

## **ASPECTOS DO FORJAMENTO SEMISÓLIDO EM MATRIZ FECHADA (1)**

**Marcos Mallqui Espinoza (2)**

**Lirio Schaeffer (3)**

**Waldemar Alfredo Monteiro (4)**

Este trabalho analisa o comportamento no estado semisólido de ligas de alumínio no forjamento em matriz fechada. Foram analisadas curvas tensão-deformação mediante um ensaio uniaxial e através da teoria das tiras calculada a força de forjamento teórico.

Neste estado o metal escoou conforme o comportamento não NEWTONIANO, sob tensões de cisalhamento pequenas, isto permite forjar peças de formato complexo com prensas de baixa capacidade.

Para a aquisição dos parâmetros como temperatura, tempo, força e deformação empregou-se um programa DIAdem instalado num PC AMD K5 PRO. A temperatura foi medida com um pirômetro óptico e o aquecimento foi realizado num forno de indução de alta frequência.

**(forjamento semisólido, tixoforjamento, curvas tensão-deformação, alumínio)**

---

**(1) Trabalho apresentado no 53º Congresso Anual da ABM, realizado 13 ao 17 de Setembro de 1998, em Belo Horizonte- MG.**

**(2) Eng. Metalúrgico da Universidad Nacional Mayor de San Marcos (Lima/Peru), Estudante de Doutorado da Universidad Federal do Rio Grande do Sul (Porto Alegre/Brasil).**

**ESPINOZA@VORTEX.UFRGS.BR**

**(3) Eng. Mecânico da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (Porto Alegre/Brasil), Doutor da Universidade Técnica de Aachen /Alemanha, Professor e Coordenador do Laboratório de Transformação Mecânica do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.**

**SCHAEFER@VORTEX.UFRGS.BR**

**(4) Eng. Mecânico do IPEN - CNEN - MMM, São Paulo.**

**WAMONTEI@NET.IPEN.BR**

**Endereço : Av. Bento Gonçalves, 9500 - CXP : 15021**

**CEP 91501-970 Porto Alegre - RS - BRASIL**

## 1.- INTRODUÇÃO

O forjamento semi-sólido com matriz fechada (FSSMF) ou também denominado tixoforjamento, é um novo processo de fabricação de peças com dimensões próximas das finais (**near net shape**).

A conformação de metais no estado semi-sólido, baseia-se principalmente no seu comportamento tixotrópico que exige uma microestrutura inicial característica é necessária para este processo.

A tixotropia é um fenômeno físico no qual o metal no intervalo sólido-líquido escoava como um líquido de elevada viscosidade quando é submetido a uma tensão de cisalhamento. Este comportamento especial é causado pela presença de uma fase sólida globular na pasta ao invés da tradicional microestrutura dendrítica. Esta morfologia particular com fase sólida é responsável pelo escoamento não Newtoniano do material dentro da matriz (Fig.1). Para alcançar este comportamento, o metal deve ser submetido a um processo prévio onde a estrutura dendrítica deve ser destruída /1/2/.

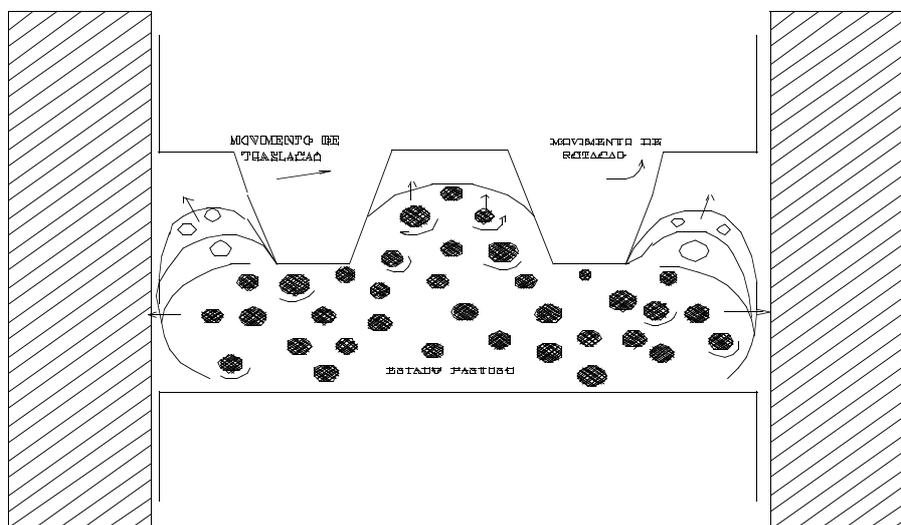


Fig.1.-Esquema gráfico onde mostra-se o escoamento do metal com estrutura globular /2/

No tixoforjamento, a coexistência destas fases está limitada pelas linhas de Líquidus e Sólidus do diagrama de fases. Estas linhas fixam igualmente as condições de equilíbrio de suas composições químicas e proporções relativas da fração sólida. Sua morfologia, entretanto, vai depender das condições de solidificação ou de refusão.

