

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E CULTURA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DA ENERGIA, METALURGIA
E MATERIAIS - PPGEEMM

INTRODUÇÃO AO FORJAMENTO ISOTÉRMICO

por

NILSON VALEGA FERNANDES

Engenheiro Mecânico

Trabalho realizado no Departamento de Engenharia Metalúrgica da
Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Gradua
ção em Engenharia da Energia, Metalurgia e Materiais - PPGEEMM

PORTO ALEGRE

1985

INTRODUÇÃO AO FORJAMENTO ISOTÉRMICO

D I S S E R T A Ç Ã O

Apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Energia, Metalurgia e Materiais - PPGEEMM, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de

Mestre em Engenharia

Área de Concentração - Metalurgia de Transformação

por

Nilson Valega Fernandes - Engenheiro Mecânico

1 9 8 5

Esta DISSERTAÇÃO foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre de Engenharia, Área de Concentração: Metalurgia de Transformação e aprovada em sua forma final, pelo Orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

Orientador: Lírio Schaeffer
Doutor em Engenharia
UFRGS - PPGEEMM

Banca Examinadora:

Arno Blass
Doutor em Engenharia
UFSC - PGEM

Ildon G. Borchardt
Doutor em Ciências
UFRGS - PPGEEMM

Lírio Schaeffer
Doutor em Engenharia
UFRGS- PPGEEMM

Coordenador do PPGEEMM
Lírio Schaeffer
Doutor em Engenharia

A G R A D E C I M E N T O S

- Ao Prof. Lírio Schaeffer pela orientação recebida.

- Aos Professores Doutores Klaus-Rainer Baldner do Instituto de Conformação Mecânica da Universidade Técnica de Aachen-RFA e Francisco José Kiss do PPGEEMM, pela colaboração na elaboração deste trabalho.

- Aos colegas e técnicos do PPGEEMM, em especial ao Eng^o Dinarte Santos e ao técnico Sérgio Domingos Alegre pelo auxílio prestado.

- Ao CNPq e a FINEP - Financiadora de Estudos e Projetos, pelo auxílio financeiro dado a este trabalho.

- A todos que de uma forma ou de outra, direta ou indireta - mente, através de críticas, sugestões e discussões, contribuíram decisivamente para a realização dos objetivos propostos.

À minha família na pessoa
de meu avô, J. D. Valega
Bernard.

R E S U M O

Pretende este trabalho dar início ao estudo do processo de forjamento isotérmico de uma peça de uma liga de alumínio (Al Mg Sil) através de alguns parâmetros como curva de escoamento, influência de lubrificantes e modelos de cálculo de força.

Para a análise da curva de escoamento da liga Al Mg Sil foram realizados testes alterando-se tanto a temperatura de ensaio como a velocidade de prensagem. Os resultados obtidos foram comparados com os resultados de duas referências bibliográficas.

Em relação ao forjamento apresenta-se a ferramenta utilizada nos testes e descreve-se sobre as influências de alguns lubrificantes testados.

Finalizando, mostra-se os resultados obtidos experimentalmente e os resultados obtidos através da aplicação de tres modelos teóricos extraídos da literatura.

Conclusões e sugestões para futuros trabalhos são também apresentados.

A B S T R A C T

The objective of this work was to start a study of the isothermal forging process of an aluminium alloy (AlMgSi 1) workpiece by using parameters as the yield curve, influence of lubricant and force calculation models.

Tests were carried out to analyze the yield curve of the alloy as a function of the test temperature and the pressing velocity. The experimental results were compared with results from two bibliographic references. With regard to the forging processes, the tool employed and the results of tests obtained with some lubricants are presented.

Finally, a comparison is made of the experimental results and of results obtained from three theoretical model.

Conclusions and suggestions for future work are also presented.

SIGNIFICADO DOS SÍMBOLOS UTILIZADOS

A_c	(mm^2)	área de contato.
d_0	(mm)	diâmetro inicial do corpo-de-prova.
h_0	(mm)	altura inicial do corpo-de-prova.
h	(mm)	espessura da garganta de rebarba.
h_1	(mm)	altura final da peça forjada.
k_f	(N/mm^2)	resistência ao escoamento.
k_w	(N/mm^2)	resistência à deformação.
L_s	(N/s)	potência externa de cisalhamento.
L_w	(Nm/s)	potência que atua contra a velocidade v da ferramenta.
L_v	($\text{N}/\text{mm}^2 \text{ s}$)	potência média por unidade de volume.
m	(-)	coeficiente de atrito constante.
P_m	(N/mm^2)	tensão média calculada por integração de área.
P_s	(N/mm^2)	tensão que leva em conta a resistência ao escoamento.
q	(kN)	força total de forjamento.
q_A	(kN)	força que atua na região da rebarba.
q_{CA}	(kN)	força que atua na cavidade da ferramenta.
q_P	(kN)	força de cisalhamento.
r	(mm)	raio central da peça forjada.
R	(mm)	raio total da peça forjada.

t_A	(N/mm ²)	tensão atuante na zona da rebarba.
$t's$	(N/mm ²)	tensão atuante em cada tira considerada.
t_s	(N/mm ²)	tensão que leva em conta t_A e $t's$.
t_k	(N/mm ²)	tensão de cisalhamento.
v	(mm/min)	velocidade de prensagem.
x	(mm)	largura da garganta da rebarba.
φ	(mm)	largura da peça.
φ_1	(mm)	distância entre as duas reentrâncias (rasgos).
φ	(-)	deformação logarítmica.
$\dot{\varphi}$	(s ⁻¹)	velocidade de deformação.
$\dot{\varphi}_0$	(s ⁻¹)	velocidade de deformação no início do ensaio.
$\dot{\varphi}_f$	(s ⁻¹)	velocidade de deformação no final do ensaio.
$\dot{\varphi}_m$	(s ⁻¹)	velocidade de deformação média.
μ	(-)	coeficiente de atrito de Coulomb a que o material está submetido.
u	(m/s)	velocidade de prensagem horizontal.
\dot{V}	(m ³ /s)	volume em função do tempo.
ϑ	(°C)	temperatura.
ϑ_0	(°C)	temperatura inicial do ensaio.
ϑ_f	(°C)	temperatura final do ensaio.

Í N D I C E

RESUMO	I
ABSTRACT	II
SIGNIFICADO DOS SÍMBOLOS UTILIZADOS E UNIDADES	III
1. INTRODUÇÃO	1
2. ESTADO ATUAL DA TÉCNICA	4
2.1. Aspectos gerais	4
2.2. Forjamento isotérmico	5
2.3. Comparação do forjamento isotérmico com outros proces_ sos	7
3. MODELOS DE CÁLCULO DE FORÇA	17
3.1. Modelo de T. Altan	17
3.2. Modelo de Haller	19
3.3. Modelo de Reicherter	21
4. RESISTÊNCIA AO ESCOAMENTO	24
4.1. Aspectos gerais	24
4.2. Material analisado	24
4.3. Construção das curvas de escoamento a quente	25
4.4. Resultados obtidos	31
4.4.1. Influência da temperatura	31
4.4.2. Influência da velocidade de prensagem	37
4.5. Comparação dos resultados obtidos com a bibliogra- fia	41
4.5.1. Comparação dos valores obtidos com os calcula- dos de acordo com Hensel e Spittel	41
4.5.2. Comparação dos valores obtidos com os calcula- dos de acordo com Akeret	44
4.5.3. Comparação entre os valores de Akeret e Meyer- -Nolkemper	47
5. ANÁLISE EXPERIMENTAL DO FORJAMENTO ISOTÉRMICO	49
5.1. Considerações gerais	49
5.2. Ferramenta de teste	50
5.3. Características dos testes	52
5.4. Equipamentos utilizados nos testes	52
5.5. Lubrificantes utilizados nos testes	53

6. RESULTADOS OBTIDOS	56
6.1. Utilização de material modelo	56
6.2. Testes com a liga AlMgSi 1	56
6.2.1. Bateria de teste A	56
6.2.2. Bateria de teste B	58
6.2.3. Bateria de teste C	58
6.2.4. Resultados obtidos do forjamento isotérmico	59
6.2.5. Resultados obtidos pela aplicação dos modelos de cálculo de força	62
6.2.6. Resultados obtidos da análise metalográfica	70
7. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS (CONCLUSÕES)	72
8. SUGESTÃO DE CONTINUIDADE	74
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	76
10. ANEXO A.....	78
11. ÍNDICE DE FIGURAS E TABELAS	88

1 - INTRODUÇÃO

A técnica do forjamento isotérmico já vem sendo empregada desde o início da Segunda Guerra Mundial em ligas de alumínio. Atualmente com desenvolvimento de outras ligas leves e de alta resistência, como ligas de titânio e magnésio, esse processo vem tendo um novo impulso.

A característica principal desse processo é que as matrizes são aquecidas até a temperatura de conformação, podendo-se assim deformar lentamente o material no estado dútil empregando-se pequenas forças. Esse processo possibilita ainda a fabricação de peças sem que seja necessário usinagem posterior, com isso consegue-se uma forte redução de matérias-primas e do custo operacional. Esse processo é importante também na conformação de metais que apresentam alta dificuldade de forjamento a quente. Assim, conseqüentemente, esse processo está sendo uma alternativa importante na conformação das ligas de titânio e ligas à base de níquel.

Nessa técnica, além de utilizar-se prensas de menor capacidade, pode-se também produzir peças contendo elementos com paredes finas e de alto grau de precisão. Se determinadas condições foram obedecidas, o material atinge características de superplasticidade e o processo pode beneficiar-se do estado superplástico.

Esta técnica pode apresentar algumas desvantagens, como maior desgaste das ferramentas devido ao trabalho em altas temperaturas e a exigência de instalações especiais para o controle rígido de temperatura.

Nesse trabalho procura-se analisar alguns aspectos do forjamento isotérmico da liga de alumínio Al Mg Si 1 (DIN) ou 6351 T6 (ASTM). É apresentado um dispositivo para a construção de curvas de escoamento a quente. São construídas as curvas de escoamento que servem de base para o cálculo de força. São testados tres modelos de cálculo de força. Os modelos não são discutidos em profundidade porque se conclui que para obter-se uma maior precisão é necessário o uso de teorias mais sofisticadas como a Teoria do Limite Superior ou Teoria dos Elementos Finitos. Foram testados alguns lubrificantes mas não se conseguiu no mercado um lubrificante que suportasse as altas temperaturas duran-

te o tempo necessário para forjar.

A figura 1.1 mostra alguns aspectos julgados importantes a serem analisados na pesquisa sobre forjamento isotérmico. Para o início deste estudo dividiu-se o trabalho em duas partes, sendo a primeira delas definida como cálculo teórico e a segunda definida como análise experimental.

O cálculo teórico apresenta os modelos empíricos de T. Altan e Haller aplicados neste trabalho e também o modelo de Reicherter que é um modelo simplificado da teoria das tiras. Estes modelos foram utilizados para estimar a força necessária de forjamento nos testes realizados.

A segunda parte do trabalho, análise experimental, está dividida em curvas de escoamento da liga de alumínio Al Mg Si 1, ferramentas utilizadas nos testes onde adaptaram-se dois modelos e sistema de aquecimento onde utilizou-se um forno de resistência elétrica. Apresenta-se ainda o material que foi utilizado nos testes de forjamento e os lubrificantes que foram testados. Para finalizar apresenta-se a opção, peça industrial, onde eventualmente poderia desenvolver-se algum produto em consequência dos resultados obtidos.

Os quadros com linhas cheias mostram as etapas analisadas nesse trabalho.

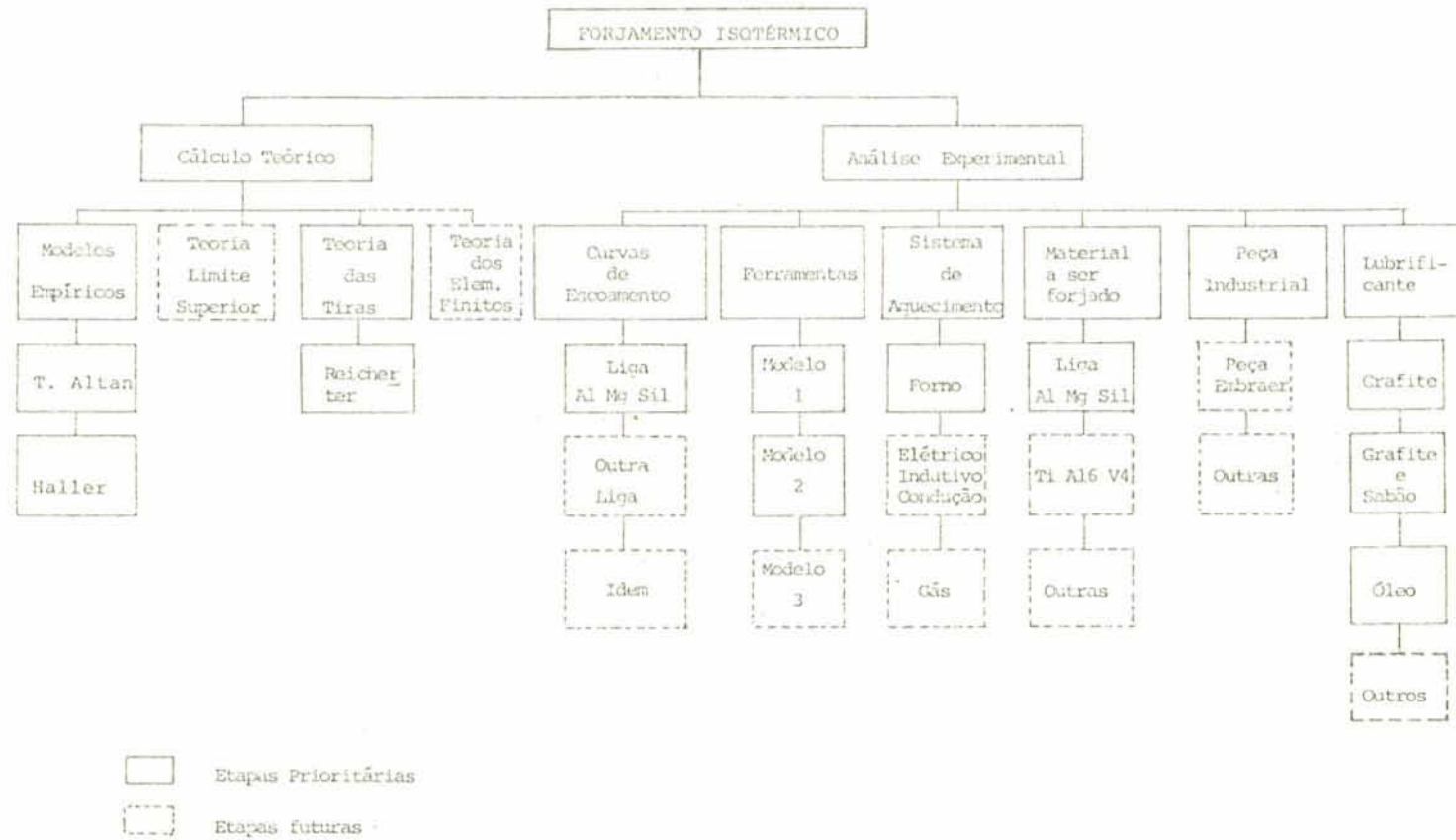


Fig. 1.1 - Fluxograma de aspectos importantes a serem analisados no forjamento isotérmico

2. ESTADO ATUAL DA TÉCNICA

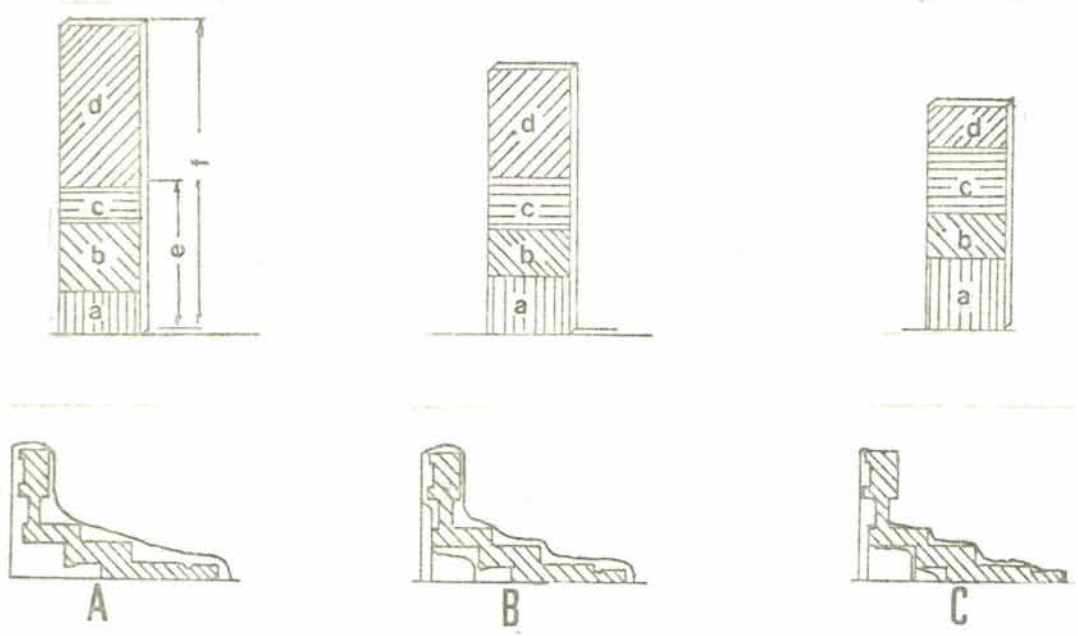
2.1. Aspectos Gerais

A produção de peças através da técnica do forjamento tem nos últimos anos sofrido transformações significativas, tanto no que diz respeito aos processos como aos equipamentos, às ferramentas e aos materiais. Exige-se cada vez mais uma maior precisão, uma melhor qualidade superficial e uma maior resistência mecânica. A tecnologia do forjamento foi obrigada a modernizar-se devido à pressão dos custos operacionais do mercado de trabalho e das exigências de controle da poluição.

A utilização de peças forjadas, como alternativa às obtidas por outros processos (fundição, usinagem) se justifica principalmente devido às exigências de segurança, pois apresentam melhores propriedades mecânicas. Em alguns casos o processo de forjamento apresenta também um menor custo de produção. Em geral é necessário que se encontre um fator de compromisso entre a quantidade de peças a ser produzida, a precisão dimensional após o forjamento e o custo de produção.

Modernamente é muito importante e não deve deixar de ser mencionado, o emprego de computadores tanto no que se refere a cálculos, como à simulação do processo e à automação.

Uma peça ao ser forjada tem seu custo vinculado a muitos fatores. Em relação à quantidade de sobremetal (material a ser retirado após o forjamento por usinagem), a fig. 2.1. mostra uma representação esquemática de como pode diminuir o custo total de uma peça em função do processo de forjamento. A peça A mostra uma grande perda de material devida à usinagem necessária para deixar a peça em sua forma definitiva, proveniente do tipo de forjamento utilizado (pouca precisão do forjado). A peça B mostra uma peça que foi forjada através de um forjamento de média precisão, por isso tem-se menos material para remover no final do processo. A peça C, por sua vez, apresenta menos material para remover do que as anteriores, pois foi forjada através de um processo de forjamento de precisão. Os custos envolvidos para cada caso, estão expressos nas colunas ao lado das peças na fig. 2.1.



- a) Custo do ferramental
- b) Custo de material
- c) Custos de forja
- d) Custos de usinagem
- e) Custos da peça forjada
- f) Custos do produto acabado

Fig. 2.1 - Representação esquemática da diminuição do custo total de uma peça em função do processo de forjamento /2.1/ .

Ainda em relação aos custos envolvidos durante o forjamento, nota-se que os mesmos tornam-se relativamente altos quando são utilizadas várias matrizes (quando ocorrem pré-formas) para a fabricação de um pequeno número de peças. Em consequência disso, verifica-se uma preocupação cada vez maior em reduzir os passos durante o forjamento, tentando-se desta forma, diminuir o número de matrizes empregadas. Esta preocupação com o número de matrizes, levou ao estudo de outros processos com características que propiciam uma redução de matrizes durante o forjamento e que originam economia em custos.

Com o objetivo de reduzir custos e melhorar a qualidade dos produtos forjados, apresentam-se como alternativa para alguns materiais, os seguintes processos: forjamento isotérmico, forjamento em matriz aquecida (quase isotérmico) e o forjamento em matriz aquecida em atmosfera controlada, denominada de "processo gatorizing" além de outros processos como: metalurgia do pó, forjamento progressivo e squeeze form (combinação entre o processo de fundição e forjamento)/2.2/ e /2.3/.

2.2. Forjamento isotérmico

Forjamento isotérmico é um processo de forjamento no qual as matrizes e o material a ser conformado estão aproximadamente à mesma temperatura.

Basicamente, o forjamento isotérmico é uma nova tecnologia para obtenção de peças de precisão. Na produção de peças de titânio, usa-se ferramenta à base de níquel e molibdênio e as mesmas são, nesse caso, pré-aquecidas até a temperatura de forjamento.

O processo de forjamento isotérmico pode utilizar-se do comportamento superplástico dos materiais. A superplasticidade é a propriedade que determinados materiais tem para alcançar grandes deformações sem que se produza estricção ou ruptura, utilizando-se durante o processo uma combinação de velocidade de deformação e temperatura.

A principal aplicação que encontram os materiais superplásticos é no campo da conformação, devido à facilidade de fluência que possuem nos intervalos de temperaturas e velocidades de deformação superplástica.

A grande utilidade dos materiais superplásticos faz com que o material chegue inclusive nas partes mais inacessíveis da matriz, reduzindo dessa forma o custo e as perdas de material.

Esse processo é muito utilizado atualmente na fabricação de peças para a indústria aeronáutica, na fabricação de peças com secções transversais finas em forma de cruz, pás de hélice, palhetas de turbina, etc.

2.3. Comparação do forjamento isotérmico com outros processos

A fig. 2.2 compara alguns aspectos entre o forjamento isotérmico e o forjamento convencional. O exemplo em questão refere-se ao forjamento de peças de titânio. No forjamento convencional de peças de titânio (800° a 1500° C dependendo da liga), as peças perderão temperatura devido ao contato com a matriz fria durante a operação de forjamento, por exemplo de 950° C no início do forjamento atingirá 800° C no final do forjamento. Para evitar o resfriamento muito rápido, altas velocidades de deformação são aplicadas, entre 10^1 - 10^3 s^{-1} . Essas duas condições do processo, resfriamento rápido no forjamento e alta velocidade de prensagem, provocam um considerável acréscimo na tensão de escoamento e, portanto, uma alta força de forjamento. Este exemplo está esquematicamente mostrado ao lado esquerdo da fig. 2.2. No forjamento isotérmico, tanto a matriz como o forjado, têm a mesma temperatura durante o processo, por exemplo 950° C (no caso de forjamento de titânio). Estas condições de processo no forjamento isotérmico, permitem trabalhar a baixas velocidades de deformação ($\dot{\psi}$), por exemplo 10^{-3} - 10^{-2} s^{-1} , conseguindo-se, com isso, trabalhar com baixa tensão de escoamento e baixa resistência à deformação. Uma combinação ótima da temperatura de forjamento e da taxa de tensão resulta em um decréscimo da força requerida para o forjamento de 10% a 20% comparada com a força de deformação requerida /2.4/ (lado direito da fig. 2.2).

No processo de forjamento isotérmico a matriz pode ser aquecida por aquecimento indutivo ou por chamas. A fig. 2.3 mostra um sistema empregando-se o processo de indução.

Voigtländer e Günther /2.4/ classificam o forjamento isotérmico como tendo uma relação temperatura da ferramenta dividida pela temperatura da peça em torno de um (1) para um tempo de contato variando de 10^2 até 10^3 s (fig. 2.4). A fig. 2.4 mostra ainda o forjamento isotérmico comparado a outros processos de forjamento.

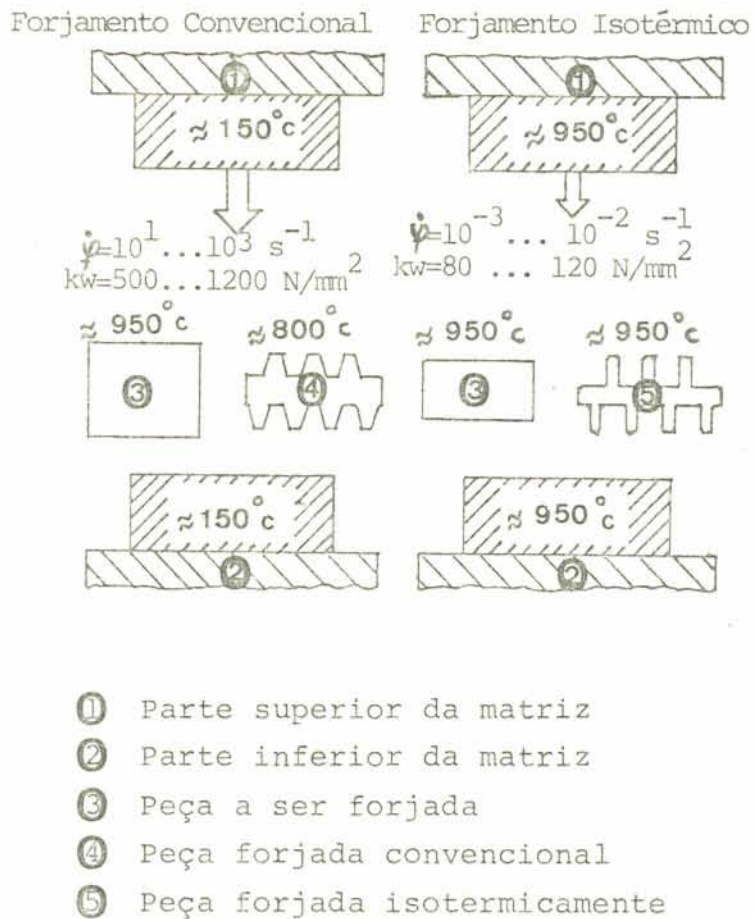


Fig. 2.2 - Comparação entre o forjamento convencional e o forjamento isotérmico em peças de Ti /2.4/.

