

ERICK PETTA MARINHO

**INSTRUMENTAÇÃO E CONTROLE DO PROCESSO DE
FABRICAÇÃO DE COMPONENTES AERONÁUTICOS POR
CONFORMAÇÃO SUPERPLÁSTICA**

São Paulo
2010

ERICK PETTA MARINHO

**INSTRUMENTAÇÃO E CONTROLE DO PROCESSO DE
FABRICAÇÃO DE COMPONENTES AERONÁUTICOS POR
CONFORMAÇÃO SUPERPLÁSTICA**

Monografia de Conclusão de Curso apresentada
à Escola Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do Diploma de Engenheiro
Mecatrônico.

Área de concentração:
Engenharia Mecatrônica

Orientador
Prof. Dr. Gilmar Ferreira Batalha

São Paulo
2010

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com anuência de seu orientador. São Paulo, 17 de dezembro de 2010.

Assinatura do autor.

Assinatura do orientador.

FICHA CATALOGRÁFICA

Marinho, Erick Petta

**Instrumentação e controle do processo de fabricação de componentes aeronáuticos por conformação superplástica / E.P. Marinho. -- São Paulo, 2010.
164 p.**

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos.

1. Aeronáutica (Componentes; Processos) 2. Processos de fabricação (Instrumentação; Controle) I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos II. t.

Embora ninguém possa voltar
atrás e fazer um novo começo,
qualquer um pode começar
agora e fazer um novo fim.

(Chico Xavier)

À minha família principalmente ao apoio incondicional de meu irmão e minha mãe. *In memoriam* Manasezes Rodrigues Marinho, meu pai.

AGRADECIMENTOS

Nessa minha jornada pela POLI tive o apoio e ajuda de muita gente; espero ser o mais honesto possível nestes agradecimentos, não deixando de citar ninguém.

Vou começar agradecendo a todos os mestres que tive na graduação, os quais com muito empenho e carinho pela profissão transmitiram da melhor forma possível o seu conhecimento, preparando os alunos para a vida fora da POLI; em particular, gostaria de agradecer a dois professores: ao professor Delson Torikai, que tive contato ao entrar na área mecatrônica, e que me ajudou muito nos primeiros passos na área científica; e ao professor Gilmar Ferreira Batalha, que sempre com muita boa vontade me auxiliou em diversos problemas ou dúvidas, seja como professor, seja como tutor de meu intercâmbio e, neste ano, como supervisor desta monografia.

Quero agradecer também aos engenheiros da Embraer, onde durante esse ano de atividades aprendi muito que trago comigo, sobre engenharia e sobre a vida profissional no geral.

Não posso deixar de citar os inúmeros colegas e amigos que fiz durante esses anos, em especial toda a turma dos “Mecatrutas” e do “Parabolóide Hiperbólico”, os quais espero que estejam comigo nos dias futuros. Meus amigos que há anos me dão apoio, Bruno, Alan e Jeizimayra. Recebi sempre valiosos conselhos também de meus tios Zé Roberto e Mayre Cabral.

Pra finalizar quero agradecer fortemente às principais pessoas da minha vida: meus pais, Margareth e Marinho, e meu irmão, Renan, que sempre estiveram dispostos a me apoiar e incentivar em todas as minhas decisões e momentos mais difíceis que passei, e também a fazer as cobranças e dar as broncas sempre que isso foi necessário.

Muito obrigado e um forte abraço a todos!

RESUMO

No presente trabalho de formatura é proposto um controle do processo de conformação superplástico de ligas de alumínio em uma autoclave. Propõem-se uma nova estratégia de caracterização reológica de matérias conformados em expansão fluidoestática biaxial. Entenda-se por nova estratégia a escolha das condições de conformação, determinação do ciclo de pressão, descrição do ensaio reológico até os métodos de determinação dos coeficientes de interesse (m , n e K). A abordagem está dividida em três sistemas de controle: (a) ciclo térmico, (b) do ciclo de pressurização e (c) da variação da taxa de deformação. O desenvolvimento dos controles citados compreende as atividades relacionadas desde o dimensionamento dos sensores, definição da planta de controle, definição do sistema de aquisição de dados até monitoramento em tempo real das variáveis do processo; a saber: temperatura, pressão e deformação. O sistema de aquisição de dados combina o hardware HBM-QUANTUM-X operado com o software HBM-Catman-easy, que permite aquisição dos sinais dos diferentes sensores e monitoramento desses sinais em tempo real em uma estação de trabalho.

Palavras-chave: Superplasticidade. Conformação Superplástica. Instrumentação. Caracterização reológica. Controle.

ABSTRACT

The aim of this work is to propose the set up control of superplastic forming of aluminum alloys in an autoclave. It proposes a new strategy for rheological characterization of materials conformed by biaxial bulge test. New strategy here means choosing of forming conditions, determining the pressure cycle, description of the rheological test methods to determine the coefficients of interest (m , n and K). This approach is divided into three control systems: (a) the thermal cycle, (b) the cycle of pressurization and (c) the variation of strain rate. The development of the listed controls includes the activities related from the design of the sensors, the setting of the plant control system, definition of the system data acquisition up to the monitoring of process variables in real time, such as: temperature, pressure and deformation. The data acquisition system combines the hardware HBB-QUANTUM-X and the software HBM Catman-easy, which allows the acquisition of signals from different sensors and the monitoring of these signals in real time at a workstation.

Keywords: Superplasticity, Superplastic Forming, instrumentation. Rheological characterization. Control

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diferença de tamanho de grão entre as ligas de alumínio 5083 convencional (esquerda) e superplástica (Direita), que possui granulação fina ($d \leq 10 \mu\text{m}$) (Siegeret al., 1994)	24
Figura 2 - Dependência entre a tensão de escoamento (σ_e) e a taxa de deformação ($\dot{\epsilon}$) para diferentes temperaturas de conformação. Material: Formall545 (Vulcan, 2006)	27
Figura 3 - Comportamento típico de material superplástico: (a) Curva Sigmodal mostrando o comportamento do logaritmo da tensão de escoamento em função do logaritmo Taxa de deformação. (b) sensibilidade a taxa de deformação “m” em função do logaritmo da taxa de deformação. (Snippe, 2009)	28
Figura 4 - Variáveis de Análise para a janela de Superplasticidade do processo de conformação estudado (temperatura, deformação e taxa de deformação) (Blandin J J, 2008)	29
Figura 5 - Pearson 1934, Liga de Bi - Sn (1950%) (Pearson, 1934)	32
Figura 6 - Recorde mundial de tração uniaxial (Robert, 2009)	34
Figura 7 - Alongamento uniforme alcançado para diferentes materiais ao longo dos anos (Vulcan, 2006)	35
Figura 8 - Liga de alumínio superplástico EN AW 7475 (Robert, 2009)	35
Figura 9 - Divisão do mercado para utilização de ligas de alumínio superplásticas. Adaptado (Vulcan, 2006)	36
Figura 10 - Exemplos na indústria automotiva de aplicações de conformação superplásticas	37
Figura 11 - Exemplos de conformação superplástica no setor aeronáutico	38
Figura 12 - Mapeamento dos parâmetros superplástico para ligas de magnésio (deformação, taxa de deformação e temperatura) (Abu-Farha, 2007)	43
Figura 13 - Mapeamento dos parâmetros superplástico de ligas de magnésio (deformação, taxa de deformação e temperatura) (Abu-Farha, 2007)	43
Figura 14 - Próteses conformadas superplasticamente	45
Figura 15 - Perfil usado na construção do acelerador de partículas. (Snippe, 2008)	46
Figura 16 - Relações entre tensão e deformação em diferentes taxas de deformação da liga de alumínio AA 5083 em condições superplástica. (Snippe, 2008)	47
Figura 17 - Corpo de prova submetido a hidroconformação para levantamento dos dados necessários para a produção do perfil desejado do acelerador de partículas. (Snippe, 2008)	47
Figura 18 - C1, C'1 são gráficos típicos de materiais clássicos e C2, C'2 são gráficos típicos de materiais superplásticos. (Blandinet al., 1996)	48
Figura 19 - Evolução da microestrutura e textura durante a deformação plástica. (Chandra, 2000)	50
Figura 20 - Evolução da microestrutura e textura durante a deformação superplástica. (Chandra, 2000)	50
Figura 21 - Esquema de tratamento termo-mecânico para obtenção da liga AA5083 como tamanho de grão adequado para a conformação superplástica (Vulcan, 2006)	56
Figura 22 - Curva Sigmoidal - Deformação x Tempo	58
Figura 23 – Relação do índice de sensibilidade a taxa de deformação com a taxa de deformação (Siegeret al., 1994)	58
Figura 24 - Relação da tensão com a Taxa de deformação (Siegeret al., 1994)	59
Figura 25 - Ilustração que mostra o significado da largura de grão (Engleret al., 2000)	65
Figura 26 - Fenômeno da coalescência (Cappettiet al., 2010)	74
Figura 27 - Método para determinação do valor de m (Vulcan, 2006)	79

