

# ENSAIOS DE COMPRESSÃO EM AÇOS PARA FIXADORES<sup>1</sup>

Francisco Boratto<sup>2</sup>  
Leandro Marchi<sup>3</sup>  
José Eustáquio Paes<sup>4</sup>  
Ubiratan Tupinambás<sup>5</sup>

## Resumo

É objetivo deste trabalho desenvolver a metodologia de análise de dados gerados em ensaios de compressão utilizando “máquina universal de ensaios”, sem uso de extensômetro, e aplicar a metodologia para avaliar três tipos de aço/fluxo de fabricação de arames, utilizados para fabricação de fixadores. A comparação entre os diversos tipos de aço/fluxo de fabricação foi feita através do “coeficiente de resistência”, K, na equação empírica que relaciona a deformação plástica verdadeira com a tensão verdadeira, chamada equação de Hollomon ( $\sigma = K\varepsilon^n$ ). A esta equação foi adicionada uma correção para o efeito do barrilamento,  $P\varepsilon^m$ , e os quatro parâmetros ajustados através de regressão não-linear. Foram estudados os seguintes aços ABNT (SAE): 1003, 10B22 e 5135, em diversas condições de processamento envolvendo fio-máquina (FM), arame tratado com esferoidização final (EF) e arame tratado com esferoidização intermediária no processo de trefilação (EP). Foi encontrado que os menores valores de K ocorrem para as condições de esferoidização no processo de trefilação associadas aos aços de baixo teor de carbono e que este valor é proporcional ao limite de escoamento em compressão, para cada tipo de tratamento.

**Palavras-chave:** Compressão; Arame; Fixadores; Hollomon.

## COMPRESSION TEST IN STEELS FOR FASTENERS

### Abstract

The objective of this work is to develop the methodology of analysis of data generated in compression tests using "standard compression machine", without the use of extensometer, and to apply the methodology to evaluate several types of steel/flow of production of Belgo, used for fasteners production. The comparison among the several types of production steel/flow was made through the "resistance" coefficient, K, in the empiric equation that relates the true plastic deformation with the true tension, called Hollomon's equation ( $\sigma = K\varepsilon^n$ ). To this equation a term representing the friction between dies and sample was added,  $P\varepsilon^m$ , and the four empirical parameters adjusted by non-linear optimization techniques. The analyzed steels were: SAE1003, SAE10B22 and SAE5135, in several processing conditions involving wire rod (FM), wire treated with final annealing (EF) and wire treated with annealing in the process (EP). As a conclusion it was found that the smallest values of K are associated with the EP conditions associated to low carbon grade.

**Key words:** Compression test; Wire; Fasteners.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 62º Congresso Anual da ABM – Internacional, 23 a 27 de julho de 2007, Vitória – ES, Brasil.

<sup>2</sup> Membro da ABM, Físico, M.Sc., Ph.D., Consultor da Gerência Técnica, Belgo Arcelor-Brasil.

<sup>3</sup> Membro da ABM, Engenheiro Mecânico, M.Sc., Controle de Processo, Belgo Arcelor-Brasil

<sup>4</sup> Membro da ABM, Engenheiro Metalurgista, Especialista da Gerência Técnica, Belgo Arcelor-Brasil.

<sup>5</sup> Membro da ABM, Engenheiro Metalurgista, Gerente de Produto, Belgo Bekaert Arames.

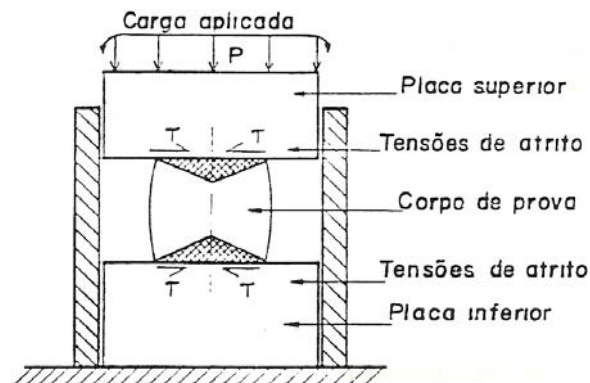
## 1 INTRODUÇÃO

A maioria dos metais é submetida a algum processo de conformação mecânica (laminação, forjamento etc) em alguma etapa de sua produção. Nos processos de conformação mecânica de fixadores, bem como em todas outras operações que envolvem processos de compressão, as deformações totais alcançadas excedem largamente as possibilidades do ensaio de tração principalmente devido a formação da estricção nestes ensaios.