Conjunto Ferramental Para
o Forjamento Isotérmico
De Palhetas de Compressor

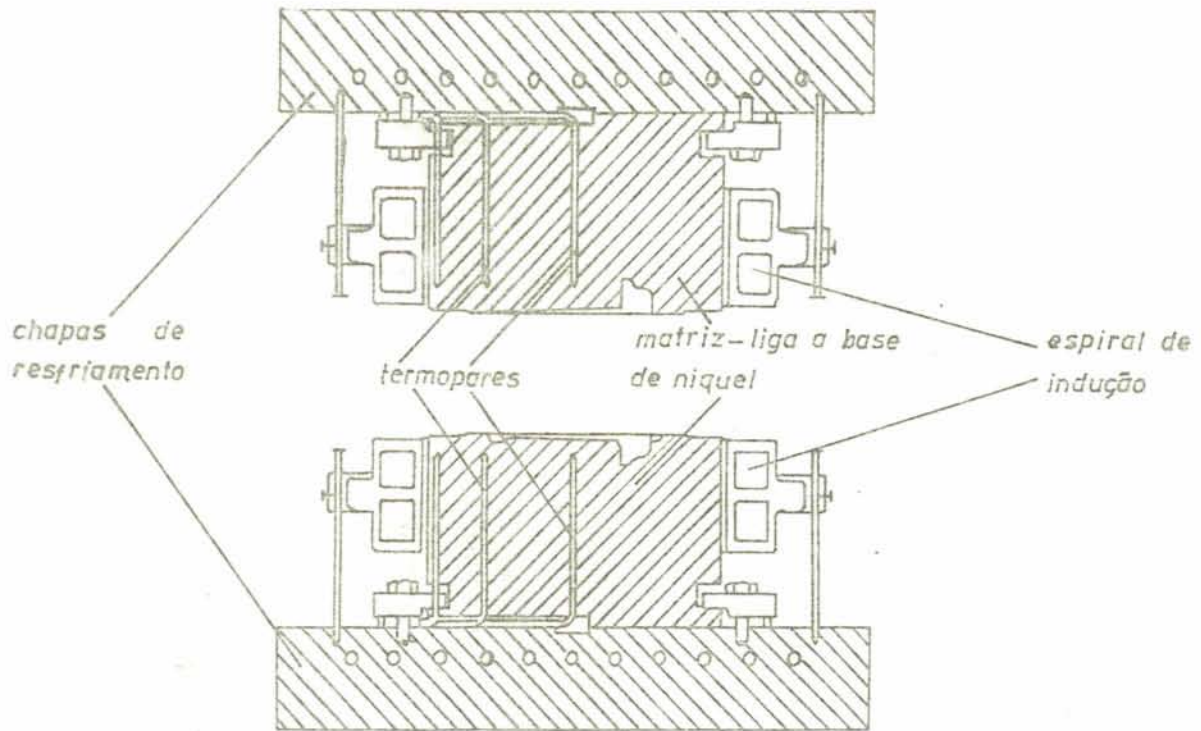


Fig. 2.3 - Sistema de aquecimento por indução em
peças de alumínio forjadas isotérmica-
mente / 2.4/.

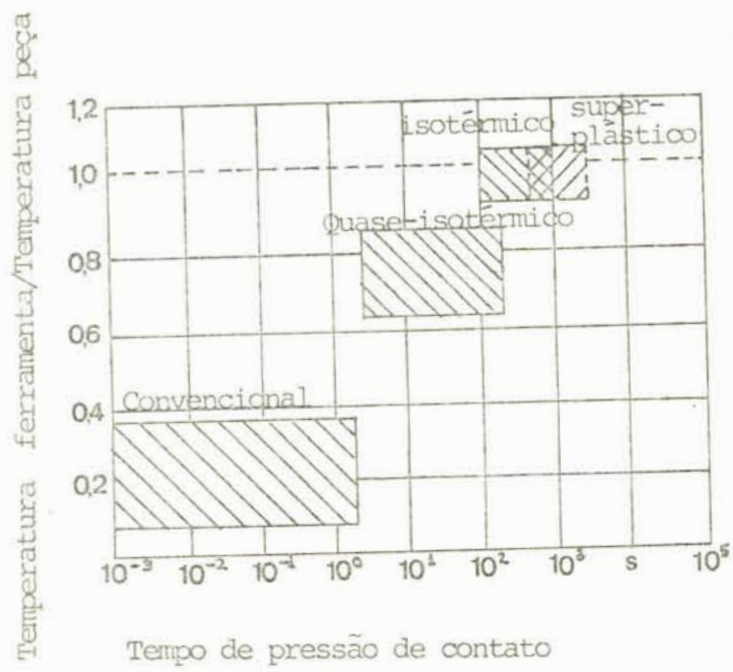


Fig. 2.4 - Relação entre temperatura de ferramenta/temperatura de peça e tempos de pressão de contato para diferentes processos de forjamento /2.4/.

A tab. 2.1 mostra uma comparação do valor da resistência a deformação (k_w) requerida no forjamento isotérmico em comparação a outros processos. Nesse caso foram forjadas palhetas de compressores e se pode observar que o forjamento isotérmico apresenta uma resistência à deformação na ordem de $1/8$ da força que o forjamento convencional.

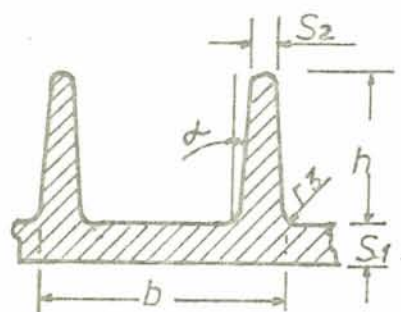
Em geral, deseja-se obter uma peça forjada com as dimensões tão próximas quanto possível da geometria da peça acabada. A dificuldade de obtenção depende do material a ser forjado. A fig. 2.5 mostra o perfil de uma peça forjada /2.6/ com tres materiais diferentes, quando sujeitos a um forjamento convencional. Os materiais comparados são: aço M2 (aço rápido ao Mo, W, V), titânio e uma liga de molibdênio. Notou-se, que para certas dimensões como b , h e α , os materiais atingem razoavelmente as dimensões requeridas, enquanto que dimensões como S_1 , S_2 e r_3 são mais difíceis de alcançar nas ligas de titânio e molibdênio. A fig. 2.5 tem a finalidade de mostrar a viabilidade da aplicação do processo de forjamento isotérmico, como alternativa para se obter uma peça com dimensões mais próximas das dimensões obtidas após a usinagem.

A fig. 2.6 mostra uma análise comparativa de custo para ligas de alumínio entre peças forjadas isotermicamente e peças fresadas /2.7/. No eixo vertical está representado o custo de peças acabadas por avião. No caso da peça 1 conseguiu-se uma economia de 30%; na peça 2, de 36%; na peça 3, de 57%; na peça 4, de 74% e na peça 5, de 45%.

Uma comparação geral de propriedades, que relaciona o forjamento isotérmico com outros processos de forjamento, é dado por K. Lange e Meyer-Nolkemper em /2.8/, e reproduzida na tab. 2.2.

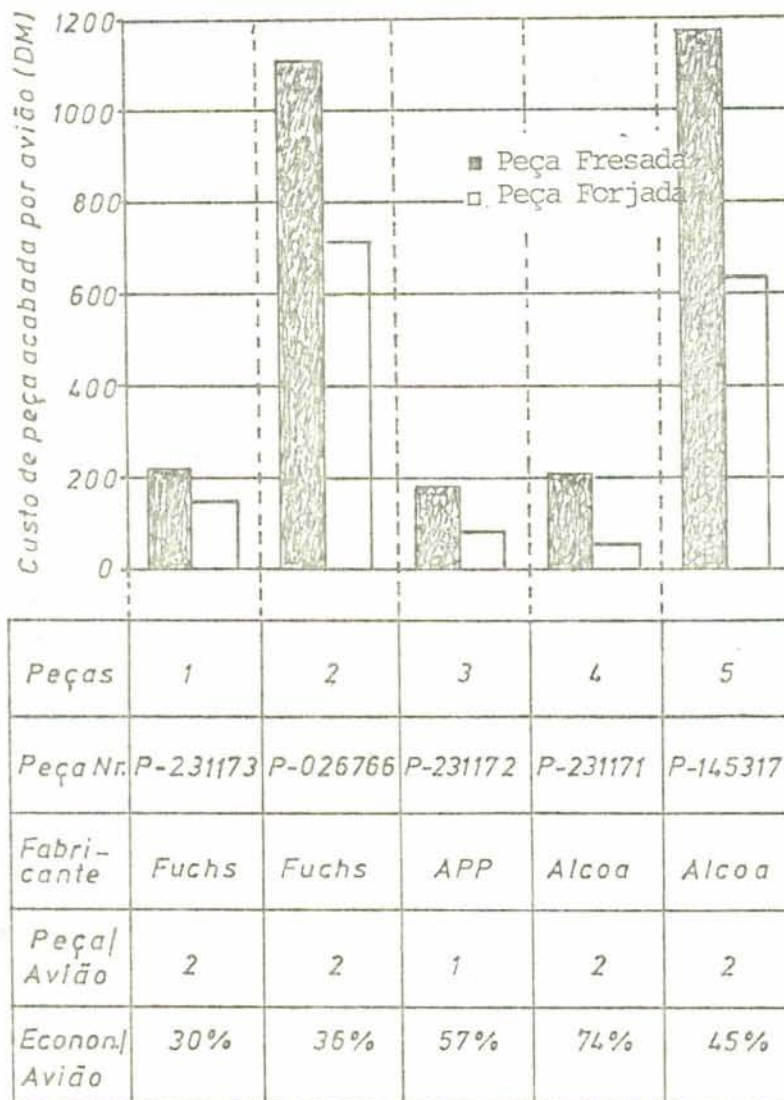
Tab. 2.1 - Valores de resistência à deformação (k_w) típicos em forjamento de precisão de palhetas de compressor feitas em TiAl6V4 /2.4/

PROCESSO	k_w (N/mm ²)
Convencional	1200
Quase-isotérmico	700
Isotérmico	150
Superplástico	40



Dimensões	Dimensões requeridas	Aço M2	Titânio	Liga Molibdênio
b	40 mm	40	40	40
h	32	32	32	32
S_1	6	6	16	25
S_2	2	8	9,5	16
r_3	4	12	18	25
α	5° (10°)	5°	1° (3°)	7°

Fig. 2.5 - Comparação entre possíveis geometrias obtidas entre tres materiais diferentes no forjamento convencional /2.6/



% Custo de peças fresadas em relação à peças forjadas

Fig. 2.6 - Análise comparativa entre peças fresadas e forjadas isotermicamente /2.7/.

Tab. 2.2 - Processos especiais de forjamento e seus objetivos /2.8/

Processo		Economia de Material	Economia de Passes	Melhor aproximação à forma final	Tolerâncias maiores	Melhor acabamento superficial	Melhores propriedades mecânicas
1. Forjamento de Precisão	Qualidade C até B (DIN 7526)			X	X	X	
2. Forjamento sem rebarba	Forjamento em matriz fechada	X					
3. Forjamento de pó (combinado em geral com o processo 2)	Biletes sinte_rizados	X	X		X		
4. Forjamento mor_no	Temperatura de forjamento entre 600 e 900°C				X	X	X
- em combina_ção com o pro_cesso 2		X			X	X	
- em combinação com os pro_cessos 2 e 3		X			X	X	
5. Forjamento iso_térmico	Temperatura de ferramentas = temperatura da peça	X	X	X			
6. Forjamento pro_gressivo	Forjamento por partes			X			
7. Tratamento ter_mo-mecânico							X

Abaixo são citadas algumas vantagens do forjamento isotérmico sobre o forjamento convencional:

1. menor compressão devida às altas temperaturas e menores velocidades de deformação (menor pressão sobre processos convencionais de forjamento). Isto torna possível o uso de prensas menores ou a produção de peças de maior porte /2.5/;
2. obtenção de peças com qualidade superior em relação às forjadas convencionalmente, por não haver necessidade de usinagem posterior (não há corte das fibras);
3. boa qualidade superficial (menor possibilidade da incidência de trincas);
4. menor gasto de material devido à produção de peças com tolerâncias menores. Essa economia de matéria-prima pode chegar a 50% na redução do custo;
5. redução do custo operacional (uma peça pelo processo convencional necessita passar por duas ou três matrizes diferentes, enquanto que no forjamento isotérmico é necessária, em geral, apenas uma matriz).

É evidente que essa nova técnica também traz consigo algumas desvantagens em relação ao processo convencional, como, por exemplo, problemas relacionados com a temperatura. É o caso do forjamento da maioria das ligas de titânio, onde a temperatura de forjamento se situa na faixa de $920^{\circ}\text{C} \pm 40^{\circ}\text{C}$, por isso é necessário que o aquecimento das ferramentas seja dessa ordem. As ferramentas adequadas a esse processo devem então ser construídas com materiais de alta resistência a quente (ligas à base de níquel e ligas à base de molibdênio /2.6/).

Outras desvantagens do processo podem ainda ser mencionadas:

- maior desgaste das ferramentas, devido ao trabalho em altas temperaturas;
- custo maior das instalações, devido ao aquecimento das matrizes (no caso de ligas de alumínio não é significativo). São necessárias instalações especiais para um controle rígido da temperatura;

- com as ferramentas desenvolvidas até o momento não é de nosso conhecimento o uso do forjamento isotérmico na fabricação de peças de aço.

3. MODELOS DE CÁLCULO DE FORÇA

Para a aplicação dos modelos de cálculo de força devem ser considerados alguns parâmetros que influenciam os resultados obtidos. Um dos parâmetros mais importantes para o cálculo de força é a resistência ao escoamento (k_f). A resistência ao escoamento, é por definição, aquela tensão que provoca o escoamento do material num estado uniaxial de tensões. A resistência ao escoamento, é função da deformação (φ), da velocidade de deformação ($\dot{\varphi}$), da temperatura (ν) do material a ser utilizado e de seu histórico (procedência do material, microestrutura, etc.). O método de determinação de k_f será abordado no capítulo seguinte (Cap. 4).

A resistência ao escoamento em um processo onde o estado de tensões em geral não é uniaxial e entram em consideração outros fatores, como o atrito e a geometria das ferramentas, denomina-se de resistência à deformação (k_w) /4.1/. Esse conceito é usado em alguns modelos de cálculo.

A seguir, são mostrados os tres modelos analisados nesse trabalho:

3.1. Modelo de T. Altan (método simplificado de tiras) /3.1/

O método utilizado por T. Altan tem sido usado para previsão de forças e tensões com aceitável precisão. Para esta finalidade, a peça é dividida em vários planos e secções aximétricas, e então equações simplificadas são usadas para prever a pressão média e a força para cada secção, antes que todos os componentes das forças sejam somados.

Este método, quando utilizado na previsão de forças de forjamento, é baseado num modelo simplificado, conforme fig. 3.1. Nesta análise, a cavidade tem uma forma retangular e a geometria da rebarba é representada conforme a fig. 3.1.

Para a peça em questão neste trabalho, a altura final é definida por h_1 , o raio por r , a espessura da garganta da rebarba por h e a largura da garganta da rebarba por x . As tensões em vários pontos da secção transversal, e também a força, podem ser estimadas através dos seguintes parâmetros: a tensão de escoamento (k_f), o fator de atrito m (depende do material e tipo de lubrificante) e a resistência à deformação k_w , que é definida pela seguinte expressão:

$$k_w = \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \cdot m \cdot \frac{x}{h} + 1 \right) k_f \quad (3.1)$$

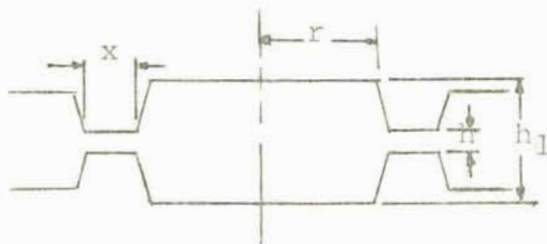


Fig. 3.1 - Esquemática de uma matriz fechada de forjamento, segundo Altan /3.1/

A força que atua na região da rebarba, q_A , é obtida através da expressão:

$$q_A = 2\bar{w}k_f \left[\frac{2}{3} \frac{m}{\sqrt{3}} \frac{1}{h} (R^3 - r^3) + \left(1 + 2 \frac{m}{\sqrt{3}} \frac{R}{h} \right) \left(\frac{R^2 - r^2}{2} \right) \right]$$

Onde: $R = r + x$.

(3.2)

Analogamente, a força que atua na cavidade, q_{CA} , pode ser obtida através de:

$$q_{CA} = 2\pi r^2 \left(\frac{m}{\sqrt{3}} \cdot \frac{k_f}{3} \cdot \frac{r}{h_1} + \frac{k_w}{2} \right) \quad (3.3)$$

A força total na secção transversal q é definida como:

$$q = q_A + q_{CA} \quad (3.4)$$

3.2. Modelo de Haller /3.2/

Haller considerou a peça a ser conformada de acordo com a fig. 3.2, onde pode-se imaginar que nas secções transversais A_3 e A_4 surgem forças de cisalhamento. Os grandes ângulos de inclinação na parede da matriz (α_1) e na superfície de prensagem (α_2) seguram o material na matriz com firmeza. O material permanece fixo dentro da matriz, mas sai pela garganta da rebarba, uma vez que procura o caminho de menor resistência. Ele está em estado plástico apenas na parte tracejada. A transição da parte plástica à parte rígida ocorre sobre o plano de cisalhamento T-S, onde atua a tensão de cisalhamento τ máx.

O corpo tem a largura b perpendicular sobre o plano da figura. A lamela (tracejada em cruz), a qual se encontra à distância y do eixo de simetria, tem a espessura dy e a largura b , portanto a superfície comprimida é $dF=b \cdot dy$.

Esquemáticamente:

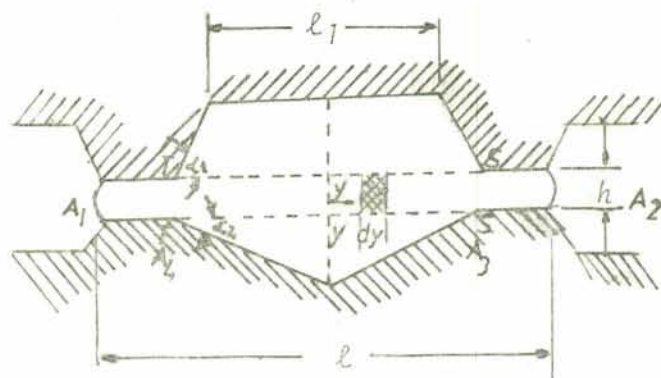


Fig. 3.2 - Representação esquemática das dimensões geométricas da equação (3.14)

Sobre a lamela apresenta-se na vertical a velocidade da ferramenta $v = - dh/dt$ e além disso na horizontal a velocidade $u = dy/dt$. Entre o eixo de simetria do corpo e a lamela encontra-se o volume $V = b.h.y$. Visto que este volume permanece constante durante a conformação, temos:

$$\dot{V} = b (hu + yv) \quad (3.5)$$

Desta forma a velocidade na horizontal será:

$$u = \frac{y}{h} \cdot v \quad (3.6)$$

Na lamela comprimida atua a tensão de cisalhamento $tk = k_f/2$ de acordo com o critério de Tresca, portanto a força de cisalhamento é:

$$q_p = dF \cdot tk = b \cdot dy \cdot tk \quad (3.7)$$

Conseqüentemente a potência externa de cisalhamento será:

$$L_s = q_p \cdot u = q_p (y/h) \cdot v = b \cdot dy \cdot tk (y/h) \cdot v \quad (3.8)$$

Para as quatro áreas de cisalhamento, sendo $tk = \text{cte}$ (material comporta-se como plástico ideal) teremos:

$$\begin{aligned} L_s &= 4 \int_0^{l/2} q_p \cdot u = -4 \int_0^{l/2} b \cdot dy \cdot tk (y/h) \cdot v \\ &= -4 \cdot tk (v/h) b \int_0^{l/2} y \, dy \end{aligned} \quad (3.9)$$

$$L_s = -(1/2) tk (v/h) \cdot b \cdot l^2 \quad (3.10)$$

A resistência à deformação k_w em todo o comprimento " l " deve apresentar uma potência contra a velocidade v da ferramenta dada por:

$$L_w = k_w \cdot l \cdot b \cdot v \quad (3.11)$$

Relacionando a potência total ($L_w + L_s$) com o volume $V = b \cdot h \cdot l$, obtém-se a potência média por unidade de volume:

$$L_{A1} = \frac{v}{h} (k_w - 1/2 \frac{l^2}{l \cdot h} \cdot tk) \quad (3.12)$$

A potência média por unidade de volume na conformação livre é:

$$L_{A2} = 2tk \cdot v/h = k_f \cdot \psi \quad (3.13)$$

De acordo com os pressupostos da teoria elementar da plasticidade, as equações (3.12) e (3.13) são iguais, onde $tk = k_f/2$, portanto a resistência à deformação poderá ser expressa por:

$$k_w = k_f \left[1 + (1/4) \cdot \frac{l^2}{l \cdot h} \right] \quad (3.14)$$

Utilizando k_w da expressão (3.14), a força de forjamento será dada por:

$$q = A_c \cdot k_w \quad (3.15)$$

3.3. Modelo de Reicherter /3.3/

Reicherter apresentou um modelo considerando os fatores intervenientes mais importantes como o atrito, as tensões atuantes na rebarba e no centro da peça. Este modelo baseia-se na teoria elementar e a aplicação consiste na análise de cada tira da peça forjada.

A fig. 3.3 mostra uma peça sobre a qual se aplicou o modelo de Reicherter

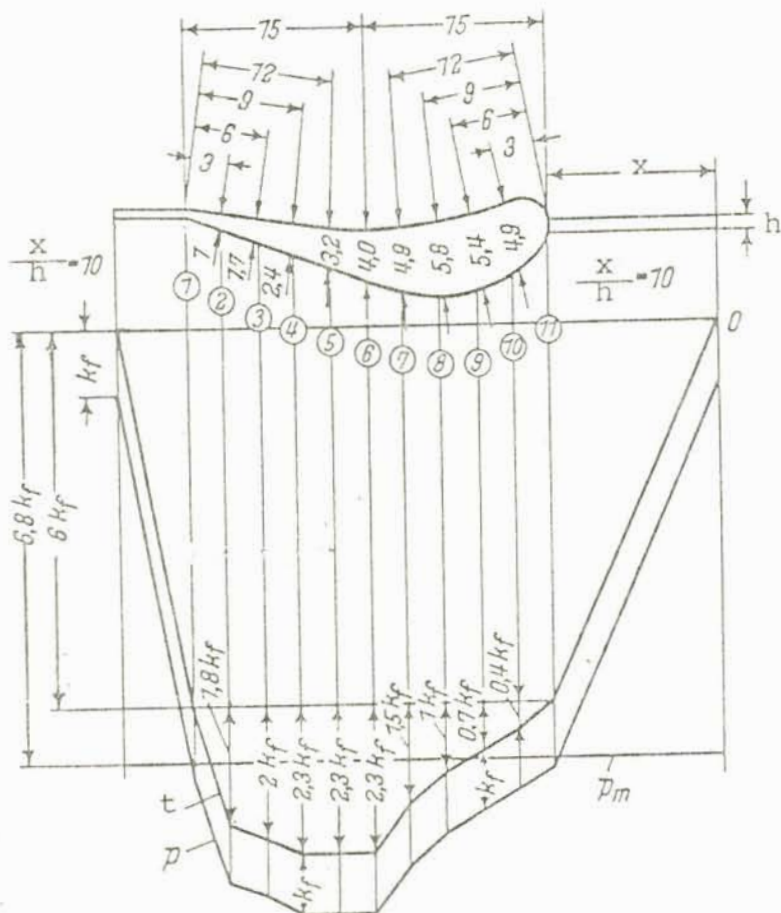


Fig. 3.3 - Peça forjada com aplicação do modelo de Reicherter /3.3/

Considerando que em cada tira atue uma tensão dada por:

$$t's = k_f \cdot 2 \cdot \mu \cdot x/h \quad (3.16)$$

onde:

k_f é a resistência ao escoamento, que depende da temperatura;

μ é o coeficiente de atrito de Coulomb vigente nas condições do teste, e tomado igual a 0,3 neste trabalho; finalmente x/h é a razão entre a largura e a altura de cada tira analisada.

Tendo-se $t's$ para cada tira, e considerando-se a tensão atuante na zona da rebarba, como expressa por:

$$t_A = k_f \cdot 2 \cdot \mu \cdot x/h \quad (3.17)$$

onde:

x é a largura da garganta da rebarba

h é a espessura da mesma

Tem-se que a tensão resultante, que leva em conta esses dois parâmetros, será dada por:

$$t_s = t'_s + t_A \quad (3.18)$$

A tensão que leva em conta a resistência ao escoamento, é dada por

$$P_s = k_f + t_s \quad (3.19)$$

Utilizando o valor desta tensão, tem-se o valor de P_m que é a tensão média calculada por planimetragens ou integração da área, que será utilizada na expressão:

$$q = A_c \cdot P_m \quad (3.20)$$

onde:

A_c é a área de contato da peça forjada, e a expressão permite calcular a força necessária para forjar.

4. RESISTÊNCIA AO ESCOAMENTO

4.1. Aspectos Gerais

Nesse capítulo descreve-se a obtenção, para a liga trabalhada da curva de escoamento que fornece a resistência ao escoamento em função da deformação, da velocidade de deformação e da temperatura. O teste empregado para a construção das curvas de escoamento foi o ensaio de compressão, por ser o que proporciona maiores faixas de deformação /4.1/.

Para a construção das curvas de escoamento, foram levados em conta neste trabalho dois parâmetros importantes: a variação da temperatura e a variação da velocidade de deformação. Com os dados obtidos dos ensaios experimentais, foi feita uma comparação com os dados fornecidos por duas referências bibliográficas.

4.2. Material Analisado

A liga AlMgSi 1 da norma DIN usada nos testes de compressão, e posteriormente usada nos testes de forjamento, pertence ao grupo de ligas endurecíveis por precipitação /4.2/, ou seja, pode ser submetida a um tratamento térmico de solubilização e envelhecida artificialmente tendo suas aplicações típicas em estruturas, peças forjadas e peças usinadas. Também possui um grande emprego na indústria automobilística e aeronáutica /4.3/, /4.4/.

A tab. 4.1 mostra as características principais da liga AlMgSi 1 utilizada nos ensaios.

Tab. 4.1 - Características da liga AlMgSi 1

Componentes	Quantidade (%)
Cu	0,10
Mg	0,55
Mn	0,50
Ti	0,20
Si	1,00
Outros	cada - 0,05 total - 0,15
Fe	0,50

A Tab. 4.2 mostra as propriedades da liga AlMgSi 1.

