

5

CAPÍTULO

RESULTADOS E ANÁLISES

5.1 TENSÕES E MÓDULOS DE YOUNG

Nas tabelas 5.1 a 5.3 são apresentados os valores de tensão de escoamento, tensão máxima e módulo de Young encontrados para cada direção e é feito, também, a média ponderada destes valores. Para cada valor médio encontrado foi calculado o desvio padrão. O erro de amostragem é calculado considerando t de Student, um número de amostras três e a probabilidade de 95% de confiança, conforme Schneider (2003).

Tabela 5.1 – Tensão de Escoamento medida com 0,2% de deformação. Material: bobina A.

	MPa
$\sigma_{e0,2_0^\circ}$	250±6
$\sigma_{e0,2_45^\circ}$	244±5
$\sigma_{e0,2_90^\circ}$	259±6
$\sigma_{e0,2}$	250±6
Erro da amostragem	15

Tabela 5.2 – Tensão Máxima. Material: bobina A.

	MPa
$\sigma_m_{0^\circ}$	284±15,1
$\sigma_m_{45^\circ}$	262±13,9
$\sigma_m_{90^\circ}$	298±15,9
σ_m	281±15,0
Erro da amostragem	37

Tabela 5.3 – Módulo de Young. Material: bobina A.

	GPa
E_{0°	70,39±1,7
E_{45°	72,25±1,8
E_{90°	75,49±1,3
E_m	72,71±1,2
Erro da amostragem	3,3

Analisando os resultados da tensão de escoamento, tensão máxima e módulo de Young (ou módulo de elasticidade) em relação às propriedades da liga citada em anexo, pode-se ver que os valores encontrados são coerentes e não se afastam muito, já que estes são sempre da-dos médios.

Através da equação 1, é possível construir a curva tensão vs. deformação verdadeira para as direções a 0, 45 e 90° da direção de laminação, faz-se uma média entre as propriedades e plota-se a curva final teórica, conforme a figura 5.1.

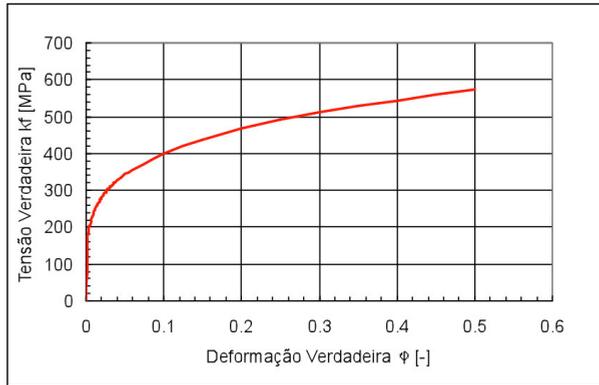


Figura 5.1 – Tensão vs. Deformação Verdadeira. Material: bobina A.

5.2 GRAU DE ENCRUAMENTO E COEFICIENTE DE RESISTÊNCIA

A curva da figura 5.1 é estimada matematicamente como:

$$k_f = C \cdot \varphi^n \tag{5}$$

onde n [-] é o grau de encruamento e C [MPa] é o coeficiente de resistência.

Através da norma SEW 1125 (1984), vê-se que uma maneira prática de obter o grau de encruamento é transpor a curva k_f vs. φ para escala logarítmica onde na maioria dos casos surge uma reta cuja inclinação é o n , ver figura 5.2. Tem-se o valor de C como sendo o valor de k_f ao prolongar esta reta até o valor da deformação verdadeira φ igual a 1.

Nas tabelas 5.4 e 5.5 são apresentadas estas constantes calculadas para cada uma das direções e o valor médio que é utilizado na equação 5.

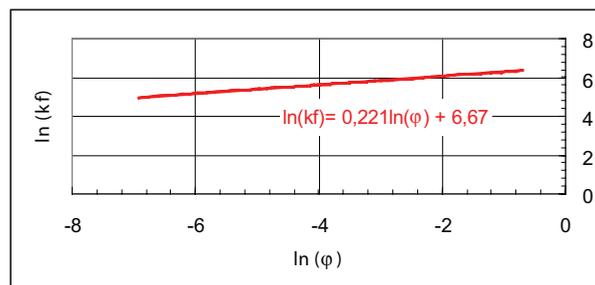


Figura 5.2 – Curva Tensão vs. Deformação Verdadeira (figura 5.1) em escala logarítmica. Material: bobina A.

