

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
Escola de Engenharia

Departamento de Metalurgia

OBTENÇÃO DA CURVA DE ESCOAMENTO A QUENTE DO AÇO 22MnB5 A  
PARTIR DO MÉTODO DO EMPILHAMENTO DE CHAPAS FINAS

**André Rosiak**

Trabalho de Diplomação

Orientador: Professor Dr. – Ing. Lirio Schaeffer  
Co-orientador: Dr. Eng<sup>o</sup> Alberto Moreira Guerreiro Brito

Porto Alegre  
2018

### CIP - Catalogação na Publicação

Rosiak, André

OBTENÇÃO DA CURVA DE ESCOAMENTO A QUENTE DO AÇO 22MnB5 A PARTIR DO MÉTODO DO EMPILHAMENTO DE CHAPAS FINAS / André Rosiak. -- 2018.

53 f.

Orientador: Lirio Schaeffer.

Coorientador: Alberto Moreira Guerreiro Brito.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Curso de Engenharia Metalúrgica, Porto Alegre, BR-RS, 2018.

1. Conformação Mecânica. 2. Ensaio Mecânicos. 3. Curvas de escoamento. 4. 22MnB5. 5. Compressão de discos empilhados. I. Schaeffer, Lirio, orient. II. Brito, Alberto Moreira Guerreiro, coorient. III. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

## AGRADECIMENTOS

A Deus.

Aos meus pais, Francisca Wasielewski Rosiak e Paulo Roberto Rosiak por todo sacrifício, exemplo e amor incondicional. Os méritos desta conquista são todos seus.

A minha irmã Ana Paula Rosiak pelo cuidado, amizade e exemplo.

A Tiana Romani pelo amor, companheirismo e paciência.

Ao meu orientador, Prof<sup>o</sup>. Dr. -Ing. Lirio Schaeffer, e ao Dr. Eng<sup>o</sup> Alberto Guerreiro Moreira Brito pela grande oportunidade, auxílio e confiança.

A MSc. Eng<sup>a</sup>. Luana De Lucca de Costa pela imensurável ajuda.

Ao Bonde da Metal e a todos irmãos que fiz durante a graduação.

A todos os colegas do Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) pelo financiamento do projeto BRAGECRIM (Iniciativa Brasil-Alemanha para Pesquisa Colaborativa em Tecnologia de Manufatura).

A todos os amigos, colegas e professores que auxiliaram nestes anos de graduação.

## SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS .....	VIII
LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS .....	IX
<b>RESUMO</b> .....	<b>X</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>XI</b>
<b>1.0 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
<b>2.0 REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	<b>3</b>
2.1 Processos de Fabricação por Conformação Mecânica.....	3
2.1.1 Tensão .....	5
2.1.2 Deformação .....	7
2.1.3 Velocidade de Deformação .....	8
2.2 Curva tensão-deformação de engenharia .....	9
<b>2.3 Curva de Escoamento</b> .....	<b>10</b>
2.4 Métodos de obtenção da curva de escoamento .....	12
2.4.1 Ensaio de Tração .....	13
2.4.2 Ensaio de Compressão .....	14
2.4.3 Ensaio de compressão de discos empilhados .....	15
2.5 Fenômenos metalúrgicos na deformação a quente .....	17
2.6 Aços ao boro: 22MnB5 .....	19
<b>3.0 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>21</b>
3.1 Definição das condições de ensaio .....	23
3.1.1 Seleção dos materiais .....	23
3.1.2 Definição velocidade de deformação .....	23
3.1.3 Definição da temperatura de processo e do tempo de aquecimento .....	24
3.2 Projeto e desenvolvimento das matrizes e corpos de prova para o ensaio .....	25
3.3 Realização dos ensaios de compressão .....	27

<b>4.0 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	29
4.1 Caracterização inicial da chapa de aço boro 22MnB5.....	29
4.2 Curvas de validação experimental .....	29
4.3 Análise da temperatura .....	33
4.4 Curva de escoamento do 22MnB5.....	34
<b>5.0 CONCLUSÕES</b> .....	38
<b>6.0 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	39
<b>7.0 REFERÊNCIAS</b> .....	40

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Distribuição das tensões normais principais em um volume elementar. ....	6
Figura 2.2 Distribuição das deformações em um volume elementar. ....	8
Figura 2.3 Curva tensão-deformação convencional. ....	10
Figura 2.4 Curvas de escoamento do aço 22MnB5 para diferentes temperaturas e velocidades de deformação obtidas a partir do ensaio de tração para as temperaturas de: (a) 700°C, (b) 800°C e (c) 900°C. ....	11
Figura 2.5 Desenho esquemático de um corpo de prova: a) submetido à carga de tração, b) submetido à carga de compressão, c) submetido à carga de torção. ....	13
Figura 2.6 Desenho esquemático de um corpo de prova submetido à carga de tração ..	14
Figura 2.7 – Representação gráfica do ensaio de compressão. ....	15
Figura 2.8 – Representação gráfica do ensaio de compressão de discos empilhados. ...	17
Figura 2.9 Representação esquemática dos dois processos dinâmicos de amaciamento, associados ao trabalho a quente. ....	18
Figura 3.1 Fluxograma das etapas desenvolvidas nessa pesquisa. ....	22
Figura 3.2 Prensa Hidráulica marca EKA modelo PKL40 durante a realização dos ensaios. ....	24
Figura 3.3 Representação esquemática do ferramental utilizado na execução dos ensaios de compressão. ....	27
Figura 3.4 Desenho esquemático da sequência de operações desenvolvidas durante os ensaios. ....	28
Figura 4.2 Curvas convencionais tensão x deformação do aço AISI1045 a 850°C e velocidade de deformação média $\dot{\varphi} = 1s^{-1}$ .....	30
Figura 4.3 Curvas de escoamento do aço SAE 1045 a 850°C e velocidade de deformação média $\dot{\varphi} = 1s^{-1}$ . ....	31
Figura 4.4 Corpo de prova formado por 16 discos empilhados, a) antes da compressão b) após o ensaio a 850°C, c) após o ensaio a 650°C. ....	32
Figura 4.5 Corpo de prova formado por 16 discos empilhados, a) antes da compressão b) após o ensaio a 850°C. ....	32
Figura 4.6 Corpo de prova formado por 4 discos após o ensaio de compressão. ....	33

Figura 4.7 Curvas de escoamento do aço 22MnB5 a 650, 750 e 850°C e velocidade de deformação média $\dot{\varphi} = 1\text{s}^{-1}$ .....	34
Figura 4.8 Curvas de escoamento do aço 22MnB5 a 650°C e velocidade de deformação média $\dot{\varphi} = 1\text{s}^{-1}$ .....	35
Figura 4.9 Curvas de escoamento do aço 22MnB5 a 750°C e velocidade de deformação média $\dot{\varphi} = 1\text{s}^{-1}$ .....	35
Figura 4.10 Curvas de escoamento do aço 22MnB5 a 850°C e velocidade de deformação média $\dot{\varphi} = 1\text{s}^{-1}$ .....	36

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Classificação dos processos de conformação mecânica quanto ao tipo de esforço aplicado.....	5
Tabela 2.2 Coeficientes da Equação de Hensel e Spittel (BATALHA, 2015).....	12
Tabela 2.3 Propriedades mecânicas dos aços ao boro.....	19
Tabela 3.1 Dimensões dos corpos de prova. ....	26

## LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

$h$	Altura final	mm
$h_0$	Altura inicial	mm
$A$	Área	mm <sup>2</sup>
$A_0$	Área Inicial	mm <sup>2</sup>
$l$	Comprimento final	mm
$l_0$	Comprimento inicial	mm
$\varphi_h$	Deformação em altura	-
$\varphi_l$	Deformação em comprimento	-
$\varphi_b$	Deformação em largura	-
$F$	Força	kN
$b$	Largura final	mm
$b_0$	Largura inicial	mm
$R_m$	Resistência máxima	N/mm <sup>2</sup>
$T$	Temperatura	°C
$t$	Tempo	s
$\sigma$	Tensão	N/mm <sup>2</sup>
$k_f$	Tensão de escoamento	N/mm <sup>2</sup>
$k_{f_0}$	Tensão de escoamento inicial	N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon$	Tensão de engenharia	N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_{eq}$	Tensão equivalente	N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_x$	Tensão no eixo x	N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_y$	Tensão no eixo y	N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_z$	Tensão no eixo z	N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_1$	Tensão principal máxima	N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_3$	Tensão principal mínima	N/mm <sup>2</sup>
$\Delta l$	Variação do comprimento	mm
$V_f$	Velocidade da ferramenta	mm/s
$\dot{\varphi}$	Velocidade de deformação	s <sup>-1</sup>
BRAGECRIM	Iniciativa Brasil-Alemanha para pesquisa colaborativa em tecnologia de manufatura;	
LAFUN	Laboratório de fundição;	
LdTM	Laboratório de transformação mecânica;	
LVDT	Linear Variable Differential Transformer.	

## RESUMO

A curva de escoamento de um material é imprescindível para a determinação das condições de trabalho em processos de conformação mecânica. Ela pode ser determinada a partir de diversos ensaios mecânicos em diferentes condições de processamento que dependem das características de aplicação do material analisado. Neste trabalho, a curva obtida a partir do método de compressão convencional utilizando um corpo de prova cilíndrico maciço de aço SAE 1045 é comparada as curvas adquiridas pelo método de compressão de discos empilhados. Considerando a altura total de 20mm para os corpos de prova, foram utilizados 2, 4, 8 e 16 discos. Os ensaios são realizados em um ferramental aquecido a mesma temperatura do corpo de prova de modo a poder-se considerar o teste *quasi-isotérmico*. A temperatura de aquecimento é de 850°C. Os resultados validam o método de empilhamento de discos pelo método de compressão convencional em todas as condições estudadas. Uma vez validado o método, foram obtidas as curvas de escoamento para o aço 22MnB5 para as temperaturas de 650, 750 e 850°C a partir da compressão de 16 discos empilhados de 1,3mm de altura cada. As curvas obtidas são análogas as apresentadas pela literatura por outros métodos de ensaio.

Palavras-chave: Ensaio mecânicos; Compressão de discos empilhados; Curvas de escoamento; 22MnB5.

## **ABSTRACT**

The flow curve of a material is indispensable for determining the working conditions in metal forming processes. It can be determined from several mechanical tests under different processing conditions depending on the application of the material. In this work, the curve obtained from the conventional compression method using a solid cylindrical sample of steel SAE 1045 is compared to the curves acquired by the method of compression of stacked discs. Considering specimens 20mm height, 2, 4, 8 and 16 discs were used. The tests are performed in a tooling heated to the same temperature of the sample. So, the test can be considered quasi-isothermal. The working temperature is 850 ° C. The results validate the disc stacking method by the conventional compression method in all studied conditions. Once the method was validated, flow curves for the 22MnB5 steel were obtained for the temperatures of 650, 750 and 850 ° C from the compression of 16 stacked discs 1.3mm height each one. The curves obtained are analogous to those reported in the literature by other test methods.

**Keywords:** Mechanical tests; Method of compression of stacked discs; Flow curves; 22MnB5.

## 1.0 INTRODUÇÃO

A partir dos avanços tecnológicos na área da conformação mecânica de materiais ferrosos é possível atingir uma ampla gama de propriedades mecânicas nos componentes forjados, alcançando um grau de confiabilidade estrutural insuperável por qualquer outro processo de fabricação mecânica. Os produtos forjados apresentam elevada resistência quando submetidos a esforços mecânicos, apresentam homogeneidade microestrutural e podem facilmente ser pós-processadas por métodos automatizados (EUROFORGE, 2015).

Dessa forma, diante da crescente demanda por componentes forjados e considerando que o custo das matrizes de forjamento representa entre 17 e 35% do custo do processo e, indiretamente, pode ser superior a 70% (BRAGECRIM, 2014) é necessário concentrar-se, principalmente, na pesquisa e desenvolvimento de ferramentas que suportem os diversos mecanismos de degradação impostos pelo processo, como desgaste, fadiga mecânica e deformação plástica (HAWRYLUKA, 2017).

Isto posto, desenvolveu-se o projeto de cooperação internacional Brasil-Alemanha intitulada “*Evaluation of Sheet Metal Covers to Improve Tool Life in Forging*” pertencente ao projeto BRAGECRIM (Iniciativa Brasil-Alemanha para Pesquisa Colaborativa em Tecnologia de Manufatura), realizado através da parceria entre o Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul e o Instituto de Conformação Mecânica (IBF) da Universidade Técnica de Aachen (RWTH), Alemanha.

O projeto tem como objetivo principal o desenvolvimento de máscaras metálicas intercambiáveis, produzidas a partir de chapas de aço, para o revestimento de matrizes de forjamento a quente auxiliando na conservação dessas matrizes e evitando, assim, o seu desgaste e deformações plásticas resultantes do choque térmico e das altas tensões a que são submetidas a cada peça forjada.

Este estudo volta-se para a fabricação das máscaras pelo processo de estampagem a quente do aço 22MnB5. Destarte, o objetivo deste trabalho consiste no

levantamento da curva de escoamento do material 22MnB5 em diferentes temperaturas, 650, 750, 850°C, sendo os objetivos específicos:

- Usar o método de empilhamento de chapas para determinação das curvas de escoamento;
- Utilizar o método de ensaio *quasi*-isotérmico do “copo quente” para controlar a temperatura durante o ensaio;
- Comparar as curvas de escoamento obtidas com as apresentadas literatura;
- Utilizar um aço comum médio carbono (SAE 1045) para a validação das curvas, já que o 22MnB5 não é produzido em barras o que não permite a comparação do método de empilhamento de chapas com o usualmente utilizado (compressão a quente).

