

ANÁLISE DA VARIAÇÃO DAS PROPRIEDADES ME
CÂNICAS À TRAÇÃO PROVOCADA PELA TREFILA
ÇÃO DE BARRAS DE AÇO AISI 1212.

João Jacques Augusto Montandon

À meu pai e minha mãe, que com seu trabalho e paciência, abriram as portas dos caminhos que levaram a minha formação profissional.

AGRADECIMENTOS

O autor agradece a todos os que contribuíram para a elaboração deste trabalho e em particular a:

- Professor Paulo Roberto Cetlin, pela orientação e sugestões apresentadas;
- Professor Carlos Alberto Bottrel Coutinho, pelo apoio dispensado;
- ACESITA, e em particular ao Departamento de Beneficiamento de Barras, pela oportunidade de realização deste trabalho;
- FINEP - Financiadora de Estudos e Projetos, pelo suporte financeiro na manutenção do "programa de Formação de Pessoal de Nível de Mestrado", convênio FINEP/ACESITA/UFMG;
- e finalmente, minha esposa e irmãos que com incentivo e paciência colaboraram para que eu pudesse concluir o trabalho.

RESUMO

O propósito deste trabalho foi estudar a variação das propriedades mecânicas de barras de aço AISI 1212 quando submetidas a um passe de trefilação, considerando a influência do trabalho redundante. A partir da análise de resultados obtidos após a aplicação das Teorias de WISTREICH, BACKOFEN, CADDELL e ATKINS e JOHNSON e ROWE, são propostos meios de se prever o Limite de Escoamento e Limite de Resistência destes materiais após a trefilação. Discute-se ainda a previsão do alongamento final destes materiais usando curvas empíricas obtidas.

ABSTRACT

The purpose of this work was to study the change in the mechanical properties of AISI 1212 Steel round bars after a single drawing pass, considering the influence of redundant work. From the analysis of results obtained through the application of Wistreich's, Backofen's, Caddell & Atkins' and Johnson & Rowe's theories, ways of calculating the Tensile Strength and Yield Strength after a single pass of drawing are presented. It is also discussed the problem of predicting the final elongation of these materials, using empirical curves.

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1. NOTAÇÃO	1
2. INTRODUÇÃO	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
3.1. Métodos para determinar a tensão de trefilação..	5
3.1.1. Método do trabalho para a deformação ho mogênea	5
3.1.2. Método dos blocos	6
3.2. Deformação redundante e trabalho redundante	8
3.3. Fator de trabalho redundante	9
3.3.1. Backofen	10
3.3.2. Wistreich	10
3.3.3. Johnson e Rowe	11
3.3.4. Caddell e Atkins	13
3.3.5. Relação entre Φ e ϕ	17
3.4. Propriedades Mecânicas - Aplicações de ϕ	18
3.4.1. Limite de escoamento	19
3.4.2. Limite de resistência à tração	20
3.4.3. Ductilidade	21
3.4.4. Dureza	23
4. TÉCNICAS EXPERIMENTAIS	24
5. RESULTADOS OBTIDOS	28
6. DISCUSSÃO	69
6.1. Limite de Escoamento	69
6.2. Limite de Resistência	77
6.3. Previsão de σ_0 e m	84
6.4. Alongamento	85

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
6.4.1. Alongamento não uniforme	85
6.4.2. Alongamento uniforme	92
6.4.3. Alongamento total	99
6.4.4. Previsão de alongamento	112
6.5. Dureza	119
7. CONCLUSÕES	126
8. APÊNDICES	127
8.1. Apêndice A	127
8.2. Apêndice B	129
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	139

1. NOTAÇÃO

- σ - tensão de trefilação ou tensão verdadeira
- γ - tensão de escoamento
- A - área da seção transversal da barra
- D - diâmetro da barra
- p - pressão de contato material-fieira
- F - força de tração
- μ - coeficiente médio de atrito entre a fieira e o material
- α - semi-ângulo da fieira
- ϵ - coeficiente de trabalho redundante (deformação)
- ϵ' - coeficiente de trabalho redundante (tensão de trefilação)
- ϵ - deformação logarítmica
- M - área de contato entre a barra e a fieira
- σ_c - tensão convencional
- e - deformação convencional, alongamento específico
- LE - limite de escoamento
- LR - limite de resistência
- L - comprimento entre marcas no corpo de prova de tração
- A_0 - Área inicial do corpo de prova de tração
- A_f - Área final do corpo de prova de tração
- k_2 - alongamento específico não uniforme

SUBSCRITOS

- M - valor médio
a - relativo à entrea da fieira
b - relativo à saída da fieira
wh ou h - relativo à teoria de Backofen
ww ou w - relativo à teoria de Wistreich
wj ou j - relativo à teoria de Johnson e Rowe
wc ou c - relativo à teoria de Caddell e Atkins
* - corrigido pelo fator de trabalho redundante
o - valor inicial
f - valor final
u - valor uniforme final
max - valor máximo
lam - relativo ao material laminado
tr - relativo ao material trefilado
 ϕ - relativo ao fator de "deformação redundante"
 ϕ - relativo ao fator de "tensão redundante"
0,2 - relativo a uma deformação plástica de 0,2%.

SUPERSCRITOS

- ϵ - após sofrer deformação ϵ
 $\phi\epsilon$ - após sofrer deformação ($\phi \times \epsilon$)

2. INTRODUÇÃO

Os produtos trefilados constituem uma classe de materiais acabados que são comumente usados na indústria, principalmente a automobilística. Sua aplicação mais comum é na obtenção de eixos de diversos tipos, hastes para válvulas, bombas e porcas por exemplo. Tendo o material trefilado boa qualidade superficial, e também ótimas tolerâncias dimensionais, não oferece problemas como matéria prima para tornos automáticos e transfere suas qualidades precisas de superfície ao produto final.

A previsão das propriedades mecânicas do trefilado a partir de dados do produto laminado a quente, ou o seu inverso (seja a determinação da matéria prima e das variáveis do processo para se obter um dado produto final) não é feita em escala industrial com uma base teórica segura; assim é que comumente se recorre a um processo de tentativa e erro, com correções baseadas em tratamentos térmicos, o que leva a uma perda de tempo e energia, além de produzir materiais que não estão com suas propriedades mecânicas bem situadas dentro de uma faixa pré-estabelecida.

No processo de trefilação as variáveis a serem controladas são as propriedades mecânicas iniciais do material, o ângulo de fieira, o atrito, a velocidade de deformação e a redução. Atualmente o atrito é mantido a níveis baixos através de lubrificantes adequados e bom acabamento da superfície interna da fieira. A matéria prima empregada geralmente está no estado laminado a quente (as propriedades mecânicas de cada aço variam dentro de uma faixa) e as reduções são determinadas pelas exigências de consumo.

O problema principal encontrado ao se tentar prever as propriedades mecânicas do material trefilado reside no fato de que a

deformação que se processa internamente não é homogênea e geralmente as propriedades previstas tomando como base a redução de área e deformação homogênea não coincidem com as medidas obtidas na prática.

Além disto, a ovalização do material laminado, mesmo dentro das tolerâncias de laminação, faz com que para reduções muito pequenas as deformações em diferentes diâmetros de uma mesma seção transversal variem muito, prejudicando principalmente as previsões sobre Limite de Escoamento.

Neste trabalho realiza-se uma análise das variáveis de trefilação de barras redondas através de algumas teorias que envolvem o trabalho redundante de tal forma que, juntamente com dados experimentais obtidos para aço AISI 1212, são feitas algumas correlações de propriedades mecânicas antes e após a trefilação. Para cada propriedade (Limite de Resistência, Limite de Escoamento e Alongamento), sugere-se qual a teoria que fornece os melhores resultados.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Métodos para determinar a tensão de trefilação.

São vários os métodos de abordagem do processo de trefilação, tanto para a determinação de equações que forneçam teoricamente a tensão de trefilação, definida como a razão entre a força de trefilação e a área final do produto trefilado, como também para a determinação de curvas, gráficos e fórmulas que descrevam a deformação experimentada pela barra durante a trefilação.

Serão expostos a seguir dois métodos simples utilizados para a previsão da tensão de trefilação.

3.1.1. *Método do trabalho para a deformação homogênea*

Considerando-se o trabalho feito sobre a barra pela força de trefilação como sendo igual ao trabalho realizado por uma força de tração que imponha a mesma redução de área, tem-se:

$$\sigma_o = Y_M \cdot \ln\left(\frac{A_a}{A_b}\right) = 2 \cdot Y_M \cdot \ln\left(\frac{D_a}{D_b}\right) \quad (1)$$

Por este método⁽¹⁾ (*), considera-se que a deformação processada no material durante a trefilação ocorreu só paralelamente ao eixo da barra, sem atrito e sem deformação cisalhante interna (deformação redundante). Por estas razões, esta fórmula simples dá

*Os superscritos entre parenteses indicam referência bibliográfica no final do trabalho.

valores inferiores aos experimentais para a carga de trefilação.

3.1.2. Método dos blocos

O método dos blocos⁽¹⁾, considera um elemento de material (figura 1) que está sendo deformado e, através de considerações de equilíbrio das forças que atuam sobre o referido elemento, obtém-se a seguinte equação:

$$\sigma_b = Y_M \cdot \frac{1+B}{B} \left[1 - \left(\frac{D_b}{D_a} \right)^{2B} \right] \quad (2)$$

onde: $B = \mu \cdot \cot \alpha$

Para se chegar à equação acima, foram feitas várias suposições além da de equilíbrio:

- a direção axial é a de variação dominante das tensões
- empregou-se uma tensão de escoamento média (Y_M) entre aquela na entrada e na saída da fieira
- empregou-se o critério de Tresca para relacionar σ_x e p
- μ é constante em toda a região de contato material/fieira
- não se considera qualquer tipo de deformação cisalhante que ocorre no material.

Esta equação dá também valores de tensão de trefilação inferiores aos reais, principalmente quando se tem ângulos de fieiras grandes e reduções pequenas, devido à deformação redundante que se processa na zona de deformação e que não foi considerada.

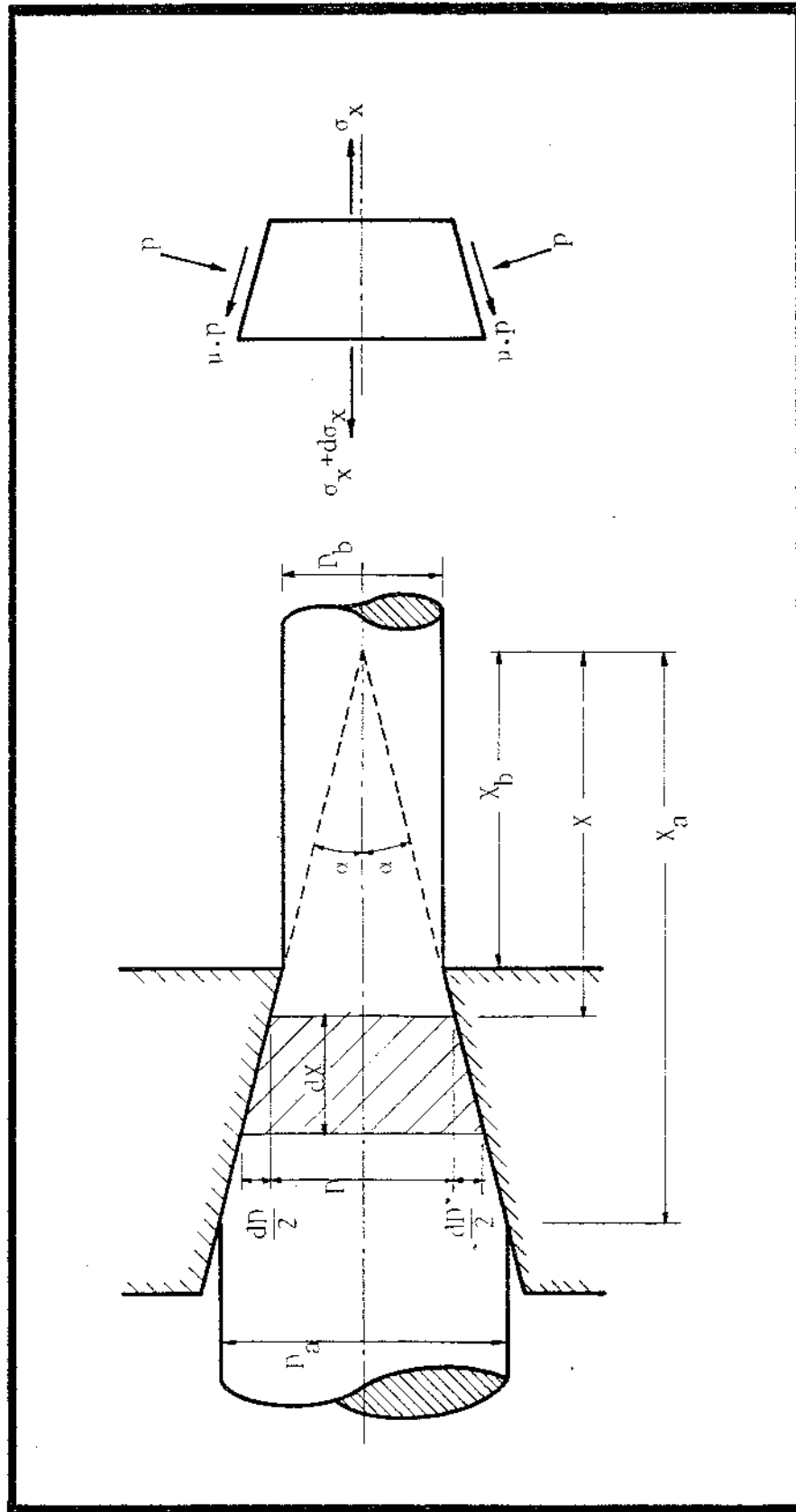


Figura 1 - Elemento em equilíbrio utilizado no método de blocos (1).

3.2. Deformação redundante e trabalho redundante

Comumente se toma o trabalho total de trefilação como composto de três componentes^(2,3):

$$W_T = W_H + W_R + W_f \quad (3)$$

onde: W_H = trabalho para deformar homogeneamente o material

W_f = trabalho dispendido para vencer o atrito

W_R = trabalho redundante associado às distorções internas do material.

Para se entender o que é a Deformação Redundante, seja um elemento do material próximo a superfície da barra (figura 2). Antes de entrar na fieira, o material se move em uma direção paralela ao eixo.

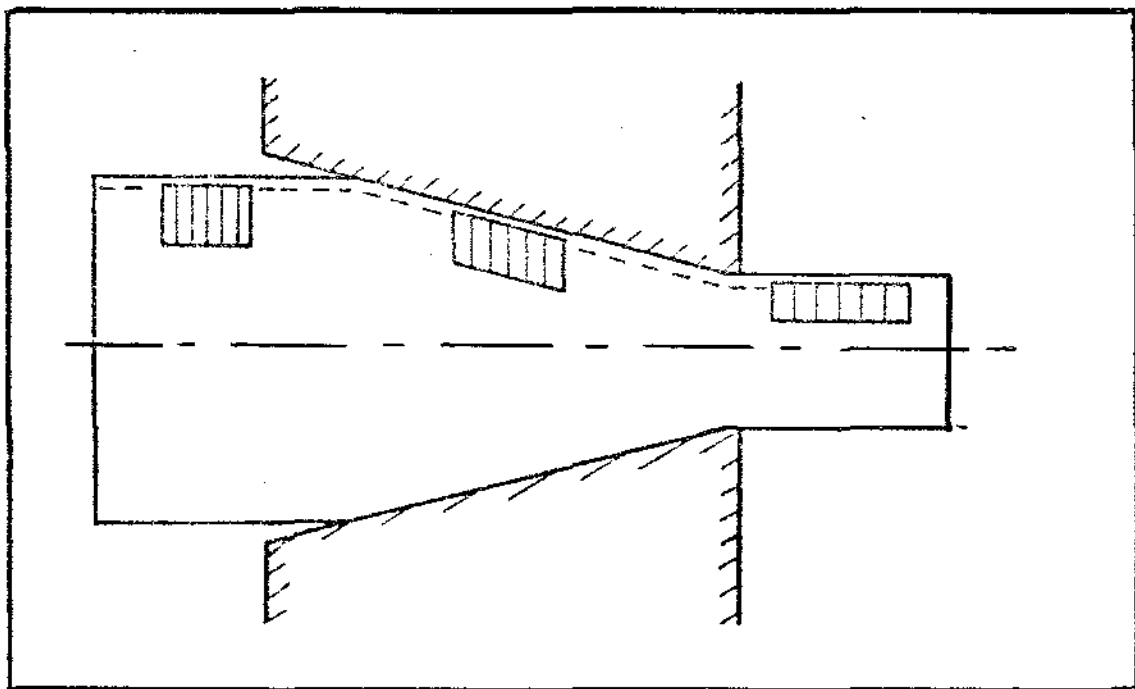


Figura 2 - Deformação redundante na trefilação de barras⁽¹⁾.

Ao entrar em contato com a matriz, adiciona-se à sua velocidade uma componente radial; ao sair da matriz, é compelido de novo a se mover com uma velocidade axial.

Tudo se passa como se à entrada da fieira o material sofresse uma deformação cisalhante que o coloca em posição de seguir o fluxo axial. Esta quantidade de deformação, chamada "redundante", decresce da superfície para o centro. Observa-se assim que a deformação interna do material trefilado é maior do que a do material que sofreu uma redução de área igual por deformação homogênea, pelo fato de no 1º caso haver uma deformação cisalhante adicional. Assim se explica porque comumente um material trefilado tem uma tensão de escoamento maior do que a de um material tracionado que sofreu a mesma redução de área. A deformação redundante (ϵ_R) envolve um gasto de energia denominado de "trabalho redundante" (W_R), que é a energia usada para causar distorções cisalhantes internas ao material. A tensão de trefilação real é pois maior do que a calculada pelo Método dos Blocos, pois esta não considera a existência de uma deformação redundante.

3.3. Fator de trabalho redundante

Levando em conta o apresentado anteriormente usa-se comumente um fator que, aplicado às equações teóricas da tensão de trefilação, forneça a tensão real, ou, aplicado à deformação calculada pela redução de área nominal, informe qual a deformação média interna sofrida pelo material, podendo-se assim antecipadamente ter-se uma idéia mais adequada das propriedades mecânicas da barra trefilada.

Há duas maneiras de determinar tal fator: uma, fazendo considerações sobre a tensão de trefilação⁽⁴⁾; outra, fazendo-se considerações sobre a deformação do metal trefilado⁽⁵⁾. Vários autores desenvolveram diferentes fórmulas para este fator de trabalho redundante, das quais apresentam-se as mais conhecidas.

3.5.1. Backofen

Backofen⁽³⁾ desenvolveu uma fórmula para o fator de trabalho redundante, o qual depende de um parâmetro geométrico do processo:

$$\phi_{wh} = 1 + 0,12 (\Delta_w - 1) \quad (4)$$

onde, para barras redondas $\Delta_w = (\alpha/r) (1 + \sqrt{1-r})^2 = \alpha(D_a + D_b)/(D_a - D_b)$, sendo r a redução de área, ou seja, $r = 1 - (D_b/D_a)^2$.

Uma observação que se faz é que Backofen também sugeriu uma relação para que se calcule ϕ_{wh} através de $\bar{\epsilon}$ (deformação média no volume) da seguinte forma:

$$\phi_{wh} = \bar{\epsilon}/\epsilon \quad (5)$$

onde ϵ é a deformação homogênea e $\bar{\epsilon}$ (deformação média no volume) são calculados com base em ensaios de micro-dureza.

3.5.2. Wistreich

Wistreich^(4,6) propôs um fator de trabalho redundante que seria aplicado à equação (2) para se obter a tensão de trefilação. O fator multiplicativo toma a seguinte forma:

$$\phi_{ww} = 0,87 + (A_b/M) \quad (6)$$

O quociente A_b/M representa a razão da área da seção transversal da barra já trefilada para a área de contato entre a barra e a fieira:

$$\frac{A_b}{M} = \frac{D_b^2 \cdot \text{sen} \alpha}{D_a^2 - D_b^2} = \frac{1-r}{r} \cdot \text{sen} \alpha \quad (7)$$

Wistreich sugeriu que ϕ_{ww} poderia decrescer com o aumento do atrito e com uma taxa de encruamento maior.

3.3.3. Johnson e Rowe

Através da comparação entre a tensão teórica de trefilação proposta por Sachs (Método dos Blocos) e tensões de trefilação medidas experimentalmente para diferentes materiais, trefilados em diversas condições (figura 3), Johnson e Rowe⁽⁴⁾ chegaram a um fator de trabalho redundante que tem a forma:

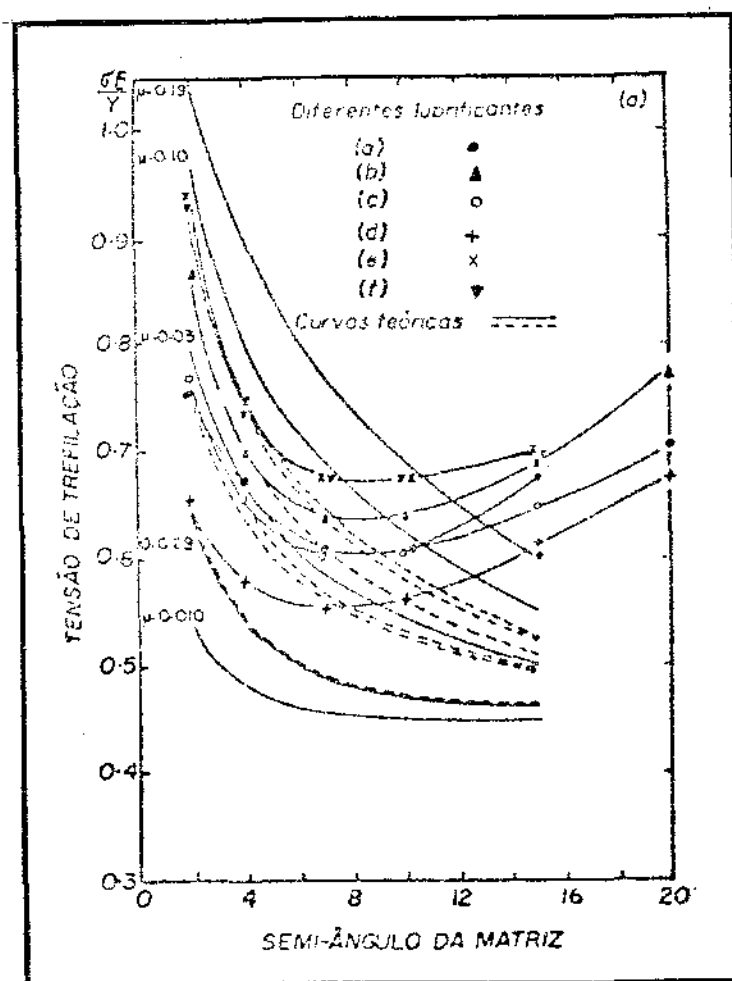


Figura 3 - Comparação entre σ_E/Y_M real e o teórico⁽⁴⁾.

$$\phi_{wj} = 0,88 + 0,78 * (As/M) \quad (8)$$

na qual o termo (As/M) representa a razão entre a área de uma seção esférica média centrada no ápice do cone da matriz, e a superfície de contato entre a barra e a matriz (figura 4):

$$\frac{A_s}{M} = \left(\frac{D_a + D_b}{D_a - D_b} \right) * \left(\frac{1 - \cos\alpha}{2 * \sin\alpha} \right) \quad (9)$$

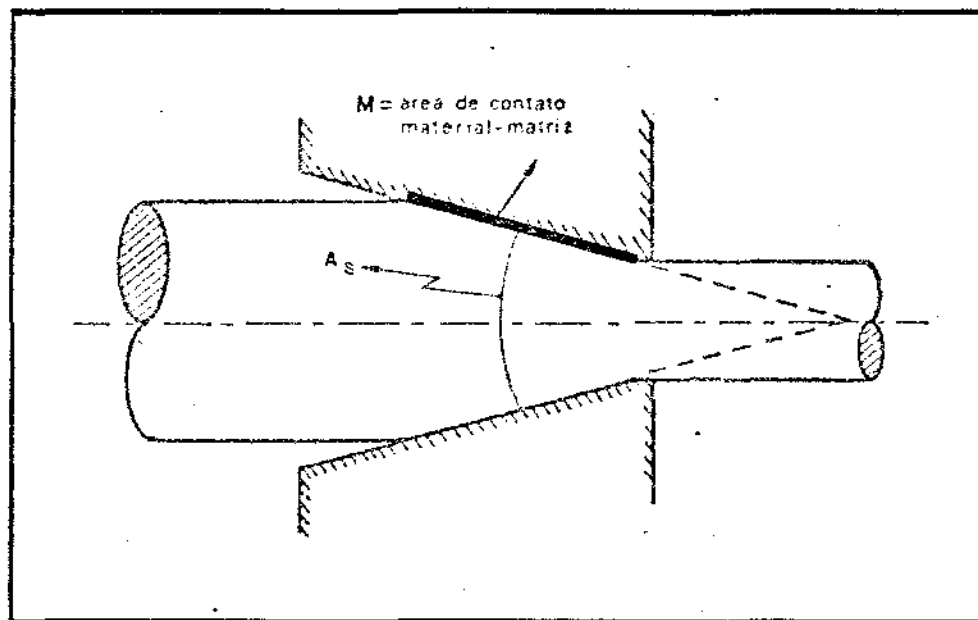


Figura 4 - Representação esquemática de As/M ⁽⁴⁾.

Ao contrário de Wistreich que considerava que ϕ poderia depender do atrito e do encruamento do material, Johnson e Rowe (através de resultados experimentais com vários lubrificantes) afirmam que o atrito e o encruamento não tem influência significativa sobre ϕ . A razão pela qual o atrito teria pequena influência no trabalho redundante seria atribuído ao fato de que seu efeito estaria con

finado à camada superficial da barra, não afetando assim a deformação redundante, que depende da deformação média equivalente da barra. Propõe-se ainda a aplicação de seu fator Φ_{wj} para o cálculo da deformação equivalente ϵ^* (deformação real processada internamente), ou seja:

$$\epsilon^* = \Phi \cdot \epsilon \quad (10)$$

onde ϵ é a deformação nominal sofrida pelo material σ_{ϵ^*} poderia ser interpretada como a deformação que um material teria que sofrer uniformemente (ex: teste de tração) para que apresentasse uma tensão de escoamento igual ao do produto já trefilado, que sofreu uma deformação nominal ϵ .

Como será visto adiante, Caddell e Atkins⁽¹¹⁾ propõe uma modificação para o fator Φ (obtido através de considerações sobre tensões de trefilação) para que ele possa ser aplicado à equação (10), que é uma equação relacionada puramente com a deformação.

3.3.4. Caddell e Atkins

Uma outra maneira de se obter um fator de trabalho redundante foi usada por Caddell e Atkins⁽⁵⁾; usando a técnica de executar testes de tração antes e depois da trefilação, conseguia-se obter σ_{wc} através da medida de ϵ^* e ϵ . ϵ^* foi medido superpondo-se as curvas tensão x deformação de testes de tração do material trefilado às curvas do material no estado recozido (figura 5). Medindo-se qual era a tensão de escoamento do material trefilado e, procurando na curva σ x ϵ do recozido qual deformação correspondia à tensão de escoamento do material trefilado, determinava-se ϵ^* .

Daí em diante, para várias reduções, construiu-se um gráfico ϵ^* x ϵ , obtendo-se retas, uma para cada ângulo de trefilação (figura 6).

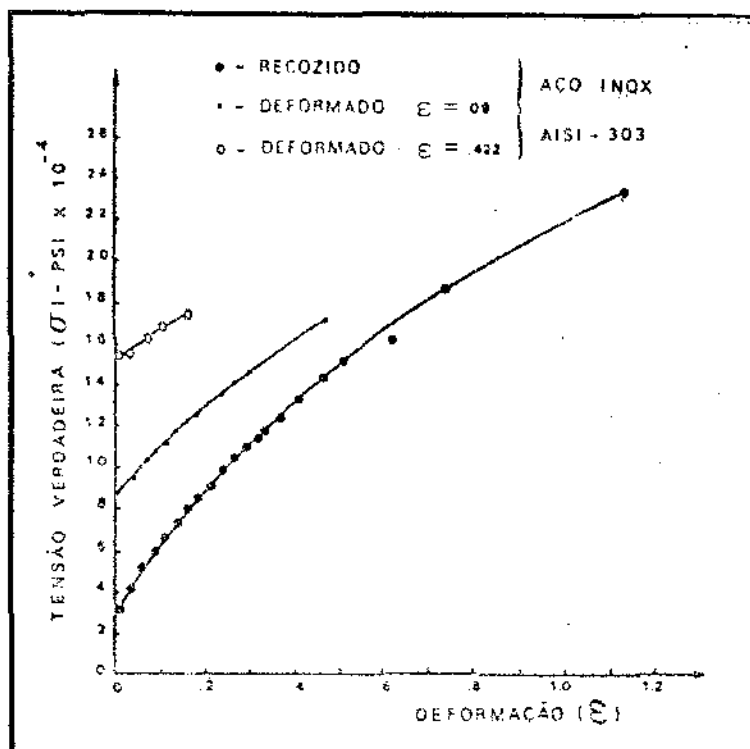


Figura 5 - Curvas de teste de tração para material recozido e encruado⁽⁵⁾.

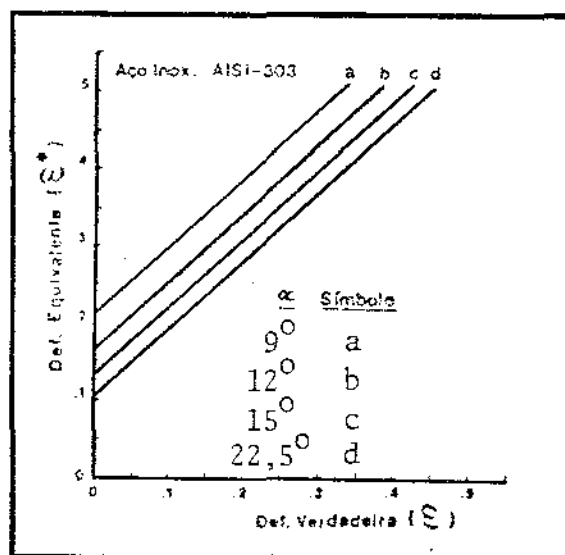


Figura 6 - Representação de deformação verdadeira versus deformação equivalente⁽⁵⁾.

Chegou-se à seguinte conclusão:

$$\varepsilon^* = K_1 \cdot \varepsilon + K_2 \cdot \text{sen} \alpha \quad (11)$$

onde K_1 e K_2 são constantes multiplicativas.

Como $\phi = \varepsilon^*/\varepsilon$ tem-se então:

$$\phi_{wc} = K_1 + K_2 \cdot \frac{\text{sen} \alpha}{\varepsilon} \quad (12)$$

Se, em vez de se construir um gráfico $\phi_{wc} \times \left(\frac{\text{sen} \alpha}{\varepsilon}\right)$, se construisse um gráfico $\phi_{wc} \times \Delta$, onde

$$\Delta = \frac{D_a + D_b}{D_a - D_b} \cdot \text{sen} \alpha \quad (13)$$

obter-se-ia então uma família de retas convergentes em ϕ_{wc}^{-1} , uma para cada material. Observe-se que Δ depende somente dos parâmetros geométricos do processo (redução e ângulo de trefilação). Obtem-se então a equação:

$$\phi_{wc} = c_1 + c_2 \cdot \Delta \quad (14)$$

Uma característica do trabalho de Caddell e Atkins foi o relacionamento de c_1 e c_2 com os parâmetros de encruamento de cada material (σ_0 e m), supondo-se que a curva tensão x deformação de cada material obedeça a equação

$$\sigma = \sigma_0 \cdot \epsilon^m \quad (15)$$

onde σ_0 - coeficiente de resistência

m - coeficiente de encruamento

c_1 e c_2 foram relacionados aos parâmetros de encruamento fazendo-se testes em 3 materiais diferentes. Como resultado final obteve-se:

$$c_1 = 1,79 \cdot \sigma_0^{-0,10} \cdot m^{0,28} \quad (16)$$

e

$$c_2 = 0,324 \cdot \sigma_0^{-0,054} \cdot m^{0,76} \quad (17)$$

sendo que σ_0 e m foram obtidas usando-se curvas tensão x deformação sendo σ dada em kg/mm^2 e ϵ dada como deformação logarítmica. Com estes dados se poderiam prever propriedades mecânicas do material trefilado a partir da matéria prima no estado recozido, ou seja, a partir de condições fixas de encruamento e tratamento térmico.

Um problema que comumente se apresenta na indústria, é o fato de que a matéria prima para trefilação (o laminado a quente) apresenta características de encruamento e tratamento térmico variáveis dentro de uma faixa. Estudos feitos em âmbito industrial⁽⁷⁾ propõem a existência de uma relação entre as características de encruamento (σ_0 e m) do material e o limite de resistência (LR) do material laminado a quente.

No estudo mencionado⁽⁷⁾ propôs-se uma relação linear:

$$\sigma_0 = a + b \cdot LR \quad (18)$$

e

$$m = c + d \cdot LR \quad (19)$$

onde a, b, c e d são constantes.

Assim, realizando-se experiências em um número suficiente de amostras seria possível confirmar tais equações, ou propor outra relação de dependência entre LR, m e σ_0 para cada material ou de um modo geral para vários materiais.

3.3.5. Relação entre Φ e ϕ

Como se sabe, tem-se dois tipos de fatores de trabalho redundante:

- Φ - calculado com base em comparações entre a tensão teórica de trefilação e a tensão medida na trefilação⁽⁴⁾.
- ϕ - calculado pela superposição de curvas tensão vs. deformação do material trefilado e da matéria prima obtendo-se ϕ através de $\phi = \epsilon^*/\epsilon$.

Como foi mostrado por Caddell e Atkins⁽¹¹⁾ os dois fatores diferem pelo fato de um ter sido obtido através de considerações sobre tensão de trefilação (Φ) e o outro (ϕ) através de considerações sobre deformação imposta pela trefilação. As diferenças entre estes fatores se tornam mais pronunciadas em metais que pos-

suem altas taxas de encruamento e para certas condições geométricas fixadas (redução de área e ângulo de trefilação).

Considerando a tensão média de escoamento calculada com base na eq.(15) e introduzindo o fator de deformação redundante ϕ , chegou-se a:

$$Y_m = \frac{\sigma_0 \phi^m \epsilon_h^m}{m+1} \quad (20)$$

onde ϵ_h é a deformação homogênea experimentada pelo material. Através da substituição desta relação na eq.(2) (equação de Sacks) e igualando-se à mesma equação corrigida pelo fator ϕ chegou-se a

$$\phi = \frac{1 - \exp(-\phi \cdot B \cdot \epsilon_h)}{1 - \exp(-B \cdot \epsilon_h)} \quad (21)$$

À medida que $B \cdot \epsilon$ se torna pequeno, a equação (21) se aproxima de

$$\phi = \phi^{m+1} \quad (22)$$

o que mostra claramente que os dois fatores não são necessariamente sempre iguais; isto ocorrerá somente para $m=0$, ou seja, para um material plástico rígido.

3.4. Propriedades mecânicas - aplicações de ϕ

Dentre as várias propriedades mecânicas usualmente definidas⁽⁸⁾, será feito um estudo de 4 (quatro):

- limite de escoamento;
- limite de resistência à tração
- ductilidade;
- dureza.

3.4.1. Limite de escoamento⁽⁵⁾

O limite de escoamento de um material submetido a um teste de tração é definido como a tensão a partir da qual o material experimenta uma deformação permanente pré-fixada após a retirada da carga que lhe foi imposta.

O que se faz usualmente é determinar qual a tensão necessária para produzir uma deformação permanente de 0,2% quando o material não apresentar patamar de escoamento. Caso contrário, o limite de escoamento refere-se ao limite superior de escoamento⁽⁹⁾. O procedimento para efetuar tais medidas encontra-se em normas que regulamentam estes testes⁽⁹⁾.

Então tem-se:

$$LE_{0,2} = \frac{P(e=0,2\%)}{A_0} = \sigma_{e0,2} \quad (23)$$

desde que o material não tem uma mudança de área apreciável desde o início do teste até o início do escoamento. Se, o material for pré-encruado de ϵ antes de se fazer o teste de tração, então, supondo que sua curva tensão vs. deformação obedeça a equação $\sigma = \sigma_0 \cdot \epsilon^m$, a nova tensão de escoamento (para pré-encruamento por trefilação) será:

$$LE = \sigma_0 \cdot (\phi\epsilon)^m \quad (24)$$

5.4.2. Limite de resistência à tração (LR)⁽⁵⁾

O limite de resistência à tração (figura 7) é dado pela máxima carga observada num ensaio de tração dividida pela área inicial da seção transversal do corpo de prova:

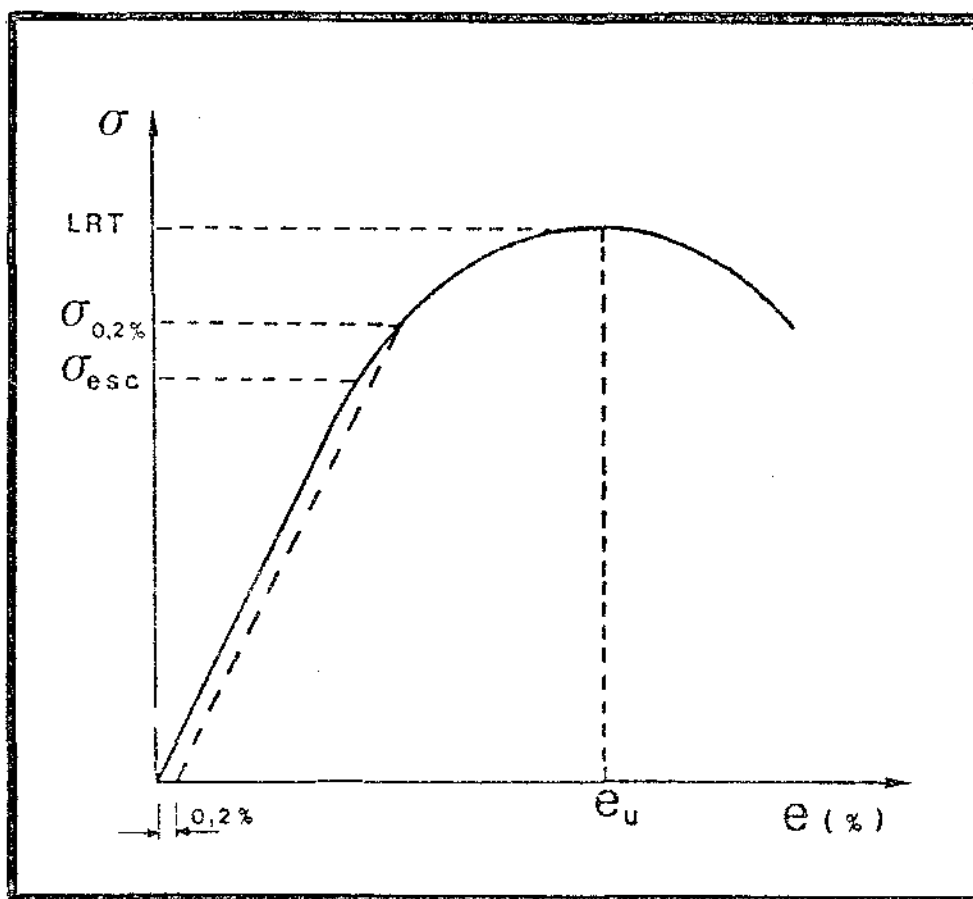


Figura 7 - Curva esquemática σ vs. e ⁽⁸⁾.

$$LR_o = \frac{P_{\max.}}{A_o} \quad (25)$$

Se o material for deformado de ϵ até uma área A , o novo LRT será:

$$LR = \frac{P_{\max.}}{A} \quad (26)$$

e, como $\epsilon = \ln(A_0/A)$ tem-se:

$$LR = \frac{P_{\max}}{A_0} \cdot \exp \epsilon = LR_0 \cdot \exp \epsilon \quad \text{para } \epsilon \leq m \quad (27)$$

ou

$$LR = \sigma = \sigma_0 \cdot \epsilon^m \quad \text{para } \epsilon > m \quad (28)$$

Se o material sofre a deformação prévia e por trefilação, então a deformação sofrida internamente pelo material foi $\phi \cdot \epsilon$. Logo, tem-se o LR considerando o trabalho redundante:

$$LR = LR_0 \cdot \exp(\phi \epsilon) \quad \text{para } (\phi \epsilon) \leq m \quad (29)$$

ou

$$LR = \sigma_0 \cdot (\phi \epsilon)^m \quad \text{para } (\phi \epsilon) > m \quad (30)$$

Tendo em mãos σ_0 e m levantados das curvas de tração faz-se a comparação entre $\phi \epsilon$ e m escolhe-se a equação (29) ou (30).

3.4.3. Ductilidade

Pode-se de um modo geral se dizer que a ductilidade é a propriedade que traduz a habilidade do material em suportar deformação plástica sem fraturar. Adequada ductilidade é uma importante consideração em engenharia, porque ela permite ao material uma re-distribuição de tensões, representando assim a habilidade do material para fluir plasticamente antes da fratura⁽⁸⁾.