Tabela 5.4 – Grau de encruamento. Material: bobina A.

n_{0°	0,210±0,005
n_{45°	0,224±0,006
n_{90°	0,227±0,006
n	0,221±0,006
Erro da amostragem	0,019

Tabela 5.5 – Coeficiente de Resistência. Material: bobina A.

	MPa
C_{0°	661±6,9
C_{45°	664±6,9
C_{90°	679±7,1
C	667±7,0
Erro da amostragem	18

Após terem sido coletados os dados da bobina A, fizeram-se novos ensaios com amostras coletadas das bobinas B e C. Destas bobinas extraiu-se tiras do início, do meio e do final. E com essas tiras, ou corpos de prova, fez-se ensaios para determinar o grau de encruamento no lado direito, no meio e no lado esquerdo da chapa, três ensaios válidos por região, ver tabela 5.6 e 5.7.

Tabela 5.6 – Grau de encruamento. Material: bobina B.

Região da Bobina	Esquerda	Meio	Direita
Início	0,101 ± 0,003	0,190 ± 0,005	0,137 ± 0,004
Meio	0,095 ± 0,005	0,098 ± 0,002	0,101 ± 0,003
Fim	0,097 ± 0,003	0,086 ± 0,014	0,079 ± 0,001

Tabela 5.7 – Grau de encruamento. Material: bobina C.

Região da Bobina	Esquerda	Meio	Direita
Início	0,171 ± 0,005	0,172 ± 0,001	0,136 ± 0,010
Meio	0,102 ± 0,003	0,097 ± 0,005	0,092 ± 0,003
Fim	0,077 ± 0,004	0,083 ± 0,002	0,070 ± 0,003

Através dos resultados das tabelas 5.6 e 5.7 vê-se que há um gradiente de encruamento ao longo da bobina, uma vez que se nota um decréscimo na direção do final da mesma.

Isto denota uma pior formação das latas no final da bobina (centro quando esta se encontra enrolada) o que pode acarretar em um número maior de amostras defeituosas.

5.3 ÍNDICE DE ANISOTROPIA

Utilizando os sensores INSTRON 2630-100 e INSTRON 2640-010, próprios para medir deformação na direção do comprimento e da largura, mediram-se as deformações nas três direções de laminação, ver figura 5.3, onde é mostrada uma média ponderada. Aplicando a equação 4 para uma deformação de 20%, define-se a anisotropia do material, que é vista na tabela 5.8.

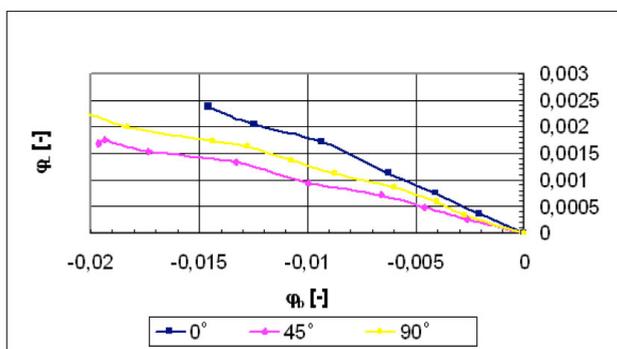


Figura 5.3 – Medição das deformações principais do material de acordo com a direção de laminação. Material: bobina A.

Tabela 5.8 – Anisotropia com 20% de deformação. Material: bobina A.

r_{0°	0,852±0,026
r_{45°	0,914±0,024
r_{90°	0,892±0,005
r	0,893±0,019
Erro da amostragem	0,048

5.4 CURVA LIMITE DE CONFORMAÇÃO

O ensaio Nakazima (ver item 4.1) utilizou um punção do tipo hemisférico com raio de 50 mm e para redução de atrito, o lubrificante PU 45.