## **2.0 REVISÃO DE LITERATURA**

A curva de escoamento de um material é imprescindível para a determinação das condições de trabalho em processos de conformação mecânica, uma vez que para se quantificar as principais características do processo, é necessário conhecer satisfatoriamente este parâmetro do material. A curva de escoamento pode ser determinada a partir de diversos ensaios mecânicos em diferentes condições de processamento, dependendo das características de aplicação do material analisado. Visto que o comportamento dos materiais durante o processo de conformação se altera com a variação de diversos fatores, torna-se extremamente importante a compreensão de cada um deles.

Com a finalidade de expor os conceitos utilizados para alcançar o objetivo deste trabalho, neste capítulo são descritos os fundamentos teóricos que possibilitam compreender a importância da curva de escoamento a quente de um material e os métodos principais para sua obtenção.

### 2.1 Processos de Fabricação por Conformação Mecânica

A conformação mecânica abrange os processos industriais nos quais metais tem sua forma alterada de uma forma simples para uma mais complexa, de forma permanente, a partir da aplicação de tensões externas maiores que a tensão de escoamento e menores que a tensão de fratura do material, ocasionando, além de mudanças dimensionais e de geometria, alterações das propriedades mecânicas e estruturais (DIETER, 1981; HELMAN, 2005).

Estes processos podem ser classificados de várias formas, contudo as classificações mais usuais são referentes à temperatura do processo e ao tipo de tensão aplicada.

Quanto à temperatura os processos de conformação podem ser classificados em operações de trabalho a quente, a morno e trabalho a frio. O parâmetro que define esta

classificação é a temperatura de recristalização, sendo os processos acima desta temperatura classificados como a quente, e abaixo, a frio (FROTA JR, 2009).

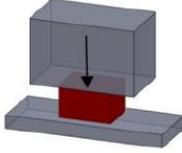
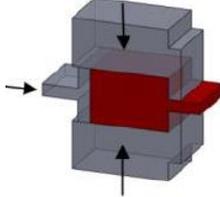
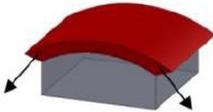
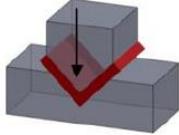
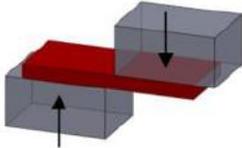
Nos processos de trabalho à frio a deformação plástica é acompanhada pelo aumento da resistência mecânica, isto é, o encruamento do material, e pela alteração sensível de outras propriedades. Além disso, destacam-se como vantagens dos processos de conformação a frio a obtenção de peças com maior precisão e melhor acabamento superficial.

Por sua vez, nos processos realizados a quente, o efeito do encruamento é eliminado pela recristalização do material e a estrutura do metal é refinada elevando sua tenacidade. Uma vantagem destes processos está associada ao fato da tensão de escoamento do material decrescer com a temperatura, de forma que assim menos energia é necessária para deformar. Entretanto, nos processos a quente, o ferramental deve apresentar boa resistência ao calor e tanto a descarbonetação quanto a oxidação do material são críticas.

Os processos de conformação também podem ser classificados de acordo com os tipos de esforços aplicados, sendo que podem aparecer mais de um tipo em um mesmo processo (CHIAVERINI, 1986). A Tabela 1 apresenta uma ilustração esquemática dos tipos de processo e suas aplicações.

Neste trabalho será abordado o processo de compressão direta por forjamento. Buscando a compreensão do processo são apresentados nos próximos tópicos os principais conceitos matemáticos característicos deste tipo de processo.

Tabela 2.1 Classificação dos processos de conformação mecânica quanto ao tipo de esforço aplicado.

Processos de compressão direta	Forjamento e laminação	
Processos de compressão indireta	Trefilação e extrusão	
Processos de tração	Estiramento de chapas e trefilação	
Processos de dobramento ou flexão	Dobramento de chapas e de barras	
Processos de cisalhamento	Torção de barras e corte de chapas	

Fonte: COSTA, 2014; CHIAVERINI, 1999 (Adaptada).

### 2.1.1 Tensão

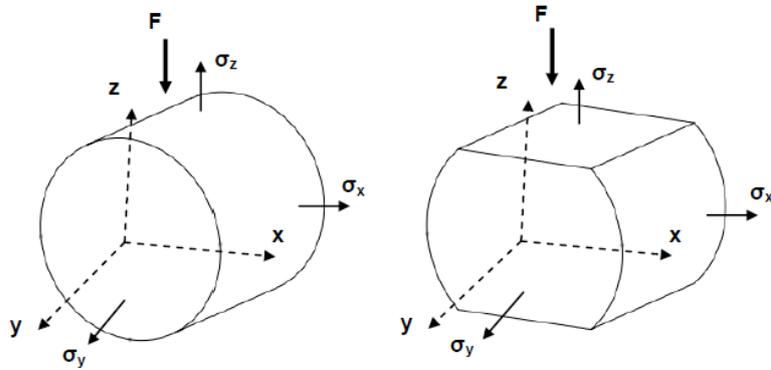
A tensão ( $\sigma$ ) pode ser definida como a razão entre a força ( $F$ ) e a área da seção ( $A$ ) onde a força está sendo aplicada, como mostra a Equação 1:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad \text{(Equação 1)}$$

Quando um corpo é submetido a uma força, surgem tensões na sua superfície e em todas as regiões internas do corpo. No ensaio de compressão abordado neste trabalho, as tensões aplicadas resultam em três tensões normais principais (Figura 1),

sendo elas a tensão na direção da largura ( $\sigma_x$ ), a tensão na direção do comprimento ( $\sigma_y$ ) e a tensão na direção da altura ( $\sigma_z$ ).

Figura 2.1 Distribuição das tensões normais principais em um volume elementar.



Fonte: SCHAEFFER, 2006.

Dependendo da combinação das tensões atuantes, um corpo pode ou não escoar. Num estado multiaxial de tensões, a deformação plástica, isto é, o escoamento do material, depende de uma combinação de todas as tensões. A tensão equivalente ( $\sigma_{eq}$ ) pode ser definida como a resultante de todas as tensões distribuídas em um determinado corpo submetido ao forjamento. Dessa forma, uma maneira de verificar se o material pode escoar é através da determinação da tensão equivalente ( $\sigma_{eq}$ ), por meio da Teoria de Escoamento de Von Mises, Equação 2:

$$\sigma_{eq} \cong \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_y - \sigma_x)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + (\sigma_z - \sigma_y)^2} \quad \text{(Equação 2)}$$

Quando a tensão equivalente ( $\sigma_{eq}$ ) atinge um determinado valor ocorre o escoamento do material. Este valor corresponde a tensão de escoamento ( $k_f$ ), que é definida como aquela tensão que num estado uniaxial de tração provoca uma deformação plástica num material. Assim, o início do escoamento dependerá de uma combinação de tensão normal e de cisalhamento, o qual não muda seu valor quando transformado de um sistema de coordenadas para outro (ALTAN, 1983; SCHAEFFER, 2004; SCHAEFFER, 2006).

Outra hipótese para verificar se o material escoar conforme a Teoria de Tresca, quando são conhecidas as tensões normais principais e a tensão de escoamento do material, sendo a tensão equivalente obtida através da Equação 3:

$$\sigma_{eq} = \sigma_1 - \sigma_3 \quad \text{(Equação 3)}$$

Segundo o critério de Tresca, semelhantemente ao de Von Mises, a deformação plástica começa quando a tensão equivalente, ou seja, a diferença entre o máximo ( $\sigma_1$ ) e o mínimo ( $\sigma_3$ ) valor das tensões principais, for igual a  $k_f$ .

### 2.1.2 Deformação

Em conformação mecânica, o estudo referente à deformação pode ser desenvolvido através de duas formas. Na mecânica convencional é comum a utilização do conceito de Deformação Relativa, a qual leva em consideração a área da secção transversal inicial nos cálculos. Contudo, nos processos de conformação mecânica, para o estudo da deformação em uma determinada região de um componente deve-se considerar a Deformação Verdadeira. Esta, por sua vez, considera a redução ou alargamento instantâneo em seus cálculos, isto é, a medida que um corpo é comprimido ou tracionado, suas dimensões são alteradas. Para o cálculo das deformações verdadeiras são utilizadas as equações:

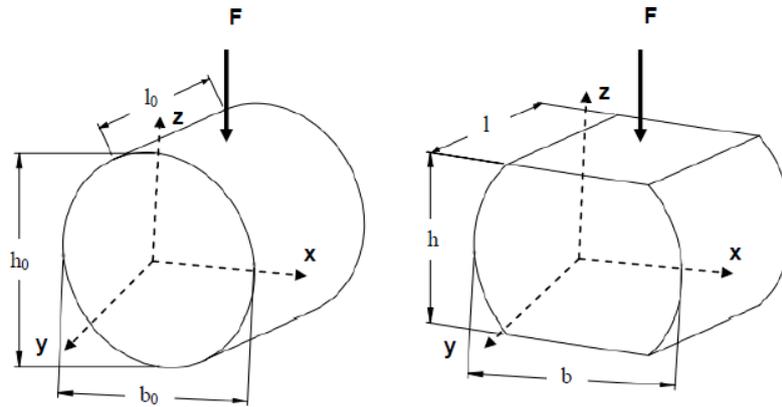
$$\text{Deformação em largura} \quad \varphi_b = \ln \frac{b}{b_0} \quad (\text{Equação 4})$$

$$\text{Deformação em comprimento} \quad \varphi_l = \ln \frac{l}{l_0} \quad (\text{Equação 5})$$

$$\text{Deformação em altura} \quad \varphi_h = \ln \frac{h}{h_0} \quad (\text{Equação 6})$$

Essas são consideradas as três deformações principais, correspondendo a um sistema de eixos cartesianos (eixo x, y e z), como mostra a Figura 2.2 para o processo de compressão.

Figura 2.2 Distribuição das deformações em um volume elementar.



Fonte: SCHAEFFER, 2006.

Conhecendo as três deformações principais no Forjamento em Matriz Aberta, é possível calcular a deformação equivalente através da Equação 7 (SCHAEFFER, 2006):

$$\varphi_{eq} = \sqrt{\frac{2}{3} \cdot (\varphi_b^2 + \varphi_l^2 + \varphi_h^2)} \quad \text{(Equação 7)}$$

Um corpo submetido a deformação plástica segue a Lei de Constância de Volume que afirma que o volume inicial do material a ser conformado é igual ao volume final deste mesmo corpo de prova. Dessa forma, quando a altura da peça é alterada, tanto o comprimento quanto a largura são modificados e o somatório das três deformações principais é igual a zero, como mostra a Equação 8:

$$\varphi_b + \varphi_l + \varphi_h = 0 \quad \text{(Equação 8)}$$

### 2.1.3 Velocidade de Deformação

A velocidade de deformação “ $\dot{\varphi}$ ”, pode ser calculada pela razão entre a velocidade da ferramenta “ $v_f$ ” e a altura instantânea “ $h$ ” como mostra a Equação 9:

$$\dot{\varphi} = \frac{v_f}{h} \quad \text{(Equação 9)}$$

A velocidade de deformação depende da direção de deformação, da própria deformação e da velocidade da ferramenta, que é a variação da altura instantânea do corpo em função do tempo. A tensão de escoamento do material apresenta uma relação direta com a velocidade de deformação, de forma que o aumento da velocidade de deformação provoca um aumento da tensão de escoamento. Porém, quanto maior a velocidade da

ferramenta, menores são as perdas térmicas do processo, e pode haver um aumento de temperatura do material decorrente da conversão da energia de deformação plástica em calor (SCHAEFFER, 2006).

## 2.2 Curva tensão-deformação de engenharia

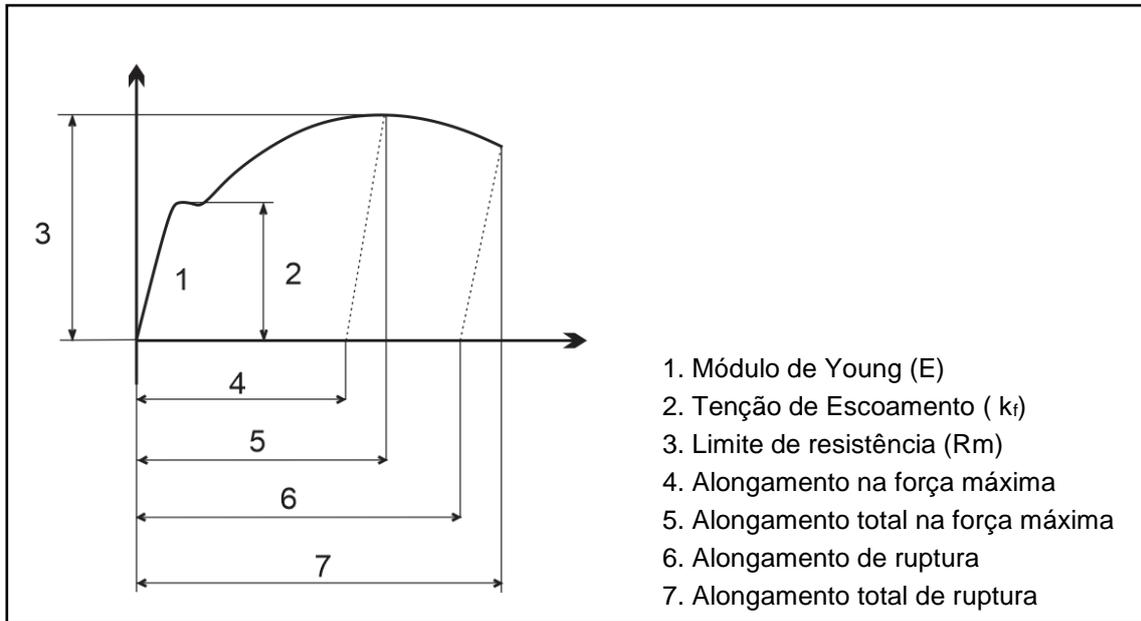
Além de compreender os parâmetros que envolvem os processos de conformação mecânica, é de suma importância conhecer o comportamento dos materiais durante a sua deformação. A curva tensão-deformação é uma descrição gráfica deste comportamento para um material que sofre carga uniaxial. Esta pode ser obtida a partir da curva força-deslocamento em função da variação do comprimento do corpo de prova, que pode ser obtida pelo ensaio de tração, por exemplo. Para tanto, basta dividir a força pela área inicial da seção transversal e o deslocamento pelo comprimento inicial da zona de referência. Naturalmente que ambas as curvas terão a mesma forma, uma vez que a primeira se obtém a partir da segunda aplicando fatores que são constantes.

