

DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTAL PARA ENSAIO DE COMPRESSÃO A QUENTE DE DISCOS EMPILHADOS*

André Rosiak¹
Luana de Lucca de Costa²
Alberto Moreira Guerreiro Brito³
Lirio Schaeffer⁴

Resumo

A curva de escoamento de um material é imprescindível para a determinação das condições de trabalho em processos de conformação mecânica e pode ser determinada a partir de diversos ensaios mecânicos, tais como, o ensaio de tração, de torção e o de compressão, em diversas condições de processamento que dependem das características de aplicação do material analisado. Neste trabalho, o ensaio de compressão de discos empilhados é apresentado e, também, é desenvolvido um ferramental que ao ser aquecido a mesma temperatura dos corpos de prova eleva o teste a condição de *quasi-isotérmico*.

Palavras-chave: Curva de Escoamento. Teste de Compressão de Discos Empilhados. Condição quasi-isotérmica.

DEVELOPMENT OF TOOL FOR COMPRESSION TEST TO HOT OF STACKED DISCS

Abstract

The flow curve of a material is indispensable for determination of working conditions in metal forming processes. It can be determined from several mechanical tests such as tensile, torsion and compression tests under several conditions which depend on the characteristics of application of the material. Herein, the test of compression of stacked discs is presented. The tool called warm cup are designed and heated to the same temperature of the samples raising the test at the *quasi-isothermal* condition.

Keywords: Flow curve. Compression test of stacked discs. Quasi-isothermal condition.

¹ Engenheiro Metalúrgico, mestrando do programa de pós graduação em minas, metalurgia e materiais - PPG3M, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil.

² Engenheira Mecânica, mestre em engenharia, doutoranda do programa de pós graduação em minas, metalurgia e materiais - PPG3M, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil.

³ Engenheiro Metalúrgico, doutor em engenharia, engenheiro, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil.

⁴ Professor titular. Engenheiro Mecânico, doutor em engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Os ensaios mecânicos possibilitam a determinação das principais propriedades mecânicas dos materiais a partir da curva de escoamento. Os comumente utilizados são: o ensaio de tração, de compressão e de torção. Estes, auxiliam no planejamento dos processos de fabricação e, atualmente, seus resultados são inseridos em programas de simulação numérica que garantem a viabilidade e melhoria desses processos [1].

A curva de escoamento demonstra comportamento do material, possibilitando estabelecer parâmetros importantes dos processos de conformação mecânica, tais como: força, energia e potência; além dos parâmetros como tensões, deformações e temperaturas [4].

Quando as tensões atuantes sobre um metal, em condições uniaxiais, atingem um determinado valor conhecido como tensão ou resistência ao escoamento (k_f), temos o início do escoamento ou deformação plástica do material [1]. Este valor de tensão é influenciado por diversos fatores relacionados com o processo de deformação como a deformação (φ), a velocidade de deformação ($\dot{\varphi}$) e 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 [1]:

$$k_f = (\varphi, \dot{\varphi}, T, \text{material}) \quad (\text{Equação 1})$$

Para a deformação a frio, a tensão de escoamento (k_f) em função da deformação verdadeira (φ) pode ser representada pela equação [1,5,6,7]:

$$k_f = c \cdot \varphi^n \quad (\text{Equação 2})$$

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 ($\dot{\varphi}$) [8,9]. Dessa maneira, deve-se considerar a influência significativa, tanto da velocidade de deformação ($\dot{\varphi}$) como da temperatura (T) e da deformação verdadeira (φ) [10]. A expressão matemática torna-se mais complexa e pode ser descrita como [1]:

$$k_f = A \cdot e^{m_1 \cdot T} \cdot \varphi^{m_2} \cdot \dot{\varphi}^{m_3} \cdot e^{\frac{m_4}{\varphi}} \cdot (1 + \varphi)^{m_5 \cdot T} \cdot e^{m_7 \cdot \varphi} \cdot \dot{\varphi}^{m_8 \cdot T} \cdot T^{m_9} \quad (\text{Equação 3})$$

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 [5].