A ductilidade é medida em termos de alongamento ou de redução de área⁽⁸⁾, ou seja

$$e_f = \frac{L_f - L_o}{L_o} \quad (31)$$

ou

$$r = \frac{A_o - A_f}{A_o} \quad (32)$$

Como o alongamento é medido em termos do comprimento inicial e é dependente deste, fazem-se ensaios em corpos de prova que sejam geomêtricamente semelhantes, ou seja, que tenham a mesma relação $L_o/\sqrt{A_o}$ ⁽⁸⁾.

Pela norma MB-4 da ABNT⁽⁹⁾, para corpos de prova de seção circular:

$$\frac{L_o}{\sqrt{A_o}} = 5,65 \quad (33)$$

Se o material foi pré-encruado por tração de um valor ϵ abaixo da deformação de estrição ($\epsilon \leq \epsilon_u = m$), o alongamento residual em um corpo de prova novamente padronizado será (ver apêndice A):

$$e_f^\epsilon = \exp(\epsilon_u - \epsilon) - 1 + k \cdot \beta \quad (34)$$

onde os símbolos ϵ_u , k e β tem seu significado dado no apêndice deste trabalho. Se o material sofrer um passe de trefilação, então, devido a deformação redundante sua nova ductilidade será:

$$e_f^{\phi \epsilon} = \exp(\epsilon_u - \phi \cdot \epsilon) - 1 + k \cdot \beta \quad (35)$$

Para $\phi \cdot \epsilon > m$, serão feitos testes para verificar se é válida a afirmação de que $e_f = k \cdot \beta$ para valores acima de ϵ_u .

3.4.4. Dureza

De um modo geral, a dureza está ligada à resistência à deformação, e, para os metais, é a medida de sua resistência à deformação permanente. Em conformação mecânica, a dureza representa a resistência à indentação.

O teste de dureza geralmente é feito indentando-se o material com uma esfera ou um indentador piramidal e medindo-se a resistência à penetração. Existe relação entre as medidas de dureza e a resistência mecânica do material⁽⁸⁾.

Em uma barra recozida, geralmente os testes de dureza acusam um perfil de dureza uniforme do centro até a periferia⁽⁵⁾, enquanto que numa barra trefilada⁽⁵⁾, a dureza geralmente cresce do centro para a periferia devido ao trabalho redundante envolvido.

Serão discutidos os testes de dureza feitos tanto em laminados quanto em trefilados e verificada alguma relação de dependência entre tais medidas.

4. TÉCNICAS EXPERIMENTAIS

Neste trabalho foram utilizadas barras redondas de aço AISI 1212 em cinco diâmetros diferentes: 19,05mm, 17,46mm, 15,88mm, 14,29mm, 12,70mm. As barras foram obtidas no estado laminado e, em cada bitola foram usadas em média quatro barras de aproximadamente 3m de comprimento cada uma.

Para cada grupo de barras, uma foi separada e as outras foram submetidas a diferentes tratamentos térmicos para que cada barra diferisse da outra quanto a propriedades mecânicas iniciais (quadro 1). Depois, cada barra foi cortada em média em 5 peças que variavam de 1m a 1,36m. Uma peça era destinada a teste de tração e dureza, e as outras à trefilações em diferentes reduções. Cada peça era apontada em uma apontadeira tipo descascadeira para facilitar sua entrada na fieira sem flambagem quando empurrada pelo push-pointer hidráulico da trefila.

Das barras destinadas à trefilação, cada uma, na medida do possível foi conformada em uma redução de área diferente das demais, para que cobrissem uma faixa de 0 a 40% de R.A. As trefilações foram realizadas em duas máquinas de trefilação: as bitolas de 12,70mm a 15,88mm foram trefiladas em uma máquina OTT ($F_{\text{máx}}=20\text{t}$), as da faixa de 17,46 a 19,05mm em uma máquina DEMAG ($F_{\text{máx}}=30\text{tons}$) (quadros 1 e 2). A velocidade de trefilação girava em torno de 10 a 15 m/min. A lubrificação foi feita com óleo de trefilação comercial (TREFILUB-55-CELUMI) esguichado sobre a barra à entrada da fieira. As fieiras usadas tinham o núcleo fabricado à base de carboneto de tungstênio sinterizado; o polimento interno foi feito com pó de diamante 4/6 μ . As carcaças são de aço alto carbono ou aço liga. As medidas dos ângulos das fieiras eram tiradas de moldes de parafina feitas após as trefilações. Os moldes eram partidos ao meio, colocadas sobre uma folha de papel e riscadas. Os ângulos eram medidos tomando-se como base o início do ponto de contato e o começo do paralelo da fieira (ver figura 8).

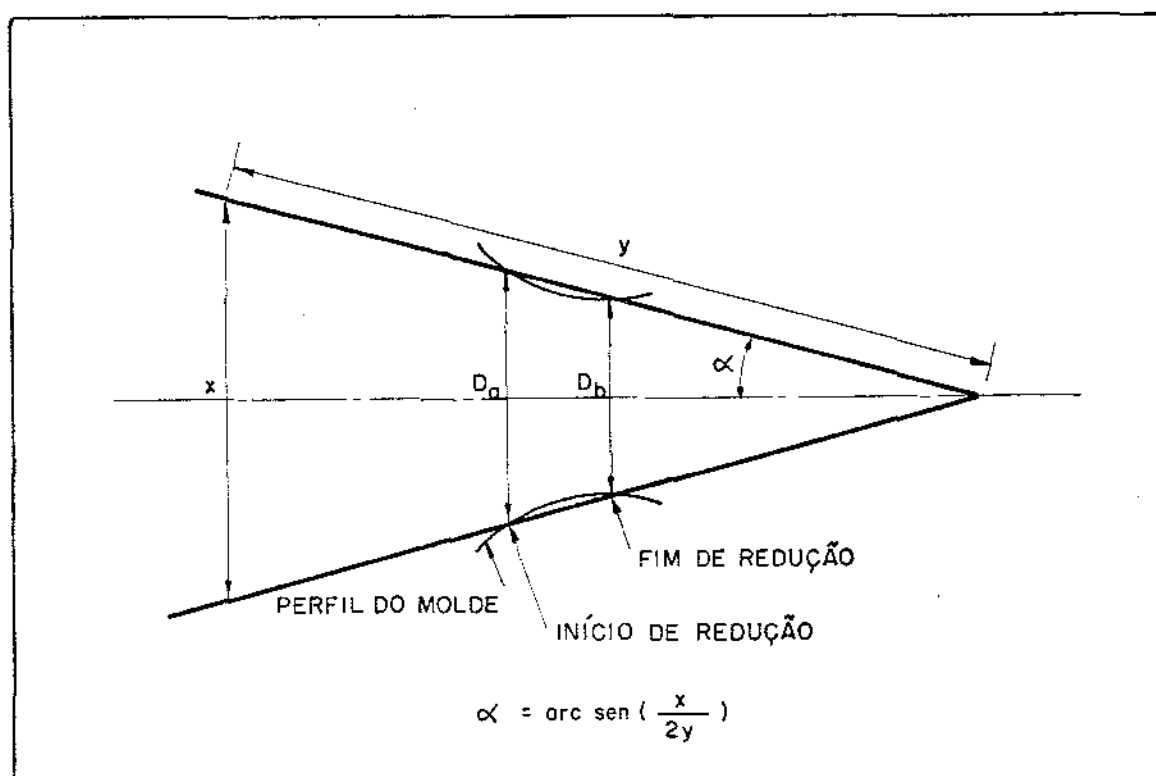


Figura 8 - Medida dos ângulos de fieira a partir do risco do molde.

Após as trefilações, eram cortadas de cada barra 2 corpos de prova para testes de tração e 2 corpos de prova para testes de dureza. Nas barras laminadas procedeu-se do mesmo modo (figura 9).

Os corpos de prova de tração tinham de 25 a 30cm de comprimento e os únicos preparativos feitos antes do teste eram o lixamento no centro do corpo de prova para nuclear a estrição (0,05 a 0,10mm no diâmetro) e a marcação do Comprimento Inicial ($L_0=5D_0$). Os testes foram feitos com os corpos de prova plenos (tanto os laminados quanto os trefilados) usando-se garras de atrito para prender os corpos de prova aos cabeçotes de tração. Devido à limitação do conjunto de garras de uma máquina (capacidade máxima de 15mm

no diâmetro) os testes foram feitos em 2 máquinas:

-WOLPERT AMSLER: capacidade máx. de 20 tons. de força; garras com capacidade de bitola redonda de 5 a 15mm; pertencente ao PIQ-GPA-ACESITA; velocidade de teste de aproximadamente $10\text{N/mm}^2/\text{seg.}$; medição de alongamento usando extensômetro de LVDT.

-KRATOS UNIVERSAL: capacidade máx. de 20 tons. de força; garras com capacidade de bitola redonda de 15 a 30mm; pertencente ao DEM.EEUFMG; velocidade de teste de aproximadamente $5\text{N/mm}^2/\text{seg.}$; medição de alongamento usando extensômetro de STRAIN-GAGE acoplado a uma ponte VISHAY modelo VE-20/A.

Dos gráficos de força vs. alongamento obtidos são tiradas curvas Tensão verdadeira vs. Deformação Logarítmica e determinados ainda Limite de Resistência e Limite convencional de escoamento. Dos corpos de provas rompidos são obtidos o diâmetro da deformação u

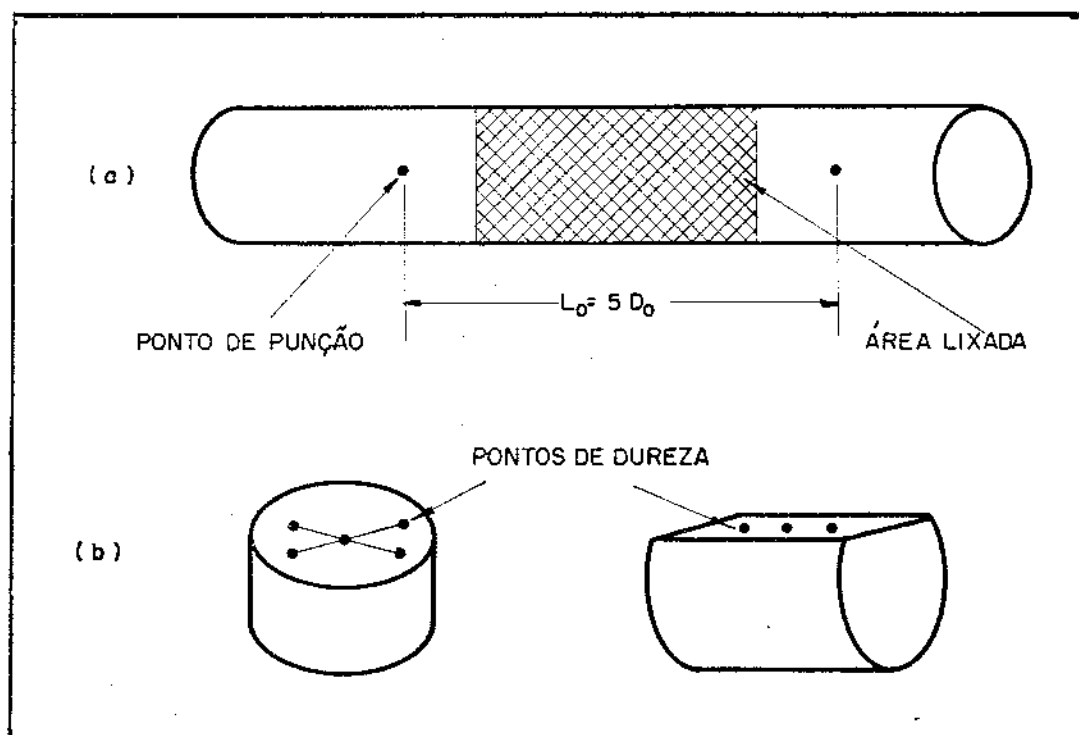


Figura 9 - Corpos de prova de tração (a) e de dureza (b).

niforme e alongamento final. Antes dos testes de tração foram tomadas as medidas de diâmetros e comprimentos úteis de todos os corpos de prova.

Foram realizados 104 testes na máquina Kratos e 97 na máquina Wolpert. Quando o corpo de prova rompia na garra o teste era descartado. Quando rompia fora do L_0 mas não na garra, apenas era desconsiderada a parte de alongamento final e do não uniforme.

Nos testes de dureza foram obtidas dureza de topo e lateral Rockwell b em corpos de prova como os da Figura 9. Todas foram obtidas em uma máquina de dureza OTTO-WOLPERT-WERKE.

Os dados foram manipulados e programados em uma calculadora Texas TI-58 cujos programas principais estão mostrados no apêndice B.

5. RESULTADOS OBTIDOS

Através da consideração de que os dados de Tensão Verdadeira e Deformação Logarítmica de um teste de tração adaptam-se à equação de Hollomon (eq.(15)), montou-se um programa de calculadora (Apêndice BI) que, a partir de dados de Força e alongamento, obtêm as quantidades citadas acima, calcula seus logarítmos e obtêm os valores de σ_0 e m por meio de uma regressão linear. Estes parâmetros e as diferenças e razões entre o Limite de Escoamento e Limite de Resistência são mostrados no Quadro 3.

De posse de σ_0 e m e de alguns valores dos Quadros 1 e 2, as equações (4), (6), (7), (8), (9), (13), (14), (16) e (17) foram programadas para calculadora (Apêndice BII) e obtiveram-se os valores constantes no Quadro 4. Estes valores juntamente com algumas transformações propostas pela equação (22) contituem a base das previsões propostas neste trabalho. Assim sendo têm-se 6 coeficientes de trabalho redundante a testar. De posse dos coeficientes de trabalho redundante e das equações (24), (29) e (30) que foram transformados nos programas apresentados no apêndice B (partes III, IV e V), foram calculados os Limites de Escoamento e de Resistência, os quais juntamente com seus correspondentes obtidos em testes de tração, originaram os quadros 5 e 6.

Os Limites de Escoamento e Resistência previstos, comparados com seus valores reais por uma regressão linear, originam parâmetros de retas que são apresentadas nos Quadros 7 e 8 e cuja discussão é feita posteriormente.

Os erros na previsão do $LE_{0,2}$ e LR estão nos Quadros 9 e 10, e suas médias e desvios padrões nos quadros 11 e 12. O erro é dado por:

$$\text{erro} = \frac{\text{Propriedade prevista} - \text{Propriedade real}}{\text{Propriedade real}} \times 100 \quad (36)$$

Dos testes de tração de barras laminadas foram tiradas os valores constantes no Quadro 13 e cujo significado encontra-se no desenvolvimento matemático sobre alongamento do Apêndice A. Sendo que:

$$\text{Alongamento total} = \text{Along. Uniforme} + \text{Along. Não Uniforme} \quad (37)$$

ou

$$e_f = e_u + k\beta \quad (38)$$

então

$$k\beta = e_f - e_u = e_f - (D_o/D_u)^2 + 1 \quad (39)$$

e cujo programa para cálculo apresenta-se no Apêndice B-VI. Como se vê, obtém-se $k\beta$ (seja laminado ou trefilado) a partir de medidas de e_f , D_u e D_o dos corpos de prova dos testes de tração. Os resultados dos alongamentos parciais medidos dos trefilados apresentam-se no Quadro 14.

As previsões sobre Alongamento foram obtidas através de um programa constante no apêndice B-VII originado da equação (35):

$$e_f^{\phi\epsilon} = \exp(\epsilon u - \phi\epsilon) - 1 + k\beta \quad (35)$$

Os diferentes valores de $\phi\epsilon$ apresentam-se no Quadro 15, e os valores de ϵ_u do laminado foram calculados com base na seguinte transformação:

$$\epsilon_{uLAM} = \ln(e_{fLAM} + 1) - k\beta_{LAM} \quad (40)$$

Os valores das previsões sobre Alongamento total são mostradas no Quadro 16 ao lado dos valores de Alongamento total encontrados na prática.

Finalmente, no Quadro 17 são mostrados os resultados de testes de dureza obtidos de acordo com a figura 9 com a ressalva de que as durezas de topo apresentadas referem-se somente às medidas na metade do diâmetro, devido à problemas de tamanho de amostra e dispersões, que serão narradas oportunamente.

Quadro 1 - Condições Iniciais

Grupo de Bitola (mm)	Nº da Barra	Lim.Resist. (Kg/mm ²)	Limete Escoam. (Kg/mm ²)	Dureza Rockwell B	Tratamentos Térmicos	Local dos Testes
12,70	15	40,61	28,33	T-67,6 S-62,5	Normalização	G
	14	38,19	27,38	T-64,8 S-59,7	Recoz.Subcrítico 25Hs. a 715°C	G
	13	41,75	30,74	T-70,8 S-61,0	Laminada	G
14,29	16	44,14	32,51	T-69,0 S-67,0	Rec.Subcrítico 12Hs. a 700°C	G
	11	42,03	30,36	T-71,1 S-58,1	Rec.Subcrítico 25Hs. a 715°C	G
	17	44,15	31,33	T-72,4 S-66,4	Rec.Subcrítico 6Hs. a 700°C	G
	19	46,39	34,36	T-69,0 S-72,0	Laminada	G
	18	46,65 ✓	33,64	T-74,0 S-72,0	Normalizada	G
15,88	12	41,49 ✓	28,60	T-69,0 S-65,1	Rec.Subcrítico 25Hs. a 715°C	G
	1	42,07 ✓	29,40	T-72,1 S-68,0	Normalização	U
	2	42,18 ✓	28,73	T-70,6 S-65,0	Rec.Subcrítico 6Hs. a 700°C	U
17,46	8	41,03 ✓	27,83	T-69,8 S-66,1	Rec.Subcrítico 25Hs. a 715°C	U
	6	44,72 ✓	30,93	T-74,2 S-71,2	Laminada	U
	7	43,09 ✓	29,32	T-71,3 S-70,2	Normalização	U
	5	43,20	28,41	T-70,5 S-67,5	Rec.Subcrítico 6Hs. a 700°C	U
19,05	10	42,33 ✓	27,23	T-69,4 S-63,5	Normalização	U
	9	39,67 ✓	26,62	T-65,4 S-62,5	Rec.Subcrítico 6Hs. a 700°C	U
	3	39,13	27,33	T-64,0 S-61,3	Rec.Subcrítico 25Hs. a 715°C	U
	4	42,94	29,02	T-70,3 S-65,1	Laminada	U
T-Dureza de Topo		S-Dureza Lateral		G-Testes feitos na Acesita		U-Testes feitos na UFMG

Quadro 2 - Variáveis de Trefilação

Nº da Barra	Bitolas Iniciais (mm)	Bitolas Finais (mm)	Redução de Área %	Nº da Fieira Usada	Angulo Medido (α°)	ϵ_{TR}
15-2	12,85	11,05	26,05%	10	9,4°	0,3018
15-3	12,90	12,32	8,79%	647	7,09°	0,0920
15-4	12,88	11,63	18,47%	610	11,9°	0,2042
15-5	12,87	11,73	16,93%	603	7,27°	0,1855
14-2	12,77	12,25	7,98%	496	6,69°	0,0831
14-3	12,75	11,05	24,89%	10	9,4°	0,2815
14-4	12,71	12,64	1,1%	10	7,63°	0,0110
14-5	12,74	11,73	15,23%	603	7,27°	0,1652
13-2	13,10	10,95	30,13%	10	9,08°	0,3585
13-3	13,12	12,66	6,89%	10	7,63°	0,0714
13-4	13,09	11,25	26,14%	500	10,14°	0,3030
13-5	13,10	12,93	2,58%	444	6,83°	0,0261
16-2	14,38	13,38	13,42%	275	7,08°	0,1442
16-3	14,34	12,65	22,18%	463	8,46°	0,2508
16-4	14,37	13,98	5,35%	545	5,9°	0,0550
16-5	14,35	13,63	9,52%	605	7,38°	0,1030
11-2	14,47	13,63	11,27%	605	7,31°	0,1196
11-3	14,41	14,17	3,3%	590	8,47°	0,0336
17-2	14,41	12,32	26,90%	647	7,47°	0,3134
17-3	14,40	13,63	10,41%	605	7,38°	0,1099
17-4	14,40	12,92	19,50%	444	8,33°	0,2169
17-5	14,40	14,19	2,90%	460	6,52°	0,0294
19-2	14,59	13,63	12,47%	605	7,38°	0,1361
19-3	14,45	12,80	21,53%	541	7,67°	0,2425
19-4	14,45	14,22	3,16%	592	7,43°	0,0321
19-5	14,46	13,98	6,53%	545	5,9°	0,0675
18-2	14,47	13,65	11,01%	605	7,38°	0,1167
18-3	14,43	12,80	21,32%	541	7,67°	0,2397
18-4	14,53	14,22	4,22%	5 92	7,43°	0,0431

Quadro 2

Nº da Barra	Bitolas Iniciais (mm)	Bitolas Finais (mm)	Redução de Área %	Nº da Fieira Usada	Ângulo Medido α°	ϵ_{TR}
12-2	15,85	14,62	14,92	455	10,39°	0,1616
12-3	15,88	14,38	18,0	363	6,60°	0,1984
12-4	15,89	12,32	39,89	647	7,86°	0,5089
12-5	15,81	15,27	6,71	259	8,40°	0,0695
12-6	15,90	14,17	20,58	590	8,47°	0,2304
1-2	15,80	15,27	6,60	259	8,40°	0,0682
1-3	15,95	15,73	1,50	649	5,9°	0,0151
1-4	15,98	12,79	35,94	541	7,9°	0,4453
1-5	15,95	14,17	21,07	590	8,47°	0,2367
1-6	15,95	13,39	29,52	275	8,57°	0,3499
2-2	15,97	15,83	1,75	649	5,9°	0,0176
2-3	15,95	14,17	21,07	590	8,47°	0,2367
2-4	16,03	13,38	30,33	275	8,57°	0,3614
2-5	16,01	13,92	24,40	652	7,7°	0,2798
2-6	15,95	15,26	8,46	259	8,4°	0,0884
8-2	17,34	16,11	13,68	16	6,95°	0,1472
8-3	17,36	16,42	10,54	12	9,05°	0,1113
8-4	17,30	16,71	6,70	23	9,44°	0,0694
8-5	17,30	15,03	24,52	566	9,4°	0,2813
6-2	17,57	17,40	1,93	39-16	5,96°	0,0194
6-3	17,56	16,61	10,53	678	6,13°	0,1112
6-4	17,59	13,91	37,47	652	9,37°	0,4694
6-5	17,56	15,25	24,58	1	8,02°	0,2821
7-2	17,45	16,12	14,66	16	6,95°	0,1586
7-3	17,51	15,25	24,14	1	8,02°	0,2764
7-4	17,48	16,61	9,71	678	6,13°	0,1021
7-5	17,39	14,94	26,19	11	10,0°	0,3037
5-2	17,48	16,61	9,17	678	6,13°	0,1021
5-3	17,49	15,25	23,97	1	8,02°	0,2741
5-4	17,45	15,85	17,5	649	7,59°	0,1923
5-5	17,44	14,74	28,57	262	15,65°	0,3364

Quadro 2

Nº da Barra	Bitolas Iniciais (mm)	Bitolas Finais (mm)	Redução de Área %	Nº da Fieira Usada	Ângulo Medido α°	ϵ_{TR}
10-2	19,10	18,71	4,04	475	6,71°	0,0413
10-3	18,99	17,00	19,86	28	9,83°	0,2214
10-4	19,09	16,60	24,39	678	10,48°	0,2795
10-5	19,14	19,03	1,15	626	6,87°	0,0115
9-2	19,30	17,92	13,79	4280	6,73°	0,1484
9-3	19,29	17,65	16,28	508	7,73°	0,1777
9-4	19,35	19,02	3,38	626	6,87°	0,0344
9-5	19,23	16,72	24,4	23	9,44°	0,2797
5-2	19,10	18,72	3,94	474	4,34°	0,0402
5-3	19,12	19,02	1,04	626	6,87°	0,0105
5-4	19,07	16,60	24,23	678	10,48°	0,2774
5-5	19,12	15,60	33,43	2	8,42°	0,4069
4-2	19,36	18,45	9,18	H11	7,54°	0,0963
4-3	19,38	15,60	35,2	2	8,42°	0,4339
4-4	19,38	16,92	23,78	26	8,09°	0,2715
4-5	19,34	19,03	3,18	626	6,87°	0,0323

Quadro 3 - Propriedades do Laminado

Nº da Amostra	LR-LE	LE÷LR	σ_0	m
15-1	12,36	0,696	74,643	0,240
14-1	10,81	0,717	69,288	0,234
13-1	11,01	0,736	76,267	0,240
16-1	11,63	0,737	79,077	0,223
11-1	11,67	0,722	76,424	0,238
17-1	12,81	0,710	80,966	0,240
19-1	12,02	0,741	83,933	0,226
18-1	13,01	0,721	83,794	0,229
12-1	12,89	0,689	76,882	0,257
1-1	12,67	0,699	79,064	0,249
2-1	13,45	0,681	79,822	0,261
8-1	13,20	0,678	80,849	0,283
6-1	13,49	0,696	85,308	0,264
7-1	13,78	0,680	84,644	0,273
5-1	14,79	0,658	84,143	0,272
10-1	15,10	0,643	82,273	0,267
9-1	13,05	0,671	79,723	0,283
3-1	11,80	0,698	76,016	0,270
4-1	13,92	0,676	84,785	0,275

Quadro 4 - Fatores de Trabalho Redundante

Nº da Amostra	ϕ_H	ϕ_W	ϕ_J	ϕ_C	C_1	C_2	
15	-2	1,1414	1,3336	1,3057	0,9680	0,779723	0,086815
	-3	1,5257	2,1507	1,9306	1,2457		
	-4	1,3687	1,7803	1,677	1,1307		
	-5	1,2086	1,4909	1,4146	1,0168		
14	-2	1,5542	2,2137	1,9768	1,2597	0,780159	0,085551
	-3	1,1556	1,3629	1,3289	0,9758		
	-4	6,6671	12,8246	10,298	4,8937		
	-5	1,2489	1,5745	1,4803	1,0424		
13	-2	1,0927	1,2359	1,2264	0,9310	0,777958	0,086687
	-3	1,7756	2,6645	2,3375	1,4230		
	-4	1,1609	1,3675	1,3377	0,9798		
	-5	3,0703	5,3631	4,4435	2,3565		
16	-2	1,2916	1,6649	1,5489	1,0393	0,759365	0,081820
	-3	1,163	1,3861	1,3407	0,9516		
	-4	1,7783	2,687	2,341	1,3707		
	-5	1,481	2,0545	1,8574	1,1678		
11	-2	1,3922	1,8714	1,7134	1,1439	0,776539	0,086298
	-3	2,9925	5,1817	4,319	2,2902		
17	-2	1,08	1,2232	1,2056	0,9170	0,773342	0,086415
	-3	1,4427	1,9756	1,7956	1,1774		
	-4	1,2020	1,4681	1,4043	1,0044		
	-5	2,74	4,6782	3,9043	2,1092		
19	-2	1,3344	1,7508	1,6194	1,0701	0,758318	0,082577
	-3	1,1453	1,3563	1,3118	0,9403		
	-4	2,8198	4,8354	4,0365	2,0894		
	-5	1,6121	2,3417	2,0708	1,2612		

Fatores de Trabalho Redundante

Nº da Amostra	ϕ_H	ϕ_W	ϕ_J	ϕ_C	C_1	C_2	
13	-2	1,41	1,9079	1,7425	1,1283	0,761096	0,083370
	-3	1,1484	1,5627	1,3167	0,9470		
	-4	2,3232	3,8039	3,2285	1,7609		
12	-2	1,4191	1,8986	1,7584	1,2009	0,792702	0,091379
	-3	1,1589	1,5936	1,3336	1,0046		
	-4	1,0101	1,0761	1,0917	0,8914		
	-5	1,8926	2,8996	2,5284	1,5610		
	-6	1,1883	1,4385	1,382	1,0266		
11	-2	1,9113	2,9385	2,5589	1,5447	0,783081	0,088940
	-3	4,1525	7,6244	6,2026	3,2043		
	-4	1,0292	1,115	1,1229	0,8933		
	-5	1,1802	1,4216	1,3687	1,0074		
	-6	1,0857	1,2257	1,2149	0,9350		
	-6	1,0857	1,2257	1,2149	0,9350		
10	-2	3,6868	6,6559	5,4451	2,9474	0,793133	0,092264
	-3	1,1802	1,4216	1,3616	1,0230		
	-4	1,0792	1,2123	1,2043	0,9457		
	-5	1,1109	1,285	1,2559	0,9702		
	-6	1,6758	2,4497	2,1754	1,4028		
	-6	1,6758	2,4497	2,1754	1,4028		
9	-2	1,2759	1,6333	1,5241	1,1323	0,809960	0,097946
	-3	1,5611	2,2056	1,9892	1,3636		
	-4	2,0197	4,3852	3,7046	1,7360		
	-5	1,1604	1,3727	1,3367	1,0378		
8	-2	3,4477	6,158	5,0563	2,7690	0,790119	0,092644
	-3	1,3418	1,7776	1,6311	1,1460		
	-4	1,0480	1,1418	1,1536	0,9192		
	-5	1,1186	1,2981	1,2683	1,0003		

Fatores de Trabalho Redundante

Nº da Amostra		ϕ_H	ϕ_W	ϕ_J	ϕ_C	C_1	C_2
7	-2	1,2474	1,5742	1,4778	1,0892	0,798498	0,095174
	-3	1,1235	1,3082	1,2763	0,9910		
	-4	1,3831	1,8633	1,6983	1,1967		
	-5	1,1564	1,3593	1,3303	1,0166		
5	-2	1,3831	1,8633	1,6983	1,1954	0,798169	0,094944
	-3	1,1255	1,3124	1,2796	0,9918		
	-4	1,2108	1,4928	1,4184	1,0592		
	-5	1,2707	1,5446	1,5188	1,1034		
10	-2	2,2425	3,6439	3,0965	1,8557	0,795415	0,093599
	-3	1,2523	1,5589	1,4865	1,0844		
	-4	1,1946	1,434	1,393	1,0394		
	-5	5,8728	11,1871	9,003	4,6804		
9	-2	1,2602	1,6027	1,4985	1,1207	0,811006	0,097990
	-3	1,2447	1,5617	1,4735	1,1079		
	-4	2,553	4,2875	3,6019	2,1739		
	-5	1,1632	1,3781	1,3412	1,0412		
3	-2	1,7847	2,7153	2,3508	1,5206	0,804933	0,095022
	-3	6,3678	12,2158	9,8083	5,1400		
	-4	1,197	1,4389	1,3965	1,0545		
	-5	1,0539	1,1616	1,1632	0,9422		
4	-2	1,5361	2,1682	1,9478	1,3223	0,800211	0,095763
	-3	1,0432	1,1395	1,1457	0,9300		
	-4	1,13	1,3212	1,2869	0,9991		
	-5	2,661	4,5118	3,7775	2,2180		

Quadro 5 - Limite de Escoamento

Nº da Amostra	Real LE _{0,2}	Previsão					
		LE _H	LE _{Wφ}	LE _{Jφ}	LE _C	LE _{Wφ}	LE _{Jφ}
15-2	58,95	57,81	60,01	59,70	55,57	59,21	58,97
15-3	46,20	46,61	50,61	49,32	44,40	48,84	47,83
15-4	57,17	54,98	58,56	57,72	52,52	57,01	56,35
15-5	53,24	52,15	54,84	54,15	50,03	53,83	53,29
16-2	41,90	42,92	46,63	45,41	40,86	45,01	44,05
16-3	54,63	53,27	55,37	55,04	51,21	54,62	54,35
16-4	30,60	37,63	43,85	41,66	35,00	39,16	37,56
16-5	49,26	47,89	50,56	49,83	45,91	49,55	48,97
18-2	63,21	60,92	62,75	62,63	58,63	62,26	62,07
18-3	47,27	46,48	51,23	49,65	44,08	46,75	45,79
18-4	62,95	59,36	61,74	61,42	57,00	63,52	62,81
18-5	34,88	41,65	47,61	45,51	39,09	33,88	33,71
19-2	54,44	54,38	57,54	56,63	51,81	56,36	55,63
19-3	59,94	60,10	62,49	62,03	57,47	61,67	61,29
19-4	43,29	47,12	51,66	50,09	44,46	49,62	48,39
19-5	51,17	52,01	55,94	54,70	49,33	54,33	53,34
21-2	67,31	62,44	64,34	64,11	60,04	63,74	63,56
21-3	54,47	52,06	56,14	54,87	49,59	54,39	53,40
21-4	62,45	58,66	61,54	60,89	56,18	60,45	59,93
21-5	41,52	44,25	50,31	48,17	41,56	46,84	45,22

Limite de Escoamento

Nº da Amostra	Real LE _{0,2}	Previsão					
		LE _H	LE _{Wφ}	LE _{Jφ}	LE _C	LE _{Wφ}	LE _{Jφ}
19-2	56,03	57,04	60,66	59,60	54,26	59,25	58,41
19-3	62,90	62,80	65,25	64,76	60,06	64,42	64,03
19-4	42,25	48,71	55,04	52,84	45,52	51,53	49,84
19-5	49,38	50,79	55,28	53,76	48,05	53,34	52,14
18-2	56,96	55,40	59,38	58,15	52,64	57,76	56,79
18-3	64,19	62,34	64,83	64,32	59,64	63,98	63,58
18-4	44,13	49,45	55,36	53,32	46,40	52,29	50,71
12-2	55,78	52,64	56,74	55,63	50,43	54,85	54,00
12-3	56,68	52,69	55,24	54,62	50,79	54,29	53,80
12-4	66,77	64,79	65,86	66,10	62,74	65,60	65,79
12-5	47,74	45,64	50,93	49,16	43,43	48,16	46,83
12-6	58,70	55,10	57,88	57,28	53,07	56,78	56,32
1-2	40,45	47,65	53,03	51,23	45,19	50,27	48,90
1-3	31,15	39,72	46,19	43,88	37,24	41,77	40,09
1-4	62,25	65,13	66,43	66,55	62,87	66,08	66,17
1-5	52,56	57,58	60,31	59,74	55,36	59,27	58,84
1-6	55,64	62,15	64,06	63,92	59,89	63,41	63,30
2-2	-	39,09	45,61	43,28	36,87	41,17	39,49
2-3	52,29	57,21	60,06	59,39	55,12	58,93	58,41
2-4	57,94	62,43	64,35	64,24	60,31	63,68	63,60
2-5	50,79	58,83	61,11	60,75	56,79	60,29	60,00
2-6	43,35	48,49	53,54	51,91	46,29	51,01	49,77

Limite de Escoamento

Nº da Amostra	Real LE _{0,2}	Previsão					
		LE _H	LE _{Wφ}	LE _{Jφ}	LE _C	LE _{Wφ}	LE _{Jφ}
11-2	54,99	49,85	53,49,	52,38	47,57	51,97	51,10
11-3	41,13	44,20	50,38	48,24	41,47	46,71	45,11
8-2	48,79	50,39	54,03	52,98	48,71	52,40	51,61
8-3	45,06	49,30	54,36	52,79	47,45	51,75	50,58
8-4	42,31	46,39	57,76	55,07	44,45	52,67	50,75
8-5	56,30	58,91	61,78	61,32	57,08	60,57	60,22
6-2	37,24	41,82	48,74	46,27	39,47	44,37	42,32
6-3	51,13	51,65	55,63	54,38	49,55	53,90	52,94
6-4	69,59	70,75	72,37	72,57	68,35	71,84	72,00
6-5	60,95	62,93	65,45	65,05	61,10	64,52	64,21
7-2	54,64	54,37	57,94	56,95	52,39	56,42	55,66
7-3	58,36	61,50	64,11	63,68	59,43	63,11	62,78
7-4	46,52	49,59	53,80	52,45	47,67	51,87	50,85
7-5	63,52	63,60	66,47	66,08	61,40	65,29	64,99
5-2	48,74	49,39	53,57	52,23	47,47	51,66	50,64
5-3	57,98	61,10	63,71	63,27	59,03	62,71	62,37
5-4	54,88	56,60	59,91	59,09	54,57	58,53	57,90
5-5	63,01	66,76	70,41	70,09	64,25	68,65	68,40

Limite de Escoamento

Nº da Amostra	Real $LE_{0,2}$	Previsão					
		LE_H	$LE_{W\phi}$	$LE_{J\phi}$	LE_C	$LE_{W\phi}$	$LE_{J\phi}$
10-2	36,35	43,61	49,64	47,53	41,46	46,16	44,61
10-3	52,95	58,44	61,95	61,17	56,24	60,42	59,83
10-4	57,01	61,41	64,47	63,98	59,17	63,18	62,80
10-5	27,24	40,12	47,65	44,97	37,77	41,61	39,74
9-2	46,30	49,64	53,13	52,13	48,02	51,59	50,83
9-3	50,47	52,05	55,50	54,59	50,36	53,98	53,29
9-4	30,16	40,09	46,42	44,19	38,31	42,39	40,79
9-5	52,34	58,05	60,90	60,43	56,26	59,69	59,34
5-2	33,43	37,27	41,75	40,16	35,69	39,42	38,23
5-3	28,36	36,56	43,60	41,09	34,50	37,75	36,03
5-4	49,09	56,42	59,30	58,82	54,52	58,07	57,70
5-5	53,71	60,46	62,07	62,09	58,65	61,54	61,56
4-2	44,29	50,09	55,08	53,47	48,06	52,60	51,40
4-3	61,94	68,16	69,84	69,94	66,04	69,30	69,38
4-4	55,55	61,23	63,93	63,47	59,19	62,88	62,52
4-5	34,92	43,14	49,89	47,51	41,03	45,62	43,90

Quadro 6 - Limite de Resistência

Nº da Amostra	Real LR	LR _H	LR _{Wϕ}	LR _{Jϕ}	LR _C	LR _{Wϕ}	LR _{Jϕ}
15-2	59,98	57,81	60,01	59,70	55,57	59,21	58,97
15-3	48,20	46,73	49,50	48,50	45,54	48,17	47,49
15-4	57,17	54,98	58,56	57,72	51,16	57,01	56,35
15-5	54,83	50,82	54,84	54,15	49,04	53,83	53,29
14-2	43,14	43,46	45,91	45,01	42,41	44,74	44,12
14-3	55,77	53,27	55,37	55,04	51,21	54,62	54,35
14-4	39,58	41,11	44,00	42,79	40,31	41,67	41,09
14-5	50,44	46,94	50,56	49,83	45,37	49,55	47,92
13-2	64,03	60,92	62,75	62,63	58,63	62,26	62,07
13-3	49,64	47,39	50,50	49,33	46,21	47,54	47,03
13-4	63,19	59,36	61,74	61,42	57,00	63,52	62,81
13-5	44,38	45,24	48,03	46,89	44,40	43,19	43,16
16-2	57,43	53,17	57,54	56,63	51,27	54,93	54,25
16-3	62,61	60,10	62,49	62,03	57,47	61,67	61,30
16-4	49,95	48,68	51,17	50,21	47,60	49,94	49,29
16-5	54,56	51,41	54,54	53,44	49,78	53,14	52,36
17-2	67,47	62,44	64,34	64,11	60,04	63,74	63,56
17-3	58,44	51,74	54,86	53,78	50,25	53,41	52,66
17-4	64,41	58,66	61,54	60,89	54,90	60,45	59,93
17-5	50,35	47,85	50,66	49,52	46,97	48,89	48,22

Limite de Resistência

Nº da Amostra	Real IR	Previsto					
		LR _H	LR _{Wϕ}	LR _{Jϕ}	LR _C	LR _{Wϕ}	LR _{Jϕ}
11-2	58,31	49,65	52,57	51,59	48,19	51,25	50,56
11-3	50,02	46,47	50,02	48,59	45,39	47,71	46,89
19-2	59,15	55,63	60,66	57,83	53,65	57,51	56,76
19-3	65,05	62,80	65,25	64,76	60,06	64,42	64,03
19-4	50,83	50,78	54,18	52,80	49,61	52,10	51,27
19-5	54,82	51,72	54,34	53,35	50,51	53,10	52,42
18-2	60,47	55,04	58,33	57,22	53,26	56,88	56,08
18-3	66,55	62,34	64,83	64,33	58,59	63,98	63,57
18-4	52,71	51,61	55,01	53,67	50,37	53,06	52,22
12-2	58,16	52,64	56,74	55,63	50,37	54,86	53,44
12-3	58,17	52,22	55,24	54,62	50,64	54,29	53,25
12-4	67,03	64,79	65,86	66,10	62,74	65,60	65,80
12-5	52,40	47,32	50,75	49,46	46,24	48,79	47,98
12-6	59,76	55,10	57,88	57,28	52,56	56,78	56,32
1-2	55,11	47,93	51,41	50,10	46,75	49,46	48,63
1-3	47,29	44,79	47,20	46,20	44,16	45,43	44,90
1-4	68,32	65,13	66,43	66,55	62,87	66,08	66,17
1-5	63,13	57,58	60,31	59,74	53,40	59,26	58,82
1-6	65,66	62,15	64,06	63,92	59,89	63,42	63,30