Analogamente, a deformação de engenharia é a deformação linear média que se obtém dividindo a variação de comprimento da zona de referência ( $\Delta l$ ), pelo respectivo comprimento inicial ( $l_0$ ).

$$\varepsilon = \frac{l_i - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (\text{Equação 10})$$

Na curva tensão-deformação, a região de maior relevância para os processos de conformação mecânica está entre o limite de escoamento ou tensão de escoamento ( $k_f$ ), onde se inicia a deformação plástica do material e pelo limite máximo ou limite de resistência ( $R_m$ ), onde a deformação deixa de ser uniforme e passa a se concentrar na região de estricção levando o material a ruptura. A Figura 2.3. apresenta as principais informações que podem ser obtidas através da análise da curva tensão-deformação de um material.

Figura 2.3 Curva tensão-deformação convencional.



Fonte: SCHAEFFER, 2004.

### 2.3 Curva de Escoamento

A curva de escoamento de engenharia ou convencional apresenta limitações quanto a descrição do comportamento mecânico do material enquanto ele se deforma, uma vez que se refere às dimensões iniciais do corpo de prova. Visto que as dimensões do corpo de prova variam continuamente ao longo do ensaio, a curva Tensão *versus* Deformação deverá representar esta variação (XU, 2013). Dessa maneira, o conhecimento da curva de escoamento nos revela o comportamento do material, possibilitando estabelecer parâmetros importantes dos processos de conformação mecânica como força, energia e potência, além dos parâmetros como tensões, deformações e temperaturas (KNOLL, 2007).

Quando as tensões atuantes sobre um metal, em condições uniaxiais, atingem um determinado valor conhecido como tensão ou resistência ao escoamento ( $k_f$ ), tem-se o início do escoamento ou deformação plástica do material. Este valor de tensão é influenciado por diversos fatores como a deformação ( $\phi$ ), a velocidade de deformação ( $\dot{\phi}$ ) a temperatura (T) e fatores relacionados ao material, como sua composição química, microestrutura, etc. Dessa forma, a curva de escoamento descreve a tensão de escoamento

em função do material e alguns outros parâmetros, conforme a Equação 11 (SCHAEFFER, 2016):

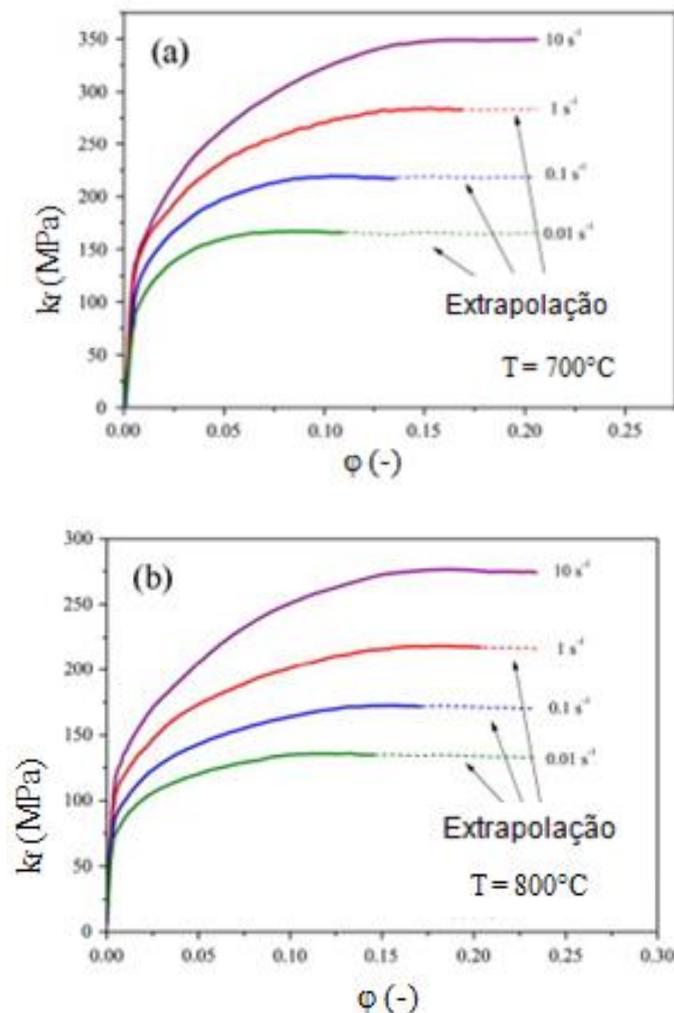
$$k_f = (\varphi, \dot{\varphi}, T, material) \quad (\text{Equação 11})$$

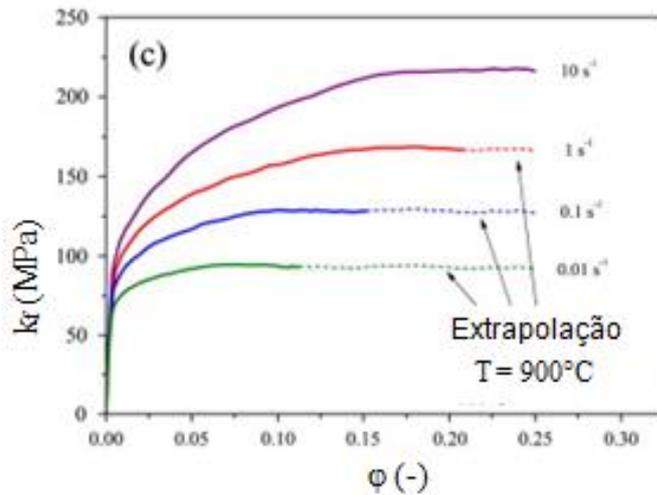
Para a deformação a frio, a tensão de escoamento ( $k_f$ ) em função da deformação verdadeira ( $\varphi$ ) pode ser representada pela Equação 12:

$$k_f = c \cdot \varphi^n \quad (\text{Equação 12})$$

Para altas temperaturas, isto é, acima da temperatura de recristalização, a tensão de escoamento ( $k_f$ ) torna-se muito mais dependente da velocidade de deformação ( $\dot{\varphi}$ ), como observa-se na Figura 2.4. Esta apresenta curvas de escoamento para deformação a quente do aço 22MnB5 (ZHOU, 2014) onde se pode verificar o efeito da velocidade de deformação.

Figura 2.4 Curvas de escoamento do aço 22MnB5 para diferentes temperaturas e velocidades de deformação obtidas a partir do ensaio de tração para as temperaturas de: (a) 700°C, (b) 800°C e (c) 900°C.





Fonte: ZHOU, 2014.

Dessa maneira, deve-se considerar a influência significativa, tanto da velocidade de deformação ( $\dot{\varphi}$ ) como da temperatura ( $T$ ) e da deformação verdadeira ( $\varphi$ ). A expressão matemática torna-se mais complexa e pode ser descrita pela equação 13:

$$k_f = A \cdot e^{m_1 \cdot T} \cdot \varphi^{m_2} \cdot \dot{\varphi}^{m_3} \cdot e^{\frac{m_4}{\varphi}} \cdot (1 + \varphi)^{m_5} \cdot e^{m_7 \cdot \varphi} \cdot \dot{\varphi}^{m_8} \cdot T^{m_9} \quad (\text{Equação 13})$$

Onde  $A$ ,  $m_1$  a  $m_9$  são constantes características do material usadas para adaptar uma expressão matemática às curvas experimentais através de regressão matemática (HENSEL-SPITTEL, 1978). As constantes para o 22MnB5 são apresentados na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 Coeficientes da Equação de Hensel e Spittel (BATALHA, 2015).

A	$m_1$	$m_2$	$m_3$	$m_4$	$m_5$	$m_7$	$m_8$	$m_9$
2033,1672	-0,0022	0,2493	-0,1068	0,0017	-0,0004	-0,0303	0,0003	0,0414

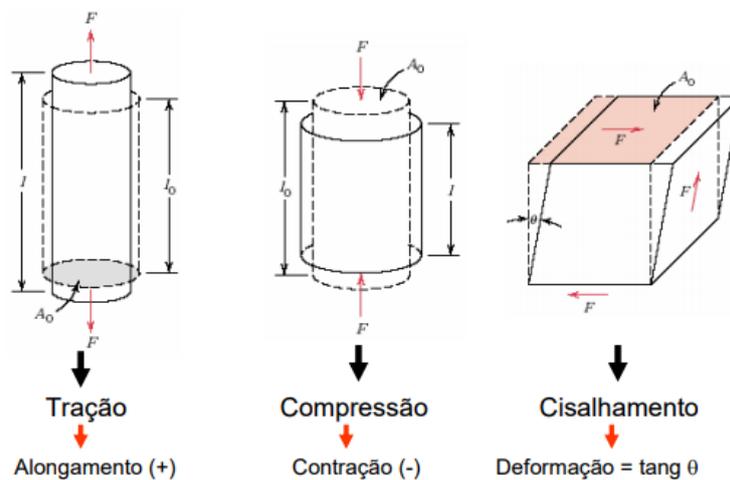
#### 2.4 Métodos de obtenção da curva de escoamento

Para a concepção e preparação de um processo de conformação mecânica é necessário conhecer um conjunto de variáveis que qualificam e caracterizam o comportamento mecânico dos materiais e seu desempenho em condições específicas (RODRIGUES, 2005). É neste contexto que surgem os ensaios mecânicos, objetivando verificar as propriedades mecânicas dos materiais, auxiliando na concepção e preparação

dos processos de fabricação através de técnicas de ensaio padronizadas. Além disso, hoje, os resultados obtidos nestes ensaios são inseridos em programas de simulação que os utilizam para seus cálculos iterativos.

Se uma carga é estática ou se ela se altera de maneira relativamente lenta com o tempo, e é aplicada uniformemente sobre uma seção reta ou superfície de um componente, o comportamento mecânico pode ser verificado mediante ensaios de tensão–deformação. Os testes mais comumente empregados são o de tração, de compressão e de torção mostrados na Figura 2.5.

Figura 2.5 Desenho esquemático de um corpo de prova: a) submetido à carga de tração, b) submetido à carga de compressão, c) submetido à carga de torção.

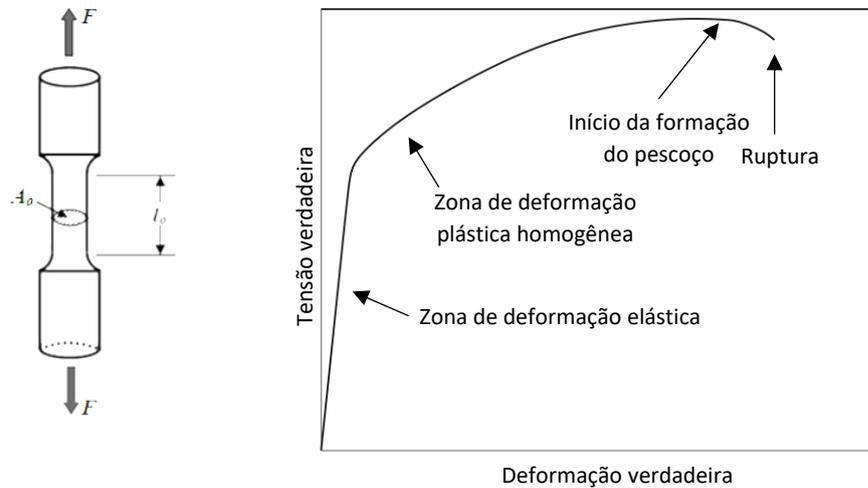


Fonte: KWIETNIEWSKI, 2013.

#### 2.4.1 Ensaio de Tração

Um dos ensaios mecânicos mais utilizados para caracterização dos materiais é o ensaio de tração. Este ensaio consiste em submeter um corpo de prova especificado a uma carga de tração continuamente crescente, com velocidade constante, até que se atinja a fratura. Durante o ensaio registra-se a variação do comprimento na zona de referência do corpo de prova (seção transversal reduzida e uniforme). O resultado é registrado na forma de um gráfico que relaciona a carga aplicada em função do alongamento.

Figura 2.6 Desenho esquemático de um corpo de prova submetido à carga de tração



Fonte: BRITO, 1998.

O ensaio de tração pode ser utilizado para avaliar diversas propriedades mecânicas dos materiais que são de extrema importância na elaboração de projetos e no controle de especificações de matéria-prima. Entre estas propriedades estão o limite de resistência à tração, limite de escoamento, módulo de elasticidade, módulo de resiliência, módulo de tenacidade, ductilidade, coeficiente de encruamento e coeficiente de resistência.