A velocidade de deformação, por sua vez, 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. Assim, 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 [1]:

$$\dot{\varphi} = \frac{v_f}{h} \quad (\text{Equação 4})$$

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, a curva de escoamento do material pode ser obtida mediante ensaios de tensão-deformação, sendo os testes de tração, de compressão e de torção os mais utilizados [3]. Diante da forte influência da velocidade de deformação e da temperatura no trabalho a quente, nos ensaios que buscam caracterizar o comportamento mecânico a altas temperaturas deve-se, preferencialmente, utilizar equipamentos que permitam manter estes parâmetros constantes durante a realização dos testes.

O ensaio de compressão de discos empilhados é uma alternativa para a determinação da curva de escoamento de materiais dispostos na forma de chapas ou placas. Quando comparado ao ensaio de tração, este método apresenta a vantagem de permitir a obtenção de resultados confiáveis para níveis superiores de deformação, uma vez que não há a instabilidade gerada pela estricção [12].

O ensaio baseia-se na compressão de um conjunto de placas ou discos empilhados, arranjados de maneira que apresentem um alinhamento correto, gerando uma forma cilíndrica. É utilizado em substituição aos de tração e compressão quando não há a disponibilidade de material suficiente para esses ensaios [12].

A preparação experimental deve garantir aderência ao longo das interfaces de contato entre discos adjacentes para manter 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 [14].

Os estudos de Alves (2011) 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 de escoamento. Assim, a curva de escoamento é praticamente idêntica, quando obtida por meio do teste de compressão convencional ou por chapas empilhadas. 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 [15].

Este estudo objetiva desenvolver uma metodologia alternativa para a obtenção da curva de escoamento a quente quando não há disponibilidade de equipamento para a realização do ensaio que permita manter constantes a velocidade de deformação e a temperatura durante o ensaio. Respeitando a importante influência destes parâmetros no trabalho a quente, foi desenvolvido um ferramental que mantém a temperatura constante durante o ensaio e ainda possibilita que seja alcançada uma velocidade de deformação média, tal que, os resultados possam ser confrontados com aqueles encontrados na literatura.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Ensaios de Compressão de Discos Empilhados

O ensaio de compressão de discos empilhados é um ensaio pouco difundido e não normalizado. Desta forma, o ferramental foi projetado para que as dimensões da amostra cilíndrica resultante do empilhamento das chapas garanta condições de

escoamento homogêneas durante o ensaio. Para tanto, 2 conceitos importantes encontrados na literatura são considerados:

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 a sensibilidade ao atrito com as matrizes de compressão seria significativamente aumentada.

Buscando um balanço ótimo entre a altura e o diâmetro do corpo de prova final a ser comprimido, definiu-se a relação h_0/d_0 igual a 1. Para tanto, 16 discos do aço 22MnB5 com 1,3mm de espessura e 20mm de diâmetro externo foram sobrepostos.

A temperatura durante o ensaio deve ser mantida constante, assim, o ensaio foi realizado dentro de um “copo quente” aquecido a 650°C juntamente com o corpo de prova e as matrizes de compressão superior e inferior, que fecham as aberturas do cilindro. A ferramenta denominada “copo quente”, nada mais é do que uma estrutura cilíndrica, produzida no aço ferramenta para trabalho a quente AISI H13.

Ainda, é considerada a redução em altura do corpo de prova para que o ferramental seja projetado de modo que a matriz superior seja deslocada apenas a altura necessária para a redução de 40% em altura do corpo de prova.

A sequência do processo a que a ferramenta será submetida é mostrada na Figura 1. Sendo a montagem do ferramental com corpo de prova, aquecimento do conjunto, compressão até o limite do curso em altura do ferramental e remoção do corpo de prova.