Figura 28 - Sensibilidade da taxa de deformação em função da própria taxa e da Temperatura de conformação. Material: AA5083. (Vulcan, 2006)	80
Figura 29 - Peak-shaped influenciada pela temperatura, tamanho inicial de grão e pela taxa de deformação. (Siegeret al., 1994)	82
Figura 30 - (a) Ilustração esquemática da acomodação no modelo GBS por Ball e Hutchinson. (b) GBS por Raj e Ashby (Baudalet al., 1995)	84
Figura 31 - O "Unit step" do processo de deformação. Um grupo de 4 grãos movem-se desde o estado inicial, através do estado intermediário até o estado final. Os estado inicial e final são termodinamicamente idênticos, embora tenham sofrido uma deformação. (Ashby et al., 1973)	86
Figura 32 - quatro exemplos de fronteiras não linear. (Ashby et al., 1973)	87
Figura 33 - A tensão de escoamento e o índice de sensibilidade a taxa de deformação versus a taxa de deformação para a liga de alumínio 7475 (Tanet al., 2007)	92
Figura 34 - A curva calculada de tensão de escoamento versus taxa de deformação para a liga de alumínio 7475. (Tanet al., 2007)	92
Figura 35 - A curva calculada de índice de sensibilidade da taxa de deformação versus taxa de deformação para a liga de alumínio 7475. (Tanet al., 2007)	93
Figura 36 – (a) Diagrama esquemático de expansão fluidoestática biaxial que considera a distribuição de espessura uniforme e (b) esquema de tensões no elemento. (Jovane, 1968)	94
Figura 37 - Esquemático de expansão fluidoestática biaxial de trabalho que considera a espessura função do m. (Holt, 1970)	95
Figura 38 - Esquemático do ensaio de expansão fluidoestática biaxial que considera o gradiente de pressão para justificar a variação de espessura. (Ghosh et al., 1982)	95
Figura 39 - Esquemático do processo de expansão livre superplástica com hipótese de distribuição uniforme de espessura. (Cheng, 1994)	96
Figura 40 - Modelo geométrico de expansão fluidoestática biaxial pneumática com matriz redonda (Vulcan, 2006) adaptado de (Dutta et al., 1992)	99
Figura 41 - Variação do ângulo do topo no trabalho do BOUDE em função da altura. (Boulos, 1999)	100
Figura 42 - Estratégia de ensaio de caracterização dos materiais. Adaptado (Aoura, 2004)	102
Figura 43 - Esquema de ensaio de expansão fluidoestática biaxial para uma peça fina. (Aoura, 2004)	103
Figura 44 - Representação esquemática do campo de tensão Biaxial usado pelo ARAMIS (GOM, 2000)	105
Figura 45 - Esquemático descritivo da nova proposta de caracterização reológica de expansão fluidoestática biaxial livre	107
Figura 46 - Setup experimental da instrumentação do controle da ferramenta de expansão fluidoestática biaxial.	112
Figura 47 - Ferramenta de conformação Superplástica, objeto de aplicação do controle proposto	113
Figura 48 - Comparador analógico (Franchitti, 2007)	116
Figura 49 - Instrumentação da conformação superplástica da liga de PbSn; variáveis monitoradas são pressão e deslocamento. (Franchitti, 2007)	116
Figura 50 - Setup de ferramenta de expansão fluidoestática biaxial livre, indicando o sensor LVDT utilizado, junto com sua corte lateral. (Cheng, 1994)	117
Figura 51 - Sistema de medição de deformação Laser Ótico (Kim, 2002)	118
Figura 52 - Sensor a laser por triangulação	119
Figura 53 - Setup de uma ferramenta de hidroconformação que utiliza câmeras CCD para monitoramento de deformações. (Ben Tahar, 2005)	120
Figura 54 - Utilização do sistema ARAMIS no setup de do ferramental para uma expansão fluidoestática biaxial chamada de "Viscous Pressure Bulge" (VPB) (Sigvant et al., 2009)	122

<i>Figura 55 - Visão frontal da janela de vidro no desenho de conjunto da ferramenta com realce no forno (Lopes, 2010)</i>	125
<i>Figura 56 - Visão lateral da janela de vidro utilizada de acesso para o sistema de medição de deformação ARAMIS. (Lopes, 2010)</i>	126
<i>Figura 57 - Válvula Proporcional (Franchitti, 2007)</i>	128
<i>Figura 58 - Transdutor de pressão (Franchitti, 2007)</i>	129
<i>Figura 59 - Parte inferior da ferramenta de conformação superplástica com destaque no canal de entrada de ar (Lopes, 2010)</i>	131
<i>Figura 60 - Diagrama de bloco do sistema de controle de pressão (em destaque)</i>	131
<i>Figura 61 - Detalhes do fluxo de calor da ferramenta de estampagem (Dröderet al., 1999)</i>	133
<i>Figura 62 - Possibilidades de aquecimento da placa para processo "sheet-metal Forming" (Dröderet al., 1999)</i>	133
<i>Figura 63 - Exemplo de sistema de aquecimento e controle com geração de energia externa a ferramenta (Dröderet al., 1999)</i>	134
<i>Figura 64 - (a) Detalhes do ferramental e amostra (b) Montagem do forno, prensa e ferramental de "expansão pneumática superplástica" (Vermaet al., 2009)</i>	135
<i>Figura 65 - Pirômetro de Radiação Infravermelho e algumas características</i>	137
<i>Figura 66 - Exemplo de comportamento buscado para a temperatura, gráfico referente a $Z=3$ (Franklin, 2009)</i>	138
<i>Figura 67 - Destaque no sistema de controle de temperatura, diagrama de blocos da malha de controle da temperatura</i>	140
<i>Figura 68 - Forno utilizado para aquecer a ferramenta de conformação superplástica</i>	140
<i>Figura 69 - Detalhes de conexões dos controladores</i>	141
<i>Figura 70 - Foto frontal dos controladores instalados na caixa de controle do forno</i>	141
<i>Figura 71 - Acesso superior da ferramenta superplástica, com destaque para a localização da câmera térmica</i>	142
<i>Figura 72 - Representação do controle independente (temperatura, pressão e deformação) através de diagrama de blocos</i>	144
<i>Figura 73 - Detalhes de construção do fechamento da ferramenta, desenho de conjunto do sistema de fechamento</i>	145
<i>Figura 74 - Desenho explodido do sistema de fechamento</i>	147
<i>Figura 75 - Interface do software da ARAMIS, com destaque para a opção de MACRO no menu.</i>	148

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 1 - Resumo dos requisitos metalúrgicos e de processo. Adaptado (Sieger e Werle 1994)</i>	25
<i>Tabela 2 - Expoente de Encruamento n e Sensibilidade a taxa de deformação m do material Alumínio para diferentes temperaturas (Vulcan 2006)</i>	26
<i>Tabela 3 - Lista de empresas e nomes comerciais para a liga de alumínio AA5083(Vulcan 2006)</i>	36
<i>Tabela 4- Propriedades Superplásticas de algumas ligas de alumínio (American Society for Metals 1988)</i>	39
<i>Tabela 5 - Propriedades da liga AA5083 utilizada nas simulações</i>	40
<i>Tabela 6- Comparação entre Superplasticidade e Plasticidade. Adaptado (Boulos 1999)(Vulcan 2006)(Sieger e Werle 1994)</i>	49
<i>Tabela 7 - Itens do desenho da ferramenta em anexo plotado em A0 (Lopes 2010)</i>	125
<i>Tabela 8- Válvulas utilizadas no controle de pressão (Lopes 2010)</i>	130
<i>Tabela 9 - Tabela com parâmetros do projeto usados para dimensionamento dessa prensa (Lopes 2010)</i>	147

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área	m^2
a_0	Semi-eixo menor inicial da peça elíptica	
b	Vetor de Burgers	$[\mu m]$
b_0	Semi-eixo maior inicial da peça elíptica	
C_m	Constante adimensional que incorpora todos os parâmetros estruturais, menos o tamanho de grão. Chamada de constante de microestrutura e de dependência do mecanismo de deformação	-
C_1	Constante	
C_2	Constante	
C	Constante em função temperatura e microestrutura	-
D_v	Coeficiente de autodifusão volumétrica	
D_{gb0}	Fator Pré-exponencial	
D	Coeficiente de difusão	-
D_0	Frequência coeficiente difusão	$[\frac{m^2}{s}]$
d	Diâmetro de grão	$[\mu m]$
d_0	Tamanho de grão inicial	
d_s	Tamanho de grão após certo tempo t	
e_0	Espessura inicial da peça	
F_{gb}	Contribuição de tensão gerada pelo GBS	
f_0	Fração de volume de cavidades em deformação zero	
F	Força	N
G	Módulo de cisalhamento	[MPa]
h	Altura total da peça conformada	
h_p	Altura do domo da calota	
h_n	Coeficientes de Fourier relativos a forma da fronteira	
k	Constante de Boltzmann	[J/K]
m	Sensibilidade a taxa de deformação da equação de Ludwik ou Norton-Hoff	-
n	Expoente de encruamento da equação de Norton-Hoff	-
p	Expoente de crescimento de grão	