A capacidade de um material experimentar grandes deformações plásticas pode ser avaliada simulando alguns processos reais através de ensaios de compressão de pequenos cilindros, blocos ou tiras. A principal limitação do ensaio de tração (formação da estricção nas amostras) não subsiste no processo de compressão já que as condições em que a deformação ocorre são intrinsecamente estáveis pois a seção transversal do corpo de prova aumenta durante o desenvolvimento do ensaio.

Quando um material é submetido a cargas de compressão, as relações entre tensão e deformação são semelhantes àquelas obtidas no ensaio de tração. Até a tensão de escoamento, o material comporta-se elasticamente. Ultrapassando este valor ocorre a deformação plástica. Com o avanço da deformação o material endurece (encruamento) e ocorre um aumento no diâmetro da seção transversal do corpo-de-prova. Entre as principais precauções que devem ser tomadas na realização do ensaio está o dimensionamento do corpo-de-prova, que deve ter uma relação entre comprimento e seção transversal adequada para resistir à flexão e a flambagem.

A Figura 1 ilustra o “barrilamento” da amostra devido ao atrito existente entre as placas e o corpo-de-prova. O material dos planos mais afastados da interface de contato escoa mais facilmente que os que se encontram mais próximos. Isto faz com que um corpo-de-prova cilíndrico adquira, após deformado, a forma de um barril.<sup>(1)</sup>



**Figura 1.** Esquema de aplicação de carga sobre um cilindro.

O grau de barrilamento depende do nível de atrito existente na interface, como ilustrado na Figura 2.

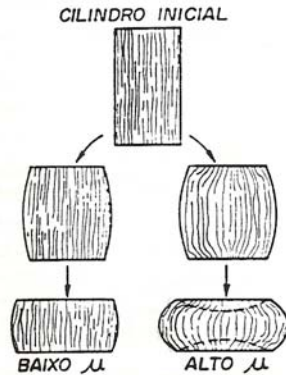


Figura 2. Características de deformação não homogênea.

### 1.1 Tensão Deformação Verdadeira

A tensão de deformação verdadeira,  $\sigma$ , é definida como quociente entre a carga em qualquer instante e a área da secção transversal do corpo de prova no mesmo instante,  $A_i$ , conforme a equação 1:

$$\sigma = \frac{F}{A_i} \quad (1)$$

A deformação verdadeira é baseada na variação da área inicial em relação a área. Portanto a deformação real é dada por:

$$\varepsilon = \ln \frac{A_i}{A_o} \quad (2)$$

O valor  $A_i$  é normalmente calculado por conservação de volume, mas como discutido anteriormente o efeito do barrilamento impede que esta área seja uniforme ao longo do comprimento do corpo-de-prova. Este valor é portanto um artifício de cálculo.

### 1.2 Equação de Hollomon

A curva tensão-deformação verdadeira pode ser aproximadamente representada pela expressão exponencial do tipo:

$$\sigma = K \cdot \varepsilon^n \quad (3)$$

onde  $K$  e  $n$  são constantes para cada material, denominados coeficiente de resistência e coeficiente de encruamento, respectivamente, e descrevem completamente a forma da curva real. Embora essas grandezas sejam consideradas como constantes, elas podem variar conforme o tratamento que o material foi submetido previamente. Essa expressão é válida para zona plástica do material.

O coeficiente K mede a tensão real quando  $\varepsilon = 1$ , tendo, portanto, dimensões de tensão. Seu valor fornece indicação do nível de resistência do material a deformação grande. O valor de  $n$ , porém, é considerado como uma característica ou habilidade do material poder distribuir a deformação uniformemente. Este valor é igual a deformação uniforme no ensaio de tração.

### 1.3 Método de Cook e Larke

Uma das principais vantagens do ensaio de compressão é a quantidade de deformação elevada que se consegue aplicar nas amostras. No entanto, sua maior limitação é o barrilamento que se forma devido o atrito. Cook e Larke<sup>(1)</sup> desenvolveram um método para minimizar ou mesmo eliminar o efeito do barrilamento. Este método requer a preparação de um conjunto de amostras cilíndricas de igual diâmetro e diferentes alturas (diferentes valores de D/h).

