



Centro Universitário da **FEI**

NATHALIA CORREIA LOPES

**INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA E DA VELOCIDADE
DE DESLOCAMENTO NO ENSAIO DE COMPRESSÃO
DE LIGA DE ALUMÍNIO AA6004**

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Magnabosco
Departamento de Engenharia Mecânica - FEI
e-mail: rodrmagn@fei.edu.br

São Bernardo do Campo

2009

Resumo

O objetivo deste trabalho é determinar o comportamento mecânico de uma liga de alumínio AA6004 através dos ensaios de compressão do material, comparando os respectivos ensaios e os desenvolvendo para diferentes temperaturas, estudando a influência da temperatura e da velocidade de deslocamento nesses ensaios. Pôde ser observado que quanto maior a temperatura de ensaio, menor a tensão necessária à uma dada deformação. Contudo, pode-se afirmar que em temperaturas acima de 300°C não existe mais a região de encruamento, o que invalida a aplicação da expressão de Hollomon. As taxas de deformação tiveram uma influência significativa nos ensaios nas temperaturas mais elevadas, obtendo-se valores de sensibilidade à taxa de deformação entre 0,05 e 0,07 a 300°C (indicando pequena influência da taxa de deformação), enquanto valores entre 0,12 e 0,18 foram obtidos a 500°C.

Palavras-chave: ligas de alumínio, propriedades mecânicas, ensaios mecânicos, ensaios de compressão.

Abstract

AA6004 aluminum alloy was submitted to compression tests at different temperatures and rates of displacement, in order to determine its mechanical behavior. It was found that the stress to a given strain decreases with testing temperature; however, for temperatures higher than 300°C the Hollomon equation is not more valid, because of the lack of strain hardening. Strain rates showed significant influence at higher temperatures: the strain rate sensibility at 300°C presented low values (between 0,05 and 0,07), while at 500°C the strain rate sensibility reached values between 0,12 and 0,18.

Keywords: *aluminum alloys, mechanical properties, mechanical tests, compression tests.*

SUMÁRIO

| | |
|----------------------------------|----|
| Lista de figuras..... | 5 |
| Lista de tabelas..... | 7 |
| | |
| 1 OBJETIVO..... | 8 |
| | |
| 2 INTRODUÇÃO..... | 9 |
| | |
| 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 11 |
| 3.1 Ensaio de Tração..... | 11 |
| 3.1.1 Regime elástico..... | 15 |
| 3.1.2 Módulo de Resiliência..... | 15 |
| 3.1.3 Regime Plástico..... | 16 |
| 3.1.4 Módulo de tenacidade..... | 17 |
| 3.1.5 Ductilidade..... | 17 |
| 3.2 Ensaio de Compressão..... | 17 |
| | |
| 4. METODOLOGIA..... | 22 |
| | |
| 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 29 |
| 5.1 Microestrutura..... | 29 |
| 5.2 Ensaios..... | 30 |
| | |
| 6. CONCLUSÕES..... | 51 |
| | |
| BIBLIOGRAFIA..... | 52 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1: Curva obtida em um ensaio de tração..... | 13 |
| Figura 2: Representação da deformação plástica presente no material, curva obtida através do ensaio de tração da liga AA6004..... | 14 |
| Figura 3: (a) montagem típica de um ensaio de compressão de cilindro; (b) compressão na presença de atrito entre cilindro e placa, levando a barrilamento; (c) compressão ideal em condição de atrito nulo..... | 18 |
| Figura 4: esboço dos corpos-de-prova utilizado para os ensaios de compressão..... | 22 |
| Figura 5: esboço dos corpos-de-prova utilizado para os ensaios de tração..... | 23 |
| Figura 6: prensa de embutimento metalográfico. CDMatM-FEI..... | 24 |
| Figura 7: lixadeiras mecânicas de 220#, 320#, 400# e 600#, respectivamente. CDMatM-FEI... | 25 |
| Figura 8: politriz mecânica. CDMatM-FEI..... | 25 |
| Figura 9: microscópio óptico LEICA DMLM. CDMatM-FEI..... | 26 |
| Figura 10: máquina de ensaios MTS. CDMatM-FEI..... | 27 |
| Figura 11: máquina de ensaios MTS CDMatM-FEI com aparato para a realização dos ensaios a quente..... | 28 |
| Figura 12: Seção longitudinal da liga de alumínio AA6004, após ataque químico com 0,5%HF..... | 29 |
| Figura 13: Seção transversal da liga de alumínio AA6004, após ataque químico com 0,5%HF..... | 30 |
| Figura 14: gráficos obtidos nos ensaios de tração da liga AA6004..... | 31 |
| Figura 15: gráficos obtidos nos ensaios de tração da liga AA6004..... | 32 |
| Figura 16: gráfico obtido em um dos corpos de prova ensaiados a tração..... | 32 |
| Figura 17: gráfico obtido através do ensaio de compressão a 1mm/min..... | 34 |
| Figura 18: gráfico obtido através do ensaio de compressão a 5mm/min..... | 35 |
| Figura 19: gráfico obtido através do ensaio de compressão a 30mm/min..... | 35 |
| Figura 20: gráfico obtido através do ensaio de compressão a 100mm/min..... | 36 |
| Figura 21: gráfico obtido através do ensaio de compressão a 500mm/min..... | 36 |
| Figura 22: gráfico obtido à partir dos dados de limite de escoamento do material a 23°C..... | 37 |
| Figura 23: gráfico obtido à partir dos dados de H do material a 23°C..... | 38 |

| | |
|--|----|
| Figura 24: gráfico obtido à partir dos dados de n do material a 23°C..... | 38 |
| Figura 25: gráficos referentes aos ensaios realizados a temperatura de 300°C , na velocidade de 5 mm/min..... | 39 |
| Figura 26: gráficos referentes aos ensaios realizados a temperatura de 300°C , na velocidade de 30 mm/min..... | 40 |
| Figura 27: gráficos referentes aos ensaios realizados a temperatura de 300°C , na velocidade de 100 mm/min..... | 40 |
| Figura 28: gráficos referentes aos ensaios realizados a temperatura de 300°C , na velocidade de 500 mm/min..... | 41 |
| Figura 29: gráfico obtido à partir dos dados de limite de escoamento do material a 300°C..... | 41 |
| Figura 30: gráficos referentes aos ensaios realizados a temperatura de 500°C , na velocidade de 5 mm/min. respectivamente..... | 42 |
| Figura 31: gráficos referentes aos ensaios realizados a temperatura de 500°C , na velocidade de 30 mm/min..... | 43 |
| Figura 32: gráficos referentes aos ensaios realizados a temperatura de 500°C..... | 43 |
| Figura 33: gráficos referentes aos ensaios realizados a temperatura de 500°C , na velocidade de 500 mm/min..... | 44 |
| Figura 34: gráfico obtido à partir dos dados de limite de escoamento do material a 500°C..... | 44 |
| Figura 35: gráficos referentes a temperatura de 23°C..... | 45 |
| Figura 36: gráficos referentes a temperatura de 300°C..... | 46 |
| Figura 37: gráficos referentes a temperatura de 500°C..... | 46 |
| Figura 38: gráficos referentes a velocidade de solitação de 5 mm/min..... | 49 |
| Figura 39: gráficos referentes a velocidade de solitação de 30 mm/min..... | 49 |
| Figura 40: gráficos referentes a velocidade de solitação de 100 mm/min..... | 50 |
| Figura 41: gráficos referentes a velocidade de solitação de 500 mm/min..... | 50 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1. Composição química (% em massa) do material em estudo..... | 22 |
| Tabela 2: comportamento da liga AA6004 e seus respectivos desvios padrão..... | 33 |
| Tabela 3: dados do comportamento mecânico de ligas AA6004 e AA6061..... | 33 |
| Tabela 4: dados do comportamento mecânico de ligas AA6004 e AA6061..... | 34 |
| Tabela 5:comportamento da liga AA6004 e seus respectivos desvios padrão..... | 37 |
| Tabela 6: valores médios das taxas de deformação..... | 47 |
| Tabela 7: valores obtidos nos cálculos de C e m,para a temperatura ambiente..... | 47 |
| Tabela 8: valores obtidos nos cálculos de C e m para 300°C..... | 48 |
| Tabela 9: valores obtidos nos cálculos de C e m para 500°C..... | 48 |

1. OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é determinar o comportamento mecânico de uma liga de alumínio AA6004 através dos ensaios de tração e compressão do material, comparando os respectivos ensaios e os desenvolvendo para diferentes temperaturas, estudando a influência da temperatura e da velocidade de deslocamento nesses ensaios.

Inicialmente os ensaios de tração e de compressão foram feitos à temperatura ambiente e com velocidade de 1mm/min para uma posterior comparação de resultados. Foram também realizados ensaios de compressão nas temperaturas de -70°C , 25°C , 100°C , 300°C e 500°C , com cinco velocidades de deslocamento distintas de 1, 5, 30, 100 e 500 (mm/min).

2. INTRODUÇÃO

As ligas de alumínio são caracterizadas por uma baixa massa específica ($2,7\text{g/cm}^3$) comparando-se por exemplo com a massa específica do aço ($7,8\text{g/cm}^3$); são ligas que contém alta condutividade elétrica e térmica e também alta resistência à corrosão. Possuem baixa temperatura de fusão (660°C), restringindo o uso de temperaturas muito elevadas. Os principais elementos de liga adicionados ao alumínio são cobre, magnésio, silício, manganês e zinco, e suas quantidades são usualmente expressas em porcentagem ^[1,2]. No caso da liga AA6004 sua composição é $0,58\%\text{Si}$, $0,014\%\text{Zn}$, $0,025\%\text{Cu}$, $0,2\%\text{Fe}$, $0,51\%\text{Mg}$ e $0,34\%\text{Mn}$ ^[1,2].

Para as ligas trabalhadas (como a liga AA6004) foi fixado que o símbolo representativo de cada liga pela Aluminum Association (AA) é um número de 4 algarismos no qual o primeiro número, da esquerda, representa os elementos prioritários da liga, que no caso da liga AA6004 são Magnésio e Silício, representados pelo número 6. O segundo número, quando não é zero, mostra que se trata de uma liga com composição alterada, se comparada a outra liga com os mesmos dois algarismos finais ^[2].

Para se obter informações específicas sobre o comportamento mecânico de um determinado material, são realizados os chamados ensaios de tração. Nestes testes o corpo-de-prova é submetido a uma força crescente enquanto são obtidas todas as informações necessárias do alongamento deste corpo.

Entre os dados possíveis de se obter através destes estão: limite de resistência à tração, limite de escoamento, elasticidade, resiliência e tenacidade, ductilidade e capacidade de encruamento. Esses resultados, no entanto, sofrem influência da temperatura, velocidade de sollicitação e nível de impurezas do material. Entre todos os tipos de ensaios utilizados em materiais, o ensaio de tração é o mais comum, por ser um procedimento simples, rápido e que fornece informações de extrema importância sobre as propriedades mecânicas do material ^[1,3].

A compressão assim como a tração também é um esforço axial, mas na compressão esse esforço tende a encurtar o corpo-de-prova. Nos ensaios de compressão a carga aplicada submete o corpo a uma força axial para dentro e uniforme. O comportamento mecânico a compressão é semelhante ao comportamento a tração, ou seja, o corpo comprimido também sofre deformação elástica e depois deformação plástica. O conceito dessas deformações, contudo, continuam sendo os mesmos, independente do tipo de ensaio.

O ensaio de compressão não é tão utilizado quanto o ensaio de tração, por causa da dificuldade que se tem para medir as propriedades avaliadas nesse tipo de ensaio, já que a deformação lateral do corpo é barrada pelo atrito entre a superfície do corpo-de-prova e da máquina utilizada para o ensaio. Para diminuir esse problema, costuma-se revestir o corpo-de-prova com algum tipo de material que tenha baixo atrito, como por exemplo, o *teflon*, ou lubrificando-o com substâncias como grafite ou graxas do tipo *MOLYKOTE*[®].

Outro problema existente durante o ensaio de compressão é a flambagem, ou seja, uma possível ocorrência do encurvamento do corpo-de-prova, isso acontece em decorrência da instabilidade na compressão de um material dúctil. Usualmente, adotam-se razões entre comprimento e diâmetro da ordem de 2:1, para que não haja o risco de flambagem do corpo-de-prova durante o ensaio ^[1,3].

As principais propriedades avaliadas com o ensaio de compressão são o limite de escoamento e o limite de proporcionalidade, além das relações entre tensão e deformação verdadeiras.

Deste modo, neste trabalho pretende-se avaliar essas propriedades através dos gráficos obtidos com os ensaios de compressão e comparar os dados do comportamento mecânico da liga obtidos em velocidades e temperaturas diferentes.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 ENSAIO DE TRAÇÃO

O ensaio de tração é usado para se obter informações específicas sobre o comportamento mecânico de um determinado material. Nestes testes o corpo-de-prova é submetido a uma força crescente enquanto são obtidas todas as informações necessárias do alongamento deste corpo.

O ensaio de tração é muito utilizado graças à capacidade de se obter os dados das principais características mecânicas dos materiais através dele. Entre os dados possíveis de se obter estão: limite de resistência à tração, limite de escoamento, módulos de tenacidade, elasticidade e resiliência, ductilidade e encruamento. Esses resultados, no entanto, sofrem influência da temperatura, velocidade de solitação e nível de impurezas do material. Entre todos os tipos de ensaios utilizados em materiais, o ensaio de tração é o mais comum, por ser um procedimento simples, rápido e que fornece informações de extrema importância sobre as propriedades mecânicas do material ^[1,3].

Neste ensaio amostras de material são preparadas como vários corpos-de-prova de acordo com as normas técnicas, no caso dos materiais metálicos existem por exemplo as normas ABNT NBR-6152 ^[6] e a ASTM E8M-04 ^[7].

A tensão de engenharia (S) é obtida a partir da divisão da força aplicada pela área inicial da seção reta do corpo-de-prova, e é dada pela seguinte equação:

$$S = \frac{F}{A_0}$$

A deformação de engenharia (e) utilizada é obtida pela divisão da diferença de comprimento pelo comprimento inicial do corpo.

A tensão e deformação citadas anteriormente são também conhecidas como tensão e deformação convencionais. No entanto, as definições de tensão e deformação verdadeiras (σ e ϵ) devem levar em conta variações instantâneas de área e alterações infinitesimais de comprimento^[1], resultando em:

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

$$\varepsilon = \ln\left(\frac{L}{L_0}\right) \Rightarrow \varepsilon = \ln\left(\frac{A_0}{A}\right)$$

Levando em conta que o volume é constante e o fenômeno de deformação é uniforme, ou seja, a área da seção transversal é constante em todo do comprimento do corpo-de-prova utilizado, obtém-se mais duas equações, que correlacionam tensões e deformações convencionais e verdadeiras, permitindo a conversão de valores de ensaios convencionais de tração para dados verdadeiros:

$$\sigma = S.(e + 1)$$

$$\varepsilon = \ln(e + 1)$$

Um gráfico de tensão em função da deformação permite a determinação da região de comportamento elástico, da região de encruamento, do início do processo de ruptura e do ponto onde ocorreu a ruptura total do material, como se pode observar na figura 1.