P	Pressão de aplicada na expansão fluídoestática biaxial	
$P_h(t)$	Pressão	
Q_c	Energia de ativação para processo de fluência	$[\frac{KJ}{mol}]$
q	Expoente de tamanho de grão	-
R_0	Raio inicial da peça a ser conformada	
R_c	Raio de curvatura da peça conforma	
R	Constante real dos gases	$[\frac{J}{mol.K}]$
TH	Temperatura homóloga	-
t	Tempo	
T	Temperatura absoluta de ensaio	[K]
$\dot{U}$	Taxa de deslizamento de controle difusional	
$\sigma_a(\dot{\epsilon})$	Tensão por Fluência por discordâncias;	[MPa]
$\sigma_b(\dot{\epsilon})$	Tensão para GBS	[MPa]
σ	Tensão	[MPa]
σ_{eq}	Tensão equivalente aplicada no pólo	
α_0	Ângulo inicial no topo do domo cônico para identificar a simetria	[°]
σ_e	Tensão de escoamento	[MPa]
β	Coeficiente de cavitação dependente do material	
$\bar{\beta}$	Função de condição de tensão	
$\dot{\epsilon}$	Taxa de deformação	$[s^{-1}]$
ϵ	Deformação	-
ϵ_t	Deformação verdadeira (natural ou deformação logarítmica)	-
δ	Largura de contorno de grão	
λ	Comprimento de onda	[nm]
γ	Energia de superfície de contorno de grão	
φ	Ângulo da peça conformada	[°]
ρ	Raio de curvatura da peça conformada	
Ω	Volume atômico	$[nm^3]$
ξ	Coeficiente da taxa de deformação	
σ_m	Tensão média	[MPa]
τ_b	Tensão de cisalhamento pra GBS	[MPa]

LISTA DE ABREVIATURAS

SPF	Superplastic Forming
MEF	Método de elementos finitos
GBS	Grain boundary sliding, deslizamento de contornos de grão
CGBS	Cooperative Grain boundary sliding, Deslizamento Cooperativo de Contornos de Grão
SPF/DB	Combination of Superplastic Forming and Diffusion Bonding
SGG	Static Grain Grown
DEGG	(Deformation-Enhanced Dynamic Grain Grown)
MBD	Mukherjee-Bird-Dorn
LVDT	(linear variable differential transformer
LI-CCD	Linearized Charge-couple device
VPB	Viscous Pressure Bulge

SUMÁRIO

1	Introdução	19
1.1	Contexto.....	21
1.2	Características microestruturais e o mecanismo físico de deformação superplástico	22
1.3	Comportamento mecânico superplástico.....	23
1.4	Requisitos metalúrgicos e de processo Superplástico	25
1.5	Objetivos	30
1.5.1	Objetivo geral	30
1.5.2	Objetivo específico.....	30
1.6	Revisão Bibliográfica do fenômeno Superplástico	32
1.6.1	Conformação superplástica em ligas de alumínio.	35
1.1	Propriedades superplásticas de algumas ligas de alumínio	39
1.2	Parâmetros utilizados no projeto	39
1.3	Fatores tecnológicos e econômicos.....	40
1.4	Justificativa.....	41
1.5	Aplicações	43
1.5.1	Aeroespaciais.....	44
1.5.2	Próteses.....	44
1.5.3	Outras aplicações.....	45
2	Modelagem do processo superplástico.....	48
2.1	Comparação entre Plasticidade e Superplasticidade	48
2.2	Abordagens do Escoamento Superplástico.....	51
2.3	Estado do conhecimento	53
2.4	Fundamento da conformação superplástica	54
2.4.1	Materiais superplásticos	54
2.4.2	Parâmetros fundamentais da conformação Superplástica	55
2.4.3	Tamanho de grão.....	55
2.4.4	Taxa de deformação (ϵ).....	68
2.4.5	Temperatura de conformação.....	71
2.5	A estabilidade e os fenômenos limitantes do processo de conformação superplástico.....	72
2.5.1	Estabilidade plástica.....	72
2.5.2	Cavitação	73

2.5.3	Expoente de Sensibilidade à taxa de deformação	76
2.5.4	Retorno Elástico (Springback).....	80
2.6	Equação constitutiva considerando crescimento de grão e cavitação.....	81
2.6.1	O “ <i>modelo composto</i> ” para superplasticidade.....	83
3	Caracterização reológica dos materiais em conformação superplástica.	94
3.1	Histórico de métodos de caracterização	94
3.2	Caracterização das ligas para expansão fluideostática biaxial.....	97
3.2.1	Expansão fluideostática biaxial à pressão constante	97
3.2.2	Expansão fluideostática biaxial à velocidade de deformação constante.....	98
3.2.3	Expansão fluideostática biaxial à tensão constante	100
3.3	Proposta de estratégia de caracterização de expansão fluideostática biaxial.....	103
3.3.1	Modelo analítico de expansão fluideostática biaxial livre	103
3.3.2	Escolha das condições de conformação superplástica	104
3.3.3	Determinação do ciclo de pressão.....	105
3.3.4	Descrição do ensaio de caracterização reológica	106
3.3.5	Método de determinação do coeficiente m	108
3.3.6	Método de determinação do coeficiente n	110
3.3.7	Método de determinação da constante do material K	110
4	Memorial descritivo do projeto dos sistemas de controle.....	111
4.1	Esquemático de controle	111
4.2	Critério de escolha dos Sensores.....	114
5	Sistema de medição de Deformação.....	115
5.1	Medição de deformação	115
5.1.1	Relógio comparador e câmera.....	115
5.1.2	LVDT	117
5.1.3	Sistema Laser óptico	117
5.2	Opções de sensor de deformação	118
5.3	Sistema escolhido de monitoramento da deformação	121
5.4	Detalhes do controle de Deslocamento	123
6	Sistema de medição de Pressão.....	127
6.1	Medição de Pressão.....	127
6.2	Opções de sensoriamento de Pressão.....	128
6.2.1	Controle proporcional	128
6.3	Sistema escolhido de monitoramento da Pressão	129

6.4	Diagrama de bloco do sistema de controle e monitoramento da pressão	131
7	Sistema de medição de Temperatura	132
7.1	Medição de Temperatura	132
7.2	Opções de sensor de temperatura	132
7.2.1	Aquecimento na base da ferramenta de “sheet-metal Forming”	132
7.3	Sistema escolhido de monitoramento da temperatura	136
7.4	Detalhes do controle da temperatura	138
7.5	Resumo dos sistemas de controle integrados.....	143
8	Sistema de fechamento/Sistema de vedação e estanqueidade;	145
9	Sistema óptico de medição de deslocamento (ARAMIS)	148
10	Conclusões	149
11	Cronograma do trabalho	151
12	Anexos	152
12.1	Especificações técnicas do Sensor de distância, Empresa Schalt.....	152
12.2	Tabelas com os critérios de escolha do pirômetro.....	153
12.3	Data Sheet das válvulas de pressão dimensionadas para o projeto	154
12.3.1	AirTronic.....	154
12.3.2	Festo.....	158
13	Bibliografia	160

1 Introdução

No panorama ambiental e econômico mundial, o crescimento dos preços de combustíveis fósseis, a falta de flexibilidade nos combustíveis fósseis alternativos, poluição e aquecimento global, representam uma pressão crescente em vários setores industriais; no automobilístico concentram-se esforços na redução do consumo de combustível e redução das taxas de emissão, uma das análises que se propõe para alcançar essa meta é a redução da massa dos carros, e para isso é necessário utilizar cada vez mais ligas de metais leves, esse entrave da indústria automobilística é também sentido na **indústria aeronáutica**. Nesse contexto, o sucesso da utilização de ligas de titânio e alumínio em projetos aeronáuticos, impulsiona a tecnologia de conformação que possibilita tais aplicações, a *superplasticidade*.

Ao nível da manufatura, os aços apresentam uma aplicabilidade elevada pela sua boa conformabilidade, quando comparado as ligas de metais leves. Fato esse que impede a redução de peso de vários projetos, tanto na aeronáutica quanto na automobilística.

Nesse contexto, explora-se cada vez mais o fenômeno da superplasticidade apresentados por algumas ligas de metais leves, cuja tensão de escoamento apresenta extraordinário aumento em elevadas temperaturas.

Este fenômeno ganha interesse ao longo dos anos e tem sido bastante estudado e posto em prática com diversas ligas de titânio e alumínio, técnica chamada de *Superplastic Forming* (SPF) (Osada, 1997) .

Essa técnica emergente oferece varias vantagens, que serão discutidas posteriormente, quando comparado a processos de conformação convencionais, porém destaca-se a possibilidade de produzir formas de múltipla curvatura, em um passo único de conformação.

Conforme visto, as ligas de metais leves e a conformação superplástica possuem uma estreita relação de matéria prima e tecnologia; esse trabalho de

formatura trabalha com a liga de alumínio AA 5083, os principais requisitos da conformação superplástica serão controlados, dessa forma será possível ampliar os estudos no que cerne a conformação e caracterização reológica de materiais conformados superplasticamente através de ensaios de expansão fluidoestática biaxiais.

A abrangência do tema e a amplitude da pesquisa foram fatores que justificam a necessidade de um primeiro capítulo que além de introduzir o tema, também resuma as principais características microestruturais e os mecanismos de deformação. No capítulo 1, há uma revisão bibliográfica do processo de superplasticidade, como também evidencia o foco do trabalho, as ligas de alumínio.

Destaca-se no capítulo 2 a abordagem teórica do processo, que através da análise individual de cada parâmetro relacionado à superplasticidade, chega-se ao modelo com equações constitutivas que consideram, além das variáveis tradicionais (temperatura, pressão, deformação, velocidade da taxa de deformação, índice de sensibilidade a taxa de deformação e tempo de conformação), duas outras variáveis que tem sido foco intenso de pesquisa, o crescimento de grão e a cavitação.