Limite de Resistência

Nº da Amostra	Real LR	Previsto					
		LR _H	LR _{Wφ}	LR _{Jφ}	LR _C	LR _{Wφ}	LR _{Jφ}
2-2	-	45,01	47,43	46,42	44,43	45,65	39,49
2-3	60,68	57,21	60,06	59,39	53,74	58,93	58,41
2-4	64,00	62,43	64,35	64,24	60,31	63,68	63,60
2-5	61,27	58,83	61,11	60,75	56,79	60,29	60,00
2-6	54,34	48,92	52,38	51,13	47,75	50,50	49,69
8-2	55,46	49,50	52,18	51,35	48,47	50,91	50,33
8-3	53,96	48,82	52,45	51,20	47,76	50,43	49,63
8-4	51,48	47,20	57,76	53,06	46,28	51,11	49,75
8-5	60,20	58,91	61,78	61,32	57,08	60,57	60,22
6-2	48,83	47,82	50,41	49,34	47,19	48,54	47,97
6-3	59,50	51,92	54,50	53,62	50,80	53,29	52,68
6-4	71,95	70,75	72,37	72,57	68,35	71,84	72,00
6-5	65,76	62,93	65,45	65,05	61,10	64,52	64,20
7-2	60,11	52,53	55,32	54,48	51,22	54,04	53,45
7-3	64,30	61,50	64,11	63,68	59,43	63,11	62,78
7-4	55,73	49,64	52,13	51,26	48,70	50,90	50,30
7-5	67,10	63,60	66,47	66,08	61,40	65,29	64,99
5-2	55,17	49,75	52,25	51,38	48,81	51,03	50,43
5-3	61,39	61,09	63,71	63,27	56,70	62,71	62,37
5-4	59,08	54,53	59,91	59,09	52,96	56,23	55,65
5-5	65,64	66,77	70,41	70,10	64,25	68,65	68,40

Limite de Resistência

Nº da Amostra	Real LR	Previsto					
		LR _H	LR _{WΦ}	LR _{JΦ}	LR _C	LR _{Wϕ}	LR _{Jϕ}
10-2	46,74	46,43	49,20	48,10	45,70	47,47	46,82
10-3	57,20	58,44	61,95	61,17	53,82	60,43	59,83
10-4	61,09	61,41	64,47	63,98	59,17	63,18	62,80
10-5	42,27	45,29	48,16	46,96	44,68	45,74	45,19
9-2	51,82	47,83	50,32	49,55	46,85	49,15	48,62
9-3	52,58	49,49	55,50	51,54	48,30	51,02	50,45
9-4	42,19	43,31	45,97	44,90	42,75	44,15	43,56
9-5	56,58	58,05	60,90	60,43	56,26	59,69	59,34
3-2	41,45	42,04	43,64	43,01	41,60	42,74	42,34
3-3	39,44	41,83	44,48	43,37	41,30	42,19	41,69
3-4	52,18	56,42	59,30	58,82	54,52	58,07	57,70
3-5	56,69	60,07	62,07	62,09	58,65	61,54	61,56
4-2	51,65	49,78	52,92	51,80	48,77	51,24	50,51
4-3	64,04	68,16	69,83	69,94	66,03	69,30	69,38
4-4	59,59	61,23	63,93	63,47	56,32	62,88	62,52
4-5	44,96	46,80	49,68	48,51	46,13	47,70	47,06

Quadro 7 - Comparação de LE previstos com $LE_{0,2}$

Reduções de Área	Características da reta	LE_H	$LE_{W\phi}$	$LE_{J\phi}$	LE_C	$LE_{W\phi}$	$LE_{J\phi}$
R.A. >0% (75 dados)	b	-10,63	-25,46	-18,47	-7,84	-12,13	-8,39
	a	1,154	1,335	1,236	1,150	1,142	1,090
	θ	49,08	53,17	51,02	48,98	48,80	47,47
	IC	0,929	0,897	0,911	0,927	0,920	0,930
R.A. >6% (75 dados)	b	4,10	-4,08	-0,11	6,19	-0,19	3,11
	a	0,904	0,994	0,939	0,904	0,949	0,904
	θ	42,16	44,82	43,20	42,10	43,49	42,12
	IC	0,869	0,825	0,841	0,859	0,870	0,870

Quadro 8 - Comparação de LR previstos com LR real

Reduções de Área	Características da reta	LR_H	$LR_{W\phi}$	$LR_{J\phi}$	LR_C	$LR_{W\phi}$	$LR_{J\phi}$
R.A. >0% (75 dados)	b	3,51	-1,38	2,19	0,43	3,16	5,08
	a	0,981	1,016	0,968	1,073	0,962	0,935
	θ	44,44	45,44	44,06	47,03	43,89	43,08
	IC	0,921	0,920	0,924	0,913	0,932	0,927
R.A. >6% (57 dados)	b	13,60	8,59	11,62	11,68	11,89	14,08
	a	0,813	0,857	0,816	0,880	0,820	0,788
	θ	39,11	40,58	39,21	41,34	39,36	38,25
	IC	0,910	0,889	0,902	0,906	0,913	0,908

Obs.: b = Interseção com ordenada;
a = Inclinação da reta;
 θ = Ângulo (graus);
IC = Índice de Correlação estatístico

Quadro 9 - Erros na previsão do Limite de Escoamento

Nº da Amostra	Erro _H	Erro _{Wφ}	Erro _{Jφ}	Erro _C	Erro _{Wφ}	Erro _{Jφ}	Redução < 6 %
15	-2	-1,93	1,80	1,27	-5,73	0,44	0,03
	-3	0,89	9,55	6,75	-3,90	5,71	3,53
	-4	-3,83	2,43	0,96	-8,13	-0,28	-1,43
	-5	-2,05	3,01	1,73	-6,03	1,11	0,09
14	-2	2,43	11,29	8,38	-2,48	7,42	5,13
	-3	-2,49	1,35	0,75	-6,26	-0,02	-0,51
	-4	22,97	43,30	36,14	14,38	27,97	22,75
	-5	-2,78	2,64	1,16	-6,80	0,59	-0,59
13	-2	-3,62	-0,73	-0,92	-7,25	-1,50	-1,80
	-3	-1,67	8,38	5,03	-6,75	-1,10	-3,13
	-4	-5,67	-1,89	-2,40	-9,42	0,94	-0,19
	-5	19,41	36,50	30,48	12,07	0,00	-3,35
16	-2	-0,11	5,69	4,02	-4,83	3,50	2,19
	-3	0,27	4,25	3,49	-4,12	2,89	2,25
	-4	8,85	19,33	15,71	2,70	14,62	11,78
	-5	1,64	9,32	6,90	-3,60	6,18	4,24
11	-2	-9,35	-2,73	-4,75	-13,49	-5,49	-7,07
	-3	7,46	22,49	17,29	0,83	13,57	9,68

Obs 1 : Erro = $\frac{LE_{\text{previsto}} - LE_{\text{Real}}}{LE_{\text{Real}}} \times 100$

Obs 2 : * Significa trefilação com R.A. <6%.

Erros na previsão do LE

Nº da Amostra	Erro _H	Erro _{Wϕ}	Erro _{Jϕ}	Erro _C	Erro _{Wϕ}	Erro _{Jϕ}	Redução < 6 %	
17	-2	-7,24	-4,41	-4,75	-10,80	-5,30	-5,57	
	-3	-4,42	3,07	0,73	-8,96	-0,15	-1,96	
	-4	-6,07	-1,46	-2,50	-10,04	-3,20	-4,04	
	-5	6,58	21,17	16,02	0,10	12,81	8,91	*
19	-2	1,80	8,26	6,37	-3,16	5,75	4,25	
	-3	-0,16	3,74	2,96	-4,52	2,42	1,80	
	-4	15,29	30,27	25,07	7,74	21,96	17,96	*
	-5	2,86	11,95	8,87	-2,69	8,02	5,59	
18	-2	-2,74	4,2	2,09	-7,58	1,40	-0,30	
	-3	-2,88	1,00	0,20	-7,09	-0,33	-0,95	
	-4	12,06	25,45	20,82	5,14	18,49	14,91	*
12	-2	-5,63	1,72	-0,27	-9,59	-1,67	-3,19	
	-3	-7,04	-2,54	-3,63	-10,39	-4,22	-5,08	
	-4	-2,97	-1,36	-1,00	-6,04	-1,75	-1,47	
	-5	-4,40	6,68	2,97	-9,03	0,88	-1,91	
	-6	-6,10	-1,40	-2,42	-9,59	-3,27	-4,05	
14	-2	17,20	31,10	26,65	11,79	24,28	20,89	*
	-3	27,51	48,28	40,87	19,55	34,09	28,70	*
	-4	4,63	6,71	6,91	1,00	6,15	6,30	
	-5	9,55	14,75	13,66	5,33	12,77	11,95	
	-6	11,70	15,13	14,88	7,64	13,96	13,77	

Erros na previsão do LE.

Nº da Amostra	Erro _H	Erro _{WΦ}	Erro _{JΦ}	Erro _C	Erro _{Wδ}	Erro _{Jδ}	Redução < 6%
-2	-	-	-	-	-	-	*
2	-3	9,41	14,86	13,58	5,41	12,70	11,70
-4	7,75	11,06	10,87	4,09	9,91	9,77	
-5	15,83	20,32	19,61	11,81	18,70	18,13	
-6	11,86	23,51	19,75	6,78	17,67	14,81	
8	-2	3,28	10,74	8,59	-0,16	7,40	5,68
-3	9,41	20,64	17,15	5,30	14,85	12,25	
-4	9,64	36,52	30,16	5,06	24,49	19,95	
-5	4,64	9,73	8,92	1,39	7,58	6,96	
6	-2	12,3	30,88	24,25	5,99	19,15	13,64
-3	1,02	8,80	6,36	-3,09	5,42	3,54	
-4	1,67	3,99	4,28	-1,78	3,23	3,46	
-5	3,25	7,38	6,73	0,25	5,86	5,35	
7	-2	-0,49	6,04	4,23	-4,12	3,26	1,87
-3	5,38	9,85	9,12	1,83	8,14	7,57	
-4	6,60	15,65	12,75	2,47	11,50	9,31	
-5	0,13	4,64	4,03	-3,34	2,79	2,31	
5	-2	1,33	9,91	7,16	-2,61	5,99	3,90
-3	5,38	9,88	9,12	1,81	8,16	7,57	
-4	3,13	9,17	7,67	-0,56	6,65	5,50	
-5	5,95	11,74	11,24	1,97	8,95	8,55	

Erros na previsão do LE

Nº da Amostra	Erro _H	Erro _{WΦ}	Erro _{JΦ}	Erro _C	Erro _{Wδ}	Erro _{Jδ}	Redução < 6 %	
10	-2	19,97	36,56	30,76	14,06	26,99	22,72	*
	-3	10,57	17,00	15,52	6,21	14,11	12,99	
	-4	7,72	13,09	12,23	3,79	10,82	10,16	
	-5	47,28	74,93	65,09	38,66	52,75	45,89	*
9	-2	7,21	14,75	12,59	3,71	11,43	9,83	
	-3	3,13	9,97	8,16	-0,22	6,95	5,59	
	-4	32,92	53,91	46,52	27,02	40,55	35,25	*
	-5	10,91	16,35	15,46	7,49	14,04	13,37	
3	-2	11,49	24,89	20,13	6,76	17,92	14,36	*
	-3	28,91	53,74	44,89	21,65	33,11	27,05	*
	-4	14,93	20,80	19,82	11,06	18,29	17,54	
	-5	12,57	15,57	15,60	9,20	14,58	14,62	
4	-2	13,10	24,36	20,73	8,51	18,76	16,05	
	-3	10,04	12,75	12,92	6,62	11,88	12,01	
	-4	10,23	15,09	14,26	6,55	13,20	12,55	
	-5	23,54	42,87	36,05	17,50	30,64	25,72	*

Quadro 10 - Erros na previsão do Limite de Resistência

Nº da Amostra	Erro _H	Erro _{Wφ}	Erro _{Jφ}	Erro _C	Erro _{Wφ}	Erro _{Jφ}	Redução < 6 %
15	-2	-3,62	0,05	-0,47	-7,35	-1,28	-1,68
	-3	-3,05	2,70	0,62	-5,52	-0,06	-1,47
	-4	-3,83	2,43	0,96	-10,51	-0,28	-1,43
	-5	-7,31	0,02	-1,24	-10,56	-1,82	-2,81
14	-2	0,74	6,42	4,33	-1,69	3,71	2,27
	-3	-4,48	-0,72	-1,31	-8,18	-2,06	-2,55
	-4	3,87	11,17	8,11	1,84	5,28	3,82
	-5	-6,94	0,24	-1,21	-10,05	-1,76	-5,00
13	-2	-4,86	-2,00	-3,12	-8,43	-2,76	-3,06
	-3	-4,53	1,73	-0,62	-6,91	-4,23	-5,26
	-4	-6,06	-2,29	-2,80	-9,80	0,52	-0,60
	-5	1,94	8,22	5,66	0,05	-2,68	-2,75
16	-2	-7,42	0,19	-1,39	-10,73	-4,35	-5,54
	-3	-4,01	-0,19	-0,93	-8,21	-1,50	-2,09
	-4	-2,54	2,44	0,52	-4,70	-0,02	-1,32
	-5	-5,77	-0,04	-2,05	-8,76	-2,60	-4,03
11	-2	-14,85	-9,84	-11,52	-17,35	-12,11	-13,29
	-3	-7,10	0,00	-2,86	-9,26	-4,62	-6,26

$$\text{Obs.1 : Erro} = \frac{\text{LR}_{\text{Previsto}} - \text{LR}_{\text{Real}}}{\text{LR}_{\text{Real}}} \times 100$$

Obs.2 : * Significa trefilação com R.A. <6%.

Erros na previsão do LR

Nº da Amostra	Erro _H	Erro _{Wφ}	Erro _{Jφ}	Erro _C	Erro _{Wφ}	Erro _{Jφ}	Redução <6%	
17	-2	-7,46	-4,64	-4,98	-11,01	-5,53	-5,80	*
	-3	-11,46	-6,13	-7,97	-14,00	-8,61	-9,89	
	-4	-8,93	-4,46	-5,46	-14,76	-6,15	-6,96	
	-5	-4,97	0,62	-1,65	-6,72	-2,90	-4,23	
19	-2	-5,95	-2,55	-2,23	-9,30	-2,77	-4,04	*
	-3	-3,46	0,31	-0,45	-7,67	-0,97	-1,57	
	-4	-0,10	6,59	3,88	-2,40	2,50	0,87	
	-5	-5,65	-0,88	-2,68	-7,86	-3,14	-4,38	
18	-2	-8,98	-3,54	-5,37	-11,92	-5,94	-7,26	*
	-3	-6,33	-2,58	-3,34	-11,96	-3,86	-4,48	
	-4	-2,09	4,36	1,82	-4,44	0,66	-0,93	
12	-2	-9,49	-2,44	-4,35	-13,39	-5,57	-8,12	
	-3	-10,23	-5,04	-6,10	-12,94	-6,67	-8,46	
	-4	-3,34	-1,75	-1,34	-6,40	-2,13	-1,83	
	-5	-9,69	-3,15	-5,61	-11,76	-6,89	-8,44	
	-6	-7,80	-3,15	-4,15	-12,05	-4,99	-5,76	
1	-2	-13,03	-6,71	-9,09	-15,17	-10,25	-11,76	*
	-3	-5,29	-0,19	-2,30	-6,62	-3,93	-5,05	
	-4	-4,67	-2,77	-2,59	-7,98	-3,28	-3,15	
	-5	-8,79	-4,47	-5,37	-15,41	-6,13	-6,83	
	-6	-5,35	-2,44	-2,65	-8,79	-3,41	-3,59	

Erros na previsão do LR

Nº da Amostra	Erro _H	Erro _{Wϕ}	Erro _{Jϕ}	Erro _C	Erro _{Wϕ}	Erro _{Jϕ}	Redução <6%
-2	-	-	-	-	-	-	*
-3	-5,72	-1,02	-2,13	-11,44	-2,88	-3,74	
-4	-2,45	0,55	0,38	- 5,77	-0,50	-0,63	
-5	-3,98	-0,26	-0,85	- 7,31	-1,60	-2,07	
-6	-9,97	-3,61	-5,91	-12,13	-7,07	-8,56	
-2	-10,75	-5,91	-7,41	-12,60	-8,20	-9,25	
-3	-9,53	-2,80	-5,11	-11,49	-6,54	-8,02	
-4	-8,31	12,20	3,07	-10,10	-0,72	-3,36	
-5	-2,14	2,62	1,86	- 5,18	0,61	0,03	
-2	-1,26	4,09	1,88	-2,56	0,23	-0,95	*
-3	-12,74	-8,40	-9,88	-14,62	-10,44	-11,46	
-4	-1,67	0,58	0,86	- 5,00	- 0,15	0,07	
-5	-4,30	-0,47	-1,08	- 7,09	- 1,89	- 2,37	
-2	-12,61	-7,97	-9,37	-14,79	-10,10	-11,08	
-3	-4,35	-0,30	-0,96	- 7,57	- 1,85	- 0,81	
-4	-10,92	-6,46	-8,02	-12,61	- 8,67	- 9,74	
-5	-5,22	-0,94	-1,52	- 8,49	- 2,70	- 3,14	
-2	-9,82	-5,29	-6,87	-11,53	- 7,50	- 8,59	
-3	-0,49	3,77	3,06	- 7,64	2,15	1,60	
-4	-7,70	1,40	0,02	-10,35	- 4,82	- 5,81	
-5	1,72	7,27	6,79	- 2,12	4,59	4,20	

Erros na previsão do LR

Nº da Amostra	Erro _H	Erro _{Wφ}	Erro _{Jφ}	Erro _C	Erro _{Wφ}	Erro _{Jφ}	Redução <6%
10	-2	-0,24	5,26	2,91	-2,23	1,56	0,17
	-3	2,17	8,30	6,94	-5,91	5,65	4,60
	-4	0,52	5,53	4,73	-3,14	3,42	2,80
	-5	7,14	13,93	11,10	5,70	8,21	6,91
9	-2	-7,70	-2,89	-4,38	-9,59	-5,15	-6,18
	-3	-5,88	5,55	-1,98	-8,14	-2,97	-4,05
	-4	2,65	8,96	6,42	1,33	4,65	3,25
	-5	2,60	7,64	6,80	-0,57	5,50	4,88
3	-2	1,42	5,28	3,76	0,36	3,11	2,15
	-3	6,06	12,78	9,96	4,71	6,97	5,70
	-4	8,13	13,65	12,73	4,48	11,29	10,58
	-5	6,63	9,49	9,53	3,46	8,56	8,54
4	-2	-3,62	2,46	0,29	-5,58	-0,79	-2,21
	-3	6,43	9,04	9,21	9,21	8,21	8,34
	-4	2,75	7,28	6,51	-5,49	5,52	4,92
	-5	4,09	10,50	7,90	2,60	6,09	4,67

Quadro 11 - Erros médios nas diversas previsões de $LE_{0,20}$

Reduções de Área	Variáveis	LE_H	$LE_{W\phi}$	$LE_{J\phi}$	LE_C	$LE_{W\phi}$	$LE_{J\phi}$
RA >6%	$\bar{\epsilon}$ (%)	2,23	8,48	6,96	-1,78	5,83	4,65
57 dados	D.P. (%)	5,94	7,66	7,06	5,98	6,51	6,28

Obs.: $\bar{\epsilon}$ = erro médio percentual

DP. = desvio padrão dos erros percentuais.

Quadro 12 - Erros médios nas diversas previsões de LR

Reduções de Área	Variáveis	LR_H	$LR_{W\phi}$	$LR_{J\phi}$	LR_C	$LR_{W\phi}$	$LR_{W\phi}$
RA. >6%	$\bar{\epsilon}$ (%)	-5,38	-0,14	-1,58	-8,73	-2,57	-3,44
57 dados	DP. (%)	4,57	4,77	4,65	4,59	4,49	4,76

Quadro 13 - Alongamento parciais dos laminados

Nº da Amostra	$k\beta_{LAM}$	$\epsilon_{u_{LAM}}$	$\epsilon_{u_{LAM}}$
15	0,1349	0,253	0,2259
14	0,1696	0,213	0,1927
13	0,1709	0,192	0,1754
16	0,1230	0,208	0,1888
11	0,1513	0,213	0,1930
17	0,1063	0,186	0,1704
19	0,1203	0,194	0,1776
18	0,1038	0,177	0,1626
12	0,1408	0,219	0,1976
1	-	-	-
2	0,1393	0,227	0,2047
8	0,1391	0,206	0,1870
6	0,1243	0,200	0,1824
7	0,1168	0,197	0,1797
5	0,1316	0,207	0,1880
10	0,1436	0,189	0,1819
9	0,1391	0,200	0,1827
3	0,1510	0,239	0,2140
4	0,1232	0,217	0,1965

Quadro 14 - Alongamentos parciais dos trefilados

Nº da Amostra	Trefilado		$K\beta_{TR}$	$e_{U_{TR}}$	
	D_O	D_U			
15	-2	11,05	11,01	0,1018	0,007
	-3	12,32	12,14	0,1324	0,030
	-4	11,63	11,62	0,1035	0,002
	-5	11,73	11,70	0,1243	0,005
14	-2	12,25	12,12	0,1627	0,022
	-3	11,05	11,04	0,1146	0,002
	-4	12,64	11,89	0,1714	0,130
	-5	11,73	11,70	0,1285	0,005
15	-2	10,95	10,93	0,0951	0,014
	-3	12,66	12,48	0,1295	0,029
	-4	11,25	11,24	0,0995	0,002
	-5	12,93	12,15	0,1418	0,133
16	-2	13,38	13,19	0,1066	0,029
	-3	12,65	12,54	0,0932	0,018
	-4	13,98	13,56	0,1161	0,063
	-5	13,63	13,38	0,1077	0,038
17	-2	12,32	12,31	0,0842	0,002
	-3	13,63	13,41	0,1037	0,033
	-4	12,92	12,87	0,0957	0,006
	-5	14,19	14,03	0,1331	0,065
19	-2	13,65	13,41	0,0967	0,036
	-3	12,80	12,70	0,0730	0,016
	-4	14,22	13,67	0,1118	0,082
	-5	13,98	13,66	0,1090	0,047
18	-2	13,63	13,41	0,0902	0,034
	-3	12,80	12,66	0,0925	0,022
	-4	14,22	13,63	0,1149	0,029

Alongamentos parciais dos trefilados

Nº da Amostra	Trefilado		$K_{B_{TR}}$	$e_{U_{TR}}$	
	D_0	D_U			
11	-2	13,63	13,40	0,1069	0,035
	-3	14,17	13,55	0,1378	0,094
12	-2	14,62	14,41	0,1064	0,029
	-3	14,38	14,21	0,1091	0,024
	-4	12,32	12,30	0,0926	0,003
	-5	15,27	14,92	0,1274	0,048
	-6	14,17	14,04	0,1014	0,019
1	-2	15,27	-	-	-
	-3	15,73	14,75	0,1494	0,137
	-4	12,79	12,70	0,0915	0,014
	-5	14,17	13,94	0,0930	0,033
	-6	13,39	13,27	0,0938	0,018
2	-2	15,83	-	-	-
	-3	14,17	14,09	-	-
	-4	13,38	13,33	0,1049	0,008
	-5	13,92	13,90	-	-
	-6	15,26	14,98	0,1163	0,038
8	-2	16,11	15,97	0,1116	0,018
	-3	16,42	16,21	0,1135	0,026
	-4	16,71	16,36	0,1176	0,043
	-5	15,03	14,98	0,0977	0,007
6	-2	17,40	16,51	0,1199	0,111
	-3	16,65	16,37	0,0873	0,035
	-4	13,91	13,89	0,0785	0,003
	-5	15,25	15,23	0,0897	0,003

Alongamentos parciais dos trefilados

Nº da Amostra	Trefilado		K _{B-TR}	e _{U-TR}	
	D _O	D _U			
7	-2	16,12	15,91	0,0963	0,027
	-3	15,25	15,17	0,0929	0,011
	-4	16,61	16,32	0,1041	0,036
	-5	14,94	14,85	0,0861	0,012
5	-2	16,61	16,43	0,1096	0,022
	-3	15,25	15,24	0,0983	0,001
	-4	15,85	15,79	0,1100	0,008
	-5	14,74	14,70	0,0928	0,005
10	-2	18,71	18,17	0,1395	0,060
	-3	17,00	17,00	-	-
	-4	16,60	16,55	0,1011	0,006
	-5	19,03	17,66	0,1410	0,161
9	-2	17,92	17,86	0,1134	0,007
	-3	17,65	17,61	0,1187	0,005
	-4	19,02	17,68	0,1390	0,157
	-5	16,72	16,68	-	-
3	-2	18,72	17,82	0,1155	0,104
	-3	19,02	17,54	0,1411	0,176
	-4	16,60	16,58	-	-
	-5	15,60	15,57	-	-
4	-2	18,45	18,39	-	-
	-3	15,60	15,57	0,0848	0,004
	-4	16,92	16,87	0,0941	0,006
	-5	19,03	18,36	0,1389	0,074

Quadro 15 - Valores de deformação total

Nº da Amostra	$\epsilon\phi_H$	$\epsilon\phi_W$	$\epsilon\phi_J$	$\epsilon\phi_C$	$\epsilon\phi_W$	$\epsilon\phi_J$	
15	-2	0,3445	0,4025	0,3941	0,2922	0,3807	0,3743
	-3	0,1404	0,1979	0,1776	0,1146	0,1706	0,1564
	-4	0,2795	0,3635	0,3424	0,2309	0,3251	0,3098
	-5	0,2242	0,2766	0,2624	0,1886	0,2560	0,2554
14	-2	0,1292	0,1841	0,1644	0,1047	0,1583	0,1444
	-3	0,3253	0,3836	0,3741	0,2747	0,3618	0,3544
	-4	0,0736	0,1416	0,1137	0,0541	0,0873	0,0731
	-5	0,2063	0,2601	0,2445	0,1722	0,2386	0,2270
13	-2	0,3918	0,4431	0,4397	0,3338	0,4253	0,4227
	-3	0,1267	0,1902	0,1669	0,1016	0,1574	0,1416
	-4	0,3517	0,4143	0,4053	0,2969	0,3900	0,3831
	-5	0,0802	0,1401	0,1161	0,0616	0,1012	0,0870
16	-2	0,1862	0,2400	0,2234	0,1498	0,2187	0,2063
	-3	0,2917	0,3476	0,3362	0,2387	0,3275	0,3187
	-4	0,0979	0,1479	0,1288	0,0754	0,1235	0,1103
	-5	0,1525	0,2115	0,1912	0,1202	0,1855	0,1708
11	-2	0,1665	0,2238	0,2049	0,1368	0,1984	0,1848
	-3	0,1005	0,1741	0,1451	0,0769	0,1268	0,1095
17	-2	0,3385	0,3833	0,3778	0,2874	0,3687	0,3644
	-3	0,1586	0,2171	0,1974	0,1294	0,1903	0,1762
	-4	0,2607	0,3184	0,3046	0,2179	0,2956	0,2852
	-5	0,0805	0,1375	0,1147	0,0620	0,1020	0,0881

Obs.: De acordo com Caddell e Atkins

$$\phi = \frac{1}{m+1}$$

Valores de deformação total

Nº da Amostra	$\epsilon\phi_H$	$\epsilon\phi_W$	$\epsilon\phi_J$	$\epsilon\phi_C$	$\epsilon\phi_W$	$\epsilon\phi_J$	
19	-2	0,1816	0,2383	0,2204	0,1457	0,2187	0,2063
	-3	0,2777	0,3289	0,3181	0,2280	0,3275	0,3187
	-4	0,0905	0,1552	0,1295	0,0670	0,1237	0,1103
	-5	0,1088	0,1581	0,1398	0,0852	0,1855	0,1708
18	-2	0,1645	0,2226	0,2033	0,1316	0,1973	0,1833
	-3	0,2753	0,3267	0,3156	0,2270	0,3084	0,2999
	-4	0,1002	0,1641	0,1393	0,0760	0,1279	0,1119
12	-2	0,2293	0,3067	0,2841	0,1940	0,2690	0,2531
	-3	0,2300	0,2766	0,2646	0,1994	0,2584	0,2495
	-4	0,514	0,548	0,556	0,454	0,5395	0,5457
	-5	0,1315	0,2015	0,1757	0,1085	0,1621	0,1454
	-6	0,2735	0,3314	0,3184	0,2365	0,3077	0,2980
1	-2	0,1304	0,2005	0,1746	0,1054	0,1618	0,1448
	-3	0,0627	0,1152	0,0937	0,0484	0,0768	0,0651
	-4	0,4524	0,4966	0,5001	0,3978	0,4859	0,4887
	-5	0,2793	0,3364	0,3239	0,2384	0,3137	0,3047
	-6	0,3799	0,4289	0,4251	0,3272	0,4118	0,4089
2	-2	0,0649	0,1172	0,0959	0,0519	0,0792	0,0675
	-3	0,2793	0,3364	0,3222	0,2421	0,3128	0,3023
	-4	0,5900	0,4581	0,4352	0,3418	0,4210	0,4188
	-5	0,3108	0,3595	0,3514	0,2714	0,3413	0,3352
	-6	0,1482	0,2167	0,1924	0,1241	0,1800	0,1638
8	-2	0,1878	0,2403	0,2243	0,1666	0,2157	0,2044
	-3	0,1738	0,2456	0,2215	0,1518	0,2063	0,1903
	-4	0,1402	0,3043	0,2571	0,1205	0,2197	0,1926
	-5	0,3264	0,3862	0,3760	0,2919	0,3601	0,3527
6	-2	0,0670	0,1197	0,0983	0,0538	0,0819	0,0701
	-3	0,1493	0,1977	0,1814	0,1275	0,1754	0,1638
	-4	0,4920	0,5360	0,5416	0,4315	0,5214	0,5256
	-5	0,3155	0,3662	0,3578	0,2822	0,3468	0,3405

Valores de deformação total

Nº da Amostra	$\epsilon\phi_H$	$\epsilon\phi_W$	$\epsilon\phi_J$	$\epsilon\phi_C$	$\epsilon\phi_W$	$\epsilon\phi_J$	
7	-2	0,1978	0,2496	0,2343	0,1727	0,2264	0,2155
	-3	0,3105	0,3161	0,3528	0,2739	0,3413	0,3348
	-4	0,1412	0,1903	0,1734	0,1222	0,1665	0,1548
	-5	0,3512	0,4128	0,4040	0,3087	0,3865	0,3800
5	-2	0,1412	0,1903	0,1734	0,1221	0,1665	0,1548
	-3	0,3085	0,3597	0,3507	0,2718	0,3394	0,3327
	-4	0,2329	0,2871	0,2728	0,2037	0,2635	0,2532
	-5	0,4275	0,5196	0,5109	0,3735	0,4735	0,4672
10	-2	0,0925	0,1503	0,1278	0,0766	0,1145	0,1007
	-3	0,2773	0,3451	0,3291	0,2401	0,3143	0,3028
	-4	0,3339	0,4008	0,3894	0,2905	0,3715	0,3631
	-5	0,0677	0,1290	0,1038	0,0540	0,0776	0,0653
9	-2	0,1870	0,2378	0,2223	0,1663	0,2143	0,2034
	-3	0,2212	0,2775	0,2618	0,1969	0,2516	0,2404
	-4	0,0878	0,1475	0,1239	0,0748	0,1070	0,0934
	-5	0,3254	0,3855	0,3752	0,2913	0,3592	0,3517
3	-2	0,0717	0,1091	0,0945	0,0611	0,0882	0,0788
	-3	0,0668	0,1281	0,1029	0,0539	0,0752	0,0633
	-4	0,3321	0,3992	0,3874	0,2926	0,3694	0,3608
	-5	0,4289	0,4727	0,4733	0,3834	0,4579	0,4583
4	-2	0,1479	0,2088	0,1876	0,1273	0,1766	0,1624
	-3	0,4527	0,4945	0,4972	0,4036	0,4807	0,4828
	-4	0,3068	0,3587	0,3494	0,2712	0,3378	0,3309
	-5	0,0860	0,1458	0,1221	0,0717	0,1053	0,0916

Quadro 16 - Previsão do alongamento

Nº da Amostra	REAL e_f	Previsto				
		$e_f^{\phi H}$	$e_f^{\phi W}$	$e_f^{\phi J}$	$e_f^{\phi C}$	
15	-2	0,1091	0,1349	0,1349	0,1349	0,1349
	-3	0,1623	0,2242	0,1633	0,1844	0,2526
	-4	0,1052	0,1349	0,1349	0,1349	0,1349
	-5	0,1294	0,1366	0,1349	0,1349	0,1729
14	-2	0,1843	0,2351	0,1783	0,1983	0,2615
	-3	0,1164	0,1696	0,1696	0,1696	0,1696
	-4	0,3015	0,2960	0,2220	0,2518	0,3183
	-5	0,1336	0,1696	0,1696	0,1696	0,1903
13	-2	0,0988	0,1709	0,1709	0,1709	0,1709
	-3	0,1586	0,2208	0,1709	0,1795	0,2475
	-4	0,1013	0,1709	0,1709	0,1709	0,1709
	-5	0,2743	0,2708	0,2068	0,2320	0,2915
16	-2	0,1356	0,1256	0,1230	0,1230	0,1627
	-3	0,1108	0,123	0,123	0,123	0,123
	-4	0,1790	0,2182	0,1648	0,1848	0,2430
	-5	0,1454	0,1600	0,123	0,123	0,1940
11	-2	0,1415	0,1781	0,1513	0,1513	0,2091
	-3	0,2314	0,2482	0,1704	0,2004	0,2744
17	-2	0,0858	0,1041	0,1041	0,1041	0,1041
	-3	0,1368	0,1160	0,1041	0,1041	0,1459
	-4	0,1015	0,1041	0,1041	0,1041	0,1041
	-5	0,1982	0,1982	0,1376	0,1614	0,2186
19	-2	0,1328	0,1100	0,1100	0,1100	0,1429
	-3	0,0888	0,1100	0,1100	0,1100	0,1100
	-4	0,1939	0,2010	0,1328	0,1592	0,2269
	-5	0,1564	0,1812	0,1297	0,1485	0,2069

Previsão do alongamento

Nº da Amostra	e _f ^{REAL}	Previsto				
		e _f ^{ØH}	e _f ^{ØW}	e _f ^{ØJ}	e _f ^{ØC}	
18	-2	0,1241	0,1038	0,1038	0,1038	0,1352
	-3	0,1147	0,1038	0,1038	0,1038	0,1038
	-4	0,2034	0,1682	0,1038	0,1274	0,1943
12	-2	0,1358	0,1408	0,1408	0,1408	0,1443
	-3	0,1332	0,1408	0,1408	0,1408	0,1408
	-4	0,0959	0,1408	0,1408	0,1408	0,1408
	-5	0,1749	0,2090	0,1408	0,1628	0,2339
	-6	0,1200	0,1408	0,1408	0,1408	0,1408
2	-2	-	0,2893	0,2307	0,2543	0,3044
	-3	-	0,1393	0,1393	0,1393	0,1393
	-4	0,1124	0,1393	0,1393	0,1393	0,1393
	-5	-	0,1393	0,1393	0,1393	0,1393
	-6	0,1540	0,1974	0,1393	0,1517	0,2233
5	-2	0,1292	0,1391	0,1391	0,1391	0,1597
	-3	0,1396	0,1524	0,1391	0,1391	0,1749
	-4	0,1608	0,1871	0,1391	0,1391	0,2079
	-5	0,1044	0,1391	0,1391	0,1391	0,1391
1	-2	0,2306	0,2466	0,1890	0,2120	0,2615
	-3	0,1218	0,1580	0,1243	0,1253	0,1808
	-4	0,0814	0,1243	0,1243	0,1243	0,1243
	-5	0,0923	0,1243	0,1243	0,1243	0,1243
7	-2	0,1229	0,1168	0,1168	0,1168	0,1238
	-3	0,1035	0,1168	0,1168	0,1168	0,1168
	-4	0,1400	0,1560	0,1168	0,1231	0,1760
	-5	0,0983	0,1168	0,1168	0,1168	0,1168

Previsão do alongamento

Nº da Amostra	e _f ^{REAL}	Previsto				
		e _f ^{ØH}	e _f ^{ØW}	e _f ^{ØJ}	e _f ^{ØC}	
5	-2	0,1316	0,1795	0,1316	0,1463	0,1998
	-3	0,0996	0,1316	0,1316	0,1316	0,1316
	-4	0,1176	0,1316	0,1316	0,1316	0,1316
	-5	0,0982	0,1316	0,1316	0,1316	0,1316
10	-2	0,1998	0,2263	0,1649	0,1884	0,2939
	-3	-	0,1328	0,1328	0,1328	0,1328
	-4	0,1072	0,1328	0,1328	0,1328	0,1328
	-5	0,3022	0,2538	0,1872	0,1241	0,2693
9	-2	0,1201	0,1391	0,1391	0,1391	0,1556
	-3	0,1232	0,1391	0,1391	0,1391	0,1391
	-4	0,2963	0,2386	0,1749	0,1996	0,2531
	-5	-	0,1391	0,1391	0,1391	0,1391
3	-2	0,2191	0,3039	0,2616	0,2780	0,3162
	-3	0,3170	0,3096	0,2407	0,2685	0,3246
	-4	-	0,1510	0,1510	0,1510	0,1510
	-5	-	0,1510	0,1510	0,1510	0,1510
4	-2	-	0,1730	0,1232	0,1232	0,1948
	-3	0,0887	0,1232	0,1232	0,1232	0,1232
	-4	0,1000	0,1232	0,1232	0,1232	0,1232
	-5	0,2132	0,2400	0,1752	0,2005	0,2561

Quadro 17 - Testes de Dureza

Nº	Topo	Lado	Nº	Topo	Lado	
1	1	72,1	5	3	94,9	92,4
	2	84,5		4	92,7	89,4
	3	69,0		5	94,3	90,7
	4	98,0	10	1	69,4	63,5
	5	94,6		2	78,0	79,3
	6	97,0		3	93,0	88,8
2	1	70,6	4	93,0	89,5	
	2	73,6	5	70,1	70,7	
	3	94,9	9	1	65,4	62,5
	4	97,2		2	85,5	82,7
	5	94,6		3	87,5	81,2
	6	87,1	4	71,3	72,8	
6	1	74,2	5	89,7	84,3	
	2	78,1	3	1	64,0	61,3
	3	90,0		2	74,1	74,3
	4	99,4		3	66,9	69,0
	5	97,0	4	90,1	85,3	
	7	1	71,3	5	92,2	86,3
2		90,4	4	1	70,3	65,1
3		94,9		2	85,4	83,4
4		86,0		3	95,2	89,6
5		95,0	4	91,6	85,6	
5		1	70,5	5	74,4	78,6
	2	87,0				

Testes de Dureza

Nº	Topo	Lado	Nº	Topo	Lado
15	1	67,6	11	1	71,1
	2	92,5		2	86,1
	3	81,0		3	77,6
	4	89,5	17	1	72,4
	5	87,2		2	97,8
14	1	64,8		3	90,0
	2	79,1		4	94,6
	3	89,5		5	79,3
	4	67,5	19	1	69,0
	5	86,0		2	89,5
13	1	70,8		3	95,0
	2	94,0		4	80,0
	3	82,4		5	88,0
	4	94,0	12	1	69,0
	5	75,2		2	90,1
16	1	69,0		3	92,6
	2	88,5		4	96,8
	3	93,0		5	84,4
	4	80,0		6	92,5
	5	88,0	8	1	69,8
18	1	73,0		2	90,0
	2	92,0		3	87,2
	3	95,0		4	84,4
	4	79,0		5	95,8

6.1. Limite de Escoamento

Se os valores previstos fossem exatamente iguais aos encontrados na prática, encontrar-se-ia uma reta de inclinação $\theta=45^\circ$ e Índice de Correlação = ± 1 quando locados em Coordenadas Cartesianas. Assim, colocando os valores previstos (pelas várias teorias) no eixo das abcissas e os valores reais em um eixo das ordenadas (Figuras de 10 a 15 para LE e de 16 a 21 para LR), obtém-se nuvens de pontos que quando introduzidos em uma regressão linear, originarão retas cujas características constam nos quadros 7 e 8.

Nestes quadros separam-se aqueles grupos de trefilações cuja Redução de Área são maiores que 6%, devido ao fato de que os erros encontrados entre os valores de propriedades previstos e aqueles obtidos na prática sobem a valores tidos como grandes quando a R.A. desce a esta faixa, principalmente quando se trata de Limite de Escoamento.

Estes erros devem-se principalmente ao fato de se ter trabalhado com barras laminadas como o são nos processos industriais normais, ou seja, com a ovalização normal de laminados prevista por norma. Quando a R.A. é pequena, os diâmetros maiores da seção transversal sofrem uma redução bem maior que os menores, gerando assim um gradiente de deformação que introduz erros como os encontrados.

Nas figuras de 10 a 15 estão locados os gráficos de Limite de Escoamento Previsto vs. Limite de Escoamento Convencional a 0,2% de deformação.

Em cada gráfico estão traçadas duas retas que partem da origem

(pontos 0,0). Uma a 45° com a abcissa, é aqui denominada Reta I deal. Se todas os pontos se situassem sobre a Reta Ideal, haveria um correlacionamento perfeito. Os pontos que se situam acima da reta ideal são pontos considerados a favor da segurança porque prevêm valores de LE abaixo dos valores reais. Os pontos situados abaixo são considerados contra a segurança porque prevêm valores de LE acima dos valores reais ou seja, superestimam o valor de LE.