O objetivo deste trabalho é desenvolver a metodologia de ensaios de compressão e aplicar a mesma para avaliar três tipos de aço/fluxo de fabricação da Belgo, utilizados para fabricação de fixadores. A comparação é feita através do “coeficiente de resistência”, K, na equação empírica de Hollomon, adicionada de um termo extra para levar em conta o efeito do barrilamento, usando diversas relações de D/h, como feito no método de Cook e Larke.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Materiais

Neste estudo foram utilizados 3 tipos de aço/fluxo de fabricação da Belgo, utilizados na fabricação de fixadores. A composição química média para os 3 tipos de aço/fluxo está apresentada na Tabela 1. FM significa fio-máquina como laminado, EF significa arame com esferoidização final (após trefilação) e EP significa arame com esferoidização intermediária no processo de fabricação.

**Tabela 1.** Análise química das amostras utilizadas neste estudo.

Aço	Tratamento	%C	%Mn	%Cr	%Ti	ppmB
1003	FM	0,04	0,40	0,02	0,02	nil
	EP	0,05	0,46	0,03	0,02	nil
	EF	0,05	0,46	0,03	0,02	nil
10B22	FM	0,23	1,14	0,15	0,02	20
	EP	0,20	1,17	0,15	0,02	20
	EF	0,20	1,17	0,15	0,02	20
5135	FM	0,35	0,72	0,94	0,02	nil
	EP	0,35	0,74	0,91	0,02	nil
	EF	0,35	0,74	0,91	0,02	nil

Para os ensaios de compressão foram usinadas amostras com 8mm de diâmetro e comprimentos de 8, 10, 12 e 14mm, três amostras para cada altura. Os testes foram feitos no Centro Tecnológico de Minas Gerais (CETEC) em uma máquina universal de ensaios marca INSTRON, automatizada com *software* em ambiente *Windows*, para controle, aquisição e tratamento de dados.

## 2.2 Métodos

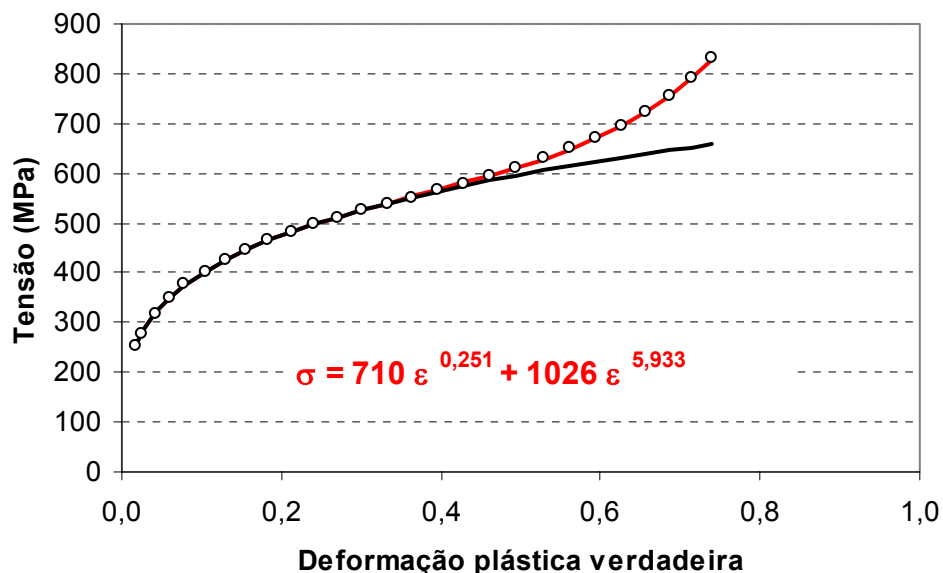
Os valores experimentais obtidos na máquina de compressão, para cada corpo-de-prova, são trabalhados de acordo com as seguintes etapas:

1. Coleta de dados originais de força (F) *versus* deslocamento (Y) do cabeçote.
2. Cálculo de equação ( $Y=a+bF$ ) relacionando deslocamento (Y) em função da força na parte elástica.
3. Utilização da equação  $Y=a+bF$  para subtração da parte elástica dos dados originais, gerando dados de força *versus* dL plástico.
4. Cálculo de tensão ( $\sigma_{\text{medido}}$ ) *versus* deformação plástica, usando equações (1) e (2), supondo inicialmente ausência de barrilamento e área instantânea calculada por conservação de volume.
5. Cálculo dos parâmetros na equação de Hollomon equação (3), incluindo efeito de barrilamento através do termo  $P \epsilon^m$

$$\sigma_{\text{corrigido}} = K \epsilon^n + P \epsilon^m \quad (5)$$

Utilização rotina “Solver” da planilha Excel, para ajuste dos melhores valores de K, n, P, m, fazendo minimização da soma dos desvios quadráticos entre  $\sigma_{\text{medido}}$  e  $\sigma_{\text{corrigido}}$ . A Figura 3 mostra o resultado desta etapa para um exemplo com o aço 1003 esferoidizado.

6. Colocação dos valores de K obtidos em um gráfico como função de D/H. O valor extrapolado para D/H igual a zero é considerado o valor de  $K_f$  do material em teste.  $K_m$  é o valor médio de todas as medidas.



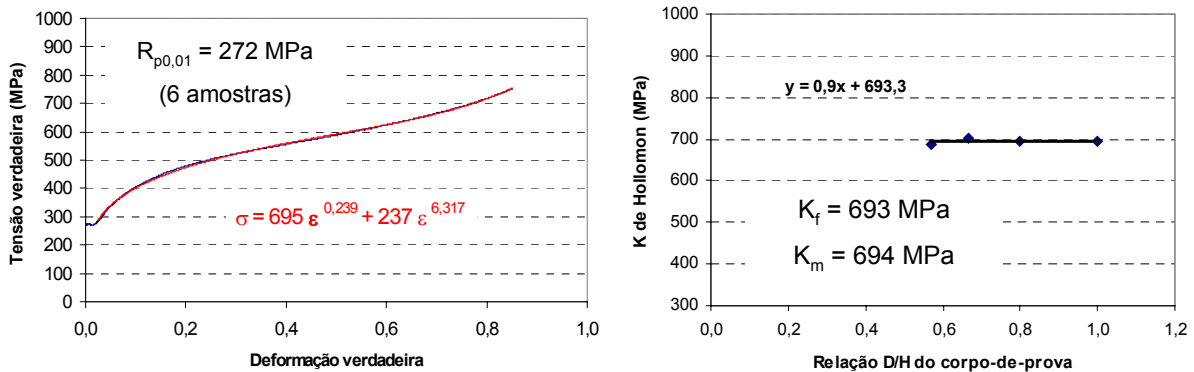
**Figura 3.** Dados experimentais (pequenos círculos) para um dos ensaios com aço 1003 e esferoidização final (corpo-de-prova com relação D/h de 8/10) e curva ajustada de Hollomon, com  $K=710$  e  $n=0,251$  (linha escura). A linha vermelha é a linha de ajuste final, considerando termo adicional para o atrito, com  $P=1026$  e  $m=5,933$ .

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

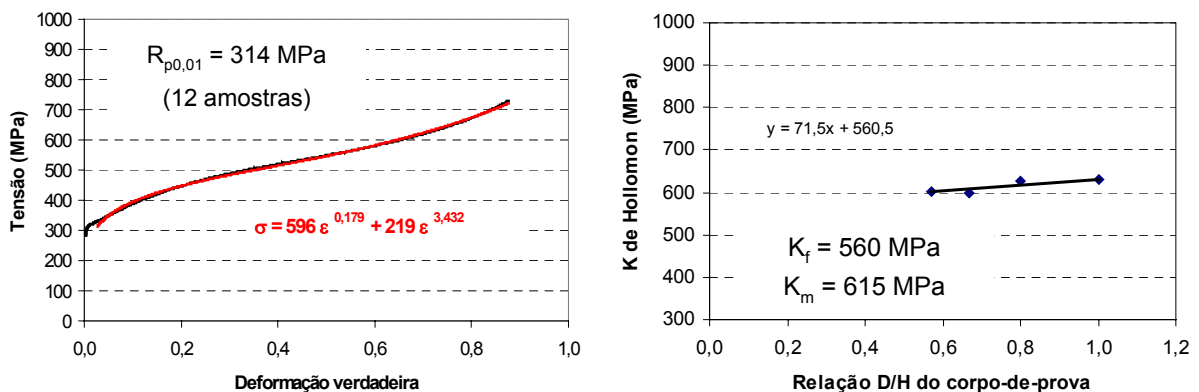
As Figuras de 4 a 12 mostram os valores de  $R_{p0,01}$ ,  $K_f$  e  $K_m$  obtidos para cada um dos três fluxos de produção dos aços estudados. A equação proposta, Eq.(5), e a utilização do método dos mínimos quadrados proporcionaram ajuste muito bom entre os dados experimentais e a linha otimizada, mas ainda assim a extrapolação para  $D/h$  igual a zero mostrou que  $K_f$  é menor que o valor médio  $K_m$ , em todos os casos, com exceção do caso mostrado na Figura 4b. Assim o método de Cook e Larke, com usinagem e ensaios de corpos-de-prova de diferentes relações  $D/H$ , ainda é necessário, em que pese a correção  $P\varepsilon^m$  utilizada.