Quando um metal solidifica em condições normais, surgem dendritas que acarretam a perda de fluidez do metal, impedindo seu escoamento em canais mais finos, dificultando assim o preenchimento do molde de forma contínua sem turbulências. Este caráter dendrítico faz com que a liga não possa ser conformada num molde quando a fração sólida ultrapassa os 30 % aproximadamente do total. Neste estado e com esta estrutura, não pode mais sofrer deformações importantes sem aparições de fissuras ou segregações de fase líquida, além de outras imperfeições.

Esta tecnologia teve seu desenvolvimento no MIT (Instituto Tecnológico de Massachussetts) nos anos 1970. M.C. Fleming/3/ e sua equipe procuraram entender as trincas ocorridas por deformações a quente, geradas por tensões internas que envolvem as deformações ou fragmentações das dendritas. Em 1972, Spencer /4/ e seus colaboradores trataram de conformar a pasta com sólidos não dendríticos empregando ligas de estanho.

Estes pesquisadores verificaram que, quando as ligas metálicas eram submetidas à agitação vigorosa durante sua solidificação resultava numa pasta semifluida de baixa viscosidade embora a fração de sólidos (fs) esteja a níveis superiores ao 50%. A nova estrutura possui uma morfologia esferoidal com propriedades tixotrópicas .

As vantagens frente ao forjamento a frio são :

a.- Precisa-se de pequenas forças para conformar uma peça. Menos do 5 % da força empregada no forjamento a frio.

b.- Podem ser forjadas peças com formatos complexos e com paredes finas.

c.- Pode-se empregar qualquer liga inclusive com partículas duras, cerâmicas, por exemplo. No forjamento a frio só pode-se empregar ligas com elevada ductilidade.

d.- As peças fabricadas pelo FSSMF podem ser tratadas termicamente melhorando suas características mecânicas, no forjamento a frio as características mecânicas são elevadas só com o encruamento.

## 2.- APLICAÇÕES INDUSTRIAIS

Na competição com outros processos como forjamento e fundição, esta tecnologia tem demonstrado mais viabilidade principalmente pelas aplicações na indústria automobilística e aeronáutica. Empresas automotivas japonesas e americanas como a FORD, TOYOTA, GM, NISSAN, MITSUBISHY, etc. ; estão empregando ligas a base de alumínio e magnésio/5/, com esta tecnologia.

Com o aumento do emprego de ligas leves, baixando o peso dos automóveis e com isso reduzindo o consumo de combustível, este processo de fabricação de peças com uma geometria próxima da peça acabada, torna-se extremamente atrativo.

Estas empresas predizem que para o ano 2000 mais de 300 kg de ligas leves serão empregadas apropriadamente nos veículos de uso particular (Fig.2), reduzindo o peso em 25 %, que pouparia ao ano 183 milhões de barris de petróleo e evitaria a emissão de monóxido de carbono (CO) em 65 milhões de toneladas na atmosfera terrestre /6/.



Fig.2.- Comparação dos materiais que são empregados em anos anteriores e do futuro /6/

Além das empresas automotivas anteriormente citadas, existem também corporações como THIXOMAT Inc., AMPTECH Corp., DOW CHEMICAL Co., AMAX Inc. etc. que comercializam esta tecnologia, fabricam equipamentos e assessoram empresas. Recentemente a AMAX Inc. e a Mitsui & Company do Japão assinaram um acordo para a transferência desta

tecnologia e dominar o mercado Japonês e europeu. Outra empresa Japonesa a Nippon Light Metal Company encontra-se pronta para assinar um acordo semelhante.

O metal mais empregado é o alumínio pelas características físicas e mecânicas, entretanto este processo pode ser empregado com cobre e suas ligas (bronzes e latões) principalmente com uso na indústria elétrica /7/. Trabalhos realizados por Siegert e Baur /8/ descrevem a potencialidade do processo na fabricação de conectores elétricos. O zinco, especificamente o Zamac 2 ou Zamac 5 estão também alcançando uma elevada produção /9/. Com menor impacto, por terem emprego limitado, ligas de titânio /10/, ferro fundido /11/ e superligas a base de cobalto e níquel /12/ estão também, sendo fabricadas por este processo.

### 3.- CARACTERÍSTICAS DO PROCESSO

A característica principal deste processo é que o forjamento é realizado no estado semisólido. A matéria prima empregada, deve ser previamente preparada. O processo depende fortemente da microestrutura. O tixoforjamento pode ser dividido em quatro estágios operacionais que podem ser observadas na figura 3.

- a) Reaquecimento homogêneo da geratriz até a temperatura semisólida ( $f_s \sim 0.6$ );
- b) Colocação da peça na matriz de maneira rápida e centrada;
- c) Forjamento da geratriz rapidamente ( $\phi = 50 \text{ s}^{-1}$ );
- d) Extração da peça forjada e resfriada em água.