O capítulo 3 trata dos modelos de caracterização reológica de materiais através de expansão fluidoestática biaxial, destaca-se nesse capítulo uma contribuição do presente trabalho de formatura, uma nova estratégia de caracterização reológica de materiais através de ensaio de expansão biaxial de conformação superplástica.

O capítulo 4 apresenta o setup de controle que será implementado na ferramenta a ser construída; nos capítulos 5, 6 e 7 realiza-se um estudo detalhado das três variáveis aquisitadas diretamente através da instrumentação proposta, deformação, pressão e temperatura respectivamente; para cada variável apresenta-se um levantamento dos métodos de sensoriamento, relacionados a conformação superplástica, dessa variável; como também as opções de sensores estudadas para implementação na instrumentação proposta e os motivos de descarte de algumas opções em detrimento do realce das características do sensor escolhido. No final de cada um desses três capítulos, há detalhes sobre o sistema de controle que será implementado.

Nos capítulos 5, 6 e 7 também se destaca as análises de posicionamento dos sensores.

No capítulo 8 há uma introdução de cálculo e análise do sistema de fechamento e estanqueidade da ferramenta.

O capítulo nove realça o sistema de sensoriamento ótico que será utilizado e justifica alguns parâmetros de utilização desses sensores.

1.1 Contexto

Este projeto visa dar continuidade as atividades de estágio, na empresa European Aeronautic Defence and Space Company **EADS**, do autor do projeto durante intercâmbio na Alemanha no período de 2007 a 2009. Após o retorno do intercâmbio à Escola Politécnica, tem sido realizado um estudo de ampliação das técnicas de instrumentação e controle sob orientação do Prof. Dr. Gilmar Ferreira Batalha. Neste trabalho é estudado, adicionalmente ao anterior, instrumentação de controle de temperatura, de pressão e deslocamento.

1.2 Características microestruturais e o mecanismo físico de deformação superplástico

A Superplasticidade não apresenta o mesmo mecanismo de deformação que a plasticidade convencional. Resumidamente, no último caso, os grãos se deformarão e isso introduzirá uma direção ao material. Superplasticidade é causada pelo deslizamento de grãos uns sobre os outros.

Escoamento superplástico é dominado por um processo que é chamado de deslizamento de contorno de grão, *Grain Boundary Sliding* (GBS), apesar de haver outros processos detalhados ao longo desse trabalho. Esse é o processo no qual cada grão desliza uns sobre os outros ao longo de seus contornos de grão. Em temperatura ótima, o contorno de grão é mais fraco que os próprios grãos, logo deslizarem ao longo desse contorno parece ser um modo mais eficiente do material deformar plasticamente sob condições de *alta temperatura e baixa taxa de deformação*.

Micromecanicamente, esse é um processo muito heterogêneo. Recentemente, observou-se que a superplasticidade ocorre devido ao deslizamento simultâneo de grupos de grãos uns sobre os outros, que é o fenômeno chamado de deslizamento cooperativo de contorno de grão, *Cooperative Grain Boundary Sliding* (CGBS).

Se durante a deformação ocorrer o crescimento do grão, então a formação de superfícies de deslizamento, na qual o fenômeno CGBS ocorre, é restringida, e a superplasticidade cessará.

Isto significa que o *crescimento de grão deve ser evitado a todo custo* para permitir o comportamento superplástico. Nas equações constitutivas do capítulo 2, há um estudo sobre o crescimento de grão, e esse fenômeno é considerado nas nessas equações.

Se os grãos deslizassem uns sobre os outros como partículas infinitamente rígidas, rapidamente vazios internos apareceriam; esses vazios representam a falha conhecida por cavitação, outro fenômeno que tem se tentado modelar.

1.3 Comportamento mecânico superplástico

O processo de conformação superplástico por expansão fluídoestática é baseado em um princípio simples, a chapa de metal é firmemente presa entre a forma superior e inferior, e por diferença de pressão gasosa, é conformada. Essa expansão do *Blank* representa uma limitação relacionada à conseqüente redução da espessura da chapa metálica.

A conformação superplástica é usualmente conduzida dentro de um limite de temperatura superior a temperatura de recristalização. A taxa de deformação de ligas usualmente é extremamente baixa, resulta, então, tempos de processo elevados.

É muito importante manter a velocidade de deformação durante o processo de conformação superplástico, isso pode ser realizado através do controle da pressão de conformação ao longo do tempo.

Essa teoria está de acordo com a conformabilidade da liga de alumínio AA5083 sob certas taxas de deformação e diferentes contrapressões.

Ligas de alumínio superplásticas geram buracos e cavidades dentro do volume do material durante o processo de conformação superplástico, cujo efeito é observado na resistência e na qualidade superficial do material, e pode antecipar uma falha durante o processo de conformação.

A influência da contrapressão evitando a cavitação nas ligas de alumínio AA5083 conformadas superplasticamente, será discutida a frente, no capítulo 2.5.2.

A necessidade de um controle acurado e de um monitoramento dos parâmetros do processo superplástico requer um apropriado sistema de controle. Um ambiente de análise dos dados aqisitados, interface gráfica, e um sistema do controle com realimentação será implementado, assim como a ferramenta de expansão a ser desenvolvida será instrumentada. O resumo do setup desse sistema de controle será apresentado no capítulo 4.1.

A Conformação de metais superplásticos permite a produção de formas complexas, que não seriam produzidas sob condições de conformação normais ou alternativamente requereria montagem de uma ou mais peças com formas complexas.

Conforme visto na Figura 1, Metais com granulação fina ($d \leq 10 \mu\text{m}$) e de alta ductibilidade, sob certas condições de processo, apresentam uma característica definida como superplasticidade – possibilidade de grandes deformações por tração – que pode ser observada em ampla faixa de materiais, desde compósitos (matrizes metálica/intermetálicas e cerâmica), cerâmicas e ligas metálicas.

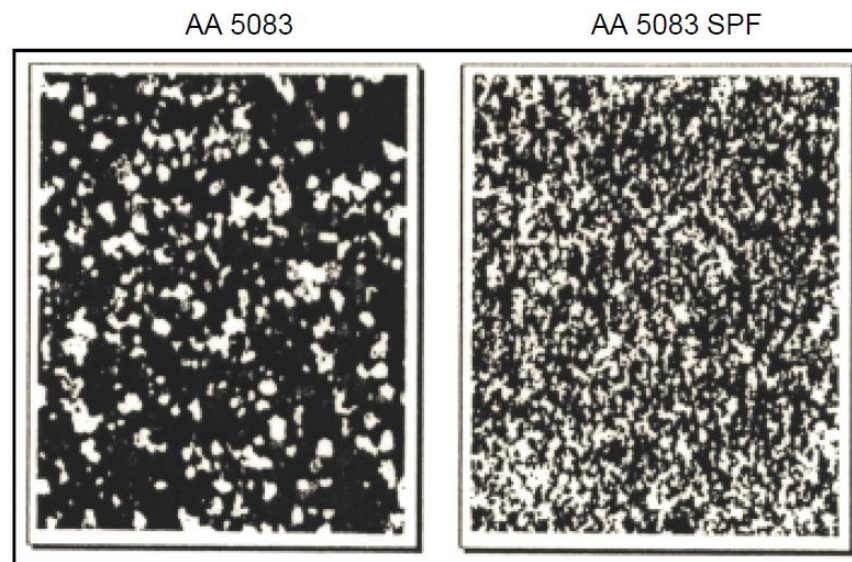


Figura 1 - Diferença de tamanho de grão entre as ligas de alumínio 5083 convencional (esquerda) e superplástica (Direita), que possui granulação fina ($d \leq 10 \mu\text{m}$) (Siegeret al., 1994)

As exigências microestruturais e condições de deformação abaixo são limitantes do processo.

- Temperatura homóloga $T_H \geq 0,5$ sendo que, $T_H = \frac{T}{T_m}$ e T_m é Ponto de fusão;
- Taxa de deformação: $\dot{\epsilon} \sim 1.10^{-4} \text{ s}^{-1}$; $1.10^{-6} \geq \dot{\epsilon} \geq 1.10^{-2} \text{ s}^{-1}$.

As relações a seguir definem as características de deformação básica, que associadas com o processo de fluência, são essenciais para estabelecer as propriedades e características da superplasticidade:

- Relação entre tensão (σ) e taxa de deformação ($\dot{\epsilon}$);
- Relação entre taxa de deformação ($\dot{\epsilon}$) ou tensão (σ) e temperatura (T);
- Relação entre taxa de deformação ($\dot{\epsilon}$) ou tensão (σ) e tamanho de grão (d);

- Relação entre a contribuição da deformação (ε) para o deslizamento de contorno de grão (GBS em inglês), mecanismo principal no processo de autodifusão, e a deformação total (ε_r);
- Relação entre a cavitação e a contra pressão;

1.4 Requisitos metalúrgicos e de processo Superplástico

A Tabela 1 traz uma compilação de informações que serão discutidas uma a uma nesse trabalho de formatura.