Nas Figura 13 são mostrados, de maneira comparativa, os valores de  $K_f$  obtidos. Fica patente que o teor de carbono no material de teste é o fator de maior contribuição para um aumento no fator  $K_f$ , mas a esferoidização intermediária mostrou ser mais benéfica do que a esferoidização final.

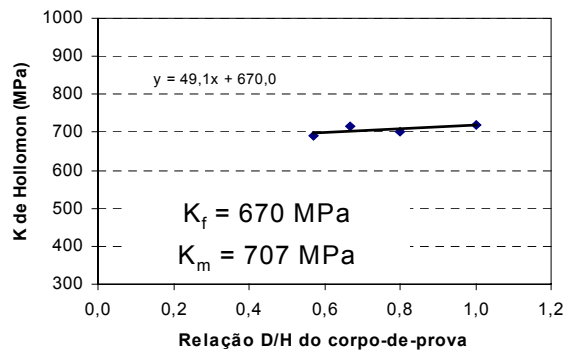
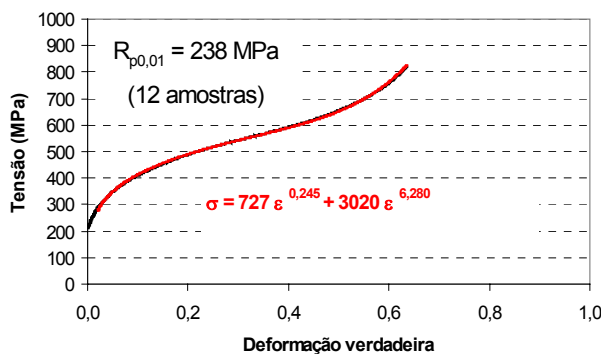
A Figura 14 mostra a correlação existente entre  $K_f$  e o limite de escoamento em compressão, onde se notam dois comportamentos distintos: aquele do material como laminado e esferoidização final de um lado e o do material com esferoidização intermediária de outro lado. A figura mostra ainda que valores de  $K_f$  podem ser estimados através de medidas de escoamento em compressão apenas.



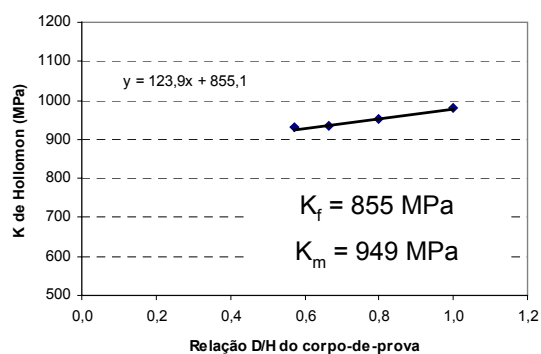
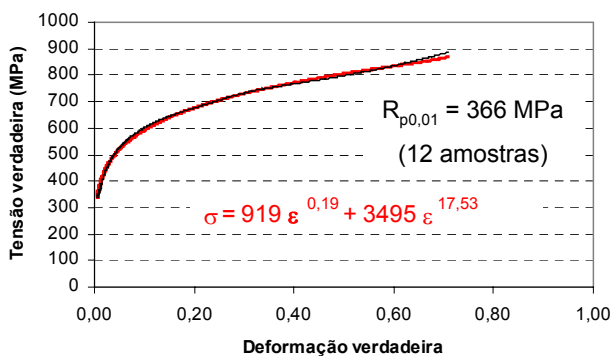
**Figura 4.** a) Curva tensão x deformação; b) Coeficiente de resistência em função da relação  $D/h$ . Fluxo: FM, aço 1003.