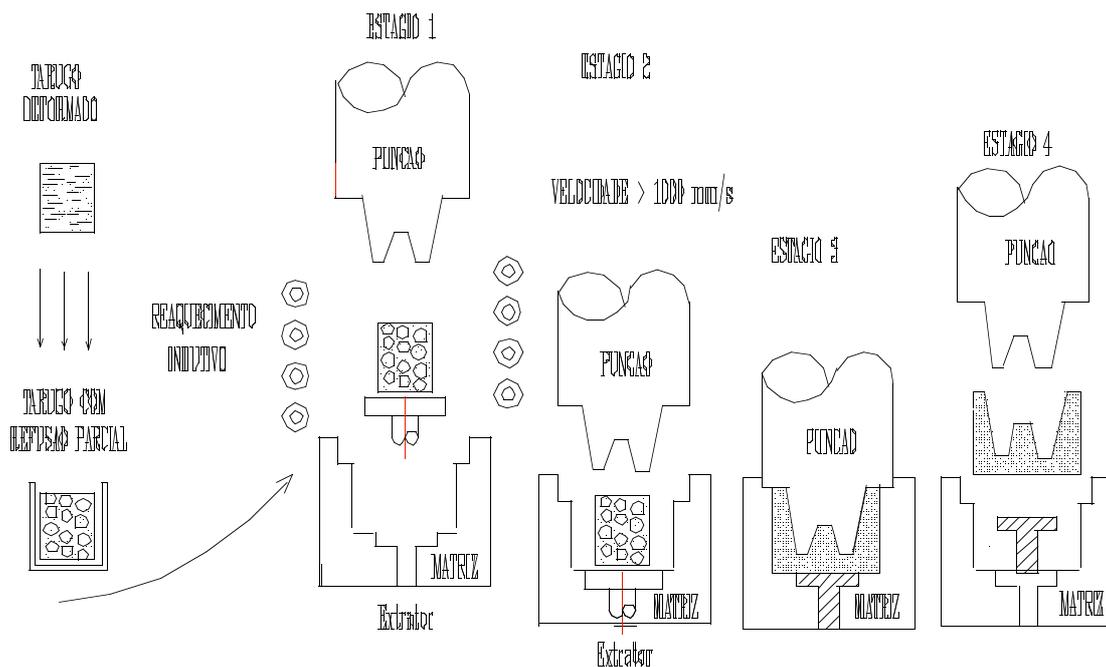
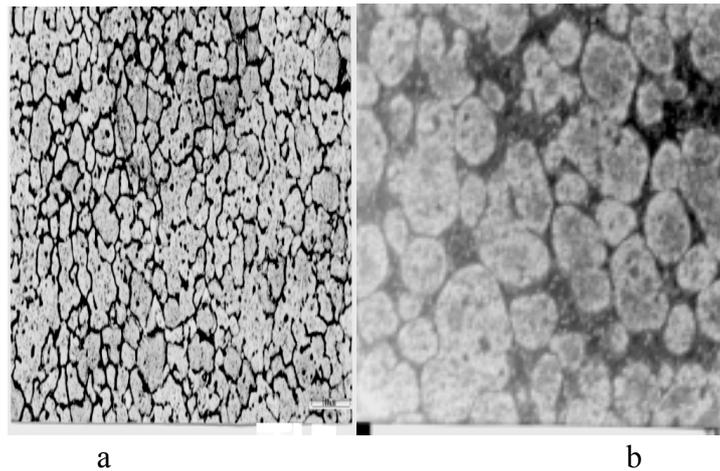


Fig 3.- Esquema da fabricação de uma peça por tixoforjamento nota-se os quatro estágios deste processo.

### 4.- MATERIAL E EQUIPAMENTOS BÁSICOS

#### 4.1.- Matéria Prima

Para os testes foi utilizado duas ligas de alumínio AA7075, matéria prima preparada pelo processo SIMA no CT-UFRGS e AA6082 preparada pelo processo MHD da EFU/Lammersdorf/Alemanha. Ambas ligas de amplo emprego e elevadas características mecânicas(Fig.4).