Tab. 4.2 - Propriedades da liga AlMgSi 1 /4.3/

Material	Tempera	Limite resist. à tração N/mm ²	Limite escoam. N/mm ²	Alongamento 50mm(%)	Dureza Brinel 500/10 N/mm ²	Limite resist. cisalhamento N/mm ²	Resistência à fadiga 500x10 ⁶ ciclos (N/mm ²)
AlMgSi 1	0	126	56	25	-	-	-
	T4	253	155	20	600	155	(95)
	T6	323	302	13	950	205	(95)

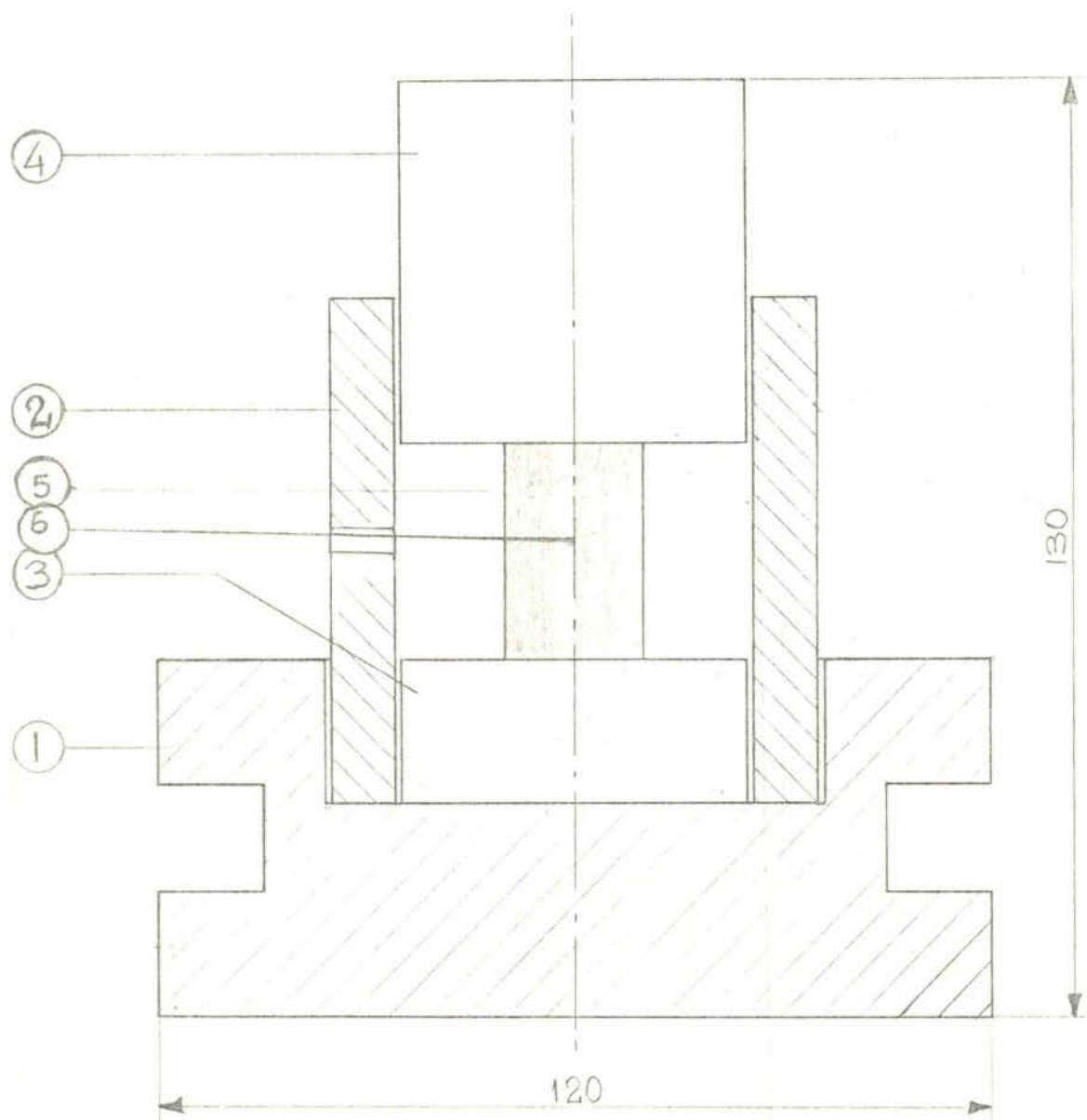
4.3. Construção das curvas de escoamento a quente

A fig. 4.1 (a, b, c, d) mostra o dispositivo construído no Laboratório de Conformação Mecânica para a obtenção das curvas de escoamento a quente. A fig. 4.2 mostra uma foto de montagem do dispositivo. Os equipamentos utilizados para estes testes, foram os seguintes:

- dispositivo de compressão;
- máquina universal de ensaios "Kratos" operada em escala de 5 ton;
- registrador (x,t) tipo potenciométrico, marca HCB
- relógio comparador;
- forno mufla Heavy Duty para o aquecimento isotérmico do conjunto peça-dispositivo;
- ponte amplificadora tipo KWS/T-5, marca HBM
- sistema indutivo para medir deformação;
- registrador X-Y, marca Hewlett-Packard
- termopares tipo K (cromel-alumel).

Os corpos-de-prova com o dispositivo de compressão foram colocados no forno até atingirem a temperatura desejada em todos os testes.

A temperatura foi medida através do Termopar que estava adaptado ao corpo-de-prova para cada teste realizado, conforme posição (6) (fig. 4.1).



* medidas em mm

Fig. 4.1 (a) - Vista frontal em corte do dispositivo de compressão.

1. Base do dispositivo.
2. Parede da câmara isotérmica.
3. Bolacha de compressão.
4. Estampo
5. Corpo-de-prova.
6. Posição do termopar

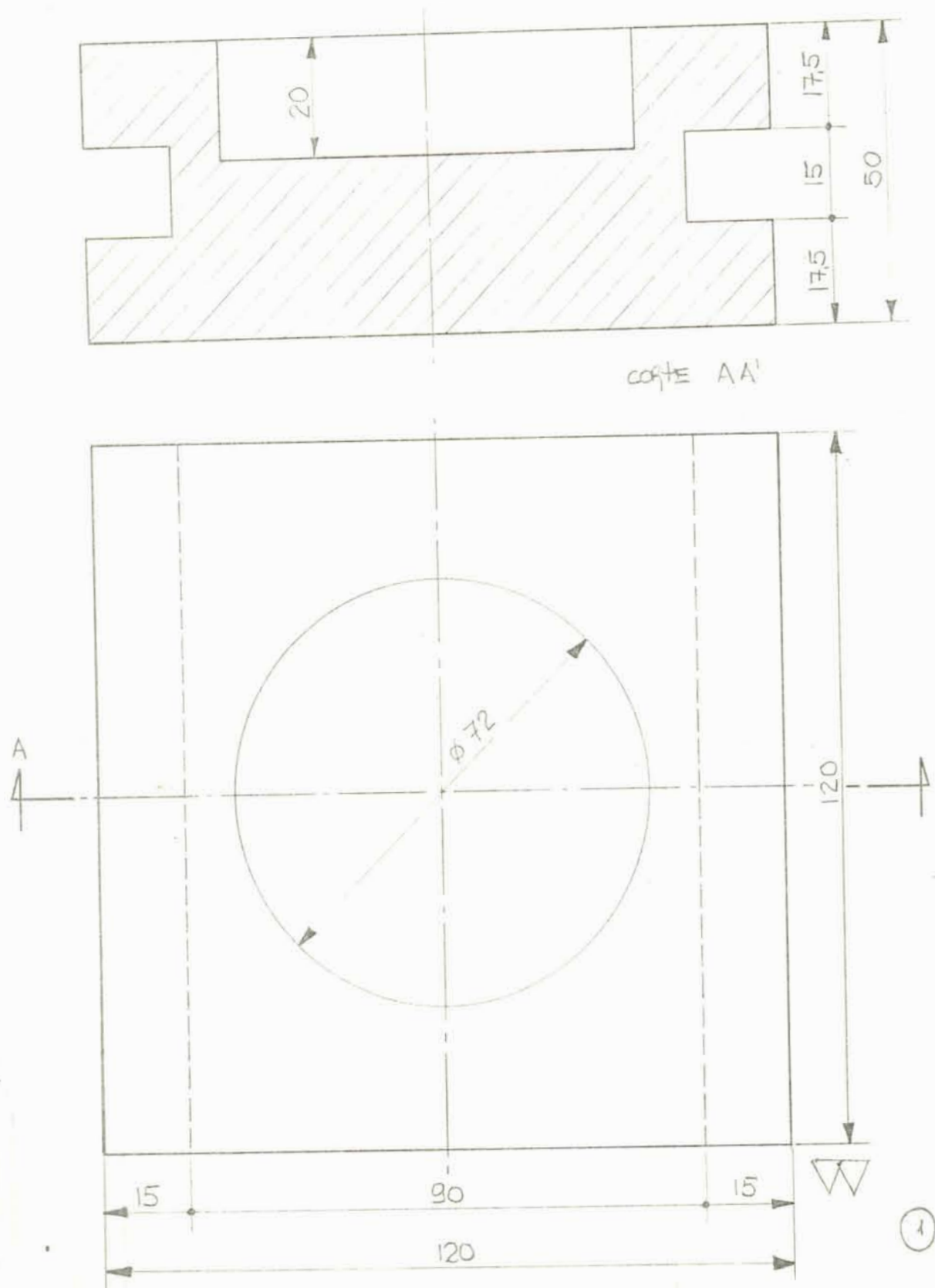


Fig. 4.1 (b) - Vista em corte da base do dispositivo de compressão

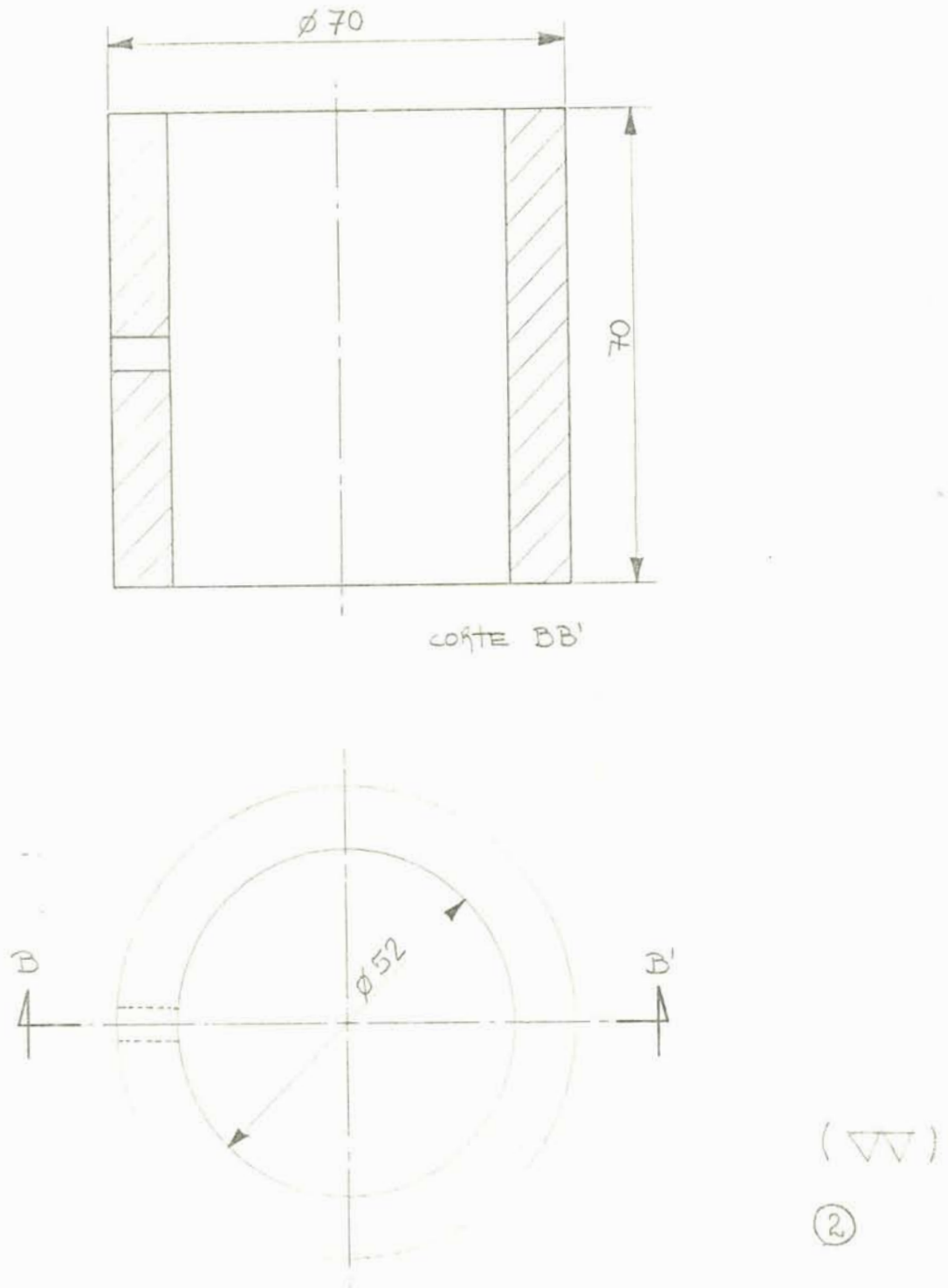


Fig. 4.1 (c) - Vista em corte da câmara isotérmica do dispositivo de compressão.

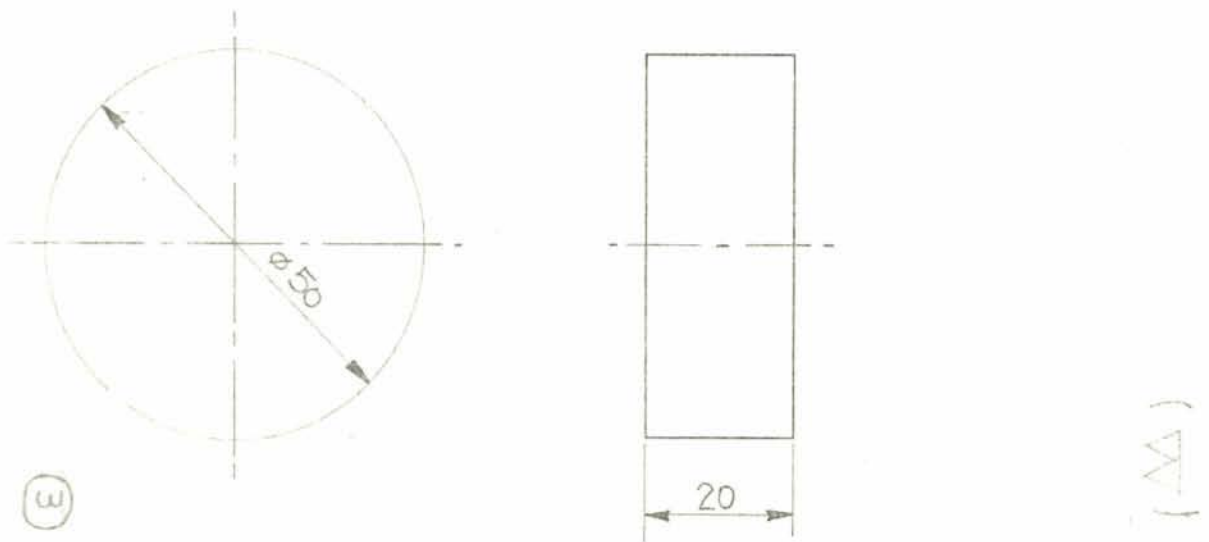
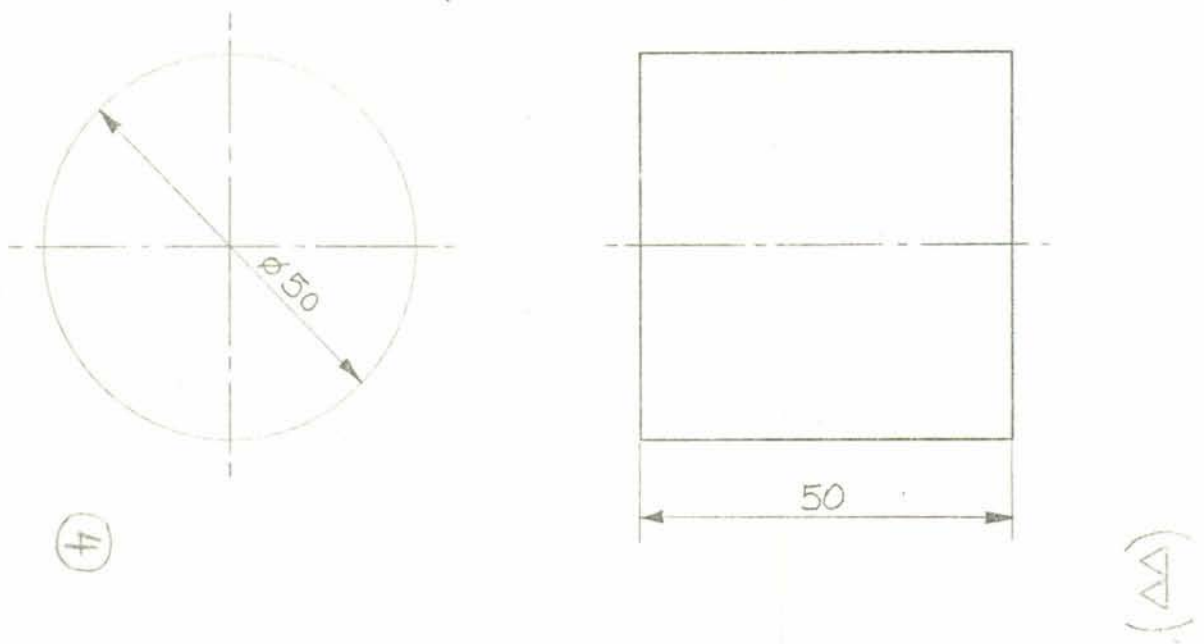


Fig. 4.1 (d) - Vista das dimensões da bolacha de compressão e do estampo do dispositivo.

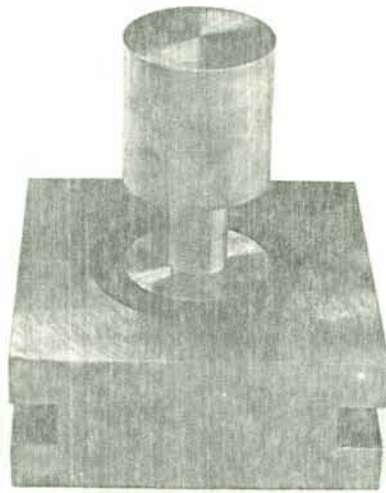
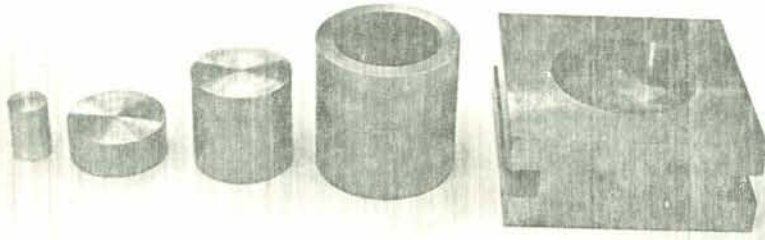


Fig. 4.2 - Foto do dispositivo de compressão.

Atingida a temperatura desejada, o conjunto foi retirado do forno e submetido ao ensaio de compressão. Os valores de deformação foram medidos através do sistema indutivo que estava ligado a uma ponte amplificadora. A força foi medida através de uma célula de carga que também estava ligada a uma ponte amplificadora. Esta célula de carga está acoplada à própria máquina de ensaio.

Tanto a força como a deformação foram registradas em um registrador X-Y e estes dados, posteriormente, foram utilizados para a montagem das tabelas 4.3, 4.4, 4.5, 4.6, 4.7 e 4.8.

Com a força registrada calculou-se o valor da resistência ao escoamento (k_f) através da lei da constância de volume, utilizando-se a área em cada instante do ensaio (A_i) aplicando-se a expressão $k_f = F/A_i$.

A deformação logarítmica (ψ) foi calculada através da expressão $\psi = \ln h_i/h_o$ onde h_i apresenta a altura em cada instante do ensaio e h_o é a altura inicial do corpo-de-prova.

A fig. 4.3 mostra esquematicamente a montagem de equipamentos para o registro da força, do deslocamento e das temperaturas vigentes nos testes.

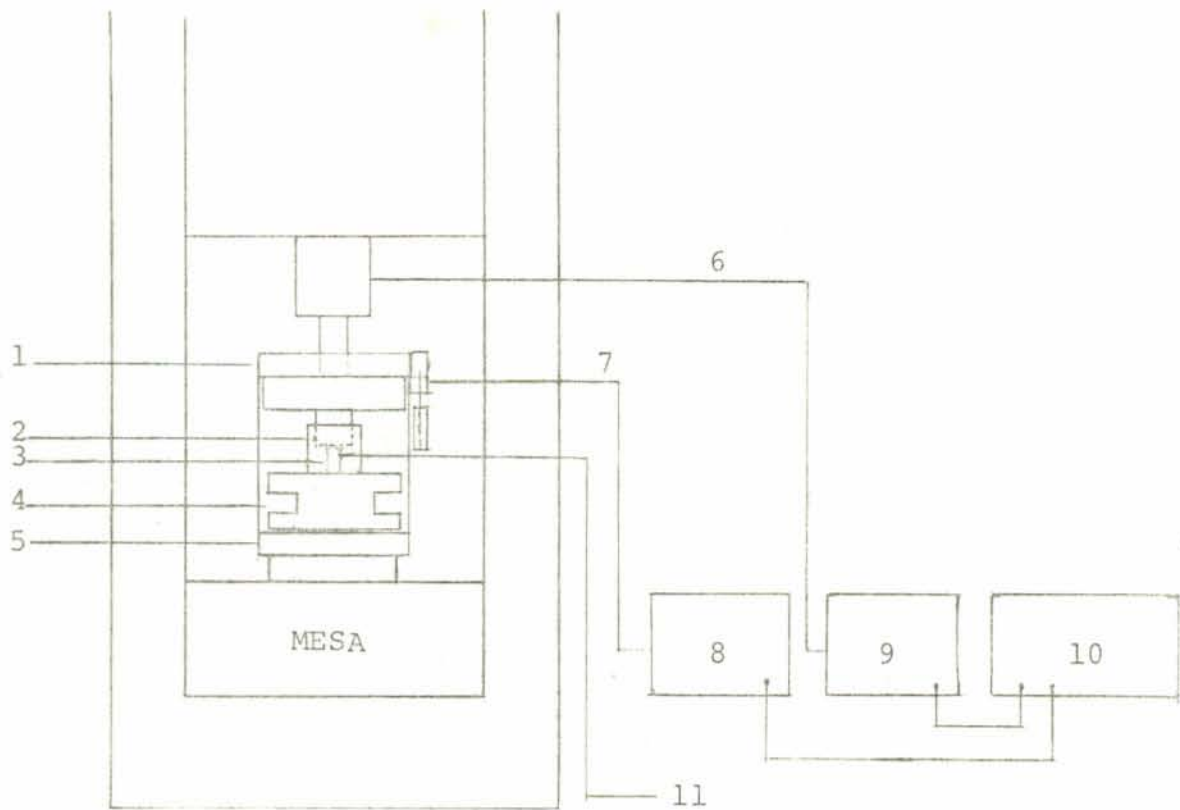
Todos os testes de compressão foram realizados dentro da faixa de temperatura de conformação da liga utilizada, ou seja, de 460° a 520°C /4.4/.

4.4. Resultados Obtidos

4.4.1. Influência da temperatura

Para os primeiros testes, foram utilizadas temperaturas iniciais de ensaio variáveis (465°C , 505°C , 515°C) e velocidade de prensagem constante (100mm/min).

As tabelas 4.3, 4.4 e 4.5 mostram os resultados obtidos para a construção das curvas k_f em função de ψ com v e $\dot{\psi}_m$ constante. Os valores apresentados em todas as tabelas correspondem aos resultados mais significativos de vários testes realizados. Os valores de $\dot{\psi}_m$ foram tomados como a média aritmética entre os valores obtidos das expressões $\dot{\psi}_o = v/h_o$ para o início do ensaio e $\dot{\psi}_f = v/h_f$ para o final do ensaio.



- 1 - Placa da máquina com isolamento de amianto
- 2 - Estampo do dispositivo de compressão
- 3 - Corpo-de-Prova
- 4 - Base do dispositivo de compressão
- 5 - Placa da base da máquina com isolamento de amianto
- 6 - Célula de carga
- 7 - Sistema indutivo
- 8 - Ponte amplificadora
- 9 - Ponte amplificadora
- 10 - Registrador X-Y
- 11 - Termopar para medição de temperatura

Fig. 4.3 - Esquematização da montagem dos equipamentos.

Tab. 4.3. Valores obtidos no ensaio nº 1.

Δh (mm)	hf (mm)	Ai (mm ²)	k_f (N/mm ²)	φ [-]
0,129	26,8	315,6	3,9	0,00478
0,258	26,7	317,1	7,8	0,0096
0,387	26,6	318,7	13,3	0,0144
0,516	26,4	320,2	17,9	0,0192
0,645	26,3	321,8	21,3	0,0241
0,774	26,2	323,4	22,4	0,0290
0,903	26,0	325,0	22,5	0,0340
1,03	25,9	326,6	22,5	0,0388
1,93	25,0	338,3	23,0	0,0741
2,58	24,4	347,3	23,3	0,100
3,22	23,7	356,7	23,4	0,126
5,8	21,2	400,1	23,7	0,241
6,45	20,5	412,7	23,9	0,272
7,74	19,2	440,4	23,8	0,337
8,38	18,6	455,5	23,8	0,371
9,03	17,9	472,0	23,8	0,407
10,32	16,6	508,5	23,7	0,481
10,96	16,0	528,8	23,8	0,520
12,25	14,7	575,0	23,9	0,604
12,9	14,1	601,5	24,1	0,649

ensaio nº 1

ho = 27 mm

do = 20 mm

 $\vartheta = 465 \pm 4^\circ\text{C}$ $v = 100 \text{ mm/min} \pm 1\%$ $\dot{\varphi}_m = 0,08 \text{ s}^{-1}$

Tab. 4.4. Valores obtidos no ensaio nº 2.

Δh (mm)	hf (mm)	A_i (mm ²)	k_f (N/mm ²)	φ [-]
0,066	27,9	314,9	3,9	0,0025
0,133	27,8	315,7	7,1	0,0050
0,26	27,7	317,1	13,4	0,0093
0,4	27,6	318,7	18,0	0,014
0,6	27,4	321,0	19,4	0,021
0,93	27,0	325,3	19,2	0,034
1,6	26,4	333,1	19,5	0,058
2,93	25,0	350,8	20,6	0,110
3,6	24,4	360,5	20,8	0,137
5,6	22,4	392,6	21,0	0,22
9,6	18,4	478,0	20,9	0,419
11,6	16,4	536,3	21,4	0,5
13,6	14,4	610,8	22,0	0,65

ensaio nº 2

ho = 28 mm

do = 20 mm

 $\vartheta = 505 \pm 4^{\circ}\text{C}$ $v = 100 \text{ mm/min} \pm 1\%$ $\varphi_m = 0,08 \text{ s}^{-1}$

Tab. 4.5 . Valores obtidos no ensaio nº 3.

Δh (mm)	hf (mm)	Ai (mm ²)	k_f (N/mm ²)	ψ [-]
0,129	27,8	315,6	3,9	0,00465
0,258	27,7	317,0	7,8	0,00932
0,387	27,6	318,5	10,9	0,0140
0,516	27,4	320,0	14,8	0,0187
0,645	27,3	321,5	16,3	0,0234
0,774	27,2	323,0	16,8	0,0282
0,903	27,0	324,6	16,9	0,0330
1,03	26,9	326,1	17,0	0,0374
1,93	26,0	337,4	17,4	0,0714
2,58	25,4	346,0	17,7	0,0966
3,22	24,7	354,9	17,6	0,122
5,8	22,2	396,2	17,6	0,232
6,45	21,5	408,1	17,7	0,261
7,74	20,2	434,1	17,8	0,323
8,38	19,6	448,34	17,8	0,355
9,03	18,9	463,7	17,7	0,389
10,32	17,6	497,5	17,6	0,459
10,96	17,0	516,2	17,6	0,496
12,25	15,7	558,5	17,9	0,575
12,9	15,1	582,5	18,0	0,61

ensaio nº 3

ho = 28 mm

do = 20 mm

 $\vartheta = 515 \pm 4^\circ\text{C}$ $v = 100 \text{ mm/min} \pm 1\%$ $\dot{\varphi}_m = 0,08 \text{ s}^{-1}$

Baseando-se nos resultados obtidos das tabelas 4.3, 4.4 e 4.5 construiu-se a fig. 4.4 que mostra a influência da temperatura na resistência ao escoamento.

