

# DETERMINAÇÃO DOS VALORES DO COEFICIENTE DE ENCRUAMENTO E LIMITE DE RESISTÊNCIA A PARTIR DE DADOS DE DEFORMAÇÃO E FORÇA OBTIDOS DE ENSAIOS DE COMPRESSÃO PARA VALIDAÇÃO DE SIMULAÇÃO EM ELEMENTO FINITOS<sup>1</sup>

*Adriano Nicholls Couto<sup>2</sup>  
 Pedro Henrique de Castro e Aquino<sup>2</sup>  
 Jánes Landre Júnior<sup>3</sup>*

## Resumo

Este trabalho tem como foco a determinação dos valores do coeficiente de encruamento e limite de resistência do cobre, do latão, do alumínio e do aço utilizando corpos de prova cilíndricos submetidos a ensaios de compressão e a aplicação destes valores para realização das simulações numéricas dos ensaios através do método dos elementos finitos. A partir dos ensaios de compressão realizados de forma direta foram obtidas as curvas tensão-deformação convencionais e a partir dos ensaios realizados de forma gradual foram obtidos os valores de força e deformação atuante no centro de cada corpo prova a cada 2 mm de deformação. De posse destes dados obteve-se valores de tensão e deformação verdadeira que posteriormente foram usados para obter os valores do coeficiente de encruamento e limite de resistência de cada material. De posse das propriedades dos materiais partiu-se para a execução e validação da simulação dos ensaios. As simulações serão executadas no software acadêmico de elementos finitos Simulação Numérica de Deformação Plástica (SNDP), desenvolvido no Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica da PUC Minas, devido à didática oferecida pelo software.

**Palavras-chave:** Encruamento; Limite de resistência; Elementos finitos; Curva tensão-deformação.

## DETERMINING THE VALUES HARDENING COEFFICIENT AND TENSILE STRENGTH USING DATA FROM FORCE AND DEFORMATION OBTAINED FROM COMPRESSION TESTS FOR VALIDATION OF FINITE ELEMENT SIMULATION

### Abstract

This paper objective is determine the strain hardening exponent and ultimate tensile strength of copper, brass, aluminum and steel, using cylindrical proof bodies subjected to compression tests and use these values in numerical simulations though finite element method. From the compression tests conducted directly were obtained conventional stress-strain curves, and from the tests conducted stopping every 2 mm deformation, were obtained deformation values and force at the center of each sample. With these data we obtained the values of stress and true strain, and they were used to obtain the values of the strain hardening exponent and tensile strength. After obtaining the material properties we went to execute and validate the simulation tests. These simulations were performed in academic finite element software *Simulação Numérica de Deformação Plástica* (SNDP), developed at Graduate Program in Mechanical Engineering at PUC Minas, due to the didacticism offered by the software.

**Key words:** Strain hardening exponent; Ultimate tensile strength; Finite elements; Stress-strain curve.

<sup>1</sup> *Contribuição técnica ao 68º Congresso Anual da ABM - Internacional, 30 de julho a 2 de agosto de 2013, Belo Horizonte, MG, Brasil.*

<sup>2</sup> *Engenharia Mecânica com ênfase em Mecatrônica. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, PUC-Minas, Belo Horizonte, MG, Brasil.*

<sup>3</sup> *Doutor em Engenharia Metalúrgica. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, PUC-Minas, Belo Horizonte, MG, Brasil.*

## 1 INTRODUÇÃO

Na fabricação de componentes metálicos através da conformação a frio utiliza-se da deformação plástica para impor a forma desejada ao material. É importante analisar no projeto qual material oferece o nível de deformação necessário sem romper.

Este artigo mostra a influência dos parâmetros de encruamento e limite de resistência do cobre, alumínio, latão e aço na sua formabilidade e compara os resultados de cada material entre si, utilizando-se de ensaios físicos de compressão e validar as simulações numéricas destes ensaios.

### 1.1 Compressão

O ensaio de compressão é basicamente um corpo de prova submetido a um esforço axial distribuído uniformemente em toda a sua seção transversal, e que tende a diminuir sua altura. Como na tração, o material submetido à compressão apresenta uma fase elástica, escoamento e posteriormente a fase plástica.

É importante observar as dimensões do corpo de prova para que não ocorra flambagem. Para evitar este problema comumente são usados corpos de prova cuja razão comprimento/diâmetro varia de 3 até no máximo 8.<sup>(1)</sup>

### 1.2 Relação entre Tensão Convencional e Tensão Verdadeira para a Compressão

As curvas obtidas nos ensaios de compressão recebem o nome de curva tensão – deformação convencional. De acordo com Dieter e Bacon<sup>(2)</sup> a curva tensão – deformação convencional não nos dá a indicação verdadeira das características de deformação do material porque a curva é baseada nas dimensões iniciais do corpo de prova, e estas dimensões mudam continuamente durante todo o processo.