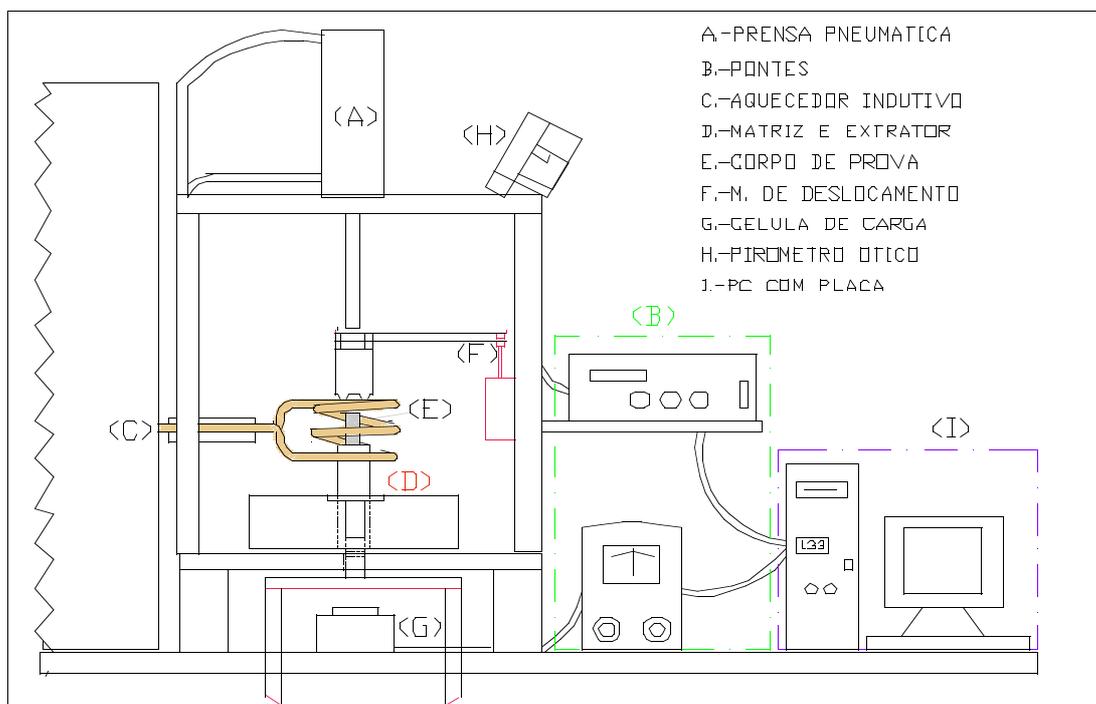


**Fig.4.- Microestrutura obtida pelos processos a) SIMA e b)MHD**

#### 4.2.- Equipamentos básicos

Na figura 5 são mostrados os equipamentos necessários para este processo:

- Aquecedor indutivo estático de alta frequência de 15 kW e 200 kHz (INDUCTOHEAT) .
- Pirômetro ótico infravermelho (RAYTEK).
- Prensa Pneumática com uma velocidade de até 1000 mm/s e força de 10 kN.
- Matriz com aquecimento resistivo com fonte de tensão reguláveis tiristorizado (LdTM).
- Controlador de temperatura com termopar tipo k (cromel-alumel).
- Medidor de deslocamento (GEFRAN SENSORI).
- Computador AMD K5 com placa de aquisição de dados (EAGLE) de 100 kHz e programa de aquisição DIAdem.
- Célula de carga de 10 kN.



**Fig.5.- Diagrama dos equipamentos empregados neste processo.**

## 5.- PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

### 5.1.- Obtenção das curvas Tensão-Deformação.

Para determinar o comportamento deste material no estado semi-sólido, foram realizados vários ensaios de compressão uniaxial num corpo de prova cilíndrico de 20 mm de diâmetro e 30 mm de altura.

A velocidade média do pistão era de 800 mm/s, medida com um dispositivo de deslocamento resistivo de 50 mm de comprimento (GEFRAN SENSORI). A medição do deslocamento em função do tempo permite o cálculo da velocidade de deformação durante o processo.

Através de um pirômetro ótico (RAYTEK), foram medidas as temperaturas de teste 585, 605 e 625 °C, e mediante uma saída analógica conectada no computador.

A força de deformação foi medida com uma célula de carga de 10000 N, previamente calibrada com um anel dinamométrico.

Todos estes dados foram armazenados num computador através de uma placa de aquisição de dados EAGLE /13/.

Os dados foram tratados por um programa DIAdem /14/, instalados num PC AMD K5 pro 133 Mhz .

Para o tratamento das curvas pelo programa DIAdem foram inseridas as formulas seguintes:

$$kw = F_i/A_i \dots\dots\dots(1)$$

$$A_i = A_0 h_0 /h_i \dots\dots\dots(2)$$

$$\phi_h = \ln h_i/h_0 \dots\dots\dots(3)$$

Sendo:

kw = resistência a deformação (Neste trabalho kw = kf)

F<sub>i</sub> = força instantânea (N).

A<sub>i</sub> = área instantânea do corpo de prova (mm).

A<sub>0</sub> = área inicial do corpo de prova (mm).

h<sub>0</sub> = altura inicial (mm).

h<sub>i</sub> = altura instantânea (mm)

φ<sub>h</sub> = deformação verdadeira.

Na figura 6 são mostradas as curvas encontradas por este ensaio, nota-se a enorme influencia da temperatura, sobre a resistência a deformação no estado semi-sólido.

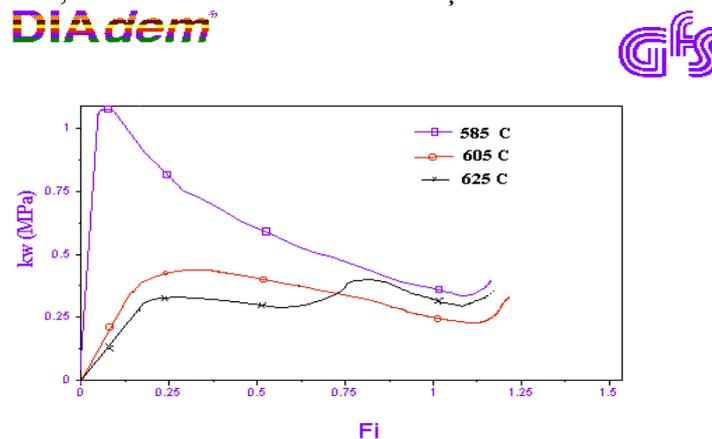
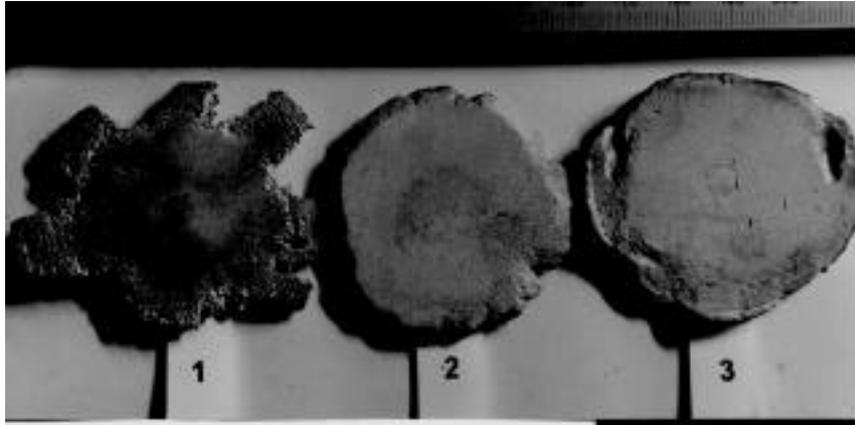