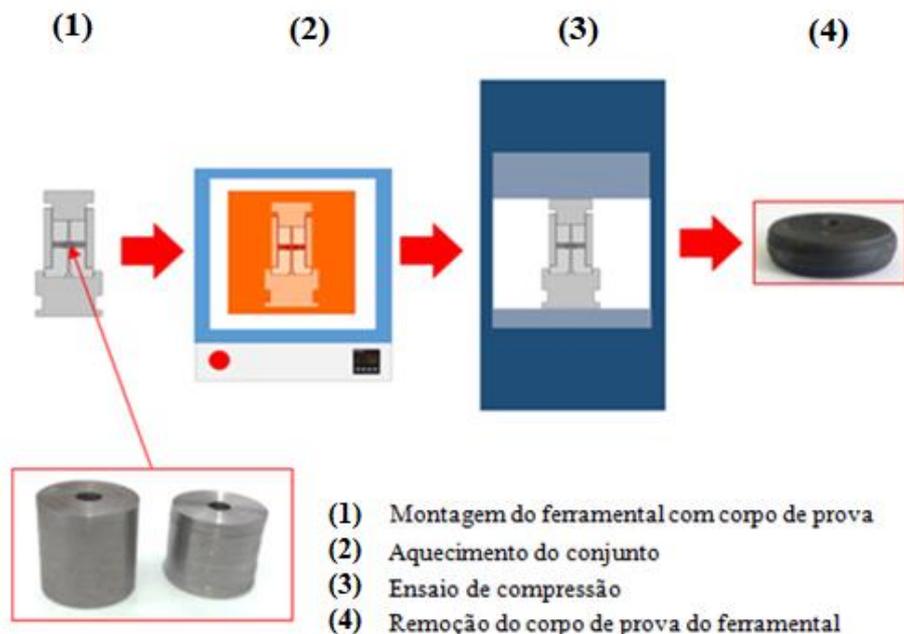


Figura 1. Ciclo de trabalho a que é submetido o ferramental.

2.2 Análise por Elementos Finitos

O conjunto ferramental foi modelado em 2D e 3D para no *software SolidWorks2017* e foram realizadas simulações numéricas no *software FORGE 3.0* para verificação da distribuição de temperatura durante a compressão dos discos. Na simulação numérica foram considerados dois estágios: (1) a transferência do conjunto do forno para a prensa e (2) o ensaio de compressão de discos empilhados. A montagem da simulação e os parâmetros de entrada utilizados são mostrados na Figura 2.

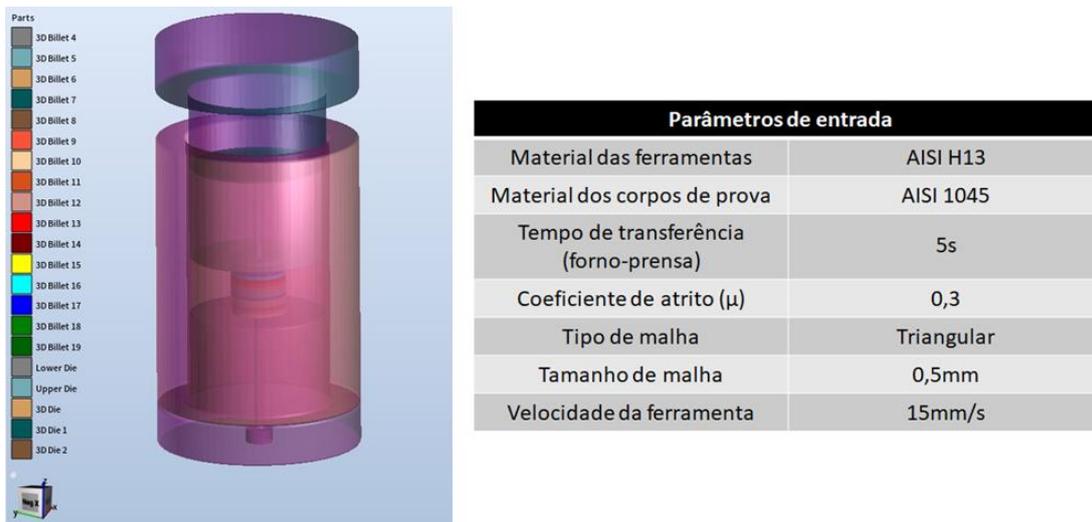


Figura 2. Montagem do ferramental no software FORGE 3.0 e parâmetros de entrada utilizados.