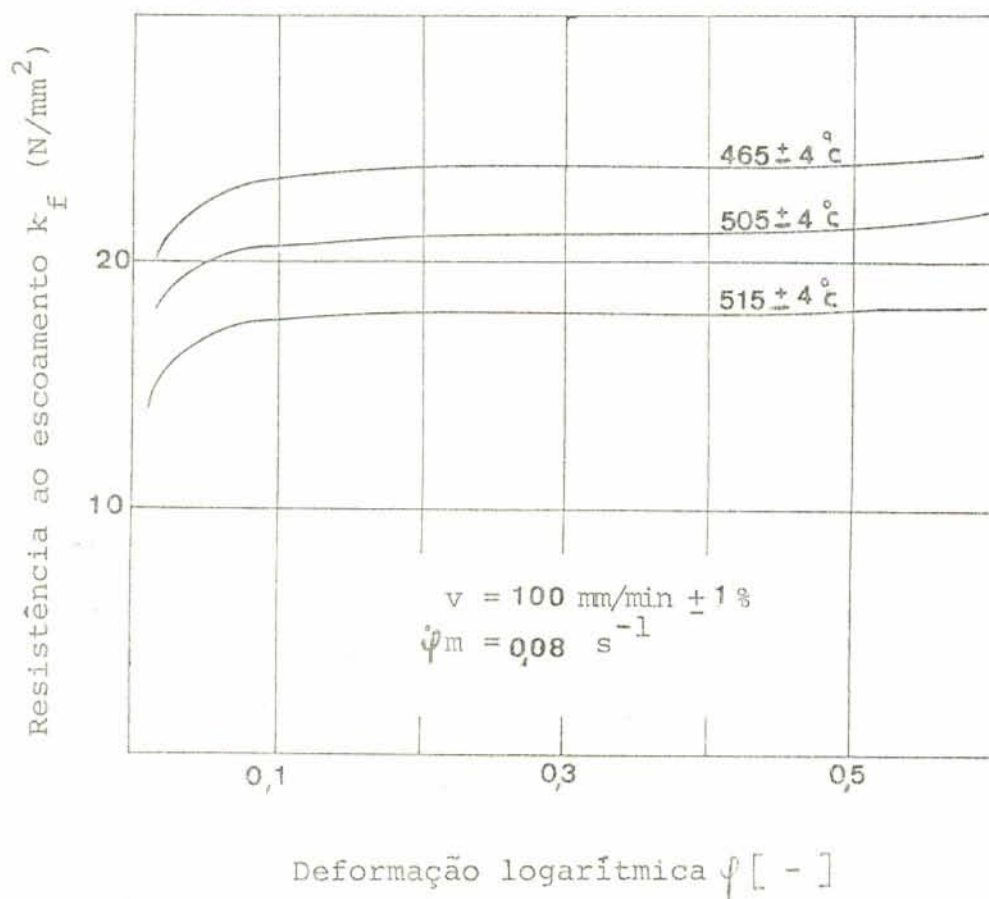


Fig. 4.4 - Curva de escoamento em função da deformação e da temperatura.

Com os resultados obtidos na curva anterior (fig.4.4), obteve-se a fig. 4.5 considerando-se ψ e $\dot{\psi}$ constantes.

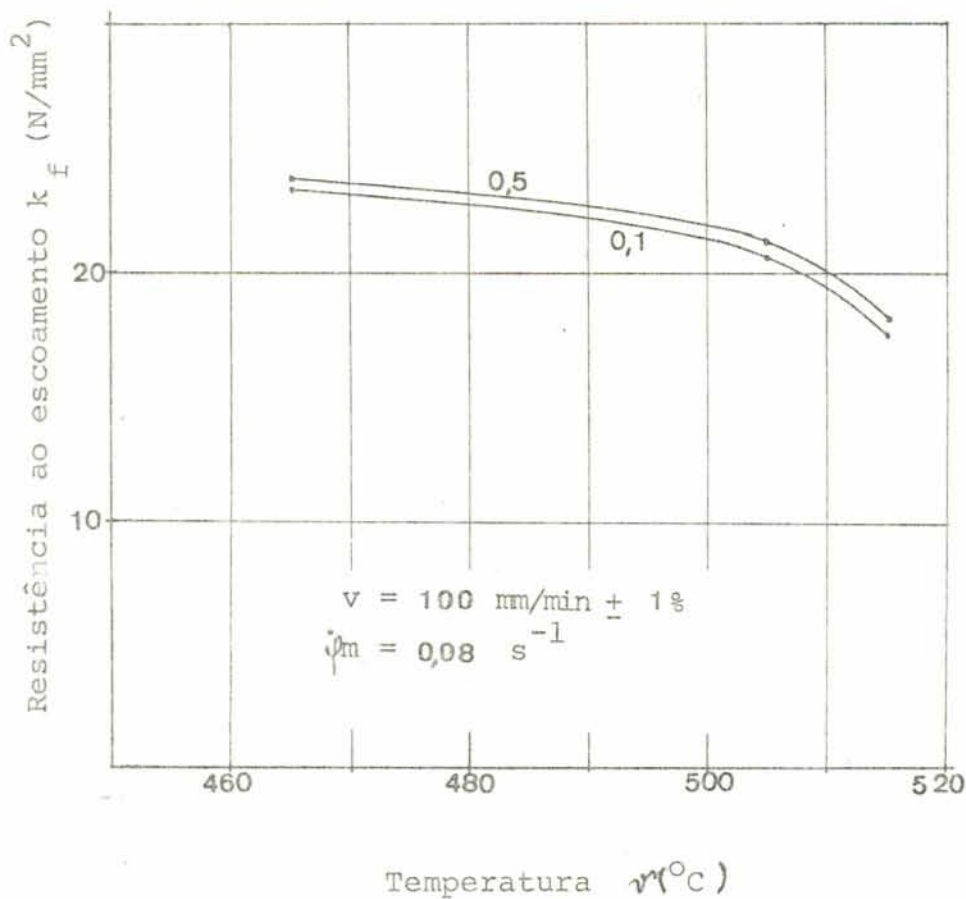


Fig. 4.5 - Curva de escoamento em função da temperatura mantendo-se constante a deformação.

4.4.2. Influência da velocidade de prensagem

Num segundo teste, foram realizados tres ensaios a temperaturas constantes com velocidades de prensagem variáveis (100mm/min, 70mm/min, 50mm/min). Os equipamentos utilizados para estes testes, foram similares aos dos primeiros testes e os ajustes de sensibilidade foram mantidos. As tabelas 4.6, 4.7, 4.8 mostram os resultados obtidos para a construção das curvas k_F em função de ψ .

Os valores apresentados em todas as tabelas, correspondem aos resultados mais significativos de vários testes realizados.

Tab. 4.6. Valores obtidos no ensaio nº 4.

Δh (mm)	hf (mm)	Ai (mm ²)	k_f (N/mm ²)	ψ [-]
0,129	27,8	315,6	11,8	0,00465
0,258	27,7	317,0	17,3	0,00932
0,387	27,6	318,5	20,4	0,0140
0,516	27,4	320,0	21,0	0,0187
1,03	26,9	326,1	22,2	0,0374
1,93	26,0	337,4	22,9	0,0714
2,58	25,4	346,0	23,1	0,0966
3,22	24,7	354,9	23,2	0,122
5,16	22,8	385,1	24,0	0,20
7,74	20,26	434,1	24,7	0,323
9,03	18,9	463,7	24,2	0,389
10,3	17,6	497,53	24,6	0,459
12,2	15,7	558,5	25,0	0,575

ensaio nº 4

ho = 28 mm

do = 20 mm

 $\nu = 460 \pm 4^\circ\text{C}$ (cte.) $\dot{\nu} = 0,05$ a $0,09 \text{ s}^{-1}$ v = 100 mm/min $\pm 1\%$ $\dot{\nu}_m = 0,07 \text{ s}^{-1}$

Tab. 4.7. Valores obtidos no ensaio nº 5.

Δh (mm)	hf (mm)	Ai (mm ²)	k_f (N/mm ²)	ψ [-]
0,129	27,8	315,6	8,7	0,00465
0,258	27,7	317,0	14,9	0,00932
0,387	27,6	318,5	19,6	0,0140
0,516	27,4	320,0	21,0	0,0187
1,03	26,9	326,1	21,4	0,0374
1,93	26,0	337,4	22,2	0,0714
2,58	25,4	346,0	23,1	0,0966
3,22	24,7	354,9	23,2	0,122
5,16	22,8	385,1	23,3	0,20
7,74	20,2	434,1	24,1	0,323
9,03	18,9	463,7	24,2	0,389
10,32	17,6	497,5	24,1	0,459
12,2	15,7	558,5	24,6	0,575

ensaio nº 5

 $h_o = 28$ mm $d_o = 20$ mm $\psi' = 460 \pm 4^\circ\text{C}$ (cte.) $\dot{\psi} = 0,04$ a $0,07$ s⁻¹ $v = 70$ mm/min $\pm 1\%$ $\dot{\psi}_m = 0,06$ s⁻¹

Tab. 4.8. Valores obtidos no ensaio nº 6.

Δh (mm)	hf (mm)	Ai (mm ²)	k_f (N/mm ²)	ψ [-]
0,129	27,8	315,6	11,8	0,00465
0,258	27,7	317,0	19,7	0,00932
0,387	27,6	318,5	20,4	0,0140
0,516	27,4	320,0	20,6	0,0187
1,03	26,9	326,1	21,0	0,0374
1,93	26,0	337,4	21,4	0,0714
2,58	25,4	346,0	21,6	0,0966
3,22	24,7	354,9	21,8	0,122
5,16	22,8	385,1	22,8	0,20
7,74	20,2	434,1	23,0	0,323
9,03	18,9	463,7	22,9	0,389
10,3	17,6	497,5	22,8	0,459
12,2	15,7	558,5	23,0	0,575

ensaio nº 6

$$h_0 = 28 \text{ mm}$$

$$d_0 = 20 \text{ mm}$$

$$T = 460 \pm 4^\circ\text{C} \text{ (cte)}$$

$$\dot{\psi} = 0,03 \text{ a } 0,05 \text{ s}^{-1}$$

$$v = 50 \text{ mm/min} \pm 1\%$$

$$\dot{\varphi}_m = 0,04 \text{ s}^{-1}$$

Com o objetivo de explicar a influência da velocidade de prensagem considerando-se constante a temperatura ($460^\circ \pm 4^\circ\text{C}$) nos valores de k_f e ψ , foram utilizados os resultados das tabelas 4.6, 4.7 e 4.8 para a construção da fig. 4.6.

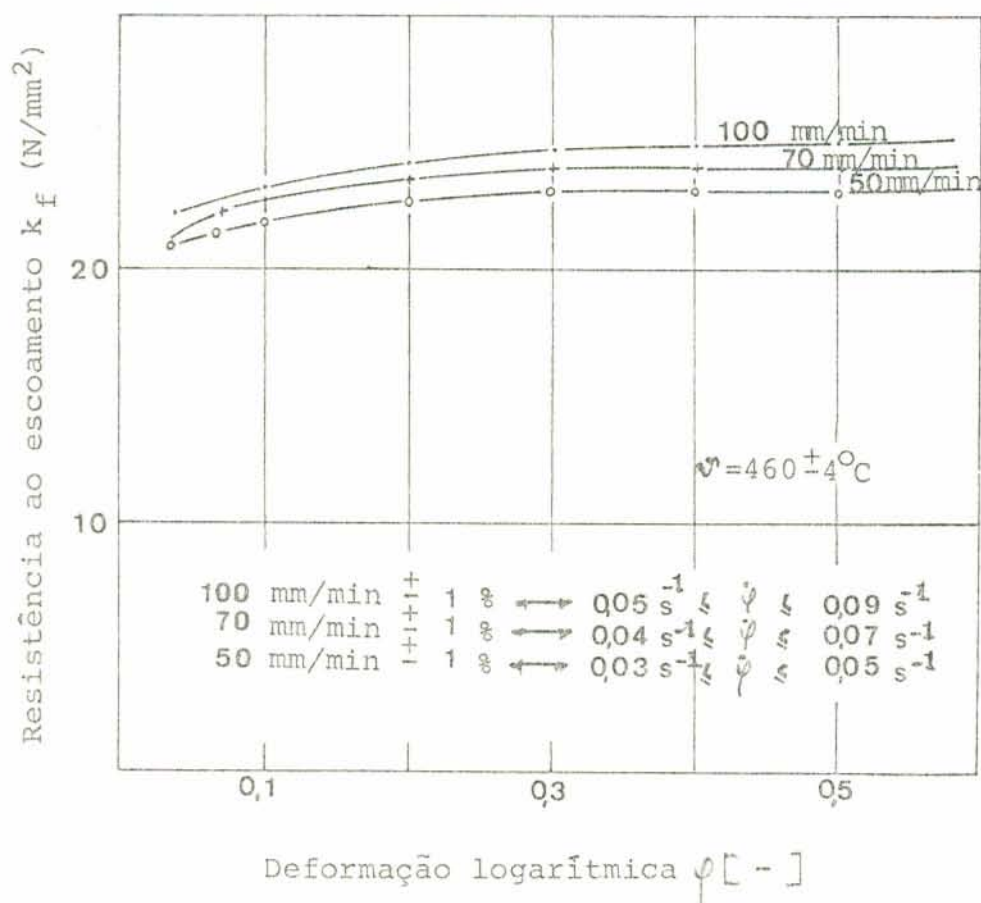


Fig. 4.6 - Curva de escoamento em função da variação da velocidade de deformação

4.5. Comparação dos resultados obtidos com a bibliografia

4.5.1. Comparação dos valores obtidos com os calculados de acordo com Hensel e Spittel

Os resultados obtidos foram comparados com os valores de resistência ao escoamento, fornecidos através de uma equação matemática apresentada por Hensel e Spittel /4.5/ para a liga analisada.

Aplicando-se a equação:

$$\psi) = k_{f_0} L_1 e^{-m_1} \cdot L_2 \psi^{m_2} \cdot L_3 \dot{\psi}^{m_3}, \text{ onde } k_{f_0}$$

L_1, m_1, L_2, L_3, m_3 , são constantes e dependem do material utilizado. Estas constantes assumem os seguintes valores:

$$k_{f_0} = 67,2 \text{ N/mm}^2$$

$$L_1 = 5,114$$

$$m_1 = 0,00429$$

$$L_2 = 1,134$$

$$L_3 = 0,815$$

$$m_3 = 0,089$$

que são fornecidos para a liga AlMgSi 1, comparados com os valores obtidos da fig. 4.5 e tabelados a seguir:

Tab. 4.9 - Comparação de alguns valores de k_f em função da φ e da $\dot{\gamma}$ obtidos experimentalmente, com os valores de Hensel e Spittel /4.5/.

$$\dot{\gamma} = 0,05 \text{ s}^{-1}$$

VALORES OBTIDOS EXPERIM.	$\varphi [-]$			REFERÊNCIA /4.5/	$\varphi [-]$		
	$\dot{\gamma} (^{\circ}\text{C})$	0,1	0,2		0,6	$\dot{\gamma} (^{\circ}\text{C})$	0,1
465 4	23,3	23,9	24,1	465	28,9	30	31,9
505 4	20,0	21,0	22,0	505	24,2	25,2	26,7
515 4	17,6	17,7	18,0	515	21,0	22,1	23,4
$k_f = \text{N/mm}^2$							

Os valores atribuídos na equação retirados da referência /4.5/, referem-se a materiais contendo de 1% à 6% de Mg. Deve-se observar que o teor de Mg no material ensaiado é de 0,4 à 0,9% de Mg.

A fig. 4.7 mostra uma comparação quantitativa entre os dados experimentais obtidos e os calculados pela referência /4.5/:

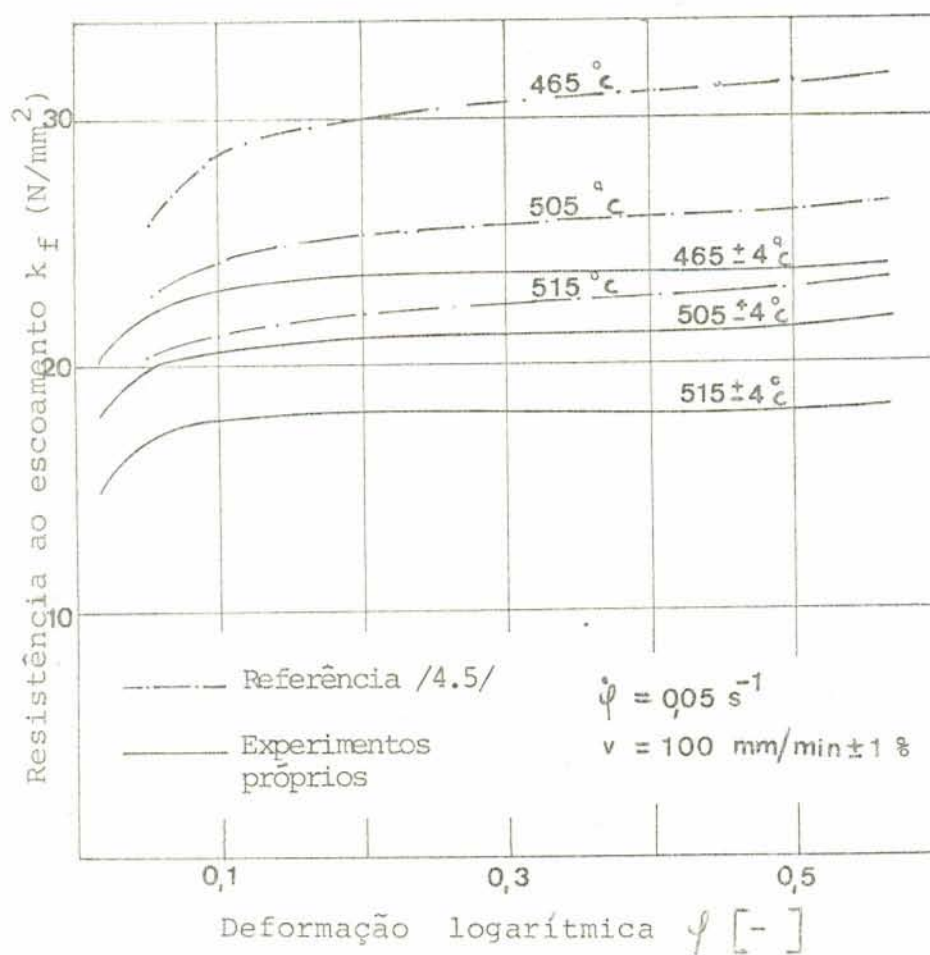


Fig. 4.7 - Comparação de dados experimentais com dados da literatura /4.5/ (equação de Hensel e Spittel).

Considerando-se os valores obtidos experimentalmente para as deformações, e comparando com os valores de Hensel e Spittel resultam as seguintes diferenças percentuais para k_f :

Tab. 4.10 - Representação das diferenças resultantes de k_f , conforme tab. 4.9.

v ($^{\circ}\text{C}$)	ϕ	diferença(%)	v ($^{\circ}\text{C}$)	ϕ	diferença(%)	v ($^{\circ}\text{C}$)	ϕ	diferença(%)
$465^{\pm 4}$	0,1	-19	$505^{\pm 4}$	0,1	-17,6	$515^{\pm 4}$	0,1	-16,5
	0,2	-20		0,2	-16,6		0,2	-19,6
	0,6	-24,5		0,6	-17,4		0,6	-23,2

4.5.2. Comparação dos valores obtidos com os calculados de acordo com Akeret

Os resultados obtidos experimentalmente foram comparados com os valores de Akeret /4.7/, através da tab. 4.11 e da fig. 4.8, que compara os valores de k_f em função de ϕ para uma mesma temperatura, levando-se em conta a variação da composição química da liga utilizada nos testes e sendo ϕ e ψ constantes.

Tab. 4.11- Influência da variação da composição química nos valores de $k_f \times \psi$ mantendo-se constantes $\dot{\psi}$ (s^{-1}) e θ ($^{\circ}C$).

AlMgSi 1

$$\dot{\psi} = 0,05 \text{ s}^{-1}$$

Cu	Fe	Mg	Mn	Si	Ti	Outros	Total	Zn	Al	Ref.	$\dot{\psi}$	k_f (N/mm ²)	θ ($^{\circ}C$)	Fig.
0,10	0,50	0,55	0,50	1,00	0,20	0,05	0,15	-	-	Exper. próprios	0,5 0,5	21,4 17,6	505,4 515,4	4.4 e 4.5
0,009	0,36	0,81	0,30	1,00	0,013	-	-	0,01	rest. /4.7/	/4.7/	0,5	21	500	A ₁ e A ₂
0,009	0,25	0,55	0,50	0,91	0,013	-	-	0,01	rest. /4.7/	/4.7/	0,5	23,7	500	A ₃ e A ₄
0,006	0,22	0,78	0,91	1,01	0,04	-	-	0,01	rest. /4.7/	/4.7/	0,5	33	500	A ₅ e A ₆
0,006	0,25	0,78	-	0,98	0,015	-	-	0,01	rest. /4.7/	/4.7/	0,5	17,2	500	A ₇ e A ₈

As figs. A1, A2, A3, A4, A5, A6, A7 e A8, são referentes ao anexo A. Os resultados apresentados na tabela, referem-se aos anexos A1, A3, A5 e A7.

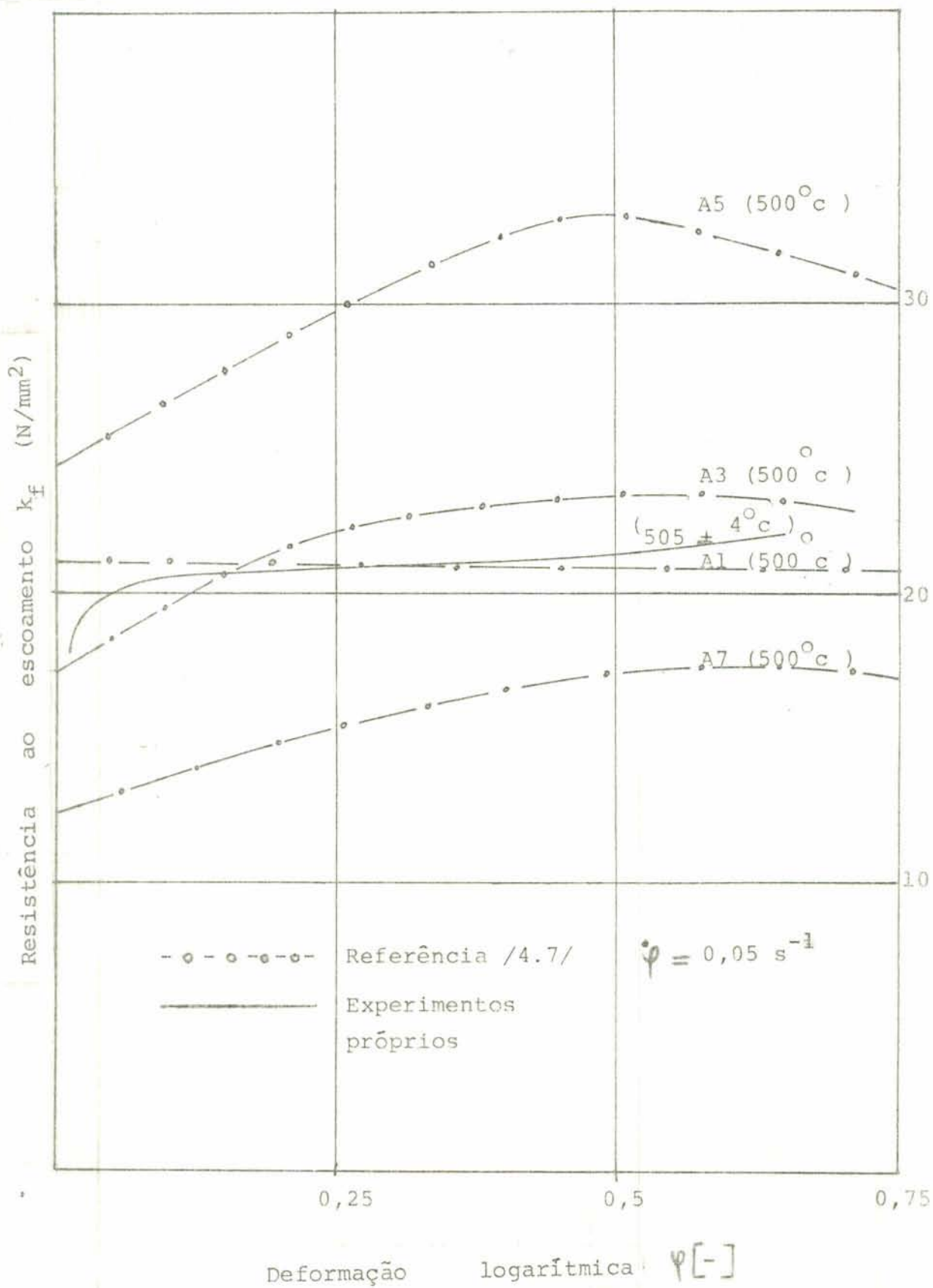


Fig. 4.8 - Comparação de dados experimentais com dados de Akeret

4.5.3. Comparação entre os valores de Akeret e Meyer-Nolkemper

Os valores de k_f e ψ de Akeret /4.7/ foram comparados com os valores de Meyer-Nolkemper /4.8/. Esta comparação foi feita considerando-se as mesmas condições de $\dot{\gamma}$ e $\dot{\nu}$ e estão contidas na tab. 4.12, e o objetivo foi verificar os resultados de k_f nas mesmas condições de ensaio.

Tab. 4.12 - Comparação de alguns valores de Akeret e Meyer-Nolkemper

$$\dot{\gamma} = 3 \text{ s}^{-1}$$

REFERÊNCIA /4.7/	ψ [-]			REFERÊNCIA /4.8/	ψ [-]				
	$\dot{\nu}$ (°C)	0,2	0,5		0,9	$\dot{\nu}$ (°C)	0,2	0,5	0,9
	350	80	75	71		350	75	85	82
	450	50	46	46		450	58	60	50
	500	40	40	38		500	46	46	42
$k_f = \text{N/mm}^2$									

Considerando-se os valores obtidos de Akeret e Meyer-Nolkemper, resultam as seguintes diferenças percentuais para k_f , expressas na tabela abaixo:

Tab. 4.13 - Representação das diferenças resultantes de k_f conforme tab. 4.12

$\dot{\nu}$ (°C)	ψ	diferença (%)	$\dot{\nu}$ (°C)	ψ	diferença (%)	$\dot{\nu}$ (°C)	ψ	diferença (%)
350	0,2	+ 6,0	450	0,2	-16	500	0,2	-15
	0,5	- 13		0,5	-30		0,5	-15
	0,9	- 15		0,9	-9,0		0,9	-10

A tab. 4.14 mostra a composição química da liga AlMgSi 1, utilizada por Akeret e Meyer-Nolkemper

Tab. 4.14 - Comparação química utilizada por Akeret e Meyer-Nolkemper

Elementos (%) Referência	Cu	Mn	Mg	Si	Fe	Zn	Cr	Ti	Pb	Al	Be
/4.7/	0,03	0,92	0,75	1,09	0,31	0,05	0,01	0,01	0,01	rest	-
/4.8/	0,01	0,72	0,91	1	0,31	-	-	0,005	-	-	0,0002

As figuras referentes ao ítem 4.5.3 e que originaram a comparação, estão contidas no Anexo A (figs. A9 e A10 do Anexo A).