Uma outra reta traçada (RETA 90%) é a reta que passa pela origem e cuja inclinação multiplicada pelo valor de LE previsto situaria 90% dos pontos com R.A. > 6% acima da Reta Ideal. Tomando como base esta afirmação, a Teoria mais segura seria aquela cuja "Reta 90%" mais se aproximasse da Reta Ideal (aquela que possuísse a maior inclinação) e que tivesse a menor dispersão dos pontos (menor Desvio padrão do erro médio percentual (Quadro 11)).

Analisando as figuras de 10 a 15 sob este prisma nota-se que os valores de LE_W e LE_J calculados a partir dos coeficientes ϕ dão previsões muito altas (inclinação da "Reta 90%" baixa).

Quando se utiliza a equação (22) e se passa a usar ϕ_W e ϕ_J , a situação melhora mas ainda se tem previsões altas.

As teorias que usam valores de ϕ de Caddell e Atkins bem como de Backofen são as que dão as previsões mais razoáveis, sendo a de C e A. a teoria mais conservadora.

Note-se que a teoria que usa ϕ_J é a que mais se aproxima de Backofen.

Para reduções abaixo de 6% nenhuma teoria mostrou-se adequada para o cálculo de LE, porque previram valores superestimados. Isto é devido à ovaliação das barras laminadas que origiam uma Redução Real menor que a considerada nas teorias.

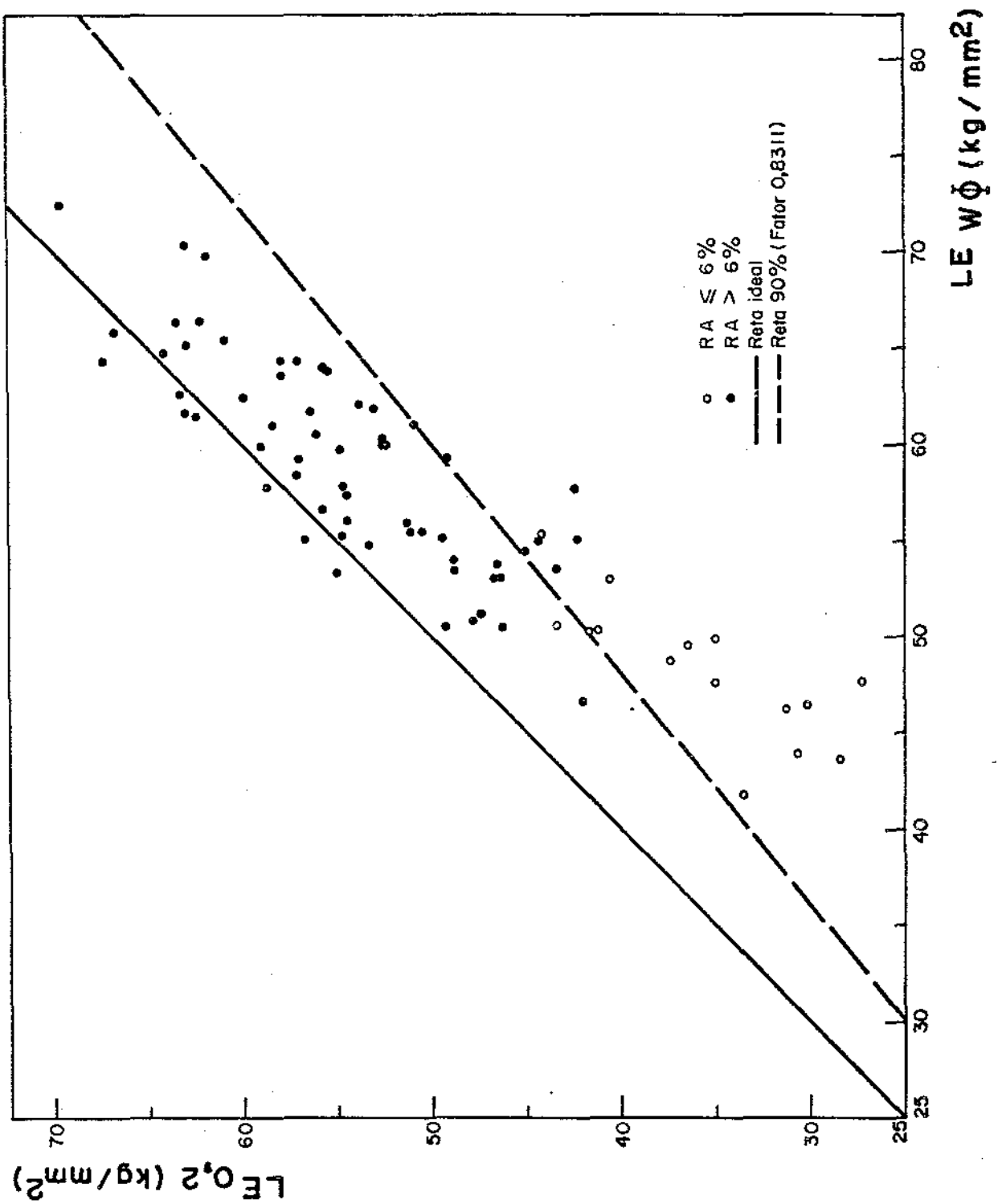


Figura 10 - Comparação entre LE previsto e LE_{0,2}.

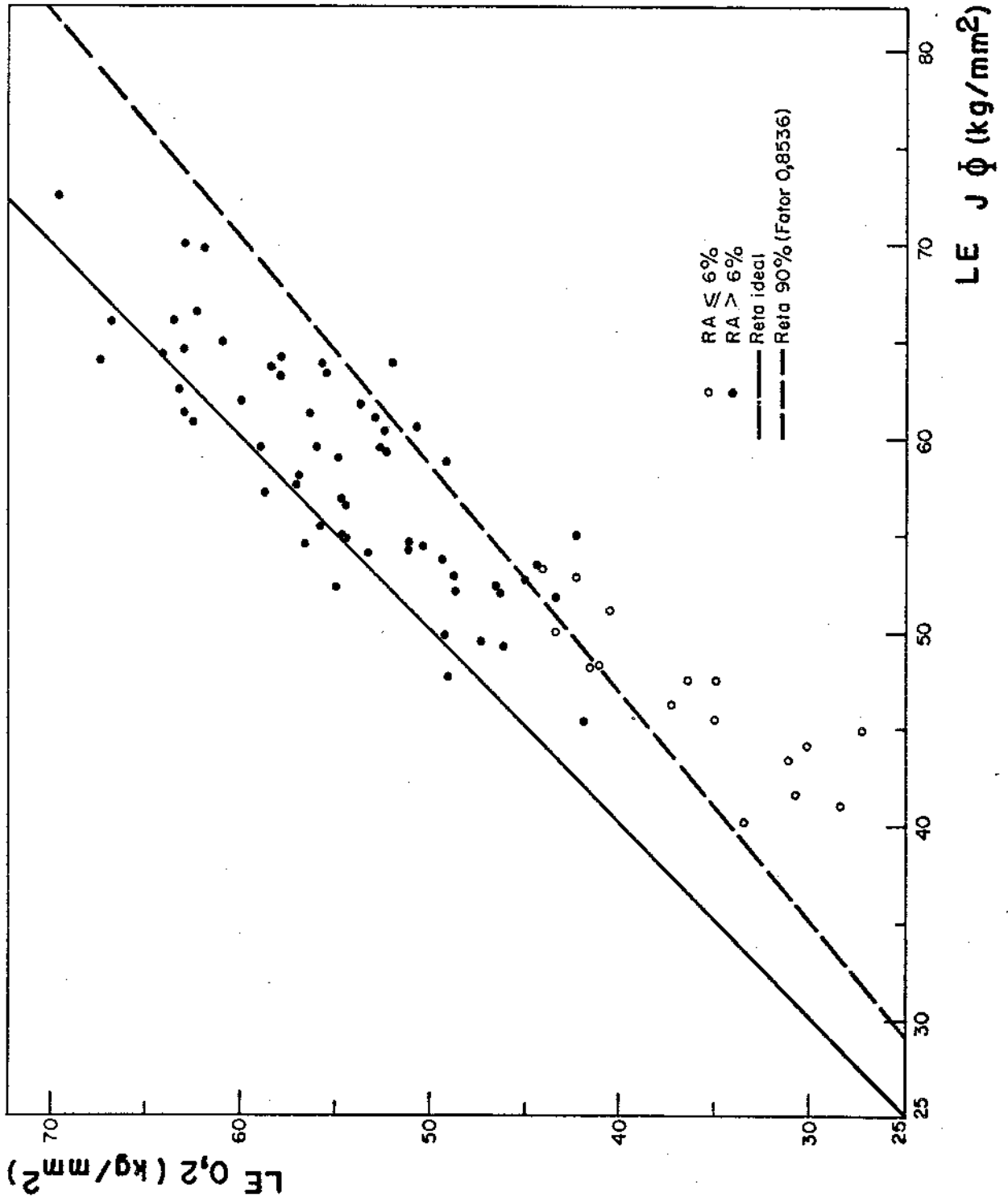


Figura 11 - Comparação entre LE previsto e $LE_{0,2}$.

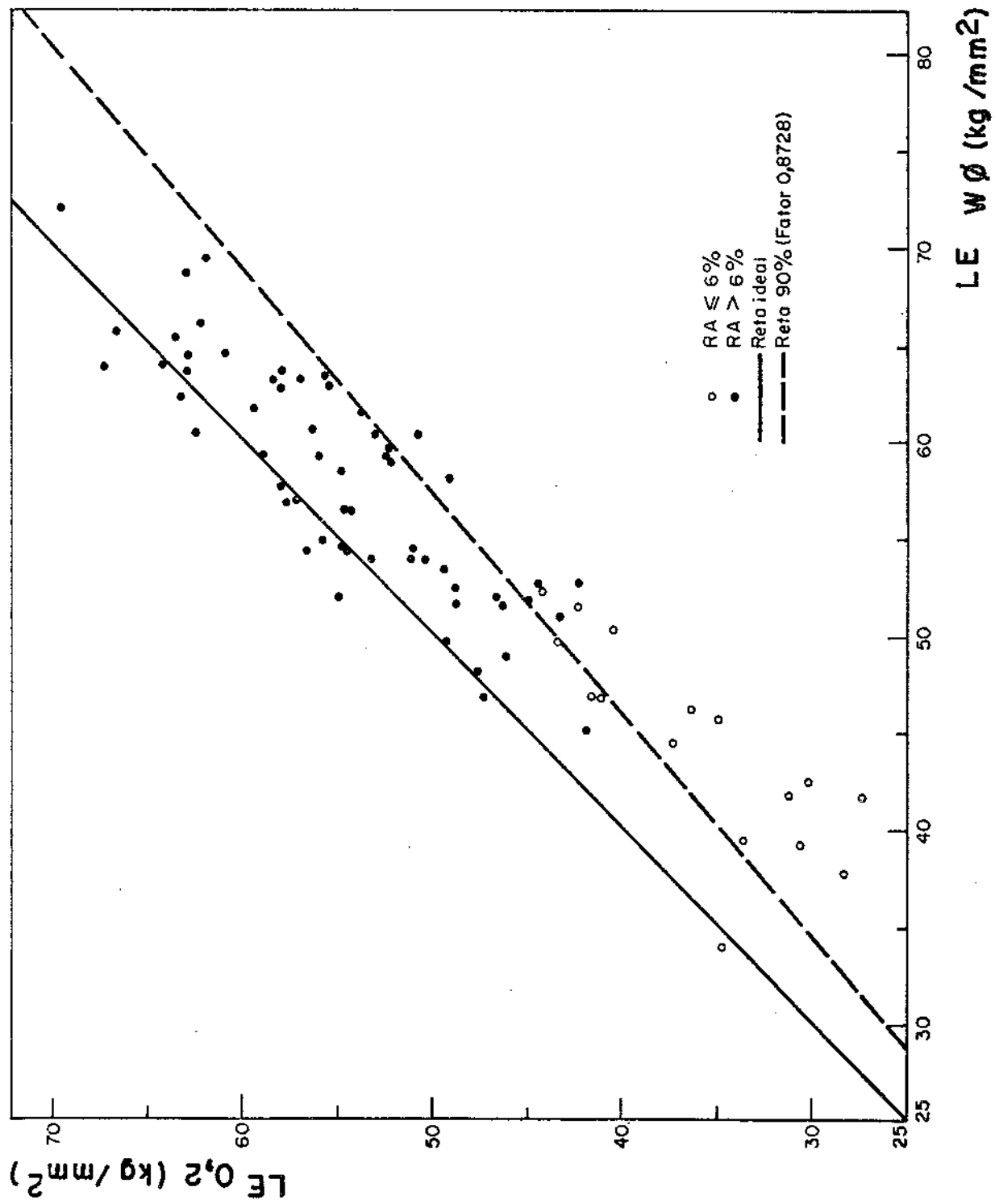


Figura 12 - Comparação entre LE previsto e LE_{0,2}.

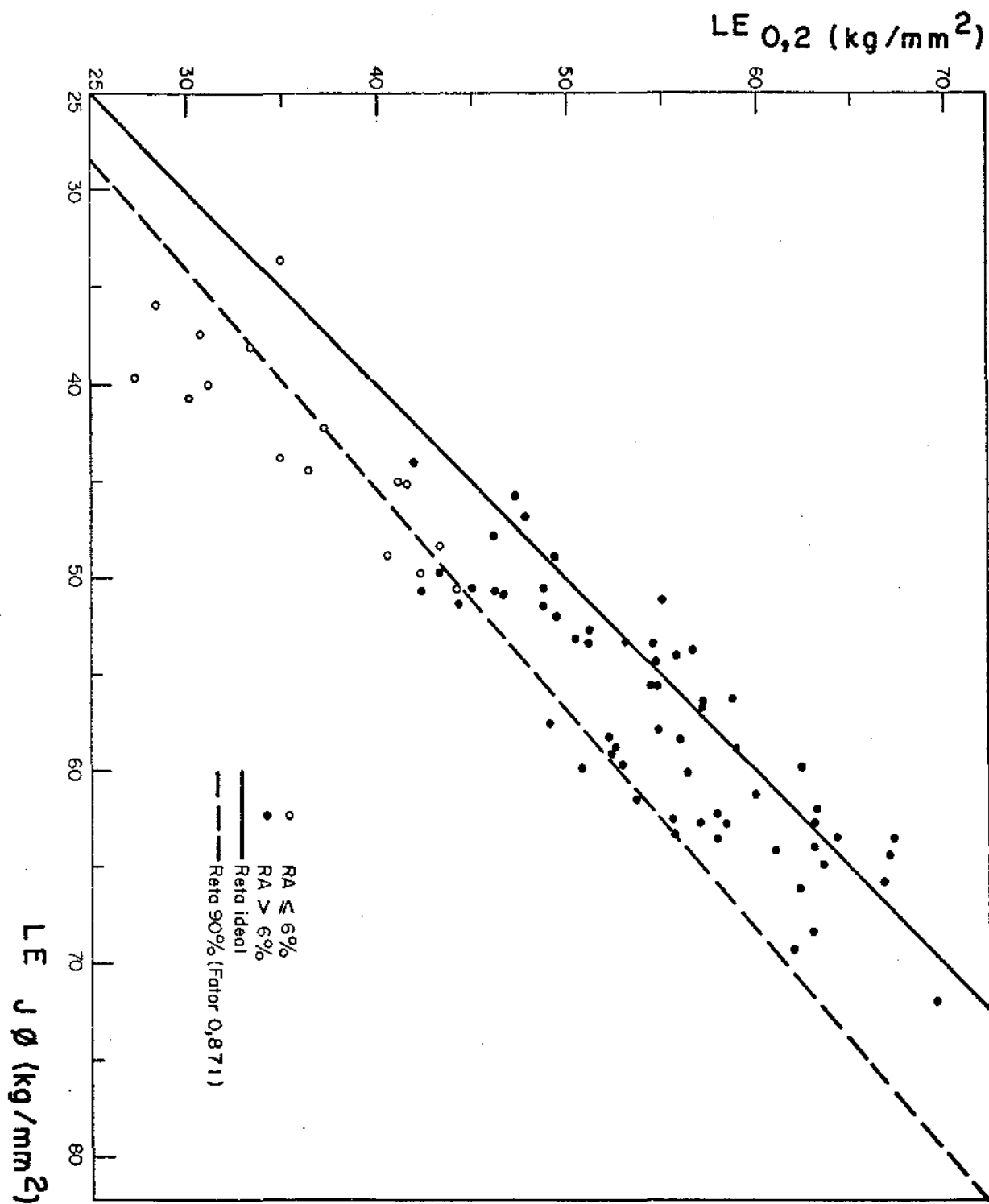


Figura 13 - Comparação entre LE previsto e LE_{0,2}.

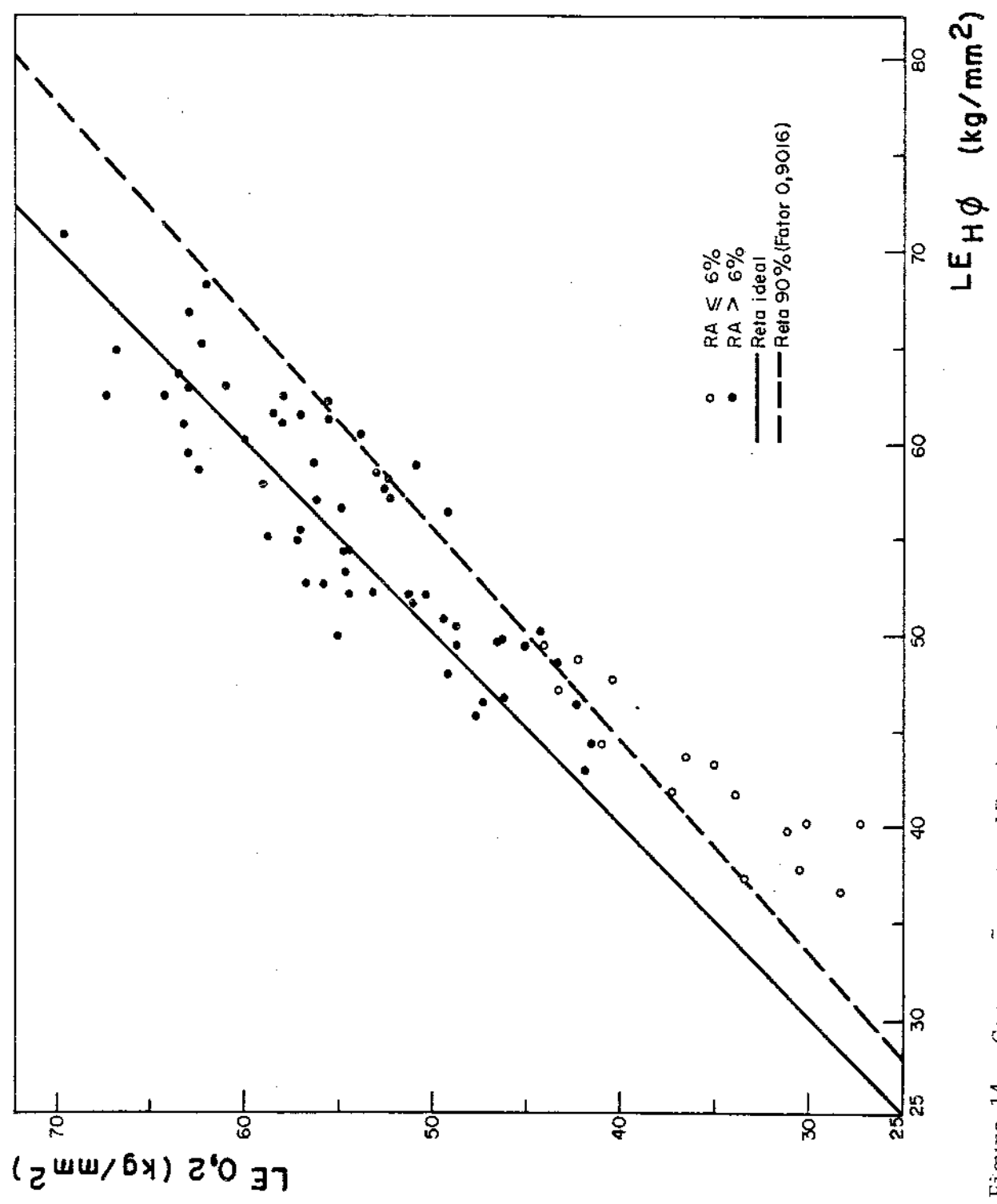


Figura 14 - Comparação entre LE previsto e LE_{0,2}.

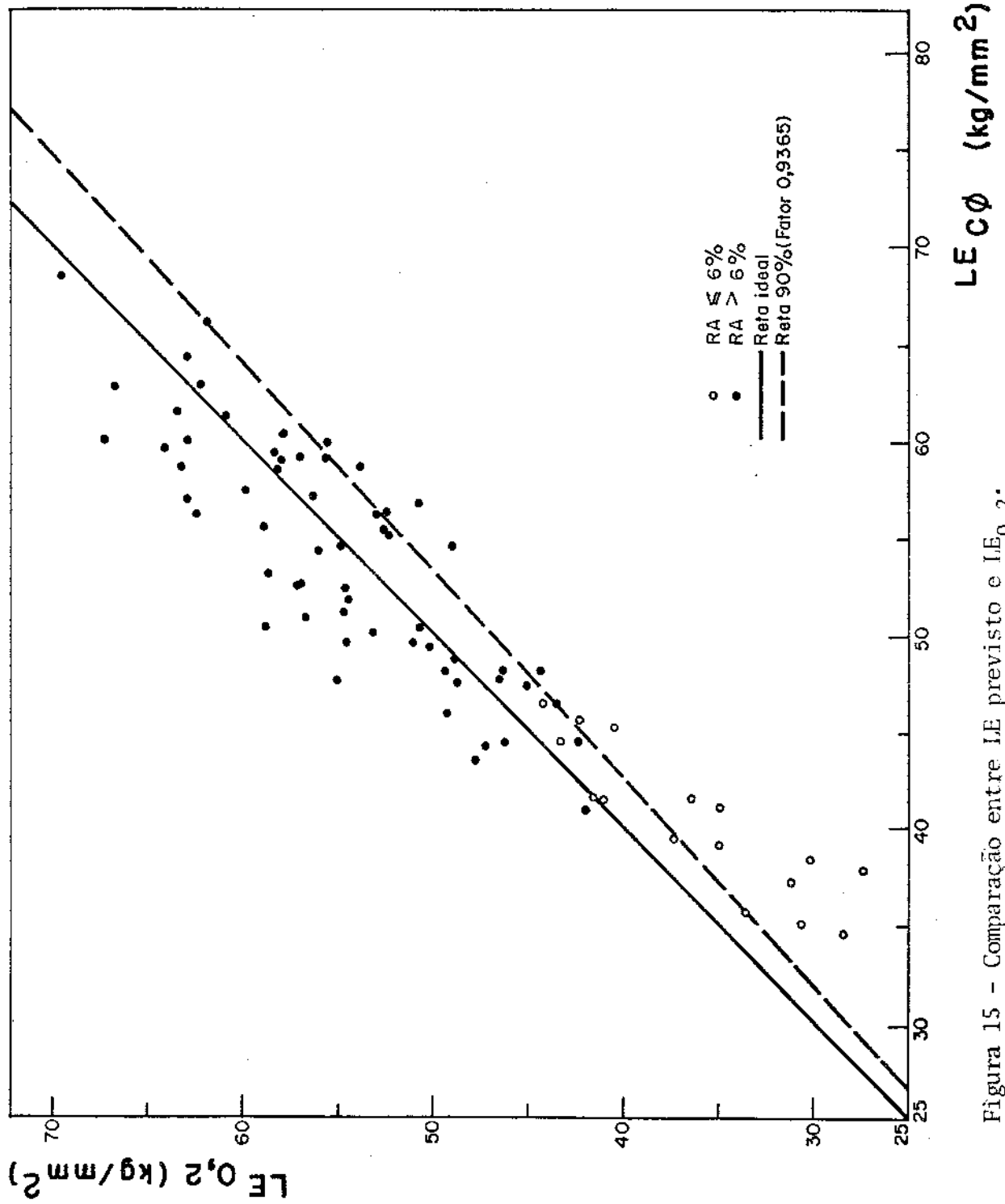


Figura 15 - Comparação entre LE previsto e $LE_{0,2}$.

Assim sendo, partindo das considerações sobre a Reta 90% e dos resultados do Quadro 11 considera-se a teoria de Caddell e Atkins como sendo a melhor em termos de segurança para uma previsão do LE.

6.2. Limite de Resistência

A comparação entre o Limite de Resistência Previsto e o Limite de Resistência Real é mostrada nas figuras de 16 a 21 cujos gráficos foram construídos a partir do Quadro 6. Neste gráficos constam as mesmas retas e a mesma separação de pontos por R.A. que constam nos gráficos de LE.

Nota-se que a dispersão dos pontos dos gráficos de LR é menor que a dos gráficos de LE, o que pode ser constatado nos quadros 11 e 12.

Os valores de LR calculados a partir de ϕ_W e ϕ_J tem os valores de inclinação da "Reta 90%" mais baixos que os calculados a partir de ϕ_W , ϕ_J , ϕ_H e ϕ_C sendo portanto os menos seguros.

Considerando a dispersão dos pontos, ou seja o Desvio Padrão do Erro Médio Percentual (Quadro 12) chega-se à conclusão de que a teoria de Wistreich usando o valor ϕ é a que tem menor erro e a menor dispersão sendo portanto a melhor teoria. Contudo, a teoria de Caddell e Atkins é a mais segura porque mesmo considerando somente a Reta Ideal, 95% dos pontos com R.A. menor que 6% se situam acima dela. Note-se que ainda aqui não são levados em conta as trefilações com R.A. ^{menor} ~~menor~~ que 6%.

No entanto, observando-se a figura 21 nota-se que mesmo a consideração dos pontos correspondentes a R.A. < 6% indica que a teoria de C e A é adequada para a previsão do LR sendo portanto a mais confiável.

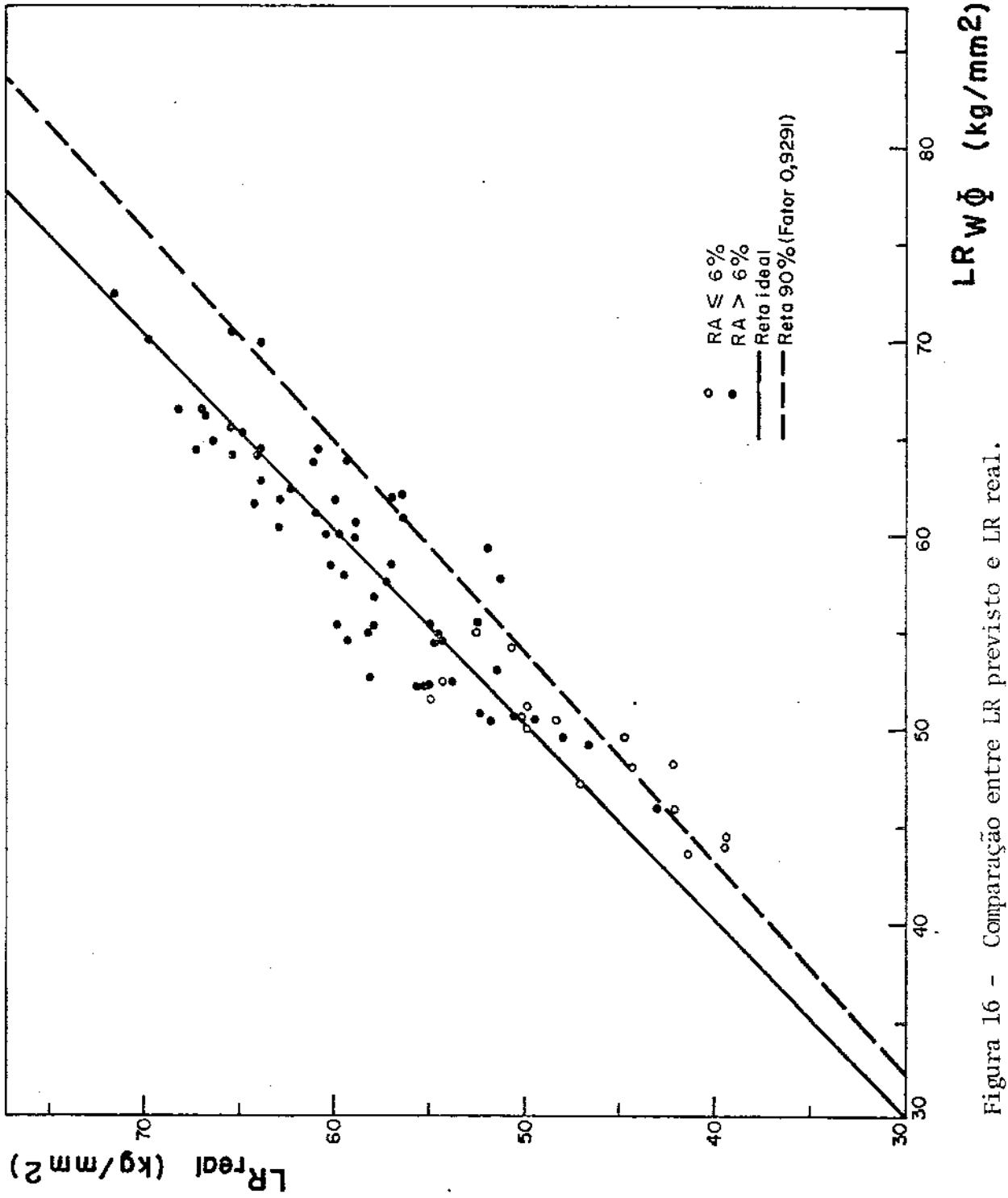


Figura 16 - Comparação entre LR previsto e LR real.

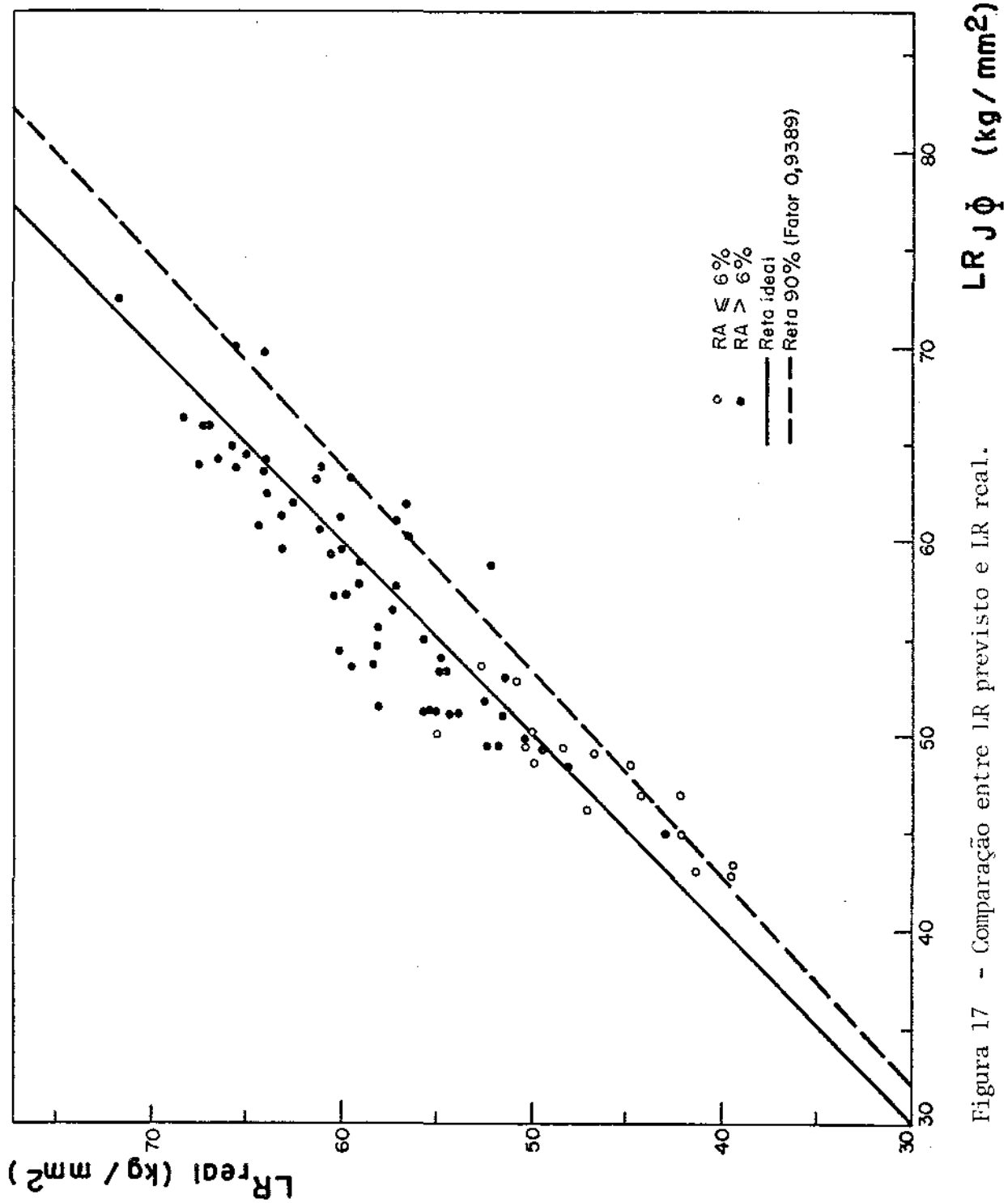


Figura 17 - Comparação entre LR previsto e LR real.

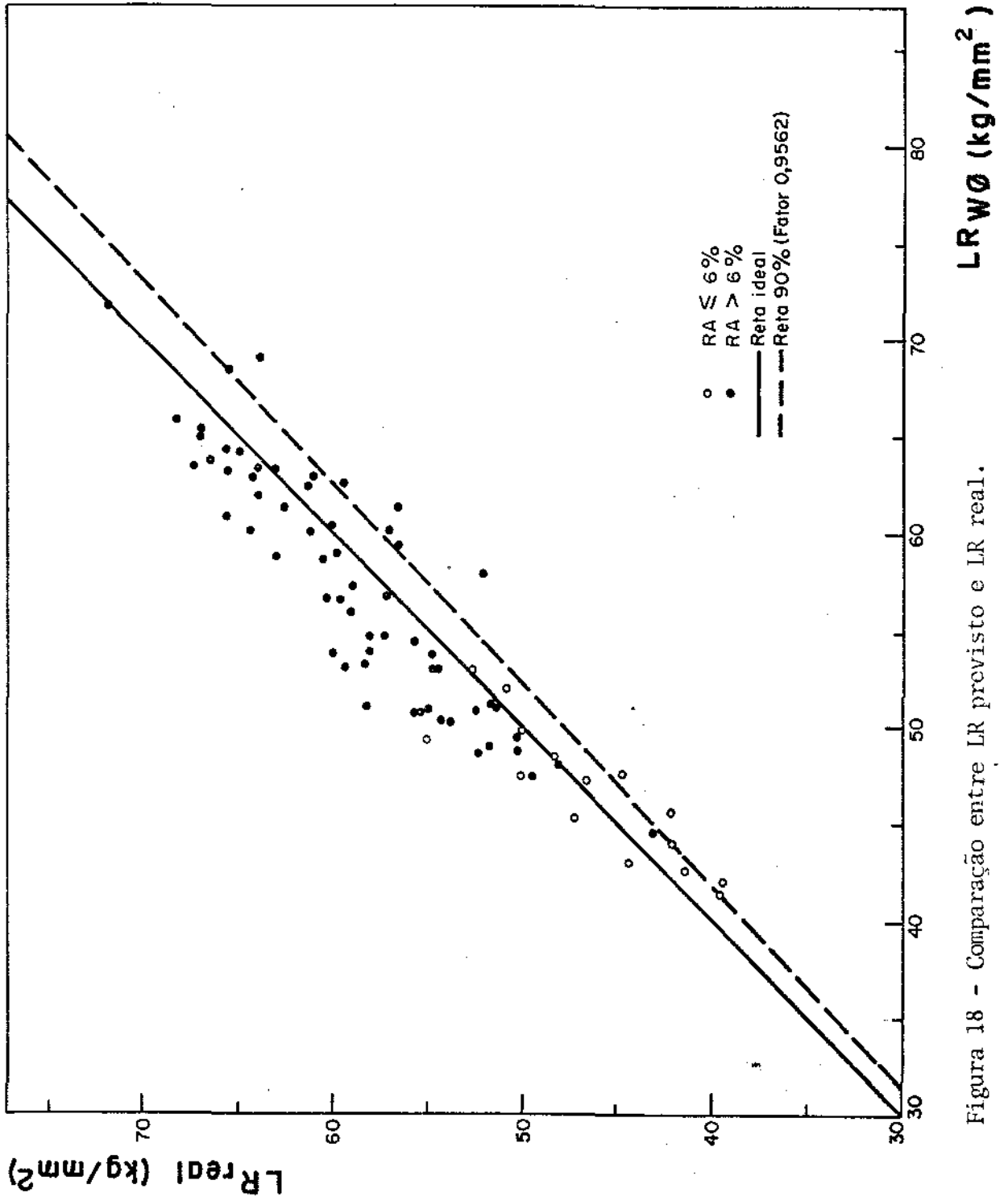


Figura 18 - Comparação entre LR previsto e LR real.

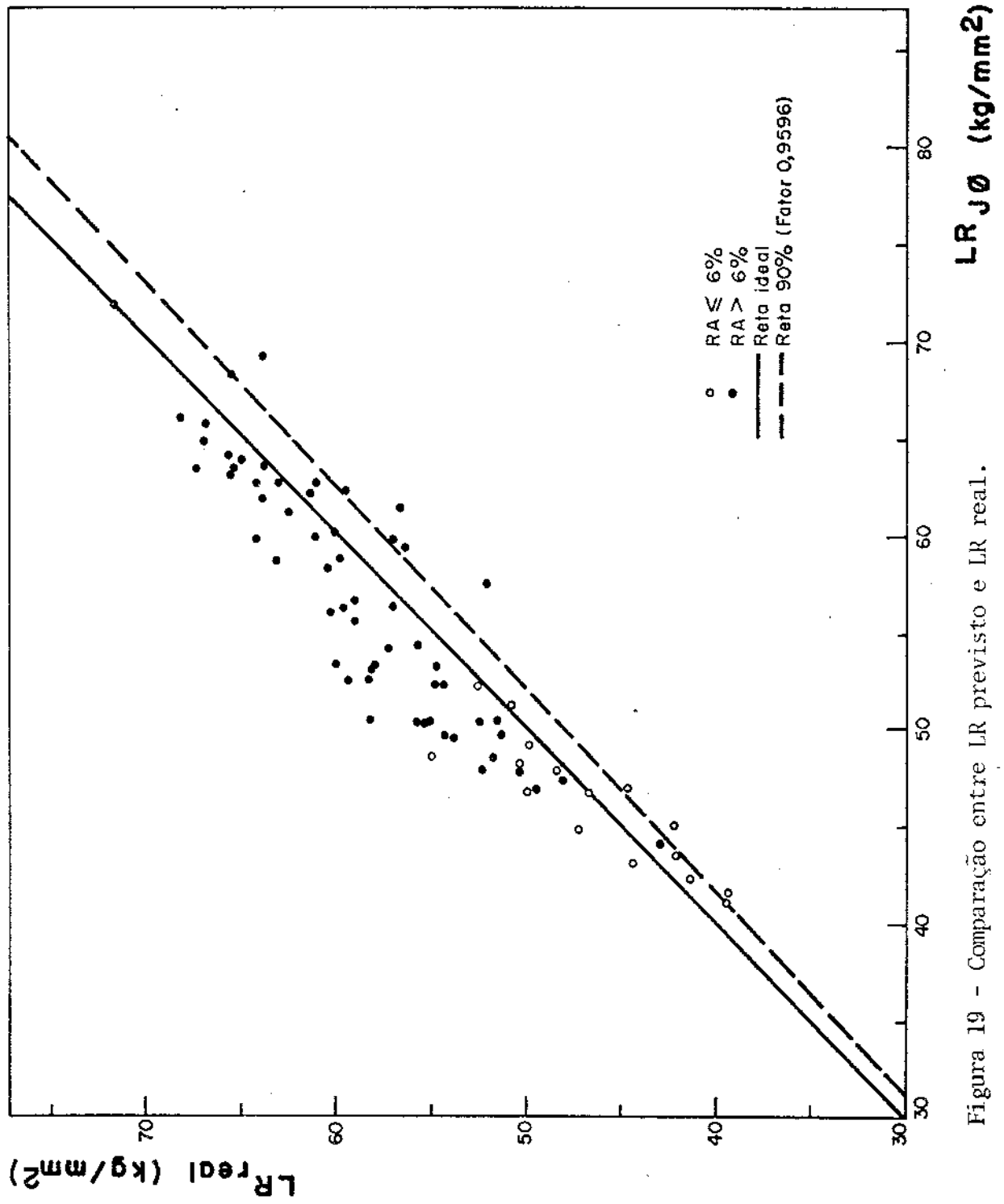


Figura 19 - Comparação entre LR previsto e LR real.