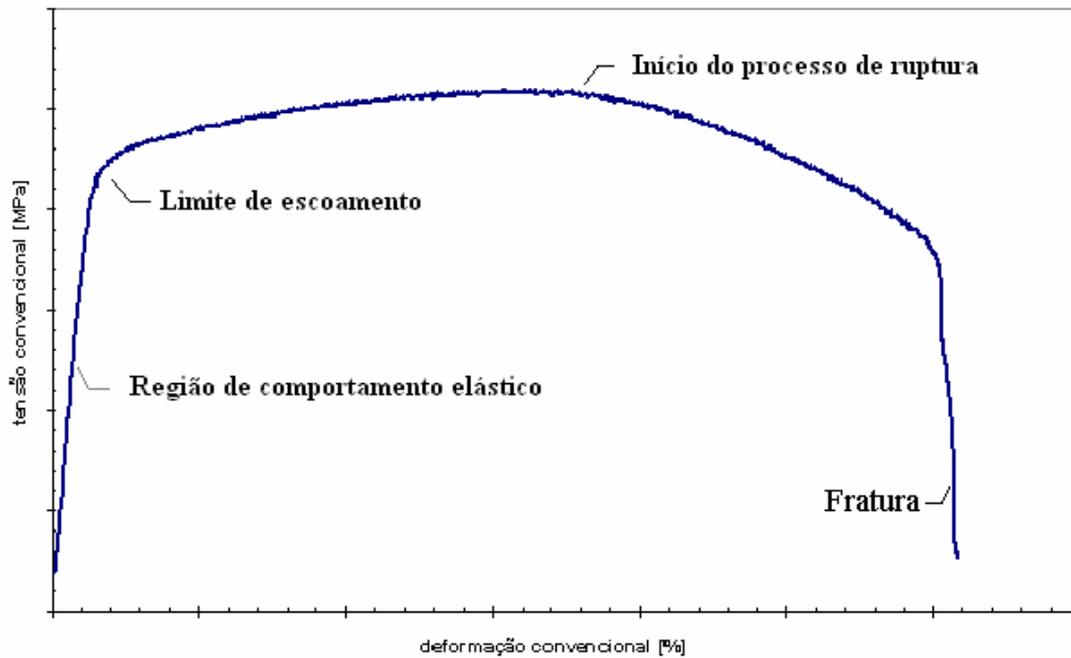


Figura 1: Curva obtida em um ensaio de tração

A curva representada em azul no gráfico da Figura 2 representa a deformação plástica uniforme existente no corpo-de-prova, esta curva tem início no limite de escoamento já que abaixo deste não existe deformação plástica, e termina no limite de resistência a tração pois acima deste limite a deformação não é uniforme e a conversão não é válida.

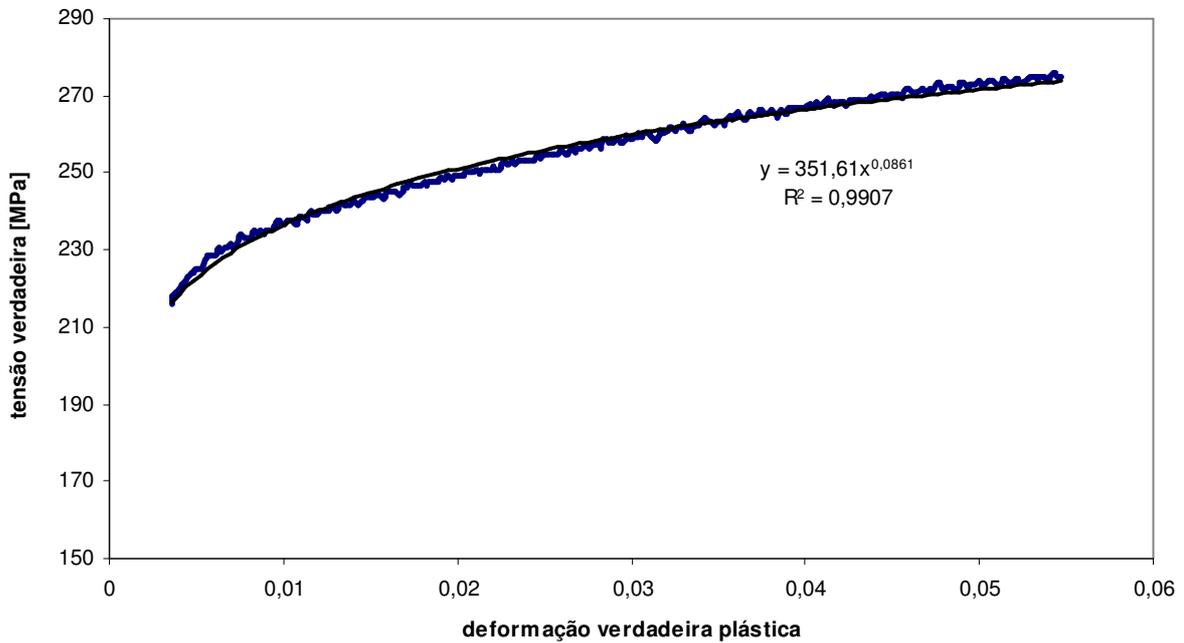


Figura 2: Representação da deformação plástica presente no material, curva obtida através do ensaio de tração da liga AA6004.

A relação matemática entre tensão verdadeira e deformação plástica verdadeira é expressa pela equação de Hollomon:

$$\sigma = K \cdot \epsilon_p^n$$

Onde: n é o expoente de encruamento

σ é a tensão verdadeira

K é o coeficiente de resistência

ϵ_p é a deformação plástica verdadeira

Abaixo do limite de escoamento a deformação predominante é a elástica, a deformação elástica ocorre quando a força que estava sendo aplicada no corpo é retirada e faz com que o

material retorne as suas dimensões originais, nos metais a função entre tensão e deformação é linear.

Já a deformação plástica uniforme é quando a mudança ocorrida no material se torna permanente, ou seja, o material não retorna as suas dimensões originais, mas ocorre na mesma intensidade em qualquer ponto do corpo-de-prova.

A deformação plástica não-uniforme é resultado do acúmulo da deformação plástica em um único ponto do material, e certamente resultará na falha deste por colapso plástico.

3.1.1 REGIME ELÁSTICO

Quando uma material sofre uma determinada deformação e após retirada a força, volta ao seu estado original, define-se essa deformação como deformação elástica. A relação entre tensão e deformação elástica de um corpo-de-prova é dada pela Lei de Hooke ^[4]:

$$\sigma = E \cdot \epsilon$$

A Lei de Hooke estabelece uma relação linear entre a tensão e a deformação, onde **E** é o módulo de elasticidade, ou uma das medidas da rigidez do material.

Na região elástica existem duas tensões principais, o limite de elasticidade que é carga máxima que o material suporta sem apresentar a deformação plástica, e o limite de proporcionalidade que é a carga máxima aonde o material não obedece mais à Lei de Hooke, ou seja, a relação entre a tensão e a deformação deixam de ser lineares. No entanto, a tensão que usualmente é utilizada para determinar o final do trecho de deformação elástica e o início da plástica é o limite de escoamento, definido como a máxima tensão que promove no material uma deformação permanente, usualmente de 0,002 ou 0,2%.

3.1.2 MÓDULO DE RESILIÊNCIA

O módulo de resiliência nada mais é do que a capacidade do material de armazenar energia durante a sua deformação elástica e quando a carga é retirada a energia é totalmente liberada. Essa propriedade é medida pelo módulo de resiliência (U), que é a energia de

deformação por unidade de volume necessária para submeter um material a tensão, desde a ausência de carga até o ponto de escoamento [4].

O módulo de resiliência pode ser determinado através do cálculo da área sob a curva tensão-deformação de engenharia calculada até o escoamento:

$$U_r = \int_0^{\varepsilon_i} \sigma \cdot d\varepsilon_l$$

Se for considerada uma região elástica linear:

$$U_r = \frac{1}{2} \sigma \cdot \varepsilon_l$$

Onde ε_l é a deformação no escoamento

Também pode-se definir o módulo de resiliência, como:

$$U_r = \frac{1}{2} LE \cdot \frac{LE}{E} = \frac{LE^2}{2E}$$

3.1.3 REGIME PLÁSTICO

Regime plástico é a região onde existe a presença da deformação plástica (permanente). Nessa região consegue-se determinar uma série de características do material, como o limite de resistência à tração que é o ponto onde o corpo-de-prova atinge a máxima tensão e é igual a carga máxima dividida pela área inicial. Após o ponto de máxima resistência, começa a fase de ruptura do material, onde ocorre uma redução da seção no local da fratura. Também é possível determinar o limite de ruptura do material, que é a tensão no instante da ruptura final, e o

alongamento, que é a diferença porcentual do comprimento final e inicial do corpo-de-prova, ou seja a máxima deformação plástica atingida ^[1,4].

3.1.4 MÓDULO DE TENACIDADE

A capacidade do material de absorver energia até a fratura é chamada de tenacidade. O módulo de tenacidade é a energia absorvida por unidade do volume desde o início da tração até a sua fratura ^[4]. O módulo de tenacidade pode ser aproximado pela seguinte expressão:

$$U_t = \frac{LE + LR}{2} \cdot e_f$$

Onde: LE é o limite de escoamento

LR é o limite de resistência à tração

e_f é a deformação final do corpo

3.1.5 DUCTILIDADE

Propriedade mecânica de grande importância, mede a habilidade de uma material ao sofrer uma deformação plástica considerável antes de ocorrer a fratura, e pode ser expressa na forma de porcentagem de alongamento (%AL) ou na forma de uma redução de área (%RA), no ensaio de tração ^[4]. No caso de um material que tem uma deformação plástica muito pequena ou até nula quando há a fratura, este é considerado um material frágil.

3.2 ENSAIO DE COMPRESSÃO

A compressão assim como a tração também é um esforço axial, mas na compressão esse esforço tende a encurtar o corpo-de-prova. Nos ensaios de compressão a carga aplicada submete o corpo a uma força axial para dentro e uniforme, como se pode observar na figura 3^[12].

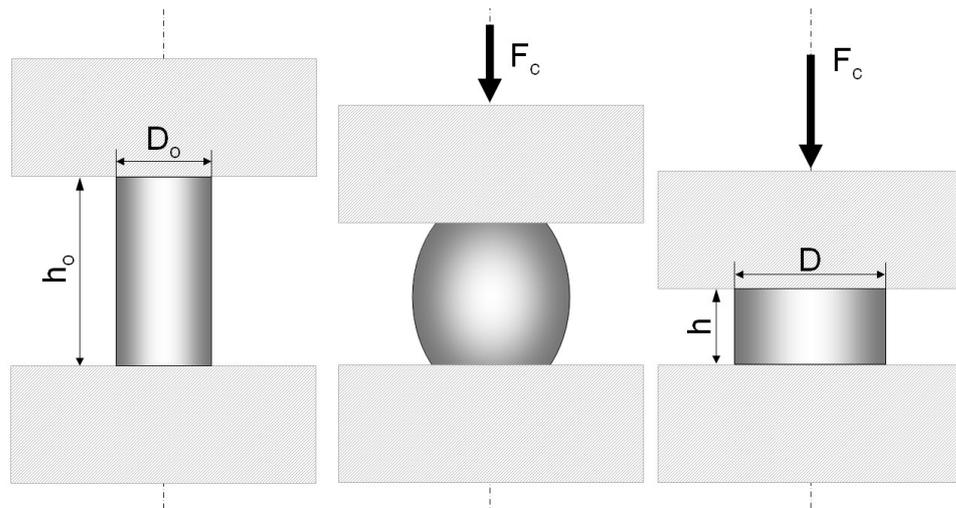


Figura 3: (a) montagem típica de um ensaio de compressão de cilindro; (b) compressão na presença de atrito entre cilindro e placa, levando a barrilamento; (c) compressão ideal em condição de atrito nulo^[12].

O comportamento mecânico a compressão é semelhante ao comportamento a tração, ou seja, o corpo comprimido também sofre deformação elástica e depois deformação plástica. O conceito dessas deformações, contudo, continuam sendo os mesmos, independente do tipo de ensaio. Nos ensaios de compressão a Lei de Hooke também continua sendo válida durante a deformação elástica e pode-se calcular o módulo de elasticidade do material.

O ensaio de compressão não é tão utilizado quanto o ensaio de tração, por causa da dificuldade que se tem para medir as propriedades avaliadas nesse tipo de ensaio, já que a deformação lateral do corpo é barrada pelo atrito entre a superfície do corpo-de-prova e da máquina utilizada para o ensaio, como mostra a Figura 3(b). Para diminuir esse problema, costuma-se revestir o corpo-de-prova com algum tipo de material que tenha baixo atrito, como por exemplo, o *teflon*.

Outro problema existente durante o ensaio de compressão é a flambagem, ou seja, uma possível ocorrência do encurvamento do corpo-de-prova, isso acontece em decorrência da instabilidade na compressão de um material dúctil. Ocorre mais freqüentemente em corpos-de-prova com comprimento maior em relação ao diâmetro. Por esse motivo dependendo da ductilidade de um determinado material é preciso limitar o comprimento do corpo-de-prova. Usualmente, adotam-se razões entre comprimento e diâmetro da ordem de 2:1, para que não haja o risco de flambagem do corpo-de-prova durante o ensaio. Além de tomar o cuidado de centralizar corretamente o corpo-de-prova na máquina de ensaios, para garantir que o esforço

ocorra uniformemente também deve ser tomado outro cuidado para evitar a flambagem que é o paralelismo entre as placas onde ficará o corpo-de-prova durante a compressão^[1,3].

Em materiais dúcteis conforme ocorre a deformação do corpo-de-prova acontece uma deformação lateral que submetida até que o corpo se transforme em um disco, não havendo uma ruptura. Por esse motivo, o ensaio de compressão em materiais dúcteis não fornece propriedades referentes a ductilidade do material^[1,3].

As propriedades avaliadas com o ensaio de compressão são o módulo de elasticidade, o limite de escoamento e o limite de proporcionalidade, além das relações entre tensão e deformação verdadeiras. Sendo muito semelhantes aos ensaios de tração, nos ensaios de compressão também existe o trecho plástico que pode ser descrito pela equação de Hollomon.

Esse tipo de ensaio geralmente é mais utilizado que o ensaio de tração quando se trata de materiais frágeis, pois como sua região elástica é muito pequena é possível determinar com mais precisão suas características. Quando se trata de materiais frágeis as propriedades avaliadas são o limite de resistência à compressão e o módulo de elasticidade.