Fig.6.- Curva tensao-deformacao da liga AA7075.

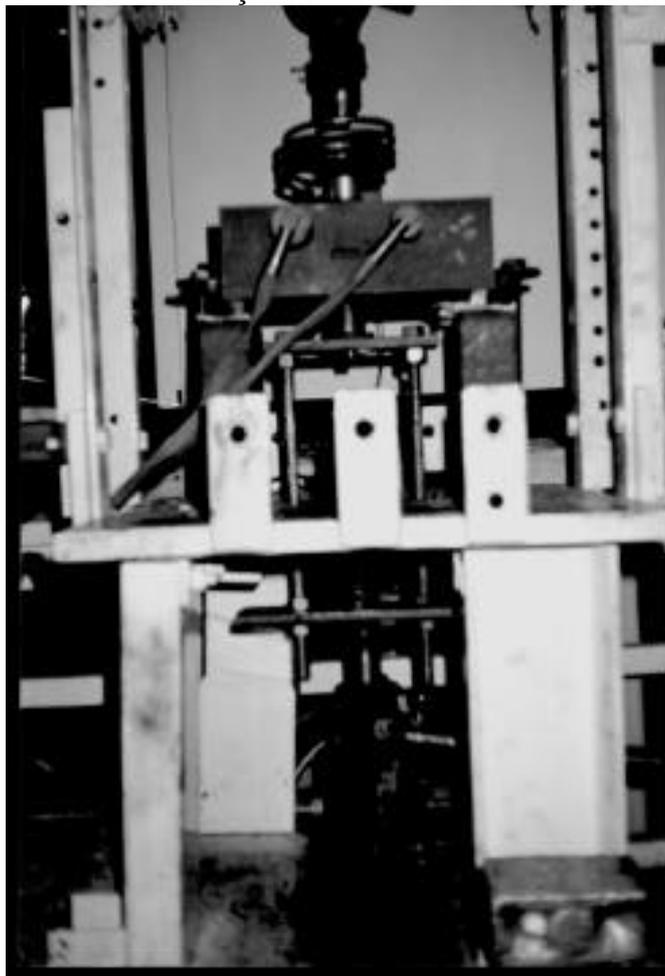
A figura 7 mostra a situação dos corpos depois de deformados. Os corpos de prova 2 e 3 não apresentaram trincas internas nem externas. Foram deformadas a 605 °C e 625 °C. O corpo de prova 1 foi deformado a 585 °C. Verifica-se que esta temperatura é inadequada para o forjamento.



**Fig. 7 .- Corpos de prova depois dos ensaios tensãoxdeformação.**

### **5.2.- Ensaio de forjamento**

Para esta avaliação foi fabricada uma matriz, punção e um extrator de aço empregando-se o material AISI H21. Para estes testes preliminares foi montada numa prensa Pneumática, fabricada no Laboratório de Transformação Mecânica/UFRGS como se mostra na figura 8.



**Fig.8.-Foto da Matriz e dos punções empregados no forjamento.**

Para um aquecimento homogêneo e rápido foi empregado um aquecedor indutivo. Para medição da temperatura empregou-se um pirômetro ótico infravermelho. Estes equipamentos são fundamentais para obter uma peça com estrutura fina, globular, e sem trincas.

Na figura 9 é apresentado o desenho da peça forjada /15/. Com este ensaio podemos medir a capacidade de preenchimento da matriz no momento do forjamento. As geratrizes são de 30mm de diâmetro e 21 mm de altura.

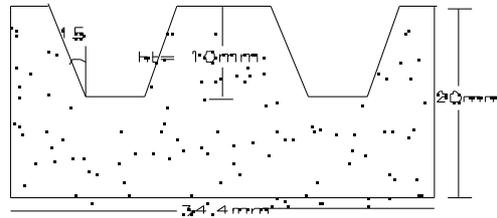


Fig.9.- Desenho da peça a ser forjada .

## 6.- AVALIAÇÃO DOS ENSAIOS TENSÃO-DEFORMAÇÃO

Pode-se notar claramente nas curvas tensão-deformação a existência de três zonas, as quais vão a depender da temperatura de forjamento.

Na figura 10 são mostradas esquematicamente as zonas de:

- a) Densificação
- b) Cisalhamento.
- c) Solidificação.