Uma vez que o software não possuía as propriedades físicas e mecânicas do aço de estudo 22MnB5 no seu banco de dados, foi impossível utilizá-lo. Desta forma, os corpos de prova utilizados no processo simulado foram do aço comum ao carbono AISI 1045 devido ao fato deste possibilitar uma boa previsão do comportamento térmico durante o ensaio.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Projeto do Ferramental

O resultado do modelamento do ferramental é mostrado na Figura 3 em corte total e o posicionamento dos corpos de prova e indicação dos componentes. Os componentes 1, 4 e 5 correspondem ao conjunto ferramental que permite a realização do ensaio *quasi-isotérmico*, denominado copo quente, onde 5 é a matriz de apoio do conjunto, 4 é a parede do copo com 15mm de espessura e 1 é a matriz de fechamento.

As matrizes 2 e 3 são as que ficam em contato com os corpos de prova no ensaio de compressão das chapas cilíndricas. A matriz 2 é a matriz flutuante que é deslocada em direção ao corpo de prova para a compressão, o alinhamento das matrizes 2 e 3 é garantida pelo pino de 5mm de diâmetro, indicado pelo número 7.

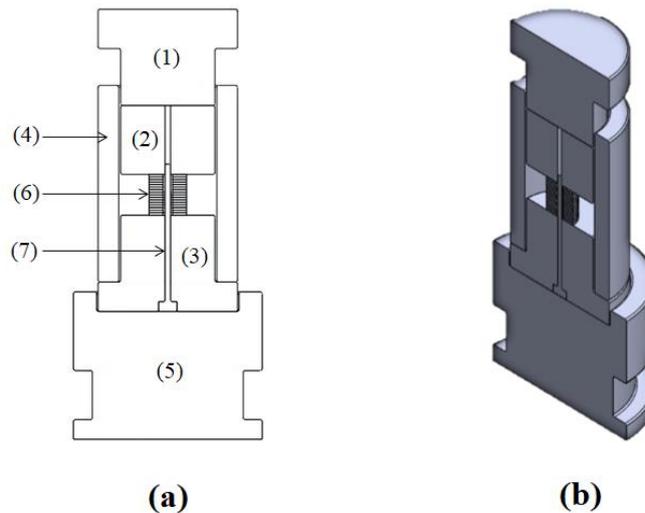


Figura 3. Modelagem do ferramental: (a) vista em corte total e indicação dos componentes; (b) projeção isométrica em corte.

A escolha do aço ferramenta AISI H13 para as ferramentas deve-se as características deste material amplamente empregado para trabalho a quente [16]. O material foi submetido aos tratamentos térmicos de têmpera e revenido para otimização destas propriedades. Nesta condição este aço apresenta resistência necessária para deformar os corpos de prova, mantendo-se íntegro, isto é, sem permitir-se deformar plasticamente. Além disso, possui propriedades de transferência de calor suficientes para inibir a perda de calor para o ambiente. Vale salientar que a temperatura desenvolvida no ensaio está dentro da faixa utilizada para revenir este material, de forma que a cada aquecimento uma redução de dureza é gerada [17]. Portanto, após a realização de no máximo 3 ensaios sugere-se que a têmpera seja realizada novamente para que a integridade das matrizes seja mantida durante os novos testes.

A determinação da espessura da parede do copo justifica-se, uma vez que esta deve ser elevada para garantir a conservação da temperatura durante o ensaio, mas não espessa o suficiente para que, devido à massa do ferramental, o seu manuseio torne-se impraticável.

A sequência de montagem experimental do conjunto é realizada como mostra a Figura 4, onde é apresentado o ferramental já usinado e pronto para o ensaio.

A velocidade de deformação média utilizada nos ensaios foi de $1s^{-1}$ e foi definida utilizando a Equação 4. Optou-se por utilizar a média da velocidade de deformação desenvolvida no processo devido ao fato da prensa utilizada nos ensaios se tratar de uma prensa hidráulica. Esta apresenta velocidade de prensagem constante de 15 mm/s o que torna impossível manter a velocidade de deformação constante durante os ensaios. Este valor de velocidade de deformação média possibilita a comparação das curvas de escoamento obtidas com a literatura. Para alcançá-lo, foi necessário que as dimensões das matrizes garantissem que após o fechamento completo do ferramental, a variação em altura do corpo de prova fosse exatamente aquela que, considerando a velocidade da prensa, possibilitasse manter a média das velocidades de deformação inicial e final sendo igual a 1.