5. ANÁLISE EXPERIMENTAL DO FORJAMENTO ISOTÉRMICO

5.1. Considerações Gerais

O forjamento em matriz fechada pode ser realizado com ou sem formação de rebarba (fig. 5.1).

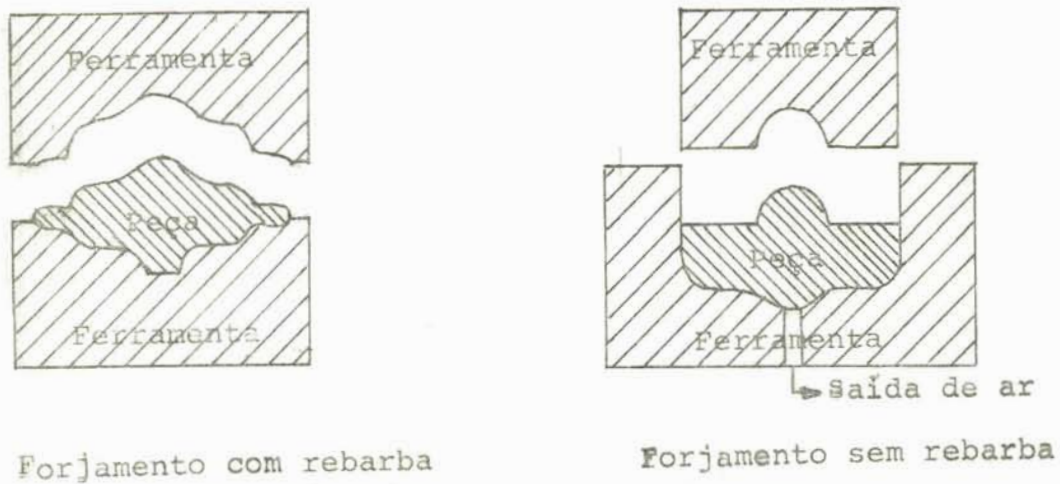


Fig. 5.1 - Representação esquemática do forjamento com e sem formação de rebarba.

Para a realização dos experimentos do presente trabalho optou-se pela construção de uma matriz com formação de rebarba.

Para analisar algumas características do forjamento isotérmico foi usado como material teste a liga AlMgSi 1, por ser a mesma facilmente encontrada no mercado e por ser uma liga empregada para peças forjadas /4.2/.

Inicialmente, foi construída a ferramenta 1 com a qual foram realizadas simulações com plasticina. A fig. 5.2 mostra uma foto de um dos testes em que se empregou plasticina. Foi ainda testado gesso como material modelo, mas os resultados foram insatisfatórios. A plasticina tem sido usada extensivamente como material para simulação /5.1/.

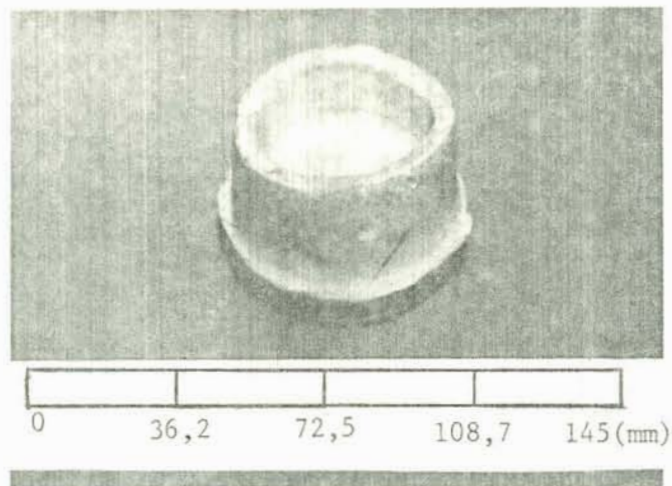


Fig. 5.2 - Teste realizado usando-se plasticina.

Após os testes com o material modelo plasticina, foi dado início aos primeiros ensaios com alumínio. Nesses ensaios verificou-se o preenchimento incompleto da matriz o que nos levou a construir uma segunda ferramenta que formaria uma peça com paredes mais espessas.

5.2. Ferramenta de Teste

A fig. 5.3 mostra uma foto desta ferramenta com o sistema de guia e extratores. A fig. 5.4 mostra a geometria da ferramenta 2 empregada na segunda série de testes.

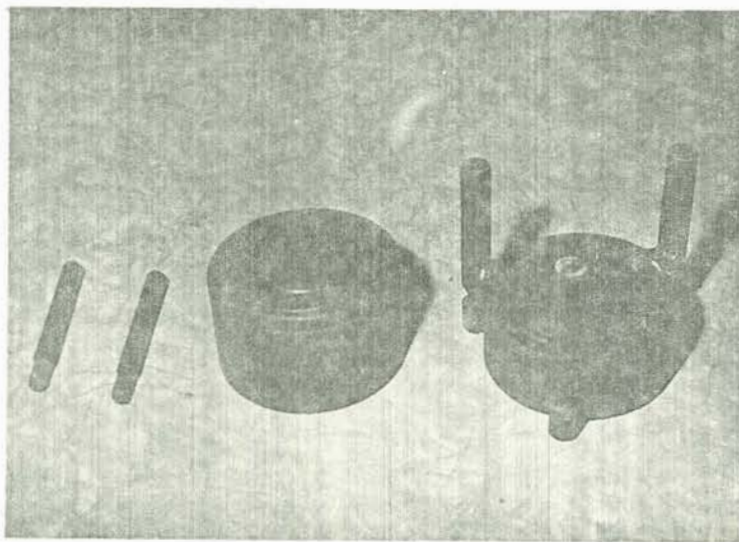
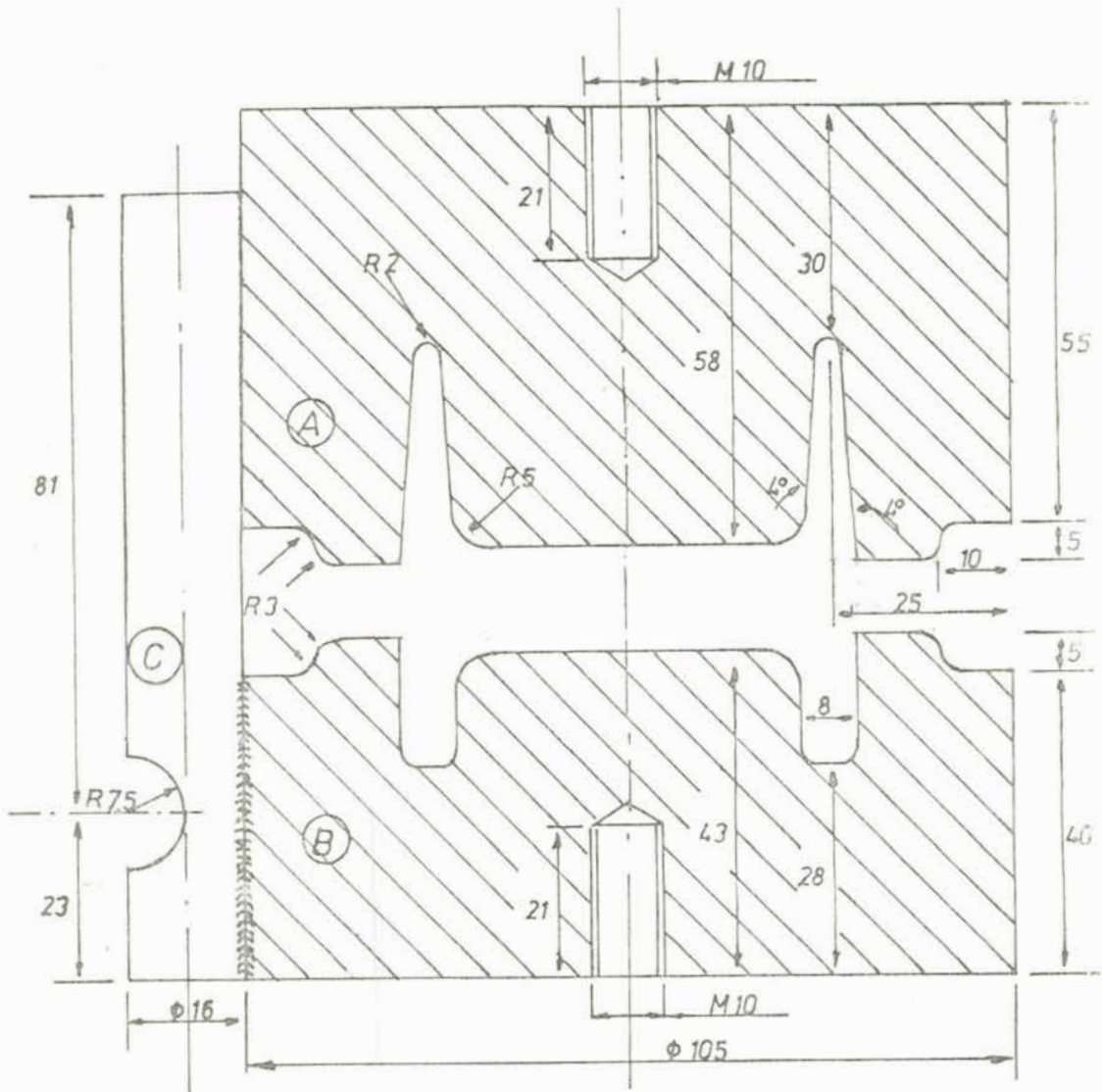
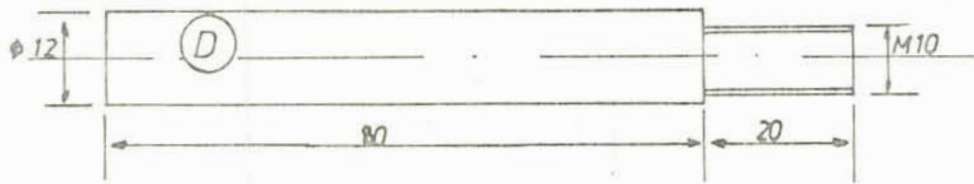


Fig. 5.3 - Foto da ferramenta 2.



- A- Parte superior da ferramenta
 B- Parte inferior da ferramenta
 C- Suporte da tenaz e pino guia



- D- Extratores para desmoldagem das peças

Fig. 5.4 - Geometria da ferramenta 2.

5.3. Características dos Testes

O forjamento isotérmico foi simulado neste trabalho, em que todo o conjunto ferramenta-peça, foi colocado no forno. Após o aquecimento até a temperatura de forja, esse conjunto foi retirado do forno e colocado na máquina de ensaio. Com o auxílio de termopares, foi medida durante o ensaio a temperatura na ferramenta e na peça, sendo que a diferença de temperatura máxima verificada, foi de 10°C . Essa diferença corresponde ao instante de ruptura do Termopar na peça (aproximadamente próximo ao final do ensaio).

Foram realizados os testes com as seguintes características:

a) Ensaio com velocidades não controladas devido às características da máquina de testes, porém com temperaturas controladas. A força de compressão foi a máxima força correspondente à capacidade da máquina (ferramenta 1).

b) Ensaio com velocidades de máquina constante (100mm/min.). As temperaturas foram mantidas constantes durante o ensaio. A força de compressão foi a máxima força correspondente à capacidade da máquina (100kN) (ferramenta 2).

c) Ensaio com temperatura constante durante o ensaio. Variação de velocidades de ensaio para ensaio (100, 70 e 50 mm/min.). A força de compressão foi a máxima força correspondente à capacidade da máquina (100kN) (ferramenta 2).

5.4. Equipamentos utilizados nos testes

Características:

- Máquina de ensaio: Fabricante: VEB WERKSTOFFPRÜFMASCHINEN (ZDM)
Potência ligada: 18 KVA
Ano: 1969
Capacidade: 300kN
- Máquina de ensaio: Fabricante: KRATOS
Precisão: 0,1%
Ano: 1982
Capacidade: 100kN

- Forno elétrico: Fabricante: HEVY DUTY ELETRIC CO
 Temperatura máxima: 700°C
 Voltagem: 230 V
 Potência: 2500 W
 Ciclos: 60

- Registrador Potenciométrico x-y: Fabricante: HEWLETT PACKARD
 Voltagem: 220 V

- Registrador Potenciométrico ECB: Voltagem: 110 V
 Modelo: RB 102
 Freqüência: 60 HZ

- Termopares tipo K: Cromel - Alumel
 Bitola: 1,5 mm

- Multímetro Digital Philips: Modelo: PM 2421/08
 Voltagem: 120 V
 Potência: 20 W
 Freqüência: 50/60 HZ

5.5. Lubrificantes utilizados nos testes

Um dos parâmetros importantes que deve ser analisado no forjamento isotérmico é o da lubrificação.

Nos primeiros testes realizados, notou-se a importância do lubrificante nos resultados obtidos. O primeiro lubrificante a ser testado foi o grafite em pó. Colocou-se o mesmo nas paredes da ferramenta 1 e na peça a ser forjada. Os resultados obtidos não foram muito satisfatórios, já que o material não escoava totalmente para o interior da ferramenta, resultando com isso o preenchimento apenas parcial da ferramenta. Outro aspecto observado durante estes testes com o grafite, foi o acabamento superficial que a peça apresentava no final dos testes. O acabamento superficial apresentou porosidades e aspecto bastante indesejável.

Os testes com grafite em pó, persistiram até a confecção da peça nº 4. As tabelas 6.1, 6.2 e 6.3, do Capítulo Re

sultados Obtidos, mostram a série de ensaios realizados. A partir da peça nº 5, passou-se a utilizar uma mistura de grafite e sabão, numa proporção de 50% (peso). Os resultados obtidos com este tipo de lubrificante foram bem melhores que os obtidos com o lubrificante usado anteriormente. Além do material preencher bem mais a ferramenta, ele escoava também com mais facilidade. O acabamento superficial continuou apresentando um aspecto indesejável.

Paralelamente aos testes que estavam sendo realizados, testava-se outro tipo de lubrificante, no caso óleo. Para estes testes, foi necessário realizar uma pesquisa nas principais forjarias de aço e de alumínio e tentar obter maiores informações. Os resultados dessa pesquisa levaram à seguinte conclusão: cada forjaria usa lubrificação conforme o material utilizado, conforme o equipamento empregado e também, conforme a temperatura de forjamento, utilizando seu próprio lubrificante, fazendo o mesmo, parte de sua própria técnica, muitas vezes pouco ventilado a terceiros.

Os óleos utilizados inicialmente, foram:

Ipirgerol SP: é um óleo lubrificante de alta qualidade.

Os testes com este tipo de lubrificante não deram resultados, pois o mesmo não suportou a temperatura de trabalho.

Dry-Lube: lubrificante utilizado para ferramentas de trefilação. Os resultados não foram satisfatórios.

Molykote (HTF): lubrificante à base de sulfeto de molibdênio e óleo. Os resultados também não foram satisfatórios. O lubrificante entrou em combustão a uma temperatura de 450°C.

Oildag e Deltaforte 79: são óleos lubrificantes utilizados em algumas forjarias de alumínio, na fabricação de peças forjadas, por exemplo, no caso do trem de pouso dos aviões Bandeirantes /5.2/.

Estes lubrificantes foram utilizados diretamente nas ferramentas e peças, e notou-se que os mesmos entravam em combustão bem antes de atingirem a temperatura de forjamento. Conseqüentemente estes testes foram inválidos, persistindo com isso o uso do lubrificante que mais se adaptou nos tes-

tes, no caso, grafite e sabão.

Considerando-se os resultados obtidos com os lubrificantes testados, verificou-se que os melhores resultados foram os testes onde se utilizou lubrificantes que continham grafite.

Pelas referências consultadas sobre lubrificação conclui-se que os lubrificantes que contêm grafite, em relação a outros lubrificantes, levam-nos a resultados mais satisfatórios, principalmente, quando se trabalha à temperaturas entre 200 à 500°C (como por exemplo, a referência /5.3/), conforme fig. 5.5.

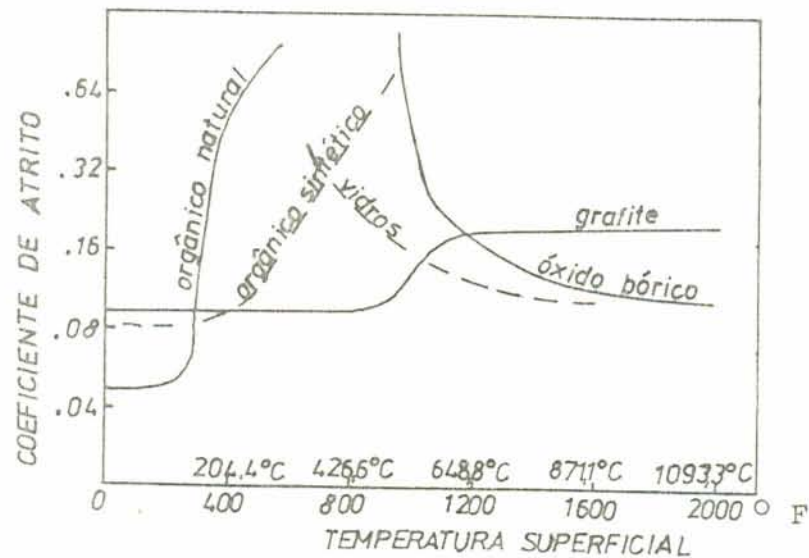


Fig. 5.5 - Representação esquemática de atrito-temperatura versus vários tipos de lubrificantes /5.3/.

6. RESULTADOS OBTIDOS

6.1. Utilização de material modelo

Em muitos processos de conformação mecânica, é comum o uso de certos materiais como modelos, que são utilizados com a finalidade de minimizar os custos referentes à usinagem de ferramentas e matéria-prima do material a ser conformado.

Os materiais utilizados como modelos comumente empregados são o chumbo, a plasticina e outras composições semelhantes. Neste trabalho testou-se a plasticina. Foi usado como lubrificante, pó de giz e óleo. Os melhores resultados foram obtidos com pó de giz (ver fig. 5.2). Todos os espaços da matriz foram preenchidos. Com o emprego do material modelo, tentou-se fixar o volume de material necessário ao preenchimento completo da matriz.

Após os testes empregando material modelo, utilizou-se alumínio (AlMgSi 1). Estes testes demonstraram, entretanto, preenchimento incompleto da matriz, devido ao atrito entre peça e ferramenta e às altas temperaturas utilizadas nos testes. Concluiu-se, assim, que o comportamento do material modelo não era idêntico ao do material de teste; devido a esse fato, abandonou-se o uso de material modelo.

6.2. Testes com a liga AlMgSi 1

6.2.1. Bateria de teste A

A tab. 6.1 mostra os dados iniciais e a força medida da bateria de teste A. Estes testes, foram realizados com velocidades não controladas da máquina (aproximadamente entre 30 e 80mm/min), com temperaturas controladas em cada teste e empregando-se a força de compressão máxima da máquina. Defeitos existentes na máquina impossibilitaram alcançar 300 kN. Todos os biletos tinham a forma de barras cilíndricas. A fig. 6.1 mostra, esquematicamente, as principais características geométricas da peça no último estágio de forjamento.

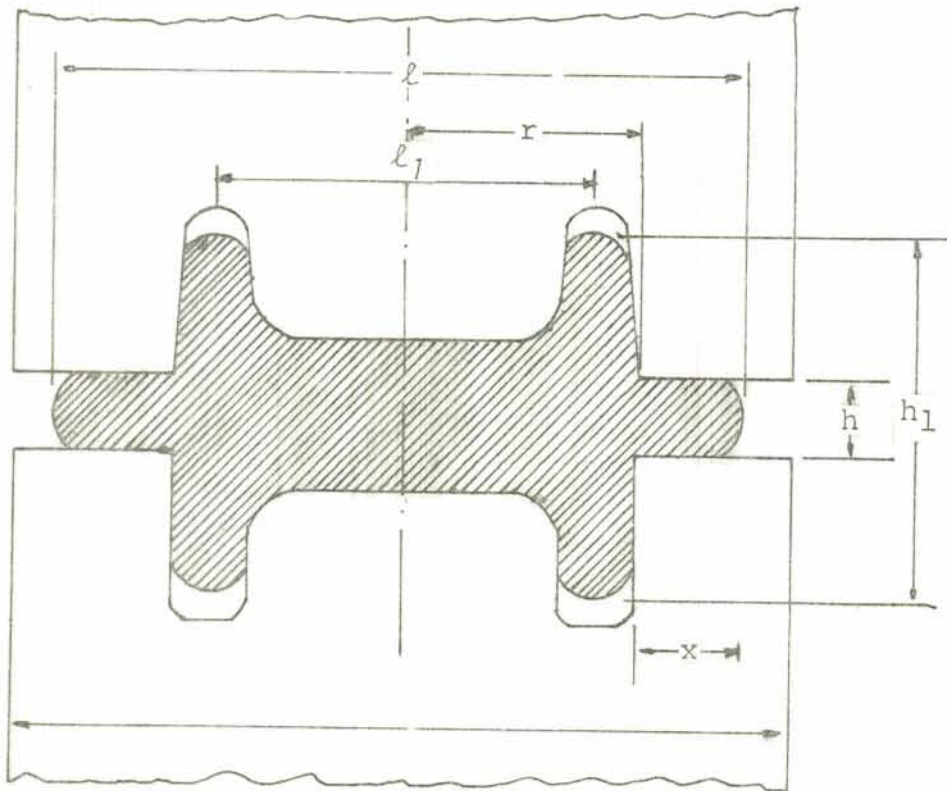


Fig. 6.1 - Características geométricas

Verificou-se, após a oitava peça, que ao manter-se a força máxima por um tempo maior sobre a peça, o escoamento (fluxo) do material, continuava se processando. Esse fato, demonstra a proximidade das condições momentâneas do ensaio da característica superplástica do material em análise, característica esta definida no Cap.2 (Ítem 2.2) quando a sensibilidade à velocidade de deformação deverá assumir valores entre 0,3 e 0,8.

Devido ao fato de se ter mantido a ferramenta por um tempo maior em contato com a peça, no instante em que a máquina atingiu a força máxima no ensaio nº 8, obteve-se também para esta situação, o melhor preenchimento da matriz. Neste ensaio, obteve-se a peça de maior altura. Em nenhum ensaio, conseguiu-se preencher completamente a matriz.

É provável que, ao se explorar mais as condições de superplasticidade da liga de alumínio analisada, ou seja, deformando-se o material com velocidades da máquina bem mais baixas que aquelas usadas, obter-se-ia o completo preenchimento das matrizes (ver fig. 2.4). Isso significa

que estaríamos trabalhando a uma velocidade de deformação tão baixa, que o material estaria dentro das características de superplasticidade. Essa característica não foi detalhadamente explorada, devido à transmissão de calor à estrutura da máquina de testes (combinação de alta temperatura com um tempo maior de permanência sobre as placas de apoio da máquina).

6.2.2. Bateria de Teste B

Neste grupo de ensaios, utilizou-se uma outra máquina de testes (máquina Kratos) com a característica principal de manter a velocidade das ferramentas constantes. Nesse equipamento, havia, ainda, a possibilidade de se medir e registrar a força e a deformação durante o ensaio. Infelizmente, a capacidade desse equipamento era de apenas 100 kN.

A velocidade de prensagem nesse grupo de ensaios foi de 100mm/min. A temperatura foi alterada de ensaio para ensaio. A tab. 6.2, mostra as condições de testes dessa série.

6.2.3. Bateria de teste C

Nesta bateria de ensaios, utilizou-se a mesma máquina de testes da bateria anterior e a mesma ferramenta, sendo que a característica principal deste teste, foi a variação da velocidade de prensagem (100mm/min, 70mm/min e 50mm/min). A tab. 6.3, mostra as condições de teste desta série.

Tab. 6.1 - Resultados da bateria de teste A

Condições iniciais				Condições finais (após o forjamento)								
Peça	h ₀ (mm)	d ₀ (mm)	v ₀ (°C) peça	h ₁ (mm)	h (mm)	ℓ (mm)	x (mm)	A _C (mm ²)	ℓ ₁ (mm)	r (mm)	R (mm)	Lubrificante
1	50	51,1	540	43	4	76,2	10	4560	55	31	41	Grafite
2	50	43	540	42	4,3	73,8	8	4277	55	31	39	Grafite
3	57	51	520	45	7	81,4	-	-	-			Grafite
4	50	50	520	44,8	4,3	73	8	4185	55	31	39	Grafite
5	54	50	490	48,4	5	70,4	7,6	3893	55	31	38,6	Grafite + Sabão
6	57	51,1	520	49,1	8	81,2	8,5	5178	55	31	39,5	Grafite + Sabão
7	56	51,1	540	50,1	5,6	77,9	7,2	4766	55	31	38,2	Grafite + Sabão
8	56	51,1	520	52,5	5,6	80,9	7,5	5140	55	31	38,5	Grafite + Sabão
9	50	51	520	47	3	81,5	7,6	5216	55	31	38,6	Grafite + Sabão
10	56	46	520	43,6	4	79,4	7,6	4951	55	31	38,6	Grafite + Sabão

- A velocidade de prensagem para este teste foi de aproximadamente 30 -80 mm/min;

- v^o final da peça não foi registrada;

- No final desta bateria de testes, a ferramenta 1 estava totalmente danificada devido a desmoldagem.

Os dados e a força medida da bateria de teste estão na Tab. 6.1.

6.2.4. Resultados obtidos do forjamento isotérmico

Tab. 6.2 - Resultados da bateria de teste B.

Condições iniciais				Condições finais (após o forjamento)									
Peça	ho (mm)	do (mm)	ϑ_0 (°C) peça	ϑ_f (°C) peça	h ₁ (mm)	h (mm)	ℓ (mm)	x (mm)	A _c (mm ²)	ℓ ₁ (mm)	r (mm)	R (mm)	Lubrificante
1.1	45	45	520	515	32	11	70,7	3	3926	55	31	34	Grafite + Sabão
1.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1.3	45	45	517	504	31,4	11	69	3	3739	55	31	34	Grafite + Sabão
1.4	45	45	513	503	31	11	69	2	3500	55	31	33	Grafite + Sabão
1.5	45	45	471	466	32,3	12	67	2,3	3535	55	31	33,3	Grafite + Sabão

Tab. 6.3 - Resultados da bateria de teste C.