Tabela 1 - Resumo dos requisitos metalúrgicos e de processo. Adaptado (Siegeret al., 1994)

Requisitos metalúrgicos	Requisitos de processo
• Granulação fina ($d \leq 10 \mu\text{m}$)	• $T_H \geq 0,5$ $T_H = \frac{T}{T_m}$ T Temperatura de conformação T_m é Ponto de fusão
• Alta resistência a crescimento de grão	Baixa taxa de deformação • $\dot{\varepsilon} \sim 1.10^{-4} \text{ s}^{-1}$ $1.10^{-6} \geq \dot{\varepsilon} \geq 1.10^{-2} \text{ s}^{-1}.$
• Taxa de deformação tem um elevado efeito na tensão de escoamento	
• Alta resistência a formação de poros	

As relações acima serão abordadas adiante, porém, de maneira geral, a superplasticidade eleva o valor da tensão de escoamento do material (σ_e), prolongando o regime de superplasticidade da conformação. Sabe-se que:

$$\sigma_e = \frac{F}{A} \quad (1)$$

Sendo F a força que uma área A é submetida durante a conformação.
A tensão de escoamento é definida pelas seguintes grandezas:

$$\sigma_e = f(\text{Material}, \varepsilon, \dot{\varepsilon}, T) \quad (2)$$

É geralmente descrita pela equação (3) de Norton-Hoff:

$$\sigma_e = C \cdot \varepsilon^n \dot{\varepsilon}^m \quad (3)$$

É importante destacar que o expoente de encruamento não possui influência na conformação em regime superplástico. Para ilustrar a dependência da tensão de escoamento com relação à sensibilidade a taxa de deformação (m) e o expoente de encruamento (n), observe a Tabela 2 (Vulcan, 2006) :

Tabela 2 - Expoente de Encruamento n e Sensibilidade a taxa de deformação m do material Alumínio para diferentes temperaturas (Vulcan, 2006)

Comportamento da conformação	n	m
Conformação a frio	0,1 – 0,3	0,01 – 0,1
Forjamento a quente	0,1 – 0,2	0,15 – 0,2
Conformação a quente	0,01 – 0,1	0,2 – 0,3
Conformação Superplástica	$n \ll 0,1$	$m \gg 0,4 - 0,8$

A dependência entre a tensão de escoamento σ_e e a taxa de deformação ($\dot{\varepsilon}$) pode ser observada na Figura 2. (Vulcan, 2006) .

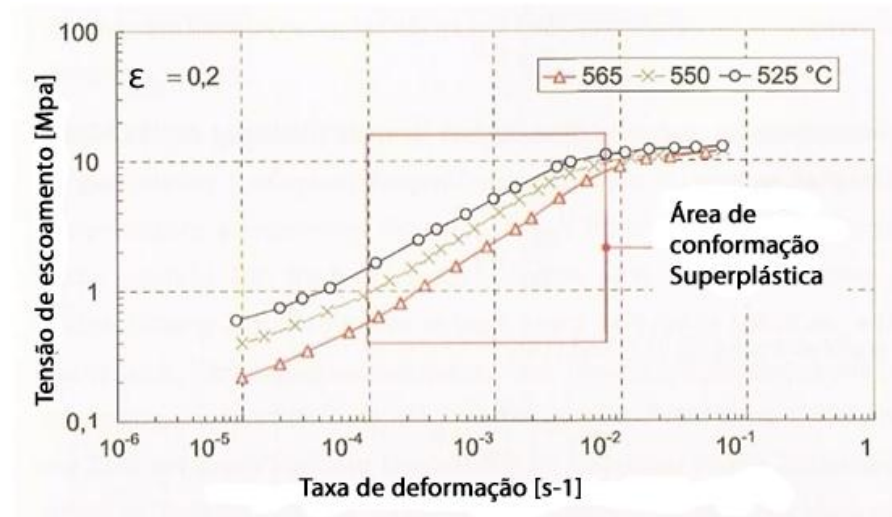


Figura 2 - Dependência entre a tensão de escoamento (σ_e) e a taxa de deformação ($\dot{\epsilon}$) para diferentes temperaturas de conformação. Material: Formall545 (Vulcan, 2006)

Logo a equação (3) resultará na equação (4) com boa aproximação.

Desconsiderando então o termo de Encruamento, $n = 0$, tem-se:

$$\sigma_e = C \cdot \dot{\epsilon}^m \quad (4)$$

Esta representação não está disponível para todos os materiais, Edington (Edington et al., 1976) definiu uma faixa relativamente estreita de taxa de deformação onde o fenômeno da superplasticidade seria tentado. Na área em destaque da Figura 2 poucos valores de tensão de escoamento, quando cruzados com a temperatura de conformação e a pressão de conformação, permitem o processo superplástico.

Devido a esse fato que se justifica a necessidade de um controle que envolva uma análise abrangente do processo superplástico. Buscando atingir os pontos ótimos de conformação e em tempo real.

A Figura 3 mostra o comportamento típico do material superplástico e os pontos ótimos do processo.

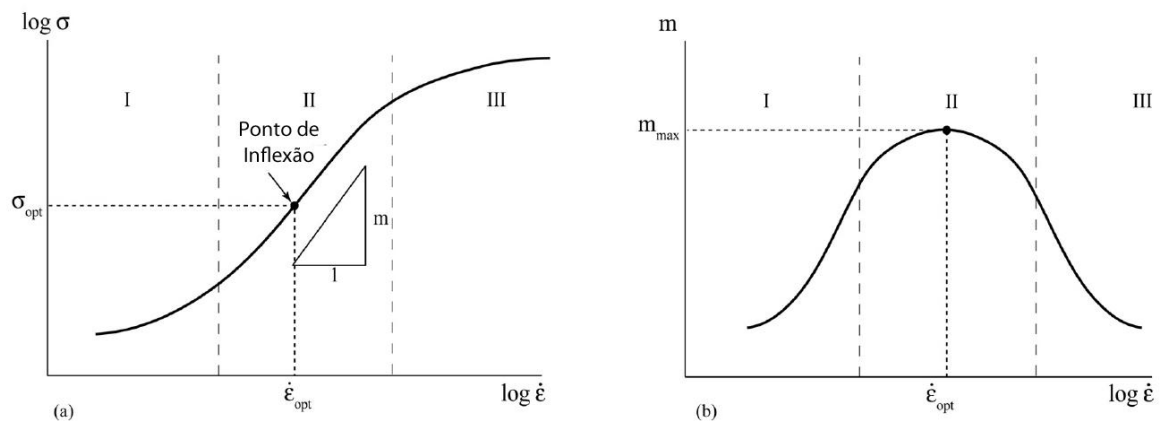


Figura 3 - Comportamento típico de material superplástico: (a) Curva Sigmodal mostrando o comportamento do logaritmo da tensão de escoamento em função do logaritmo Taxa de deformação. (b) sensibilidade a taxa de deformação “m” em função do logaritmo da taxa de deformação. (Snippe, 2009)

Baseado nas relações acima citadas o presente projeto propõe atuar controladamente sobre o processo superplástico, utilizando os resultados obtidos, através da simulação utilizando elementos (Solosando, 2010) , no desenvolvimento de uma planta do processo de conformação.

Sobre o controle, serão três os dados aqusitados e controlados, temperatura, pressão e deformação. Dados esse que servirão de parâmetros de análise. O campo de tensão biaxial e a espessura do topo do domo da peça conformada também serão aqusitados. É importante destacar nesse momento introdutório que nesse trabalho de formatura é proposto uma nova estratégia de caracterização reológica de materiais conformado superplasticamente através de expansão fluidoestática biaxial, e que a aquisição das variáveis de interesse para esse modelo proposto, foi fator decisivo na escolha dos sensores e na definição dos pré-requisitos da instrumentação proposta.

A busca pela janela Superplástica envolve o controle das três variáveis mostradas na Figura 4 abaixo:

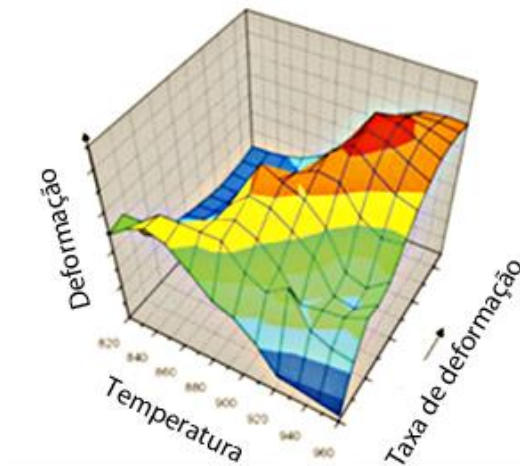


Figura 4 - Variáveis de Análise para a janela de Superplasticidade do processo de conformação estudado (temperatura, deformação e taxa de deformação) (**Blandin J J, 2008**)

Sobre o corpo de prova, será a liga de alumínio AA5083 o material usado para as conformações.

A liga metálica de alumínio AA5083 é o mais comum material usado para conformação superplástica (SPF). A habilidade de utilizar AA5083 com comportamento superplástico baseia-se no pequeno tamanho de grão que é possível se obter com essa liga, tipicamente menor que 10 μm , e que além disso, também é relativamente estável a temperaturas típicas de operações superplásticas.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo geral

Obter melhores parâmetros que representem a conformação de metais superplásticos; para que uma simulação por elementos finitos tenha resultados positivos em processos de conformação, é extremamente importante que os parâmetros de entrada tenham boa acurácia e repetibilidade. Convencionalmente, as propriedades dos materiais metálicos utilizados vêm de ensaios de tração unidimensionais e que não conseguem representar as características mínimas necessárias da superplasticidade.