Na figura 5.4 são apresentadas as medições realizadas, após os ensaios, para corpos de prova retirados do início, meio e final da bobina. Extrapolando estes pontos

por um polinômio tem-se a CLC. Em azul está representada a curva encontrada para o final da bobina e em vermelho vê-se a para o início que é válida para o meio também.

Analisando estes resultados, vemos que a curva azul está com um limite menor que a vermelha, o que mostra que no final da bobina a estampabilidade do material é pior do que no início e no meio.

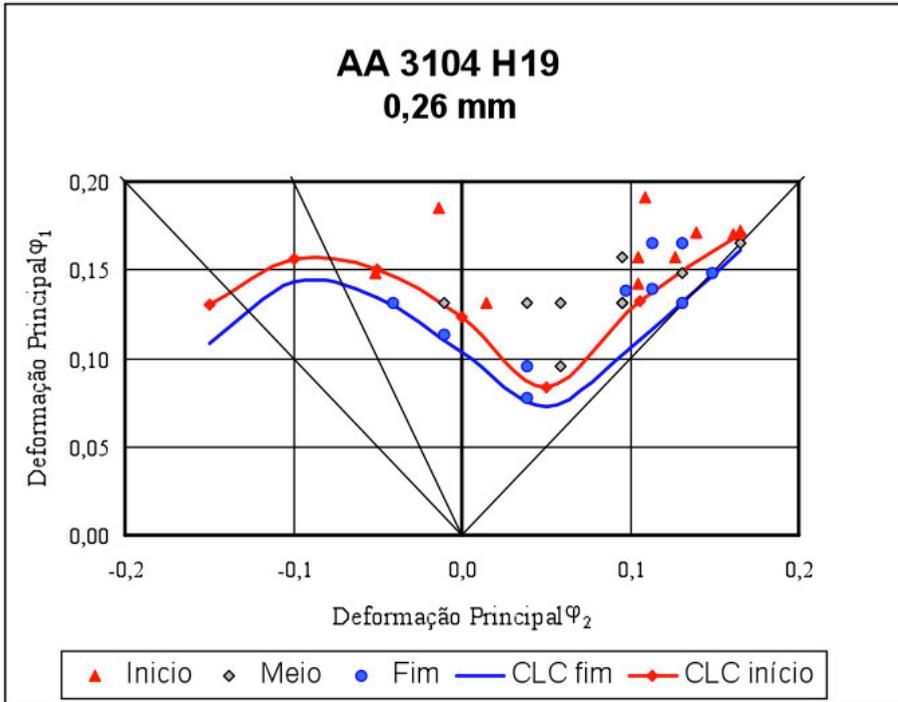


Figura 5.4 – Curva Limite de Conformação. Material: bobina C.

5.5 FORÇA DE ESTAMPAGEM

No processo de fabricação de latas de alumínio abordado neste trabalho, existem duas etapas que podem ser classificadas como de estampagem. A primeira é a chamada estampagem e a segunda é a de reestampagem, conforme detalhado abaixo.

5.5.1 PRIMEIRA ESTAMPAGEM

Para o cálculo das forças de estampagem e do prensa-chapas durante a etapa onde é formado o primeiro copo, ver figura 5.5, foram utilizadas as equações 6 e 7, conforme Schaeffer (1999).