As tensões convencionais são assim denominadas, pois para seu cálculo leva-se em consideração a área da seção transversal inicial, conforme é mostrado pela Equação 1.

$$\sigma = \frac{P}{A_0} \quad (1)$$

No caso das deformações convencionais leva em consideração a altura inicial do corpo de prova, conforme a Equação 2 mostra.

$$e = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L - L_0}{L_0} \quad (2)$$

Dessa forma a deformação obtida terá sinal negativo. Para que os cálculos da tensão verdadeira possam estar corretos é necessário tomar o valor absoluto da deformação convencional.

A deformação verdadeira é a razão entre a mudança de comprimento  $\Delta L$  em relação ao comprimento instantâneo. Então a deformação verdadeira é o somatório das deformações em cada passo, conforme mostram a Equações 3 e 4, propostas por Ludwik:

$$\varepsilon = \sum \left( \frac{L_1 - L_0}{L_0} + \frac{L_2 - L_1}{L_1} + \dots \right) \quad (3)$$

$$\varepsilon = \int_{L_0}^L \frac{dL}{L} = \ln \frac{L}{L_0} \quad (4)$$

A relação entre a deformação convencional e a deformação verdadeira é mostrada pelas Equações 5 a 7.

$$e = \frac{(L - L_0)}{L_0} = \frac{L}{L_0} - 1 \quad (5)$$

$$\frac{L}{L_0} = 1 + e \quad (6)$$

$$\varepsilon = \ln \frac{L}{L_0} = \ln(1 + e) \quad (7)$$

Se for considerado que durante o processo o volume seja constante, ou seja:

$$A_0 L_0 = AL \quad (8)$$

tem-se que a deformação verdadeira pode ser escrita da seguinte forma:

$$\varepsilon = \ln \frac{A}{A_0} \quad (9)$$

Ao comparar a Equação 1 com a Equação 10,

$$\sigma_v = \frac{P}{A} \quad (10)$$

obtém-se a relação entre a tensão convencional e a tensão verdadeira é dada pela Equação 11.

$$\sigma_v = \frac{P}{A_0} \frac{A_0}{A} = \frac{P}{A_0} (1 + e) = \sigma (1 + e) \quad (11)$$

Dessa forma é possível obter a curva tensão – deformação verdadeira e a partir dela identificar o coeficiente de encruamento  $n$  e o limite de resistência  $K$ , parâmetros estes que são dados de entrada para a equação de Hollomon.

### 1.3 Equação de Hollomon

Hollomon visa estudar o comportamento das tensões e deformações na região plástica, onde a Lei de Hooke não se aplica.<sup>(3)</sup> Segundo Forgas Junior<sup>(4)</sup> ao aplicar a equação de Hollomon obtém-se uma curva que pode ser dividida em três regiões, a saber: elástica, escoamento inicial e região plástica.

Hollomon tenta ajustar à curva tensão-deformação verdadeira uma expressão potencial como mostra a Equação 12.

$$\sigma_v = K \varepsilon^n \quad (12)$$

Onde,  $n$  é o coeficiente de encruamento e  $K$  o limite de resistência do material.

## 1.4 Encruamento

Na zona plástica a Lei de Hook não pode ser aplicada como dito anteriormente, pois a variação entre tensão e deformação não é linear. Houve muitas tentativas de ajuste de curvas para a zona plástica. A mais comum é expressão potencial de Hollomon.

Observando a equação de Hollomon pode – se observar que os valores de tensão são altos para pequenas deformações.<sup>(5)</sup> Esse efeito é chamado de encruamento. O material se torna mais resistente à medida que é deformado, elevando assim os níveis de tensões.

O valor do coeficiente de encruamento  $n$  varia entre 0 e 1. Este parâmetro tem duas razões para ser importante:

- quanto maior for o valor de  $n$  maior será a taxa com que o material encrua; e
- quanto maior o valor de  $n$  mais o material pode se deformar antes de atingir a instabilidade plástica

Para calcular o coeficiente de encruamento utilizam-se as equações da tensão e da deformação verdadeiras, a partir da equação de Hollomon e dos valores obtidos de tensão e deformação verdadeiros.

## 1.5 Limite de Resistência

O limite de resistência é um parâmetro utilizado para especificar materiais. Sua importância varia se o material for dúctil ou frágil.