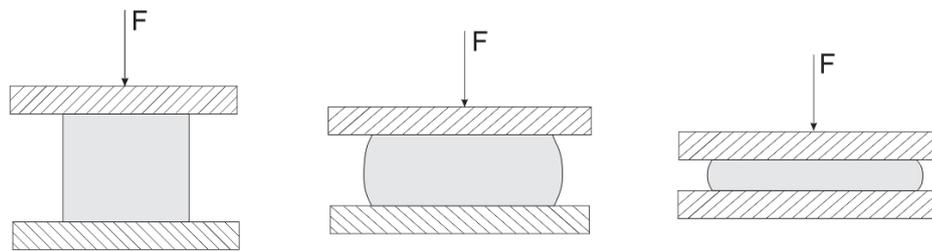
#### 2.4.2 Ensaio de Compressão

Embora o ensaio de tração uniaxial seja o mais utilizado, o mesmo apresenta limitações, sendo útil basicamente para o projeto e não para a produção de componentes por processos de conformação mecânica (ALTAN, 1983). Isso se deve à instabilidade plástica que surge no ensaio, permitindo caracterizar o comportamento do material apenas para pequenas faixas de deformação verdadeira, enquanto nos processos de deformação plástica estas deformações superam largamente estes valores, levando a necessidade de extrapolação, o que pode se mostrar insatisfatório. O ensaio de compressão torna-se uma solução diante de tais restrições, tendo como vantagem adicional o fato das tensões envolvidas nos ensaios e na maioria dos processos tecnológicos terem, na essência, a

mesma natureza, isto é, estados de tensão basicamente compressivos (RODRIGUES, 2005).

O ensaio de compressão é executado geralmente em uma máquina universal de ensaios, onde um corpo de prova cilíndrico é apoiado entre duas placas planas, uma fixa e outra móvel, como mostrado na Figura 2.7. O corpo de prova é então submetido a uma força axial compressiva uniformemente distribuída em toda sua seção transversal, sendo registrados durante o ensaio, simultaneamente, a força instantânea ( $F$ ) em função da variação no comprimento ( $l$ ).

Figura 2.7 – Representação gráfica do ensaio de compressão.



Fonte: PRÓPRIA.

Contudo, o ensaio de compressão também apresenta fenômenos indesejáveis. O atrito que se desenvolve nas interfaces corpo de prova/matriz, provoca deformação plástica não homogênea, dissipa energia impondo um aumento da força de compressão e ainda faz com que a secção transversal do corpo de prova varie ao longo da sua altura. Além disso, a relação inicial entre a altura e o diâmetro do corpo de prova,  $h_0/d_0$ , se extrapolada pode gerar instabilidade. Ambos os problemas, se não controlados, geram dificuldades na obtenção da curva tensão-deformação do material (RODRIGUES, 2005).

Assim, para os ensaios serem aplicados sem erros, as amostras cilíndricas devem ser comprimidas sem sofrer o abaulamento mostrado na Figura 2.7, ou seja, mantendo o estado uniaxial de tensões. Isso é possível através do emprego de lubrificação adequada entre o corpo de prova e as ferramentas de compressão (ALTAN, 1983).

#### 2.4.3 Ensaio de compressão de discos empilhados

O ensaio de compressão com discos empilhados foi proposto por PAWELSKI em 1967, como uma alternativa para a determinação da curva de escoamento de materiais

na forma de chapas ou placas. O ensaio baseia-se na compressão de um conjunto de placas ou discos empilhados, dispostos de forma que apresentem um alinhamento correto, gerando uma forma cilíndrica, conforme mostrado na Figura 2.8.

Este ensaio não tem recebido grande atenção da literatura, existindo poucos trabalhos que abordam esse método para caracterização mecânica. Entretanto, a busca por outras formas de determinação da curva de escoamento de chapas metálicas não é algo novo. Em 1927, SEIBEL propôs um ensaio de compressão que consistia em utilizar um punção cônico aplicado a uma amostra formada por várias camadas do mesmo material. No teste, o alinhamento central da amostra junto aos punções foi garantido pela aplicação de pinos de ajuste que representaram um erro insignificante aos resultados e a vantagem de se obter uma compressão quase homogênea de toda a amostra.

Para teste de compressão, a preparação do conjunto de chapas é uma questão central. O corte dos discos a partir da chapa metálica deve ser realizado de forma que seja capaz de manter sua integridade, sem a ocorrência de distorções. Além disso, é essencial que todos os discos fiquem concêntricos e que a orientação de laminação seja a mesma (MERKLEIN, 2006).

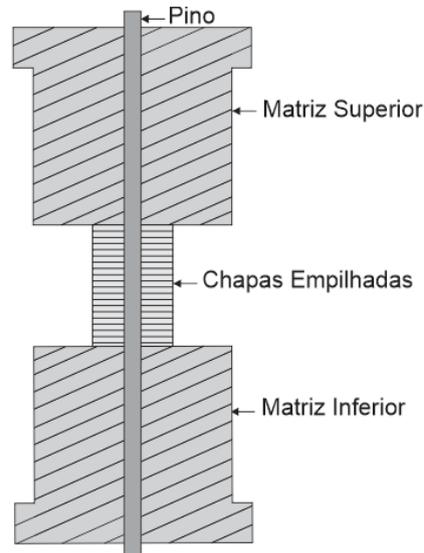
A preparação experimental deve ainda garantir aderência ao longo das interfaces de contato entre discos adjacentes para garantir condições de escoamento homogêneas. Deslizamentos entre discos adjacentes induzem escoamento não homogêneo o que desencadeia gradientes de tensão em direção a borda das chapas analisadas (RODRIGUES, 2010).

A amostra resultante, de forma cilíndrica, não deve exceder uma razão de altura e diâmetro iniciais de 1,5 para dessa forma se manter a estabilidade da pilha (MARTÍNEZ, 2017). Razões muito pequenas aumentam a sensibilidade ao atrito ao longo da interface de contato com as matrizes de compressão e podem dar origem a um acúmulo significativo de tensão que pode causar o rompimento do lubrificante e assim o escoamento não homogêneo do material (RODRIGUES, 2010).

RODRIGUES (2010) confirmaram a viabilidade técnica do teste de compressão para a determinação da curva de escoamento de materiais na forma de chapas ou placas. Seus estudos mostraram que mesmo que as condições de atrito ao longo da interface de contato entre as chapas adjacentes empilhadas venham a influenciar no perfil do corpo de prova deformado, a falta de homogeneidade do escoamento do material não influencia seu comportamento e, portanto, a sua curva escoamento. Assim, a curva de

escoamento é praticamente idêntica, quando obtida por meio do teste de compressão convencional ou por chapas empilhadas (RODRIGUES, 2010).

Figura 2.8 – Representação gráfica do ensaio de compressão de discos empilhados.



Fonte: BOFF, 2011.

Ademais o ensaio através da pilha de discos apresenta a vantagem de desenvolver uma influência menor do atrito com as matrizes compressivas, em comparação ao corpo de prova cilíndrico utilizado no ensaio convencional. Isso se deve ao fato de que em um cilindro, o efeito do atrito se propaga através da amostra, todavia em uma pilha de discos, o efeito do atrito é reduzido consideravelmente de um disco para o outro (MANJABACAS, 2017).

## 2.5 Fenômenos metalúrgicos na deformação a quente

O comportamento de um material submetido a deformação a quente é distinto daquele apresentado a frio. A altas temperaturas, tem-se um aumento da conformabilidade do material, que pode ser explicado pela maior difusão dos átomos no interior da rede cristalina. Discordâncias que estejam ancoradas à temperatura ambiente têm, a quente, maior chance de se movimentarem. Além disso, a maior difusão atômica no interior da estrutura cristalina possibilita a anulação de algumas das discordâncias existentes, diminuindo a sua respectiva densidade. Estas são as razões principais que

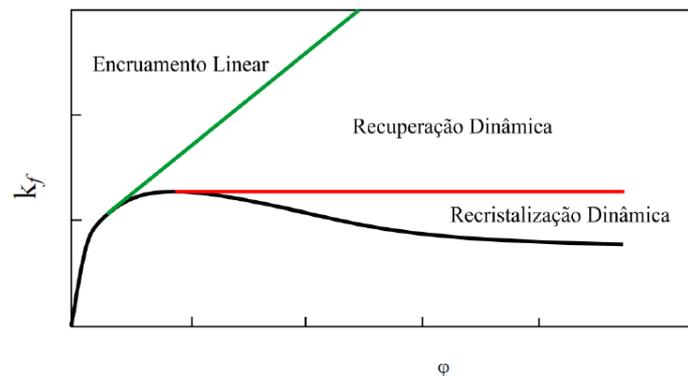
permitem explicar a menor velocidade de encruamento que os materiais experimentam quando são deformados plasticamente a quente (RODRIGUES, 2010).

Dessa forma, a curva de escoamento, bem como as propriedades finais obtidas em um material deformado a quente apresentarão algumas particularidades devido aos fenômenos metalúrgicos que ocorrem durante e após a deformação. Durante o processo de deformação ocorrem simultaneamente endurecimento e amaciamento dinâmico.

Encruamento é um dos fenômenos que contribuem para o aumento da resistência mecânica dos materiais durante a deformação plástica. Este fenômeno pode ser explicado através das interações entre os campos de deformação de discordâncias. Com a deformação, a densidade de discordâncias aumenta devido a multiplicação das discordâncias ou à formação de novas discordâncias. Consequentemente, a distâncias entre elas diminui e como na média as interações de deformação entre discordâncias são repulsivas, o movimento das mesmas é dificultado. Conforme a densidade de discordâncias se eleva, essa resistência ao seu movimento se torna mais pronunciada e a tensão necessária para a deformação do metal aumenta (CALLISTER, 2000).

Em contraponto, durante a deformação a quente o material também apresenta amaciamento dinâmico, que pode ser de dois tipos: recuperação dinâmica e recristalização dinâmica (JORGE JR, 1997). Devido à intensa vibração térmica que favorece a difusão atômica e a mobilidade e aniquilamentos das discordâncias, o encruamento e a estrutura distorcida dos grãos são rapidamente eliminadas pela formação de novos grãos livres de deformação em função dos processos de amaciamento dinâmico, que são termicamente ativados (PADILHA, 2005).

Figura 2.9 Representação esquemática dos dois processos dinâmicos de amaciamento, associados ao trabalho a quente.



Fonte: JORGE JR, 1997.

Os três mecanismos que atuam durante a deformação a quente podem ser observados na Figura 2.9. A linha verde indica um encruamento linear e ausência de qualquer mecanismo de amaciamento dinâmico. Este comportamento ocorre habitualmente a frio, para casos em que as velocidades de deformação são suficientemente elevadas para o fenômeno de amaciamento não consiga compensar o aumento de resistência mecânica gerado pelo encruamento (RODRIGUES, 2010). A linha vermelha representa o comportamento da curva de escoamento de um material experimentando recuperação durante a deformação (recuperação dinâmica). A curva preta representa o comportamento da curva de escoamento de um material experimentando recristalização durante a deformação (recristalização dinâmica).

## 2.6 Aços ao boro: 22MnB5

A escolha do aço 22MnB5 para realização deste trabalho é consequência das características apresentadas pelos aços baixo carbono ao boro quando estampados a quente. Esta classe de aços, tais como, 22MnB5, 27MnCrB5, e 37MnB4, constituem a única classe de aços capazes de formar uma microestrutura totalmente martensítica durante ou após a estampagem a quente quando uma ferramenta refrigerada é utilizada (KARBASIAN, 2010), sendo o aço 22MnB5 o mais utilizado nos processos de estampagem atualmente (LI, 2016). As propriedades mecânicas dos aços ao boro são apresentadas na Tabela 2.3.

Tabela 2. 3 Propriedades mecânicas dos aços ao boro.

Aço	Temperatura inicial de formação da martensita em °C	Taxa resfriamento crítica em °C/s	Tensão de Escoamento MPa		Tensão Máxima MPa	
			Inicial	Estampada a quente	Inicial	Estampada a quente
20MnB5	450	30	505	967	637	1354
22MnB5	410	27	457	1010	608	1478
8MnCrB3	-*	-*	447	751	520	882
27MnCrB5	400	20	478	1097	638	1611
37MnB4	350	14	580	1378	810	2040

\* Não é possível formar apenas martensita.

Fonte: KARBASIAN, 2010.

O material apresenta uma microestrutura inicial composta por ferrita ( $\alpha$ ) e cementita ( $\theta$  ou Fe<sub>3</sub>C), com uma resistência à tração em torno de 600 MPa. Após o processo de estampagem a quente, a peça final pode apresentar uma microestrutura totalmente martensítica com uma resistência mecânica com cerca de 1500 MPa.

Nos aços utilizados na estampagem a quente elementos de liga que permitem aumentar a temperabilidade do aço, capacidade do aço formar martensita, são adicionados, sendo eles: o manganês (Mn), o cromo (Cr) e o boro (B).

O Mn é adicionado a liga com o objetivo de suprimir a transformação da austenita em ferrita através da redução da força motriz para a transformação, atrasando a cinética de transformação de fase. Além disso, também promove o aumento da dureza da martensita devido o aumento do tempo de incubação para a transformação da bainita. O Cr tem um efeito notável em atrasar a transformação da ferrita e da perlita restringindo a transformação bainítica, deslocando-a rumo a menores temperaturas no diagrama CCT (COSTA, 2014).

A adição do boro tem como principal objetivo inibir a formação de ferrita durante a etapa de transferência do blanque do forno de austenitização para a prensa. A nucleação da ferrita é localizada no contorno de grão da austenita e o crescimento ocorre no interior do grão austenítico através do movimento de fronteira. Nos aços com elevado teor de boro (0,002 a 0,005%), o boro segrega no contorno de grão da austenita. A segregação do boro retarda a nucleação da ferrita e mantém o aço austenítico durante a transferência do blanque do forno de austenitização até a prensa.