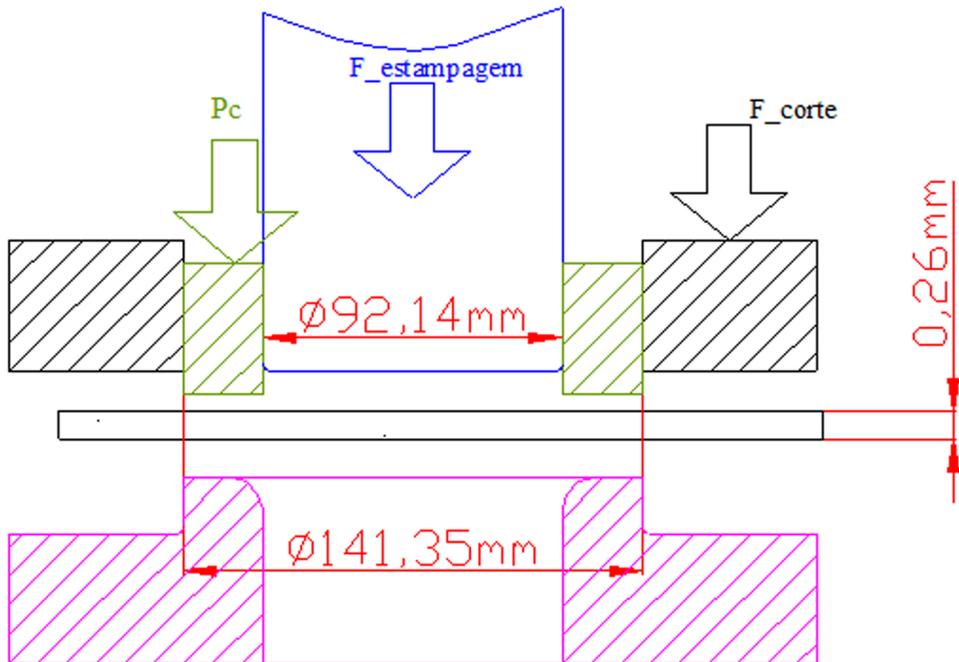


Figura 5.5 – Desenho esquemático da primeira etapa de estampagem.

$$F = \pi \cdot (d1 + t) \cdot t \cdot \sigma_m \cdot 1,2 \cdot \left(\frac{\beta - 1}{\beta_{m\acute{a}x} - 1} \right) \quad (6)$$

onde F [N] é a força de estampagem, $d1$ [mm] é o diâmetro do punção, t [mm] é a espessura nominal da chapa, σ_m [MPa] é a tensão máxima do material, β [-] é a razão limite de estampagem (que relaciona o diâmetro do disco cortado com o diâmetro do punção) e $\beta_{m\acute{a}x}$ [-] é a razão de estampagem máxima do material, que é retirado da literatura: Chang (1997).

$$P_c = \frac{\sigma_m}{400} \cdot \left[(\beta - 1)^2 + \frac{d1}{200 \cdot t} \right] \cdot A \quad (7)$$

onde P_c [N] é a força do prensa-chapas, A [mm²] é a área do disco descontando-se a área de contato entre este e o punção.

Aplicando estas equações para a primeira etapa, e substituindo pelos valores da tabela 5.9, tem-se que a força de estampagem encontrada é de 13,5kN e a força do prensa-chapas é de 13,1kN. Uma vez tendo calculado a força de estampagem e a área, envolvidas na etapa de deformação do copo, calcula-se a tensão do material após esta etapa, através da equação 8, e encontra-se o valor de 251MPa.

$$kf_{est} = \frac{F}{A} + \sigma_{e0,2} \quad (8)$$

onde kf_{est} [MPa] é a tensão de escoamento do material após a estampagem e $\sigma_{e0,2}$ [MPa] foi retirado da tabela 5.1.

Tabela 5.9 – Valores para a primeira etapa de estampagem.

A	9024mm ²
$d1$	92,14mm
t	0,26mm
β	1,54
$\beta_{m\acute{a}x}$	2 (segundo Chang (1997))
σ_m	281Mpa (tabela 5.2)

5.5.2 REESTAMPAGEM

Para o cálculo das forças de estampagem e do prensa-chapas durante a etapa onde é formado o primeiro copo, ver figura 5.5, foram utilizadas as equações 6 e 7, conforme Schaeffer (1999).

Tabela 5.10 – Valores para a etapa de reestampagem.

A	3222mm ²
$d1$	66,24mm
t	0,26mm
β	1,39
$\beta_{m\acute{a}x}$	2 (segundo Chang (1997))
σ_m	281Mpa (tabela 5.2)