O cálculo da tensão e deformação verdadeiras para os ensaios de compressão de um cilindro de diâmetro inicial D_o e altura inicial h_o é dado em módulo, assumindo-se novamente um volume constante durante a deformação do corpo, de acordo com a Lei de constância de volume:

$$D_o^2 h_o = D^2 h$$

Não existindo atrito a força compressiva uniaxial (F) que será necessária para produzir um dado escoamento é dada pela seguinte equação:

$$F = \sigma_0 A$$

Onde: σ_0 é a tensão para um dado escoamento do material

A é a área do cilindro comprimido

A tensão verdadeira produzida pela força compressiva (F) é calculada pela seguinte expressão:

$$\sigma = \frac{4.F}{\pi.D^2}$$

Em termos de constância de volume, tem-se:

$$\sigma_c = \frac{4.F_c.h}{\pi.D_o^2.h_o}$$

Onde: F_c é a força compressiva

h é a altura do corpo-de-prova após a compressão

h_o é a altura inicial do corpo-de-prova

D_o é o diâmetro inicial do corpo-de-prova

A deformação verdadeira é descrita pela seguinte equação:

$$\varepsilon_c = \ln \frac{h_o}{h}$$

Tanto nos ensaios de compressão, como nos ensaios de tração, existem alguns fatores que influenciam nos resultados dos ensaios, como a velocidade de sollicitação e temperatura. No caso da velocidade, o esperado é que a mesma seja diretamente proporcional a deformação ocorrida no corpo ao longo do ensaio. Já a temperatura, quanto maior ela for, menor será a tensão necessária para deformar o corpo-de-prova.

A variação da deformação por unidade de tempo é denominada taxa de deformação e pode ser descrita pela seguinte equação:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{1}{h} \cdot \frac{dh}{dt} = \frac{V_d}{h}$$

Onde: V_d é a velocidade de deslocamento

H é a altura do corpo de prova após a compressão

Da equação anterior nota-se que a taxa de deformação tem relação direta com a velocidade de deslocamento do ensaio. Além disso, quanto maior a taxa de deformação, maior é a tensão e a constante de resistência do material. A influência da taxa de deformação é muito mais significativa nos ensaios a quente. Além da velocidade e da temperatura, outro fator que também contribui com a influência da taxa de deformação são as dimensões do corpo-de-prova, ou seja, quanto maior a altura do corpo-de-prova, menor será a taxa de deformação.

Quanto maior o valor da sensibilidade a taxa de deformação, maior será a resistência do material. Deste modo, pode se afirmar que a tensão de escoamento sofre influência da taxa de deformação e obedece a seguinte equação:

$$\sigma_0 = C \cdot \dot{\epsilon}^m$$

Onde: m é a sensibilidade à taxa de deformação

C é a constante de resistência

4. METODOLOGIA

O material analisado é uma liga de alumínio AA6004 e sua composição química pode ser observada na tabela 1.

Tabela 1: Composição química (% em massa) do material em estudo

| Si | Zn | Cu | Fe | Mg | Mn | Al |
|------|-------|-------|------|------|------|---------|
| 0,58 | 0,014 | 0,025 | 0,20 | 0,51 | 0,34 | balanço |

Foram tomadas para cada um dos 86 corpos-de-prova para compressão uma medida do comprimento (h_0) e uma do diâmetro (D_0), para se obter o comprimento e o diâmetro médios, indicados na Figura 4, que serão utilizados ao longo do trabalho.

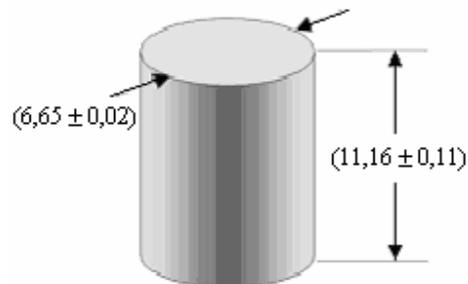


Figura 4: esboço dos corpos-de-prova utilizado para os ensaios de compressão

Nos 5 corpos-de-prova para tração foram feitas 5 medidas ao longo do comprimento para se obter o diâmetro médio, indicado na Figura 5.

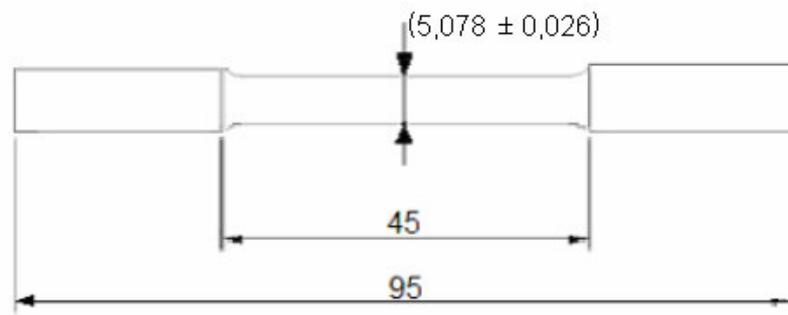


Figura 5: esboço dos corpos-de-prova utilizado para os ensaios de tração

Amostras do material foram cortadas de modo longitudinal e transversal para que fossem analisadas micrograficamente, para isso foi usada uma cortadeira de disco abrasivo, foi feito um corte lento, com baixa pressão, máxima vazão do fluido refrigerante e com interrupções, para evitar o aquecimento excessivo da peça a ser analisada, evitando alteração de sua microestrutura.

Após o corte da peça foi realizado seu embutimento em baquelite para facilitar o manuseio da amostra durante as seguintes etapas de preparação, em uma prensa de embutimento metalográfico do Centro de Desenvolvimento de Materiais Metálicos da FEI (CDMatM-FEI), mostrada na figura 6, numa temperatura entre 120 e 160°C, pressão entre 100 e 150 kgf/cm².



Figura 6: prensa de embutimento metalográfico. CDMatM-FEI.

Com o embutimento pronto foi feito o processo de lixamento para a remoção da camada rugosa existente, o lixamento foi realizado em lixadeiras mecânicas (figura 7) de lixas com granas de 220#, 320#, 400# e 600#; o lixamento inicial (220#) tem como objetivo remover a camada rugosa causada no desbaste da peça; a lixa 320 remove a rugosidade e a deformação ocorrida na lixa de 220, e assim sucessivamente. Esse lixamento é feito sob água corrente para remover as partículas decorrentes do atrito entre a peça e a lixa. Também é realizada uma rotação da amostra de 90° a cada mudança de lixa.



Figura 7: lixadeiras mecânicas de 220#, 320#, 400# e 600#, respectivamente. CDMatM-FEI.

Depois de lixada a peça foi polida em uma politriz mecânica (figura 8), com o objetivo de remover a camada rugosa e a deformação da lixa de 600#, além da politriz mecânica foi também utilizada nesta etapa pasta de diamante, com granulometria de 6 e 1 μm . A peça então foi limpa com algodão e álcool e seca com ar quente (secador).



Figura 8: politriz mecânica. CDMatM-FEI.

Para evidenciar a estrutura do material, foi feito um ataque químico de 0,5%HF, esse ataque é feito imergindo a superfície da amostra em um recipiente contendo o reativo, por um

período de 5 a 10 segundos, interrompendo o ataque borrifando álcool, para diluir o reativo. A secagem é feita com o auxílio de um secador. A análise metalográfica foi feita em microscópio óptico LEICA DMLM (figura 9).



Figura 9: microscópio óptico LEICA DMLM. CDMatM-FEI.

Os ensaios de tração foram realizados para se obter os dados necessários do comportamento mecânico do material, como a ductilidade, o limite de escoamento e o limite de resistência. Esses ensaios foram realizados na máquina universal de ensaios MTS (figura 10). Esses ensaios foram realizados à temperatura ambiente na velocidade de solitação de 5 mm/min.



Figura 10: máquina de ensaios MTS. CDMatM-FEI.

Já os ensaios de compressão, também realizados na MTS, foram feitos à temperatura ambiente e também os ensaios a frio (Figura 9), com o auxílio de gelo seco e álcool para manter a temperatura (-70°C) da caixa acoplada a MTS onde foram imersos os corpos-de-prova, para que mantivessem a temperatura correta antes dos ensaios que foram feitos nas velocidades de 1, 5, 30, 100 e 500 (mm/min).

Os ensaios foram também realizados a quente com as temperaturas de 300°C e 500°C , havendo um período de dez minutos entre um ensaio e outro, para o corpo-de-prova alcançar a temperatura desejada. Esses ensaios foram realizados em diferentes velocidades de sollicitação de 5 mm/min, 30 mm/min, 100 mm/min e 500 mm/min.

Para que os ensaios a quente pudessem ser realizados foi acoplado um forno à máquina universal de ensaios, como pode se observar na figura 11.



Figura 11: máquina de ensaios MTS do CDMatM-FEI com aparato para a realização dos ensaios a quente.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 MICROESTRUTURA

Com o auxílio do microscópio óptico LEICA foi possível a análise metalográfica da liga estudada (AA6004), as fotos foram tiradas a partir de amostras que sofreram ataque químico de 0,5%HF. As fotos a seguir representam respectivamente as microestruturas de uma mostra com corte longitudinal (figura 12) e de uma amostra com corte transversal (figura 13), e nestas figuras pode ser observada a homogeneidade da microestrutura.

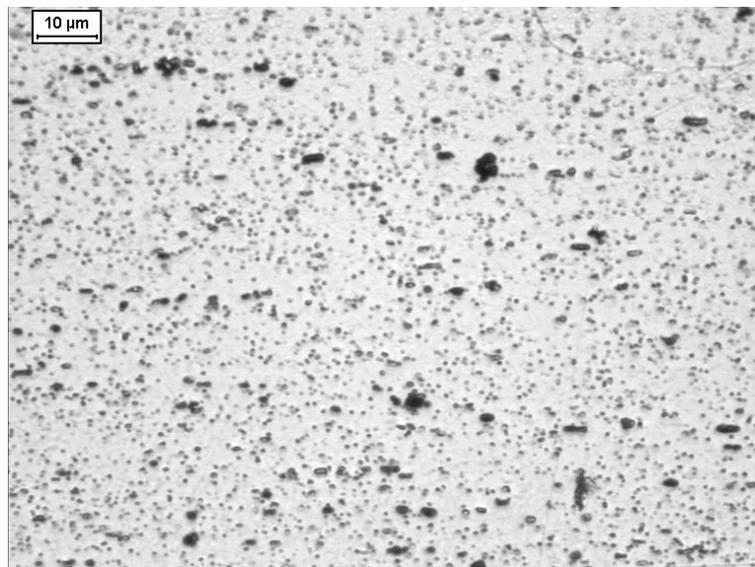


Figura 12: Seção longitudinal da liga de alumínio AA6004, após ataque químico com 0,5%HF

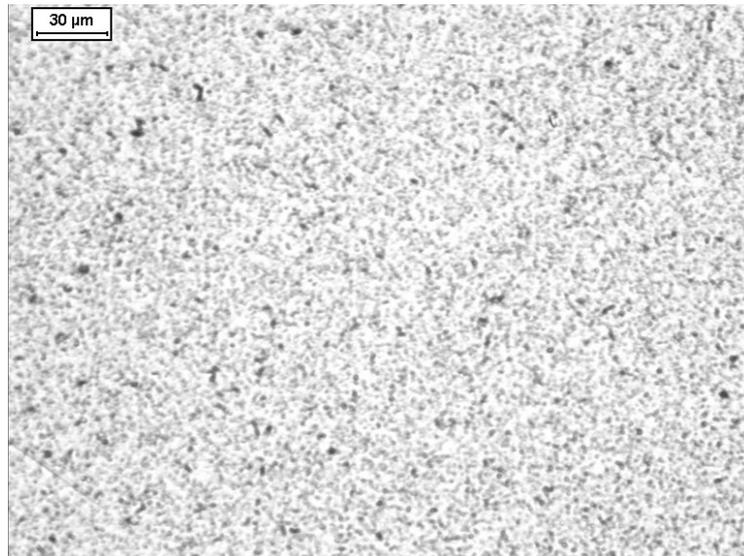


Figura 13: Seção transversal da liga de alumínio AA6004, após ataque químico com 0,5%HF

As partículas cinzentas delineadas nas Figuras 12 e 13 provavelmente são partículas de $MnAl_6$, já as pequenas áreas escuras são partículas de fases insolúveis, como as fases que contém magnésio (Mg_2Si). Em ligas da série 6xxx, a fase intermetálica mais comum é Mg_2Si , mas também podem estar presentes na microestrutura partículas de Silício em excesso^[10], não observadas contudo nas micrografias das figuras 12 e 13.

5.2 ENSAIOS MECÂNICOS

Na figura 14 pode-se observar o gráfico referente a tensão convencional em função da deformação convencional obtidos no ensaio de tração dos 5 corpos-de-prova estudados.

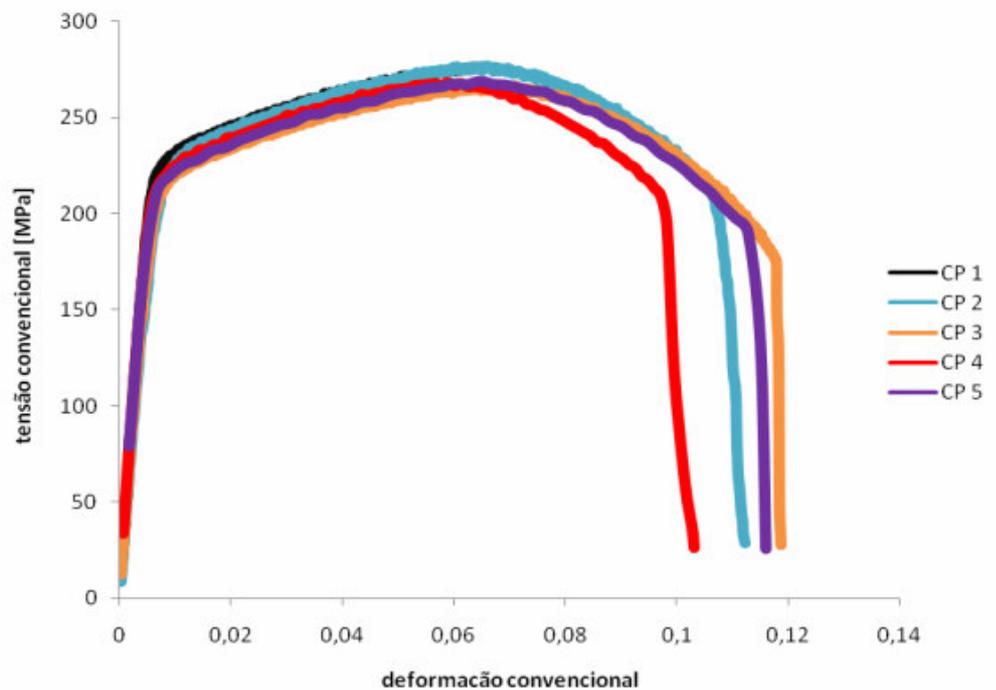


Figura 14: Curvas obtidas nos ensaios de tração da liga AA6004

Como abaixo do limite de escoamento não existe deformação plástica e após o limite de resistência a deformação plástica não é uniforme, foram construídos os gráficos representados pelas figuras 15 e 16. Na figura 15 pode-se observar os gráficos tensão verdadeira x deformação verdadeira referentes aos cinco ensaios de tração realizados, de onde foram extraídos dados como limite de escoamento e limite de resistência a tração do material, na Figura 16 pode-se observar o gráfico de tensão verdadeira x deformação verdadeira plástica de um dos corpos de prova ensaiados, de onde são extraídos os valores de H e n .