Condições iniciais				Condições finais (após o forjamento)									
Peça	ho (mm)	do (mm)	ν_o (°C) peça	θF (°C) peça	h ₁ (mm)	h (mm)	ℓ (mm)	x (mm)	A _C (mm ²)	ℓ ₁ (mm)	r (mm)	R (mm)	Lubrificante
1.4	45	45	513	503	31	11	69	2	3500	55	31	33	Grafite + Sabão
2.1	45	45	514	505	32,2	11,7	69	3	3739	55	31	34	Grafite + Sabão
2.2	45	45	515	505	33	12	70	3	3851	55	31	34	Grafite + Sabão

- As velocidades de prensagens para o teste B, foi de 100 mm/min, e para o teste C foram: peça 1.4 = 100 mm/min
peça 2.1 = 70 mm/min
peça 2.2 = 50 mm/min

- Na bateria de teste B e C, utilizou-se a ferramenta 2;

- Na bateria de teste B e C, ultrapassou-se a capacidade da escala utilizada da máquina (100 kN), atingindo-se 107 kN.

Tab. 6.4 - Resultados obtidos para a bateria de teste A

Peças Nº	Forças Calculadas (kN)						Forças Medidas (kN)
	Modelo de T. Altan	Diferença(%)	Modelo de Haller	Diferença(%)	Modelo de Reicherter	Diferença(%)	
1	181	-28	277	10	214	14	250
2	148	-33	253	13	274	20	220
3	-	-	-	-	-	-	-
4	147	-43	249	-4	185	-29	260
5	134	-50	214	-21	171	-36	270
6	125	-54	196	-38	210	-22	270
7	124	-54	228	-16	176	-34	270
8	128	-53	240	-11	200	-26	270
9	165	-37	303	11	325	17	260
10	146	-42	292	14	308	34	250

- A peça três não se calculou, devido a problemas surgidos durante o ensaio.

Tab. 6.5 - Resultados obtidos para a bateria de teste B

PEÇAS (Nº)	FORÇAS CALCULADAS (kN)						FORÇAS MEDIDAS (kN)
	Modelo de T. Altan	Diferença(%)	Modelo de Haller	Diferença(%)	Modelo de Reicherter	Diferença(%)	
1-1	79	-26	136	21	105	-2,0	107
1-2	-	-	-	-	-	-	-
1-3	79	-26	130	18	107	0	107
1-4	73	-32	130	18	101	-6,0	107
1-5	74	-31	157	32	97	-9,0	107

- A peça 1-2 não se calculou, devido a problemas surgidos durante o ensaio.

Tab. 6.6 - Resultados obtidos para a bateria de teste C

PEÇAS	FORÇAS CALCULADAS (kN)						FORÇAS MEDIDAS (kN)
	(Nº)	Modelo de T. Altan	Diferença(%)	Modelo de Haller	Diferença(%)	Modelo de Reicherter	
1-4	73	-32	130	18,0	101	-6,0	107
2-1	78	-27	127	16	105	-2,0	107
2-2	78	-27	128	16	110	3,0	107

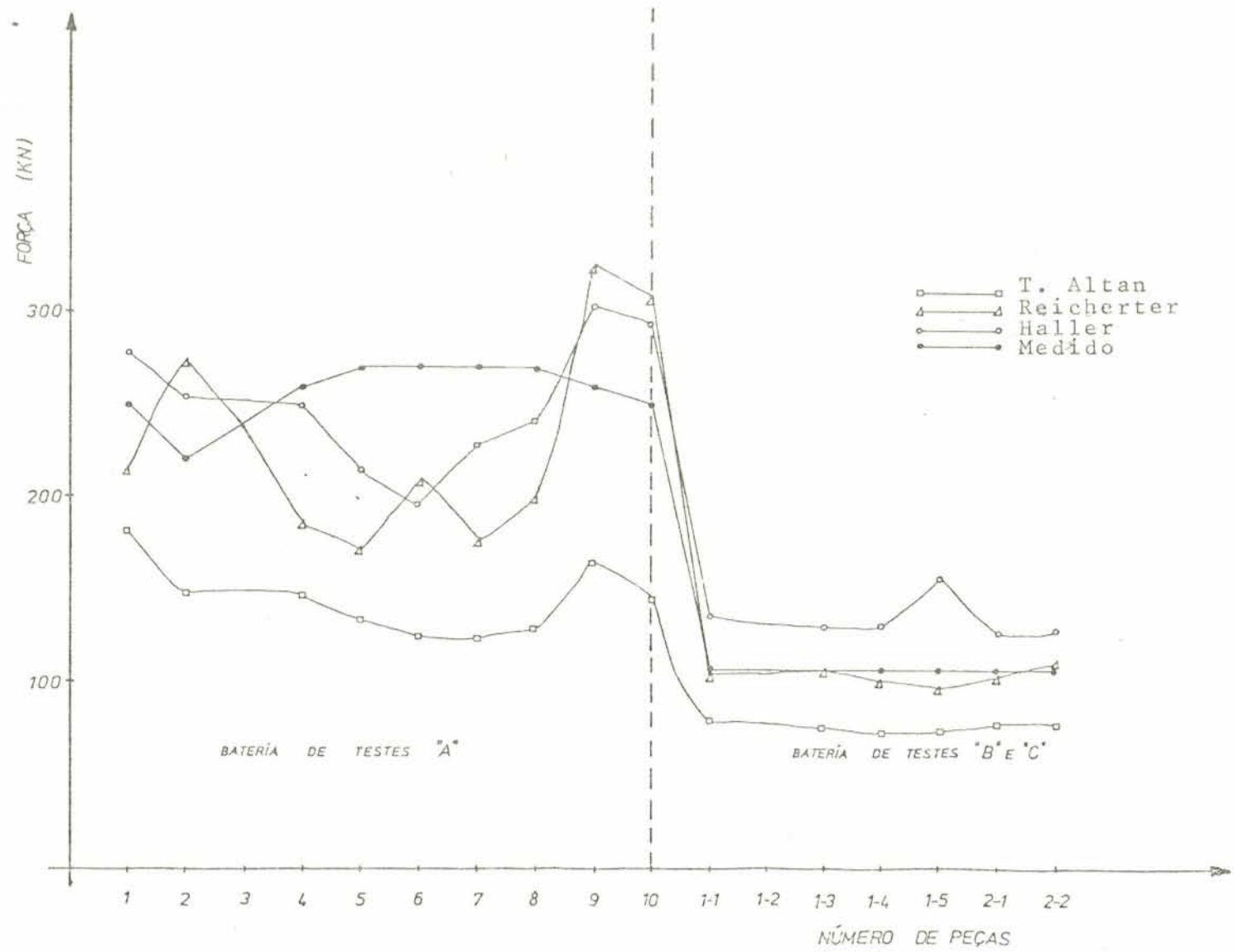
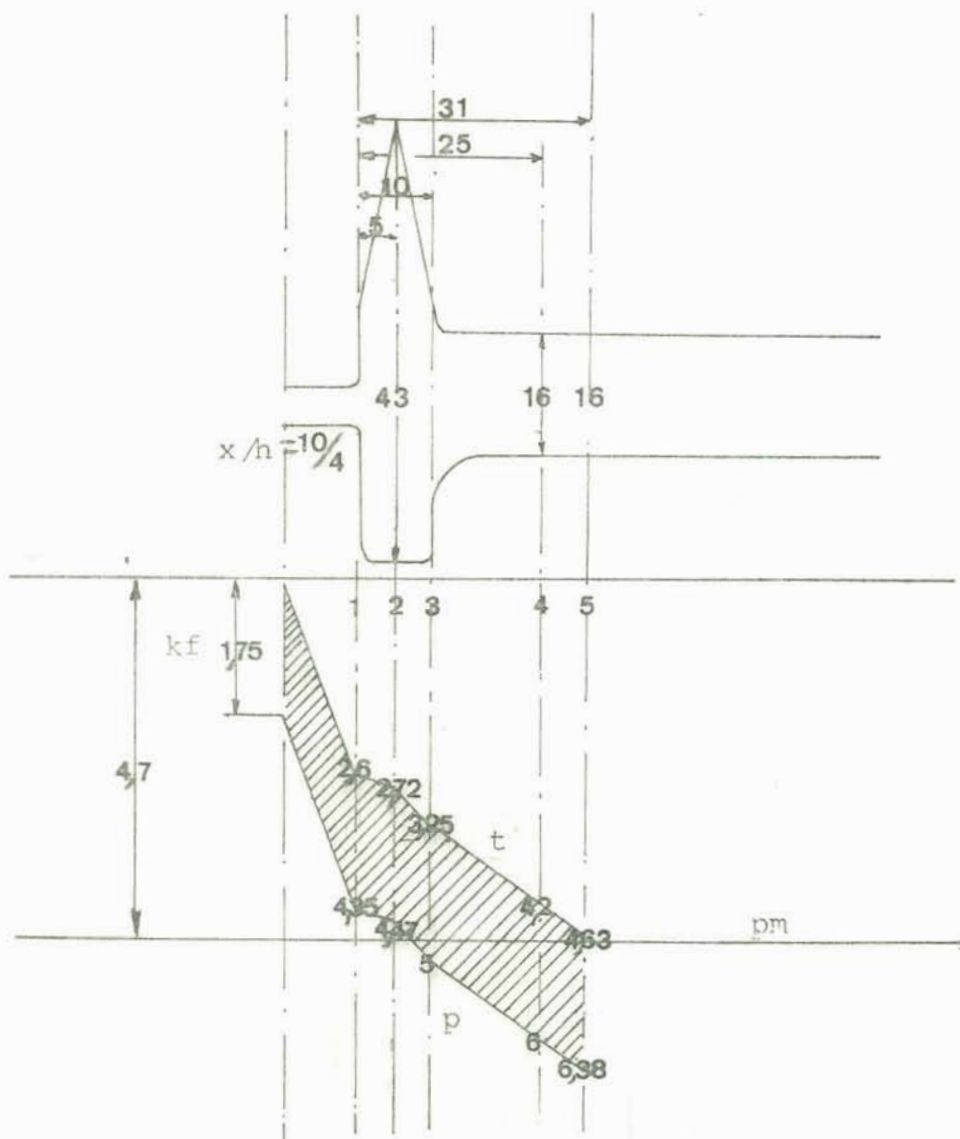


Fig. 6.2 - Força calculada e medida para cada peça forjada.

Para efetuar os cálculos de acordo com o modelo de Reicherter, fez-se uma analogia com o modelo apresentado em 3.3. Para o cálculo das tensões, relacionou-se para a geometria da ferramenta utilizada o mesmo procedimento adotado, conforme o diagrama abaixo, referente a peça 1. (fig. 6.3).



Para as demais peças, procedeu-se de maneira similar.

Fig. 6.3 - Exemplo do diagrama obtido com a aplicação do modelo de Reicherter (peça 1).

Os diagramas apresentados a seguir, mostram os resultados obtidos da bateria de testes B. As peças ensaiadas, foram a 1-1, 1-3, 1-4 e a 1-5. A peça 1-2, foi desprezada devido a mesma ter sido aquecida a uma temperatura maior do que a temperatura de conformação do material; este aquecimento foi de aproximadamente 600°C . A velocidade de prensagem foi de $100\text{mm}/\text{min}$ para esta bateria, e o objetivo deste teste foi verificar o efeito sobre as condições de forjamento, considerando-se uma velocidade de prensagem constante, devida às variações de temperatura.

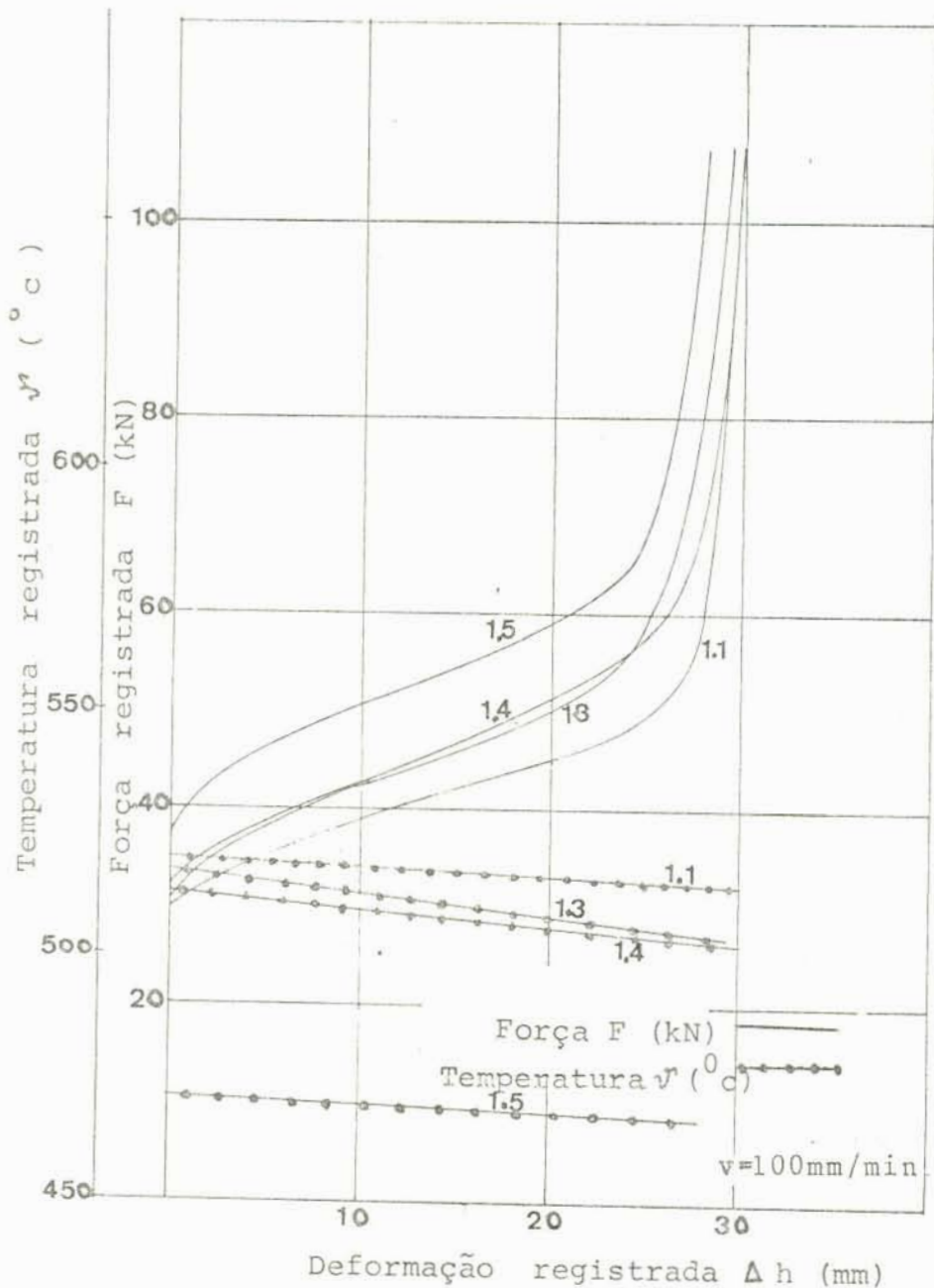


Fig. 6.4 - Curvas resultantes do forjamento isotérmico para a bateria de testes B.

A fig. 6.5 mostra os resultados obtidos da bateria de testes C, relacionando as forças registradas pelas respectivas deformações. Os resultados obtidos, correspondem as peças 1-4, 2-1 e 2-2.

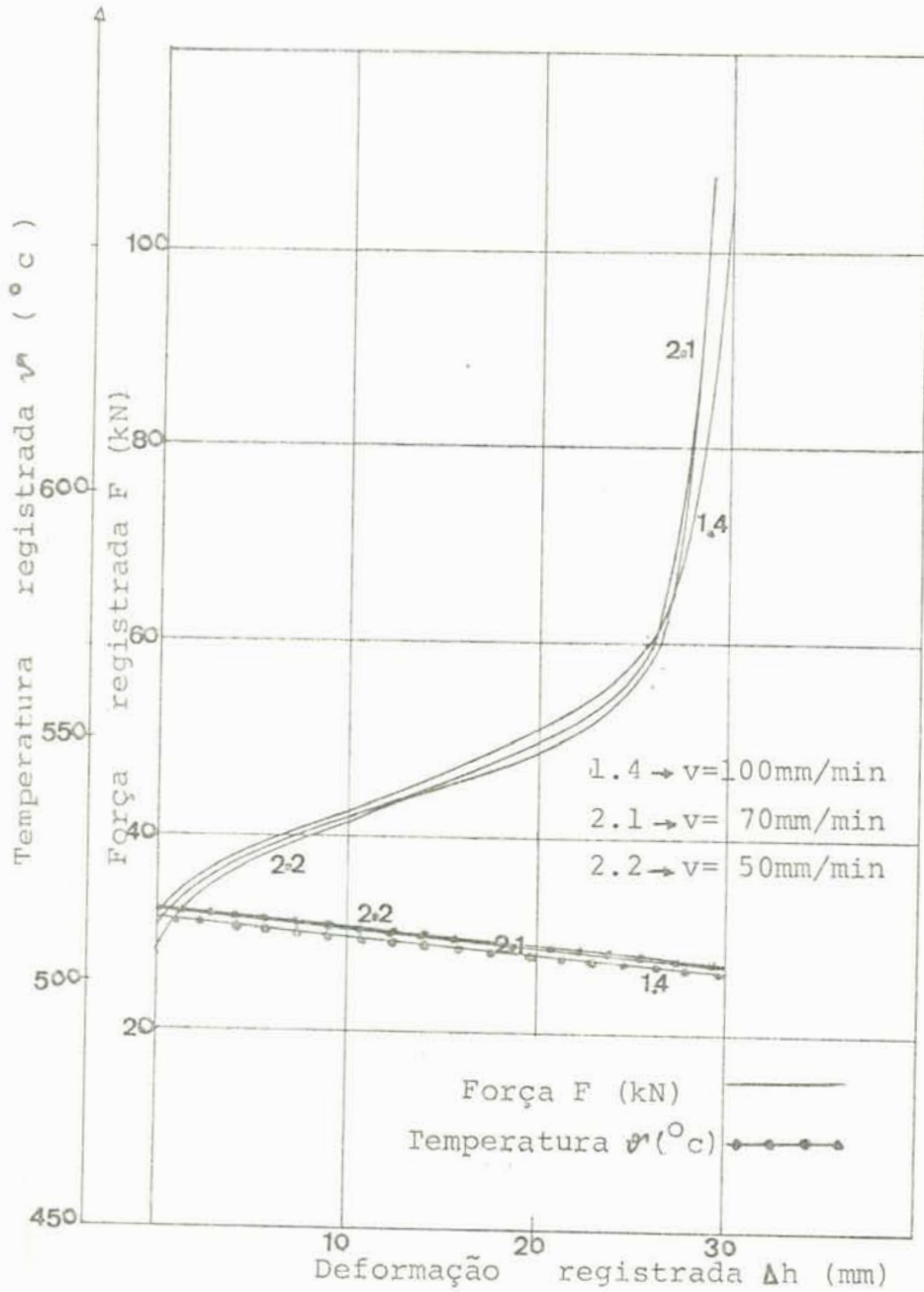


Fig. 6.5 - Curvas resultantes do forjamento isotérmico para a bateria de testes C.

Com o objetivo de verificar a influência da velocidade no preenchimento da matriz (obtenção da maior altura final da peça), construiu-se a fig. 6.6 com base nos resultados dos testes C. Para a variação da velocidade de testes (entre 50 a 100 mm/min), não se verificou grande variação da altura.

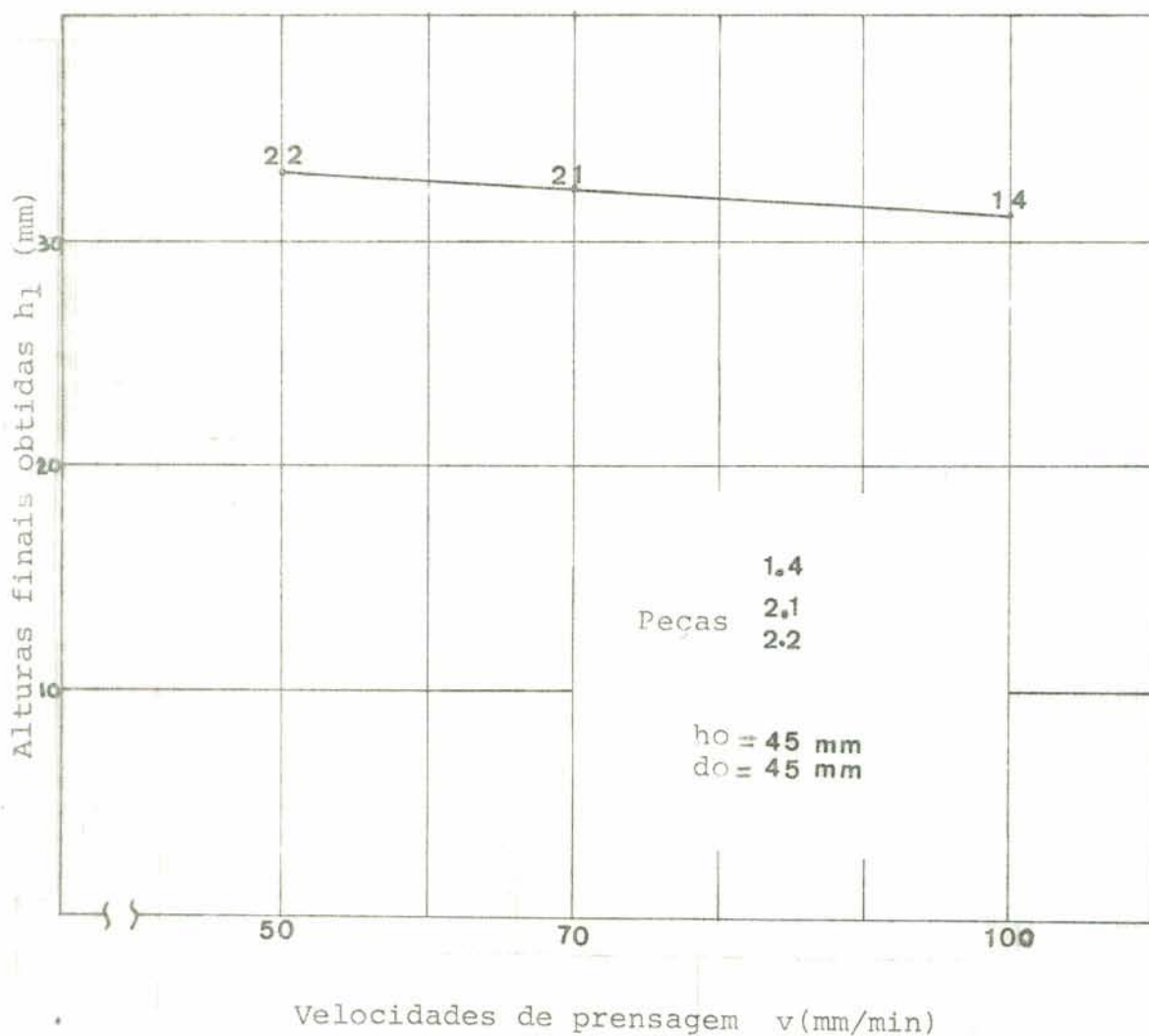


Fig. 6.6 - Alturas finais obtidas versus velocidades de prensagem, utilizadas na bateria de testes C.

OBS: Para todas as temperaturas registradas e expressas nas figuras, deve-se considerar um erro de $\pm 2\%$ devido as imprecisões dos instrumentos de medição.

6.2.6. Resultados obtidos da análise metalográfica

As fig. 6.7 e 6.8 a e b dão uma idéia sobre as deformações internas nas peças deformadas e podem servir de subsídios quando se empregar teorias mais precisas que permitam descrever o fluxo do material e calcular regiões de grandes e pequenas deformações (na zona de deformações plásticas). As teorias analisadas neste trabalho não levam em consideração o que ocorre internamente.

A fig. 6.7 ilustra como exemplo a macroestrutura de uma peça forjada. Nela se pode observar as regiões de grandes deformações

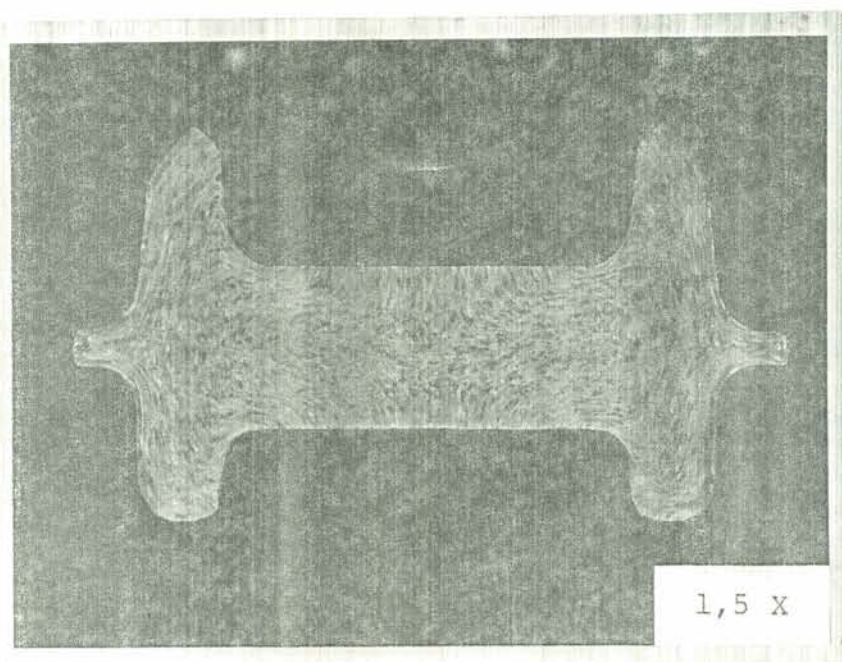


Fig. 6.7 - Macroestrutura da peça 1. Bateria de teste A

A fig. 6.8 a) e 6.8 b) mostram um caso típico da macroestrutura de um corpo de prova empregado para a construção da curva de escoamento.

Igualmente pode-se aqui observar as regiões de grandes deformações.

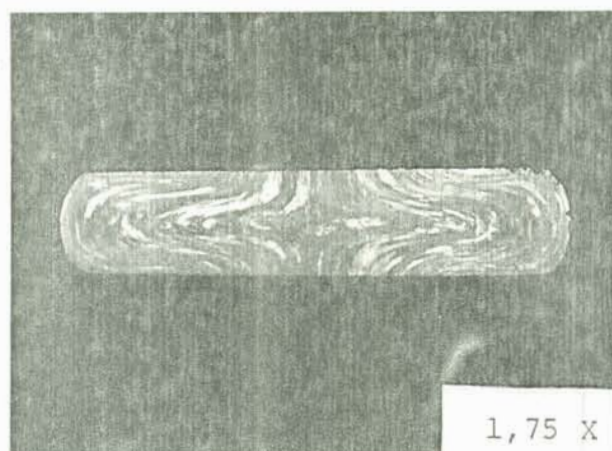
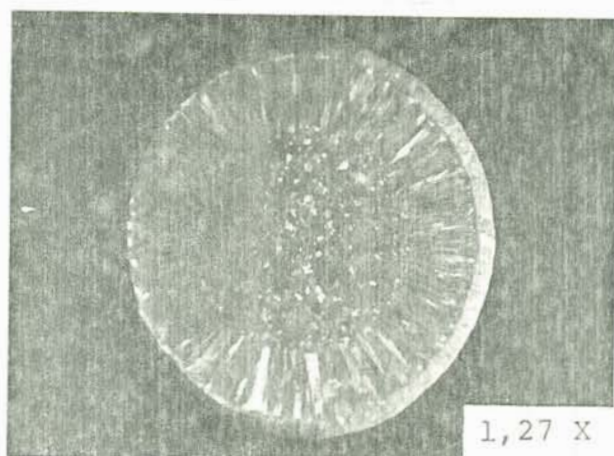


Fig. 6.8 a) e 6.8 b) - Macroestrutura de um corpo de prova utilizado para a curva de escoamento ($\dot{\nu} = 505C^{\circ}$).

7. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS (CONCLUSÕES)

- Nos testes de influência da velocidade de prensagem sobre os valores de k_f e verificou-se, para as velocidades de prensagem utilizadas (100mm/min, 70mm/min e 50mm/min) uma variação significativa da tensão de escoamento. Apesar de grandes alterações na velocidade de prensagem (100%) as alterações de k_f não são significativas ($0,03 \text{ s}^{-1}$ a $0,09 \text{ s}^{-1}$) o que justifica esta observação.

- Verifica-se que na comparação dos resultados obtidos experimentalmente com os resultados calculados por Hensel e Spittel, o valor de k_f diminuiu da ordem de 20% à medida em que ψ e $\dot{\nu}$ aumentam. Isso pode ser ocasionado pela menor quantidade de Mg do material utilizado experimentalmente (o Mg aumenta a resistência mecânica).

- Verifica-se a grande influência da composição química no comportamento das curvas de Akeret, observando-se que pequenas variações na quantidade de alguns componentes da liga utilizada (AlMgSi 1), são suficientes para causar uma variação substancial nos valores de k_f em função de ψ (tab. 4.11).

- Considerando, por exemplo, a condição experimental $\psi = 0,5$ e $\dot{\nu} = 0,05 \text{ s}^{-1}$ com uma temperatura de $505 \pm 4^\circ\text{C}$, o valor de k_f medido ($21,4 \text{ N/mm}^2$) é, praticamente, o mesmo fornecido por Akeret nas mesmas condições (21 N/mm^2), o que pode ser comprovado nas figs. A 1 e A 2 (Anexo A).

- As pequenas diferenças entre outros pontos das curvas dos dados experimentais e os dados de Hensel e Spittel podem ser devidas às diferenças na composição química do material trabalhado.

- Finalmente conclui-se que, para efeitos de comparação de valores experimentais com valores da literatura, é necessária uma composição química semelhante. Não foi discutido o efeito da microestrutura inicial porque, em geral, os trabalhos encontrados na literatura não fornecem referência sobre a mesma. É bem possível que microestruturas diferentes (para a mesma composição química) tenham efeitos significativos sobre as curvas de escoamento.

- Nos resultados obtidos pela aplicação dos modelos de cálculos de força, verificou-se que o modelo de Reicherter, para algumas peças como a 1.1, 1.3 e a 2.1, praticamente, não apresenta diferenças percentuais em relação à força medida.

- Na utilização de material modelo, verificou-se que a plastilina utilizada como material modelo, não serve para simular o processo de forjamento do alumínio (AlMgSi 1).

- Na bateria de testes B as peças nas quais se manteve condições praticamente isotérmicas do início ao final do ensaio, foram as que obtiveram alturas finais maiores, o que comprova que o sistema sem perda de temperatura, ocasiona melhores resultados.

- Para a geometria analisada (ferramenta e biletas) e para os limites de velocidade empregados pode-se afirmar que é possível forjar pelo processo isotérmico, sendo verificada uma pequena queda de temperatura (figs. 6.4 e 6.5), durante o ensaio.

8. SUGESTÃO DE CONTINUIDADE

- Quando refere-se à comparação do forjamento isotérmico com outros processos (Cap. 2) e são apresentadas características obtidas com o forjamento isotérmico, é conveniente considerar outros processos como: metalurgia do pó, forjamento progressivo, forjamento a frio e a morno. Estes processos são, também processos atualizados e, provavelmente, permitem a obtenção de características semelhantes às do forjamento isotérmico, sendo portanto outras opções viáveis em termos de forjamento de precisão.

- Seria conveniente adotar outro tipo de geometria de matriz, principalmente, matrizes sem a formação de rebarbas e com menos ângulos e, com isso, testar outras teorias para cálculo de força com alteração de capacidade de equipamento e velocidade de prensagem.

- É conveniente testar lubrificantes na construção das curvas de escoamento da liga AlMgSi 1, já que neste trabalho, optou-se apenas por alterações de temperaturas (ν), velocidades de prensagem ($\dot{\psi}$) e comparações com dados apresentados nas referências bibliográficas.

- Utilizou-se vários lubrificantes para fins de testes (Cap. 5) que não originaram resultados muito satisfatórios durante o forjamento. Entre estes lubrificantes, estão o Oildag e Deltaforte 79 (Acheson do Brasil Ltda). É conveniente testar outros tipos de lubrificantes, como o Molylube MM 50 que é uma graxa para altas temperaturas (acima de 400°C), contendo 4,4% de dissulfeto de molibdênio ou o Molylube LA que é uma suspensão coloidal estável de dissulfeto de molibdênio. Estes lubrificantes foram recentemente fabricados pela Acheson do Brasil Ltda e, provavelmente, devem permitir trabalhar em temperaturas de forjamento como as utilizadas neste trabalho.

- Na bateria de testes A, durante o forjamento da peça oito, quando se manteve a força máxima por um tempo maior sobre a peça verificou-se que o material continuava escoando para o interior da matriz. Seria conveniente explorar mais as condições de superplasticidade do processo isotérmico, bastando para isso, que se tenha um melhor isolamento térmico da máquina.

- É conveniente projetar um forno de aquecimento que opere em cima da estrutura da própria máquina a fim de obtermos uma perda mínima de temperatura.

- Na bateria de testes C, verifica-se que as alturas finais das peças 2-1, 2-2 e 1-4, têm pouca diferença. É conveniente, utilizar máquinas de ensaios que possibilitem trabalhar com velocidades de prensagem menores do que 50mm/min e verificar se os resultados se alteram sensivelmente à medida que se alteram as velocidades de prensagem.

- Para avaliar o modelo de cálculo de força que melhor se ajusta ao processo, é conveniente considerar somente baterias de testes B e C, pois na bateria de teste A, ocorreu pouco controle das dimensões iniciais das peças e perda de temperatura durante os testes. A bateria de teste A teve por finalidade dar início ao processo de forjamento isotérmico.

- É conveniente realizar testes de micrografia tanto nos testes de forjamento como nas curvas de escoamento e verificar a influência quantitativa de determinados elementos da liga trabalhada nos resultados.

- Os modelos não permitem observar o comportamento da força durante o ensaio (fig. 6.4 e 6.5) e por isso sugere-se que nos próximos trabalhos sejam exploradas teorias com maior precisão como a teoria da análise do limite superior /8.1/ ou teoria dos elementos finitos /8.2/.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- /2.1/ CONSIDERAÇÕES relevantes no projeto de peças forjadas, Mundo Mecânico, São Paulo, Agosto, vol. 7, 1982, pg. 16-21.
- /2.2/ BOULGER, F.W.: Isothermal forging and other emerging processes, Forging equipment materials and practices, Metals and ceramics informations center, MCIC-HB-03, Outubro, 1973, pg. 213-244.
- /2.3/ CHEN, C. CHARLIE: Recent advancement in titanium near-net-shape Technology, Journal of Metals, Novembro, 1982, pg. 30-35.
- /2.4/ VOIGTLÄNDER, O. e GÜNTHER G.: Isothermal precision forging, Metallurgia, Agosto, 1983, pg. 322-324.
- /2.5/ GYSLER, G.: Isothermes Umformen, Relatório interno, Institut für Werkstoffforschung, Novembro, 1978.
- /2.6/ SCHRÖDER, G.: Isothermes und Superplastisches Umformen beim Gesenkschmieden, Werkstatt und Betrieb, Novembro, 1980, pg. 765-770.
- /2.7/ LOECHELT, E. e RENDIGS, K.H.: Anforderungen an Genau_uschmiedestücke für Luftfahrtgerät, Vereinigte Flugtechnische Werke GmbH, Bremen, Outubro, 1981.
- /2.8/ LANGE, K. e MEYER-NOLKEMPER, H.: Gesenkschmieden, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1977.
- /3.1/ ALTAN, T., Sook-Oh-Ik e GEGEL HAROLD: Metal forming fundamentals and applications, American Society for Metals, 1983.
- /3.2/ HALLER, H.W.: Handbuck des Schmiedens Carl Hansen Verlag, Munique, 1971.
- /3.3/ DAHL W. e Outros, Grundlangen der Bildsamer Formgebung: VDEh, Verlag Stahleisen, 1966, pg. 473-474.

- /4.1/ SCHAEFFER, L., BORCHARDT, I. e GERBASE, J.F.: Obtenção de curvas de escoamento e aplicação nos cálculos de força de conformação, Engenharia no Rio Grande do Sul, nº 39, Dezembro, 1977, pg. 31-33.
- /4.2/ BILLIGMANN, J.: Estampado y prensado a maquina, Editorial Reverté S.A., 1972, pg. 41-49.
- /4.3/ Belmetal, Catálogo de Produtos, 1983, pg. 182.
- /4.4/ LANGE, K.: Lehrbuch der Umformtechnik, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, vol. II, 1974, pg. 108.
- /4.5/ HENSEL, A. e SPITTEL, T.: Kraft-und Arbeitsbedarf bildsamer Formgebungsverfahren, VEB Deutscher Verlag, Leipzig, 1978, pg. 95-136.
- /4.6/ ALDER, J.F. e PHILIPS, V.A.: The effect of strain-rate and temperature on the resistance of aluminium, copper and steel to compression, Journal of the Institute of Metals, vol. 83, 1954-1955, pg. 80-86.
- /4.7/ VDM: Atlas der Warm, Formänderunseigenschaften, Frankfurt, Maio, 1972.
- /4.8/ MEYER-NOLKEMPER, H.: Fließkurven Metallischer Werkstoffe, Technische Universität, Hannover, 1977.
- /5.1/ CETLIN, P.R. e CAMPOS, M.E.: Ensaio de qualificação de plasticina para a simulação de processos de conformação mecânica, Congresso ABM, 1980, pg. 99.
- /5.2/ SIMON, R.: Gerente do Departamento de Projetos da Forjaria São Bernardo S.A., São Paulo, Informação Pessoal.
- /5.3/ RABINOWICZ, E.: Fundamentals of Deformation Processingn Syracuse University Press, 1964, pg. 134.
- /8.1/ AVITZUR, B.: Metal Forming: Processes and Analysis, McGraw-Hill Book Company, New York, 1968.
- /8.2/ ZIENKIEWICZ, O.C. e Y.K. CHEUNG: The finite Element Method in Structural and Continuum Mechanics, New York, McGraw-Hill, 1967.

10. ANEXO A

Os diagramas das figuras A1, A2, A3, A4, A5, A6, A7, A8, A9 e A10 mostram as diferenças das curvas k_f em função de φ considerando a variação da composição química da liga AlMgSi 1. As composições químicas dos materiais considerados nas figuras A1, A2, A3, A4, A5, A6, A7 e A8 estão contidas na tab. 4.11.

Nos resultados demonstrados pelas figuras A1, A3, A5 e A7 foi utilizada a mesma velocidade de deformação ($0,05 \text{ s}^{-1}$), e nos resultados demonstrados pelas figuras A2, A4, A6 e A8 a velocidade de deformação foi de $0,1 \text{ s}^{-1}$.

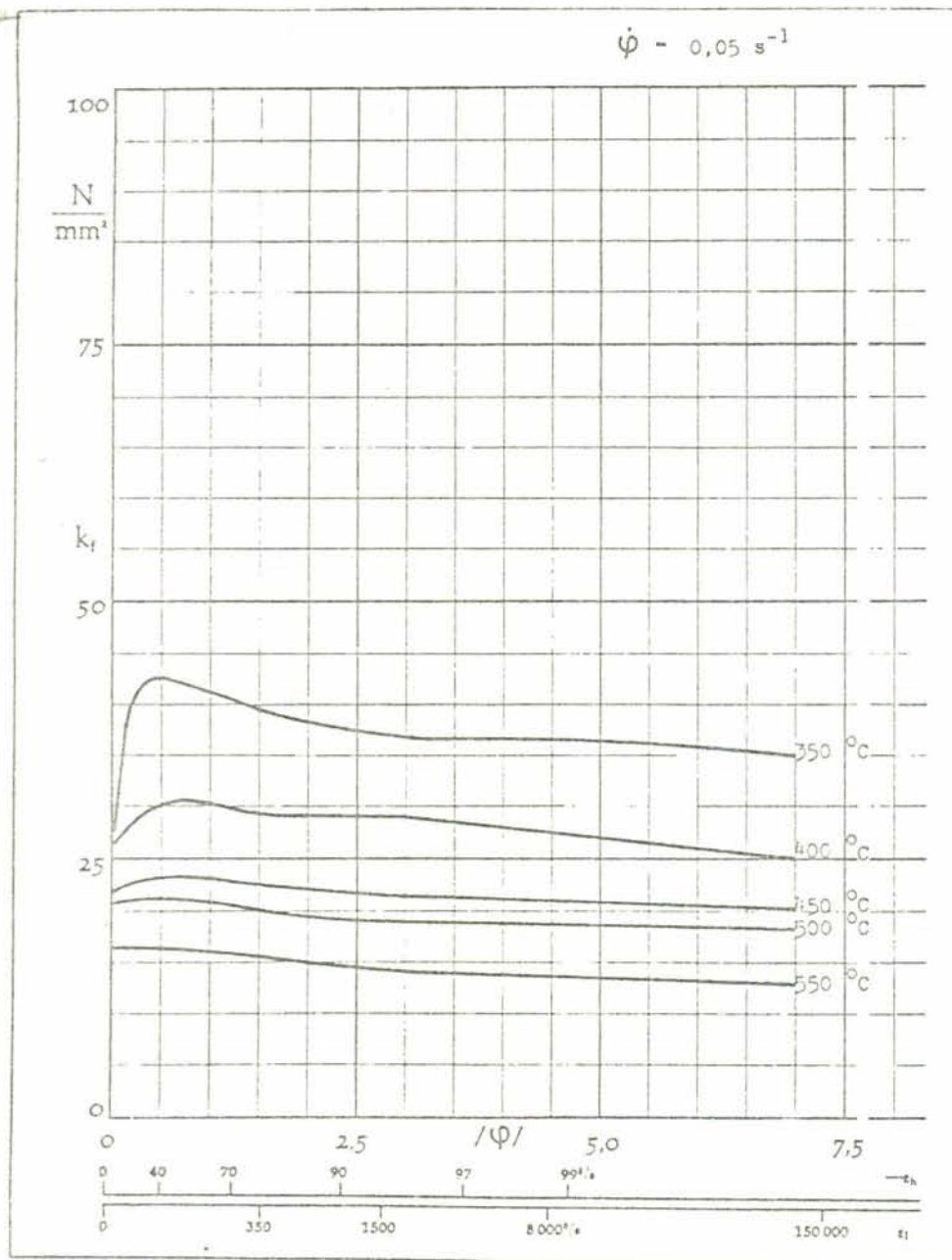


Fig. A1 - Curva de escoamento $k_f \times \varphi$ em função da temperatura
/4.7/

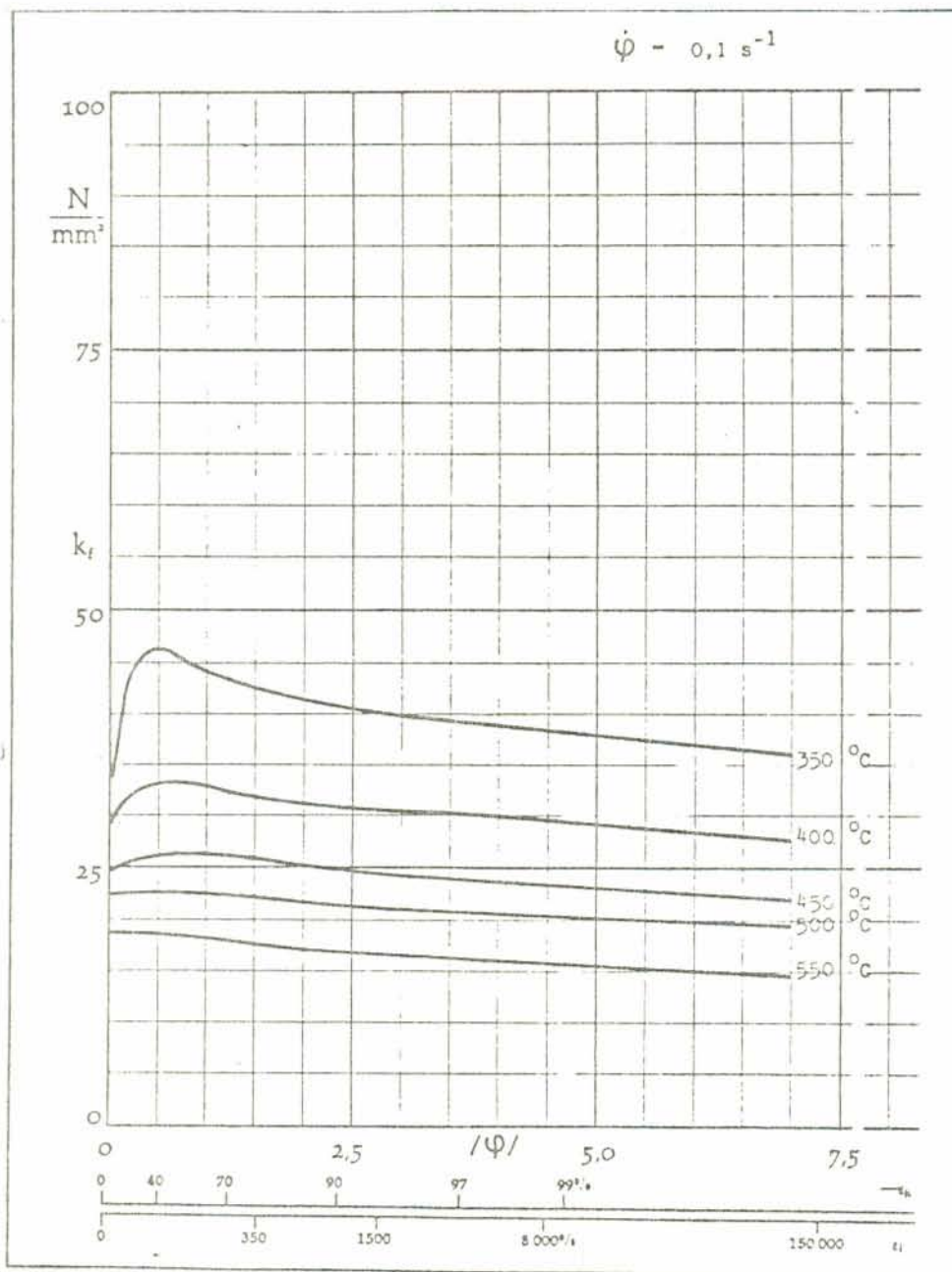


Fig. A2 - Curva de escoamento $k_f \times \psi$ em função da temperatura /4.7/.

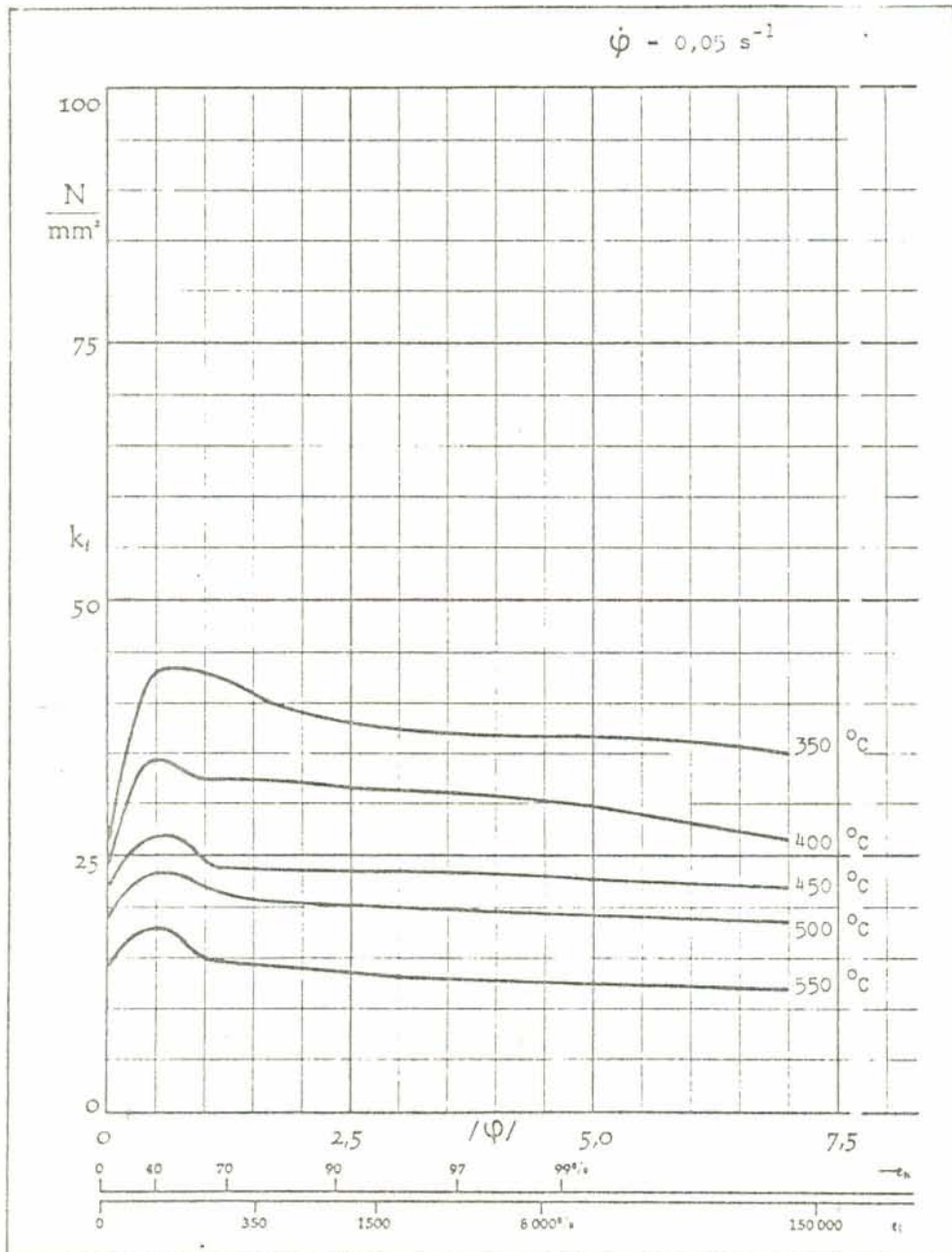


Fig. A3 - Curva de escoamento $k_f \times \varphi$ em função da temperatura /4.7/.

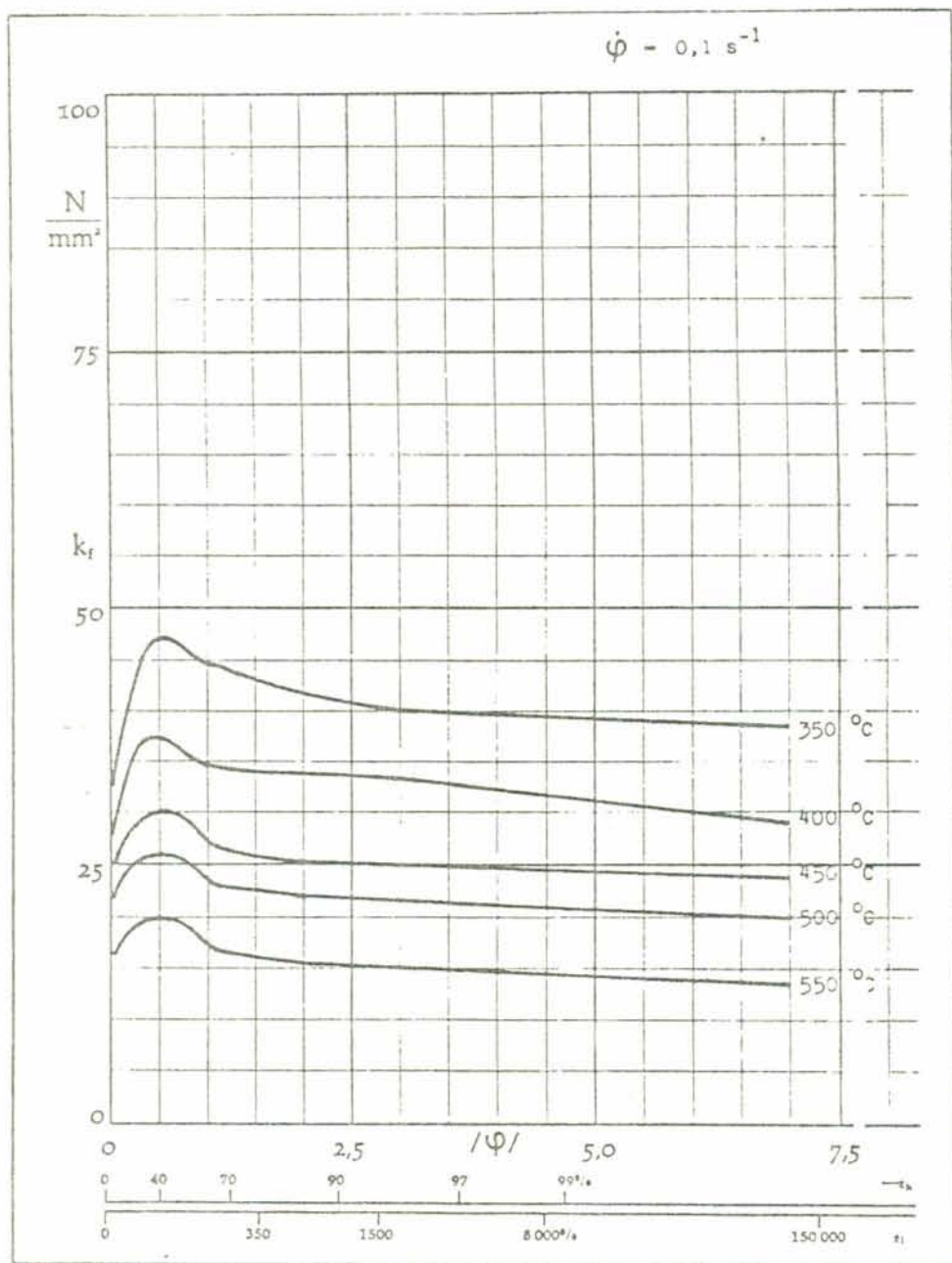


Fig. A4 - Curva de escoamento $k_f \times \psi$ em função da temperatura /4.7/.