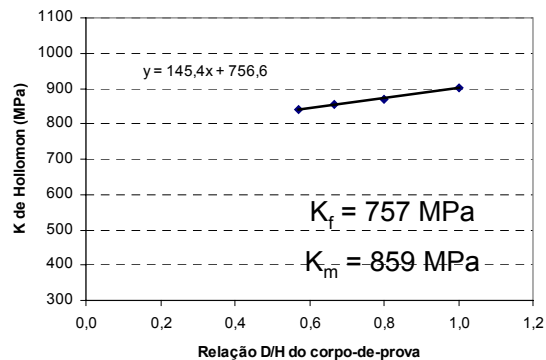
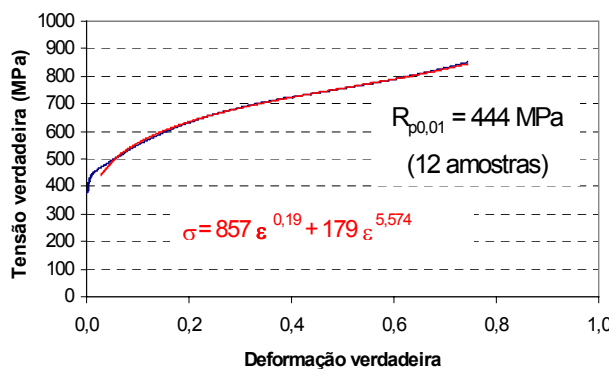
**Figura 5.** a) Curva tensão x deformação; b) Coeficiente de resistência em função da relação  $D/h$ . Fluxo: EP, aço 1003.



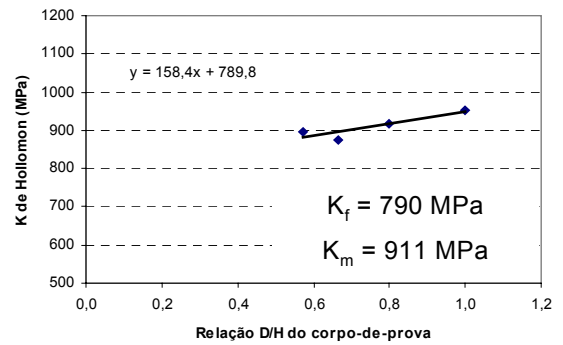
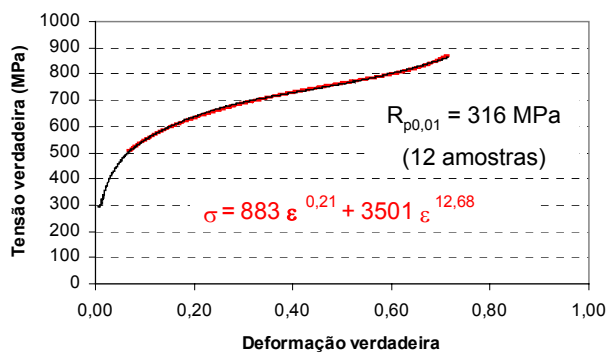
**Figura 6.** a) Curva tensão x deformação; b) Coeficiente de resistência em função da relação D/h. Fluxo: EF, aço 1003.