O boro permite deslocar o domínio ferrítico em direção às baixas velocidades de resfriamento e assegurar uma adequada temperabilidade. Ainda, o efeito do boro é de tal modo relevante que o teor dos elementos de liga restantes pode ser aproximadamente reduzido à metade sem que as curvas de transformação sofram alterações apreciáveis quanto à sua posição para os aços de baixo teor em carbono (SOUZA, 2013).

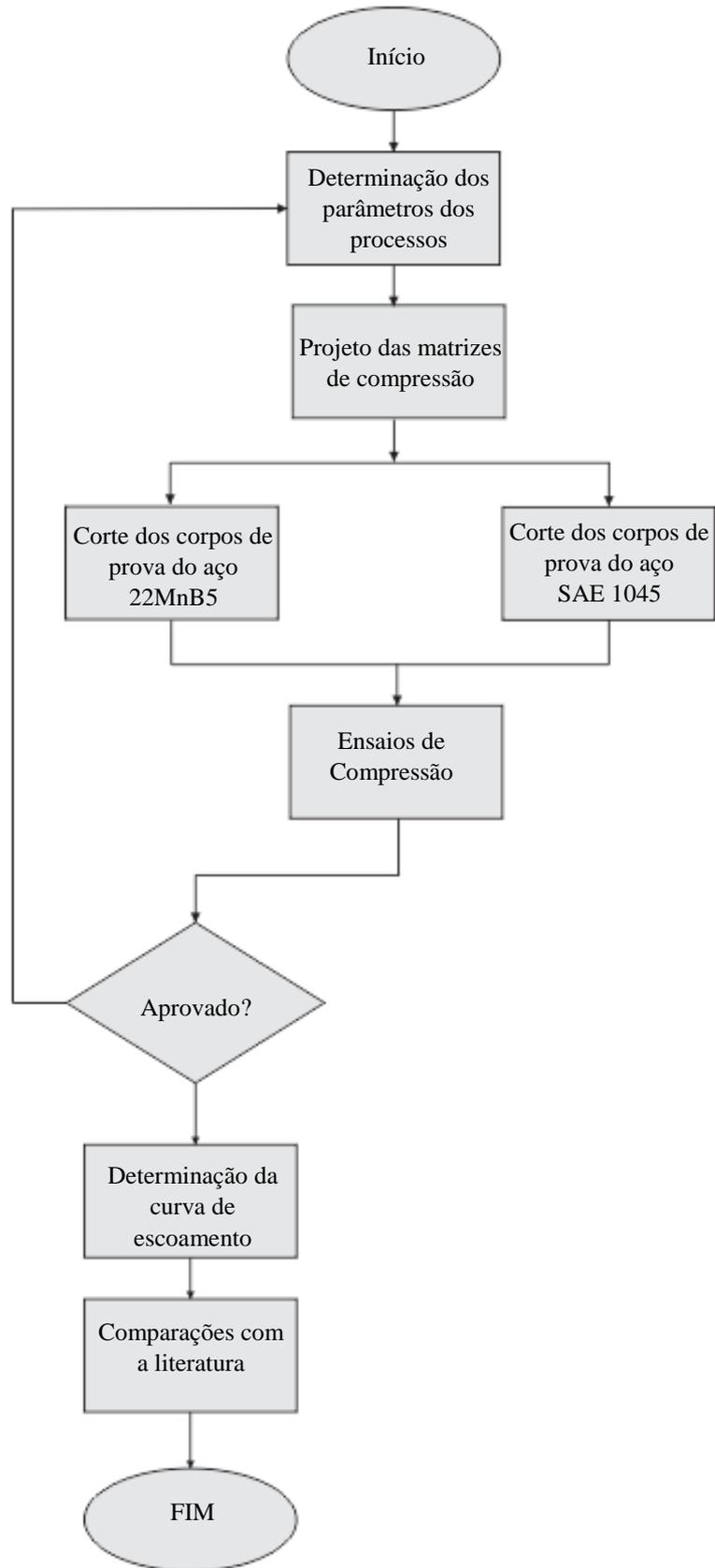
### 3.0 MATERIAIS E MÉTODOS

Inserido no objetivo do projeto BRAGECRIM, essa pesquisa volta-se a analisar a viabilidade da utilização do processo de estampagem a quente do aço 22MnB5 para fabricação de máscaras metálicas, sendo que, o projeto prevê potencial para confecção das máscaras metálicas, “*die mask*”, nos aços: (i) aço carbono (DC04), (ii) dupla fase (DP600), (iii) aço HSLA e (iv) um aço para estampagem a quente (22MnB5). Assim, para alcançar os objetivos específicos propostos são seguidas as etapas apresentadas no fluxograma mostrado na Figura 3.1.

Buscando a melhor forma de descrever as etapas deste trabalho, este e os próximos capítulos são divididos em:

- (i) definição das condições de ensaio;
- (ii) projeto e desenvolvimento das matrizes e corpos de prova para o ensaio;
- (iii) realização dos ensaios de compressão.

Figura 3.1 Fluxograma das etapas desenvolvidas nessa pesquisa.



Fonte: PRÓPRIA.

### 3.1 Definição das condições de ensaio

#### 3.1.1 Seleção dos materiais

A seleção do aço 22MnB5 como material a ser analisado neste trabalho partiu de resultados prévios obtidos no projeto BRAGECRIM que indicam que este apresenta as melhores propriedades mecânicas e metalúrgicas para a aplicação designada pelo projeto.

A análise química do percentual em massa dos elementos foi realizada em um espectrômetro de emissão ótica Q2ION, marca BRUKER, disponível no Laboratório de Fundação (LAFUN) nesta universidade.

Ainda, optou-se por utilizar um aço comum baixo carbono, SAE 1045, uma vez que o 22MnB5 não é produzido em barras o que não permite a comparação do método de empilhamento de chapas com o usualmente utilizado (compressão a quente).

O material das matrizes de forjamento foi selecionado com base nas características metalúrgicas do material e do processo de forjamento a quente, sendo um aço ferramenta para trabalho a quente H13 na condição revenida.

#### 3.1.2 Definição velocidade de deformação

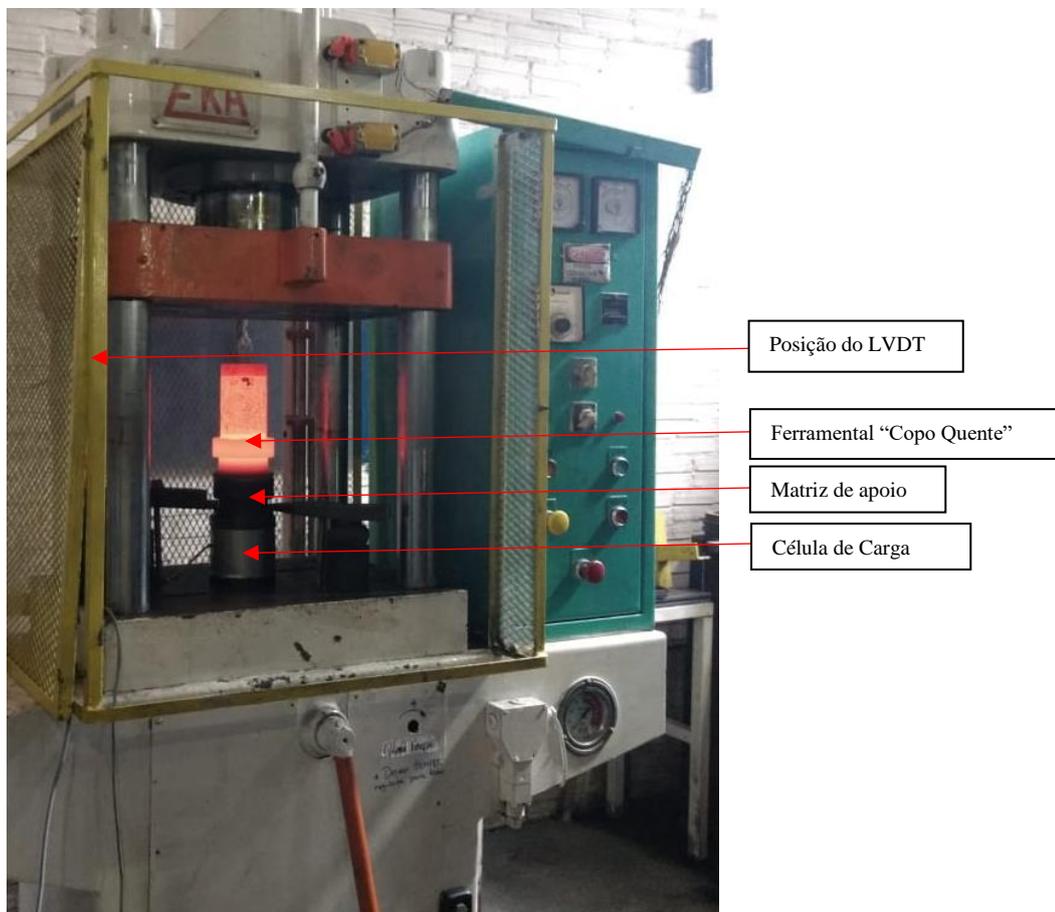
A velocidade de deformação média utilizada nos ensaios foi de aproximadamente  $1s^{-1}$ . Este valor foi definido a partir da média dos resultados obtidos por meio da Equação 9 para a altura inicial do corpo de prova e a altura final após o ensaio. Optou-se por utilizar a velocidade de deformação média desenvolvida no processo devido ao fato da prensa utilizada nos ensaios se tratar de uma prensa hidráulica. Esta apresenta velocidade de prensagem constante o que tornou impossível manter a taxa de deformação constante durante os ensaios. Este valor de velocidade de deformação média possibilita a comparação das curvas de escoamento obtidas com a literatura

A prensa utilizada para os ensaios é uma Prensa hidráulica de simples efeito marca EKA modelo PKL40, com capacidade de 400 kN e velocidade de prensagem igual a 15 mm/s e é apresentada na Figura 3.2.

Os dados de força durante o experimento foram medidos com a utilização de uma célula de carga com capacidade para 400 kN.

Já os dados de deslocamento da mesa superior foram obtidos utilizando um sensor de deslocamento do tipo LVDT. Os dados foram registrados em um sistema de aquisição de dados marca HBM, modelo Spider 8, ligado a um computador com o software Catman 4.0. O Catman 4.0 permite controlar a gravação e o pós processamento dos dados adquiridos. O posicionamento dos equipamentos é mostrado na Figura 3.2.

Figura 3.2 Prensa Hidráulica marca EKA modelo PKL40 durante a realização dos ensaios.



Fonte: PRÓPRIA.

### 3.1.3 Definição da temperatura de processo e do tempo de aquecimento

As temperaturas de ensaio são definidas considerando a faixa de temperatura a ser utilizada nas próximas etapas do projeto BRAGECRIM, ou seja, as temperaturas de aquecimento utilizadas no processo de estampagem para a produção das máscaras

metálicas intercambiáveis. Os ensaios foram realizados a 650, 750 e 850°C que são as temperaturas de trabalho do aço 22MnB5 conforme descrito na literatura por KARBASIAN (2010).

O tempo de aquecimento, isto é, o intervalo de tempo necessário para a completa homogeneização da temperatura de ensaio na estrutura formada pelas ferramentas e corpos de prova foi de 1h e foi definido através da utilização de um termopar tipo K de 1,5mm de diâmetro posicionado na parte interna da ferramenta.

### 3.2 Projeto e desenvolvimento das matrizes e corpos de prova para o ensaio

O ensaio de compressão de discos empilhados é um ensaio pouco difundido e não normalizado. Desta forma, as dimensões da amostra cilíndrica resultante do empilhamento das chapas foram definidas de forma a garantir condições de escoamento homogêneas durante o ensaio. Para tanto, 2 conceitos importantes encontrados na literatura foram levados em consideração:

1) O corpo de prova não deve exceder uma razão de altura e diâmetro iniciais de 1,5 para que dessa forma seja mantida a estabilidade da pilha de discos durante o ensaio;

2) Esta razão não deve muito pequena, uma vez que assim a sensibilidade ao atrito com as matrizes de compressão seria significativamente aumentada, podendo dar origem a um acúmulo significativo de tensão que pode causar a quebra do lubrificante e assim o escoamento não homogêneo do material.

Buscando um balanço ótimo entre a altura e o diâmetro do corpo de prova final a ser comprimido e acompanhando os valores utilizados na literatura, definiu-se a relação  $h_0/d_0$  igual a 1. Os corpos de prova de 22MnB5 foram obtidos a partir de uma chapa metálica de 45x45mm e espessura de 1,3mm. Visto que tanto a tolerância dimensional, quanto o acabamento superficial dos discos que compõem os corpos de prova são de extrema importância, todos os discos foram usinados. O diâmetro externo de todos corpos de prova é de 20mm, enquanto o interno é 5mm, as demais dimensões são demonstradas na Tabela 3.1.

Os corpos de prova de aço SAE 1045 tiveram sua altura variada para possibilitar a avaliação da influência do número de discos nos resultados e assim realizar a validação do método de empilhamento de discos.

Tabela 3.1 Dimensões dos corpos de prova.