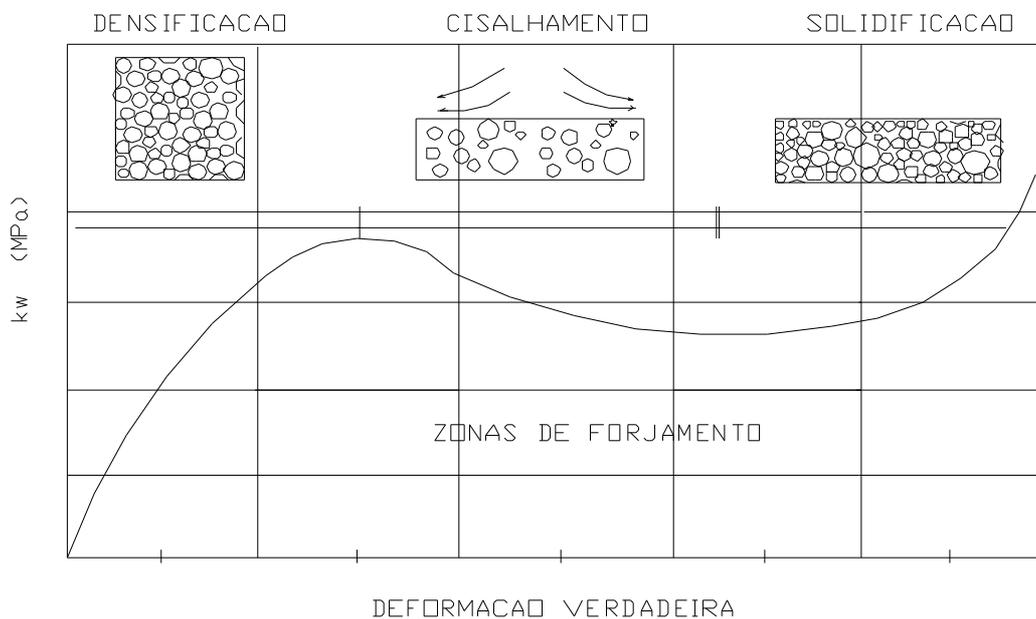


Fig.10.- Esquema das zonas no forjamento semi-sólido.

### Densificação

Nesta zona ocorre uma grande alteração da resistência ao escoamento. Quando a temperatura é baixa a resistência é maior. Isto pode-se notar claramente no gráfico da figura 6, onde é forjada a liga AA7075 a temperatura de 585 °C. A temperaturas elevadas com a quantidade de sólidos menor que 30 %, o metal quase não apresenta este comportamento.

### Cisalhamento

Nesta zona o material escoia até preencher toda a matriz, inclusive paredes finas, a temperatura da matriz não deve ser muito baixa para se evitar as perdas de calor da matriz ao corpo de prova. Esta zona deve ser muito rápida a velocidade de escoamento deve superar a gradiente térmico.

### Solidificação

O material nesta zona perde uma quantidade grande de calor por convecção e condução nas matrizes e no punção. O metal solidifica totalmente sob pressão. Com a pressão existente elimina-se os gases e ocorre um caldeamento no seio da peça. As porosidades são eliminadas desta maneira.

A superfície oxidada do corpo de prova penetra na peça durante o escoamento. Pode-se minimizar a oxidação fechando-se a câmara de aquecimento com a injeção de gás inerte.

## 7.- CÁLCULO DA FORÇA DE FORJAMENTO

Para poder avaliar o comportamento encontrado no estado semi-sólido, empregou-se a teoria elementar da Plasticidade discretizando-se a peça forjada em cinco anéis (figura 11).

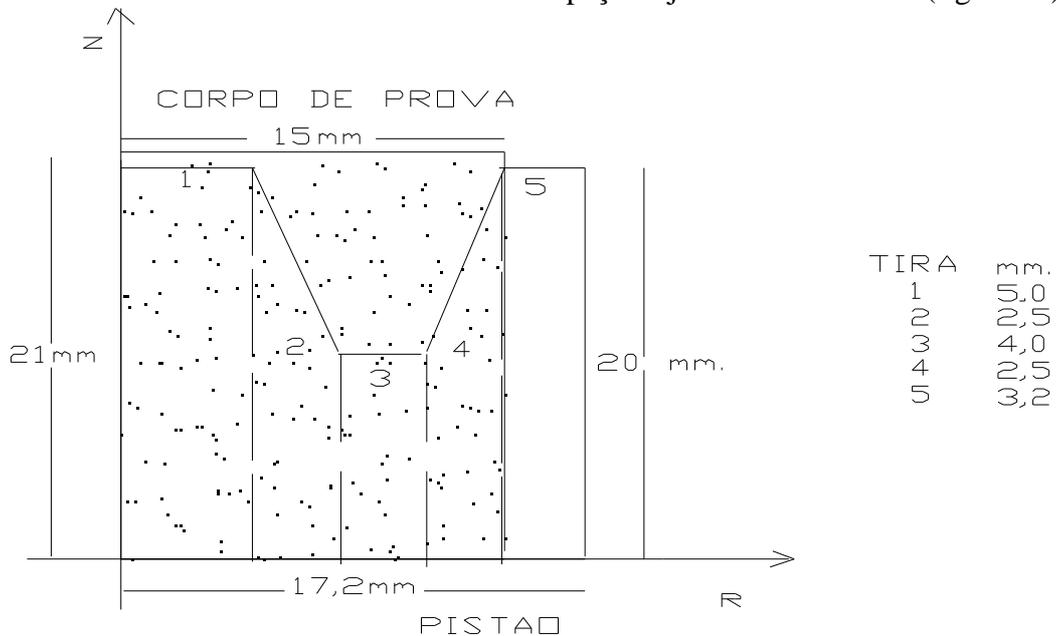


Fig.11.- Desenho do corpo de prova e da peça com os discos discretizados.