Esses dados são insuficientes por algumas características não serem equivalentes entre os processos unidimensionais e bidimensionais, *mas principalmente pela deformação máxima obtida através um ensaio de tração uniaxial ser pequena quando comparado com os valores de processos de conformações espaciais*; por isso é necessário um levantamento de dados, em um ensaio biaxial, para determinar as características de um determinado material durante o processo de conformação superplástico por expansão fluidoestática biaxial, para assim conseguir aperfeiçoar o processo de simulação.

Para atingir esse objetivo, propõe-se uma nova estratégia de caracterização reológica de materiais por conformação superplástica de expansão fluidoestática biaxial analisados de forma biaxial.

1.5.2 Objetivo específico

O foco é o *controle das variáveis de caracterização da superplasticidade*. Intimamente relacionado com o controle está configuração de um setup de aquisição de dados. Busca-se também avaliar os melhores métodos de aquisição das variáveis de interesse (temperatura, deformação e pressão). A utilização de uma instrumentação adequada e versátil para a aquisição dos dados do processo de conformação é importante para o estudo das características do material durante a conformação superplástica. A nova proposta de caracterização reológica do material está intimamente relacionada com a instrumentação de medição proposta por esse trabalho de formatura.

A validação teórica e as investigações experimentais serão comparadas a expansão fluidoestática biaxial pneumáticos usando formas circulares. O objetivo da parte experimental é o levantamento da curva limite das variáveis (pressão, temperatura e deformação) de conformação superplástica da liga de alumínio sob certas condições de temperatura e pressão. Como também, em um primeiro momento, realizar o levantamento das características reológicas da liga AA 5083 utilizando uma expansão fluidoestática biaxial com análise de campos de tensão biaxiais. Uma descrição geral do objetivo da ferramenta de conformação em desenvolvimento é:

- Realizar ensaios tri axiais de conformação superplástica;
- Ser capaz de realizar as medições de temperatura, deslocamento, pressão, tensão e espessura; durante o processo de conformação;
- Atuar em tempo real em duas variáveis – temperatura e pressão;
- Levantar os diagramas limites de conformação;
- Controlar a altura do domo da peça conformada;
- Realizar alteração no suporte do blank para conformar com diferentes geometrias;
- Realizar ensaios de caracterização reológica de expansão fluidoestática biaxial.

A validação teórica baseia-se na otimização dos parâmetros do processo e confirma-se com a possibilidade de observação experimental das conclusões obtidas no trabalho de simulação por elementos finitos (Solosando, 2010) . Observa-se a lista abaixo dos resultados obtidos pela simulação:

- Variação da espessura;
- Deformação plástica na espessura;
- Curvas de pressão x tempo de conformação;
- Forças atuantes na matriz x tempo de conformação.

É válido ressaltar que o vértice do blank conformado foi tomado como a origem das posições para a montagem dos gráficos de afinamento x posição e variação da espessura x posição. Dependendo dos tipos de sensores empregados no projeto, todos os resultados da simulação poderão ser avaliados, e outros parâmetros poderão ser analisados durante a fase experimental.

1.6 Revisão Bibliográfica do fenômeno Superplástico

Muitos trabalhos sobre o fenômeno da superplasticidade já foram escritos, considerando as limitações tecnológicas da época da pesquisa, foram importantes para o levantamento dos limites da utilização desse processo de conformação.

O fenômeno de superplasticidade foi observado pela primeira vez em 1912 por Rosenhain com uma liga de Zinco-cobre-alumínio (Rosenhain et al., 1912) .

Desde os primeiros trabalhos de Bengough em 1912 (Bengough, 1912) e Jenkin em 1928 (Jenkins, 1928) , observou-se o fenômeno superplástico, entretanto é atribuído ao trabalho de Pearson em 1934 (Pearson, 1934) a primeira deformação superplástica obtendo resultados de 1950% de alongamento em uma liga de Bi - Sn (material que fora das condições superplásticas apresenta 5% de alongamento antes da ruptura, sendo classificado como frágil).

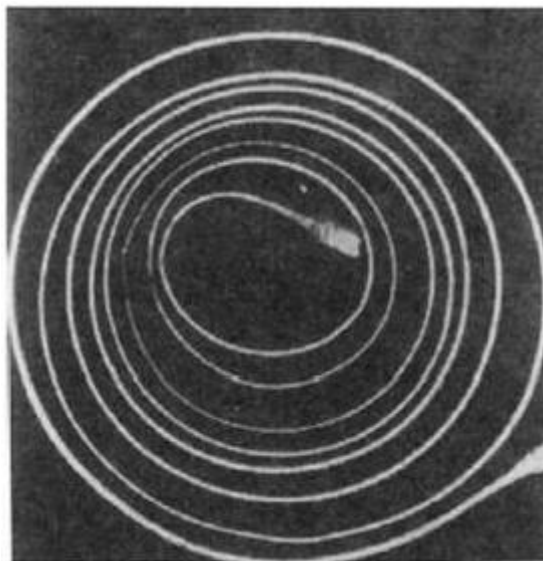


Figura 5 - Pearson 1934, Liga de Bi - Sn (1950%) (Pearson, 1934)

Bochvar (Bochvaret al., 1946) , a quem é atribuído o termo superplasticidade, baseado nos estudos de Pearson (Pearson, 1934) desenvolveu pesquisas na década de 40. As pesquisas só foram retomadas no ocidente, em 1962, após a publicação por Underwood (Underwood, 1962) de uma revisão dos trabalhos soviéticos.

Antes de 1964 o principal alvo das pesquisas era obter o máximo alongamento através de ensaios de tração uniaxiais a quente. O foco na pesquisa tecnológica teve início somente após os trabalhos pioneiros de Backofen (Backofen et al., 1964), o expoente m (sensibilidade a taxa de deformação do escoamento) começou a ser analisado com ênfase e muitas teorias sobre deformação superplástica têm sido propostas e estudadas desde então, resultando em várias aplicações tecnológicas.

Backofen, Turner & Avery, em 1964, no MIT, publicaram o seu paper mais conhecido, no qual, pela primeira vez, uma chapa de AlZn superplástica foi conformada como uma bolha. Este evento marca o surgimento de uma nova tecnologia: Conformação superplástica. Prof. Backofen (considerado o pai da conformação superplástica) e seu grupo de pesquisa no Instituto de Tecnologia de Massachusetts fizeram uma espécie de replicação de trabalho russo e estabeleceram a importância da sensibilidade da taxa de deformação com deformação de metais superplásticos. Eles também investigaram outros sistemas de liga leve, tais como: cobre, titânio e magnésio.

Stuart Davis Fields recebeu seu doutorado em 1957, no departamento de metalurgia no MIT, e foi co-autor de vários trabalhos com Backofen. Enquanto Backofen publicava em 1964, o Dr. Fields trabalhava no escritório do departamento de produtos da IBM, em Lexington, Kentucky, e descobriu a extraordinária conformabilidade possível dos metais superplásticos através dos trabalhos de Backofen durante um encontro da ASM. (Barnes, 2007)

Em abril de 1965, Fields publicou a primeira patente com aplicação de conformação superplástica no mundo usando uma grande variedade de chapas e tubos usados anteriormente para termo conformação. Depois disso, Fields (Fieldset al., 1971) estudou ligas eutetóides de ZnAl sob tensão uniaxial e os resultados de tensão uniaxial foram relacionados com a espessura em peças termo conformadas.

Todo este trabalho que havia sido desenvolvido nos EUA não demoraria a ser observado pela comunidade científica mundial.

O “Electricity Council Research Center”, Capenhurst, foi a primeira indústria com laboratórios para o estudo dessa nova tecnologia. Em 1969, aconteceu a primeira conferência sobre SPF, também realizada em Capenhurst. A participação

de alguns grupos, como Hinxton Hall, Cambridge, Divisão de Pesquisa da British Aluminium e Press Steel Fisher Division of British Leyland, foi notável.

Em 1971, ISC Alloys Ltd., Avonmouth Bristol, Reino Unido, foi fundada como a primeira empresa comercial de conformação superplástica no mundo, a motivação foi a produção de formas complexas usando a liga eutetóide de ZnAl com baixos custos de ferramental e tempos de formação.

Imediatamente após a primeira demonstração de superplasticidade em uma liga de alumínio, em 1969, muito foi feito através de pesquisa e investimentos para ampliar as exigências especiais de processamento necessário para conseguir uma produção viável.

No entanto devido os rápidos progressos nos últimos anos nesta área fizeram com que muitas das informações iniciais fossem ficando desatualizadas ou incompletas. Conforme as pesquisas evoluíram e um número maior de materiais além dos metálicos (Chokshiet al., 1993) , como materiais cerâmicos, compósitos, intermetálicos, e mais recentemente materiais nanométricos (Xu, 2009) .

Até os dias de hoje, o maior alongamento uniforme de tensão uniaxial foi de aproximadamente 8000%, alcançado com bronze comercial (Higashi, 1992) .