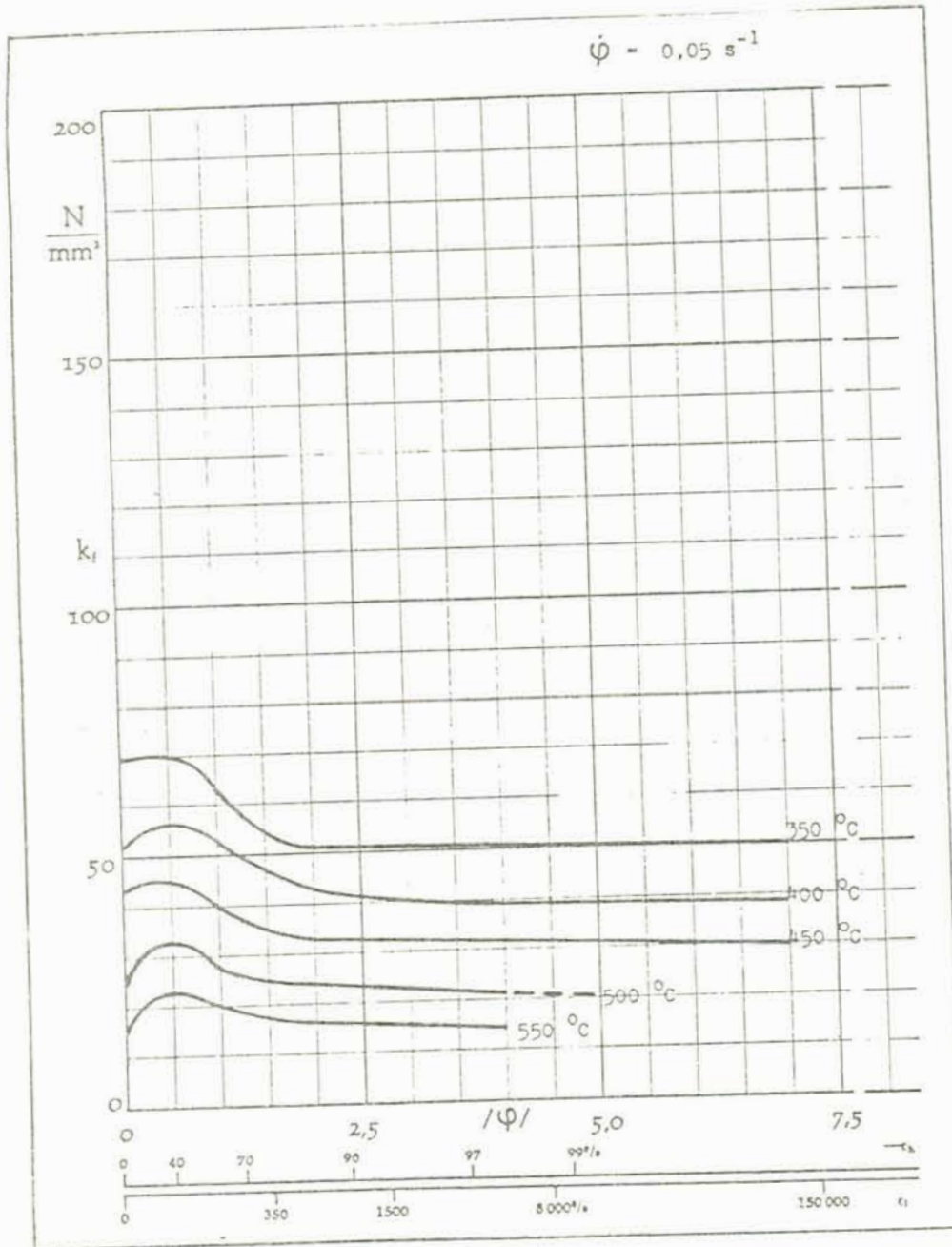


Fig. A5 - Curva de escoamento $k_f \times \dot{\psi}$ em função da temperatura /4.7/.

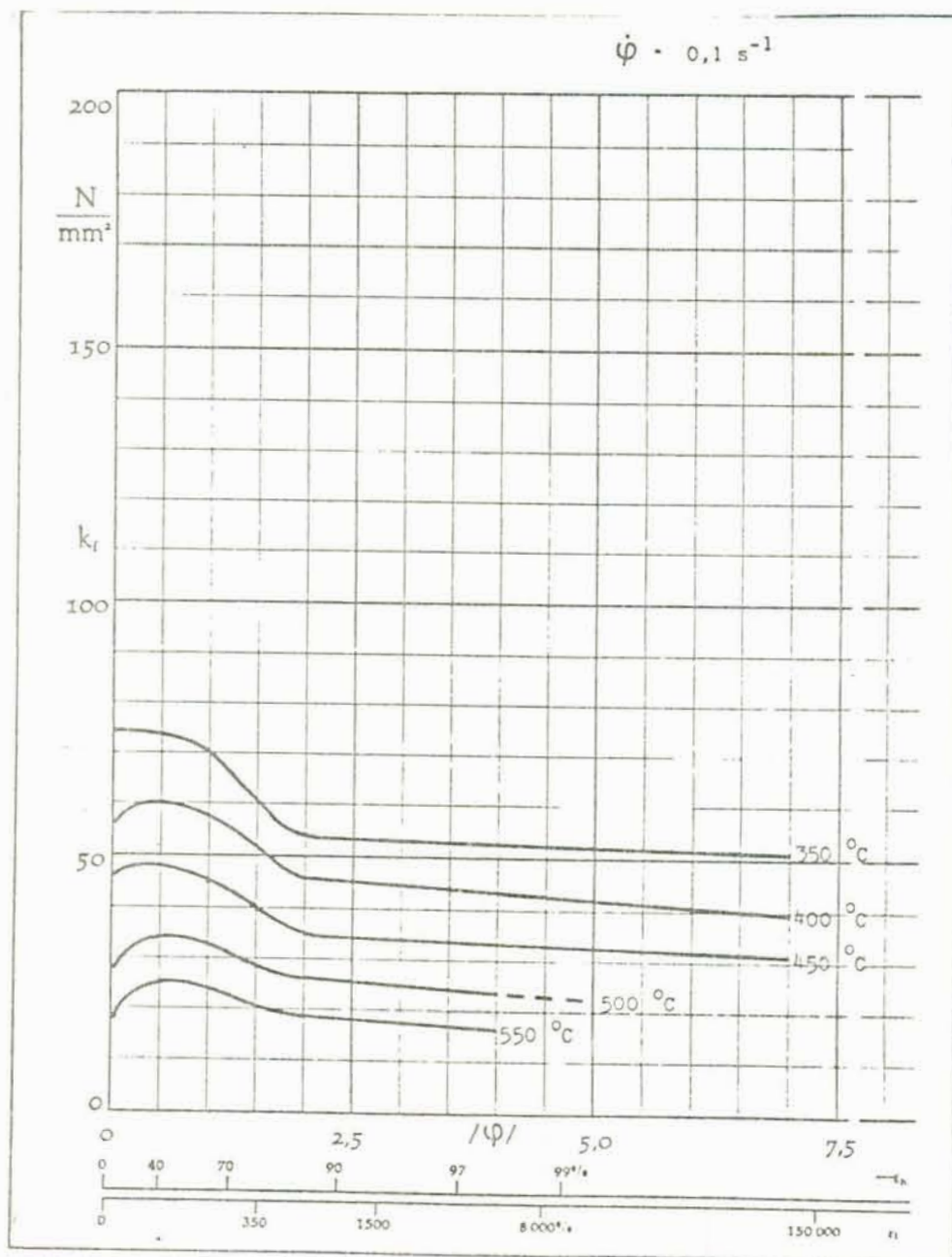


Fig. A6 - Curva de escoamento k_f x ψ em função da temperatura /4.7/.

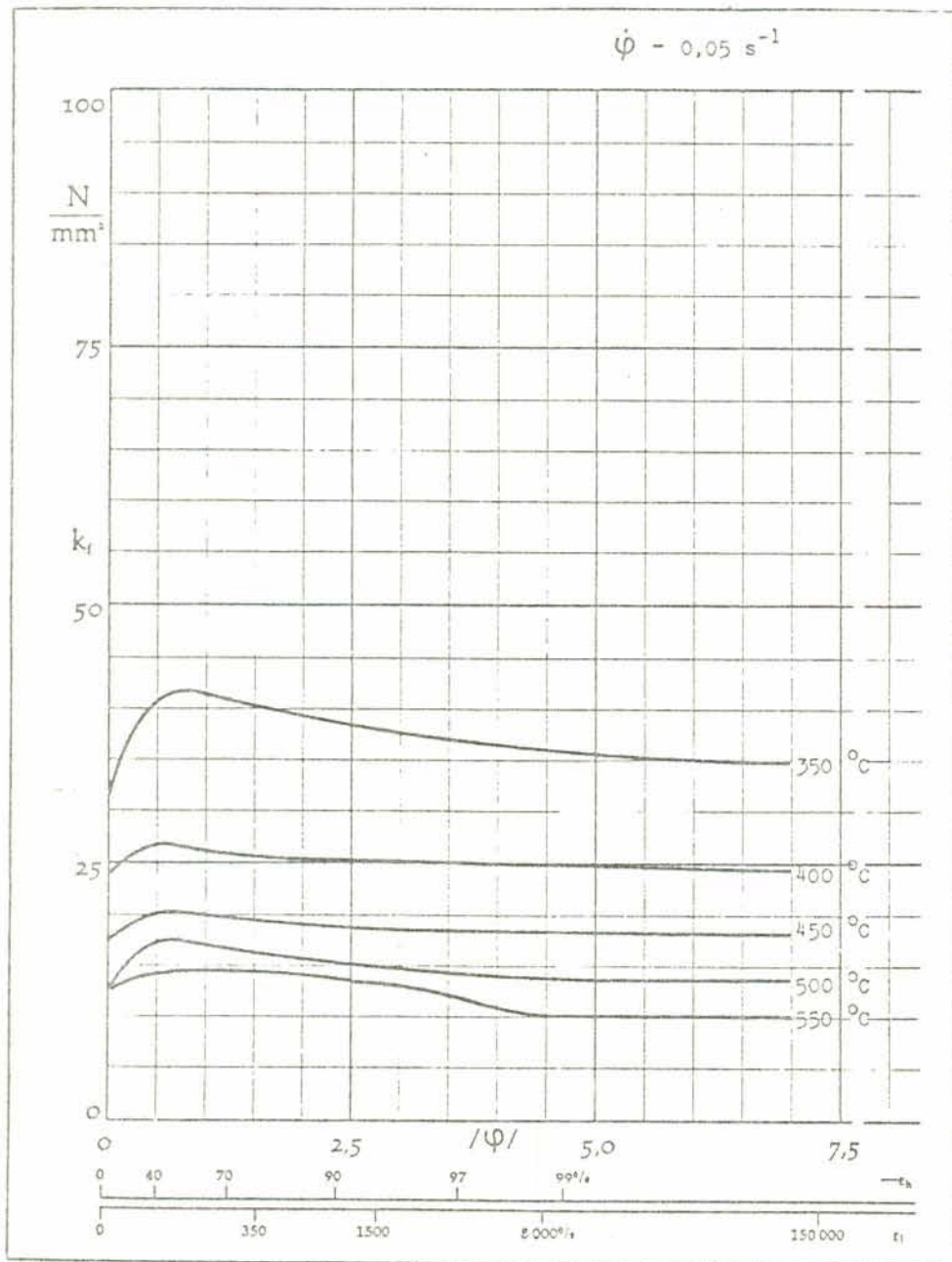


Fig. A7 - Curva de escoamento $k_f \times \psi$ em função da temperatura /4.7/.

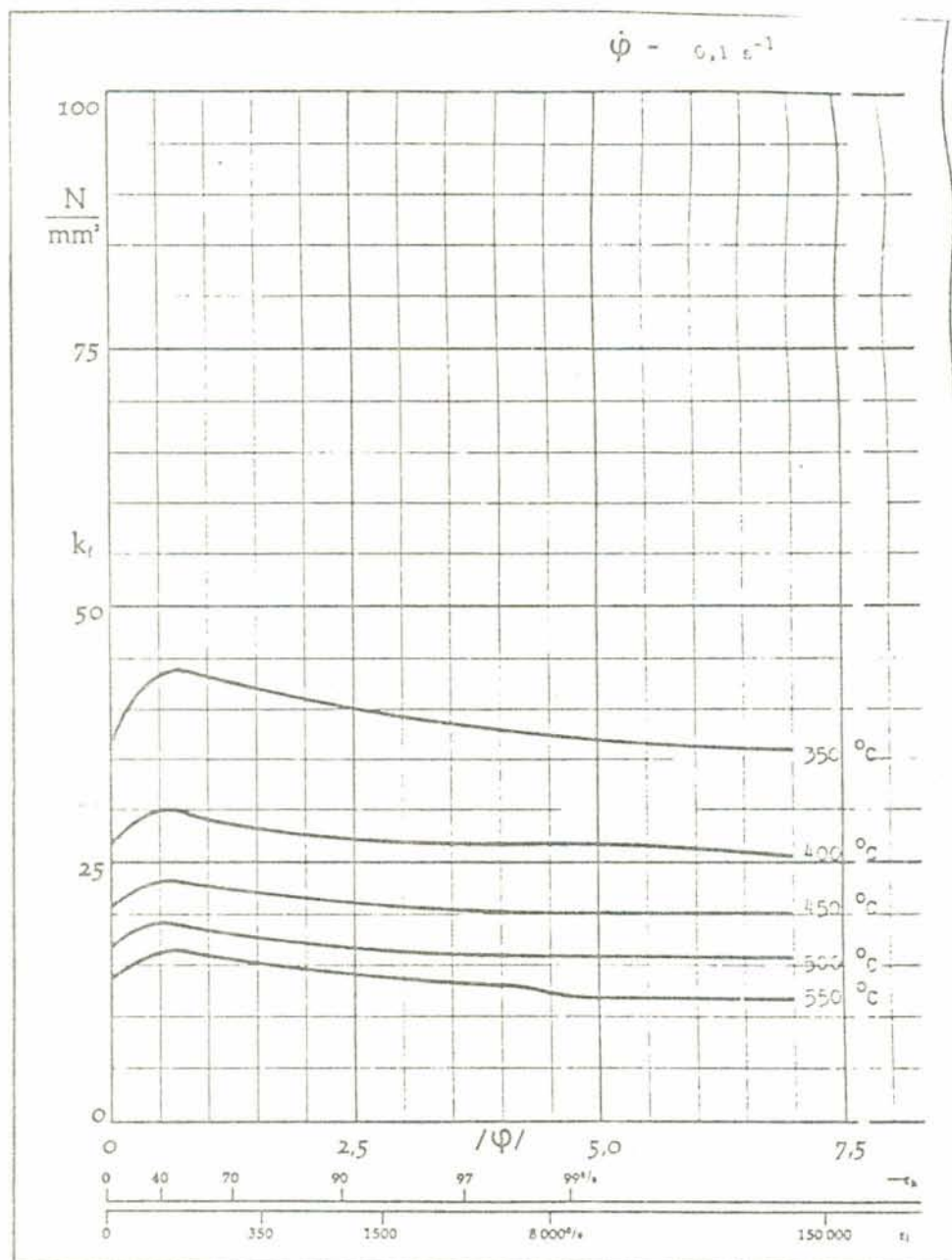


Fig. A8 - Curva de escoamento $k_f \times \psi$ em função da temperatura /4.7/.

As figuras A9 e A10 referem-se ao ítem 4.5.3 (Comparação entre os valores de Akeret e Meyer-Nolkemper) e as composições químicas dos materiais utilizados estão expressas na tab. 4.14.

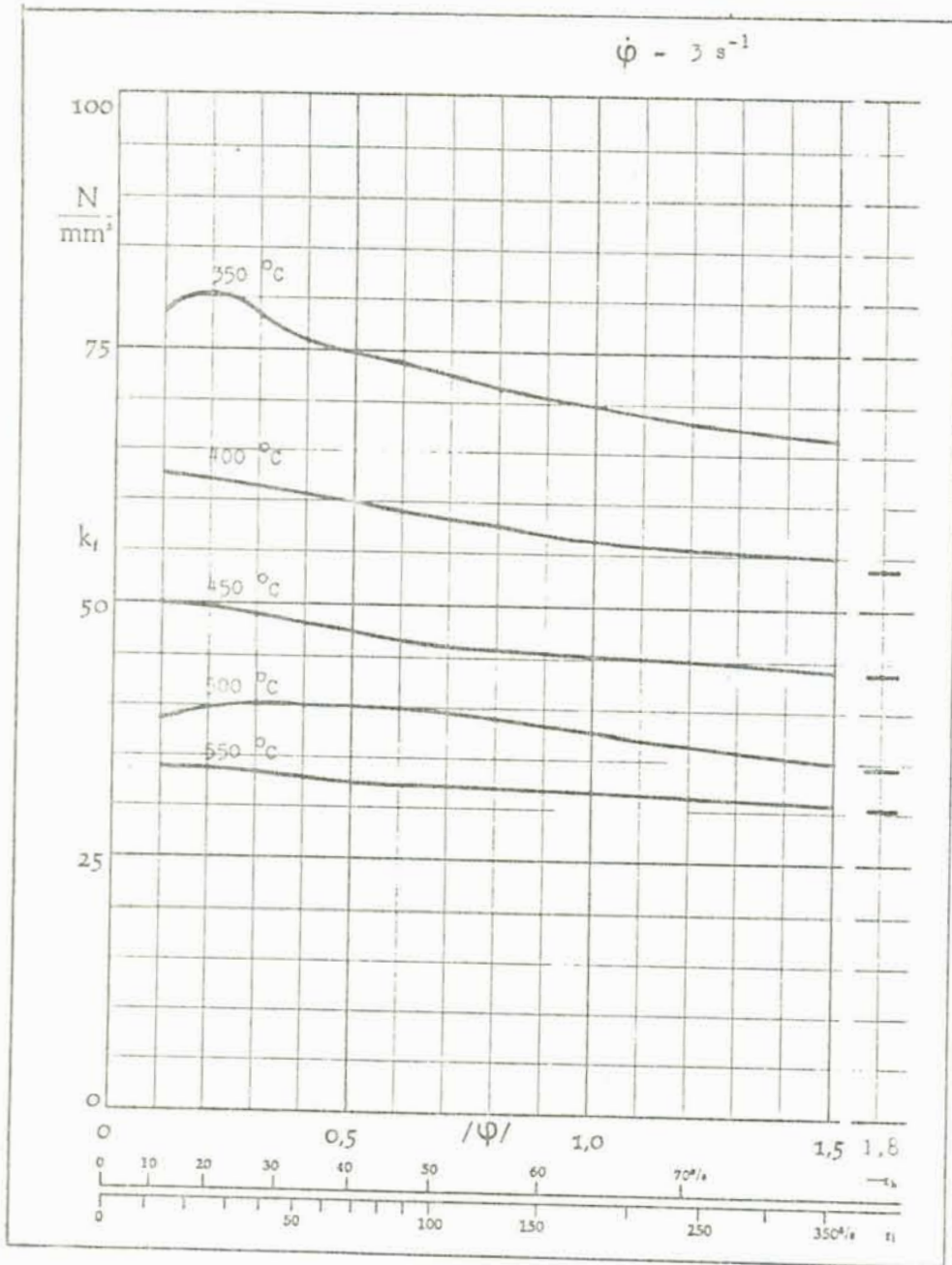


Fig. A9 - Curva de escoamento k_f x φ em função da temperatura /4.7/.

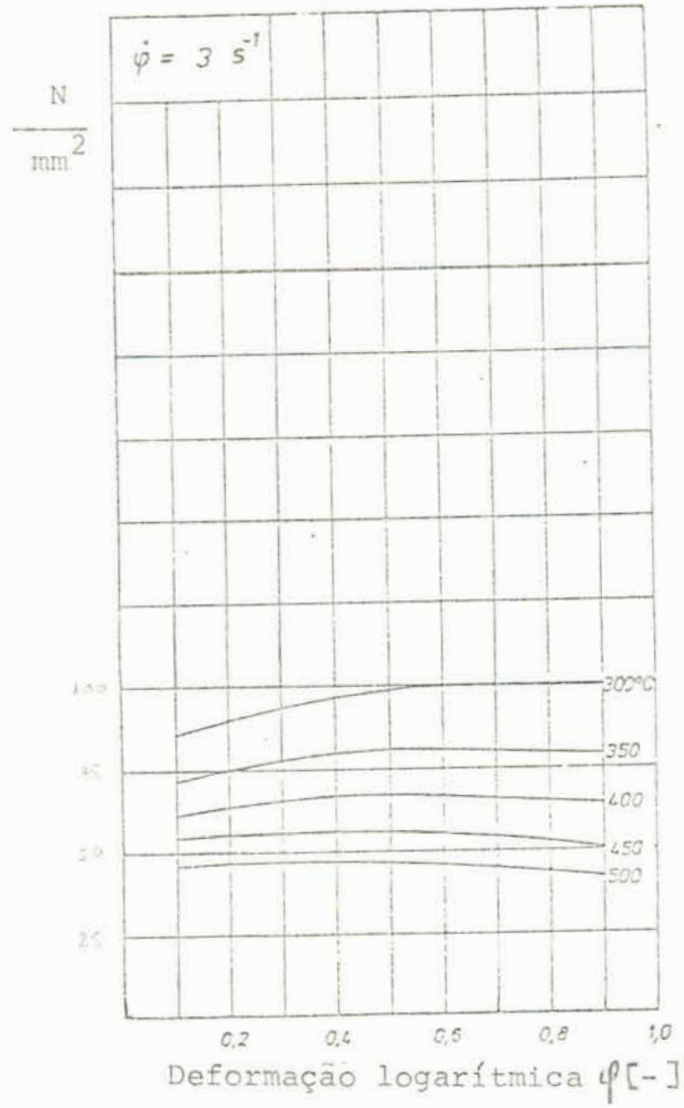


Fig. A10 - Curva de escoamento $k_f \times \varphi$ em função da temperatura /4.8/.

11. ÍNDICE DE FIGURAS E TABELAS

Fig. 1.1 - Fluxograma de aspectos importantes a serem analisados no forjamento isotérmico	3
Fig. 2.1 - Representação esquemática da diminuição do custo total de uma peça em função do processo de forjamento	5
Fig. 2.2 - Comparação entre o forjamento convencional e o forjamento isotérmico em peças de Ti	8
Fig. 2.3 - Sistema de aquecimento por indução em peças de alumínio forjadas isotermicamente	9
Fig. 2.4 - Relação entre temperatura de ferramenta/temperatura de peça e tempos de pressão de contato para diferentes processos de forjamento	10
Fig. 2.5 - Comparação entre possíveis geometrias obtidas entre tres materiais diferentes no forjamento convencional	12
Fig. 2.6 - Análise comparativa entre peças fresadas e forjadas isotermicamente	13
Fig. 3.1 - Esquemática de uma matriz fechada de forjamento, segundo Altan	18
Fig. 3.2 - Representação esquemática das dimensões geométricas da equação (3.14).....	19
Fig. 3.3 - Peça forjada com aplicação do modelo de Reicherter	22
Fig. 4.1 (a) - Vista frontal em corte do dispositivo de compressão	26
Fig. 4.1 (b) - Vista em corte da base do dispositivo de compressão	27
Fig. 4.1 (c) - Vista em corte da câmara isotérmica do dispositivo de compressão	28

Fig. 4.1 (d) - Vista das dimensões da bolacha de compressão e do estampo do dispositivo	29
Fig. 4.2 - Foto do dispositivo de compressão	30
Fig. 4.3 - Esquemática da montagem dos equipamentos	32
Fig. 4.4 - Curva de escoamento em função da deformação e da temperatura	36
Fig. 4.5 - Curva de escoamento em função da temperatura mantendo-se constante a deformação	37
Fig. 4.6 - Curva de escoamento em função da variação da velocidade de deformação	41
Fig. 4.7 - Comparação de dados experimentais com dados da literatura (equação de Hensel e Spittel).....	43
Fig. 4.8 - Comparação de dados experimentais com dados de Akeret	46
Fig. 5.1 - Representação esquemática do forjamento com e sem formação de rebarba	49
Fig. 5.2 - Teste realizado usando-se plasticina	50
Fig. 5.3 - Foto da ferramenta 2	50
Fig. 5.4 - Geometria da ferramenta 2	51
Fig. 5.5 - Representação esquemática de atrito-temperatura versus vários tipos de lubrificantes	55
Fig. 6.1 - Características geométricas	57
Fig. 6.2 - Força calculada e medida para cada peça forjada	65
Fig. 6.3 - Exemplo do diagrama obtido com a aplicação do modelo de Reicherter (peça 1)	66
Fig. 6.4 - Curvas resultantes do forjamento isotérmico para a bateria de testes B	67

Fig. 6.5 - Curvas resultantes do forjamento isotérmico para a bateria de testes C	68
Fig. 6.6 - Alturas finais obtidas versus velocidades de prensagem, utilizadas na bateria de testes C	69
Fig. 6.7 - Macroestrutura da peça 1. Bateria de testes A	70
Fig. 6.8 a) e 6.8 b) - Macroestrutura de um corpo-de prova utilizado para a curva de escoamento ($\dot{\gamma} = 505^{\circ}\text{C}$)	71
Fig. A1 a Fig. A10 - Curva de escoamento $k_f \times \dot{\gamma}$ em função da temperatura	73-87
Tab. 2.1 - Valores de resistência à deformação (k_w) típicos em forjamento de precisão de palhetas de compressor feitas em TiAl6V4 /2.4/	12
Tab. 2.2 - Processos especiais de forjamento e seus objetivos /2.8/	14
Tab. 4.1 - Características da liga AlMgSi 1	24
Tab. 4.2 - Propriedades da liga AlMgSi 1 /4.3/	25
Tab. 4.3 - Valores obtidos no ensaio nº1	33
Tab. 4.4 - Valores obtidos no ensaio nº2	34
Tab. 4.5 - Valores obtidos no ensaio nº3	35
Tab. 4.6 - Valores obtidos no ensaio nº4	38
Tab. 4.7 - Valores obtidos no ensaio nº5	39
Tab. 4.8 - Valores obtidos no ensaio nº6	40
Tab. 4.9 - Comparação de k_f em função da $\dot{\gamma}$ e da $\dot{\gamma}$ obtidos experimentalmente, com os valores de Hensel e Spittel /4.5/	42

Tab. 4.10 - Representação das diferenças resultantes de k_f , conforme tab. 4.9	44
Tab. 4.11 - Influência da variação da composição química nos valores de $k_f \times \psi$, mantendo-se constantes $\dot{\psi}$ (s^{-1}) e ν ($^{\circ}C$)	45
Tab. 4.12 - Comparação de alguns valores de Akeret e Meyer-Nolkemper	47
Tab. 4.13 - Representação das diferenças resultantes de k_f conforme tab. 4.12	47
Tab. 4.14 - Composição química utilizada por Akeret e Meyer-Nolkemper	48
Tab. 6.1 - Resultados da bateria de teste A	59
Tab. 6.2 - Resultados da bateria de teste B	60
Tab. 6.3 - Resultados da bateria de teste C	61
Tab. 6.4 - Resultados obtidos para a bateria de teste A...	62
Tab. 6.5 - Resultados obtidos para a bateria de teste B...	63
Tab. 6.6 - Resultados obtidos para a bateria de teste C...	64