Para metais dúcteis o limite de resistência é um indicador da carga máxima que o material pode atingir, além de especificar o material.<sup>(1)</sup>

Para metais frágeis o limite de resistência caracteriza bem a resistência do material, pois nestes casos o escoamento é muito difícil de ser definido e a região da zona plástica é muito pequena.<sup>(1)</sup>

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Materiais, Forma e Dimensões

Os materiais utilizados na simulação física foram o cobre, latão, alumínio e o aço. Ambos os materiais são de fácil aquisição e confecção tornando a execução da simulação física e conseqüentemente o estudo das propriedades destes materiais acessível.

Para a realização dos ensaios foram usados corpos de prova cilíndricos. Pelo fato da seção transversal circular ser bastante utilizada na metal-mecânica foram escolhidas para execução dos experimentos.

Todos os corpos de prova foram obtidos através do processo de laminação. As dimensões dos corpos de prova são mostradas na Tabela 1, bem como a razão comprimento/diâmetro (L/D) de cada material a fim de evitar a flambagem.

**Tabela 1.** Dimensões dos corpos de prova

Material	Altura	Diâmetro	L/D
Cobre	9,55 mm	20,05 mm	2,10
Latão	9,50 mm	20,05 mm	2,11
Alumínio	9,65 mm	20,05 mm	2,08
Aço	9,575 mm	20,05 mm	2,09

## 2.2 Ensaio Físico

Os ensaios foram realizados em três corpos de prova de cada material, à temperatura ambiente e a velocidade de deslocamento da ferramenta é 10 mm/min, sem a utilização de lubrificante. Foram realizados dois tipos de ensaio.

O primeiro ensaio foi executado sem interrupções com o objetivo de obter a curva tensão-deformação convencional do material. O ensaio era finalizado quando se atingia força de 180 KN, devido às limitações da máquina, ou quando o material rompesse. Os dados de tensão e deformação obtidos através desta curva foram usados para calcular os valores do coeficiente de encruamento e limite de resistência.

O segundo foi utilizando os outros dois corpos de prova restantes. Os ensaios eram finalizados quando a ferramenta se deslocava 10 mm, para isso foram executados 5 passos de 2 mm. Em cada passo era medido o diâmetro e a altura do corpo de prova. Com os dados de força obtidos pela máquina, o diâmetro e a altura em cada passo primeiramente calcula-se a média aritmética dos valores de diâmetro e altura e posteriormente foram calculadas a tensão e a deformação verdadeiras. A partir das tensões e deformações verdadeiras foram calculados os valores do coeficiente de encruamento e limite de resistência. Estes dados foram usados para validação das simulações numéricas.

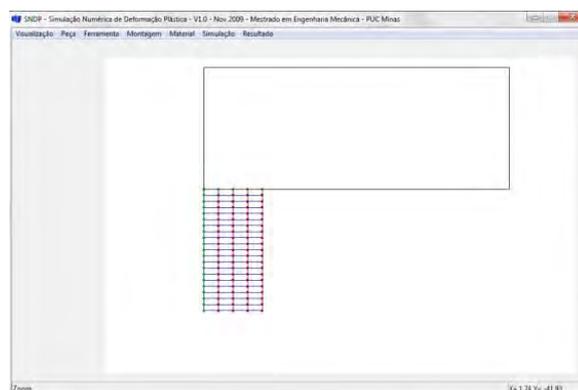
## 2.3 Simulação Numérica do Ensaio

Para realização das simulações numéricas foi utilizado o software SNDP (Simulação Numérica de Deformação Plástica). Segundo Oliveira<sup>(6)</sup> este programa utiliza o método dos elementos finitos e é voltado para a simulação de processo de conformação mecânica em matriz aberta de materiais rígido-plásticos. O SNDP trabalha com dois casos: axissimétrico e estado plano de deformação.

O SNDP trabalha em três etapas para efetuar a simulação numérica. São elas:

- pré-processamento: nesta etapa são geradas as geometrias da peça e da ferramenta, bem como a definição das propriedades do material e as condições de execução do processo. É importante ressaltar que para gerar a geometria 3D da peça é necessário somente desenhar o primeiro quadrante da peça se esta for axissimétrica;
- processamento: nesta etapa o programa realiza os cálculos necessários; e
- pós-processamento: nesta etapa é feita a análise dos resultados gerados pelo programa.

A Figura 1 mostra a geometria da peça e da ferramenta carregadas no software.