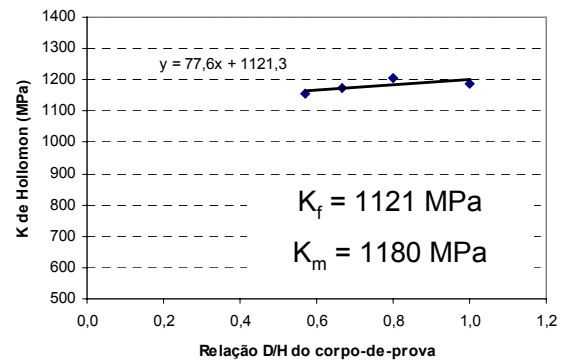
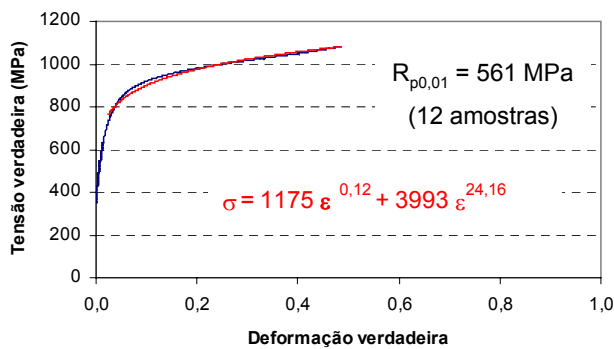
**Figura 7.** a) Curva tensão x deformação; b) Coeficiente de resistência em função da relação D/h. Fluxo: FM, aço 10B22.



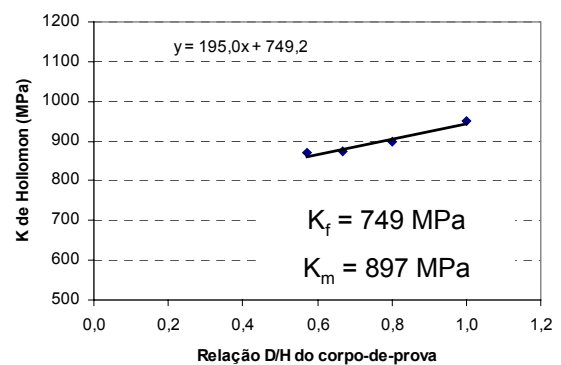
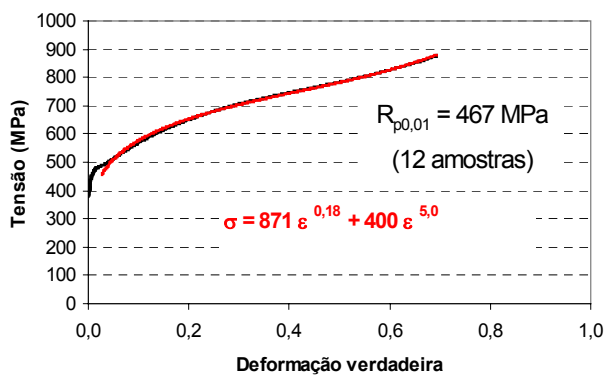
**Figura 8.** a) Curva tensão x deformação; b) Coeficiente de resistência em função da relação D/h. Fluxo: EP, aço 10B22.



**Figura 9.** a) Curva tensão x deformação; b) Coeficiente de resistência em função da relação D/h. Fluxo: EF, aço 10B22.



**Figura 10.** a) Curva tensão x deformação; b) Coeficiente de resistência em função da relação D/h. Fluxo: FM, aço 5135.



**Figura 11.** a) Curva tensão x deformação; b) Coeficiente de resistência em função da relação D/h. Fluxo: EP, aço 5135.



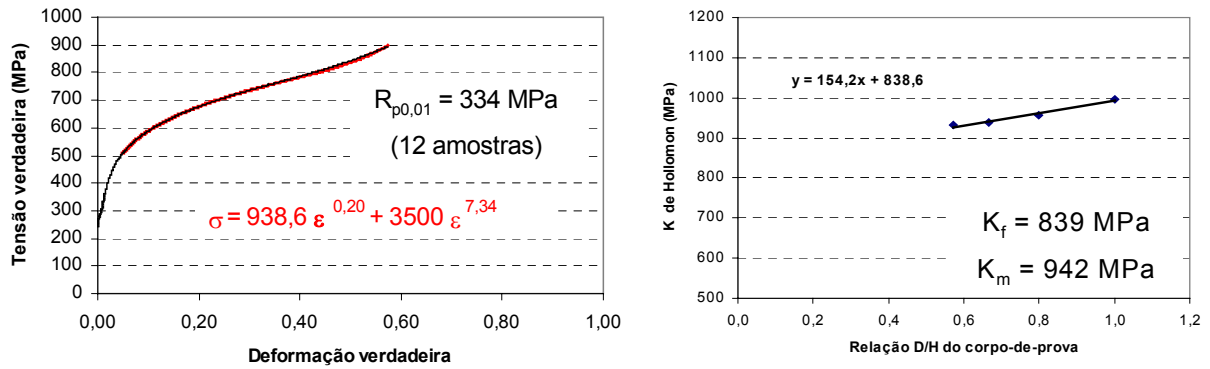


Figura 12. a) Curva tensão x deformação; b) Coeficiente de resistência em função da relação D/h. Fluxo: EF, aço 5135.