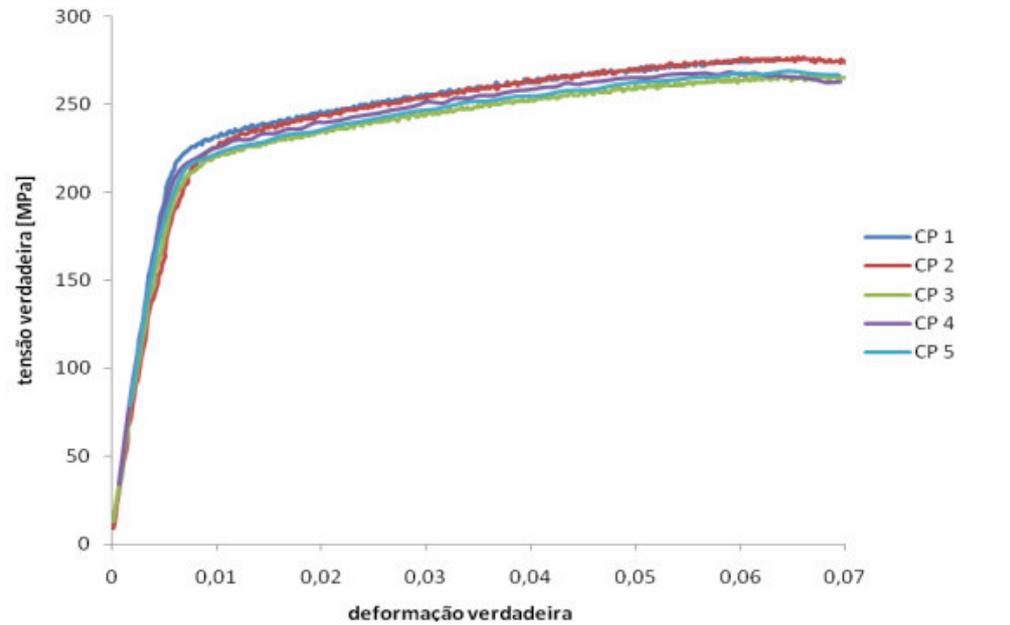


Figura 15: Curvas obtidas nos ensaios de tração da liga AA6004

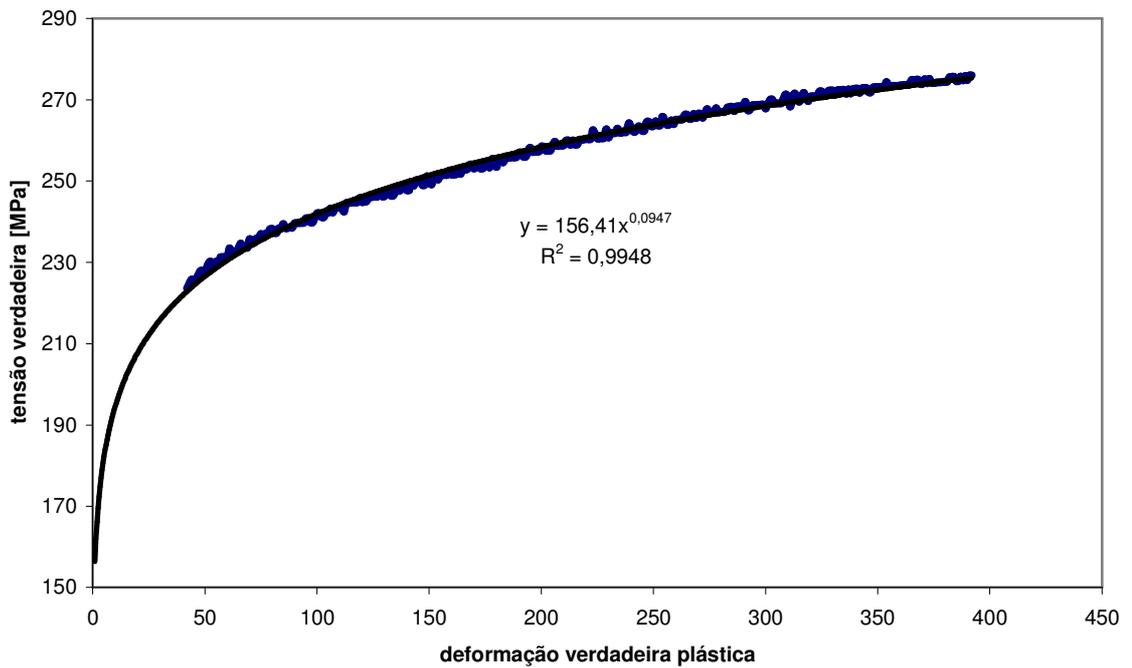


Figura 16: Curvas obtidas em um dos corpos de prova ensaiados a tração.

Os resultados do comportamento a tração da liga AA6004 com seus respectivos desvios padrão podem ser observados na tabela 2.

Tabela 2: comportamento a tração da liga AA6004 e seus respectivos desvios padrão

| | |
|--------------------------------------|----------------|
| Limite de escoamento [MPa] | (216 ± 4,92) |
| Limite de resistência à tração [MPa] | (255 ± 4,58) |
| AT [%] | (20,25 ± 0,21) |
| RA [%] | 71,7 |
| H | (296 ± 79,8) |
| n | (0,077 ± 0,02) |

Comparando-se os resultados obtidos com os resultados de ligas citadas no Metals Handbook ^[9,11] e em outro trabalho ^[5], (tabela 3) percebe-se que a liga AA6004 em estudo apresenta valores de propriedades mecânicas típicas desta classe de materiais.

Tabela 3: dados do comportamento mecânico de ligas da série 6xxx comparados à liga estudada neste trabalho.

| Ligas | Limite de escoamento [MPa] | Limite de resistência à tração [MPa] | Referência |
|--------------|-----------------------------------|---|-------------------|
| AA6004 | (216 ± 4,92) | (255 ± 4,58) | Este trabalho |
| AA6061 | 275 | 310 | [9] |
| AA6261 | (278 ± 10,1) | (305 ± 4,5) | [5] |
| AA6351 | (331 ± 15,4) | (355 ± 10,7) | [5] |
| AA6005 – T5 | 240 | 260 | [11] |
| AA6009 - T4 | 130 | 235 | [11] |
| AA6010 | 170 | 255 | [11] |
| AA6070 | 170 | 315 | [11] |

Na tabela 4 pode se observar os valores de H e n das ligas AA6004 (obtidos neste trabalho, nos ensaios de tração) e AA6061, onde pode-se perceber que os valores são coerentes, pois a liga menos resistente (AA6004) é também a mais dúctil.

Tabela 4: dados do comportamento mecânico de ligas AA6004 e AA6061

| Ligas | H | n | RA[%] | Referência |
|--------|-----|-------|-------|---------------|
| AA6004 | 296 | 0,077 | 71,7 | Este trabalho |
| AA6061 | 365 | 0,042 | 58 | [9] |

Foram obtidos os gráficos referentes dos ensaios de compressão à temperatura ambiente, com 5 velocidades de solitação diferentes, 1 mm/min (figura 17), 5 mm/min (figura 18), 30mm/min (figura 19), 100mm/min (figura 20) e 500 mm/min (figura 21).