Amostra	Material	Nº de chapas e discos	Espessura dos discos (mm)	Altura total (mm)	Relação $h_0/d_0$
1	SAE 1045	16	1,25	20	1
2	SAE 1045	8	2,5	20	1
3	SAE 1045	4	5	20	1
4	SAE 1045	2	10	20	1
5	SAE 1045	Corpo de prova cilíndrico	20	20	1
6	22MnB5	16	1,3	20,8	1,04
7	22MnB5	16	1,3	20,8	1,04
8	22MnB5	16	1,3	20,8	1,04

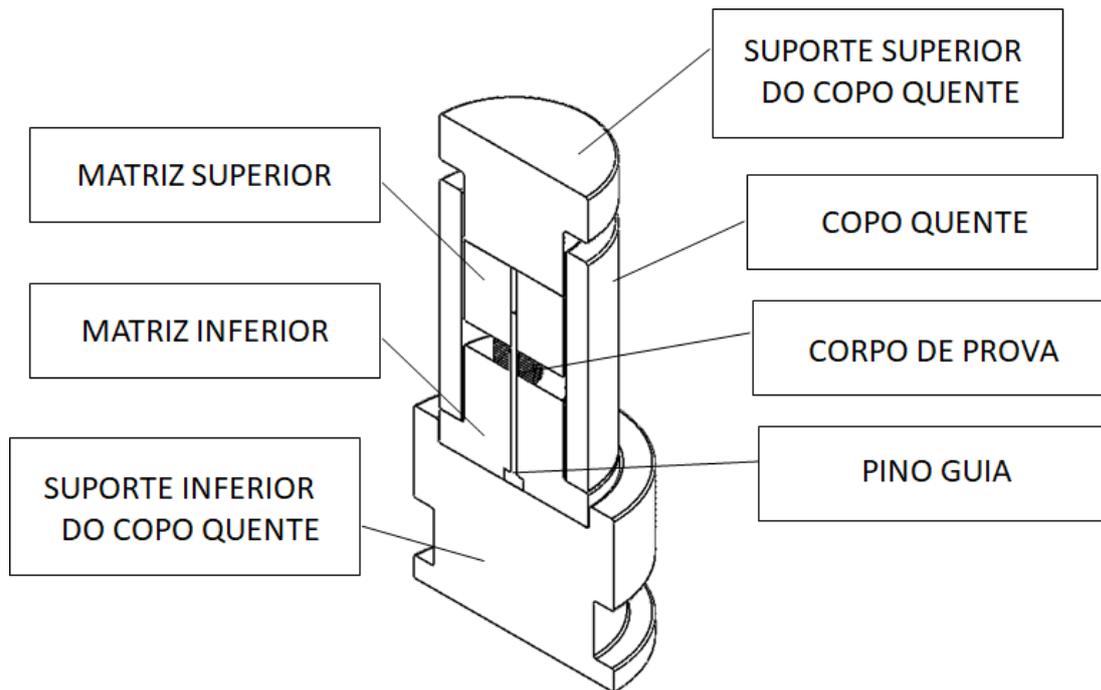
Fonte: PRÓPRIA.

A temperatura durante o ensaio é mantida aproximadamente constante visto que a ferramenta, denominada “copo quente” são aquecidas juntamente com o corpo de prova. O “copo quente”, nada mais é do que uma estrutura cilíndrica, produzida no aço ferramenta para trabalho a quente H13. O emprego do método de ensaio *quasi-isotérmico* do “copo quente” está associado a impossibilidade da utilização de uma máquina de ensaios universal que possibilitasse ensaios a altas temperaturas.

Assim, durante o aquecimento o corpo de prova é posicionado no interior do “copo quente” juntamente com as matrizes de compressão, superior e inferior, que fecham as aberturas do cilindro, reduzindo a perda de calor para o exterior após a retirada da estrutura do forno de aquecimento.

Diante disso, foi necessário desenvolver um projeto de matrizes planas capazes de serem posicionadas no interior desta estrutura. Levando em consideração o deslocamento da prensa durante os ensaios e as dimensões do “copo quente”, projetou-se o ferramental que pode ser observado na Figura 3.3

Figura 3.3 Representação esquemática do ferramental utilizado na execução dos ensaios de compressão.



8

Fonte: PRÓPRIA.

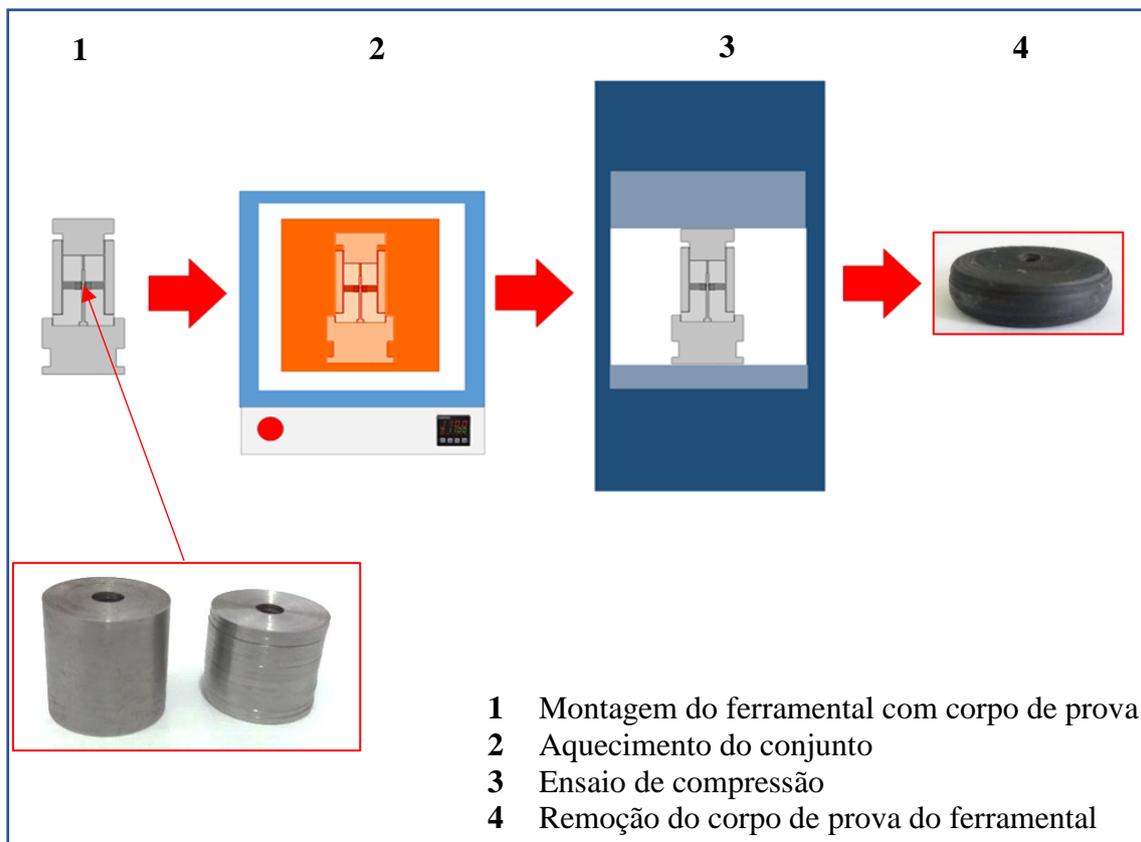
Nos ensaios, o alinhamento central das chapas empilhadas foi garantido pela aplicação de um pino central instalado na matriz inferior. Como discutido anteriormente, a utilização deste pino é insignificante aos resultados e possibilita a vantagem de se obter uma compressão mais homogênea de toda a amostra.

### 3.3 Realização dos ensaios de compressão

Os ensaios experimentais são ilustrados na Figura 3.4 e ocorreram da seguinte forma: (1) montagem do ferramental (ferramental+corpo de prova); (2) aquecimento do conjunto; (3) ensaio de compressão; (4) remoção do corpo de prova do ferramental e resfriamento ao ar.

A compressão ocorreu até a redução de 50% (10mm) em altura dos corpos de prova para todas as geometrias estudadas. A lubrificação foi realizada apenas entre as matrizes e a superfície dos corpos de prova externos, sendo que, não houve lubrificação entre os discos. O lubrificante utilizado foi uma suspensão de grafite, Lubrodal AT 737 F, marca Fuchs.

Figura 3.4 Desenho esquemático da sequência de operações desenvolvidas durante os ensaios.



Fonte: PRÓPRIA.

## 4.0 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão evidenciados os resultados obtidos nos ensaios de compressão com discos e chapas empilhadas. As curvas de escoamento obtidas para o SAE 1045 serão comparadas entre si para análise do efeito gerado pelo número de chapas ou discos, enquanto os resultados alcançados para o aço 22MnB5 serão comparados a literatura para sua validação. Além disso, será discutida a viabilidade da utilização do copo quente para a realização de ensaios a quente.

### 4.1 Caracterização inicial da chapa de aço boro 22MnB5

Para a caracterização do material na condição recebida foi realizada a análise química do percentual em massa dos elementos e os resultados apresentados na Tabela 4.1 para o aço boro 22MnB5 e estão dentro da margem especificada na literatura por KARBASIAN (2010).

Tabela 4.1 Resultado da análise química (% em massa).

Análise química (% em massa)							
C	Si	Mn	P	S	Al	Cu	Nb
0,23	0,21	1,24	0,021	0,002	0,037	0,01	0,002
V	Ti	Cr	Ni	Mo	Sn	B	Ca
0,004	0,046	0,19	0,02	0,00	0,001	0,0039	0,0013

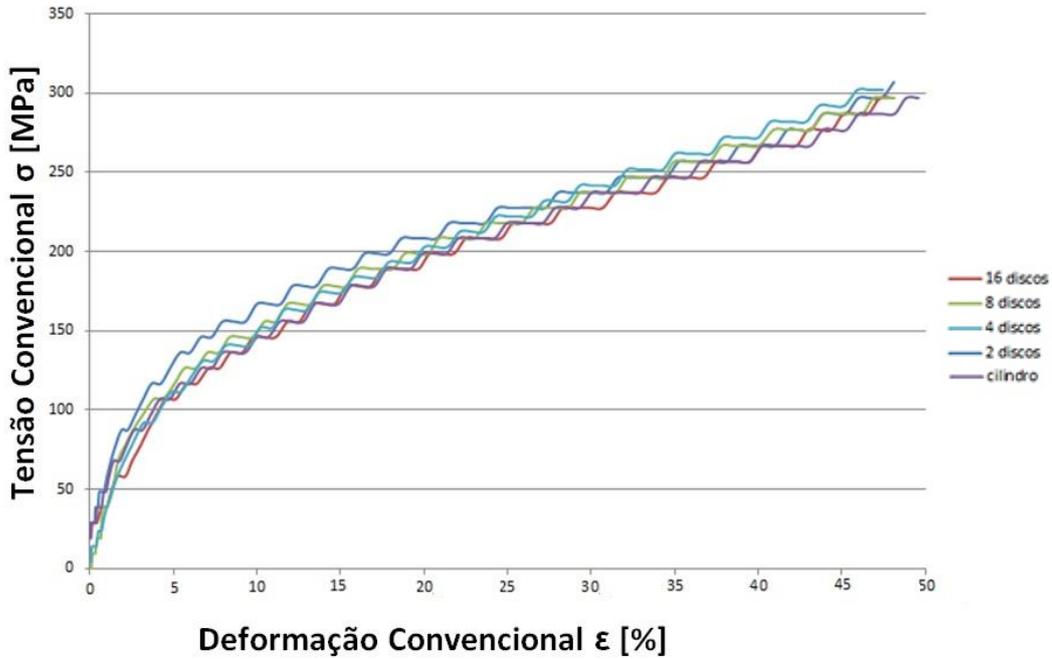
Fonte: PRÓPRIA.

### 4.2 Curvas de validação experimental

Inicialmente, foram realizados ensaios com o aço SAE 1045 para a determinação da influência do número de discos empilhadas nos resultados do ensaio de compressão. A Figura 4.1 mostra as curvas convencionais tensão *versus* deformação obtidas para os casos de corpos de prova contendo 2, 4, 8 e 16 discos empilhados, bem como o resultado obtido para o ensaio com um corpo de prova cilíndrico. Os ensaios

foram realizados a 850°C e a velocidade de deformação média imposta durante o ensaio foi  $\dot{\phi} = 1 \text{ s}^{-1}$ .

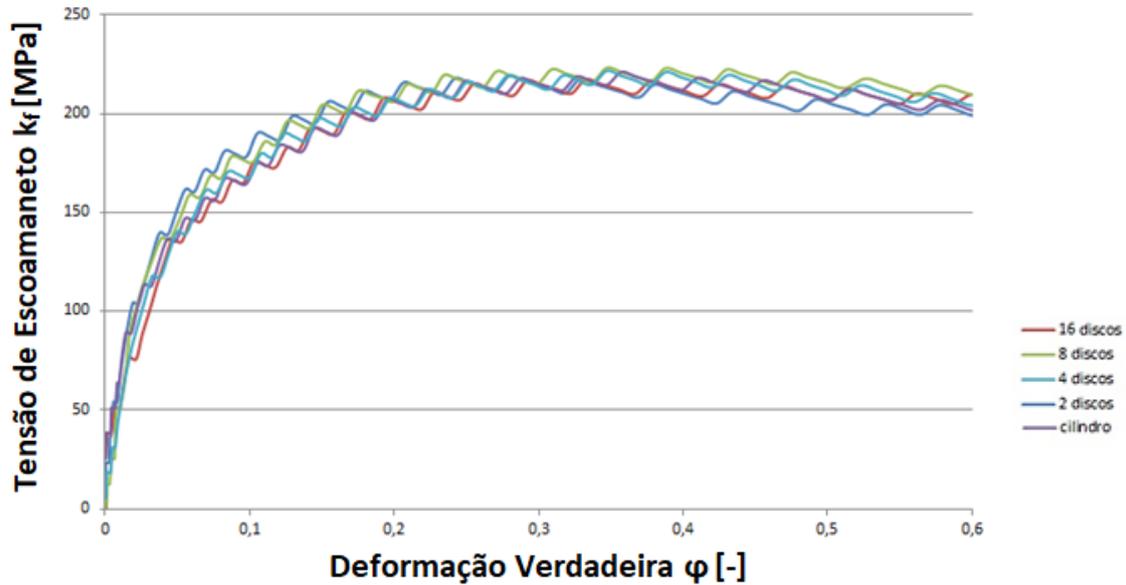
Figura 4.1 Curvas convencionais tensão x deformação do aço AISI1045 a 850°C e velocidade de deformação média  $\dot{\phi} = 1 \text{ s}^{-1}$ .