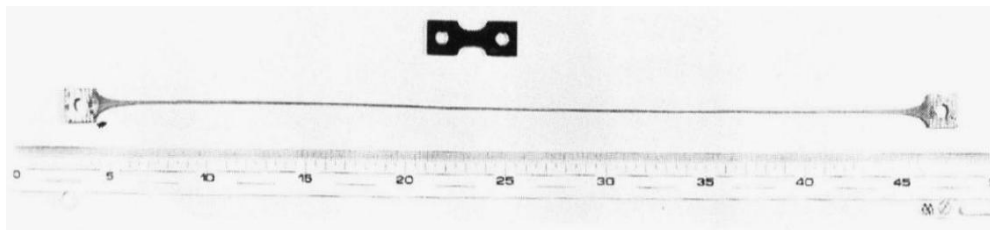


Figura 6 - Recorde mundial de tração uniaxial (Robert, 2009)

Os valores de alongamento uniforme em diferentes ligas superplásticas, em função dos anos, podem ser observados na Figura 7 (Vulcan, 2006) abaixo.

No início dos anos 1970, outro avanço ocorreu na indústria aeroespacial, foi a conformação superplástica em liga de titânio e o novo conceito, hoje conhecido como SPF / DB, resultado de dois processos combinados, o SPF e o diffusion bonding (DB). Esta tecnologia avançou consideravelmente ao longo dos anos 1970 e início de 1980 com o auxílio de financiamento do governo . (Barnes, 2007)

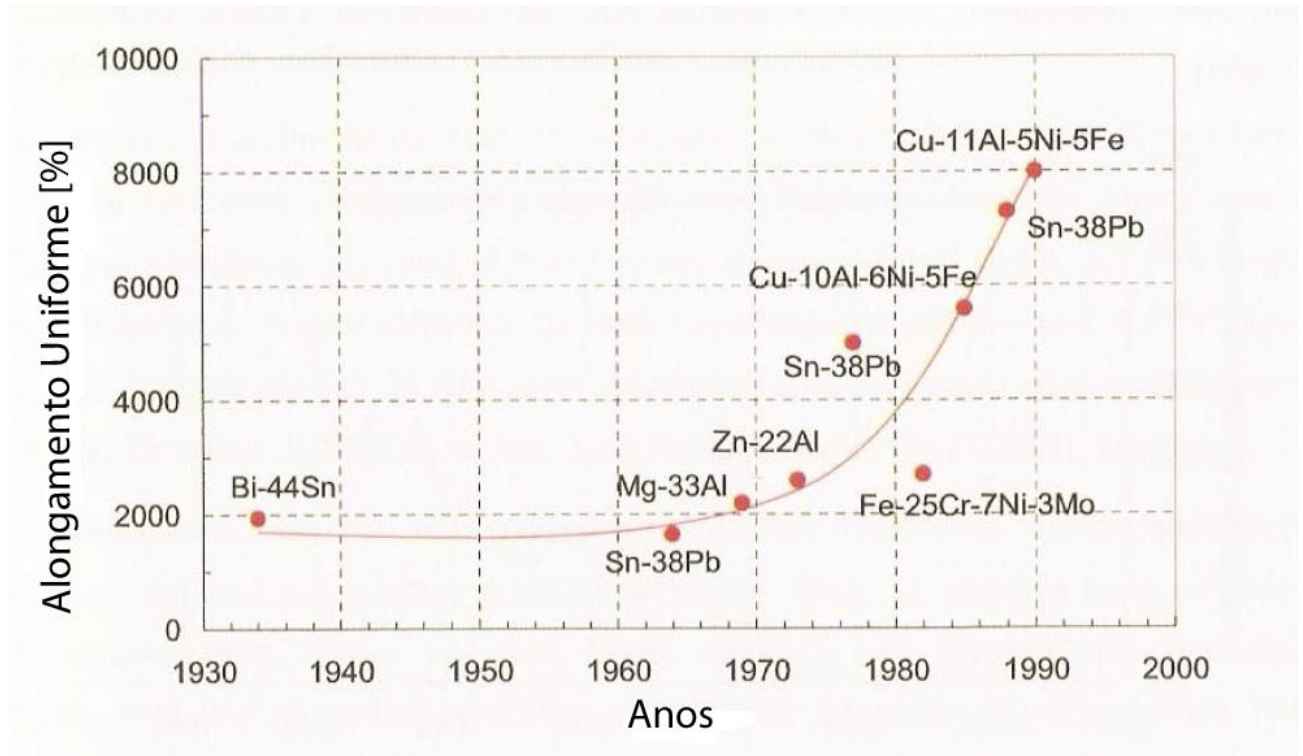


Figura 7 - Alongamento uniforme alcançado para diferentes materiais ao longo dos anos (Vulcan, 2006)

A primeira aplicação realmente comercial de titânio SPF foi em 1981, cerca de 13 anos depois que Johnson havia demonstrado pela primeira vez a superplasticidade com uma liga de titânio. Esta primeira aplicação comercial foi uma parte da asa produzida pela British Aerospace Filton para a aeronave Airbus A310. (Barnes, 2007)

1.6.1 Conformação superplástica em ligas de alumínio.



Figura 8 - Liga de alumínio superplástica EN AW 7475 (Robert, 2009)

As ligas de alumínio usadas para conformação superplástica são na sua maioria conhecidos pelo nome da empresa ou pelo nome do produto no mercado.

Na construção automotiva, é usada para as partes internas automotivas a liga de alumínio com conformação superplástica AA5083. Existem hoje no mercado várias empresas que fornecem esse material com diferentes nomes, na Tabela 3 abaixo se listam algumas:

Tabela 3 - Lista de empresas e nomes comerciais para a liga de alumínio AA5083 (Vulcan, 2006)

Empresa	Nome comercial
ALCAN	Formal®545
ALCOA	5083-SPF
Sky Aluminium	ALNOVI-1

A Figura 9 abaixo tenta ilustrar a aplicação da liga de alumínio e diferentes áreas industriais. (Barnes, 1994)

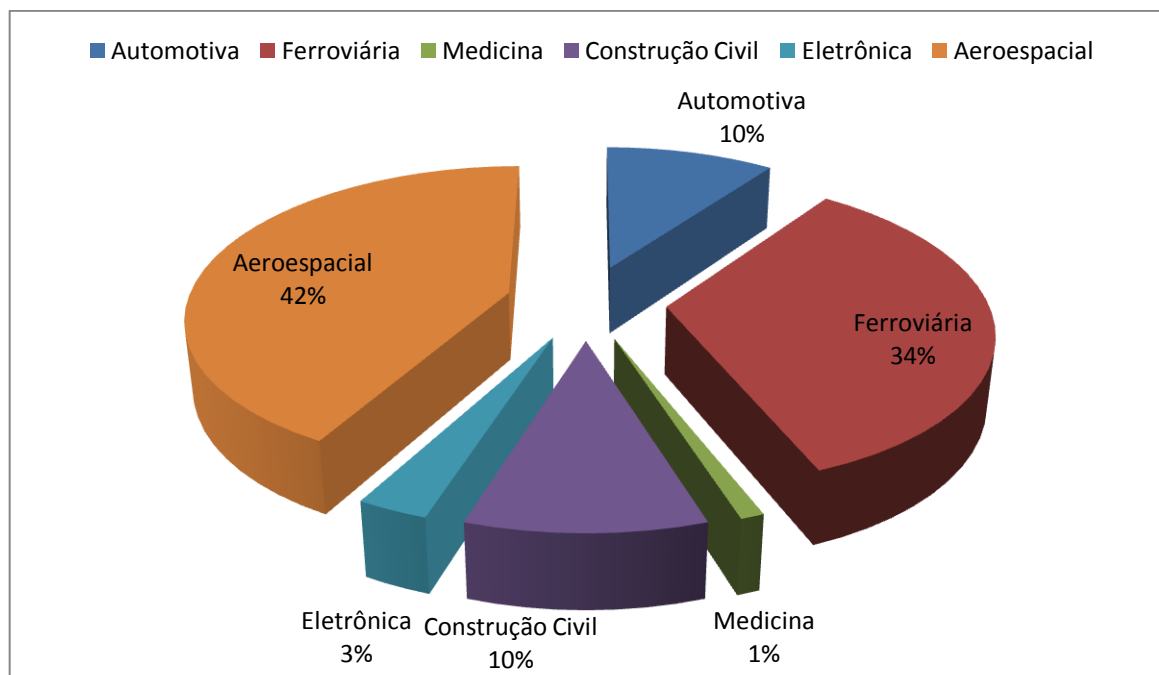


Figura 9 - Divisão do mercado para utilização de ligas de alumínio superplásticas.
Adaptado (Vulcan, 2006)

Exemplos na indústria automotiva.



(a) Aston Martin Vanquish



(b) Morgan Aero 8

Figura 10 - Exemplos na indústria automotiva de aplicações de conformação superplásticas

A produção de titânio SPF cresceu na década de 1980. Apenas 10 anos depois, em 1991, no setor aeroespacial, Rohr Industries, trabalhava com 10 linhas full-time de produção e produzia mais de 400 partes diferentes em uma produção anual de mais de 20.000 peças de titânio superplástico. (Barnes, 2007)

Alguns exemplos de conformação superplástica no setor aeronáutico são mostrados abaixo.