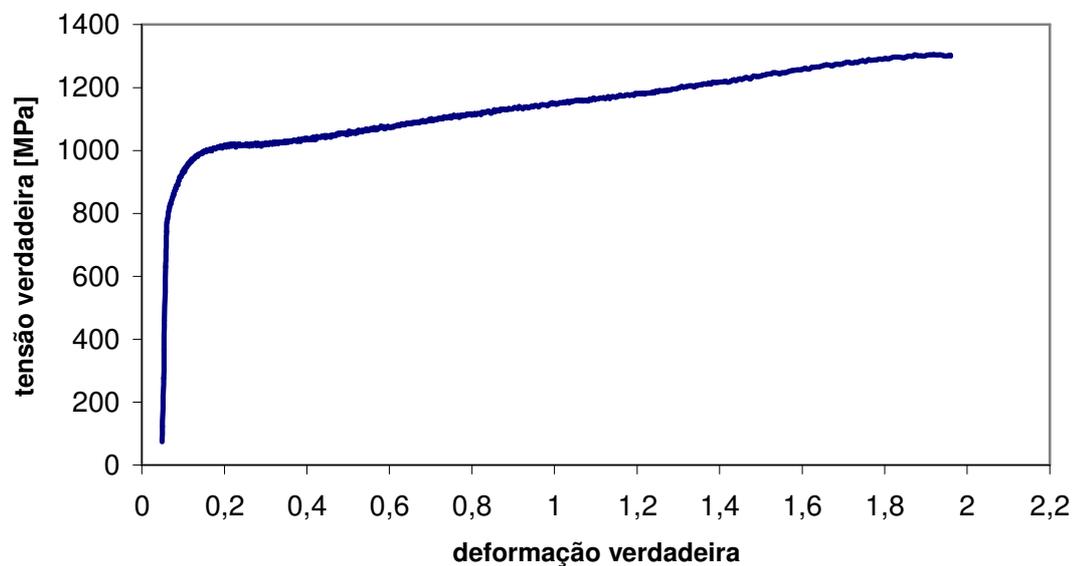


Figura 17: Curvas obtidas através do ensaio de compressão a 1mm/min

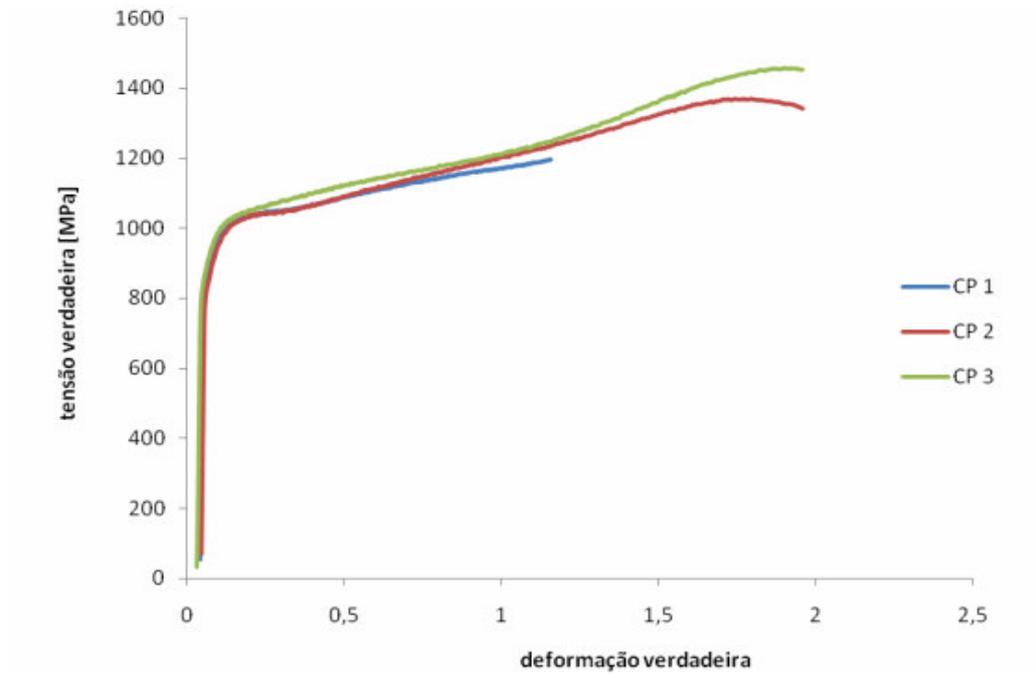


Figura 18: Curvas obtidas através do ensaio de compressão a 5mm/min

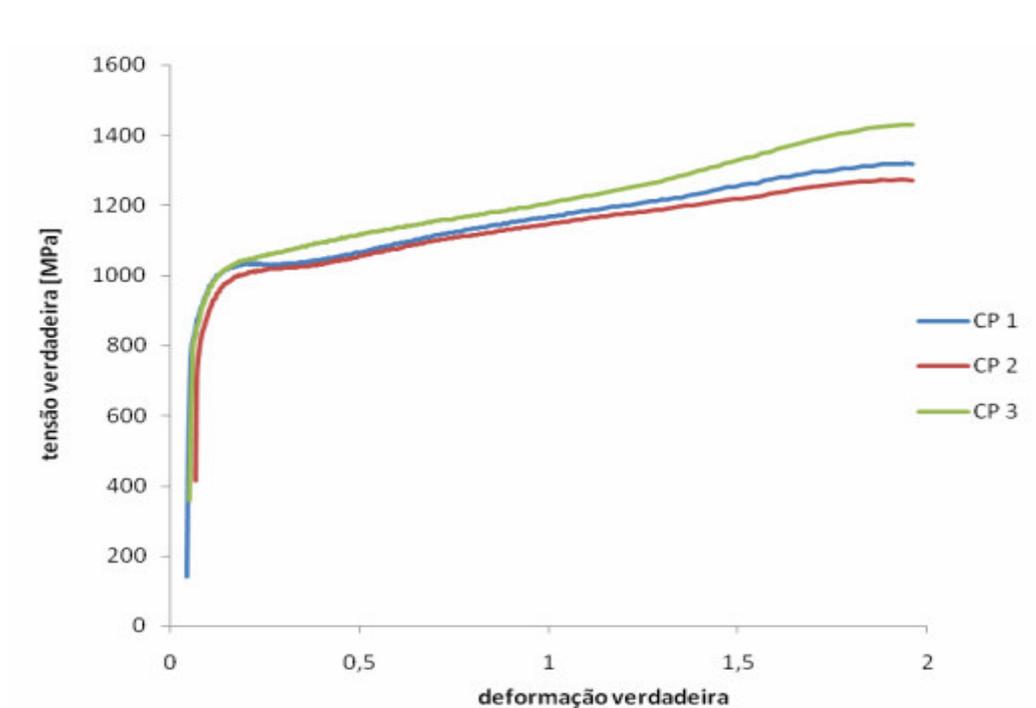


Figura 19: Curvas obtidas através do ensaio de compressão a 30mm/min

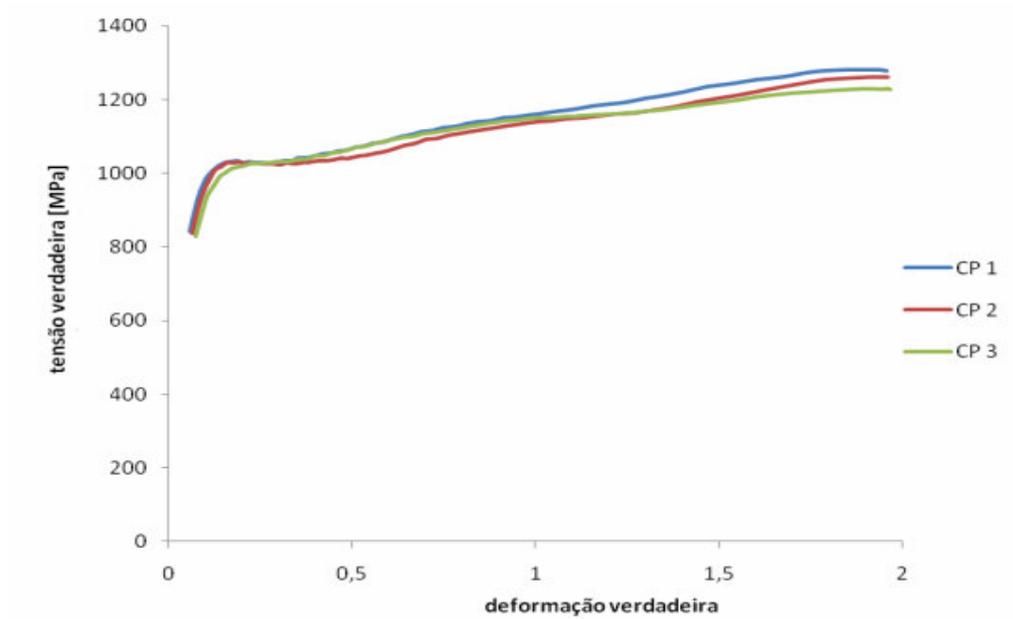


Figura 20: Curvas obtidas através do ensaio de compressão a 100mm/min

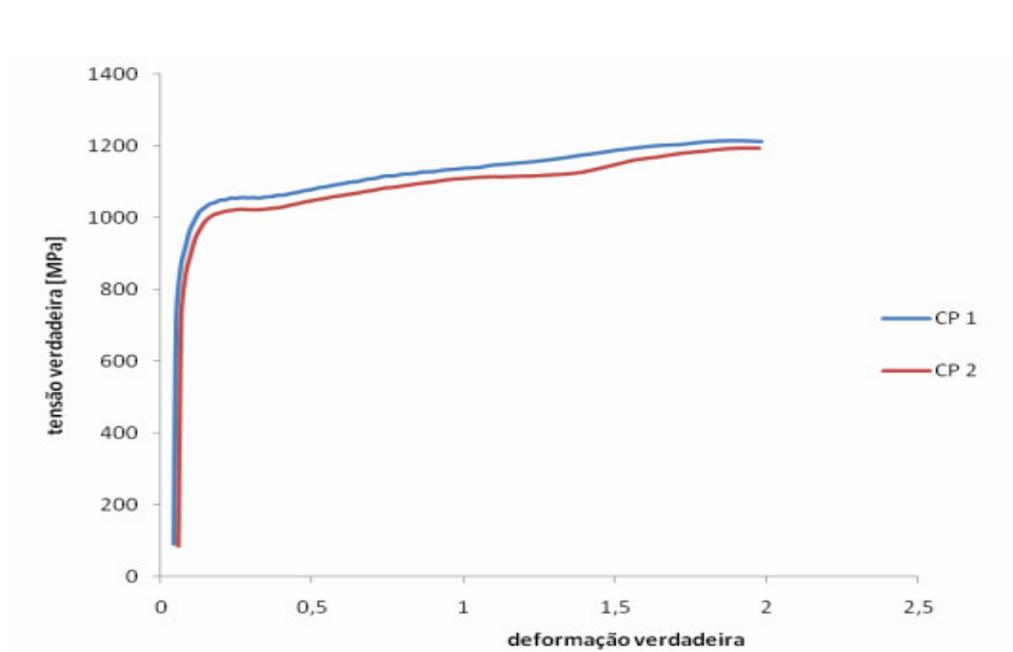


Figura 21: Curvas obtidas através do ensaio de compressão a 500mm/min

Os resultados obtidos do comportamento da liga AA6004 através dos ensaios de compressão e seus respectivos desvios padrão podem ser observados na tabela 5, onde nota-se a insensibilidade à velocidade de solitação nos parâmetros avaliados, considerando-se os

desvios-padrão obtidos. A mesma conclusão pode ser obtida nas figuras 22 a 24, onde percebe-se que as diferenças de valores entre as propriedades são pequenas.

Tabela 5: comportamento da liga AA6004 e seus respectivos desvios padrão

| Velocidade de solicitação [mm/min] | Limite de escoamento à tração [MPa] | H [MPa] | n |
|---|--|---------------------|----------------------|
| 5 | $(867,03 \pm 19,88)$ | $(952,8 \pm 24,69)$ | $(0,2392 \pm 0,027)$ |
| 30 | $(829,76 \pm 18,18)$ | $(954,7 \pm 19,74)$ | $(0,2075 \pm 0,021)$ |
| 100 | $(836,18 \pm 10,01)$ | $(996,1 \pm 8,29)$ | $(0,1434 \pm 0,009)$ |
| 500 | $(847,95 \pm 14,78)$ | $(884,6 \pm 19,09)$ | $(0,2167 \pm 0,003)$ |

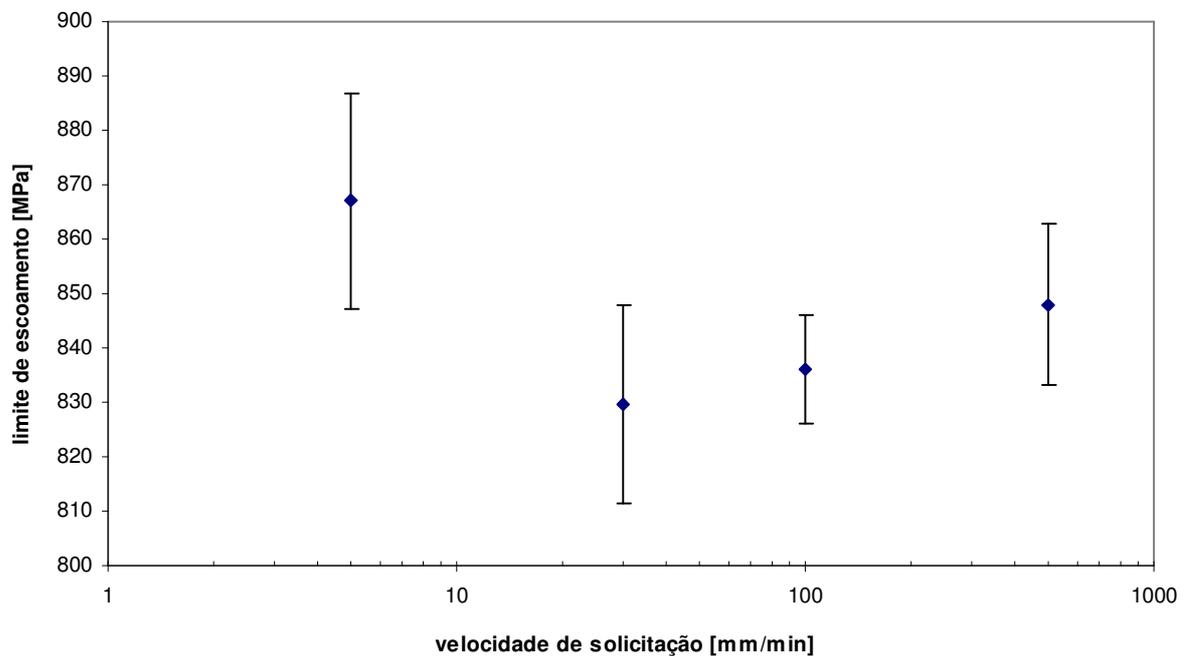


Figura 22: gráfico obtido à partir dos dados de limite de escoamento do material a 23°C.

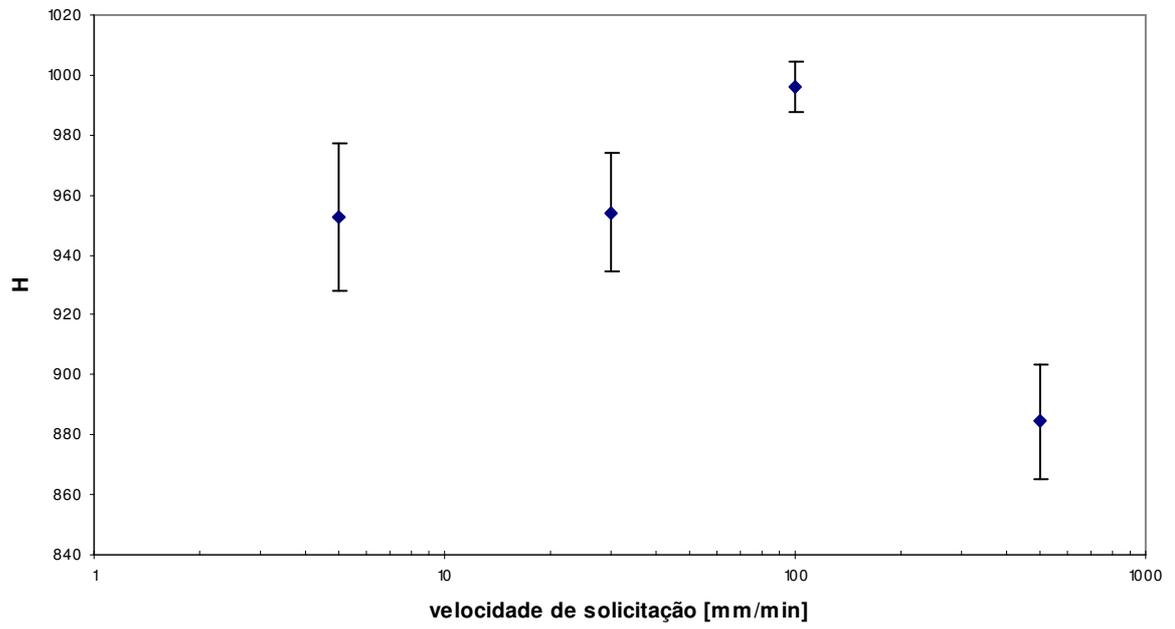


Figura 23: gráfico obtido à partir dos dados de H do material a 23°C.

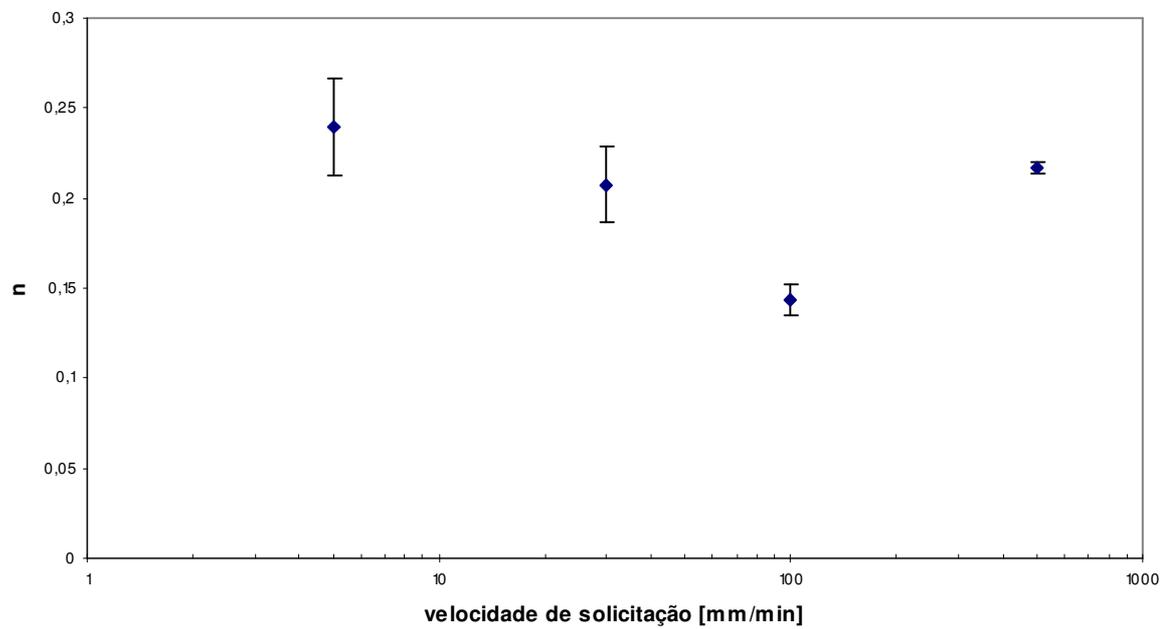


Figura 24: gráfico obtido à partir dos dados de n do material a 23°C.

Nas figuras 25, 26, 27 e 28 pode-se observar os gráficos referentes aos ensaios realizados a temperatura de 300°C, Na figura 29, pode-se observar o gráfico referente ao limite de escoamento na temperatura de 300°C em diferentes velocidades de solitação onde se nota que a tensão é praticamente constante, indicando a não ocorrência de encruamento, fazendo com que a expressão de Hollomon não seja mais válida, impossibilitando a determinação dos valores de H e n.

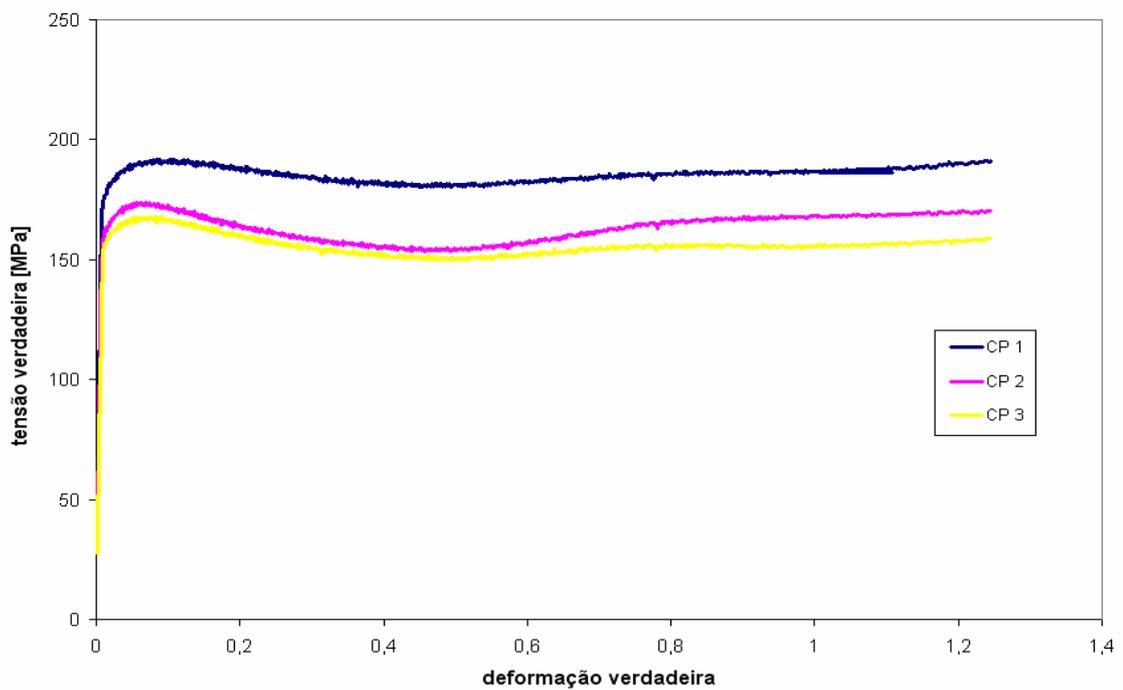


Figura 25: Curvas referentes aos ensaios realizados a temperatura de 300°C , na velocidade de 5 mm/min.