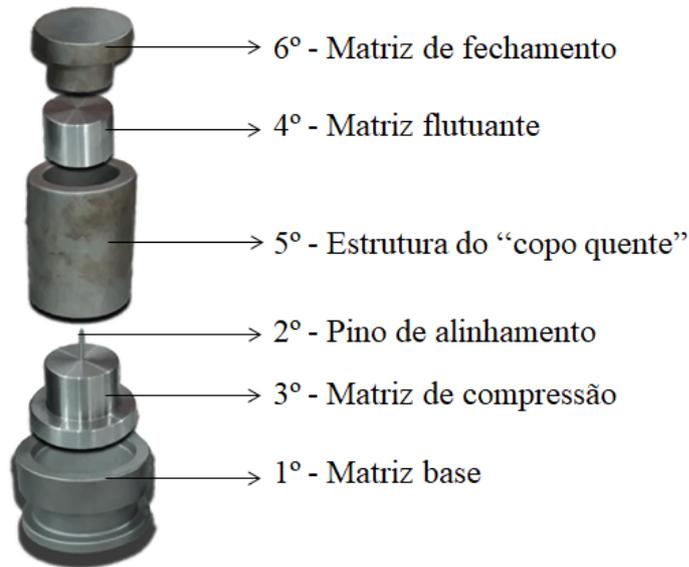


Figura 4. Sequência de montagem do ferramental.

3.2 Análise Térmica

O copo quente tem a função de inibir a perda térmica do corpo de prova para o ambiente durante o ensaio. Com a utilização de um termopar tipo K de 1,5mm de diâmetro posicionado na parte interna das ferramentas foi possível verificar que só foi constatada queda de temperatura 40 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 8 segundos, o copo quente se mostrou eficaz para aplicação neste ensaio. Além do ferramental não permitir a dissipação de calor para o ambiente durante o ensaio, o fato da energia de deformação plástica durante a compressão ser quase completamente convertida em calor é outro fator que auxilia na preservação da temperatura.

A Figura 5 mostra o resultado da simulação numérica em 3D para a temperatura do corpo de prova de aço AISI 1045 de 650°C composto por 16 discos empilhados ao final de uma compressão com redução de 40% em altura.

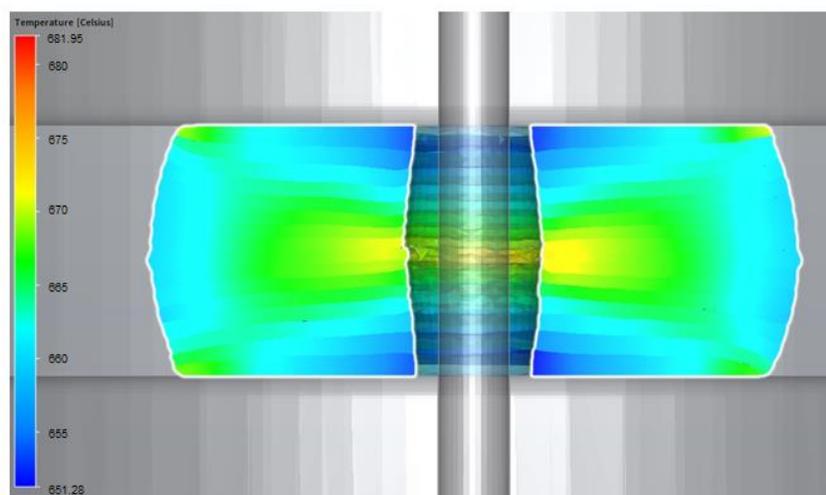


Figura 5. Resultado da simulação numérica para a temperatura no final do ensaio de compressão.

É possível observar que a temperatura mais baixa ao final do ensaio é de 651°C, praticamente a mesma de aquecimento do conjunto. Ainda, a temperatura no centro do corpo de prova é 672°C, ou seja, um aumento de 22°C em relação à temperatura de aquecimento. Este acréscimo de temperatura deve-se ao fato das deformações serem mais intensas nestas regiões.