**Figura 1.** Geometria da peça e da ferramenta carregada no software.

Para execução da simulação primeiramente foi definida a velocidade de deslocamento da ferramenta de -0,1667 mm/seg. Posteriormente foi definido o número de passos sendo 100 passos. A constante de penalidade e o coeficiente de atrito, utilizados permaneceram no valor padrão do programa sendo respectivamente 10000 e 0,3.

O deslocamento da ferramenta foi definido com base na quantidade que a ferramenta deslocou para comprimir cada corpo de prova.

### 3 RESULTADOS

Inicialmente executaram-se os ensaios de compressão sem interrupção e através de um software capaz de controlar a máquina de ensaios realizou-se a leitura das medidas do deslocamento da ferramenta e força aplicada nos corpos de provas, sendo possível devido a sensores acoplados a máquina.

Posteriormente realizaram-se os ensaios de compressão com paradas a cada 2 mm de deslocamento da ferramenta. Em cada parada eram tomados os valores de altura e máximo diâmetro dos corpos de prova e através do software era feita a leitura do valor de força no momento da parada.

Estes dados foram utilizados nas equações 1,2, 7 e 11 para determinar os valores de tensão e deformação verdadeiros, utilizados na equação de Hollomon para se obter os valores do coeficiente de encruamento e limite de resistência de cada material em cada ensaio.

A Tabela 2 mostra os valores do coeficiente de encruamento e limite de resistência para os dois tipos de ensaios realizados.

**Tabela 2.** Coeficiente de encruamento e limite de resistência

Material	Ensaio sem interrupção	Ensaio com parada a cada 2 mm
Cobre	n= 0,0324 K= 351,86 MPa	n= 0,266 K= 446,96 Mpa
Latão	n= 0,145 K= 689,68 MPa	n= 0,161 K= 735,6 Mpa
Alumínio	n= 0,0138 K= 377,88 MPa	n= 0,124 K= 367,45 Mpa
Aço	n= 0,016 K= 865,48 MPa	n= 0,095 K= 992,08 Mpa

Observou-se que os parâmetros obtidos nos dois ensaios são distintos devido ao fato de que no ensaio com parada era necessário realizar trabalho para vencer a energia elástica do material que retornava em cada parada. Outro motivo para essas diferenças é o fato da velocidade de resposta da máquina não ser instantânea, ocasionando acúmulo de erro nas medidas, devido à imprecisão na parada do ensaio.

A histerese da máquina também influencia nos resultados, pois a cada parada a máquina não está nas mesmas condições do passo anterior.

Para realizar as medidas de diâmetro e altura do corpo de prova era necessário retirá-los de sua posição inicial. Com isso ao colocá-los novamente sobre a superfície do equipamento era perdido a concentricidade peça – ferramenta, ocasionando o escorregamento dos corpos de prova, inclusive os mais afetados foram os constituídos de aço.

A fim de validar as simulações numéricas destes ensaios os valores de altura, diâmetro e tensão verdadeira, obtidos tanto nos ensaios físicos quanto na simulação numérica foram comparados.

A fim de validar a simulação através dos parâmetros obtidos no ensaio sem interrupções foi criada a Tabela 3 que apresenta os valores de tensão para o ensaio sem interrupção e a simulação numérica.

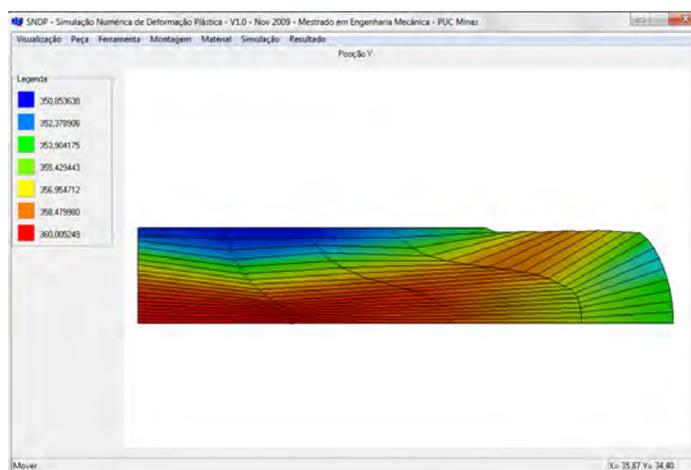
**Tabela 3.** Valores de tensão efetiva para o ensaio sem interrupção e simulação numérica

Material	Cobre	Latão	Alumínio	Aço
Tensão efetiva	376,208134	644,2961711	363,5950738	804,3621523
Tensão simulação	360,005249	619,213867	381,60555	868,469604
Erro relativo Tensão	4,50%	4,05%	4,72%	7,38%

Pela análise da Tabela 3 é possível perceber que a diferença relativa entre os valores de tensões obtidos tanto na simulação quanto no ensaio sem interrupção se deve ao fato de que a máquina possui como dito anteriormente, o efeito de histerese mecânica e velocidade de resposta muito baixa e deve-se levar em conta a falta de concentricidade entre a peça e a ferramenta. No entanto o programa para executar a simulação não leva em conta estes efeitos presentes na máquina de ensaio, ou seja, a velocidade de avanço da ferramenta é constante.