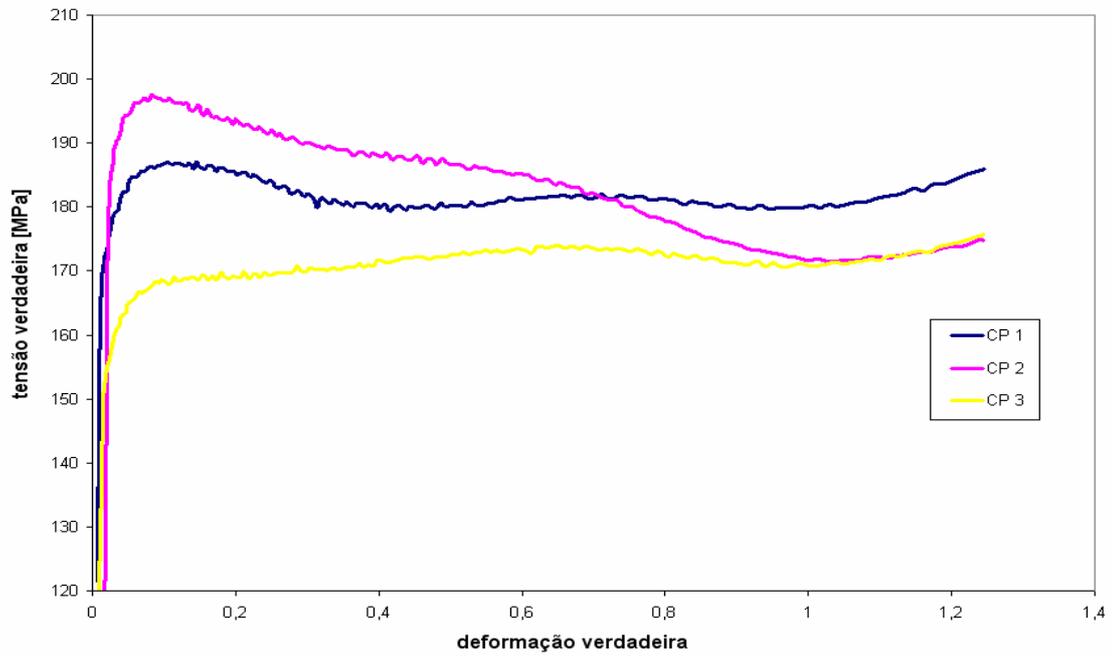


Figura 26: Curvas referentes aos ensaios realizados a temperatura de 300°C , na velocidade de 30 mm/min.

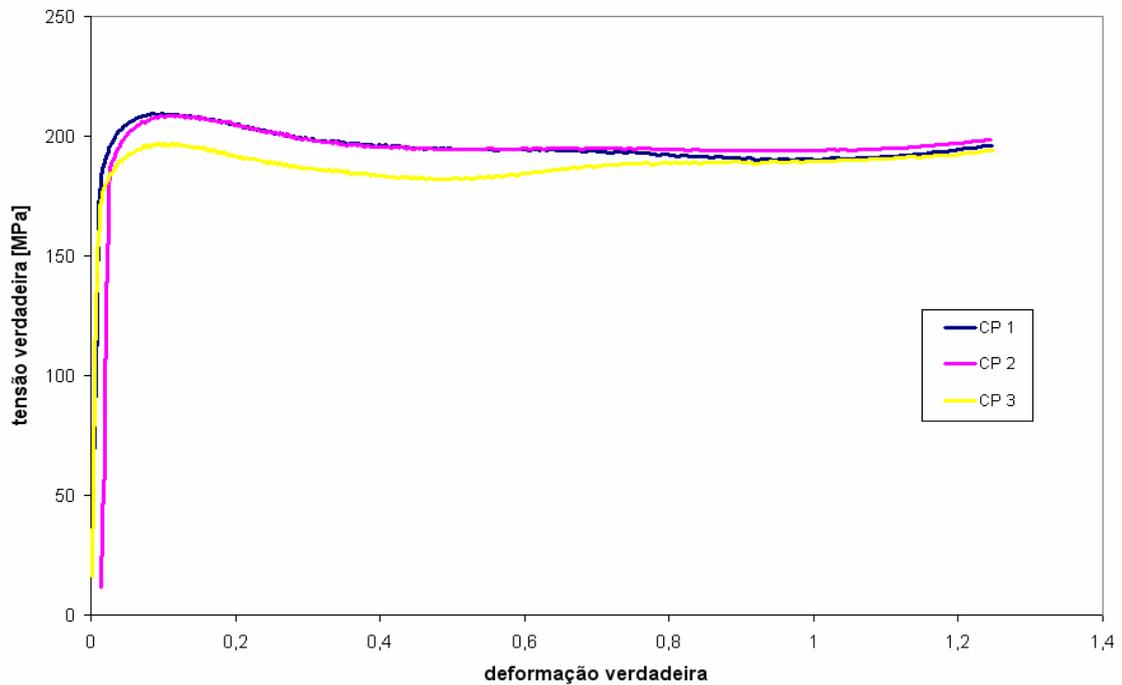


Figura 27: Curvas referentes aos ensaios realizados a temperatura de 300°C , na velocidade de 100 mm/min.

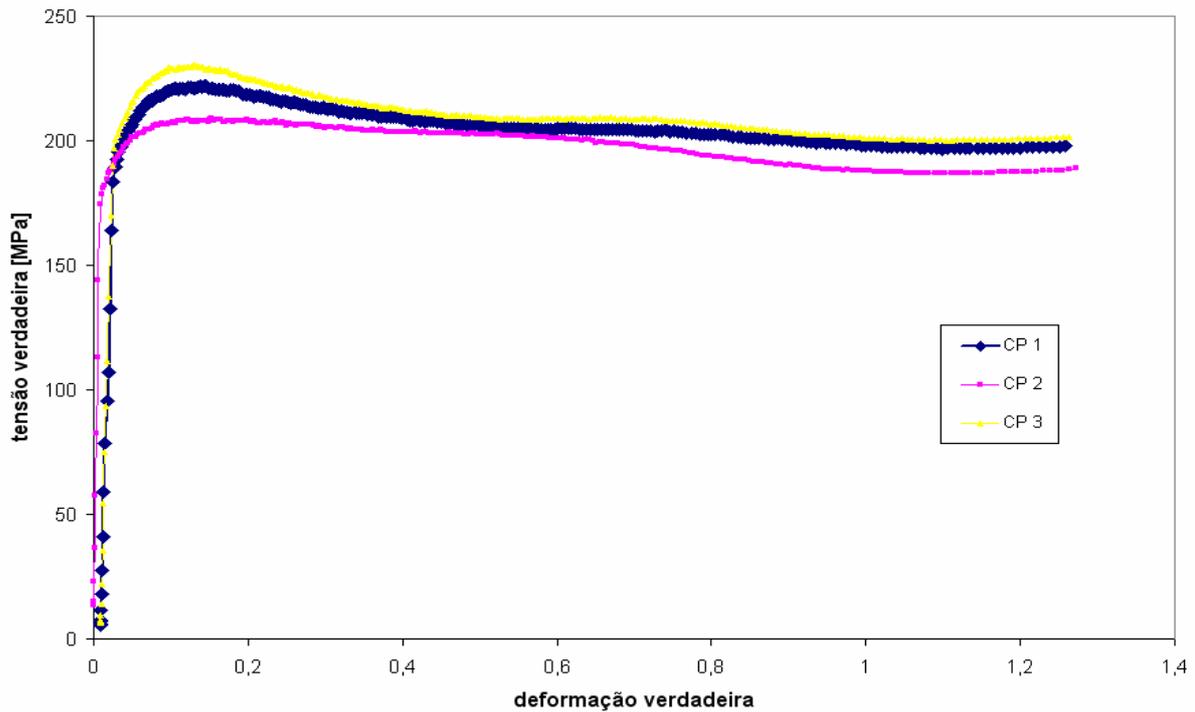


Figura 28: Curvas referentes aos ensaios realizados a temperatura de 300°C , na velocidade de 500 mm/min.

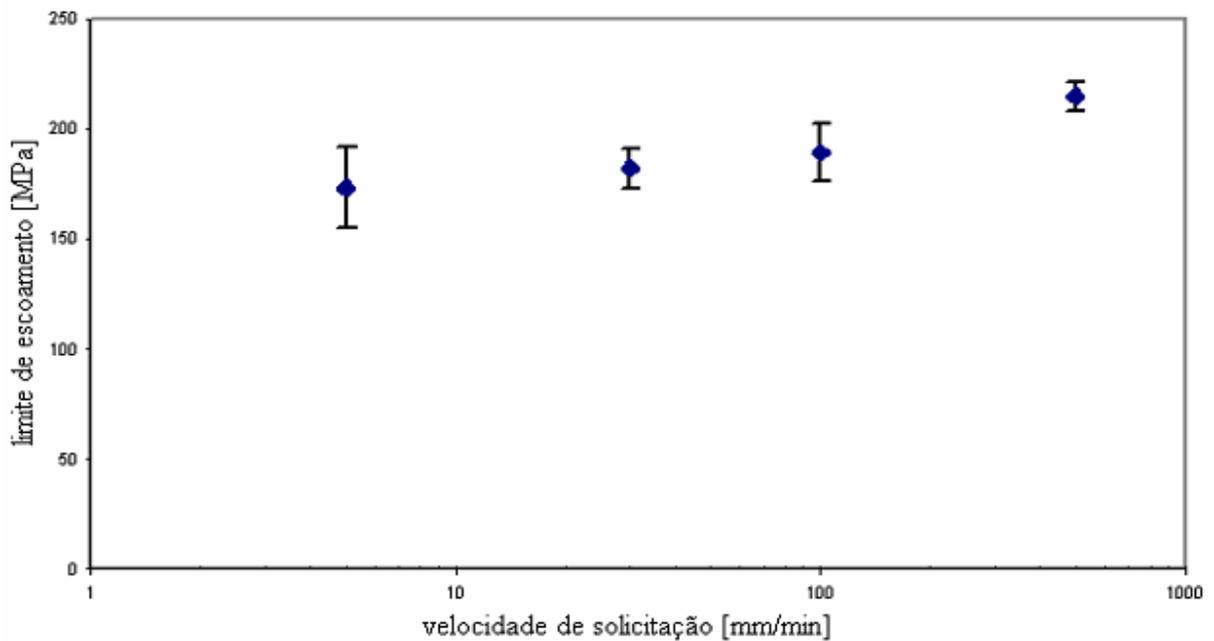


Figura 29: gráfico obtido à partir dos dados de limite de escoamento do material a 300°C.

Já nas figuras 30, 31, 32 e 33 pode-se observar os gráficos referentes aos ensaios realizados a temperatura de 500°C, onde se observa que quanto maior a velocidade de solitação,

maior é a tensão necessária para se deformar o material, o que é confirmado pela figura 32, onde se observa o gráfico referente ao limite de escoamento na temperatura de 500°C em diferentes velocidades de solitação. Mais uma vez, como na temperatura de 500°C não existe mais a região de encruamento, e portanto a expressão de Hollomon não é mais válida.

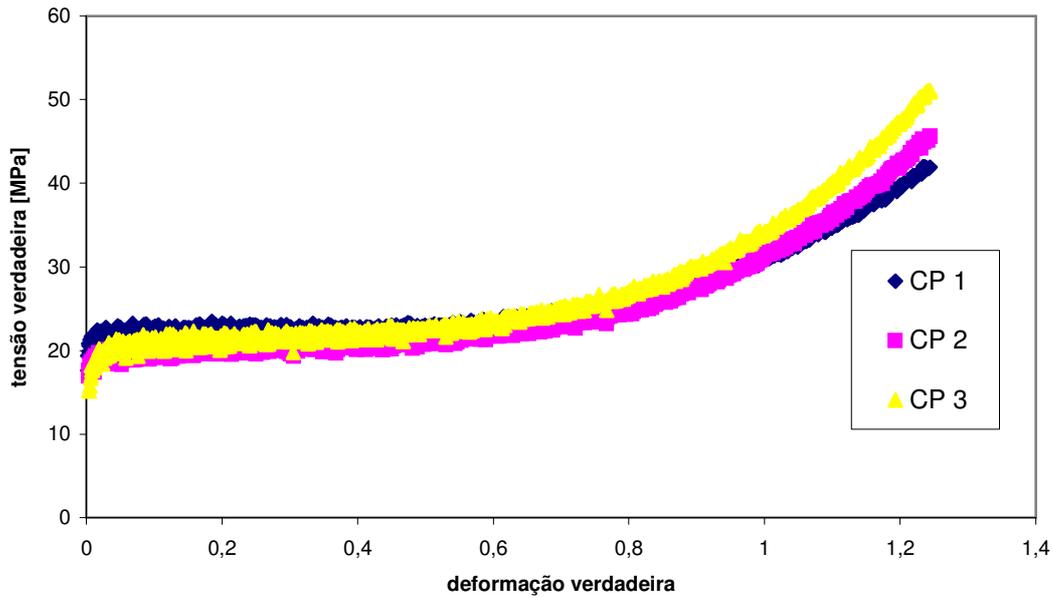


Figura 30: Curvas referentes aos ensaios realizados a temperatura de 500°C , na velocidade de 5 mm/min.

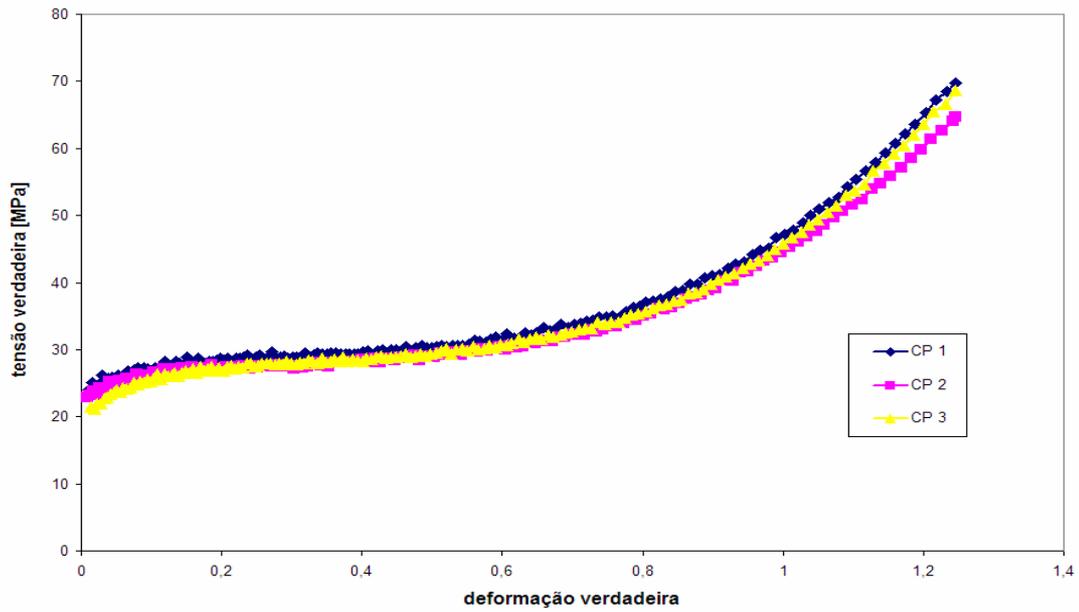


Figura 31: Curvas referentes aos ensaios realizados a temperatura de 500°C , na velocidade de 30 mm/min.