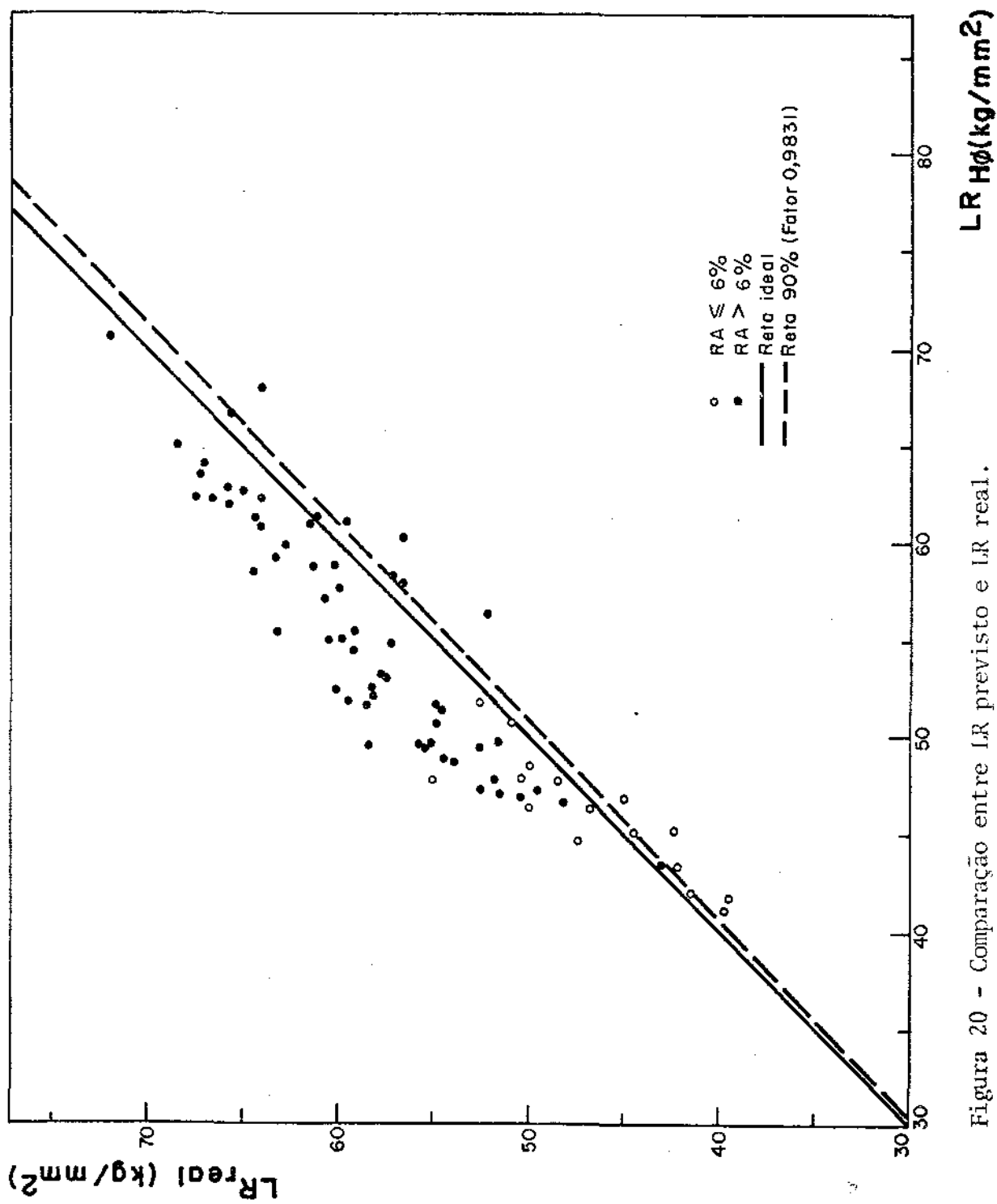


Figura 20 - Comparação entre LR previsto e LR real.

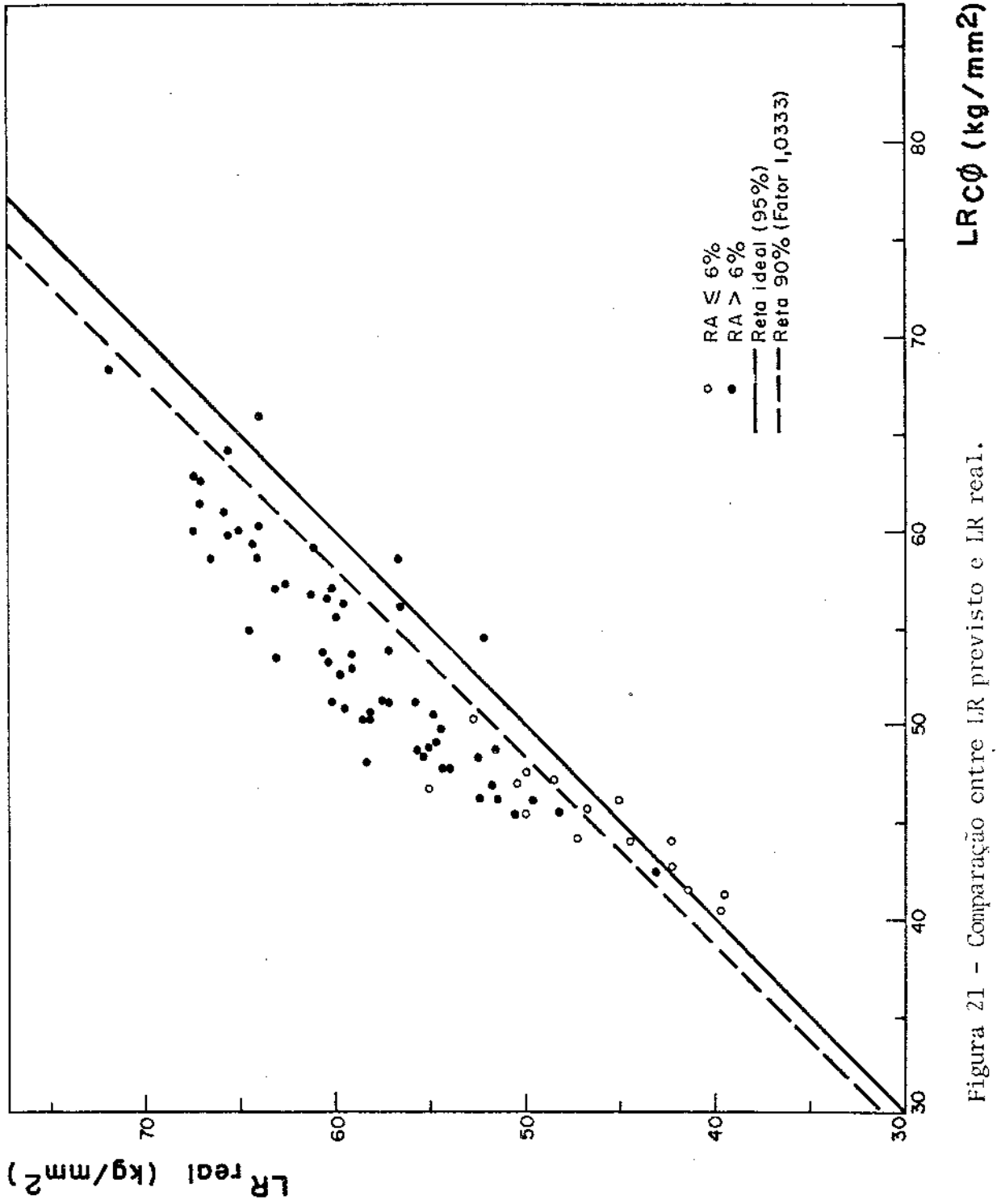


Figura 21 - Comparação entre LR previsto e LR real.

3.3. Previsão de σ_0 e m

As teorias tratadas até agora consideram o uso de σ_0 e m como parâmetros principais nas fórmulas de previsão de LE e LR. Como estes parâmetros são obtidos após a obtenção de vários pontos (AL e F) que descrevam toda a parte da deformação uniforme de uma curva de tração, fizeram-se algumas tentativas de sua obtenção a partir do correlacionamento direto com propriedades mecânicas do material, e que sejam de obtenção corriqueira. Fizeram-se correlações com LE, LR e Dureza Rb do material laminado. Os resultados mais satisfatórios são apresentados nas figuras 22, 23 e 26.

Os testes de tração, como já foi salientado, foram executados em 2 máquinas diferentes. Na primeira máquina (WOLPERT-AMSLER) os testes foram executados a uma velocidade aproximada de 10N/mm²/seg. Na segunda (KRATOS), que foi usada devido à falta de garras apropriadas para diâmetros acima de 15mm, a velocidade dos testes forçosamente foi reduzida à metade; o equipamento de leitura da deformação consistia de uma ponte com mostrador digital e a leitura da deformação era feita anotando-a para uma dada força, o que impediu um andamento mais rápido dos testes.

Isto explicaria o fato de que grupos de pontos provindos de testes realizados em diferentes máquinas se localizarem em áreas distintas dos gráficos das figuras 22 e 23.

Na figura 22, os dados obtidos na WOLPERT (GPA) apresentam uma dispersão visivelmente menor que os obtidos na KRATOS e pode ser usado perfeitamente para correlacionar LR com σ_0 .

Na figura 23 correlacionou-se LE/LR com m . Observando-se a reta obtida e os pontos agrupados em regiões diferentes, tudo leva a crer que a seguinte relação foi seguida:

Aumentando-se $\dot{\epsilon}$, LE/LR aumenta e m decresce.

A reta é razoável e pode ser usada para previsões de m, mas lembrando que afetará pouco a previsão de LE e LR, devido ao fato de que a dispersão não é grande (principalmente na máquina WOLPERT).

Uma constatação da diferença observada nas duas baterias de testes são as figuras 23 e 24 que mostram duas regiões distintas para C_1 e C_2 (parâmetros das equações de Caddell e Atkins). Nestas figuras a dispersão dos pontos impediu qualquer correlacionamento direto entre LR e (C_1, C_2) (outras correlações c/ outros parâmetros foram tentadas).

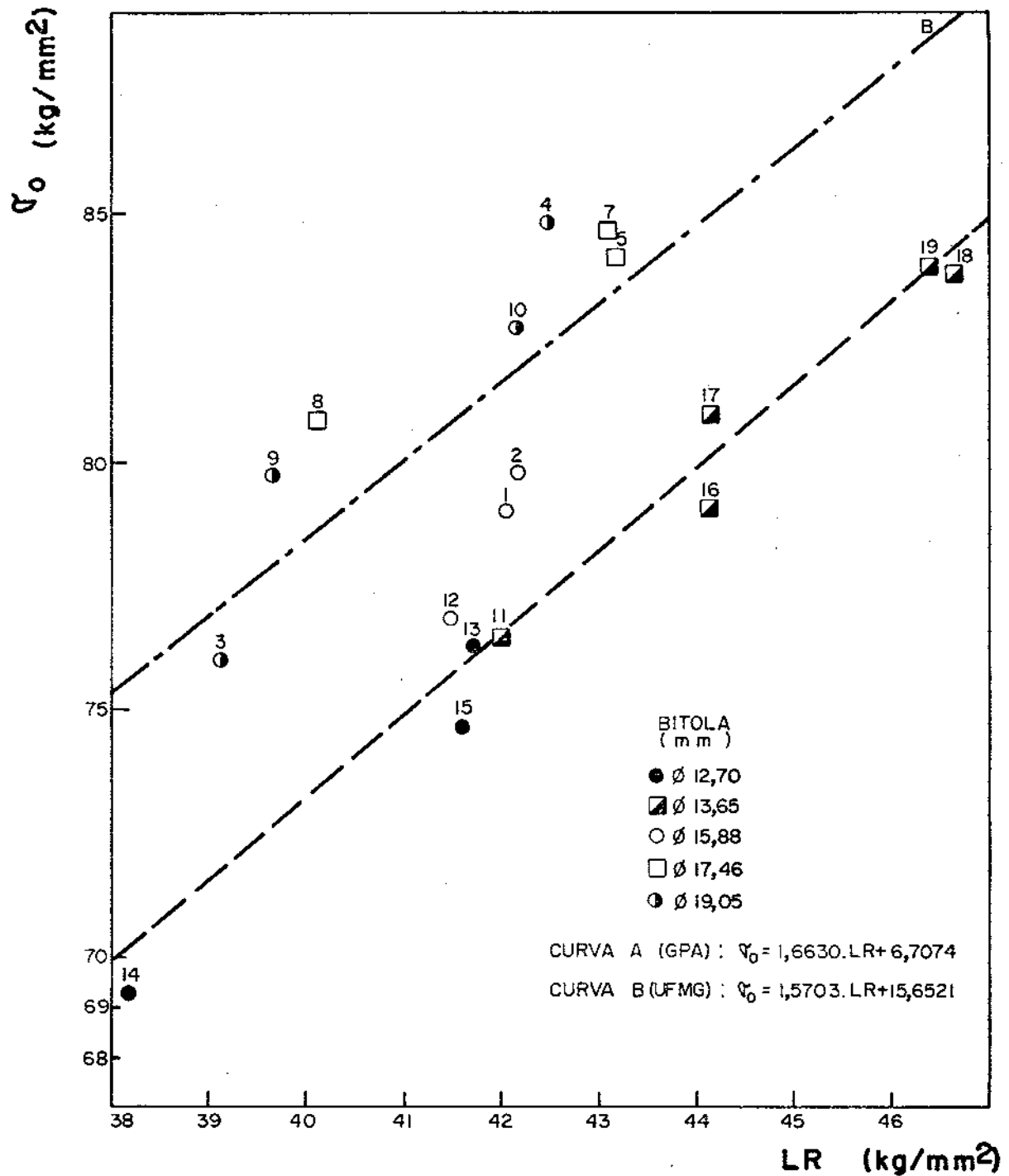
Dos testes de Dureza Rb feitos tentou-se alguma correlação direta de Rb com σ_0 e m mas o que se obteve levou apenas a uma tendência crescente de σ_0 com Rb mas nenhuma correlação concreta.

Assim estando exposto, observa-se que um correlacionamento direto de σ_0 com LR e m com LE/LR do material laminado é viável como meio de se simplificar a busca pelos parâmetros da equação de Hollomon a níveis industriais.

6.4. Alongamento

6.4.1. Alongamento não uniforme

A previsão de alongamento total de barras de aço após trefila foi baseada na equação (35) mostrada anteriormente. Para se fazer tais previsões seria necessário ter em mãos os valores de ϵ_{ij} e $k\beta$, para, através das deformações de trefilação, calcular-se o alongamento final.



PONTOS DE A : 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19

PONTOS DE B : 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10

Figura 22 - Correlação entre LR do laminado e σ_0 .

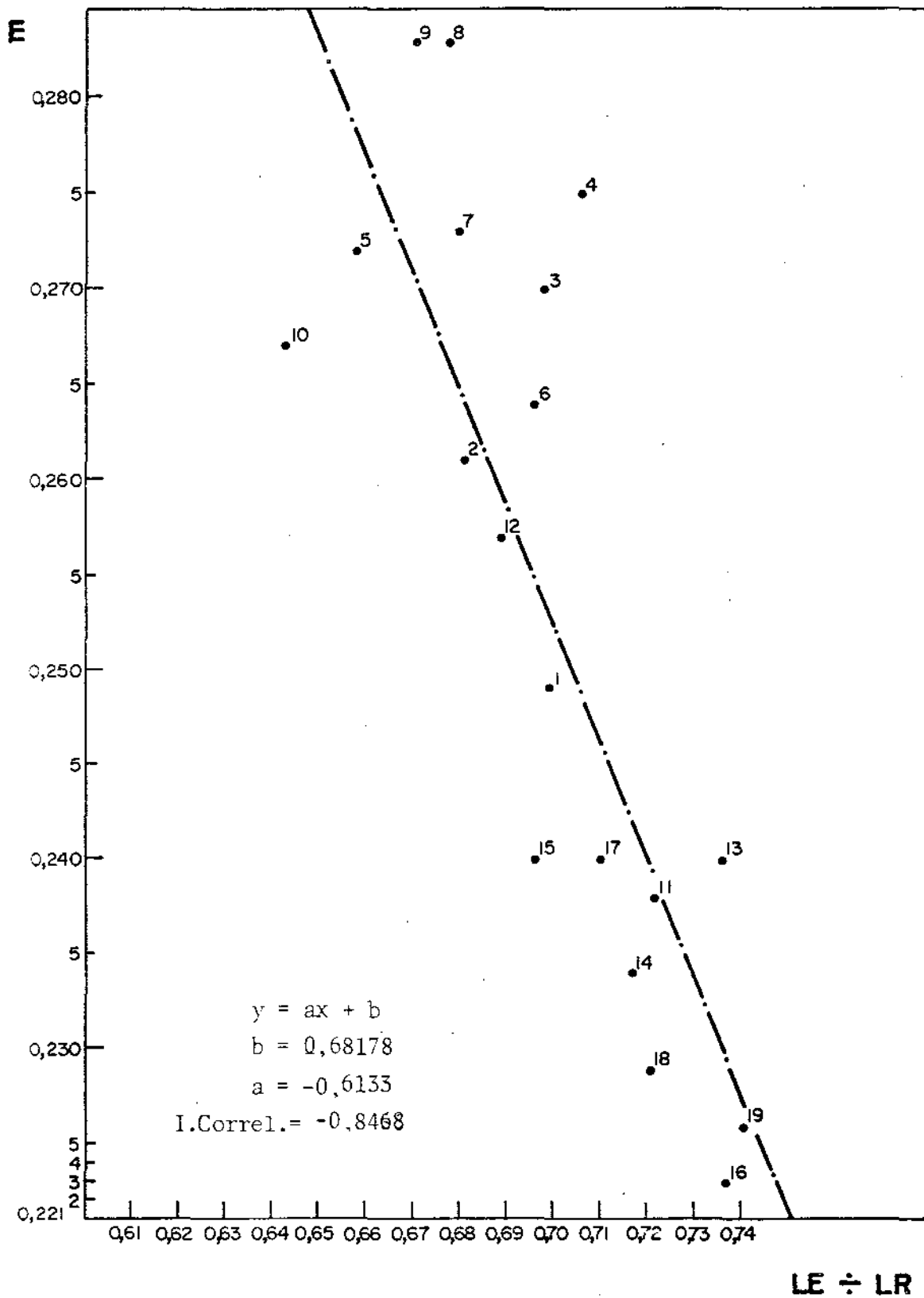


Figura 23 - Correlação entre $LE \div LR$ do laminado e m .

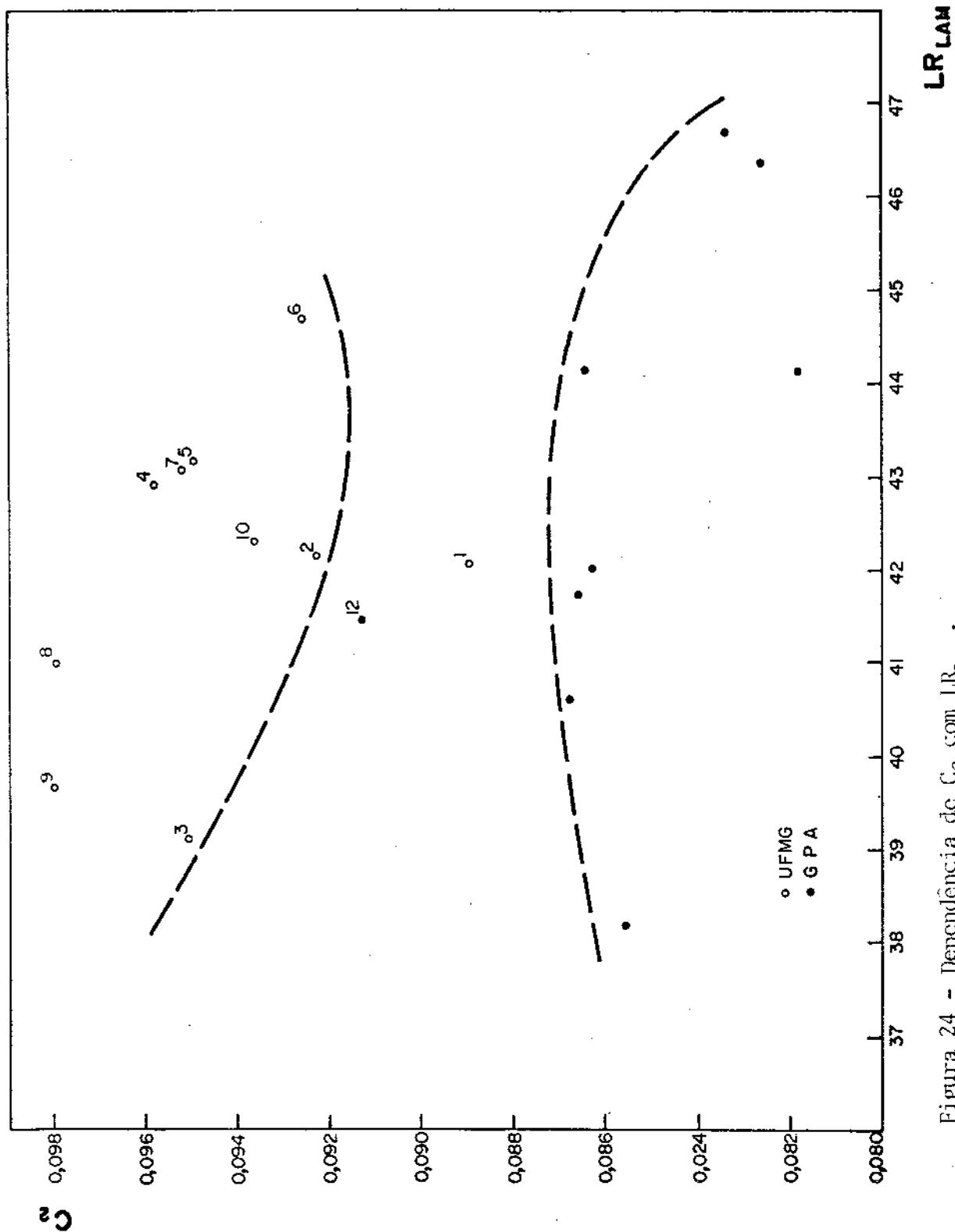


Figura 24 - Dependência de C_2 com LR_{LAM} .

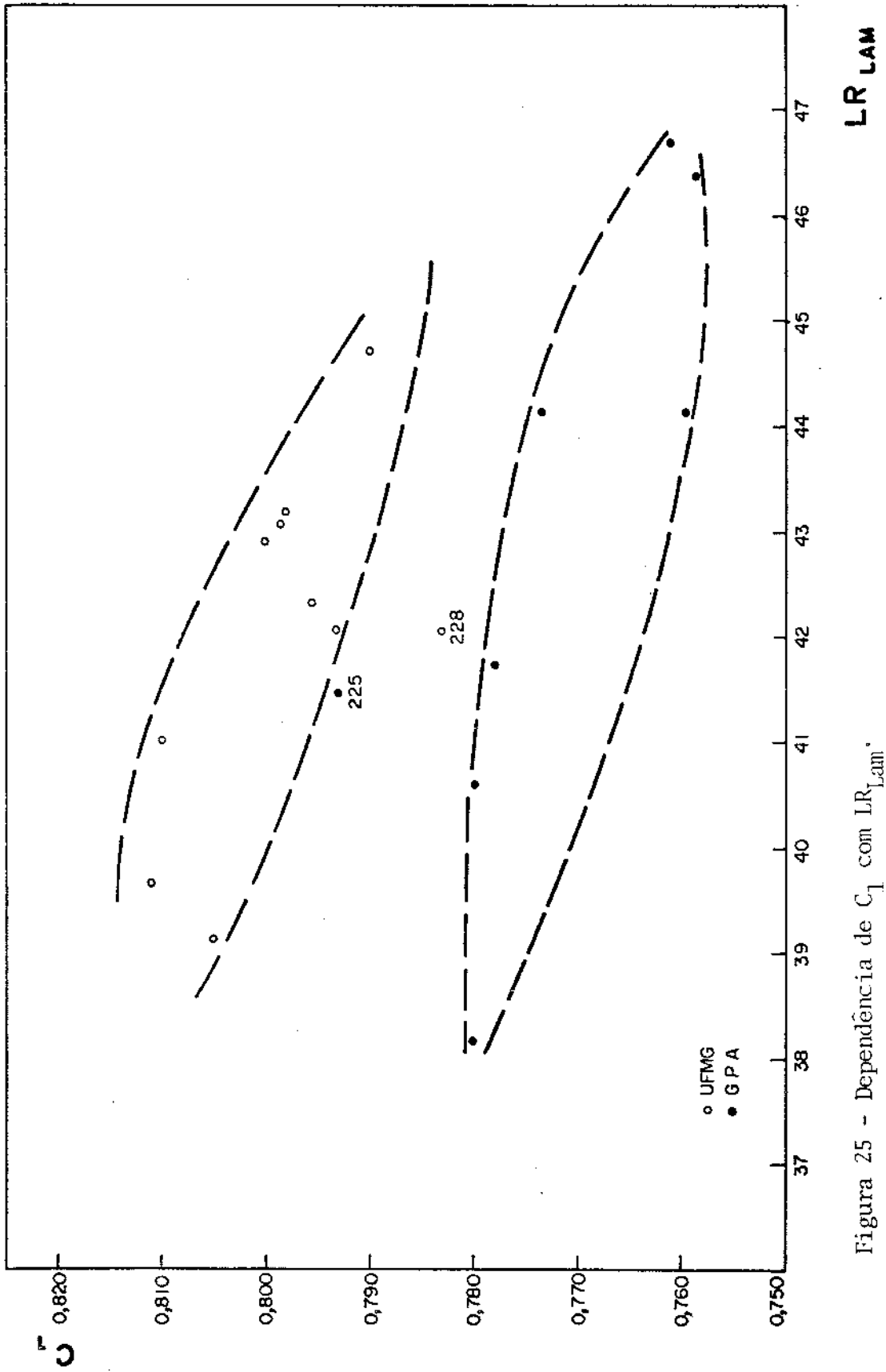


Figura 25 - Dependência de C_1 com LR_{Lam} .

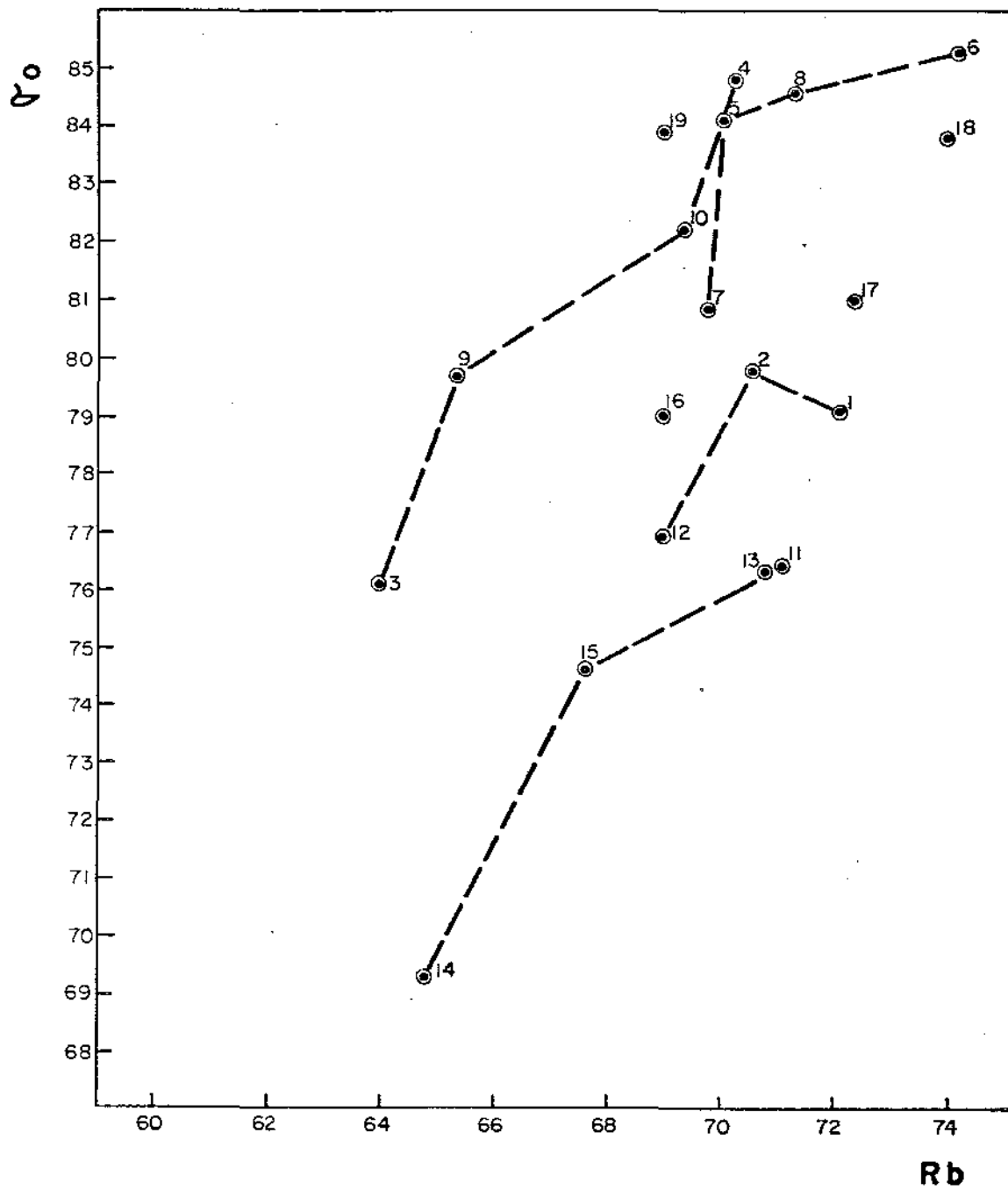


Figura 26 - Correlação entre Rb e σ_0 no laminado.

De acordo com a literatura⁽⁸⁾, a deformação uniforme termina quando

$$\varepsilon = \varepsilon_u = m \quad (41)$$

como $e_f = e_u + k\beta$ (38)

$$k\beta = e_f - e_u = e_f - \exp \varepsilon_u + 1 \quad (42)$$

ou, de acordo com (41)

$$k\beta = e_f - \exp m + 1 \quad (43)$$

Quando os dados foram introduzidos na equação (43), em 60% dos casos os valores de $k\beta$ chegavam a níveis muito baixos, o que nos fez supor que a equação (43) não seria o melhor meio de se calcular $k\beta$ para se fazer previsões sobre alongamento. Usou-se então a equação (39) que, além de fornecer dados coerentes, usa parâmetros fáceis de se medir na prática (e_f , D_0 e D_u).

Os valores de $k\beta_{TR}$ vs deformação total estão locados nas figuras 27 a 32. Ao contrário do que se previa, $k\beta_{TR}$ não é constante, nem igual a $k\beta_{lam}$. À medida que a deformação aumenta, $k\beta_{TR}$ cresce tendendo para um valor assintótico.

A análise das curvas da deformação não uniforme ($K\beta$) vs deformação total para as várias teorias (figs. 27 a 32) inicialmente leva à conclusão de que o uso de ϕ fornece pontos mais dispersos que aqueles usando δ para cálculo (figs. 27 e 28). A dispersão não diminui tanto quando se usa ϕ (ϕ^{m+1} para J e R e Backofen), e todas as teorias tem aproximadamente a mesma dispersão. Esta dis

persão é inerente à medida de e_f e D_u usados para o cálculo de $k\beta$.

Como em se falando de alongamento procura-se atingir no mínimo um dado valor para uma dada especificação, procurou-se nos gráficos de $k\beta$ apresentados obter-se uma curva mínima para cada um deles. Estas curvas são do tipo

$$(x^2 - a) (y - b) = c \quad (44)$$

sendo x correspondendo a $\phi\epsilon$ e y a $k\beta_{TR}$.

Cada uma delas foi obtida a partir das condições arbitrárias de um valor assintótico em $k\beta = 0,082$ e em pontos que dariam um $k\beta$ mínimo em $\phi\epsilon = 0,05$ e $\phi\epsilon = 0,25$.

6.4.2. Alongamento uniforme

Os valores da deformação uniforme (e_{uTR}) do quadro 14 foram calculados a partir de

$$e_u = \frac{L_u}{L_0} - 1 = \left(\frac{D_0}{D_u}\right)^2 - 1 \quad (45)$$

tendo em mãos os valores de D_0 e D_u medidos nos corpos de prova rompidos. Locando-se estes valores contra os valores de deformação total para cada teoria, obtiveram-se as figuras de nºs 33 a 38.

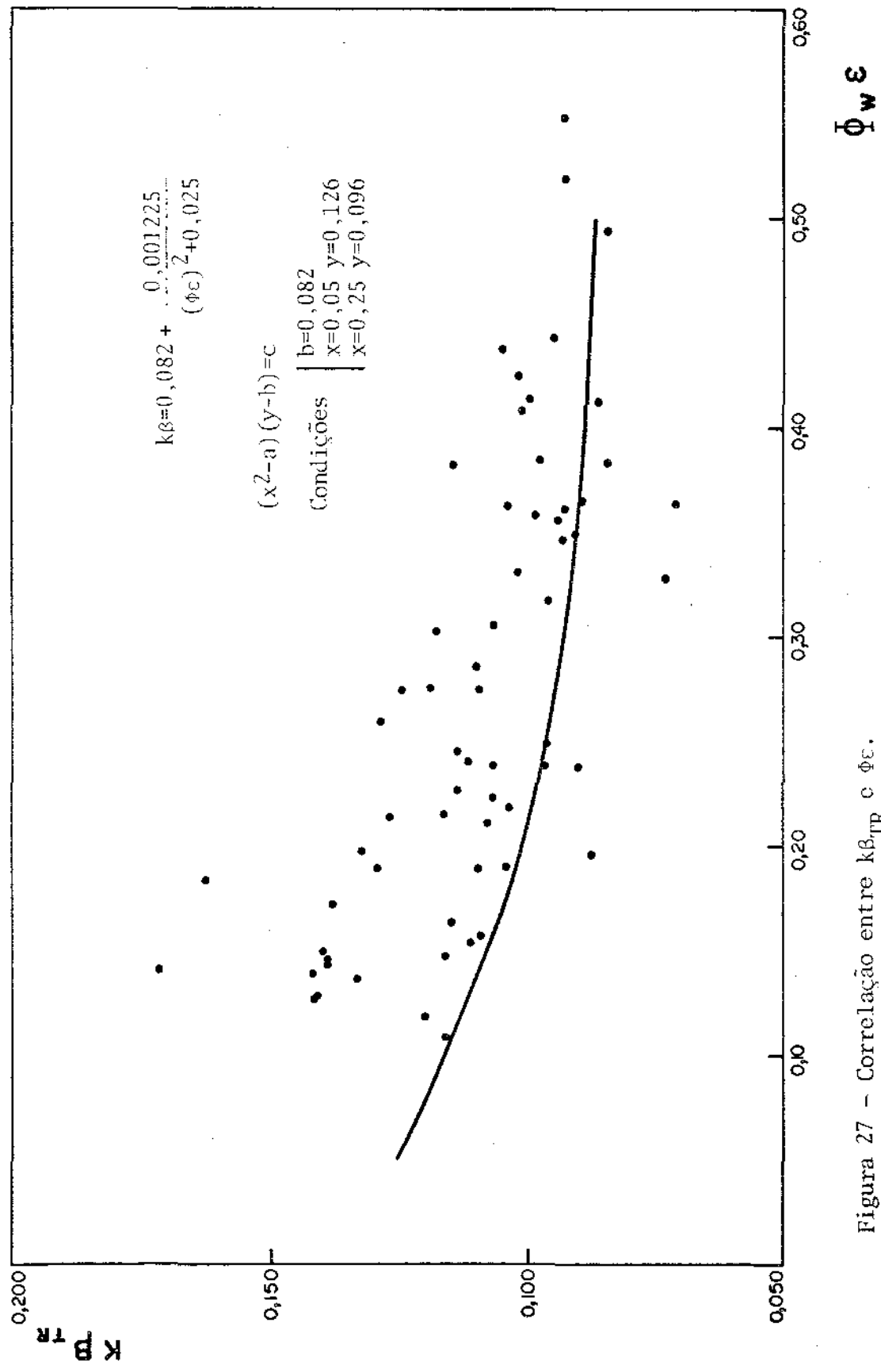
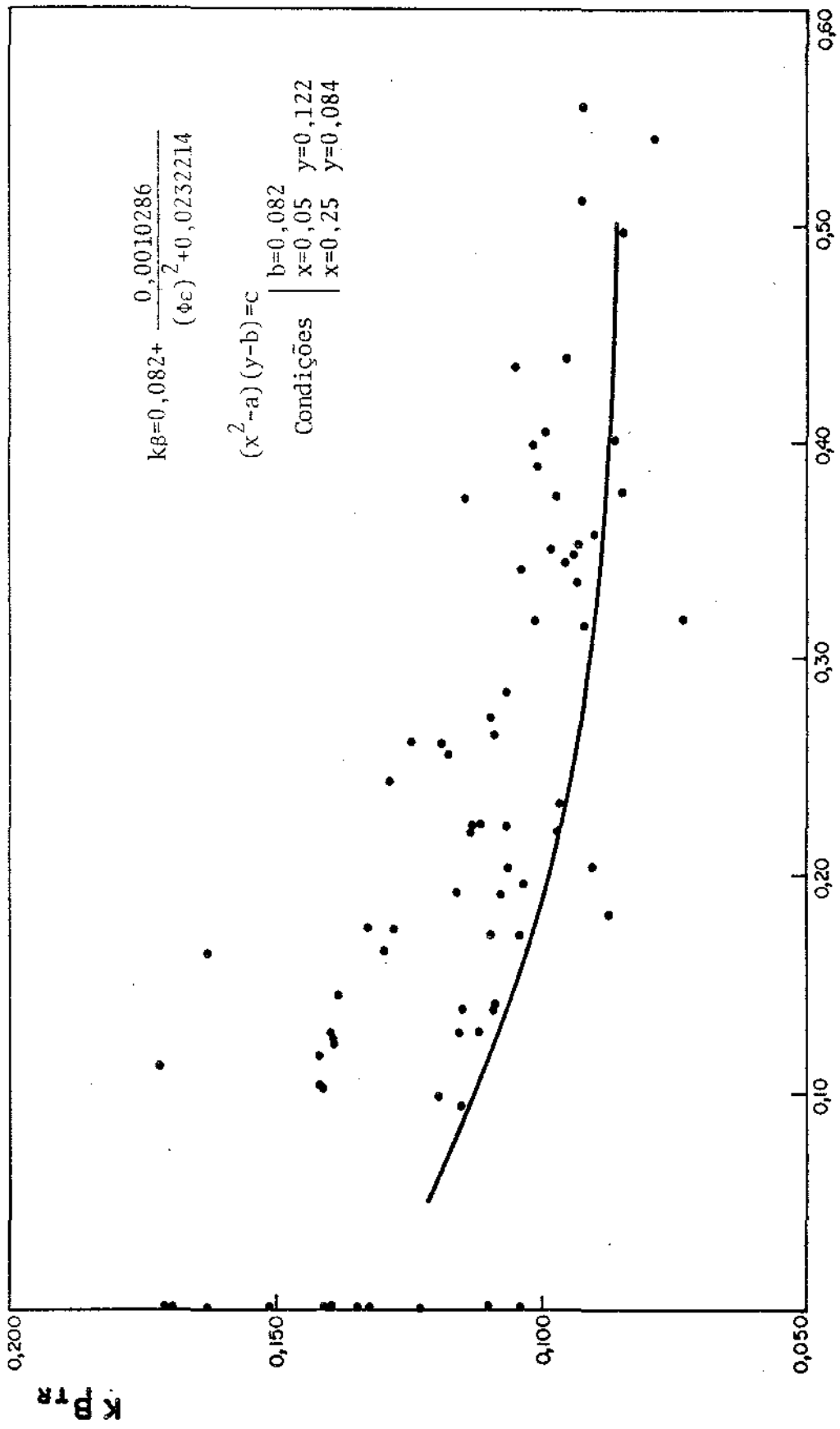


Figura 27 - Correlação entre $k\beta_{TR}$ e $\Phi\epsilon$.



Φ_{JE}

Figura 28 - Correlação entre $k\beta_{TR}$ e Φ_{JE} .