Como o valor do coeficiente de atrito não foi levado em consideração por não fazer parte do escopo deste trabalho e na simulação o coeficiente de atrito considerado foi o padrão do programa implica que essas considerações também causem diferença entre os valores do ensaio físico e da simulação.

A grande diferença entre o erro relativo do aço para os demais materiais pode ser por causa da falta de concentricidade no momento do ensaio de compressão do aço. As Figuras 2 a 5 mostram o campo de tensões 2D ao longo de cada corpo de prova. É importante ressaltar que o corpo de prova é simétrico e o programa trabalha com apenas o 1º quadrante do desenho do corpo de prova.



**Figura 2.** Isolayer de tensão cobre.

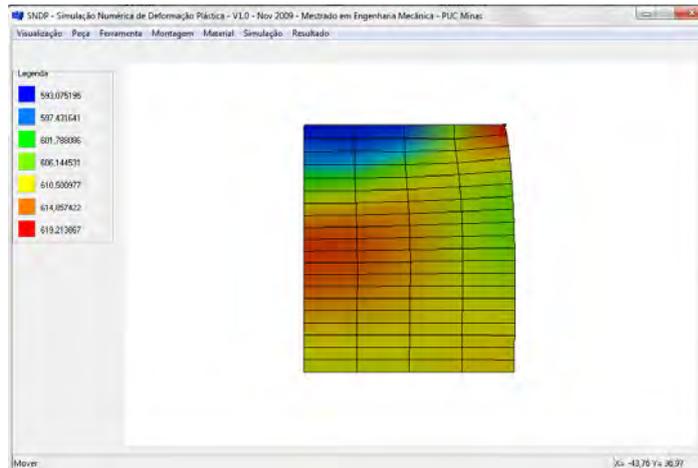


Figura 3. Isolayer de tensão latão.

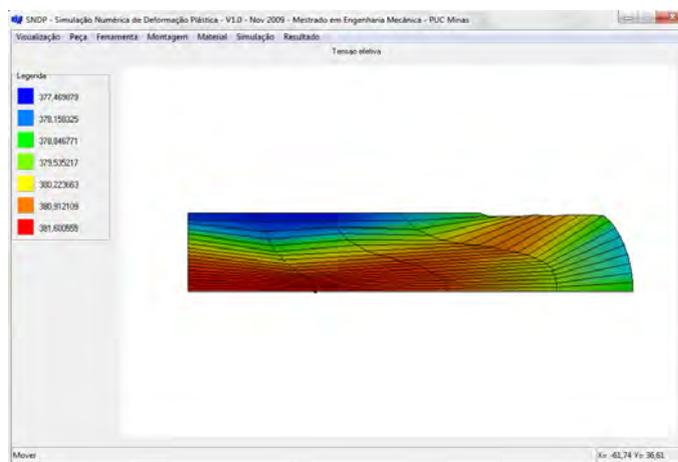


Figura 4. Isolayer de tensão alumínio.

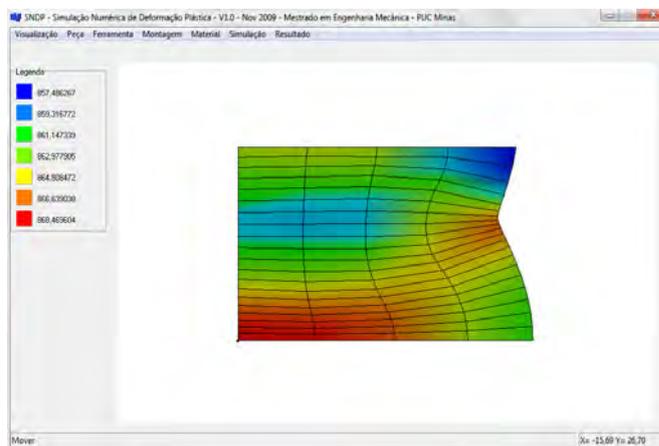


Figura 5. Isolayer de tensão aço.

O cobre quando deformado a frio para a confecção dos corpos de prova possui limite de resistência à compressão próximo de 420 MPa. Através da Figura 2 percebe-se que a tensão atingida na simulação não ultrapassa o limite de resistência, portanto o corpo de prova não se rompe.