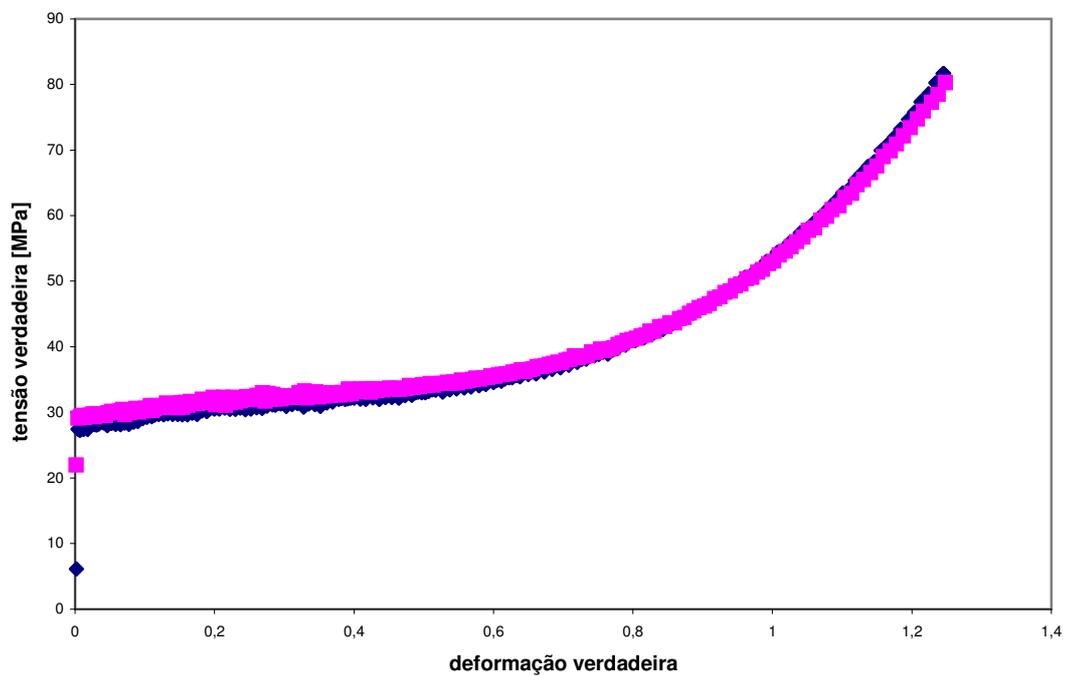


Figura 32: Curvas referentes aos ensaios realizados a temperatura de 500°C , na velocidade de 100 mm/min.

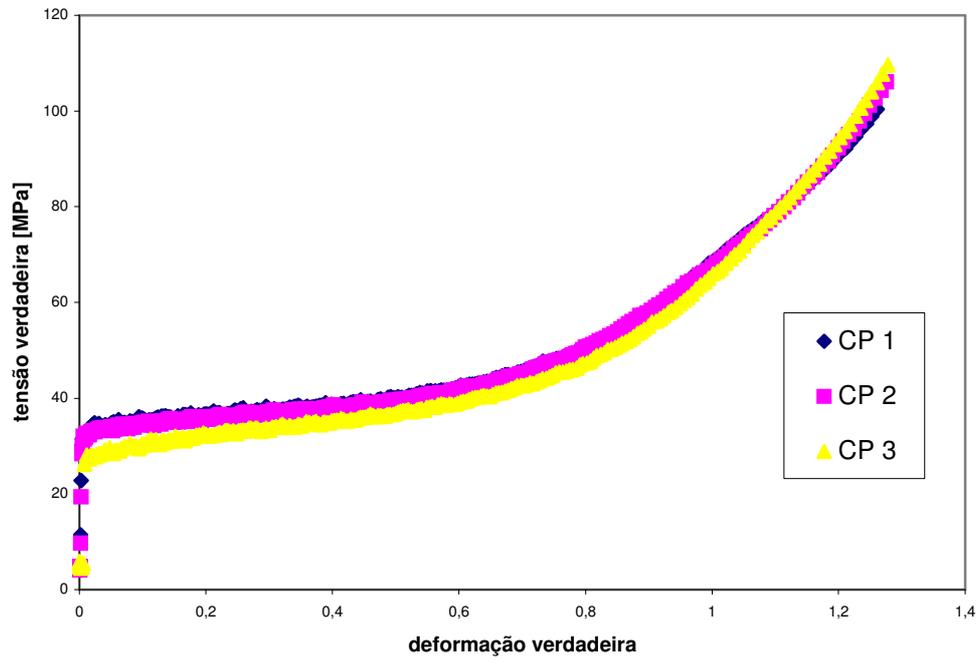


Figura 33: Curvas referentes aos ensaios realizados a temperatura de 500°C , na velocidade de 500 mm/min.

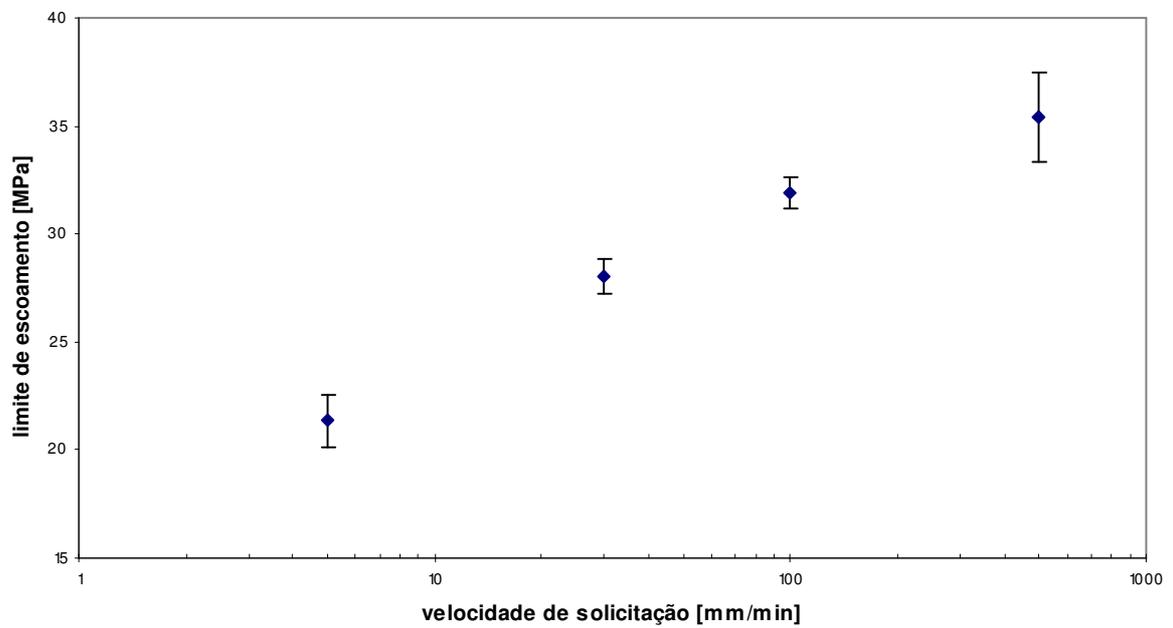


Figura 34: gráfico obtido à partir dos dados de limite de escoamento do material a 500°C.

Para que se possa discutir a influência da velocidade de solitação nos ensaios de compressão realizados, foram obtidos os gráficos 35, 36 e 37. Na figura 35, pode-se notar que não há influência monotônica da velocidade de solitação nos ensaios realizados a temperatura ambiente, o que poderia encontrar justificativa no uso inadequado dos lubrificantes, já que se esperaria praticamente nenhuma influência, ou o aumento da tensão necessária a deformação com o aumento da velocidade de solitação. Já nas figuras 36 e 37, referentes aos ensaios a 300°C e 500°C, observa-se que a influência da velocidade é a esperada, ou seja, conforme o aumento da velocidade, maior é a tensão necessária para se deformar o material.

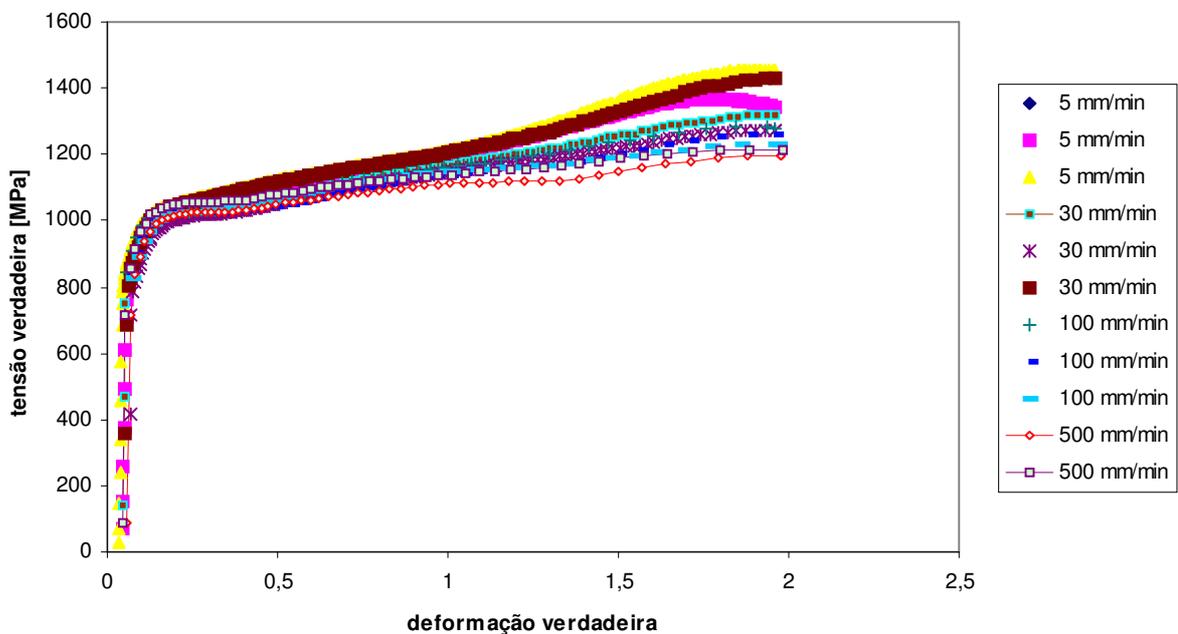


Figura 35: Curvas tensão-deformação verdadeiras referentes a temperatura de 23°C.

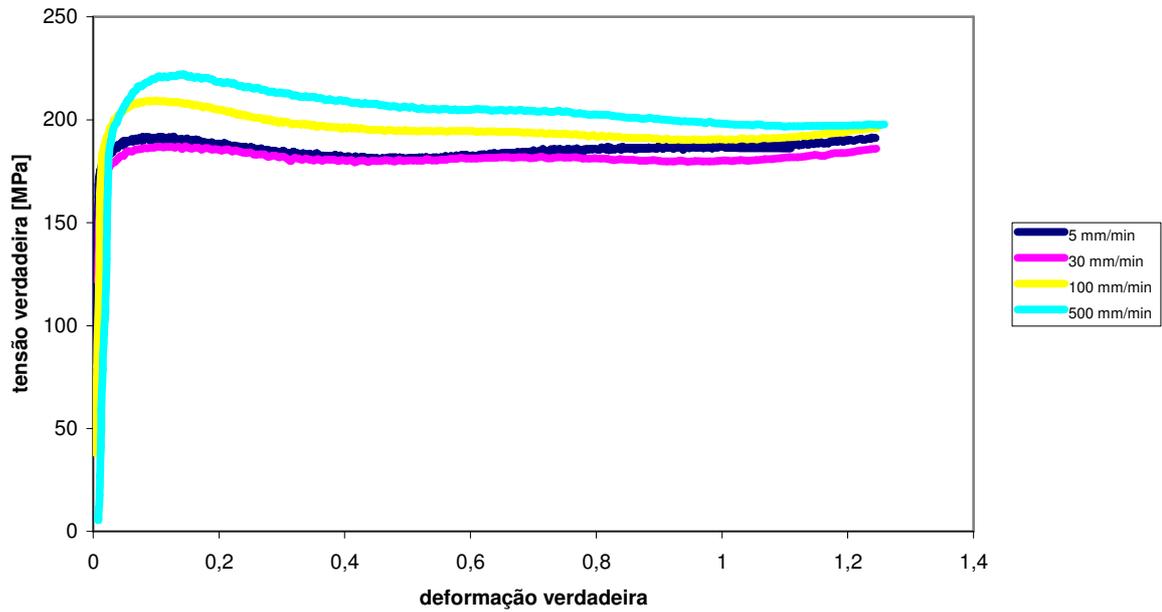


Figura 36: Curvas tensão-deformação verdadeiras referentes a temperatura de 300°C.

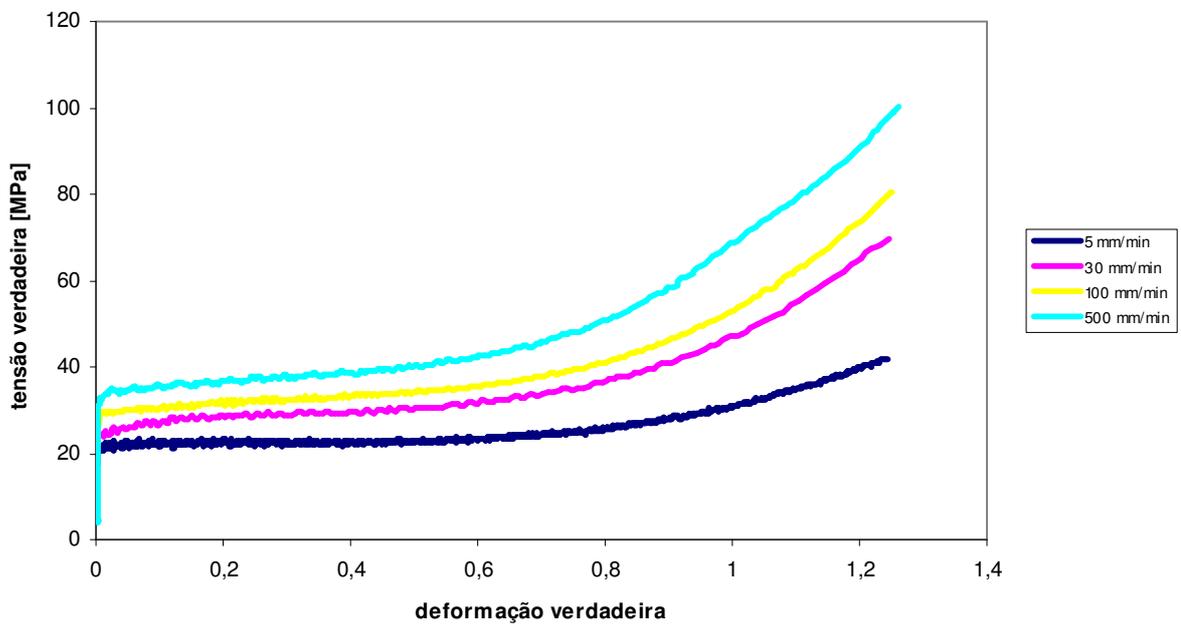


Figura 37: Curvas tensão-deformação verdadeiras referentes a temperatura de 500°C.