Para o cálculo teórico foi empregado o método das tiras (slab metod).

A equação empregada no cálculo dos discos foram:

$$z = k_w \cdot e^{(2\mu/h) (d/2 - r)} \dots\dots\dots(4)$$

Sendo:

$z$  = tensão axial na direção  $z$ , sobre a peça em cada disco.

$k_w$  = resistência a deformação

$\mu$  = Coeficiente de atrito

$d$  = Diâmetro final da peça

$r$  = raio de cada disco

Dados Iniciais:

Temperatura = 605 °C.

Altura inicial  $h_0 = 21$  mm.

Diâmetro inicial  $d_0 = 34,4$  mm.

Coefficiente de atrito = 0,35

Na tabela 1, são mostrados os dados calculados por cada disco.

TABELA 1

Tiras	$h_i$ (mm)	$r_i$ (mm)		$k_w$ (MPa)	$A_i$ (mm <sup>2</sup> )	$z$ (MPa)	F (N)		
1	20,0	5,0	0,049	0,09	78,54	0,138	10,84		
2	15,0	7,5	0,336	0,47	98,18	0,738	72,46		
3	10,0	11,5	0,742	0,40	238,76	0,596	142,30		
4	15,0	14,0	0,336	0,47	200,27	0,391	78,31		
5	20,0	17,2	0,049	0,09	313,66	0,090	28,23		
						TOTAL	332,13		

A força total do forjamento do pistão calculada pela teoria dos discos é 332 N e a força medida pela célula de carga foi de 350 N. O erro encontrado foi de 5%.

Na figura 12, é mostrado os pistões forjados a diferentes temperaturas, a peça 1 foi forjada a 605 °C, nota-se a peça são e totalmente preenchida, sem trincas. A peça 2 forjada a 625 °C nota-se na superfície a fase líquida segregada, e a peça 3 a 585 °C com falta de preenchimento e trincada, temperatura muito baixa.

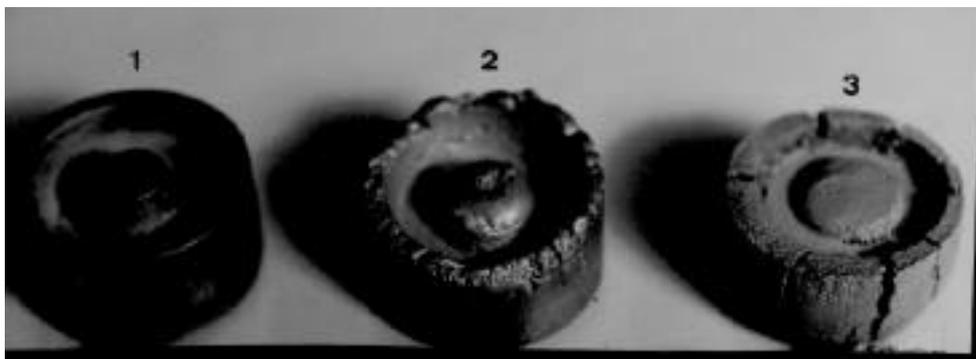


Fig. 12.- Pistões da liga AA7075 forjada a (1) 605°C, (2) 625 °C e (3) 585 °C.

Na figura 13 é mostrado a microestrutura da liga AA7075 forjada no estado semisólido. Pode-se notar zonas deformadas com grãos equiaxiais.

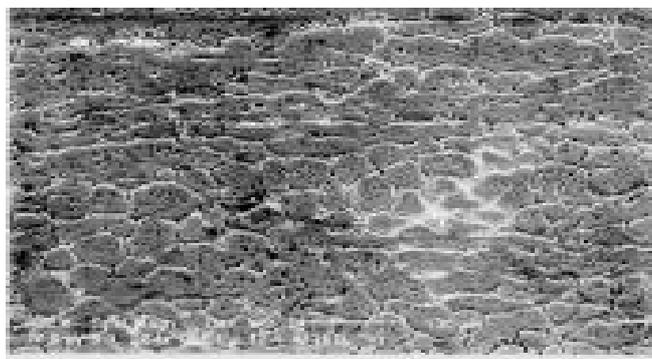


Fig. 13.- Microestrutura da liga AA7075 forjada a 605 °C.

Na figura 14 mostra-se a micrografia da liga AA6082(MHD) após o forjamento semisólido. Nota-se no interior dos grãos as discordâncias alinhadas e extensas indicando o escorregamento preferencial em planos do tipo  $\{011\}$ . Pode-se observar também alguns anéis de discordância.



**Fig.14.- Micrografia eletrônica obtida por MET da liga AA6082 forjada.**

## **8.-CONCLUSÕES**

1.-A liga AA6082 obtida pelo processo MHD possui uma microestrutura mas globular que a liga AA7075 obtida pelo processo SIMA.