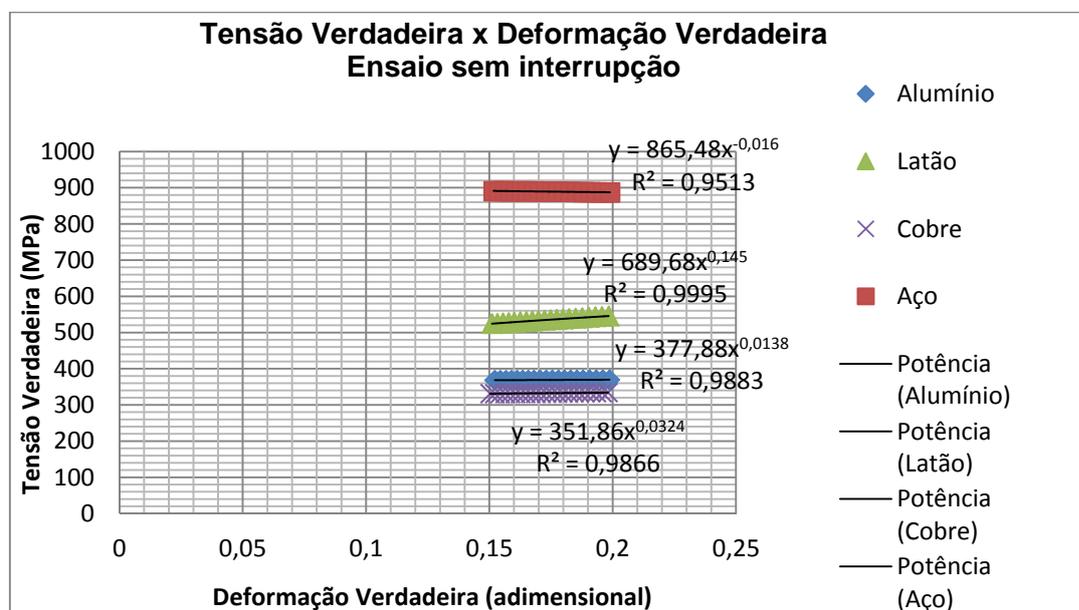
No caso do latão o limite de resistência à compressão tem valor o próximo a 590 MPa. Ao analisar a Figura 3 observa – se que a tensão atingida ultrapassa o limite de resistência do latão, caracterizando assim sua ruptura, como de fato acontece no ensaio de compressão do latão.

Para o alumínio o limite de resistência à compressão varia entre 350 a 380 MPa. Observa-se pela Figura 4 a tensão máxima atingida na simulação numérica foi 381 MPa. Tensões desta magnitude atingiram a porção central e também uma pequena porção da borda do corpo de prova. Isto indica que nestas áreas surgiram trincas, vistas na borda dos corpos de prova comprimidos.

No caso do aço o limite de resistência a compressão para o SAE 1020 é 780 MPa. Porém no ensaio físico o corpo de prova atingiu 868 MPa e não se rompeu e nem apresentou trincas.

A definição de qual tipo de aço que se refere é feita através da composição química que define as quantidades mínimas e máximas de cada elemento presente no material. Portanto, nesse caso não foi possível estabelecer corretamente o limite de resistência à compressão, pois não foi feito o teste de composição química do corpo de prova e assim verificar os parâmetros na literatura. Além disto, como este foi trefilado, não se sabe o nível de encruamento atingido durante o processo de fabricação e como este alterou o limite de resistência do material.

A Figura 6 mostra o gráfico tensão – deformação verdadeira para o ensaio sem interrupções de cada material.



**Figura 6.** Gráfico tensão – deformação verdadeira do ensaio sem interrupção para todos os materiais.

Em cada material foram coletados dados de tensão verdadeira para deformações verdadeiras de 5% a 60%, obtendo a curva tensão – deformação verdadeira para esta faixa. Porém foi detectado que na faixa de 15% a 20% houve um ajuste melhor da curva de tendência, fato este que pode ser visto pelo valor de R<sup>2</sup>. A partir de 10% de deformação verdadeira pode-se ter segurança de que o material está na fase plástica. Após 60% de deformação verdadeira do material a tensão verdadeira passa a diminuir.

O coeficiente de encruamento que pode ser calculado pontualmente ou como neste caso pode-se calcular um coeficiente médio. O sinal negativo presente nos cálculos mostra apenas que a tensão decresce devido ao aumento de resistência do aço a medida que este é comprimido.