Através da análise das curvas convencionais é possível constatar que, tomando como padrão os resultados obtidos para o corpo de prova cilíndrico, a utilização de diferentes números de discos empilhados tem uma influência pequena. A curva obtida para 2 discos empilhados foi a que apresentou a maior discrepância quando comparada aos resultados para o corpo de prova cilíndrico, com uma diferença entre as curvas que alcançou até 26% para pequenas deformações, ou seja, inferiores a 10%.

A partir dos resultados de força e deslocamento foi possível elaborar as curvas de escoamento verdadeiras mostradas na Figura 4.2 e analisar a influência do número de discos empilhadas nos resultados. Os resultados mostraram que o escoamento de material é independente do número de discos empilhados, pelo menos para um empilhamento de 16 discos.

Figura 4.2 Curvas de escoamento do aço SAE1045 a 850°C e velocidade de deformação média  $\dot{\phi} = 1s^{-1}$ .

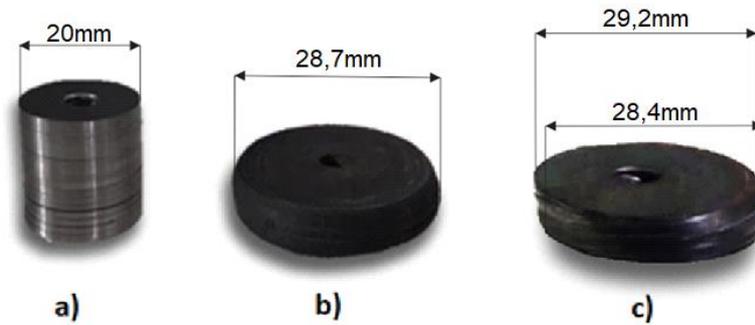


Como pode ser observado na Figura 4.2, o comportamento das curvas com discos empilhados é praticamente idêntico ao obtido com o teste de compressão realizado em corpo de prova cilíndrico. As diferenças entre as curvas são inferiores a 10% e podem ser atribuídas ao acomodamento dos discos durante o processo e ao fato de não trabalhar com uma velocidade de deformação constante durante os ensaios. Isso evidencia que para o ensaio de compressão de discos empilhados realizado a quente o número de discos ou chapas empilhadas não influencia significativamente as curvas obtidas podendo, assim, ser implementado para chapas de diferentes espessuras, pelo menos até o limite de 16 chapas.

A ocorrência de deslizamento entre discos é muito menos crítica no ensaio realizado a quente do que quando a compressão é realizada a temperatura ambiente, como apresentada na literatura em ALVES (2011). Quando realizado a frio, este ensaio apresenta como grande desafio a permanência da geometria cilíndrica do corpo de prova durante a compressão devido ao deslizamento dos discos. Quando realizado a quente, todavia, durante o aquecimento e principalmente durante a conformação, a tendência é o material criar uniões entre as interfaces adjacentes entre os discos o que gera uma maior estabilidade geométrica durante o ensaio. Uma vez que este efeito depende diretamente da temperatura, ao reduzirmos a temperatura de ensaio de 850°C para 750°C foi possível notar uma redução na união formada entre as chapas, para os ensaios realizados a 650°C a redução foi ainda mais evidente. A Figura 4.3 mostra o corpo de prova antes e depois

do ensaio a 850°C, sem a ocorrência de nenhum deslizamento significativo entre chapas adjacentes e um corpo de prova após o ensaio a 650°C, neste caso com o deslizamento das chapas.

Figura 4.3 Corpo de prova formado por 16 chapas empilhadas, a) antes da compressão b) após o ensaio a 850°C, c) após o ensaio a 650°C.



Ainda que a tendência ao deslizamento das chapas durante o ensaio a quente seja reduzida, qualquer agitação ou movimento indevido durante o transporte dos corpos de prova enquanto ainda estiverem a temperatura ambiente pode acarretar o escorregamento dos discos. Isso ocorreu em um dos ensaios, gerando, após a compressão, a geometria irregular mostrada pela Figura 4.4. Apesar da geometria assimétrica produzida, os resultados foram coerentes, demonstrando que mesmo que ocorra algum deslizamento durante o ensaio isso não afeta significativamente a curva de escoamento.

Figura 4.4 Corpo de prova formado por 16 chapas empilhadas, a) antes da compressão b) após o ensaio a 850°C.



MARTÍNEZ (2017) demonstrou que o ensaio de discos empilhados possui a vantagem de diminuir a influência do atrito entre os corpos de prova e as matrizes compressivas, em comparação ao corpo de prova cilíndrico utilizado no ensaio convencional. Isso se deve ao fato de que em um cilindro, o efeito do atrito se propaga através da amostra. Todavia, em uma pilha de discos, o atrito é reduzido consideravelmente de um disco para o outro. Entretanto, buscando beneficiar-se da união entre as chapas que é gerada no processo a quente, durante os ensaios optou-se por não utilizar lubrificante entre os discos, apenas entre as interfaces formadas por matrizes e

discos. Mesmo sem a lubrificação entre chapas, os ensaios realizados com empilhamento de discos, apresentaram menor efeito de “barril” do que o ensaio realizado com corpo de prova cilíndrico.

Analisando os corpos de prova após a compressão, é possível notar que os discos centrais se deformaram menos em espessura do que aqueles em contato com a matriz. Este efeito foi mais evidente nos casos de 4 e 8 discos, como é possível observar na Figura 4.5. Entretanto, isso não impactou os resultados finais, visto que o comportamento das curvas não apresentou variação significativa quando comparado ao realizado com corpo de prova cilíndrico.

Figura 4.5 Corpo de prova formado por 4 discos de aço SAE 1045 após o ensaio de compressão.



### 4.3 Análise da temperatura

Um dos objetivos deste trabalho era a utilização do método de ensaio *quasi-isotérmico* do “copo quente” para controle da temperatura durante o ensaio. Os corpos de prova foram aquecidos até a temperatura de ensaio, juntamente com as matrizes de compressão dentro de um recipiente de proteção contra a perda de calor para o ambiente, o copo quente.

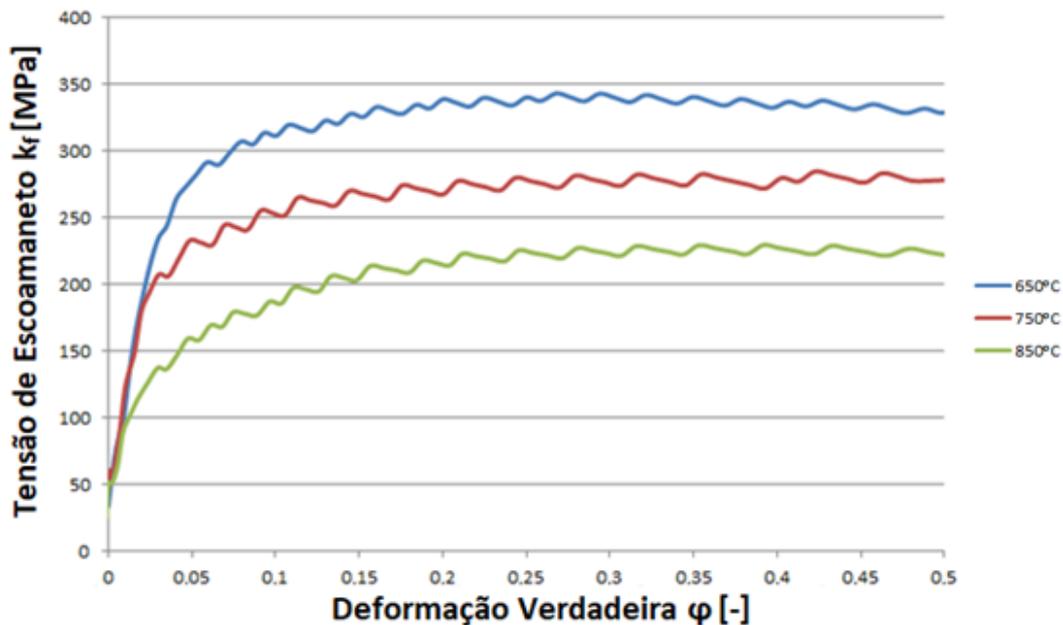
Como o copo quente tem a função de não permitir a dissipação de calor para o ambiente e uma vez que a energia de deformação plástica durante a compressão é quase completamente convertida em calor, só foi constatada queda de temperatura após 8 segundos após a retirada do conjunto do forno. Como a duração de todo o processo de compressão, incluindo o tempo de manuseio, é de aproximadamente 6 segundos, o copo quente se mostrou eficaz para aplicação neste ensaio.

#### 4.4 Curva de escoamento do 22MnB5

Considerando o objetivo principal deste estudo, após a validação do método dos discos empilhados explanada anteriormente, foram realizados os ensaios para a obtenção das curvas de escoamento do aço 22MnB5 em diferentes temperaturas.

As curvas de escoamento verdadeiras do material obtidas pelo ensaio de compressão de chapas finas a 650, 750 e 850°C podem ser observadas na Figura 4.7. Analisando os resultados das três temperaturas é possível notar que o comportamento das curvas é coerente, assim, as tensões necessárias para alcançar um mesmo grau de deformação decrescem com o aumento da temperatura de ensaio.

Figura 4. 6 Curvas de escoamento do aço 22MnB5 a 650, 750 e 850°C e velocidade de deformação média  $\dot{\varphi} = 1 \text{ s}^{-1}$ .



Para validação dos resultados alcançados através do ensaio de compressão de chapas empilhadas, as curvas obtidas por este método, foram comparadas com curvas presentes na literatura. As Figuras 4.7, 4.8 e 4.9 apresentam estes resultados, onde as curvas azuis correspondem as curvas obtidas neste trabalho, enquanto as de cor preta correspondem a resultados de ensaios de tração obtidos por ROHITHUPPALURI (2016) e as curvas vermelhas, presentes nas temperaturas de 650 e 850°C, foram modeladas matematicamente por HOCHHOLDINGER (2009) a partir das fórmulas matemáticas por ele desenvolvidas.

Figura 4.7 Curvas de escoamento do aço 22MnB5 a 650°C e velocidade de deformação média  $\dot{\varphi} = 1\text{s}^{-1}$ .

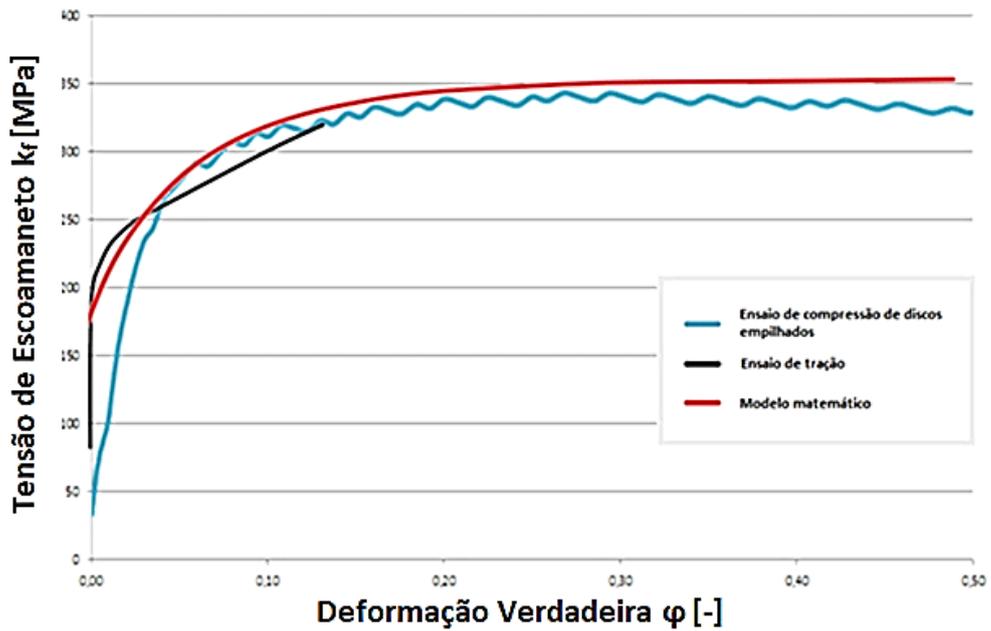


Figura 4.8 Curvas de escoamento do aço 22MnB5 a 750°C e velocidade de deformação média  $\dot{\varphi} = 1\text{s}^{-1}$ .