Para validar os resultados da simulação numérica referentes a variação da temperatura, foram comparados os resultados de força e deslocamento obtidos a partir da simulação e do ensaio prático. Os resultados, apresentados na Figura 6, são muito próximos e validam a utilização do FORGE 3.0 para a previsão do comportamento térmico durante o ensaio.

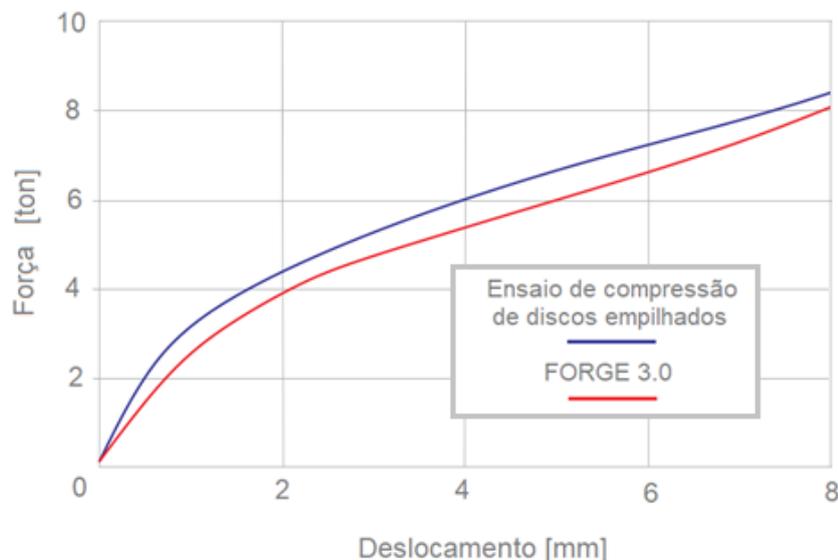


Figura 6. Gráfico Força x Deslocamento referentes ao ensaio prático e a simulação numérica.

3.3 Curva de Escoamento

A Figura 5 apresenta o resultado da curva de escoamento do aço 22MnB5 obtido pelo método de empilhamento de chapas, curva azul, enquanto a de cor preta corresponde a curva resultante do ensaio de tração obtidos por ROHITHUPPALURI (2016) e a curva vermelha é a modelada matematicamente por HOCHHOLDINGER (2009) a partir das fórmulas por ele desenvolvidas.

Quando comparadas, a curva realizada neste trabalho apresenta 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.