Ao contrário do ensaio com parada neste ensaio o coeficiente de encruamento do alumínio é menor do que o coeficiente do aço. Isto é devido, como dito

anteriormente, pelas condições da máquina e dos erros de medição e concentricidade da peça, ocorridos no ensaio com parada.

No entanto como no ensaio com parada, o cobre se mostra mais dúctil que os demais materiais e, o aço ainda alcança uma carga máxima de compressão maior do que os demais materiais possuindo assim maior resistência e boa ductilidade.

Nas Tabelas 4, 5, 6 e 7 foram representados os dados de tensão efetiva instantânea no momento das paradas e a simulação com parada a cada 2 mm.

**Tabela 4.** Comparação entre os resultados do ensaio com parada e da simulação numérica do cobre

Material	Tensão Efetiva (mm)	Tensão Efetiva Simulação (mm)	Erro Relativo da Tensão (%)	Altura (mm)	Altura Simulação (mm)	Erro Relativo da Altura (%)
Cobre	219,01	245,74	10,88	18,36	18,09	1,49
	294,78	263,54	11,85	16,73	16,09	3,98
	326,24	282,94	15,30	15,07	14,09	6,96
	356,84	302,05	18,14	13,54	12,09	11,99
	355,36	311,71	14,00	11,98	10,09	18,73

**Tabela 5.** Comparação entre os resultados do ensaio com parada e da simulação numérica do latão

Material	Tensão Efetiva (mm)	Tensão Efetiva Simulação (mm)	Erro Relativo da Tensão (%)	Altura (mm)	Altura Simulação (mm)	Erro Relativo da Altura (%)
Latão	497,87	499,74	0,37	18,44	18,07	2,05
	545,55	517,86	5,35	16,94	16,07	5,41
	584,43	540,54	8,12	15,59	14,07	10,80
	626,79	568,61	10,23	14,26	12,07	18,14
	Ruptura	601,06	-	-	13,53	10,07

**Tabela 6.** Comparação entre os resultados do ensaio com parada e da simulação numérica do alumínio

Material	Tensão Efetiva (mm)	Tensão Efetiva Simulação (mm)	Erro Relativo da Tensão (%)	Altura (mm)	Altura Simulação (mm)	Erro Relativo da Altura (%)
Alumínio	259,33	277,76	6,63	18,17	18,09	0,44
	330,05	287,16	14,91	16,61	16,09	3,23
	316,41	298,48	6,01	14,90	14,09	5,75
	324,13	308,75	4,98	13,37	12,09	13,56
	329,07	313,30	5,03	11,91	10,09	17,94

**Tabela 7.** Comparação entre os resultados do ensaio com parada e da simulação numérica do aço

Material	Tensão Efetiva (mm)	Tensão Efetiva Simulação (mm)	Erro Relativo da Tensão (%)	Altura (mm)	Altura Simulação (mm)	Erro Relativo da Altura (%)
Aço	709,13	801,44	11,52	18,73	18,09	3,54
	910,20	810,20	12,34	17,74	16,09	10,25
	899,22	810,04	11,01	16,39	14,09	15,90
	825,04	825,42	0,05	15,21	12,09	25,81
	864,64	845,60	2,25	14,74	10,09	46,09

Na simulação não há como retirar a força do corpo de prova, portanto a energia elástica do material só é contabilizada no ensaio físico, devido a isto há uma diferença no valor da altura para as duas situações.

Este mesmo fator contribui para a diferença existente entre os valores de tensão verdadeira do ensaio físico e da simulação numérica.

A Figura 7 mostra um gráfico comparativo entre as curvas tensão – deformação verdadeira de cada material.