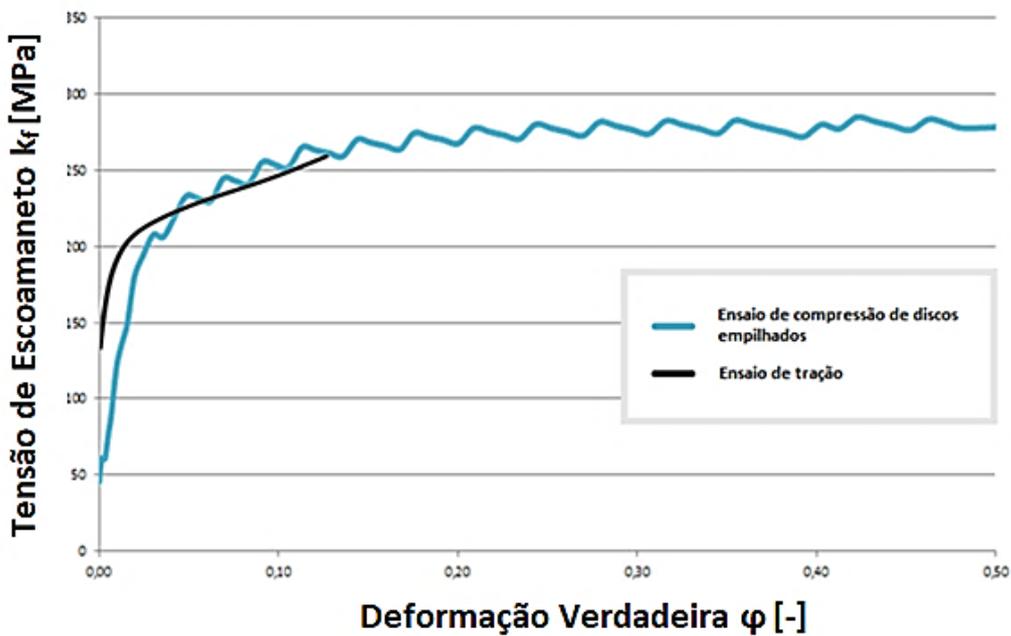
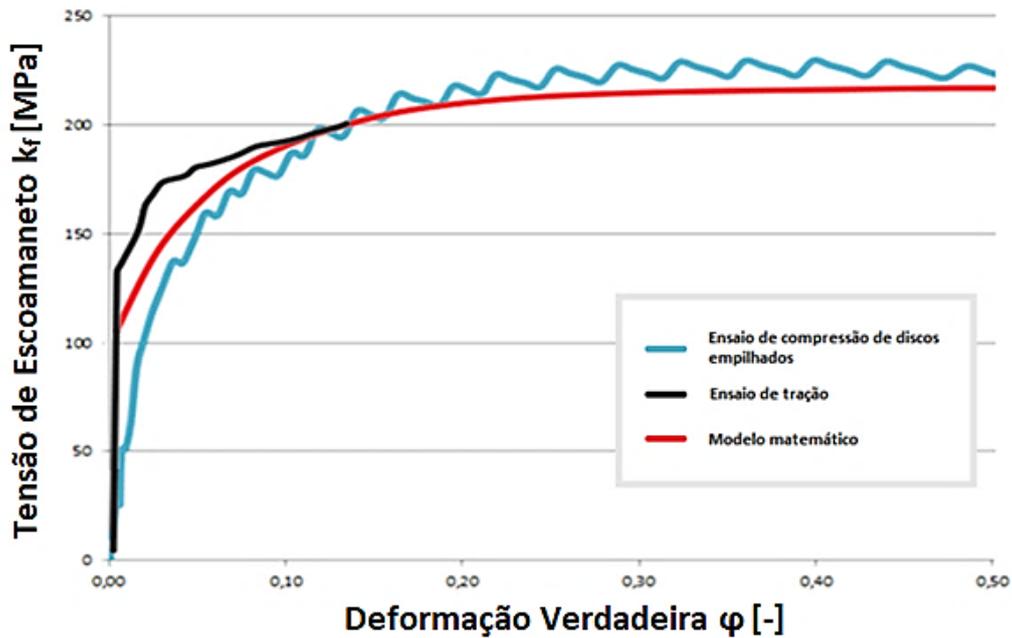


Figura 4.9 Curvas de escoamento do aço 22MnB5 a 850°C e velocidade de deformação média  $\dot{\varphi} = 1 \text{ s}^{-1}$ .



Quando comparadas às curvas obtidas através do ensaio de tração por ROHITHUPPALURI (2016), as curvas realizadas neste trabalho apresentam uma pequena diferença de comportamento para pequenas deformações. Isso se deve, principalmente, a acomodação das chapas no estágio inicial do ensaio de compressão. Todavia, para maiores deformações as curvas convergem, ocorrendo a intersecção entre elas aproximadamente a um valor de deformação igual a 0,05 para as temperaturas de 650 e 750°C e 0,10 para 850°C. A partir destes pontos, os comportamentos das curvas são idênticos aos resultados obtidos em tração para as temperaturas de 750 e 850°C, enquanto para 650°C as curvas voltam a apresentar alguma discrepância até a deformação de 0,12.

Mesmo diante de pequenas discordâncias para baixas deformações, com o avançar da deformação, as curvas obtidas através do teste de compressão de chapas empilhadas apresentam resultados idênticos aqueles do teste de tração, validando este método de determinação de curva de escoamento. Uma vez que os ensaios de tração apresentam a limitação de avaliar a resposta do material apenas a deformações muito pequenas, e diante dos resultados acima referidos, o ensaio de compressão de chapas empilhadas surge como uma alternativa podendo ser aplicado para a avaliação do comportamento do material para maiores deformações, o que é impossível através do teste de tração.

Além disso, a sobreposição das curvas experimentais às curvas obtidas a partir do modelo matemático por HOCHHOLDINGER (2009), corrobora esta proposição. Como

estes resultados foram alcançados por um método matemático, as curvas construídas alcançam maiores níveis de deformação que aqueles do ensaio de tração e para estes valores mais elevados de deformação as curvas convergem, apresentando comportamentos equivalentes. Contudo, nota-se novamente uma pequena diferença como a encontrada na comparação com o ensaio de tração de ROHITHUPPALURI (2016) para pequenas deformações, que se deve, também, a acomodação das chapas no estágio inicial do ensaio de compressão.

## 5.0 CONCLUSÕES

Esta pesquisa assumiu o objetivo principal de realizar o levantamento das curvas de escoamento do material 22MnB5 em diferentes temperaturas, 650, 750, 850°C utilizando o método de compressão de empilhamento de chapas dentro de uma ferramenta projetada para obter um processo *quasi*-isotérmico, denominado “copo quente”.

Os resultados experimentais para as curvas de escoamento do aço 22MnB5 para as temperaturas 650, 750 e 850°C, mostraram-se análogos aos obtidos pelo ensaio de tração que foram adquiridos na literatura e aos obtidos através de um método matemático também encontrado na literatura.

Devido a não disponibilidade do aço 22MnB5 em barras no mercado, o aço baixo carbono, SAE 1045, foi utilizado para validação experimental do método de empilhamento de discos. Ainda, foi confirmado a convergência de resultados quando utilizados 2, 4, 8 e 16 discos nos experimentos utilizando o SAE 1045.

As principais dificuldades encontradas foram a manipulação do ferramental, já que ele consistia em um conjunto aquecido nas temperaturas acima indicadas. Desta forma, a transferência do ferramental do forno para prensa tornou-se uma tarefa que necessitou de extremo cuidado no manuseio. Ainda, com o constante aquecimento e resfriamento da ferramenta na realização dos ensaios, foram necessárias diversas etapas de reusinagem, além da deformação dos corpos de prova em torno do pino central tornarem necessário o descarte do pino após cada experimento.

Assim, a aplicação do ensaio de compressão de chapas e discos empilhados a quente mostrou-se eficiente para a avaliação do comportamento de materiais de pequena espessura durante deformação. De forma que por meio deste teste é possível construir curvas de escoamento com resultados confiáveis para níveis superiores de deformação, o que é impossível através do ensaio de tração.

## 6.0 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Reavaliar o ensaio de empilhamento de discos considerando diferentes velocidades de deformação;
- Comparar as curvas de escoamento obtidas a partir do método *quasi-isotérmico* com as obtidas em máquina de ensaio universal;
- Estudar metalurgicamente as uniões formadas entre as faces dos discos durante o aquecimento;
- Validar resultados obtidos a partir dos métodos de finitos (FEM) com os experimentais;
- Obter, pelo método aqui apresentado, e analisar as curvas de escoamento do 22MnB5 em outras faixas de temperatura sugeridas pela literatura.

## 7.0 REFERÊNCIAS

1. ALTAN, T., **Metal Forming: Fundamentals and Applications**, Volume 1 of ASM series in metal processing, 1983.
2. ALVES M., NIELSEN C. V, & MARTINS P. A. F. **Revisiting the Fundamentals And Capabilities Of The Stack Compression Test**. Experimental Mechanics Volume 51, Issue 9, pp 1565–1572, 2011.
3. BATALHA, F. G. **Introdução a Manufatura Mecânica**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2003.
4. BOFF, U; FOLLE, L. F; MORAES, A. S. e. SCHAEFFER, L. **Ensaio de compressão é adequado para obter curvas de escoamento em chapas finas**, Seminário Internacional de Conformação de Chapas, Porto Alegre, 2011
5. BRAGECRIM, Projeto. 2014 (AUXPE 2203/2015).
6. CALLISTER, W. D., **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. John Wiley & Sons, 2002.
7. CHIAVERINI, V. **Tecnologia Mecânica**. Editora São Paulo: McGraw-Hill, 1986.
8. COSTA, L. L. (2014). **Efeito de diferentes ciclos termomecânicos no comportamento microestrutural do aço AISI 4140**. Porto Alegre, Brasil: Dissertação - UFRGS
9. DIETER, G. E. **Metalurgia Mecânica**. 2ª Ed. Editora Guanabara, 1981.

10. EUROFORGE. Fonte: EUROFORGE: [www.euroforge.org](http://www.euroforge.org) (2015).
11. FROTA JUNIOR, R. T. C. **Avaliação de parâmetros do processo de forjamento a quente em matriz aberta pelo método de elementos finitos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Aeronáutica e Mecânica). Instituto Tecnológico da Aeronáutica, São José dos Campos, 2009.
12. HAWRYLUKA, M., GRONOSTAJKIA, Z., KASZUBAA, M., POLAKA, S., WIDOMSKIA, P., SMOLIKB, J., & ZIEMBAA, J. (2017). **Analysis of the wear of forging tools surface layer after hybrid surface treatment**. International Journal of Machine Tools & Manufacture, pp. 60-71.
13. HELMAN, H., CETLIN, P. R. **Fundamentos da Conformação Mecânica**. 2ª Edição. Editora Artliber, 2005.
14. HENSEL, A. e SPITTEL, T. **Kraft – und Arbeitsbedarf bildsamer Formgebungverfahren**. Leipzig: VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1978.
15. HOCHHOLDINGER B., GRASS H., LIPP, A. P., **Determination of Flow Curves by Stack Compression Tests**, 2009.
16. KARBASIAN, H.; TEKKAYA, A. E. **A review on hot stamping**. Journal of Materials Processing Technology. Volume 210, Issue 15, 19, p. 2103-2118, 2010.
17. KNOLL, P, LIMA., & SCHAEFFER, L. **Estudo descreve a obtenção da curva de escoamento do Alumínio por ensaio de compressão**. Revista Corte e Conformação de Metais, n.28, p. 74-79, 2007
18. KWIETNIEWSKI, C. E., & KISS, F. L. **Metalografia e tratamentos térmicos de aços e ferros fundidos**. Porto Alegre: UFRGS, 2013.

19. LI, N., LIN, J., & DEAN, T. A. **Experimental characterization of effects of thermal conditions on austenite formation for hot stamping of boron steel.** Journal of Materials Processing Technology, p. 254-264, 2016.
20. MARTÍNEZ, A., MIGUEL V., COELLO, J., MANJABACAS, M.C., **Determining stress distribution by tension and by compression applied to steel: Special analysis for TRIP steel sheets.** Materials & Design Volume 125,, p. 11-25, 2017.
21. MARTINS, V. **Previsão da tensão de escoamento do aço 42CrMo4 em altas temperaturas: uma revisão.** Congresso internacional da ABM, p. 1877-1888, 2011.
22. MERKLEIN, M.; KUPPERT, A.A **A Method for the Layer Compression Test Considering the Anisotropic Material Behavior.** International Journal of Material Forming, Springer, p. 483-486, 2009.
23. PADILHA, A. F., & SICILIANO, F. **Encruamento, Recristalização e Crescimento de Grão.** São Paulo: Editora ABM, 2005.
24. PAWELSKI, O., **Über das stauchen von holzylindern und seine eignung zur bestimmung der formänderungsfestigkeit dünner bleche.** Archiv für Eisenhüttenwesen, 38: p. 437-442, 1967.
25. RODRIGUES, J., & MARTINS, P. **Tecnologia Mecânica: Tecnologia da deformação Plástica. (Vol. I).** Lisboa, Portugal: Escolar Editora, 2010.
26. ROHITHUPPALURI B.; GRASS, H.; LIPP, A.; LIPP, A. **Determination of Flow Curves by Stack Compression Tests and Inverse Analysis for the Simulation of Hot Forming.** 7<sup>th</sup> European LS-DYNA Conference, 2016.
27. SCHAEFFER, L. **Conformação de Chapas Metálicas.** Porto Alegre: Imprensa Livre Editora Ltda, 2004.

28. SCHAEFFER, L. **Forjamento - Introdução ao Processo**. Porto Alegre: Imprensa Livre, 2006.
29. SEIBEL, E. POMP, A. **Die ermittlung der formänderungsfestigkeit von metallen durch den stauchversuch**. Mitteilung d. Kaiser-Wilhelm-Instituts f. Eisenforschung v. 9, p.157-171, 1927.
30. SOUZA, F. B. **Simulação Numérica do Processo de Estampagem a Quente do Aço - USIBOR1500P**. Belo Horizonte: Dissertação – UFMG, 2013.
31. XU, M. C., GUEDES, C. **Experimental Study on the Collapse Strength of Narrow Stiffened Panels**. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, v. 135, n. 2. p. 10-20, 2013.
32. ZHOU, J., WANG, B., HUANG, M. **Two constitutive descriptions of boron steel 22MnB5 at high temperature**. Materials & Design, Volume 63, p. 738-748, 2014.