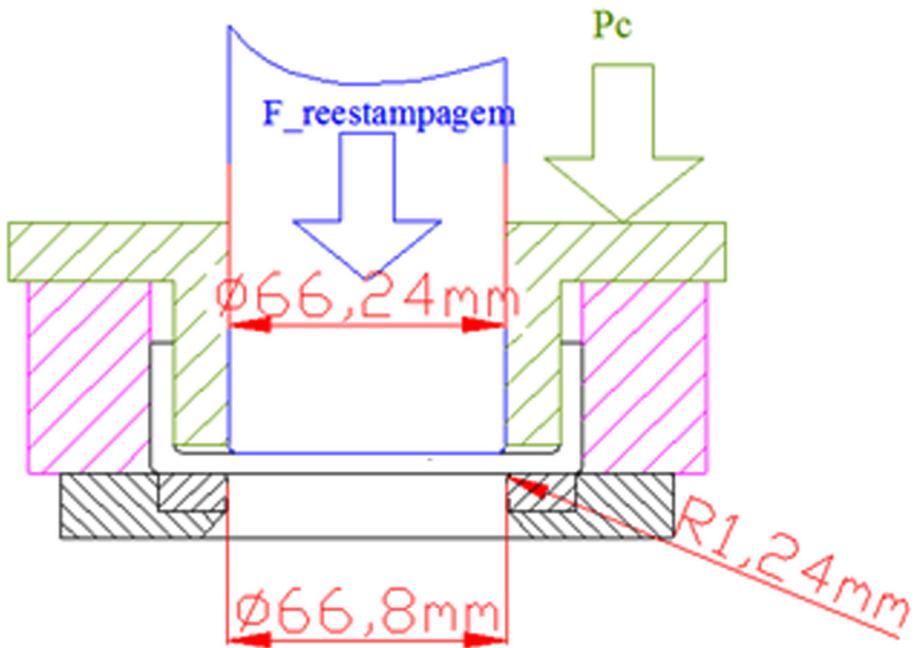


Figura 5.6 – Desenho esquemático da etapa de reestampagem.

5.6 FORÇA DE TREFILAÇÃO (IRONING)

Nesta etapa final do processo de conformação do corpo da lata, conforme figuras 5.7 e 5.8 e tabela 5.11, é apresentada a geometria do ferramental para cada etapa de *ironing*.

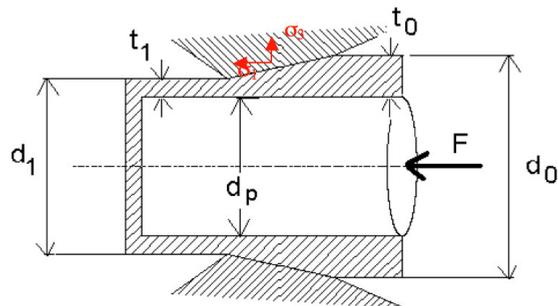


Figura 5.7 – Desenho esquemático de cada etapa de ironing (Fonte: DANCKERT, 2001).

Tabela 5.11 – Geometria do ferramental.

Ferramenta	[mm]
Diâmetro do Punção	66,24
Diâmetro da Ferramenta de Reestampagem	66,80
Diâmetro da Primeira Ferramenta de <i>Ironing</i>	66,65
Diâmetro da Segunda Ferramenta de <i>Ironing</i>	66,55
Diâmetro da Terceira Ferramenta de <i>Ironing</i>	66,44