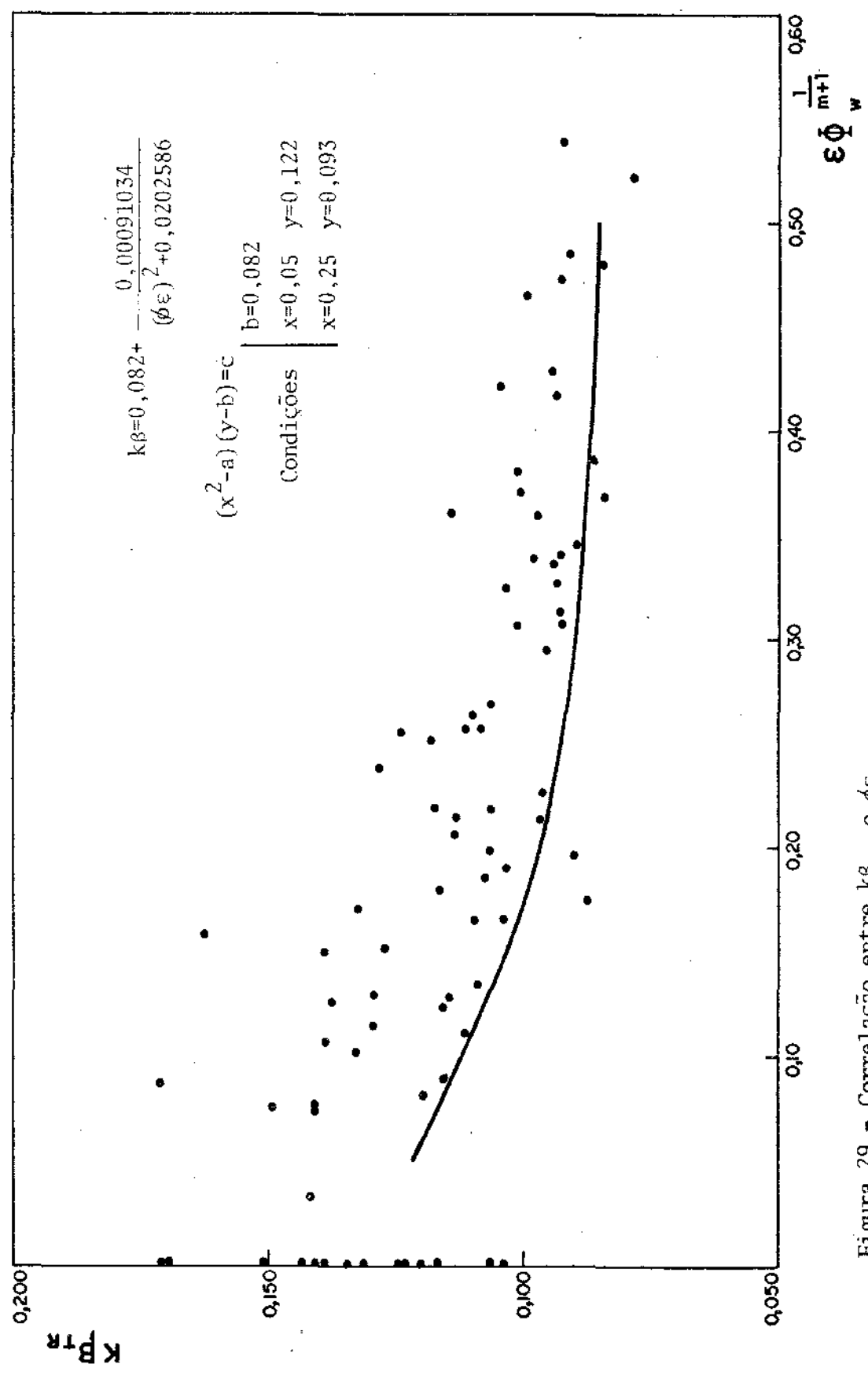


Figura 29 - Correlação entre $k\beta_{TR}$ e $\phi\epsilon$.

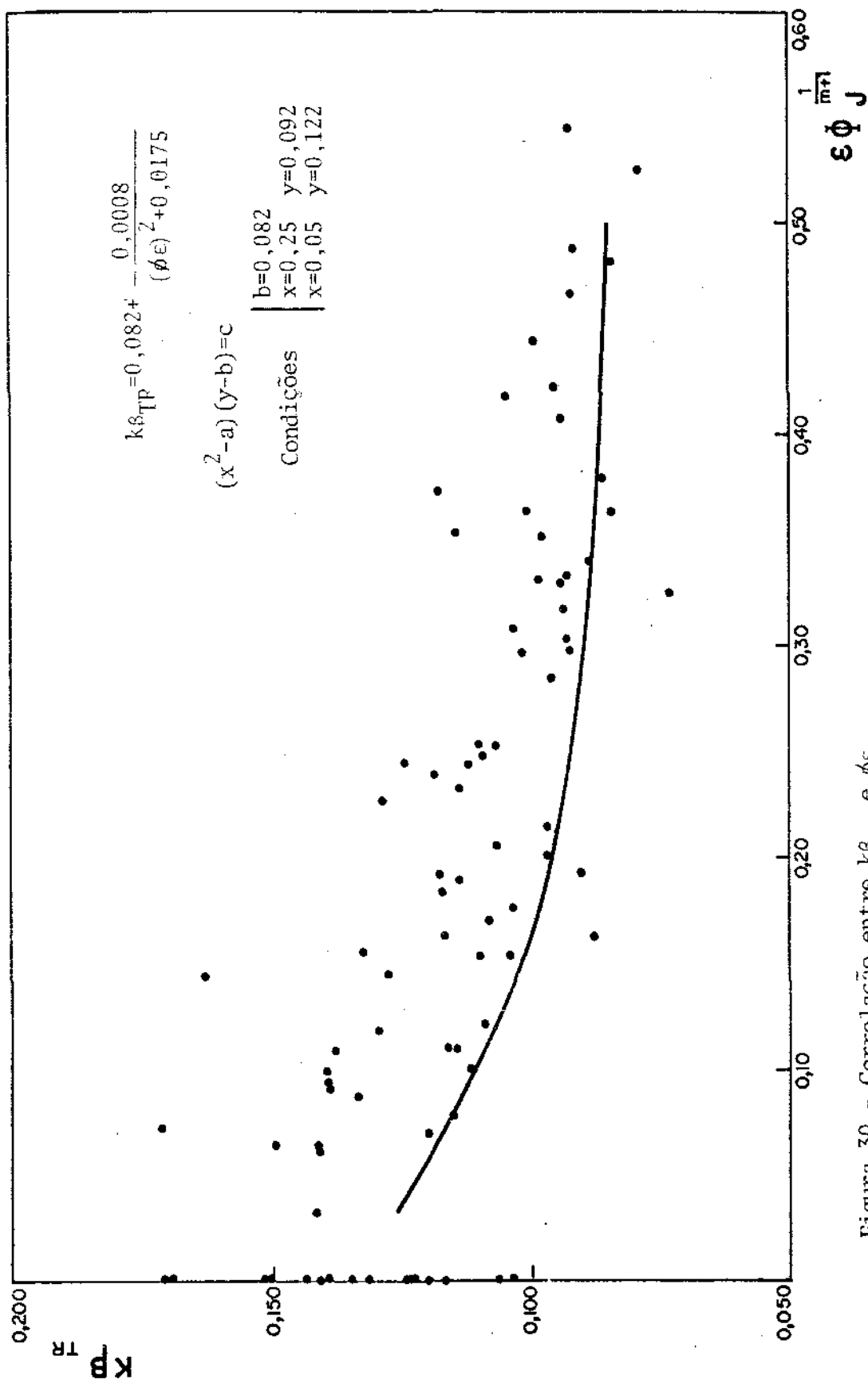


Figura 30 - Correlação entre $k\beta_{TR}$ e $\phi\epsilon$.

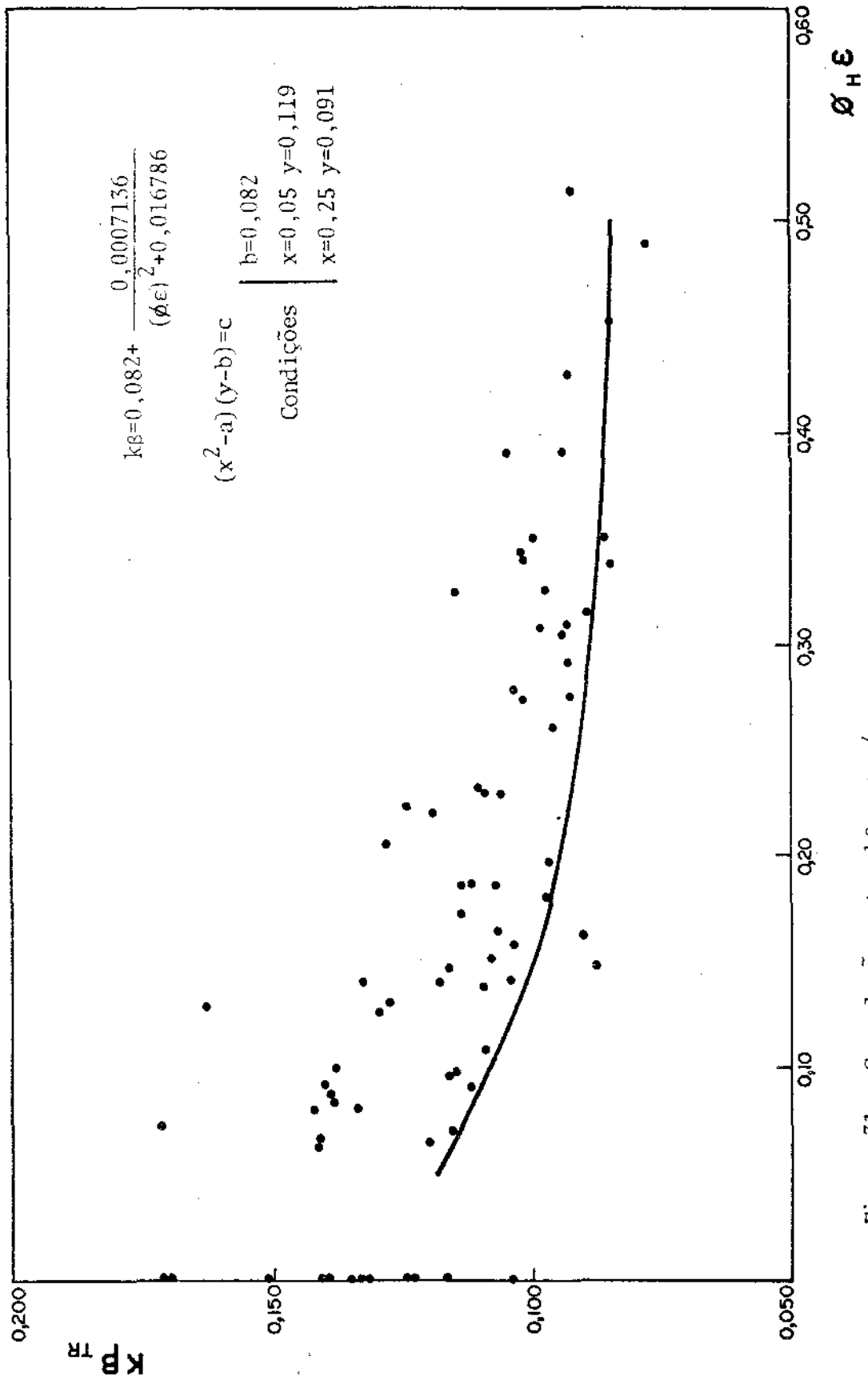


Figura 31 - Correlação entre $k\beta_{TR}$ e $\phi_{H\epsilon}$.

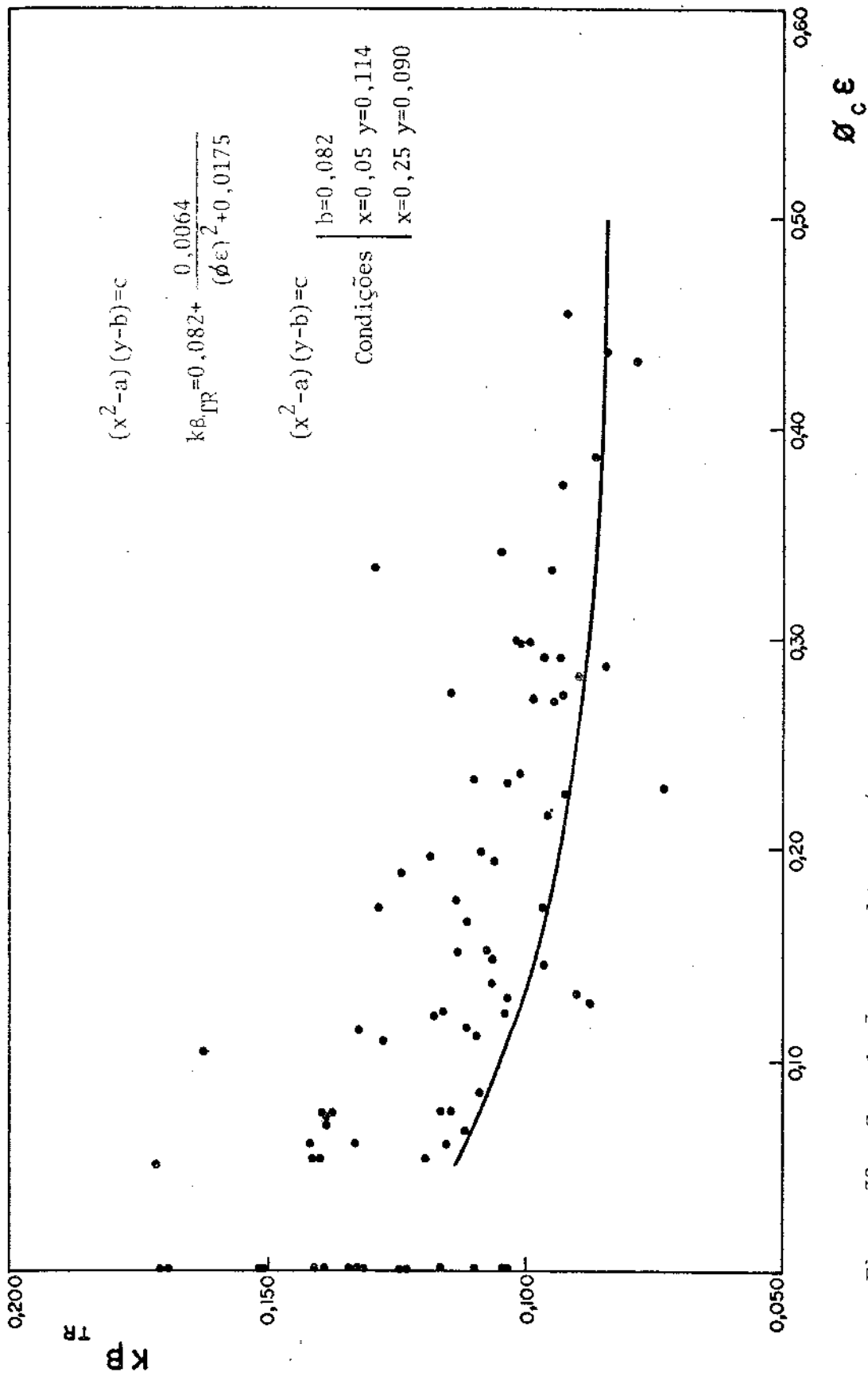


Figura 32 - Correlação entre $k\beta_{Lam}$ e $\phi_c \epsilon$.

Nota-se que em todas elas, quando $\phi\epsilon$ (ou $\phi\epsilon$) aumenta, e_u tende a zero; no entanto, e_u não chega a zero para $\phi\epsilon = \epsilon_{u1am}$.

Além disto, se a correlação fosse perfeita (quando $\phi\epsilon > \epsilon_{u1am} - e_{uTR} = 0$) e a relação linear, obter-se-iam pontos sobre uma reta a 45° com a horizontal em um gráfico e_{uTR} vs $\exp[\epsilon_{u1am} - \phi\epsilon] - 1$. O que se obteve foram gráficos nos quais, além de pontos dispersos, muitos se concentram sobre o eixo das ordenadas em consequência de que quando $\phi\epsilon \geq \epsilon_{u1am}$, e_{uTR} não é igual a zero como se previa (figuras 39 a 44).

Do mesmo modo que na seção anterior, traçam-se curvas de alongamento uniforme mínimo e as que seguem a equação do tipo

$$(x^4 - a)(y - b) = c$$

na qual x corresponde a $\phi\epsilon$ e y a e_u , pareciam ajustar-se bem às características de uma curva mínima. As condições para a obtenção de cada curva e as equações correspondentes encontram-se nas figuras de n.ºs. 33 a 38.

6.4.3. Alongamento total

Os dados de alongamento total das barras trefiladas (e_{fTR}) e que foram apresentadas na tabela 16, se forem comparadas com valores de deformação ($\phi\epsilon$ e $\phi\epsilon$) resultarão em gráficos que são apresentados nas figuras de n.ºs. 45 a 50.

Novamente observa-se que os gráficos que usaram valores de $\phi\epsilon$ tem uma dispersão maior que seus correspondentes que usam $\phi\epsilon$. A dispersão menor observa-se nas figuras 48, 49 e 50.

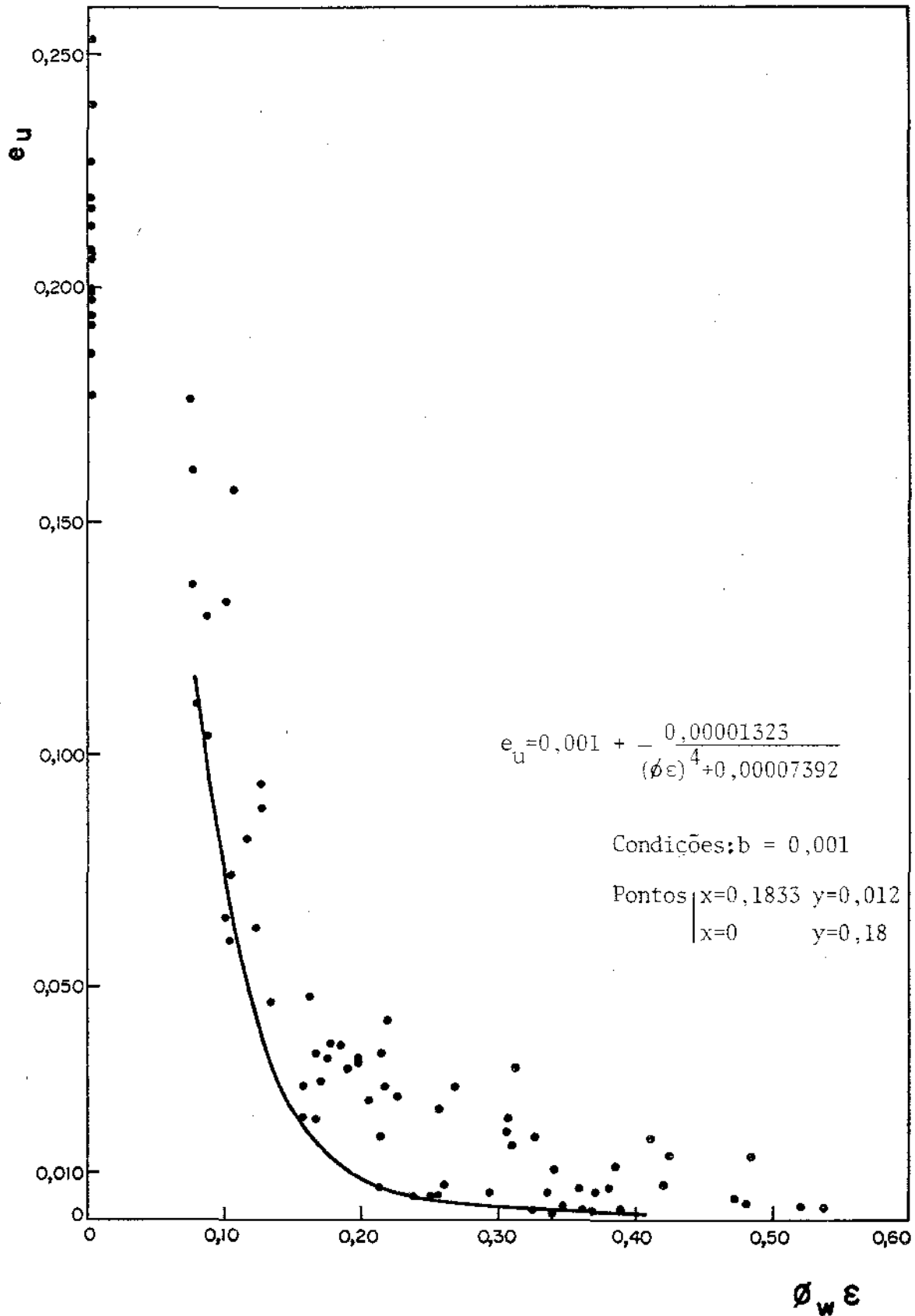


Figura 33 - Correlação entre e_u e $\phi_w \epsilon$.

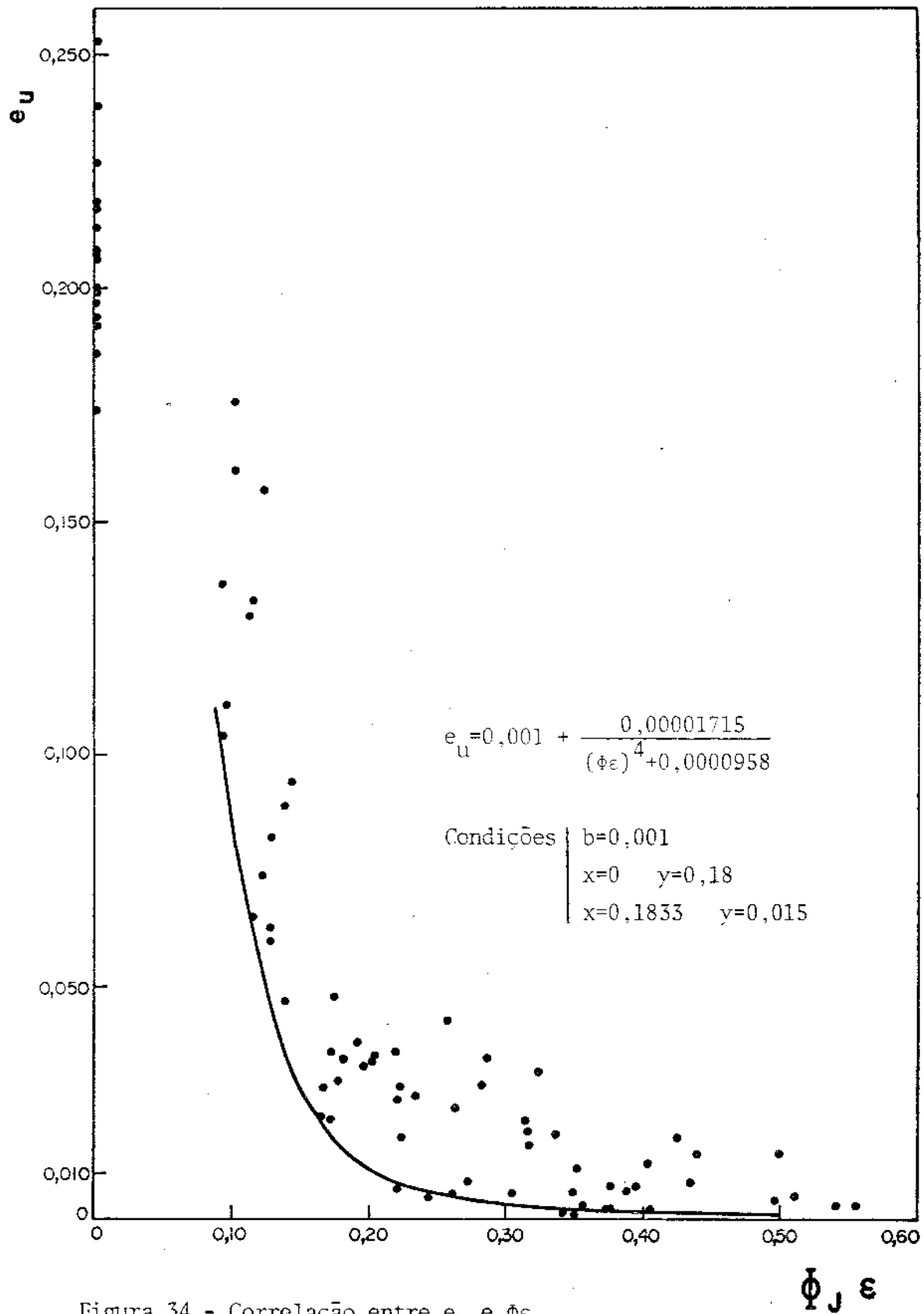


Figura 34 - Correlação entre e_u e $\Phi \epsilon$.

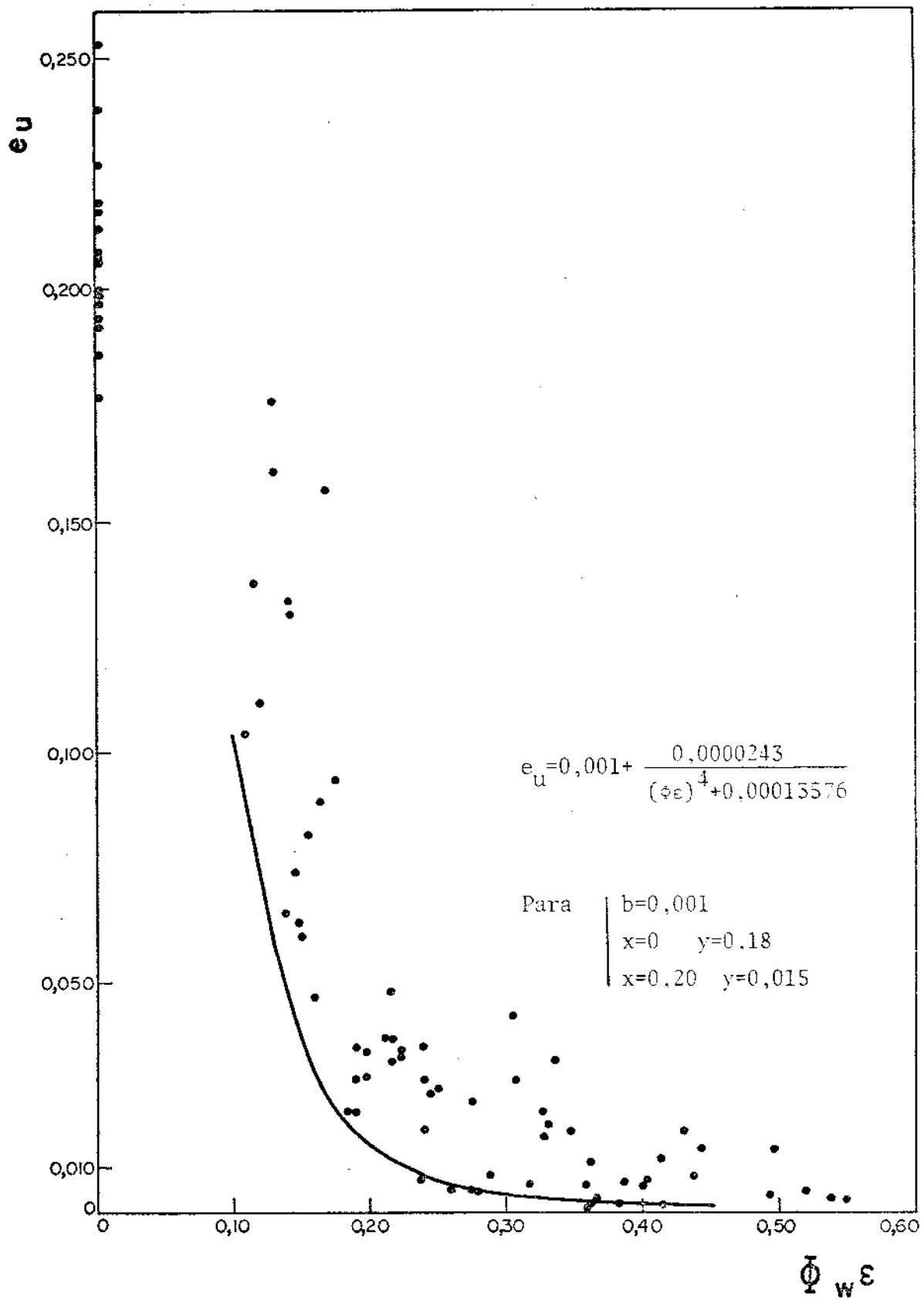


Figura 35 - Correlação entre e_u e $\bar{\Phi}_w \epsilon$.

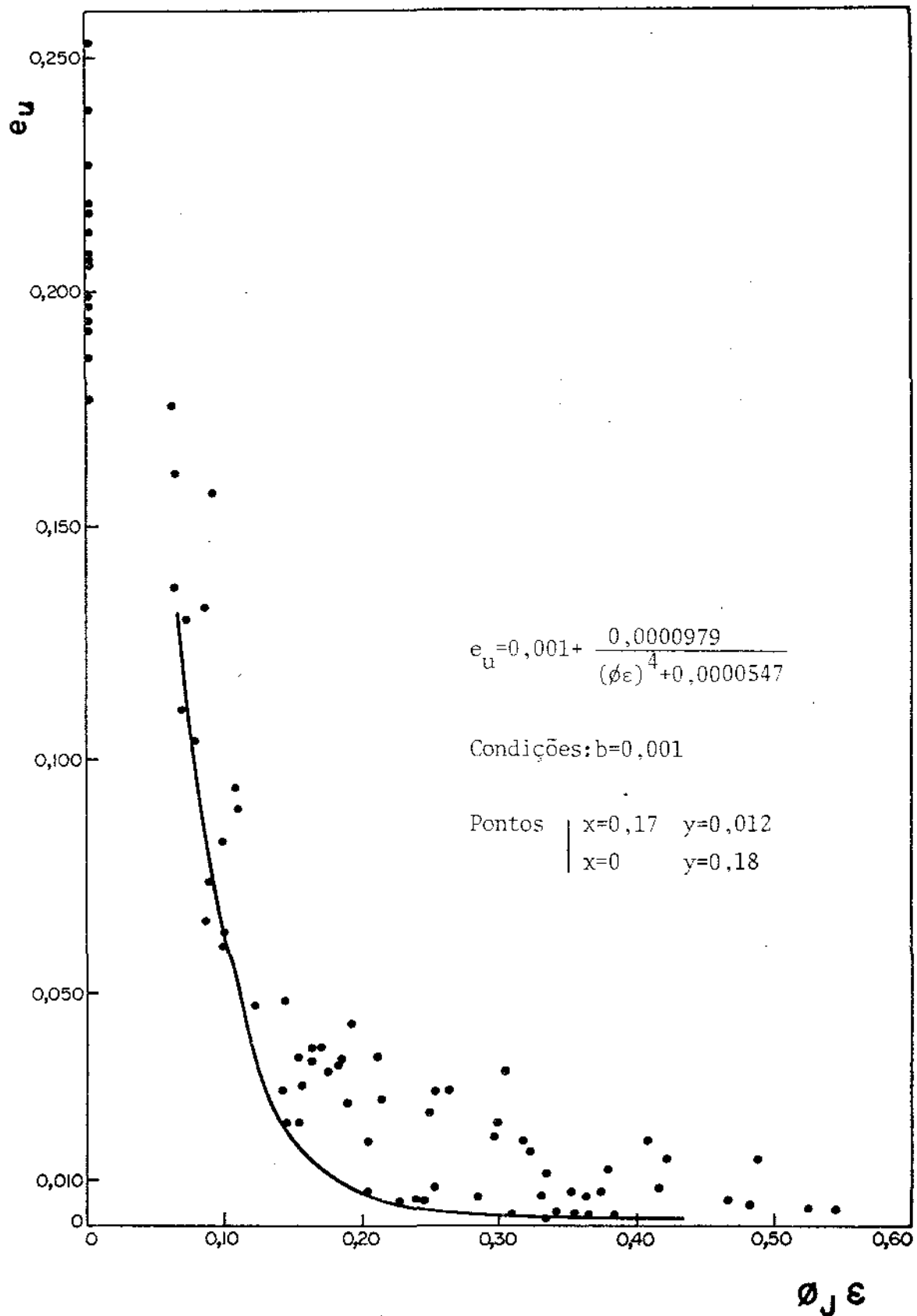


Figura 36 - Correlação entre e_u e $\phi\epsilon$.

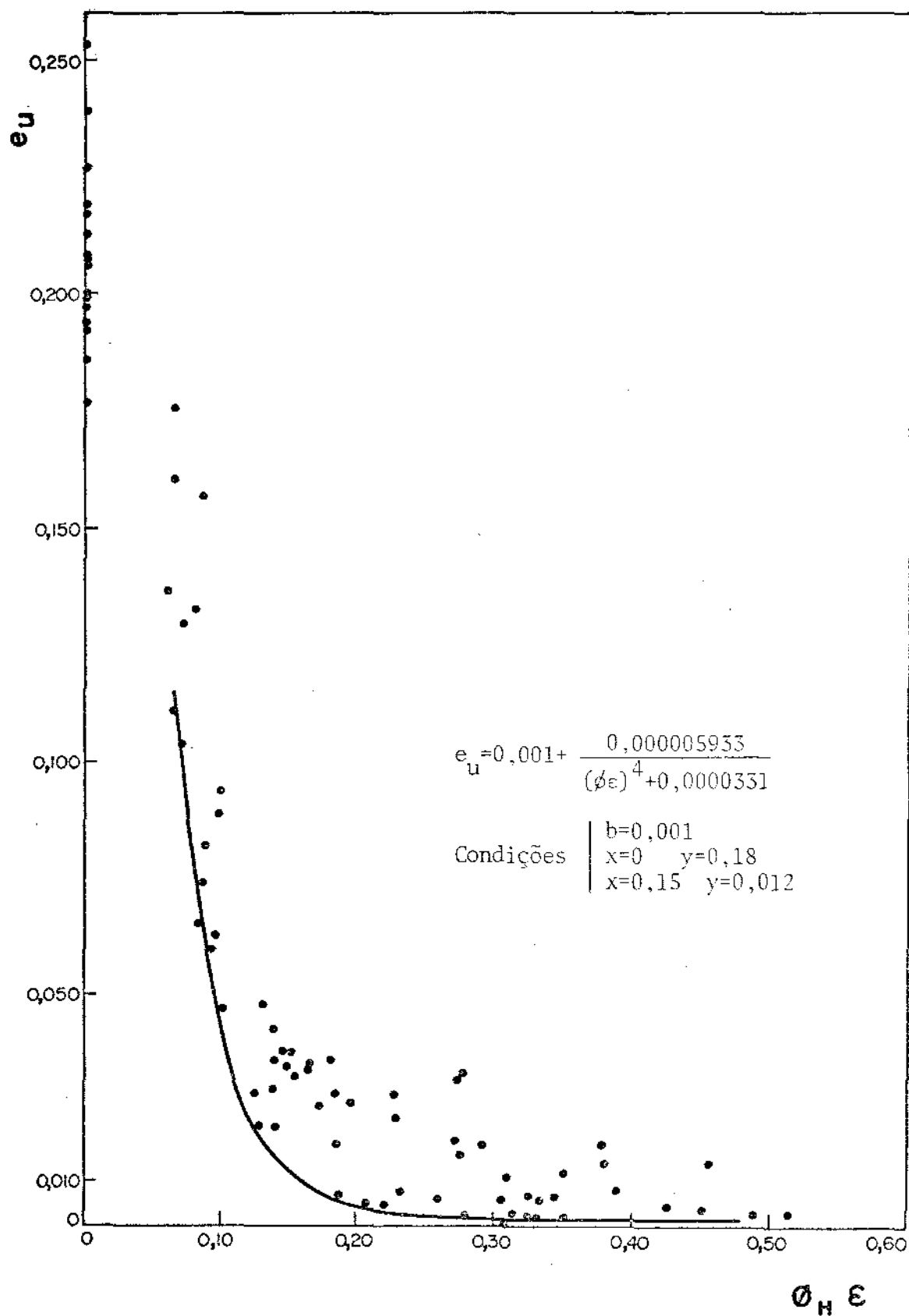


Figura 37 - Correlação entre e_u e $\phi\epsilon$.

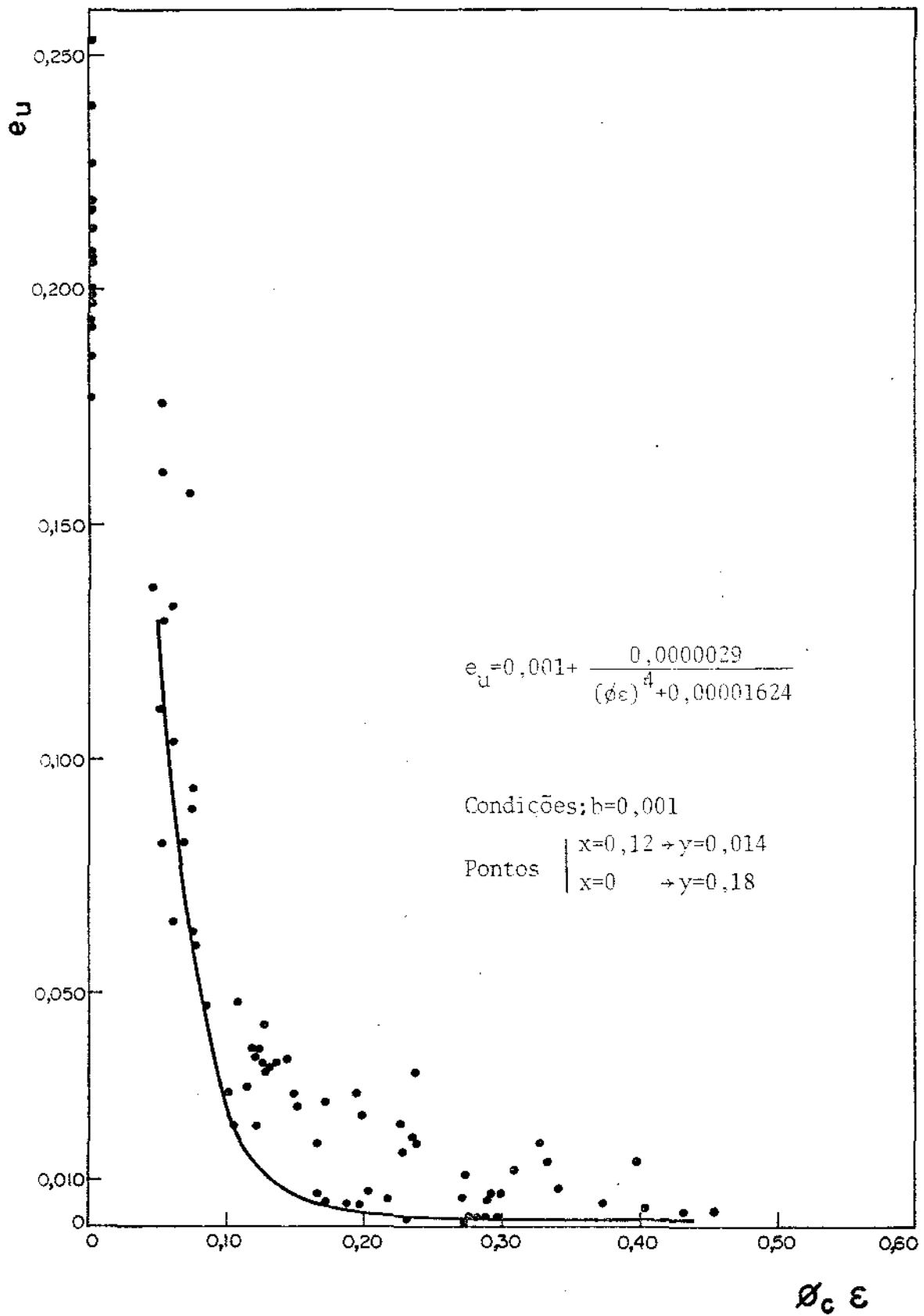


Figura 38 - Correlação entre e_u e $\phi_c \epsilon$.

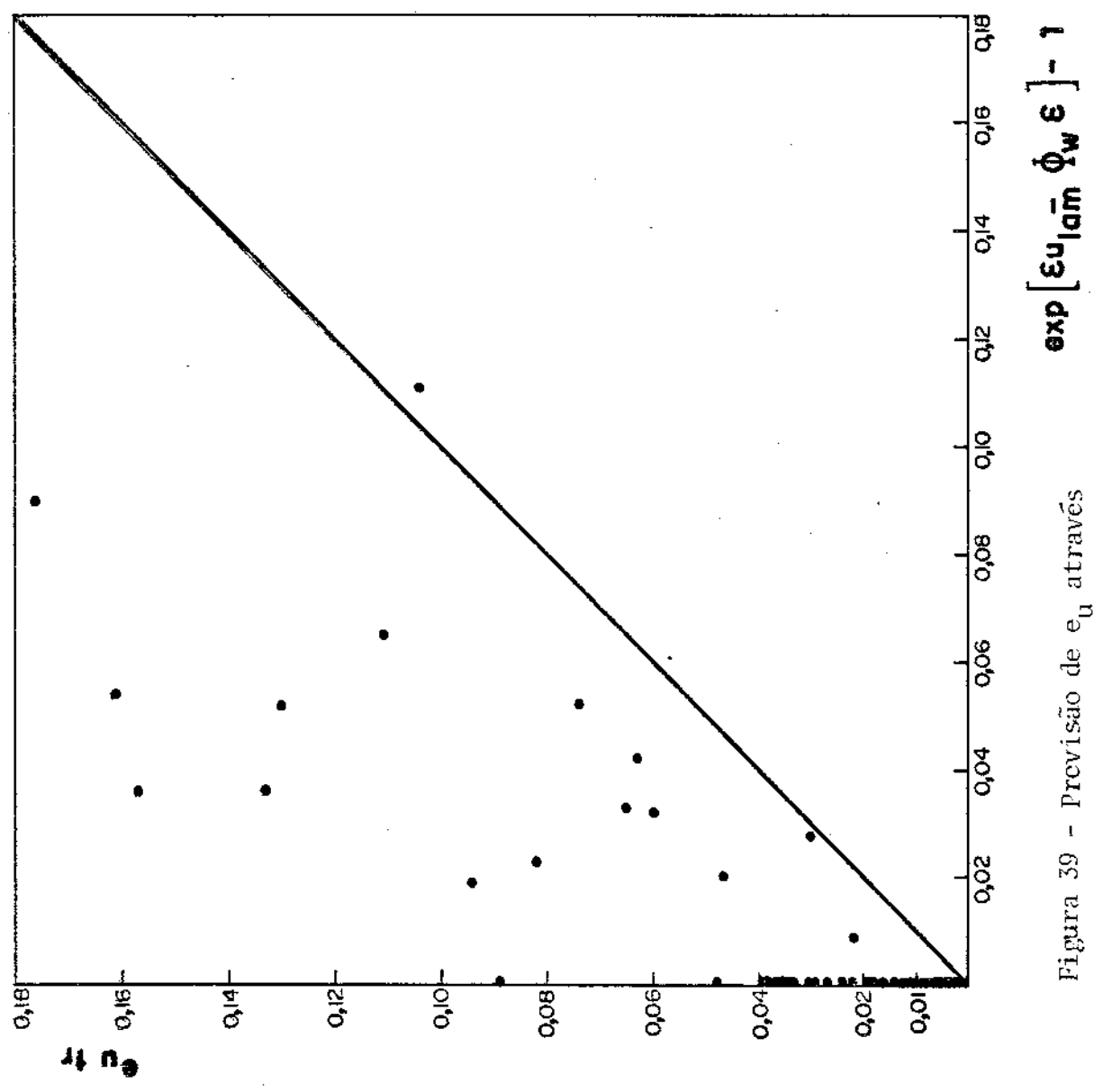


Figura 39 - Provisão de e_u através de $\Phi \epsilon$.