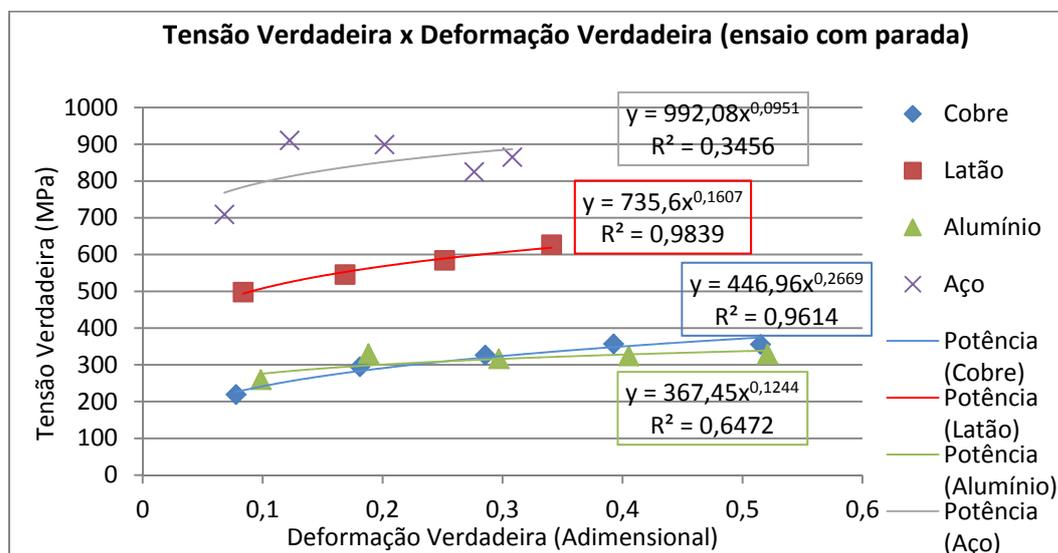


Figura 7. Gráfico tensão – deformação verdadeira do ensaio com parada para todos os materiais.

Por este gráfico percebe-se que quanto mais o cobre e o alumínio se deformam, maior é a tensão necessária para comprimi-los, ou seja, há um endurecimento do material provocado pela deformação do mesmo, implicando em um valor do coeficiente de encruamento maior do que o do aço. Portanto estes materiais são indicados para processos que exigem grande encruamento para pequenas deformações plásticas. Contudo o limite de resistência do cobre e do alumínio é menor em relação ao aço, logo a carga máxima que estes materiais podem ser comprimidos é menor, tornando assim o aço mais vantajoso por poder ser comprimido até tensões maiores e conseqüentemente possuir maior resistência aliado a uma boa ductilidade. Já para processos que exigem que sejam atingidas grandes deformações de maneira mais fácil o cobre e o alumínio levam vantagem sobre o aço pelo fato destes materiais poderem se deformar mais antes de atingir a carga máxima de compressão, ou seja, serem mais dúcteis do que o aço.

O latão possui apenas quatro pontos em sua curva pelo fato de que após o quarto passo o material se rompeu por cisalhamento a 45°, fato este que caracteriza um material frágil e, portanto o quinto ponto fica invalidado. Pelo fato do latão ter se rompido não é possível dizer que este é mais dúctil do que o aço apesar de possuir um coeficiente de encruamento maior, pois o latão pouco se deformou e entrou em colapso. O latão resistirá à força de compressão até que a tensão atinja o valor do limite de resistência que é de 735,6 MPa.

A maior variância dos dados do aço em relação aos dados dos demais materiais se deve ao fato dos corpos de prova terem escorregado durante o ensaio, problema causado pela retirada do corpo de prova de sua posição para a realização das medidas em cada passo do ensaio.

## 4 CONCLUSÃO

O software de Simulação Numérica de Deformação Plástica mostrou resultados satisfatórios nos valores de tensão atuante no material, altura e diâmetro dos corpos de prova durante o ensaio de compressão tanto para o ensaio sem interrupção quanto para o ensaio com parada, apesar da influência das condições em que os ensaios físicos foram executados. Assim foi possível ter uma noção da influência dos parâmetros de encruamento e limite de resistência na resposta dos materiais mediante uma carga compressiva.

## Agradecimentos

Os autores agradecem à PUC-Minas, a Capes e à Fapemig pelo apoio na realização deste trabalho.

## REFERÊNCIA

- 1 Souza, S. A. Ensaio mecânicos de materiais metálicos: Fundamentos teóricos e práticos. 5<sup>o</sup> ed. Ed. Edgard Blücher, 1982, 286 p.
- 2 Dieter, G. E.; Bacon, D. Mechanical Metallurgy, McGraw Hill Book Company, 1988, cap. 3. P. 69 -75.
- 3 Serra, J. S. Caracterización y comparación de las propiedades mecânicas de dos chapas de acero avanzado de alta resistência (AHSS): TRIP800 Y DP800. Barcelona, 2008. P. 21-22.
- 4 Forgas Junior, A. Influência da temperatura de recozimento intercrítico no comportamento mecânico de um aço bifásico baixo carbono. São Bernado do Campo, 2009. p. 47 – 51
- 5 Cipriano, G. L. Determinação do coeficiente de encruamento de metais através da morfologia das impressões de dureza na escala macroscópica. Curitiba, 2008. p. 20 – 23
- 6 Oliveira, A. F. Desenvolvimento de ferramenta computacional usando o Método de Elementos Finitos para simulação numérica do processo de conformação em matriz aberta. Belo Horizonte, 2011.