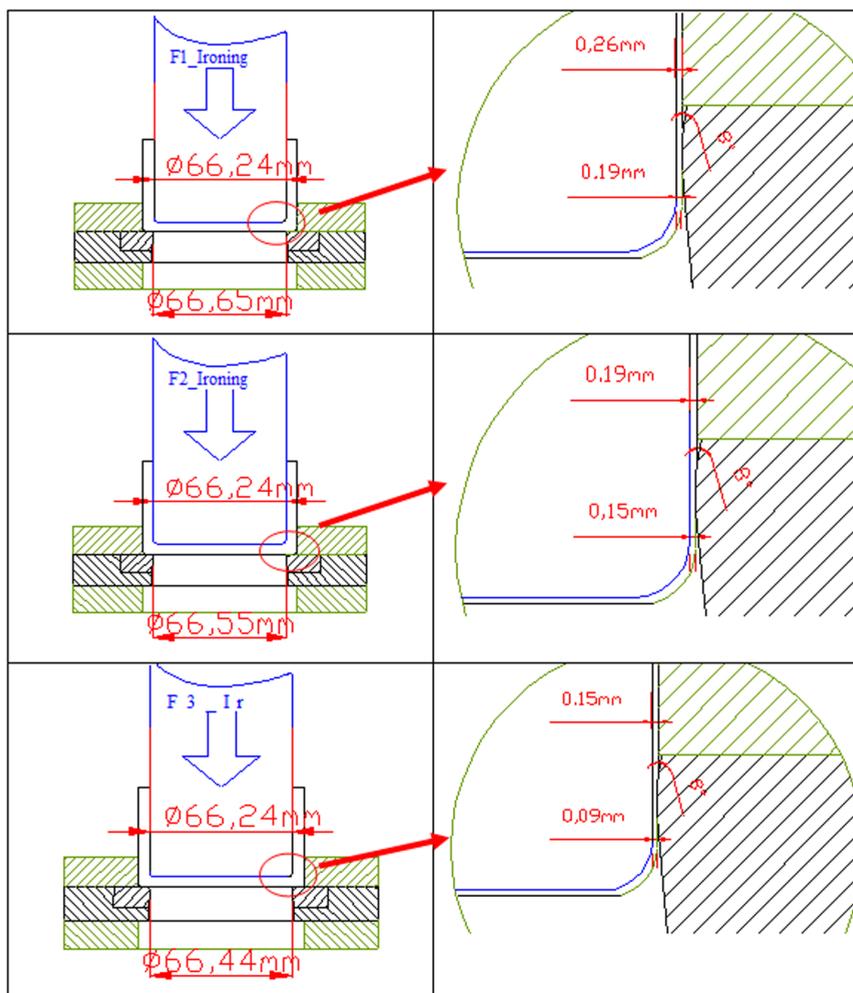


Figura 5.8 – Desenho esquemático do ferramental. À direita uma vista em detalhe da etapa.

Segundo Campion (1980) antes da primeira etapa de ironing não há variação de espessura, logo a espessura inicial é a espessura da bobina. O diâmetro externo da lata antes de passar pelo *ironing* é:

$$d_0 = d_p + 2 \cdot t_0 \quad (9)$$

onde d_0 é o diâmetro externo da lata antes de cada *ironing*, d_p é o diâmetro do punção da etapa de ironing e t_0 é a espessura da lata antes de cada *ironing*, todos em mm.

E a equação que define a área transversal da lata nesta etapa é:

$$A_0 = \frac{\pi}{4} \cdot (d_0^2 - d_p^2) \quad (10)$$

O diâmetro externo da lata após cada *ironing* d_1 [mm] é:

$$d_1 = d_p + 2 \cdot t_1 \quad (11)$$

onde t_1 [mm] é a espessura da lata após cada *ironing*.

A área referente ao diâmetro é:

$$A_1 = \frac{\pi}{4} \cdot (d_1^2 - d_p^2) \quad (12)$$

A deformação principal envolvida é encontrada pela equação 13, conforme Altan (1999).

$$\varphi_A = \ln \left(\frac{d_0^2 - d_p^2}{d_1^2 - d_p^2} \right) \quad (13)$$

Ao aplicar a deformação da equação 13 na equação 5, tem-se a tensão de escoamento do material no ponto antes (kf_0) e após cada etapa de *ironing* (kf_1) dados em MPa, sendo utilizado o valor médio no cálculo da força de *ironing*, ver equação 14.

$$kf_m = \frac{kf_0 + kf_1}{2} \quad (14)$$

A força de *ironing* é dada pela fórmula 15, conforme Schaeffer (1999), e utilizou-se o coeficiente de atrito (μ) sugerido por Chang (1997) como sendo 0,02 e o ângulo da feira (α) é 8 graus (0,139rad).

$$F = kf_m \cdot A_1 \cdot \varphi_A \cdot \left(1 + \frac{\mu}{\alpha} + \frac{2 \cdot \alpha}{3 \cdot \varphi_A} \right) \quad (15)$$

A redução máxima (grau de esforço máximo), é dada pela desigualdade abaixo (fórmula 16). O grau máximo admissível (a) encontrado por Schaeffer (1999) é 0,75. Valores acima de 0,75 indicam que o processo não é viável.

$$a = \frac{\sigma_1}{kf_1} \leq 0,75 \quad (16)$$

onde σ_1 [MPa] é a tensão axial (ver figura 5.7) que é razão entre a força de *ironing* e área na saída da feira, conforme a equação 17 e kf_1 [MPa] é a tensão radial é encontrada pela Teoria da Máxima Tensão Cisalhante ou Critério de Tresca, ver equação 18.

$$\sigma_1 = \frac{F}{A_1} \quad (17)$$

$$kf_1 = \sigma_1 - \sigma_3 \quad (18)$$

Na tabela 5.12 são apresentados os resultados do cálculo das tensões e das forças de *ironing* envolvidas em cada etapa.