Nas figuras 38 a 41 pode se observar claramente a influência da temperatura nos ensaios realizados, onde se observa que independente da velocidade de solitação, conforme o aumento da temperatura, menor é a tensão necessária para se deformar o material. Assim, pode-se implementar o cálculo dos C e m, mostrando a influência da taxa de deformação média (cujos valores são apresentados na Tabela 6) na tensão necessária para deformações de 0,2, 0,4 e 1,0. Contudo, os valores de C e m mostrados nas tabelas 7, 8 e 9 apenas permitem concluir que a sensibilidade a taxa de deformação (m) assume valores entre 0,05 e 0,07 a 300°C (indicando pequena influência da taxa de deformação) para valores entre 0,12 e 0,18 a 500°C, mostrando que a sensibilidade a taxa de deformação aumenta quanto maior a temperatura de conformação empregada. Mais uma vez, provavelmente devido a problemas de lubrificação, não se pode afirmar nada sobre os dados a 23°C, notando-se que os desvios-padrão, particularmente dos valores de m, chega a ter a magnitude do valor médio obtido nas três deformações estudadas.

Tabela 6: valores médios das taxas de deformação.

| Velocidades de solitação [mm/min] | 5 | 30 | 100 | 500 |
|-----------------------------------|------|-----|-----|-----|
| $\dot{\epsilon}$ | 0,01 | 0,1 | 0,3 | 1,3 |

Tabela 7: valores obtidos nos cálculos de C e m, para a temperatura ambiente.

| T | 23°C | | |
|------------------|-----------------|-----------------|---------------|
| $\dot{\epsilon}$ | 0,2 | 0,4 | 1 |
| C | 1380,2 ± 244 | 1426 ± 307,6 | 1182 ± 1,4 |
| m | 0,15 ± 0,11 | 0,23 ± 0,2 | 0,2 ± 0,01 |

Tabela 8: valores obtidos nos cálculos de C e m para 300°C.

| T | 300°C | | |
|------------------|------------|------------|------------|
| $\dot{\epsilon}$ | 0,2 | 0,4 | 1 |
| | 219,7 | 208,9 | 197 |
| C | $\pm 5,6$ | ± 10 | $\pm 2,6$ |
| m | 0,05 | 0,07 | 0,05 |
| | $\pm 0,02$ | $\pm 0,06$ | $\pm 0,04$ |

Tabela 9: valores obtidos nos cálculos de C e m para 500°C.

| T | 500°C | | |
|------------------|------------|------------|------------|
| $\dot{\epsilon}$ | 0,2 | 0,4 | 1 |
| | 38,5 | 40,8 | 65,5 |
| C | $\pm 4,5$ | $\pm 2,5$ | $\pm 10,5$ |
| m | 0,12 | 0,12 | 0,18 |
| | $\pm 0,04$ | $\pm 0,02$ | $\pm 0,07$ |

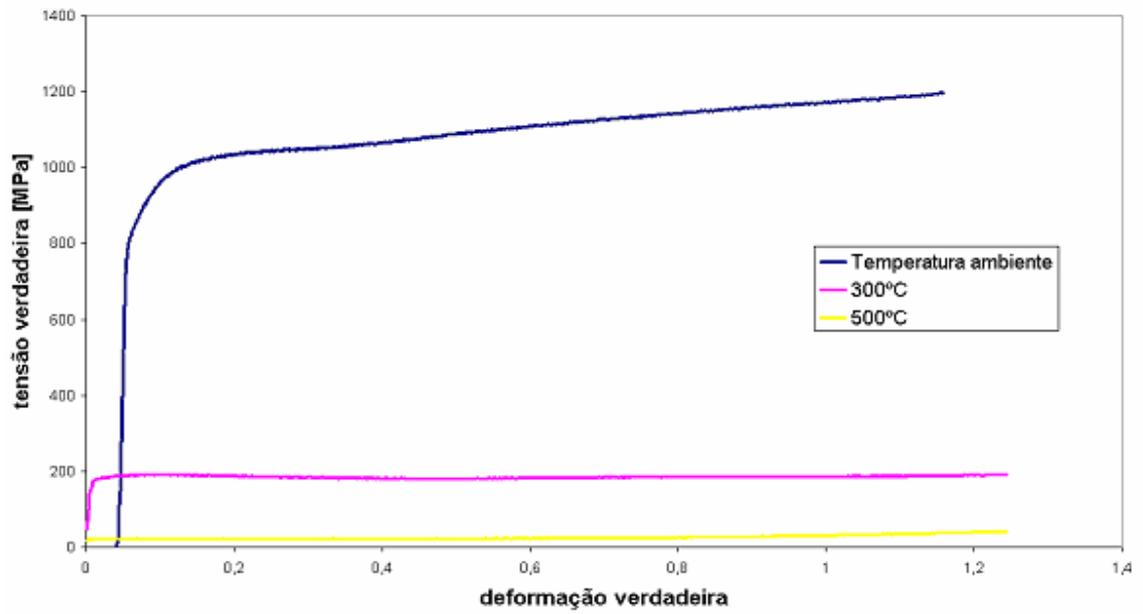


Figura 38: Curvas referentes a velocidade de solitação de 5 mm/min.

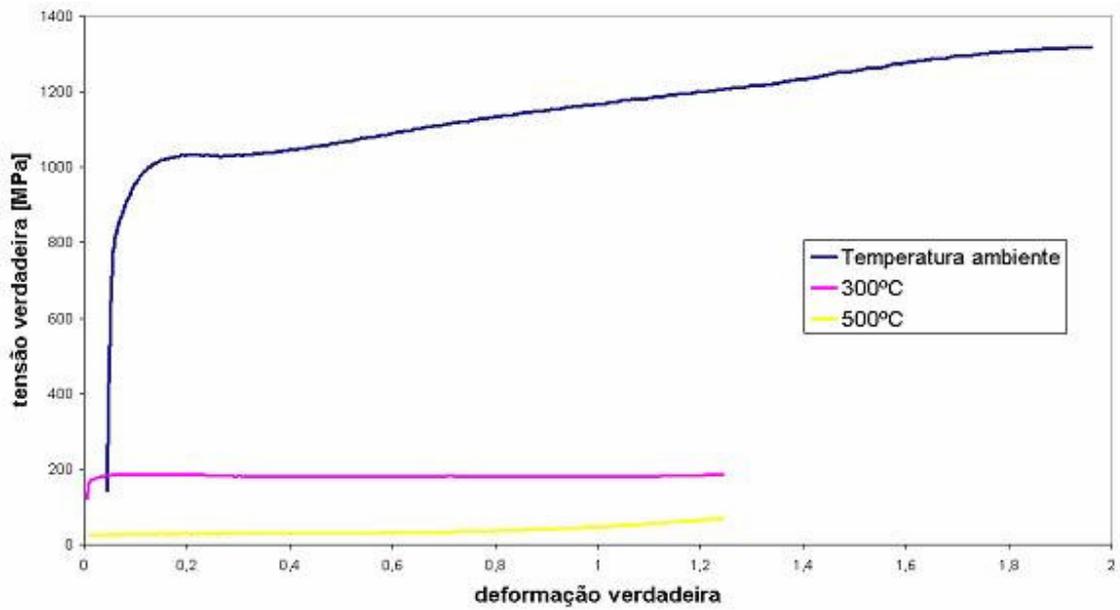


Figura 39: Curvas referentes a velocidade de solitação de 30 mm/min.

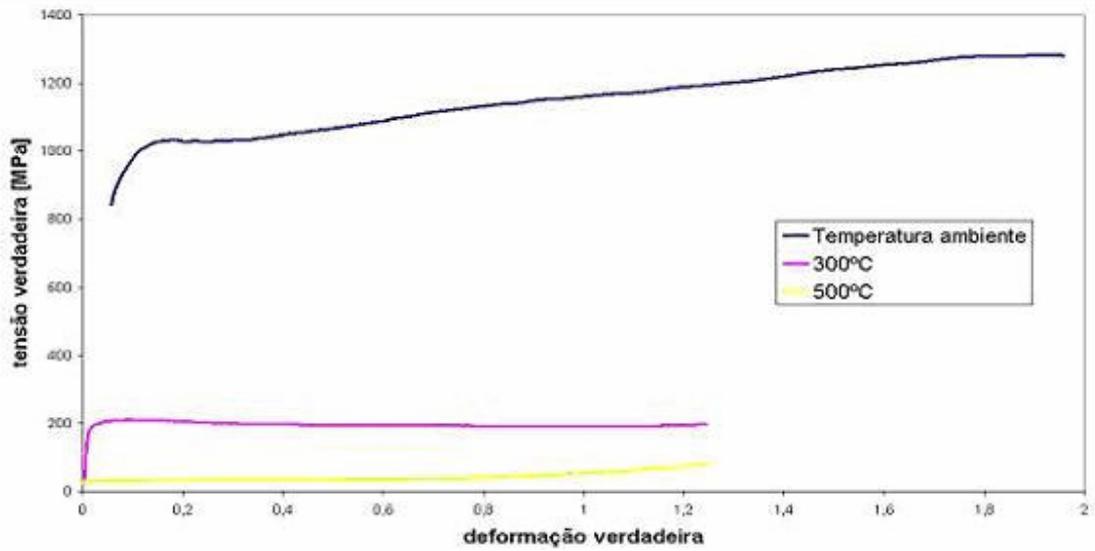


Figura 40: Curvas referentes a velocidade de solitação de 100 mm/min.

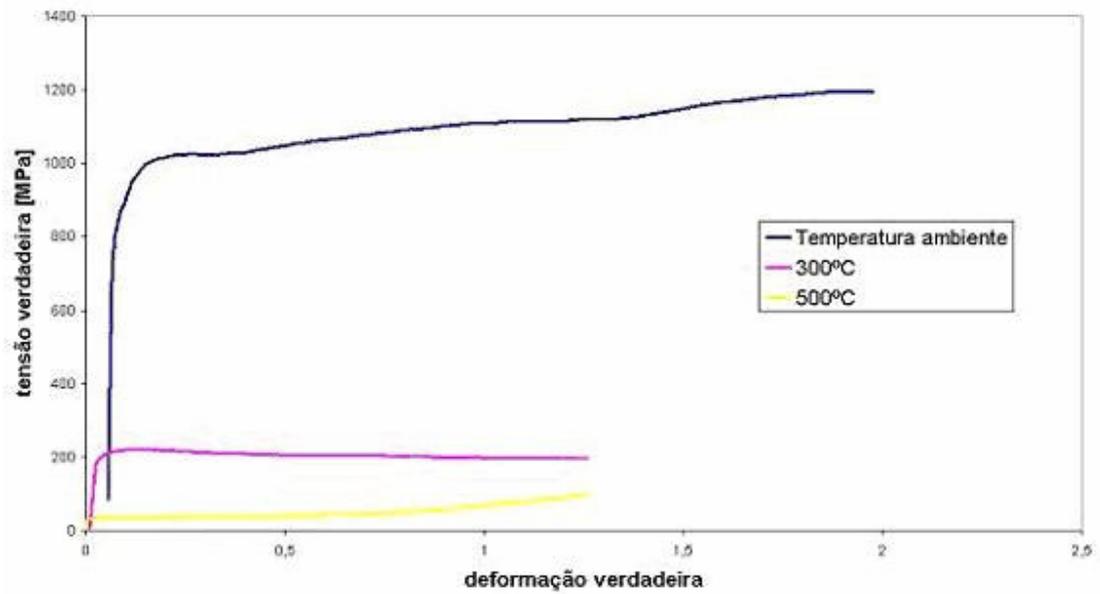


Figura 41: Curvas referentes a velocidade de solitação de 500 mm/min.

6. CONCLUSÕES

Do trabalho realizado pode se concluir que quanto maior a temperatura de ensaio, menor a tensão necessária à uma dada deformação. Contudo, pode-se afirmar que em temperaturas acima de 300°C não existe mais a região de encruamento, portanto, a expressão de Hollomon não é mais válida. As taxas de deformação tiveram uma influência significativa nos ensaios nas temperaturas mais elevadas, obtendo-se valores de sensibilidade à taxa de deformação entre 0,05 e 0,07 a 300°C (indicando pequena influência da taxa de deformação) para valores entre 0,12 e 0,18 a 500°C.

BIBLIOGRAFIA:

- [1] DIETER, George Ellwood. Metalurgia mecânica. 2. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, c1981. 653 p.
- [2] GOMES, Mario Rennó. Emprego do alumínio e suas ligas. São Paulo: ABM, 1976. 101 p.
- [3] GARCIA, Amauri; SPIM, Jaime Alvares; SANTOS, Carlos Alexandre dos. Ensaios dos materiais. Rio de Janeiro: LTC, c2000. 247 p.
- [4] CALLISTER, William D. Ciência e engenharia de materiais: uma introdução. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, c2008. 705 p.
- [5] FONSECA, JR., Taylor Mac Intyer. Métodos de previsão da curva deformação-viva em fadiga para as ligas de alumínio AA6261-T6 e AA6351-T6. 2003. 96p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, 2003.
- [6] ABNT NBR 6152/92 – Materiais metálicos – determinação das propriedades mecânicas à tração – métodos de ensaios.
- [7] ASTM E8M – 04 – Standart test method for tension testing of Metallic Materials [Metric].
- [8] ASTM E09-89, Standard test methods of compression testing of metallic materials at room temperature. ASTM.
- [9] Metals handbook, vol.19: “Fatigue and fracture”. ASM, M.Park, 1990, 10^a ed.
- [10] AMERICAN SOCIETY FOR METALS. BOYER, HOWARD E.; ASM. Metals handbook. 9th. ed.Ohio: ASM International, c1989, c1978.v9.
- [11] AMERICAN SOCIETY FOR METALS. BOYER, HOWARD E.; ASM. Metals handbook. 9th. ed.Ohio: ASM International, c1989, c1978.v2.

[12] Comportamento Mecânico dos Materiais. **Centro universitário da FEI**. Disponível em:<<http://www.fei.edu.br/~rodrMagn/MR7210/MR7210-08.pdf>>. Acesso em 27 abr. 2009.