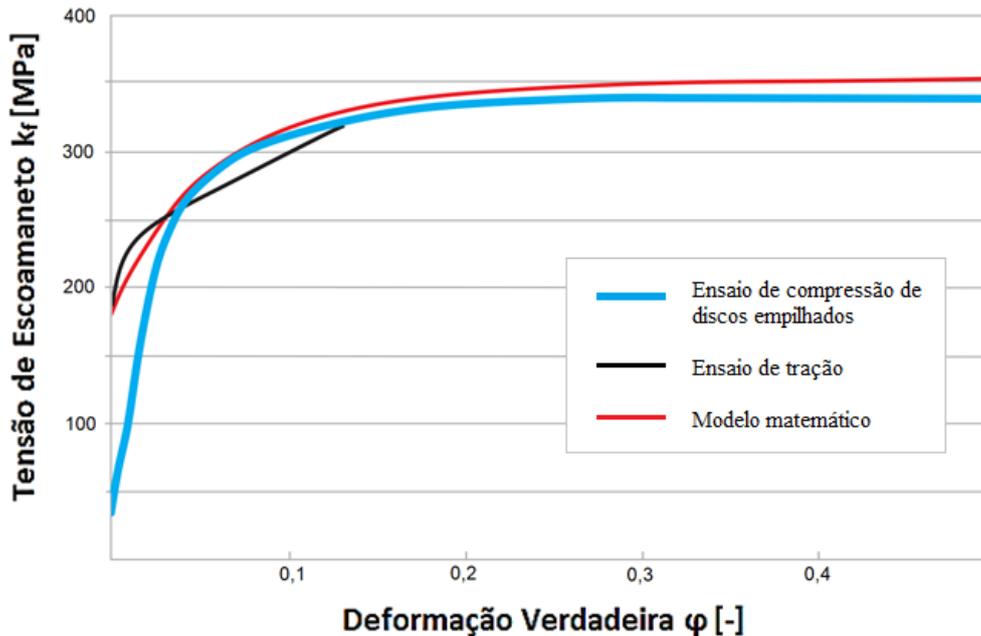


Figura 5. Curvas de escoamento a quente para o aço 22MnB5 a 650°C com velocidade de deformação média $\dot{\phi} = 1\text{s}^{-1}$.

3 CONCLUSÃO

- A escolha do aço ferramenta AISI H13 para confecção do ferramental foi satisfatória. As matrizes planas de compressão se mantiveram íntegras durante a realização dos ensaios a 650°C, não apresentando deformação plástica. Além disso, o “copo quente” foi capaz de inibir a perda térmica dos corpos de prova, uma vez que os ensaios práticos revelaram que não há queda da temperatura durante toda a sua duração;
- Os resultados da análise por elementos finitos mostraram que a única variação de temperatura nos corpos de prova durante os ensaios deve-se àquela gerada pela deformação plástica. Os resultados de força e deslocamento do ensaio prático e da simulação numérica no software FORGE 3.0 foram comparados e validam a utilização da simulação numérica para avaliar a variação térmica durante o ensaio;
- A aplicação do conceito de velocidade de deformação média foi validada. A comparação da curva obtida neste trabalho com as presentes na literatura, onde a velocidade de deformação é constante, evidencia que este conceito pode ser empregado para a determinação do comportamento mecânico dos metais quando conformados a quente;
- O ferramental se mostrou eficaz para levantamento da curva de escoamento a quente. 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 que convergem com aqueles do teste de tração e modelamento matemático presentes na literatura;

Agradecimentos

Os autores agradecem 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).

- [1] SCHAEFFER, L. Forjamento - Introdução ao Processo. Porto Alegre: Imprensa Livre, 2006.
- [2] DIETER, G. E. Metalurgia Mecânica. 2ª Ed. Editora Guanabara, 1981.
- [3] RODRIGUES, J., & MARTINS, P. Tecnologia Mecânica: Tecnologia da deformação Plástica. (Vol. I). Lisboa, Portugal: Escolar Editora, 2010.
- [4] 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
- [5] SCHULER, Metal Forming Handbook, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1998.
- [6] HOSFORD, W. F., Metal Forming Mechanics and Metallurgy, Cambridge University Press, 2007
- [7] WILKO C. E., Formability, A Review of Parameters and Processes that Control, Limit or Enhance the Formability of Sheet Metal, 2010.
- [8] YOGO, Y., Stress-strain curve of pure aluminum in a super large strain range with strain rate and temperature dependency, Procedia Engineering, Volume 207, 2017.
- [9] WANG, Y., Flow behavior and microstructures of superalloy 718 during high temperature deformation, Materials Science and Engineering , 2008.
- [10] BANABIC, D., Formability of Metallic Materials, 2000.
- [11] HENSEL, A. e SPITTEL, T. Kraft – und Arbeitsbedarf bildsamer Formgebungverfahren. Leipzig: VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1978.
- [12] 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.
- [13] MERKLEIN, M.; KUPPERT, A.A Method for the Layer Compression Test Considering the Anisotropic Material Behavior. International Journal of Material Forming, Springer, p. 483-486, 2009.
- [14] 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
- [15] 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.
- [16] EISENHÜTTENTEUTE, V. D., Steel: A Handbook for Materials Reserarch and Engineering, vol. 2, 1993.
- [17] BRYSON, W. E., Heat Treatment, Selection, and Application of Tool Steels, 2009.
- [18] 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. 7th European LS-DYNA Conference, 2016.
- [19] HOCHHOLDINGER B., GRASS H., LIPP, A. P., Determination of Flow Curves by Stack Compression Tests, 2009.