Tabela 5.12 – Cálculos de Força de *Ironing*. Material: bobina A.

	<i>Ironing 1</i>	<i>Ironing 2</i>	<i>Ironing 3</i>
d_0	66,76mm	66,66mm	66,55mm
A_0	54,07mm ²	43,48mm ²	32,58mm ²
d_1	66,66mm	66,55mm	66,44mm
A_1	43,48mm ²	32,58mm ²	20,38mm ²
φ_A	-0,22	-0,29	-0,47
kf_0	253MPa	474MPa	506MPa
kf_1	474MPa	506MPa	564MPa
kf_m	364MPa	490MPa	535MPa
F	5,43kN	6,76kN	6,87kN
σ_1	123MPa	207MPa	337MPa
σ_3	-351MPa	-299MPa	-287MPa
a	0,25	0,31	0,60

Pode-se visualizar (tabela 5.12) que o grau de esforço (a) aumenta conforme se avança nas etapas de *ironing*, no entanto, não é atingido o limite máximo de 0,75 o que representa que o material não está sendo exigido ao máximo. Outra constatação é que a força de *ironing* é crescente no sentido do final do processo, o que é correto já que o grau de esforço também segue esta tendência.

Através dos dados obtidos, monta-se um diagrama entre o grau de esforço com a espessura final da lata, variando-se o grau de encruamento. A figura 5.9 mostra que:

- para obter uma espessura final da lata (3° *ironing*) de 0,098mm (condição do projeto) tem-se um grau de esforço de 0,6 ou 60%, caso o encruamento seja 0,22;
- se houver a diminuição do encruamento tem-se um aumento do grau de esforço do material, mantendo a condição de projeto;
- caso haja uma variação na espessura final da parede da lata, tem-se na figura qual seria o grau de esforço obtido para um encruamento conhecido.

A figura 5.9 é um gráfico que relaciona propriedade mecânica e metalúrgica do material e projeto de ferramental.

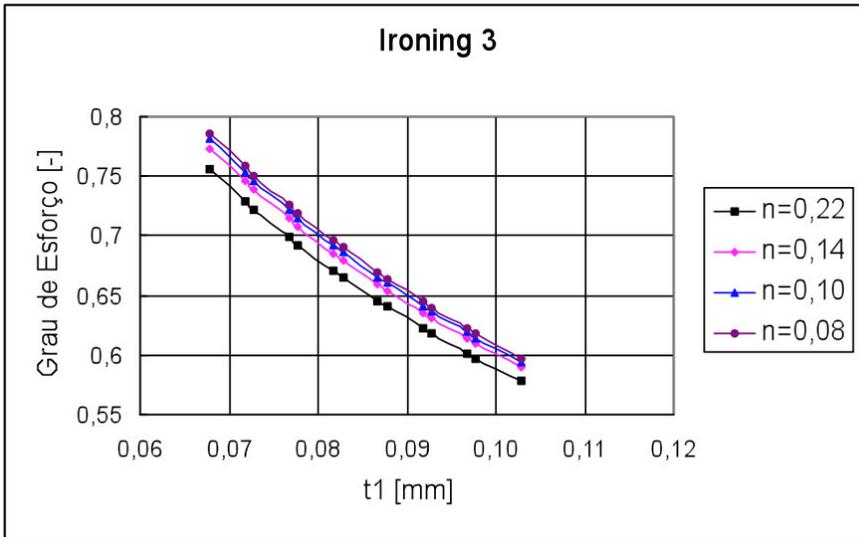


Figura 5.9 – Relação de grau de esforço, encruamento e folga entre ferramentas.