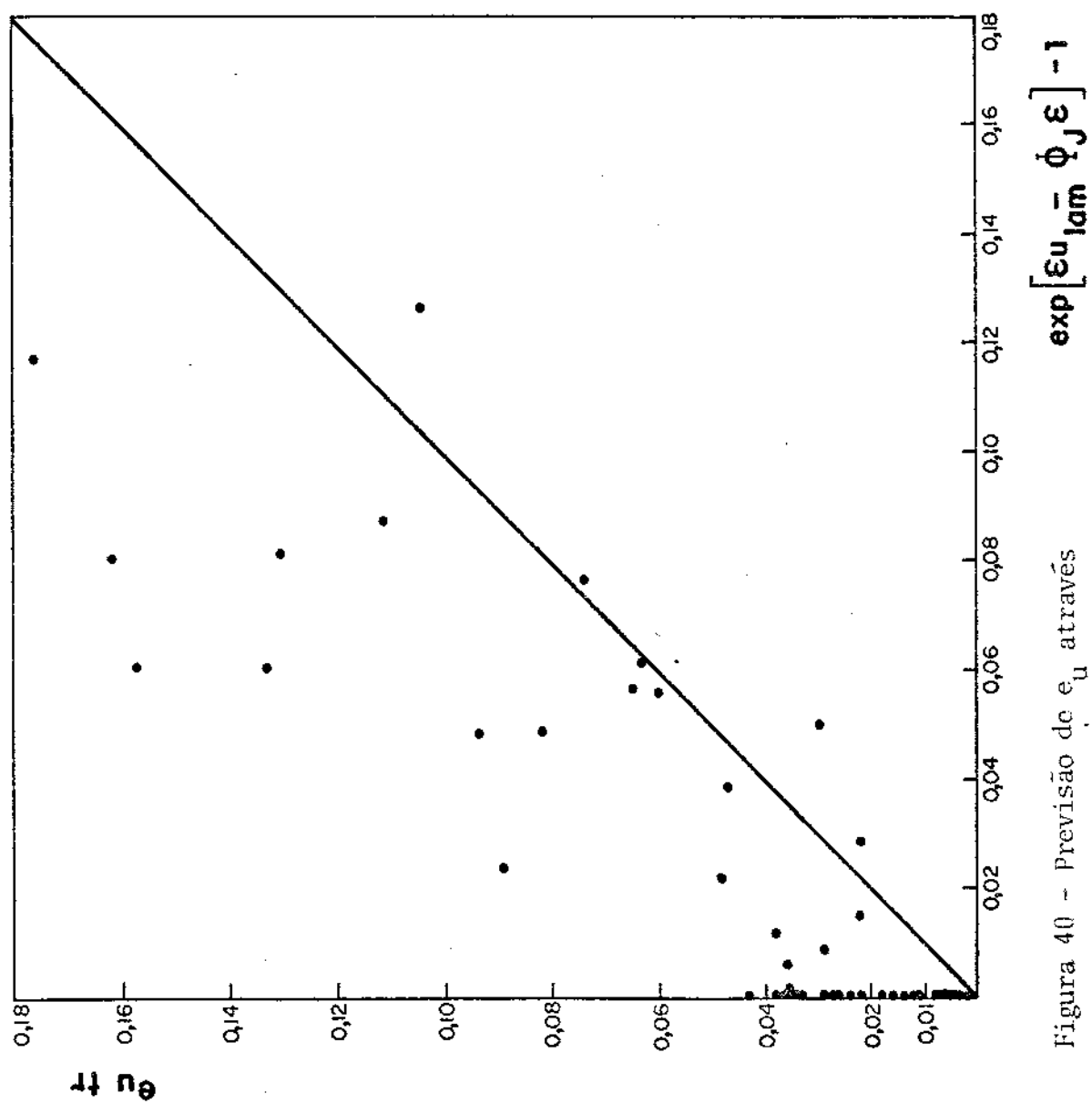


Figura 40 - Previsão de e_u através de $\phi \epsilon$.

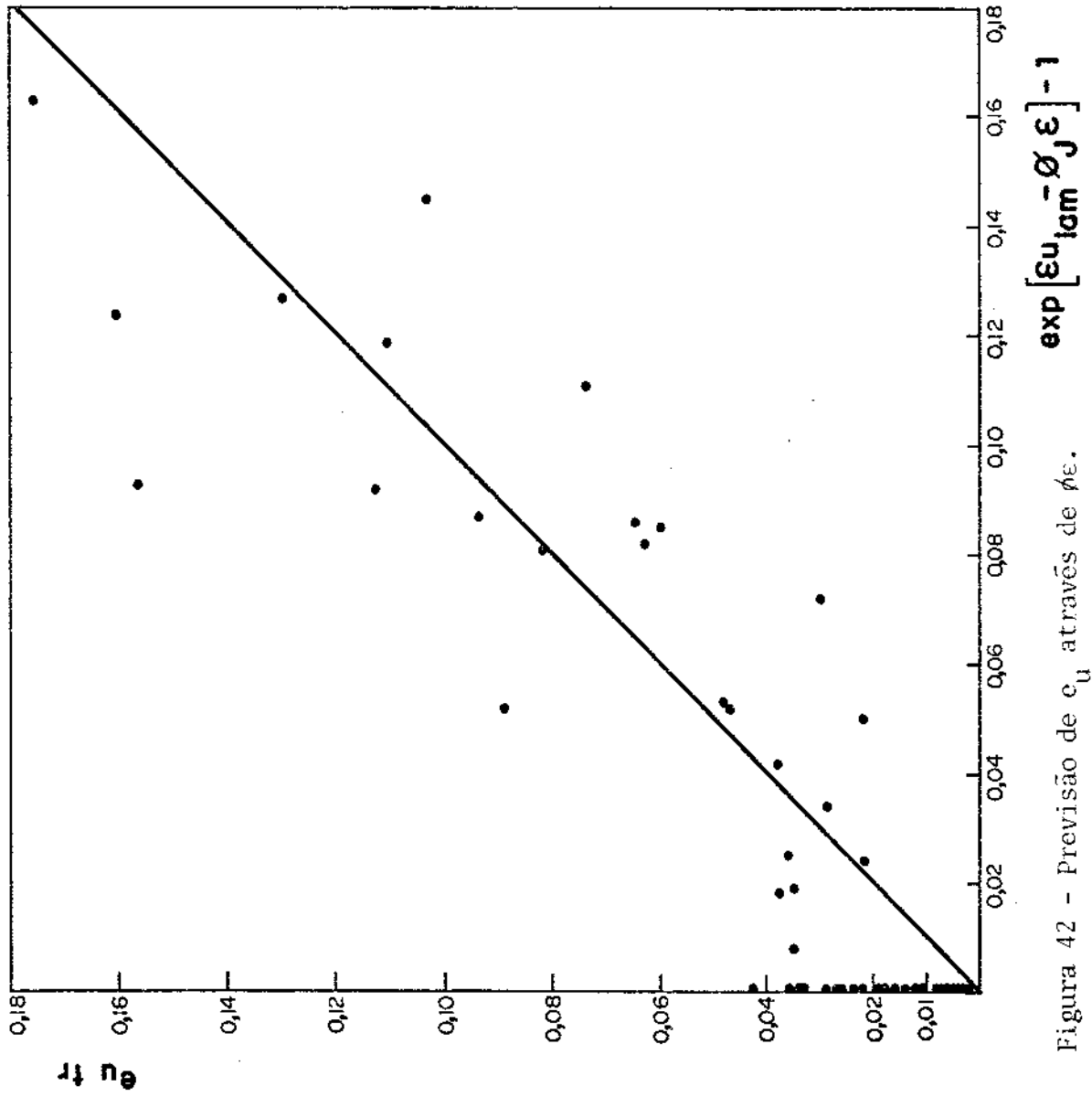


Figura 42 - Previsão de e_u através de $\mu\epsilon$.

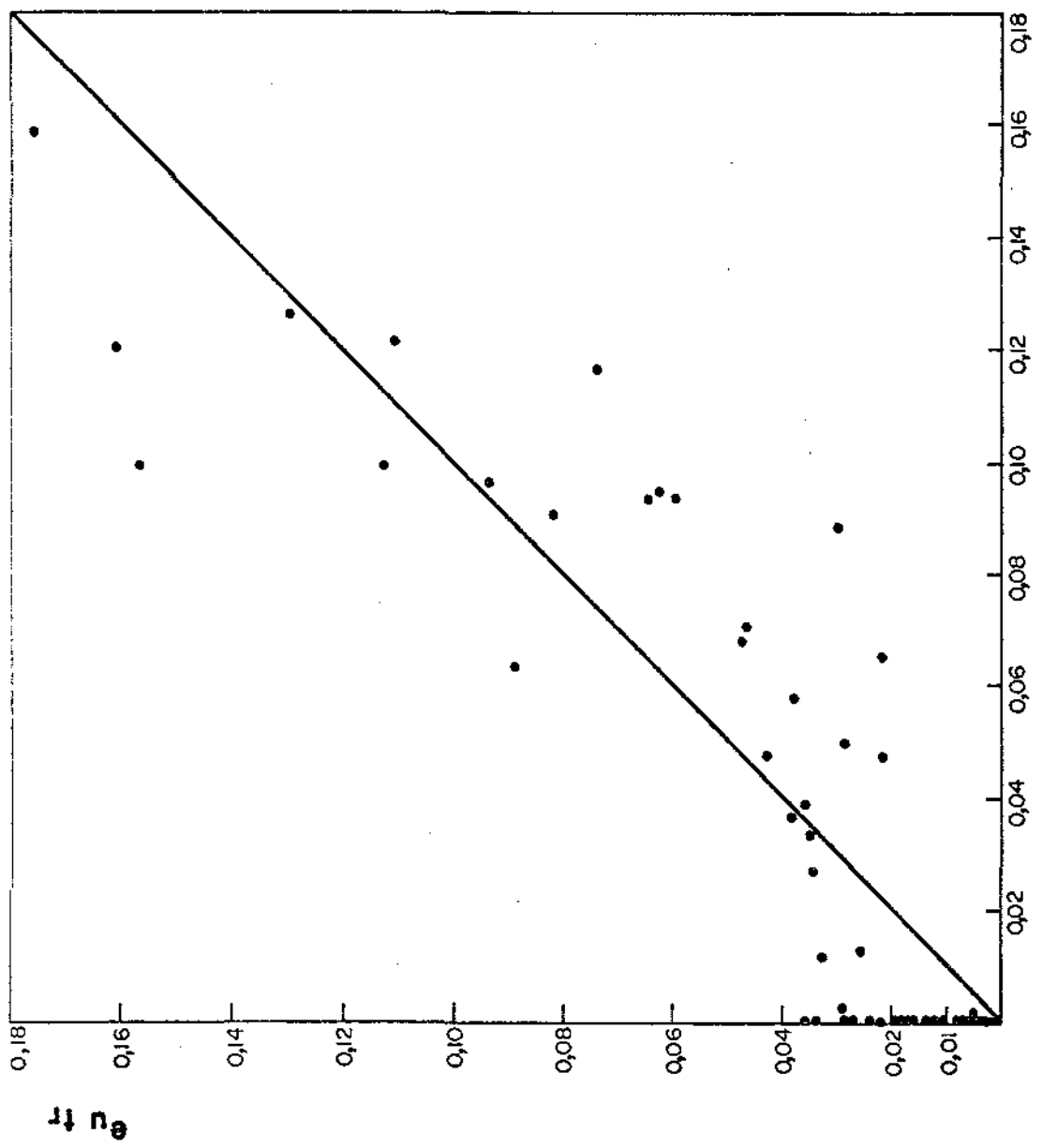


Figura 43 - Provisão de e_u através de $\phi \epsilon$. $\exp[\epsilon_{u iam} - \phi_H \epsilon] - 1$

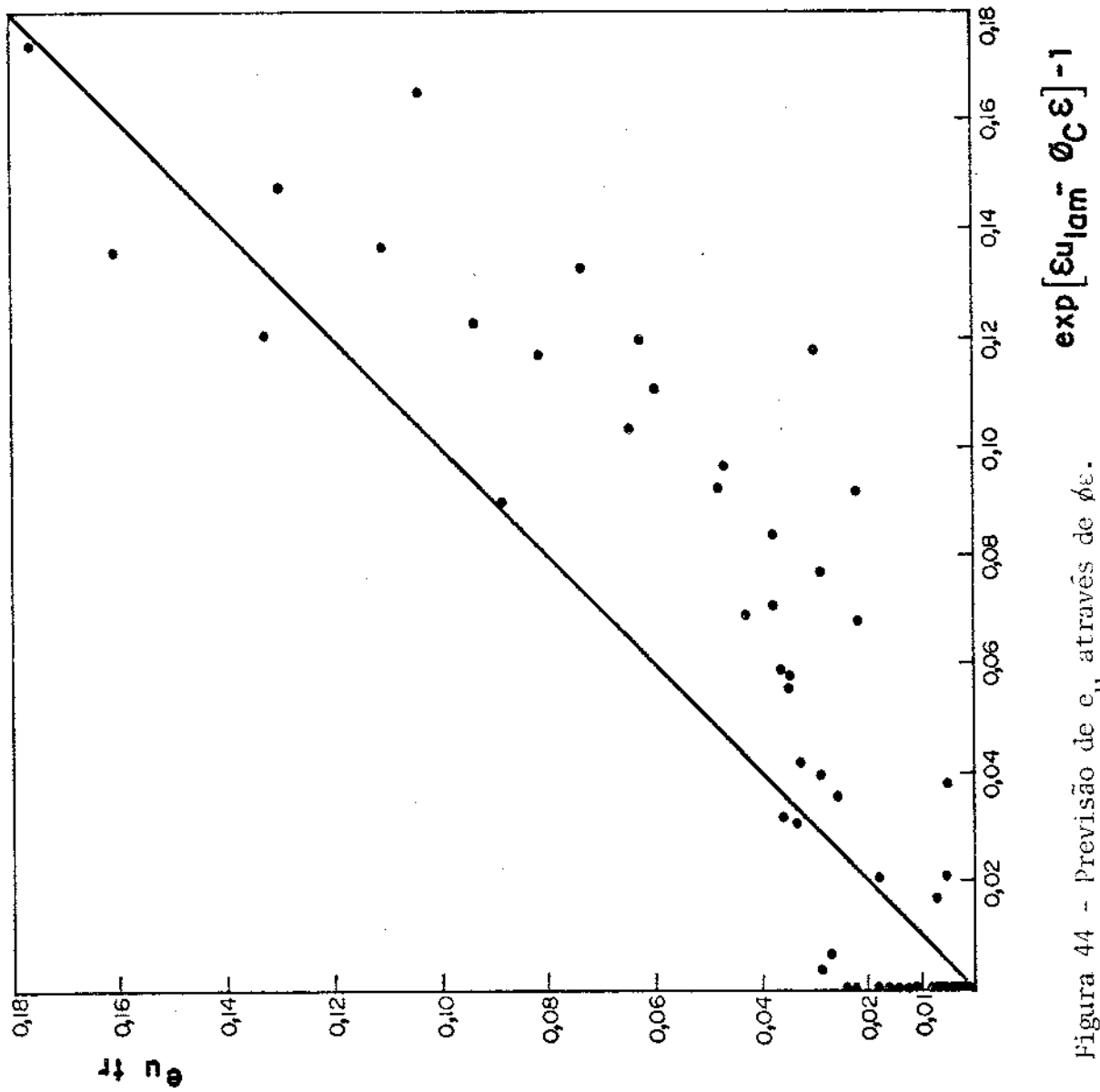


Figura 44 - Previsão de e_u através de ϕ_ϵ .

As equações de curvas mínimas dos gráficos de $k\beta_{TR}$ vs ($\phi\epsilon$ ou $\phi\epsilon$) e $\epsilon_{u_{TR}}$ vs ($\phi\epsilon$ ou $\phi\epsilon$) foram somadas de acordo com a eq.(38) e as curvas mínimas obtidas a partir destas equações tem boa concordância com os pontos locados nos gráficos das figs. 45 a 50.

6.4.4. Previsão de alongamento

Os valores de previsão de alongamento total obtidos no Quadro 16, como já foi dito, foram obtidos através da equação (35) usando-se valores de ϕ_H , ϕ_W , ϕ_J e ϕ_C . Os alongamentos totais previstos para os trefilados foram comparados com seus correspondentes obtidos e resultaram nos pontos dos gráficos das figuras 51 a 54.

Se o correlacionamento fosse perfeito, todos os pontos estariam sobre as retas traçadas a 45° e passando pela origem. O que se nota é uma dispersão que tende a se acentuar para altas reduções e que pode ser atribuída a termo $\exp(\epsilon_u - \phi\epsilon)$ da equação (35) que impõe limites superiores para o termo $\phi\epsilon$ (poderia ser no máximo igual a $\epsilon_{u_{lam}}$). Esta dispersão diminui quando se usa ϕ_C .

Foram traçadas curvas de ajustamento mínimo para os pontos com $RA < 6\%$ e cujas equações são apresentadas nos respectivos gráficos. Tendo em mãos um valor previsto, introduz-se na equação de curva mínima e obtêm-se um valor de alongamento com 90% de certeza que estará abaixo do valor real. Porém, como foi dito a dispersão neste caso é alta. Por esta razão vê-se que o modelo proposto não corresponde à realidade havendo então a alternativa do modelamento direto para previsão do alongamento.

Com relação ao modelamento direto usando-se os valores de coeficiente de trabalho redundante (figs. 45 a 50), nota-se que a dispersão destes dados é maior ou no máximo próxima da dispersão de pontos de um gráfico $\epsilon_{f_{tr}}$ vs ϵ obtido na prática (figs. 55 e 56), e

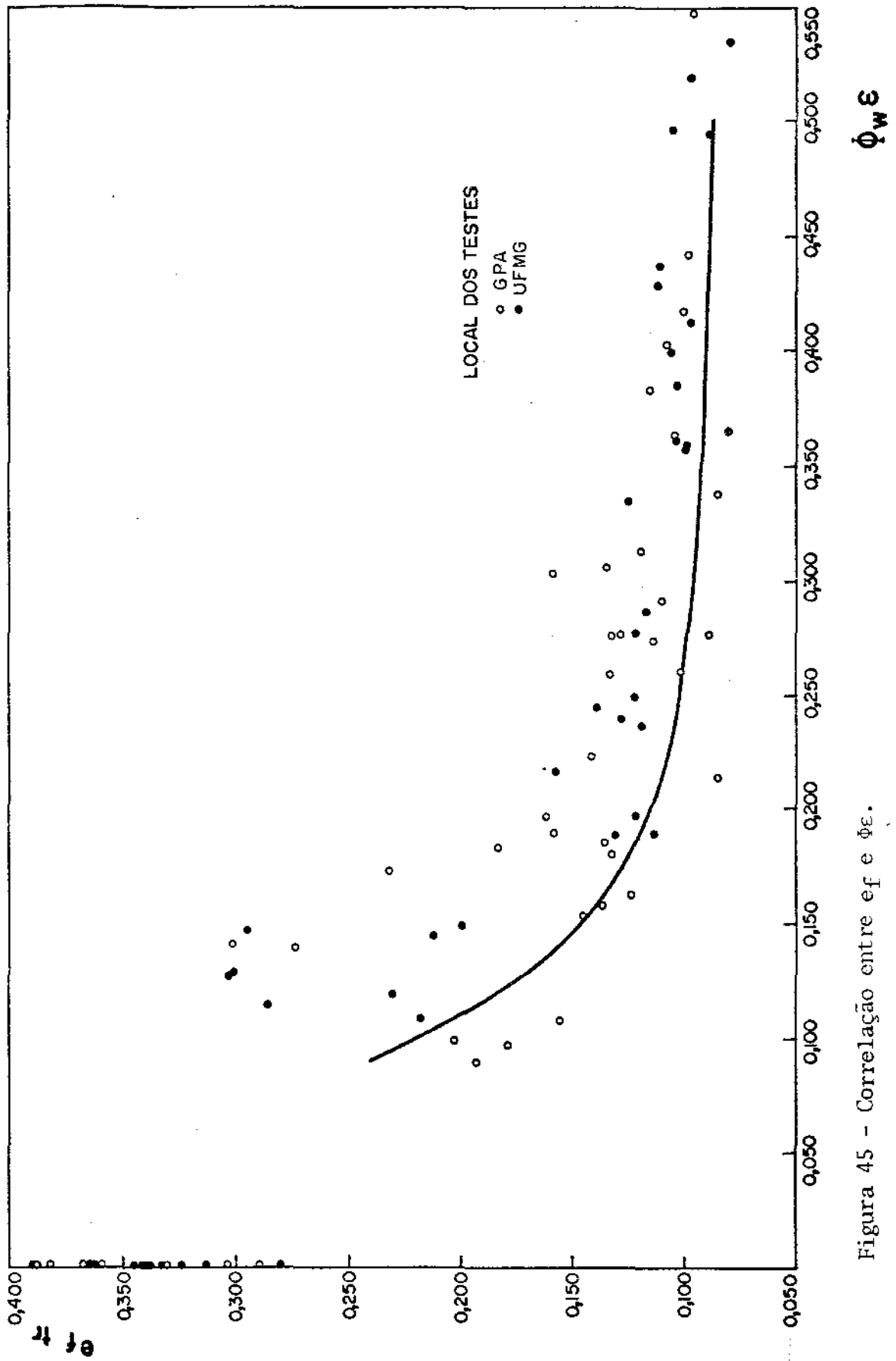


Figura 45 - Correlação entre ϵ_f e $\phi_w \epsilon$.

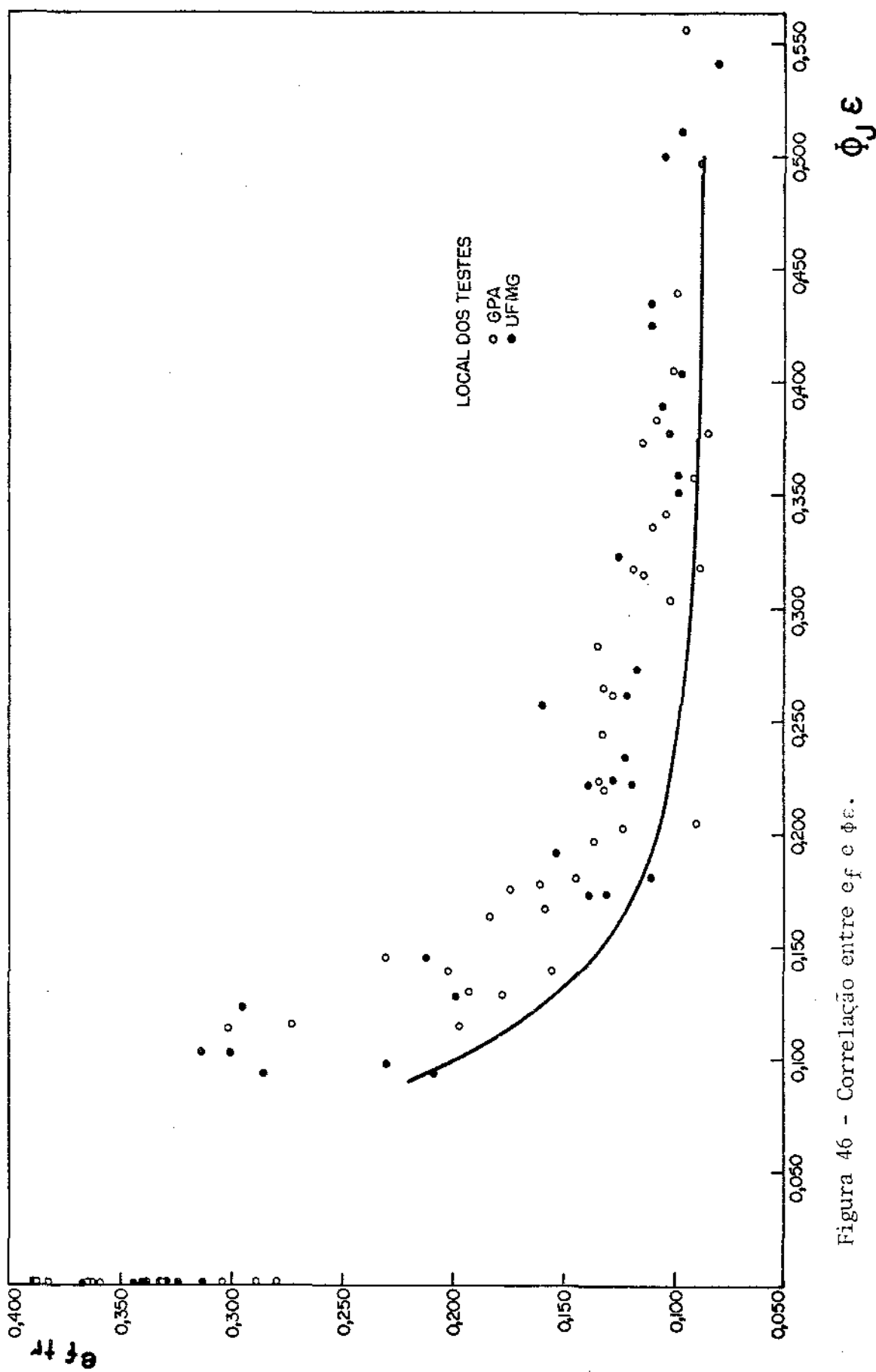


Figura 46 - Correlação entre ϵ_f e $\phi_J \epsilon$.

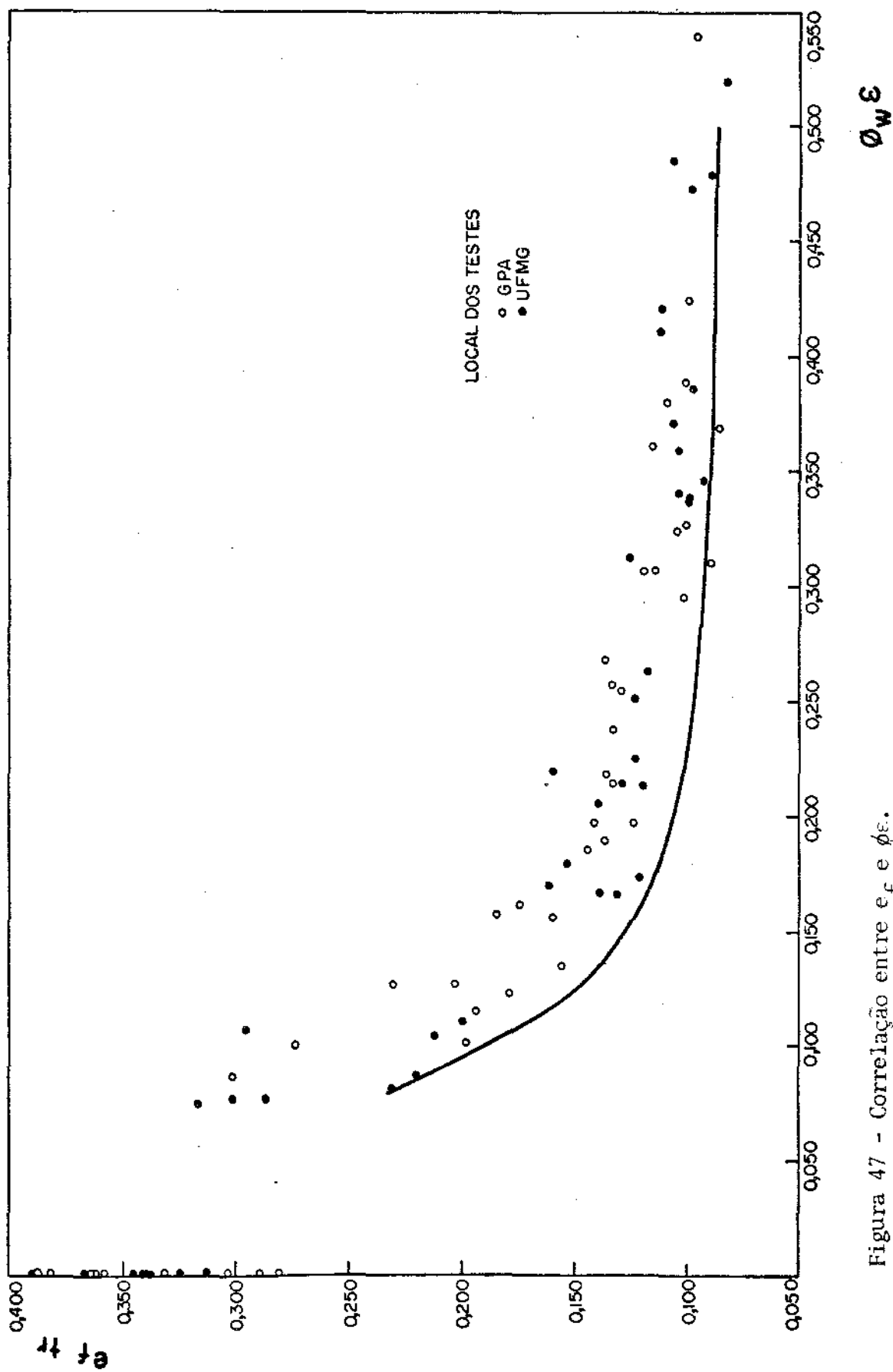


Figura 47 - Correlação entre ϵ_f e $\phi_w \epsilon$.

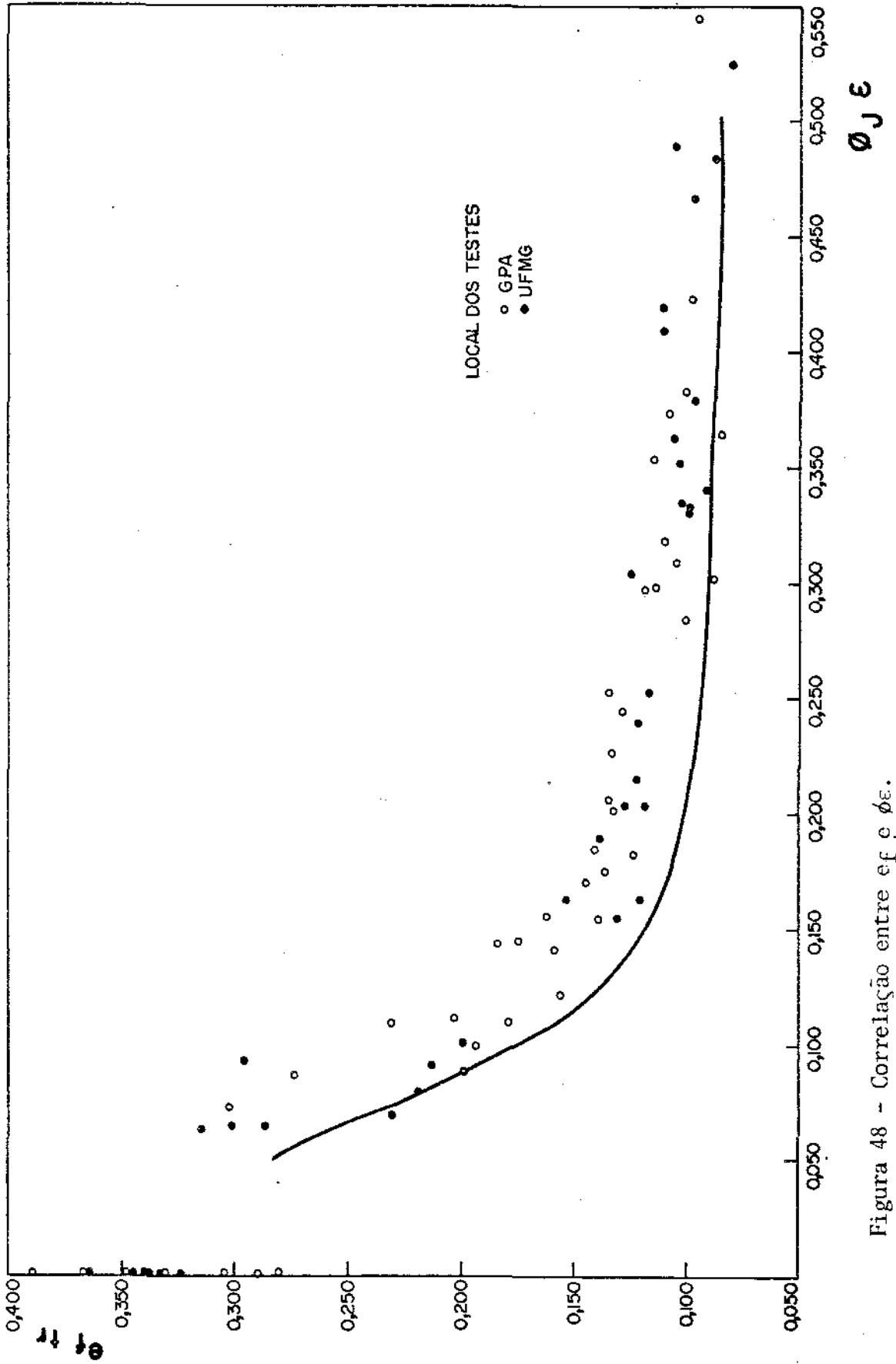


Figura 48 - Correlação entre $\phi J \epsilon$ e $\phi J \epsilon$.

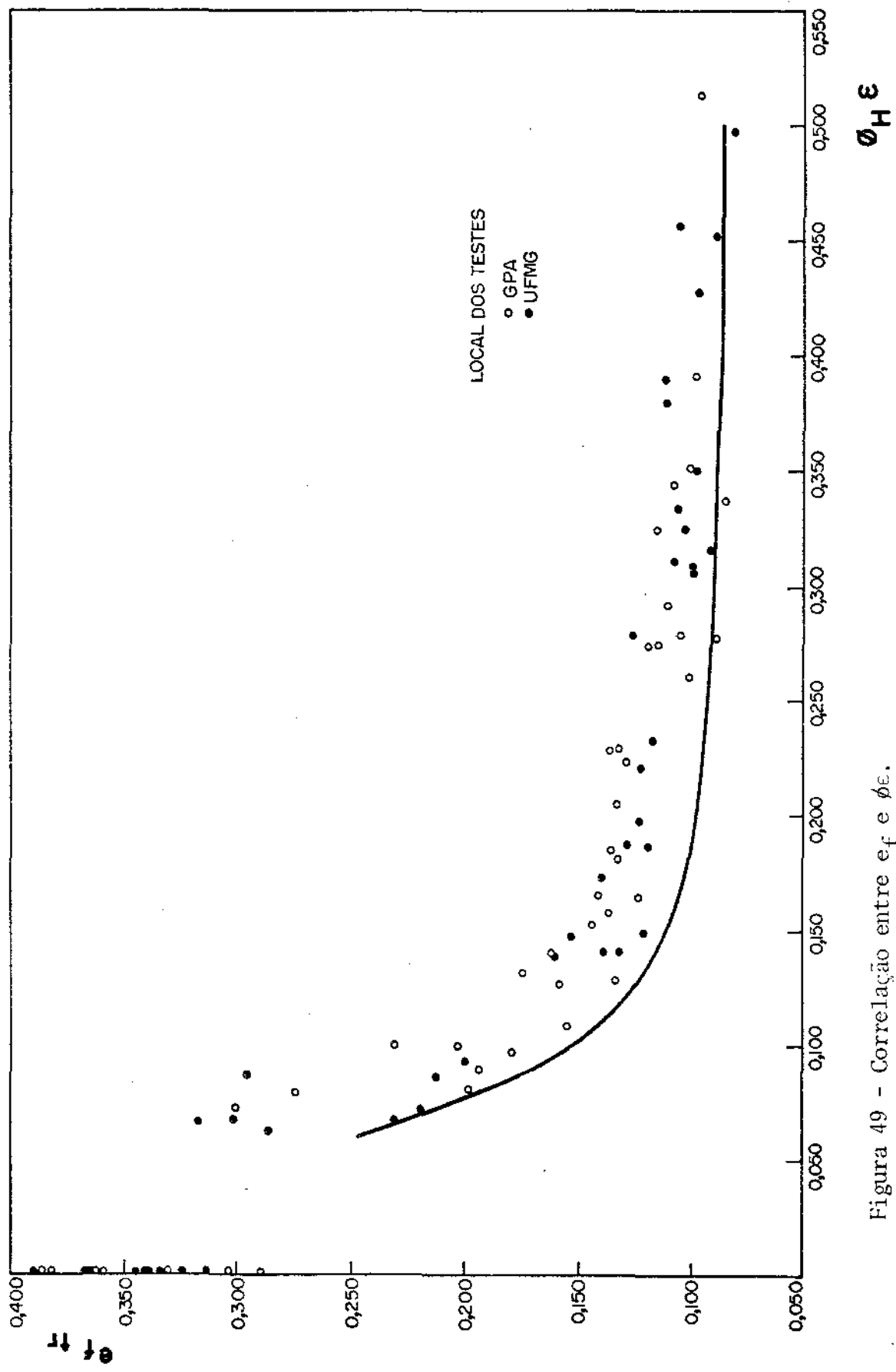


Figura 49 - Correlação entre e_f e $\phi_H \epsilon$.

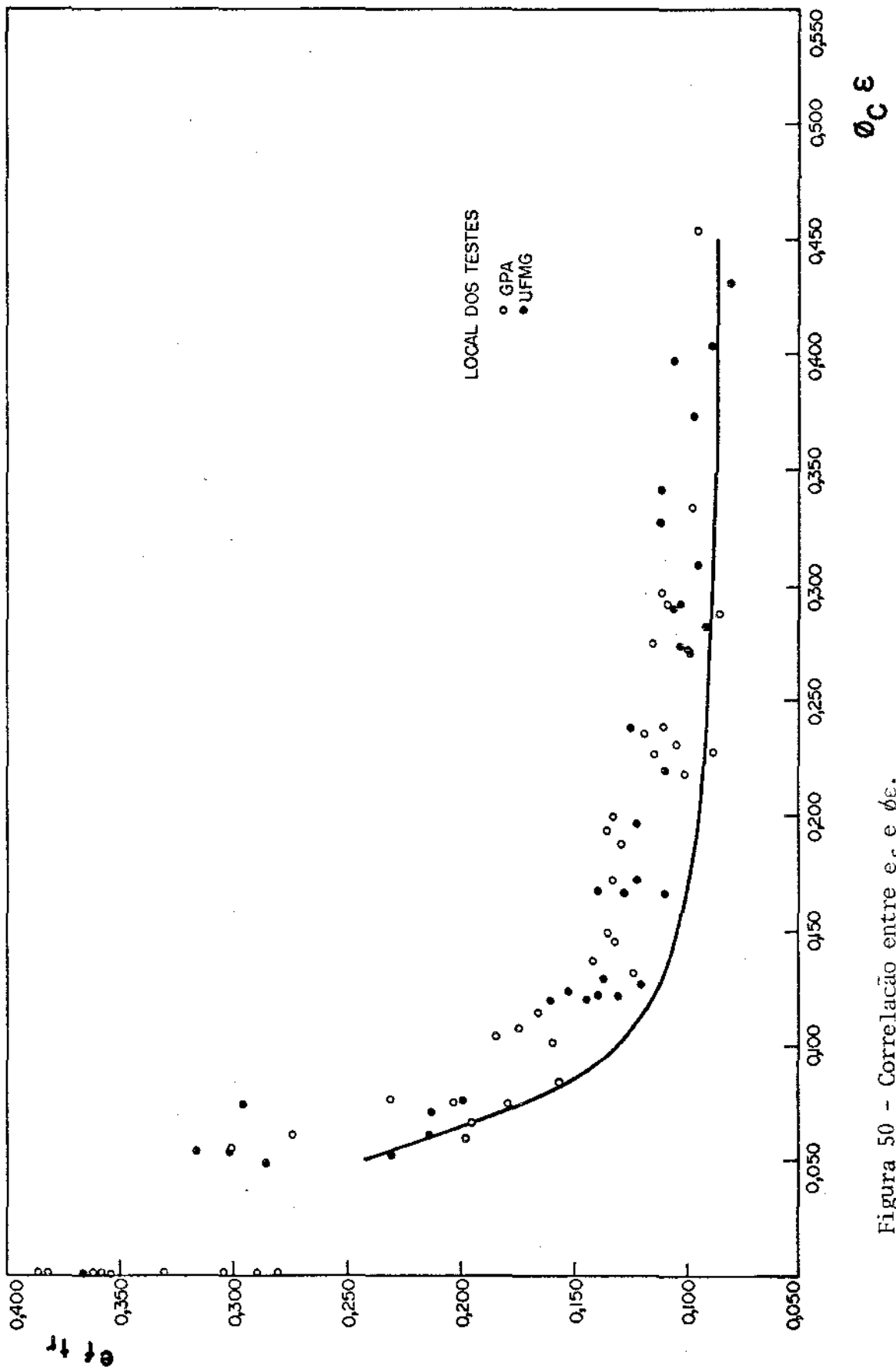


Figura 50 - Correlação entre e_f e $\phi_c \epsilon$.

cuja obtenção é menos trabalhosa que a dos precedentes. Esta mostrou-se a opção mais segura, principalmente considerando-se uma curva mínima como a mostrada na figura 56 que pode ir se ajustando do melhor aos pontos a medida que se obtiverem mais pontos ao longo de um processo industrial.