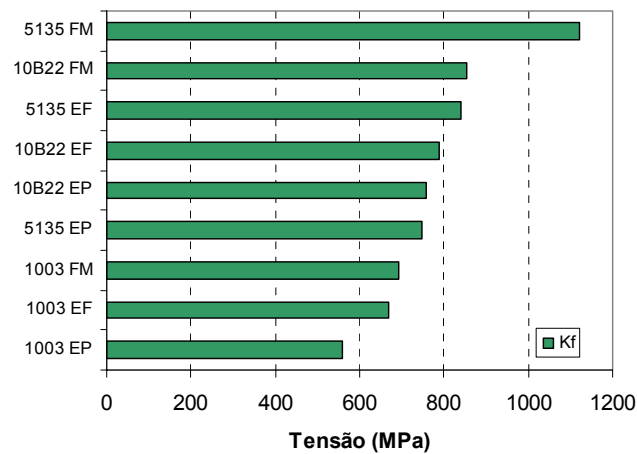


Figura 13. Valores de  $K_f$  para os aços e fluxos de produção estudados neste trabalho.

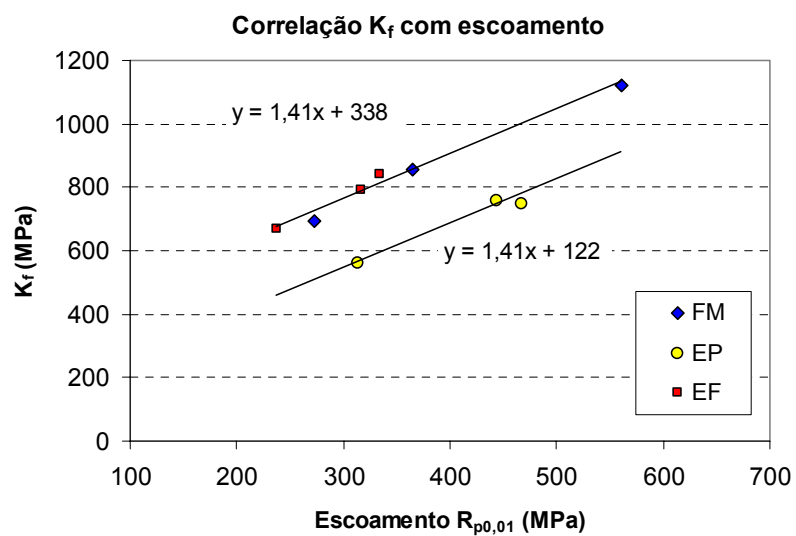


Figura 14. Coeficiente de resistência  $K_f$  em função do limite de escoamento em compressão.

## 4 CONCLUSÕES

- O fluxo com esferoidização intermediária, EP, para os três aços estudados, foi o que proporcionou o menor valor de resistência,  $K_f$ , com isto, é o mais indicado para os fabricantes de parafusos.
- Existe uma boa correlação de  $K_f$  e o escoamento para os tratamentos estudados.
- A correlação entre  $K_f$  e o escoamento permite, que para outros aços, a figura 13 seja usada para se estimar os valores de  $K_f$  através do limite de escoamento, o que simplifica os ensaios mecânicos e se evita a complicação de usinagem de vários corpo-de-prova de alturas variadas, bem como se evita o problema do barrilamento.

## REFERÊNCIAS

- 1 HELMAN, H. **O Ensaio de Compressão**, cap. 6, Fundamentos de Ensaios Mecânicos de Metais, UFMG-ABM.

## BIBLIOGRAFIA

- 1 DIETER, G.E. **Metalurgia Mecânica**, Editora Guanabara Dois, 2ª ed., 1981.
- 2 HELMAN, H. e P. R. CETLIN, P.R. **Fundamentos da Conformação Mecânica dos Metais**, Fundação Christiano Ottoni, 1993.