2.-O forjamento semisólido necessita de forças muito pequenas.Neste caso de 350 N.

3.-As peças forjadas a 605 °C mostraram boa qualidade interna e externa, com excelente rendimento metálico. Não ha perda de metal.

4.-O refino de grão (50μm) e a quase ausência de porosidades provocam uma melhoria das propriedades mecânicas.

5.-A velocidade de forjamento não deve ser muito rápida ou muito lenta. Ambos extremos provocam defeitos na peça. Velocidades de deformação superiores a 100 s<sup>-1</sup> provocam segregações da fase líquida, velocidades inferiores a 10 s<sup>-1</sup> provocam a solidificação do metal pela perda de calor em contato com a matriz, com o preenchimento parcial da matriz.

6.-A temperatura de forjamento não deve ser muito elevada. Nesta situação ocorre segregação da fase líquida. A temperatura muito baixa provoca trincas e o metal não preenche totalmente a cavidade.

7.-O reaquecimento até a temperatura de forjamento deve ser rápida e homogênea, para assegurar um tamanho de grão fino com pouca oxidação na superfície. O sistema de aquecimento indutivo é o mais apropriado para este propósito.

8.-As pressões de forjamento adequadas para obter um limite aceitáveis de porosidades é de 3 MPa, para uma peça simples com simetria axial.

9.- A temperatura da matriz deve oscilar entre 350 e 450 °C, no forjamento destas ligas. À temperaturas superiores o lubrificante perde sua eficácia e a peça se solda na matriz.

## 9.- BIBLIOGRAFIA

- /1/ MIDSON, S.P.-Semi-Solid High Temperature Alloys - Proceedings of Second International Conference on the Processing of Semi-solid Alloys and Composites, Boston, June, 10 -12, 1992.
- /2/ KOOP,R.; BREMER,T. and MERTENS,P.-Thixoschmieden, Umformtechnik, 23-24 März 1995, EUROGRESS Aachen, 10 ASK, IBF,pp 4.1-1 / 4.1-7.
- /3/ KENNEY,M.P.; COURTOIS,J.A.; EVANS,R.D. ; FARRIOR,G.M.; KYONKA,C.P. and KOCH,A..A. -Semisolid Metal Casting an Forging -ALUMAX Eng., Metals Handbook, V15,1989, pag 327-330.
- /4/ SPENCER D.B., MEHRABIAN R.,FLEMINGS M., Metallurgica Transforming, 1972, V3, pp 1925-1932.
- /5/ MALACHI KENNEY, - New Semi-solid process forges future markets - Metallurgica, February 1992 , pag 47 - 48.
- /6/ KATSUNORI WATANABE, YOSHIHIKO N., SAITO K. AND HIDEO ITO - On the Present State of Wrought Aluminium for Automotive Use-The Sumitomo Search, # 39, Set 1989,pp 167-168.
- /7/ YOUNG, K.P.; RIEK, R.G. ; BOYLAN, J.F.; BYE R.L.; BOND, B.E. and FLEMINGS, M.C. Trans. AFS. Vol 84. 1976, pp 169-174.
- /8/ SIEGERT, K. AND BAUR, J. , Thixoforging of Cu-Zn Alloy, Production Engineering Vol IV, 2 , Feb 1997, University of Stuttgart, pp.41-44.
- /9/ Le HUY H. ; MASOUNAVE, J. and BLAIN, J. - J. Materials Science, Vol. 20 (Nro 1), Jan 1985, pp. 105-113.
- /10/ TOLOUI, B. and WOOD J.V.- Biomedical Materials, Vol 55, Materials Research Society, 1986.
- /11/ YOUNG, K.P.; RIEK, R.G. and FLEMINGS, M.C. - Metallurgy Technology, Vol. 6 (# 4), April 1979, pp 130-137.
- /12/ CHENG, J. ; APELIAN D. and DOHERTY, R.D.- Metallurgy Trans. A, Vol 17A (# 11), Nov. 1986, pp 2049-2062.
- /13/ DAVID TINKER and EAGLE Tec., Version 2.00- 1994-7 - User Manual.
- /14/ DIAdem, Version 2.00 - 1996 - GfS- mbH Aachen.
- /15/ LAPKOWSKI, W. and SINZAK, J.- Formability of Metal Alloys in the Part-Liquid State - Journal of Materials Processing Technology, 32 (1992), pp 271-277.

## 10.- AGRADECIMENTOS

É deixado aqui os agradecimentos dos autores a entidades que facilitaram a realização desta pesquisa como o CNPq e Instituto de Conformação Mecânica de Aachen (IBF-Alemanha) .

## ABSTRACT

This work analyses the behavior of semi-solid aluminum alloys in closed die forging. The strain-stress curves of an upsetting test were analysed, and the force was calculated with the slab method.

Under these conditions, the metal flows according to a non-Newtonian behavior, under small shearing stress. Then is possible to forge complex shape workpieces with a low capacity press.

In order to acquire of data (temperature, time, force, strain) the program DIAdem was installed in a PC AMD K5 PRO. The temperature was measured with a optical pirometer, and the slugs were heated in a high frequency induction furnace.

**(semi-solid forging, thixoforging, aluminium, upsetting)**