6.5. Dureza

Como foi dito anteriormente, devido a deformação redundante desenvolvida em uma barra trefilada, o perfil de dureza do material trefilado cresceria do centro para a periferia, sendo que o perfil de dureza da barra laminada usada como matéria prima deveria ter um valor constante para originar tal perfil.

Nos testes de dureza desenvolvidos na matéria prima laminada encontrou-se um perfil não constante, que poderia ser creditado tanto à alguma falta de homogeneidade de propriedades mecânicas iniciais, como a variações oriundas do processo de medição da dureza.

No material trefilado por vezes encontraram-se perfis não crescentes e sem nenhuma tendência, que não levaria realmente a conclusões sobre a verdadeira deformação desenvolvida.

Devido a estas razões e ao fato de que para se emitir alguma conclusão sobre os perfis e previsões de dureza, seria necessário ter em mãos um número grande de medições para cada amostra, apresentam-se somente os resultados do Quadro 17.

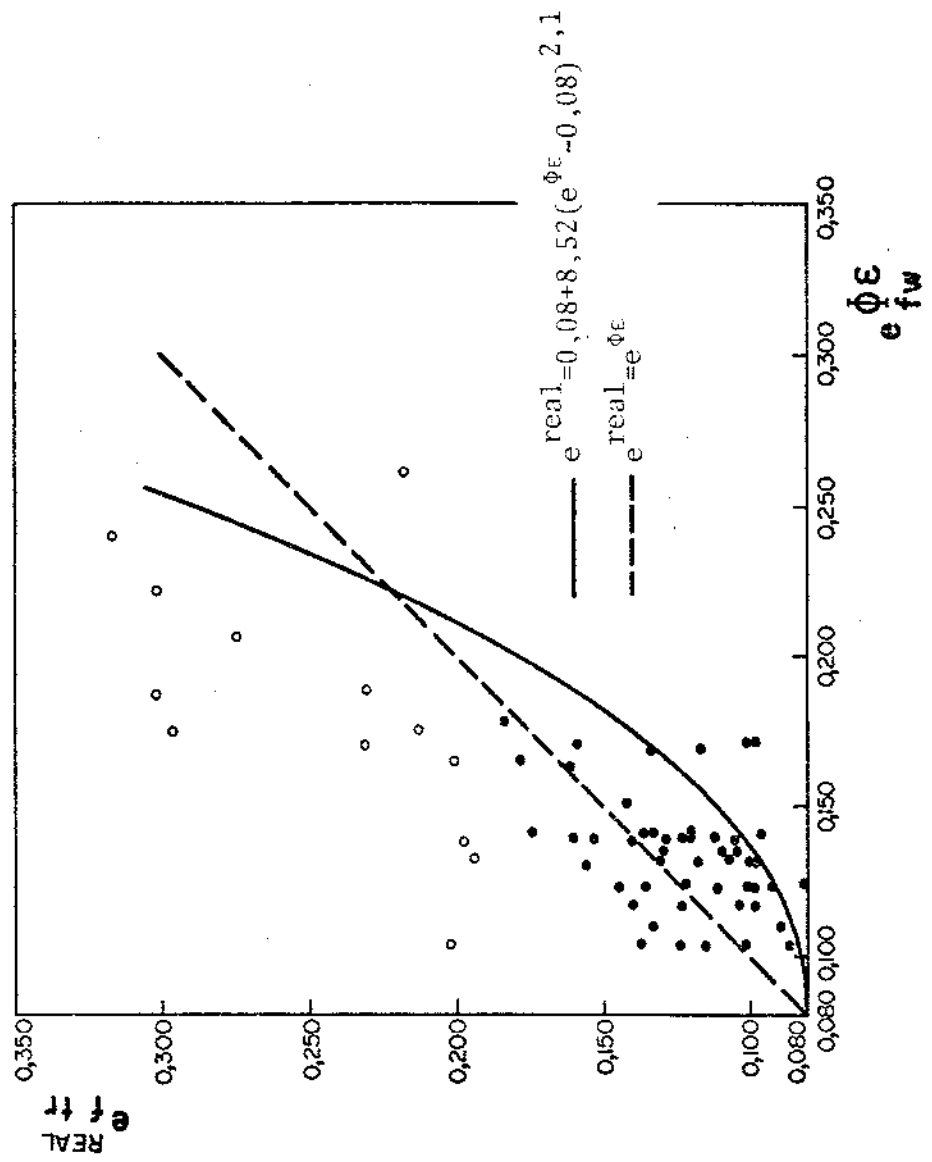


Figura 51 - Comparação entre e_f previsto e e_f real.

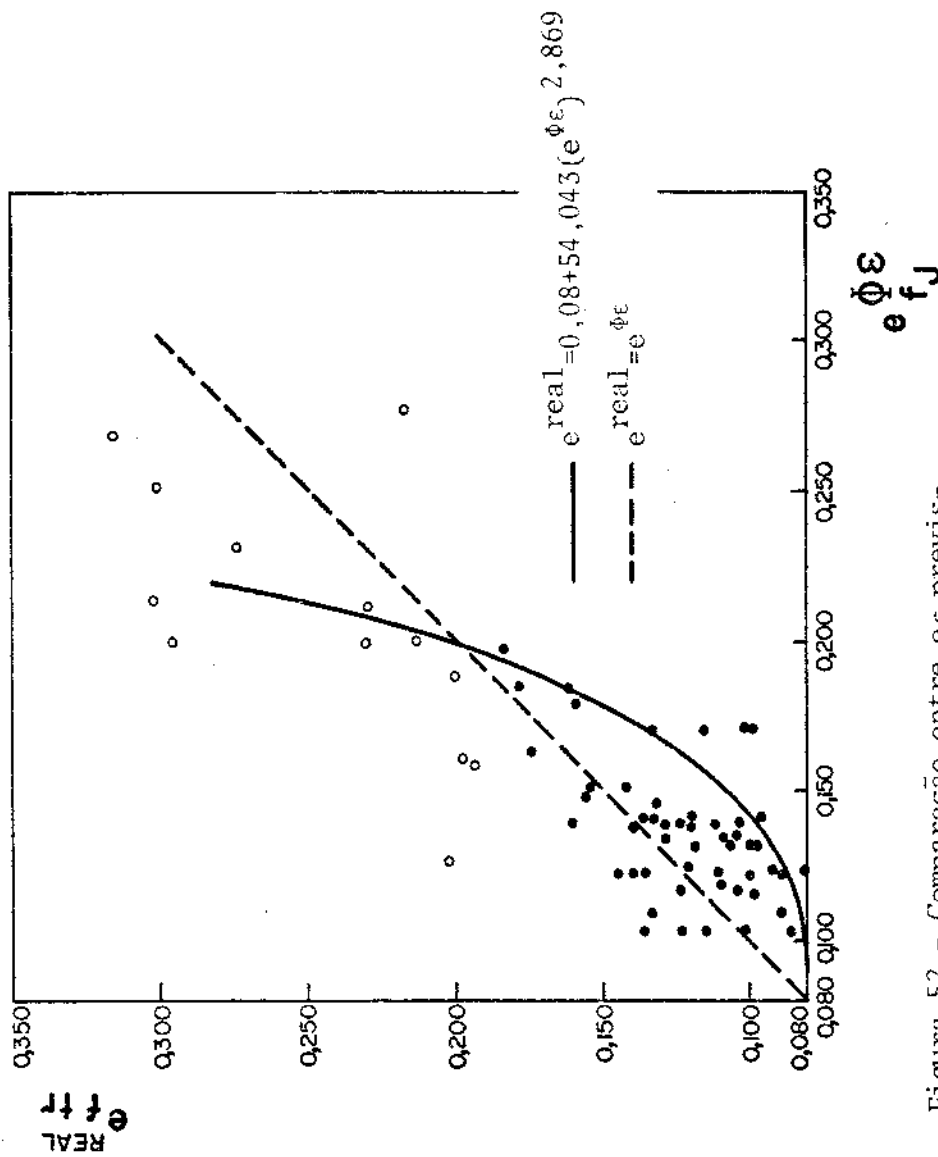


Figura 52 - Comparação entre de previs-
to e de real.

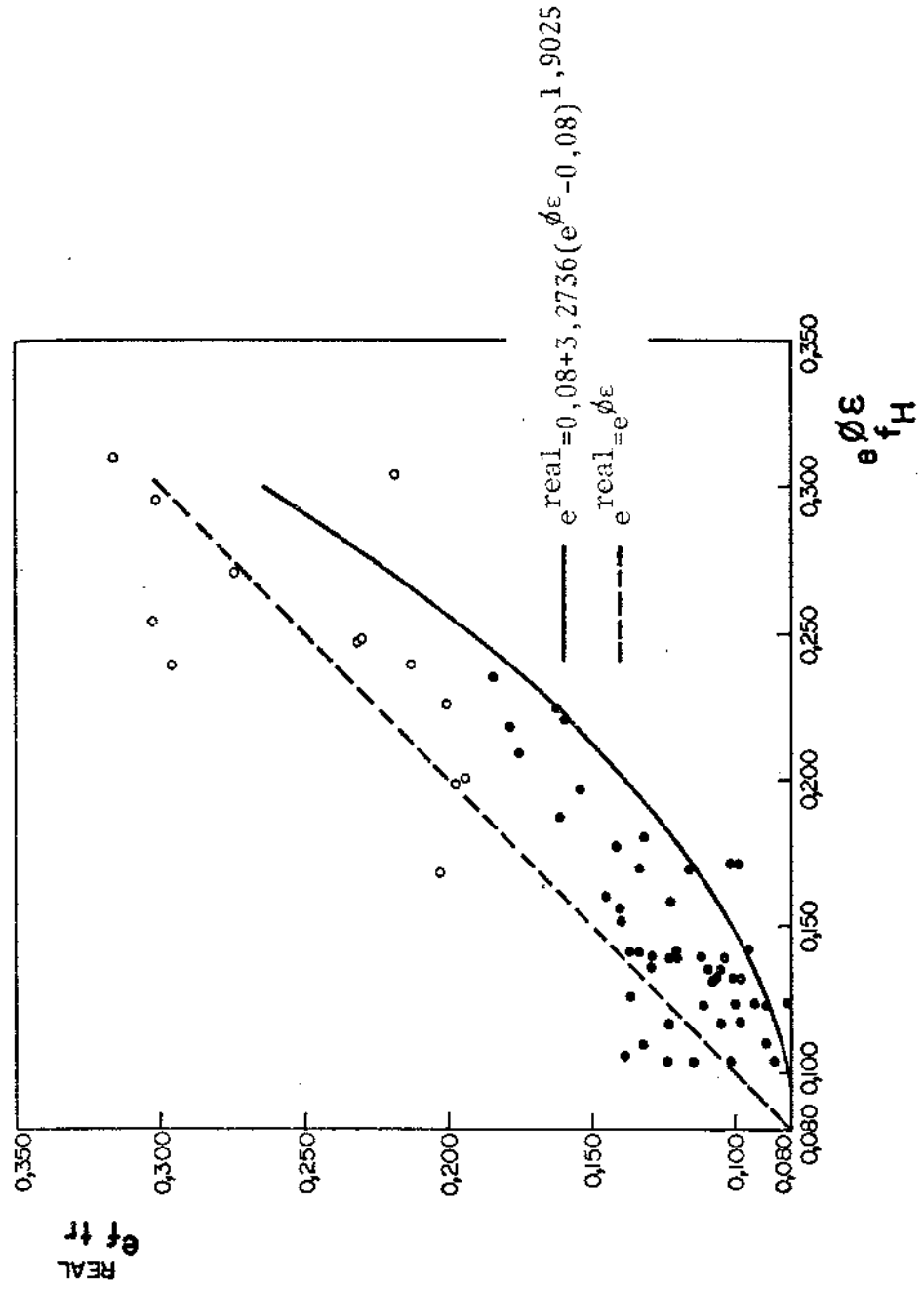


Figura 53 - Comparação entre e_f previsto e e_f real.

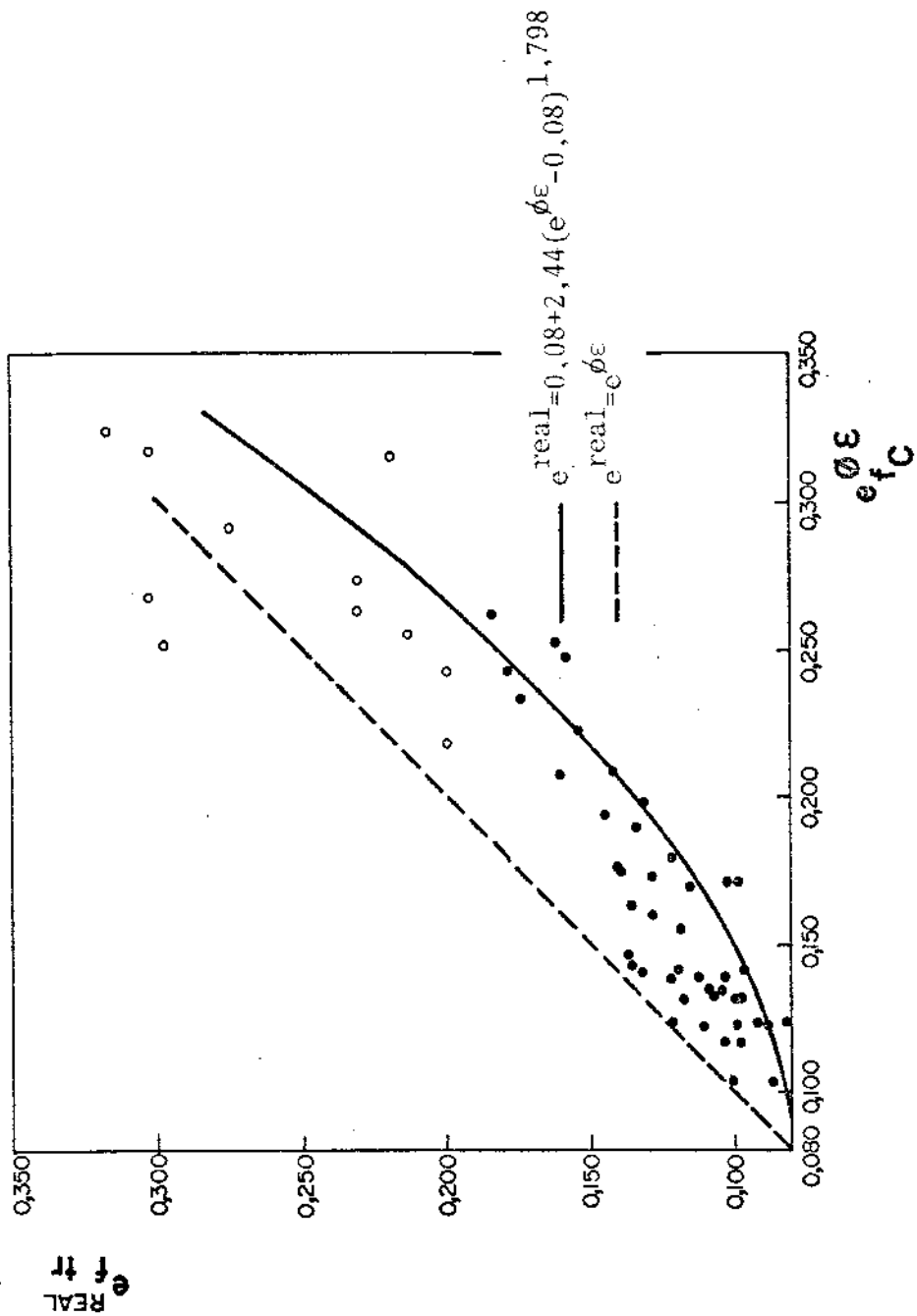


Figura 54 - Comparação entre e_f previsto e e_f real.

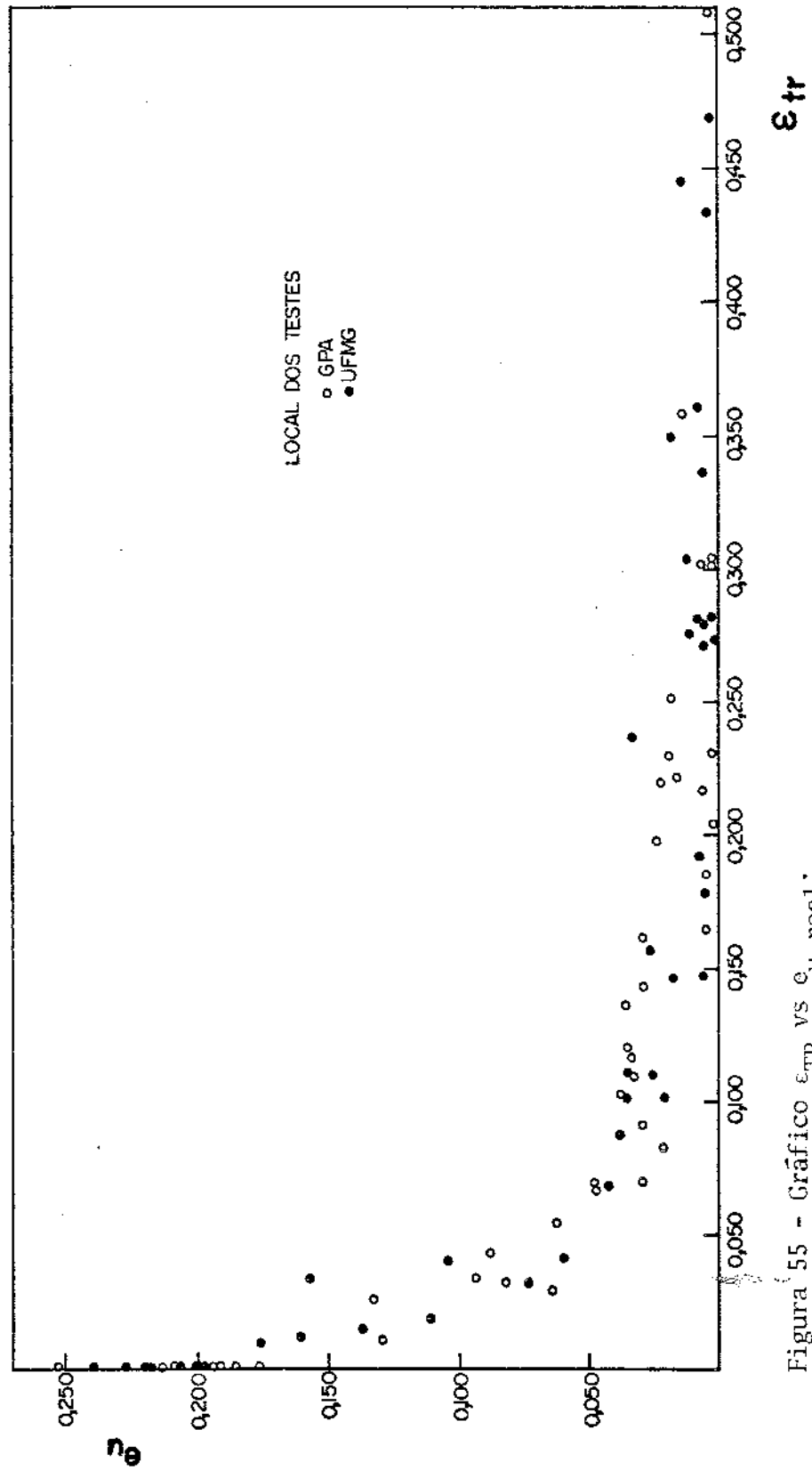
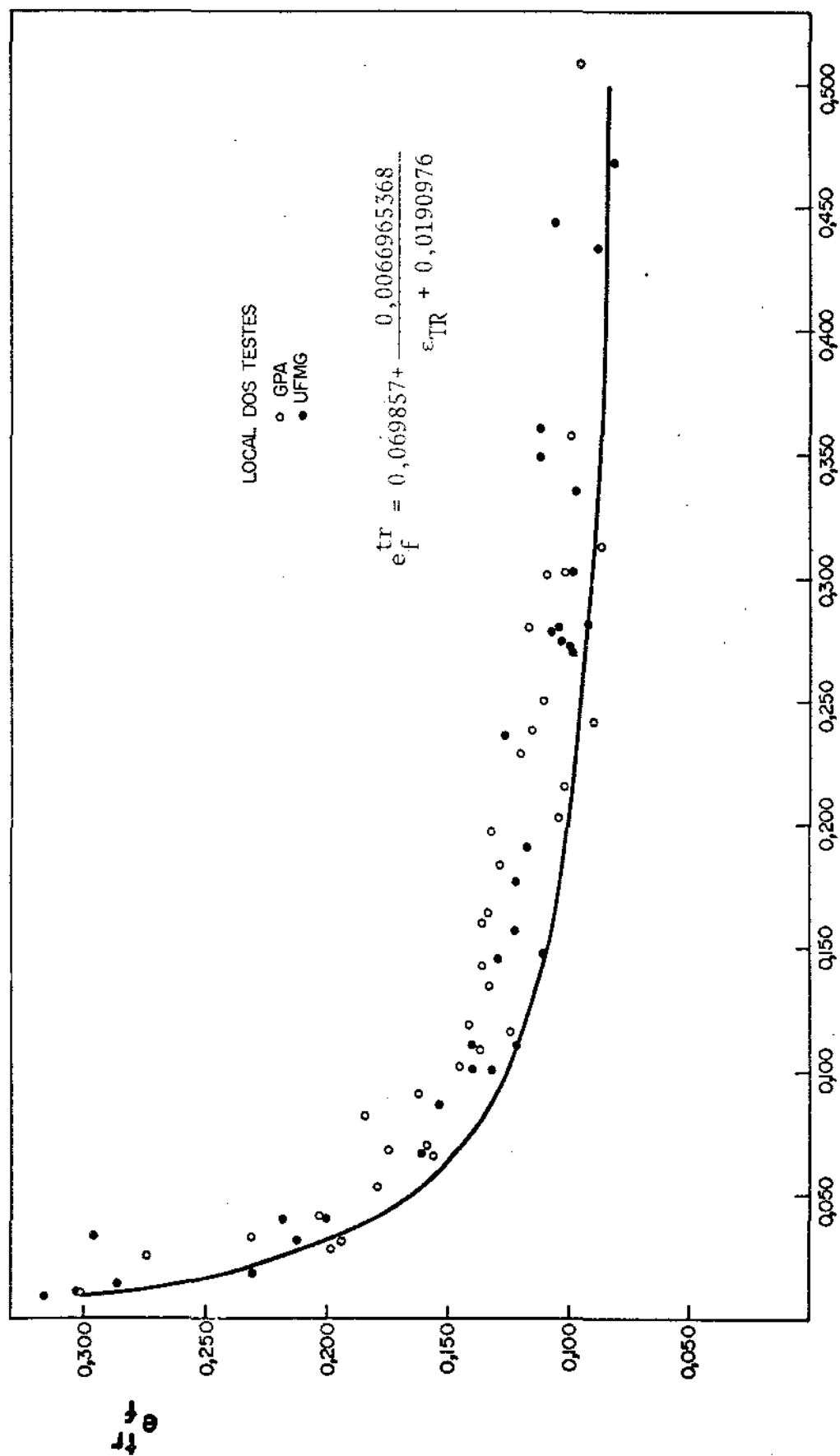


Figura 55 - Gráfico ϵ_{TR} vs ϵ_u real.



ϵ_{tr}

Figura 56 - Gráfico ϵ_{TR} vs ϵ_u real.

7. CONCLUSÕES

Através da análise das variações das propriedades mecânicas provocadas pela trefilação e da aplicação das teorias expostas, é possível prever o Limite de Escoamento convencional e o Limite de Resistência de um aço AISI 1212 após a trefilação em um passo. A teoria que apresentou melhores resultados quanto à dispersão e à segurança das previsões foi a de Caddell e Atkins. O Limite de Resistência, em razão da própria definição da propriedade apresentou resultados menos dispersos que o Limite de Escoamento Convencional.

O Alongamento mostrou ser uma medida em que as previsões são bem mais seguras quando se aplicam curvas mínimas obtidas de gráficos experimentais de ϵ vs. Alongamento Total. A aplicação dos coeficientes de trabalho redundante apresentou resultados que desabonam seu uso para a previsão do Alongamento Total de um material trefilado devido ao não completo conhecimento dos Alongamentos Parciais que o constituem, sendo este um campo aberto a estudos para seu completo entendimento.

Devido à dispersão inerente ao processo de medição de dureza, não se chegou a conclusões experimentais ou teóricas que pudessem gerar fórmulas ou gráficos para a sua previsão após o processo de trefilação. O que se pode sugerir é um tratamento de correlacionamento estatístico entre a dureza do material lamina do com seu Limite de Resistência e entre a dureza do material em seu estado final trefilado e seu Limite de Resistência neste mesmo estado. Como se tem o correlacionamento entre os Limites de Resistência antes e após a trefilação, de uma maneira indireta talvez se consiga fazer previsões sobre dureza, ou mesmo utilizando-se gráficos estatísticos de dureza vs. ϵ .

8.1. Apêndice A

De acordo com a literatura⁽⁸⁾, o alongamento de uma amostra até a fratura pode ser expresso por

$$e_f = \alpha + \beta \cdot \frac{\sqrt{S_0}}{L_0}$$

e, para $\sqrt{S_0}/L_0$ constante tem-se:

$$e_f = \alpha + k \cdot \beta$$

onde,

α = alongamento específico uniforme

$k \cdot \beta$ = alongamento específico não-uniforme

Acredita-se que $k\beta$ seja aproximadamente constante para um material, qualquer que seja seu grau de encruamento. Por outro lado, quando $\phi \cdot \epsilon = 0$, α corresponderá a ϵ_u . Quando $\phi \cdot \epsilon > 0$, α corresponderá a $\epsilon_u - \phi \cdot \epsilon$, até que $\phi \cdot \epsilon = \epsilon_u$. Daí em diante ($\phi \cdot \epsilon > \epsilon_u$) o termo α seria aproximadamente igual a zero.

Tem-se que

$$\epsilon_u = \ln\left(\frac{l_u}{l_0}\right) \therefore l_u = l_0 \cdot \exp(\epsilon_u)$$

Quando $\phi \cdot \varepsilon = 0$ então,

$$e_u = \alpha_o = \frac{l_u - l_o}{l_o} = \frac{l_u}{l_o} - 1$$

$$\therefore e_u = \alpha_o = \frac{l_o \cdot \exp(\varepsilon_u)}{l_o} - 1 = \exp(\varepsilon_u) - 1$$

Então, o alongamento do material recozido será

$$e_f^o = \alpha_o + k \cdot \beta = \exp(\varepsilon_u) - 1 + k \cdot \beta$$

Quando $\phi \cdot \varepsilon \neq 0$

$$\varepsilon_u - \phi \cdot \varepsilon = \ln \frac{l_u}{l_o}$$

$$\therefore l_u = l_o \cdot \exp(\varepsilon_u - \phi \cdot \varepsilon)$$

$$\therefore e_u^{\phi \varepsilon} = \alpha^{\phi \varepsilon} = \frac{l_u}{l_o} - 1 = \exp(\varepsilon_u - \phi \cdot \varepsilon) - 1$$

logo,

$$e_f^{\phi \varepsilon} = \exp(\varepsilon_u - \phi \cdot \varepsilon) - 1 + k \cdot \beta$$

Quando $\phi \cdot \varepsilon = \varepsilon_u$ então $e_f^{\varepsilon_u} = k \cdot \beta$

Acredita-se que para $\phi \cdot \varepsilon > \varepsilon_u$, $e_f^{\phi \varepsilon} = \text{cte.} = k \cdot \beta$, possivelmente decrescente⁽¹⁰⁾.

8.2. Apêndice BB1 - Programa para equação de Hollomon

Supondo que a curva tensão verdadeira vs. deformação logarítmica de um teste de tração siga a equação de Hollomon ($\sigma = \sigma_0 \cdot \epsilon^m$) é dado um programa para cálculo de σ_0 e m a partir dos pares Força vs. Alongamento. Esses pares foram obtidos de dois modos e se tem 2 modos de obter os parâmetros calculados:

1ª Parte

Quando ΔL é obtido por extensômetro acoplado ao corpo de prova e ligado a uma ponte eletrônica com leitura digital obtém-se diretamente F e ΔL .

ComentáriosPreparação e Programa

L_0 (introdução)	$L_0 \rightarrow$ STO 12
A_0 (introdução)	$A_0 \rightarrow$ STO 13
	LRN
F (introdução)	2nd Lb1 C R/S
ΔL (introdução)	2nd Lb1 A STO 10 R/S
Z (gera, armazena)	2nd Lb1 B STO 11
x_i (gera, armazena)	\div RCL 12 + 1 = STO 14
y_i (gera, armazena)	Ln x Lnx STO 15
	RCL 10 x RCL 14 \div RCL 13 = Lnx STO 16
	2nd Pgm 1
	RCL 15 \times RCL 16 2nd Σ^+
	GTO C R/S
	LRN

a) Para operar a 1a. vez (para um teste de tração)

F → A

ΔL → B

acabando os pares de valores apertam-se as teclas:

2nd Op 12 - para obter $\ln \sigma_0$

x ÷ y - para obter m

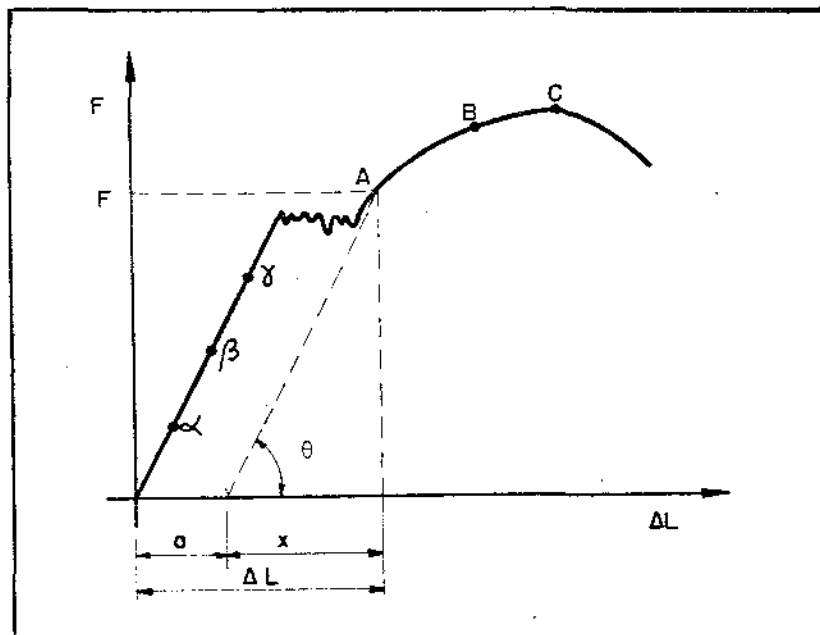
b) Para recomeçar a 2a. vez (outra curva) apertar:

2nd Op 1 SBR CLR

e introduzem-se L_0 e A_0 novamente em STO 12 e STO 13. Após isto, introduzem-se F e ΔL em A e B. A

2ª Parte

Quando se tem somente o traçado da curva dada pela máquina (Figura ⁵⁷ ~~10~~) deve-se eliminar a deformação elástica e a deformação da máquina.



⁵⁷ Figura ~~10~~ - Eliminação da componente elástica e deformação da máquina.

Suponha-se que se queira saber a componente plástica do ponto A. Como se tem os pontos α , β , γ tem-se em mãos θ através de um gráfico ou através da regressão linear.

Então, pelo gráfico (semelhança de triângulos):

$$\frac{Aa'}{x} = \theta \therefore x = \frac{Aa'}{\theta} = \frac{F}{\theta}$$

Como necessita-se de a:

$$a = \Delta L - x = \Delta L - F/E$$

De posse de θ (regressão ou gráfico) entra-se no programa que dá valores de deformação plástica procurada (x):

<u>Intruções</u>	<u>Programa</u>
- Colocar a inclinação (θ) em STO 10	LRN 2nd Lb1 a STO 11 R/S
- Entrar com F em A	2nd Lb1 B
- Entrar com ΔL em B e x aparecerá no visor	-RCL 11 \div RCL 10 = R/S LRN

De posse dos novos pares de F e x ($\Delta L'$) entra-se com os mesmos no programa da 1a. parte e obtém-se σ_0 e m.

B.II. Programa Fatores de Trabalho Redundante

B.II.1. Programa ϕ_H

<u>Operação</u>	<u>Programa</u>
$D_a \rightarrow A$	LRN
$D_b \rightarrow B$	2nd Lb1 A STO 00 R/S
$\alpha^0 \rightarrow C$	2nd Lb1 B STO 01 R/S
e se obtém	2nd Lb1 C STO 02
o fator	(((RCL 00+RCL 01)÷(RCL 00-RCL 01) x RCL 02x2nd π ÷ 180 - 1)x 0.12 + 1 = R/S LRN

B.II.2. Programa Φ_W

Instrução: Se operado isolado, introduzir * acima (Labels) e de
pois o programa abaixo. Se junto com o anterior, introduzir o
programa que se segue após o último R/S do programa anterior.

<u>Operação</u>	<u>Programa</u>
a) Isolado: ver "instrução" e operar como o anterior	LRN RCL 01 x ² x RCL 02 2nd Sin ÷
b) Após calcular ϕ_H : apertar R/S	(RCL 00 x ² - RCL 01 x ²) + 0.87 = R/S LRN.

B.II.3. Programa ϕ_J

Instrução: mesma anterior.

<u>Operação</u>	<u>Programa</u>
a) Isolado: vide anterior	LRN
b) Após ϕ_H e ϕ_W : apertar R/S novamente	(RCL 00 + RCL 01)÷(RCL 00 - RCL 01) x(1-RCL 02 2nd Cos)÷ RCL 02 2nd sin x 0.39+0.88 = R/S LRN.

B.II.4) Programa ϕ_C

Programa independente dos anteriores

<u>Operação</u>	<u>Programa</u>
	$\sigma_0 \rightarrow$ STO 01
	m \rightarrow STO 02
	LRN
Apertando A obtém C1	2nd Lb1 A
Apertando R/S obtém C2	1.79xRCL 1 y^x .11x RCL 2 y^x .28 = STO 6 R/S .32432xRCL 1 y^x .054x RCL2 y^x .76 = STO 7 R/S
Introduzir	
D _a em B	2nd Lb1 B STO 4 R/S
D _b em C	2nd Lb1 C STO 5 R/S
α em D	2nd Lb1 D STO 3
obtém ϕ_C no visor	RCL 7 X RCL 3 2nd sin x(RCL4+RCL5) +(RCL4-RCL5)+ RCL6 = R/S LRN

B.III - Programa Previsão do Limite de Escoamento

<u>Operação</u>	<u>Programa</u>	<u>Observações</u>
Colocar σ_0 e m nas memórias	$\sigma_0 \rightarrow$ STO 00 m \rightarrow STO 01	Para cada grupo
Colocar D_f em A Colocando D_0 em B se obtém ϵ	LRN 2nd Lb1 A STO2 R/S 2nd Lb1 B \div RCL 2 = 1nx X 2=STO3 R/S	Para cada amostra
Colocando cada ϕ em C obtém LE	2nd Lb1 C x RCL 3 = y^x RCL 1 x RCL00 = R/S LRN	Para cada grupo valor de ϕ

B.IV - Programa Previsão do Limite de Resistência

<u>Operação</u>	<u>Programa</u>	<u>Observações</u>
Colocar σ_0 , m e LR_0 nas memórias 00, 01 e 02	$\sigma_0 \rightarrow$ STO 00 m \rightarrow STO 01 $LR_0 \rightarrow$ STO 02	Para cada grupo de amostras
Colocar ϵ em A. (ϵ foi obtido na previsão de LE)	LRN 2nd Lb1 A STO 3 R/S	Para cada amostra
$\phi \rightarrow$ B obtém $\phi \cdot \epsilon$ Compare $\phi \epsilon$ com m	2nd Lb1 B x RCL 3 = STO 4 R/S	
Se $\phi \epsilon \leq m$ aperte C e obtém LR	2nd Lb1 C RCL 4 INV Lnx X RCL 2 = R/S	Para cada valor de ϕ
Se $\phi \epsilon > m$ aperte D e obtém LR	2nd Lb1 D RCL 4 y^x RCL 1 = x RCL 00 = R/S LRN	

B.V - Programa Previsão do LR com ϕ Transformado

<u>Operação</u>	<u>Programa</u>	<u>Observação</u>
Colocar σ_0 , m e LR ₀ nas memórias 00, 01 e 02	$\sigma_0 \rightarrow$ STO 00 m \rightarrow STO 01 LR ₀ \rightarrow STO 02	Para cada grupo de amostras
Colocar ϵ em A	LRN 2nd Lb1 A STO 03 R/S	para cada amostra
Colocar ϕ em B obtem $\frac{1}{\epsilon \cdot \phi^{m+1}} = \epsilon \phi$	2nd Lb1 B $y^X((RCL01+1)\frac{1}{X}) \times RCL3$ = STO 4 R/S	
Se $\phi \epsilon \leq m$ apertar C para obter LR	2nd Lb1 C RCL4INV 1n X RCL2=R/S	para cada valor de ϕ
Se $\phi \epsilon > m$ apertar D para obter LR	2nd Lb1 D RCL 4 y^X RCL 1 x RCL 00 = R/S LRN	

B.VI - Programa para Cálculo de $k\beta$

$$\text{Equação: } k\beta = e_f - (D_o/D_u)^2 + 1$$

<u>Operação</u>	<u>Programa</u>
Introduzir	LRN
D_o em A	2nd Lbl A ÷ R/S
D_u em B	2nd Lbl B
e_f em C	= x^2 +/- + 1 + R/S
se obtém $k\beta$	2nd Lbl C = R/S

B.VII - Programa para Previsão de Alongamento

$$\text{Equação: } e_{fTR} = \exp(\epsilon_{Ulam} - \phi\epsilon) - 1 + k\beta_{lam}$$

<u>Operação</u>	<u>Programa</u>	<u>Observações</u>
Introduzir k β em A ϵ_U em B	LRN 2nd Lb1 A STO 10 R/S 2nd Lb1 B STO 11 R/S	Para cada grupo de Amostras
ϵ em C	2nd Lb1 C STO 12 R/S	Para cada amostra
Cada ϕ em D: se o valor for maior que zero continue. Para continuar apertar R/S	2nd Lb1 D x RCL 12 = +/- + RCL 11 = R/S INV ln x - 1 + RCL 10 = R/S LRN	Para cada valor de ϕ

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

01. ROWE, G.W.. Principles of Industrial Metalworking Processes. Londres, Edward Arnold Ltd., 1977. 407p.
02. AVTZUR, B.. Metal forming - processes and analysis. New York, McGraw-Hill, 1968. 500p.
03. BACKOFEN, W.A.. Deformation Processing. Reading Mass., Adsson-Wesley, 1972. 326p.
04. JOHNSON, R.W. & ROWE, G.W.. Redundant work in drawing cylindrical stock. Journal of the Institute of Metals, 96 : 97-105, 1968.
05. CADDELL, R. M. & ATKINS, A. G.. The influence of redundant work when drawing through conical dies. Journal of Engineering for industry, 90 : 411-19, May, 1968.
06. WISTREICH, J.G.. Investigation of the mechanics of wire drawing. Proc. Inst. Mech. Eng., 169 : 654-65, 1955.
07. CETLIN, P. R. et alii. Previsão do limite de resistência de barras trefiladas, através de barras laminadas a quente, sob condições industriais. In: X Simposio Interno Semestral, Acesita, novembro, 1975.
08. DIETER, Jr., G.E.. Mechanical Metallurgy. Tokio, McGraw-Hill, 1976, 774p.
09. ABNT - Brasil. Norma MB-4. Determinação das propriedades mecânicas à tração de materiais metálicos, 1977, 14p.

10. CETLIN, P.R.. Comunicação pessoal, maio 1979.
11. ATKINS, A.G. & CADDELL.. The incorporation of work hardening and redundant work in rod drawing analyses. I.J. Mech.S., 10 : 15-28, 1968.