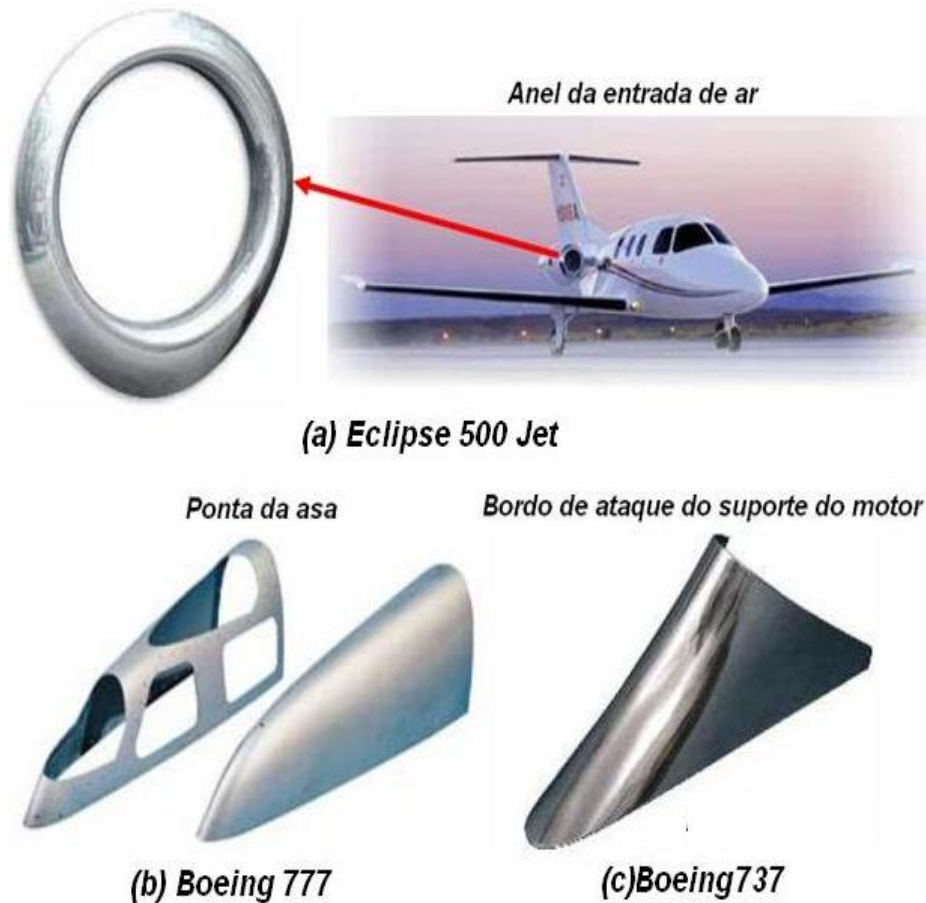


Figura 11 - Exemplos de conformação superplástica no setor aeronáutico

Atualmente, tem havido muitas inovações associadas superplasticidade. A meta é um processo totalmente controlado, o que significa que todas as variáveis do processo, tais como temperatura, taxa de deformação e posição (em alguns casos, o movimento da ferramenta) devem ser controlados para aperfeiçoar esse processo já conhecido.

1.1 Propriedades superplásticas de algumas ligas de alumínio

Tabela 4- Propriedades Superplásticas de algumas ligas de alumínio (American Society for Metals, 1988)

Ligas de alumínio	Temperatura de teste (°C)	Taxa de deformação (s ⁻¹)	Sensibilidade a taxa de formação (m)	Elongamento %
Recristalização Estática				
Al-33Cu	400-500	$8 \cdot 10^{-4}$	0,8	400-1000
Al-4.5Zn-4.5Ca	550	$8 \cdot 10^{-3}$	0,5	600
Al-6 to 10Zn-1.5Mg-0.2Zr	550	10^{-3}	0,9	1500
Al-5.6Zn-2Mg-1.5Cu-0.2Cr	516	$2 \cdot 10^{-4}$	0,8-0,9	800-1200
Recristalização Dinâmica				
Al-0.6Cu-0.5Zr (Supral 100)	450	10^{-3}	0,3	1000
Al-6Cu-0.35Mg-0.14Si (Supral 220)	450	10^{-3}	0,3	900
Al-4Cu-3Li-0.5Zr	450	$5 \cdot 10^{-3}$	0,5	900
Al-3Cu-2Li-1Mg-0.2Zr	500	$1,3 \cdot 10^{-3}$	0,4	878

1.2 Parâmetros utilizados no projeto

Em suma, a ferramenta de conformação superplástica deverá ser capaz de realizar um experimento que garanta a obtenção de todos os parâmetros aplicados no projeto de simulação, Solosando (Solosando, 2010), e que seja versátil para

o estudo das outras variáveis envolvidas na teoria, mas que a simulação não considerou. Segue uma lista dos parâmetros envolvidos na simulação.

Tabela 5 - Propriedades da liga AA5083 utilizada nas simulações (Solosando, 2010)

Coeficiente de sensibilidade K	Sensibilidade a taxa de deformação (m)	Expoente de encruamento (n)	Taxa de deformação (s-1)
591,0	0,60	0	2,8. 10-3

K é a constante do material que será obtida via ensaio de tração. Tal constante depende de características do material e da temperatura de realização do ensaio, ou seja, ela varia para diferentes temperaturas, taxas de deformação e condições microestruturais. Essa constante envolve grandezas como: vetor de Burgers, coeficiente de difusão, módulo de elasticidade transversal (G).

O gás do processo de conformação será o Argônio, poderia ser utilizado o nitrogênio, mais barato, entretanto, nas condições de temperatura da conformação superplástica – 550°C. O material do blank será AA 5083 e o material da matriz AISI 304. (Lopes, 2010)

1.3 Fatores tecnológicos e econômicos

O endurecimento do material é praticamente inexistente e o retorno elástico é zero; essas características proporcionam um ótimo acabamento na peça conformada, com boa precisão dimensional que evita re-trabalho.

Esse processo de conformação é caro, a temperatura de trabalho é muito alta (60% da temperatura de fusão), o tamanho médio dos grãos deve ser menor que 10 μm , a taxa de deformação menor que 10^{-2} s^{-1} .

Materiais com pequeno tamanho de grão têm um tratamento térmico caro. Os diferentes tipos de tratamentos térmicos empregados contribuem com a melhoria das propriedades mecânicas da liga. De acordo com as características da liga, a

taxa de resfriamento e a adição de alguns elementos apresenta-se como as técnicas mais usadas para melhoria das características mecânicas. (Dobrzański L A, 2009)

O diagrama tradicional do limite de conformação (FLD) é descrito por uma curva de eixos de maior e de menor deformação. Esta curva define a região entre a deformação plástica estável ou elástica (curva inferior) e escoamento inseguro (curva superior). O risco de falha é determinado pela distância entre a condição atual de tensão no processo de conformação e a curva limite de conformação. (Majak J, 2007)

A possibilidade de usar a superplasticidade é limitada por baixas taxas de deformação, que é uma característica intrínseca do processo e deve estar localizado dentro da área de risco de conformação possível; esta baixa taxa de deformação força um tempo de produção longo. Para uso da superplasticidade, é necessário levar em conta ambos fatores, tecnológicos e econômicos.

1.4 Justificativa

Conformação superplástica (SPF) é uma tecnologia de conformação de chapas particularmente bem específica por suas condições restritas de realização. Esta tecnologia tem sido industrialmente usada nos últimos 30 anos, particularmente no campo da Aeronáutica, mas hoje avança sobre outros novos setores industriais (Automotivo). Dentre outras vantagens sobre técnicas de conformação convencional, SPF elimina o fenômeno conhecido como retorno elástico (Springback) —será descrito no item 2.5.4 —, gera superfícies com bom acabamento após a conformação e aumenta consideravelmente a liberdade de design. A condição de superplasticidade pode ser alcançada com uma grande variedade de ligas metálicas e cerâmicas. Conformação superplástica foi considerada no passado como tipo artesanal de tecnologia de conformação, disponível somente para pequenos volumes de produção. Porém hoje, a realidade é diferente e a superplasticidade tem se tornado uma tecnologia de conformação integrada com uma boa variedade de processos.

Sobre o controle, utilizado como instrumento para possibilitar o ajuste dos parâmetros necessários para o processo de conformação superplástico, varias

técnicas já foram utilizadas. Por exemplo, o controle de medição de espessura é uma das dificuldades do processo, como as bordas do *blank* são presas ao ferramental durante o processo, o aumento de área significará em redução de espessura, já que seu volume é constante. Algumas técnicas, como reversão da pressurização (Ghosh et al., 2006), foram desenvolvidas para essa finalidade. Métodos de modelamento por elementos finitos – MEF – são atualmente empregados no projeto para a previsão e controle da geometria (parâmetros pré-estabelecidos de tempo e dimensão geométrica) da peça conformada, principalmente em relação à distribuição de espessura.

A importância de um estudo das características reológicas do material que deve ser conformado se justifica também para se obter melhores parâmetros, condizentes com a tecnologia de conformação que se deseja simular, evitando assim utilizar parâmetros de ensaios unidimensionais em expansão fluidoestática biaxial.

As curvas dos parâmetros de conformação superplástico quando analisadas em três dimensões evidenciam a interdependência das variáveis superplásticas.

Um exemplo dessas curvas pode ser observado na Figura 12 e na Figura 13 abaixo.

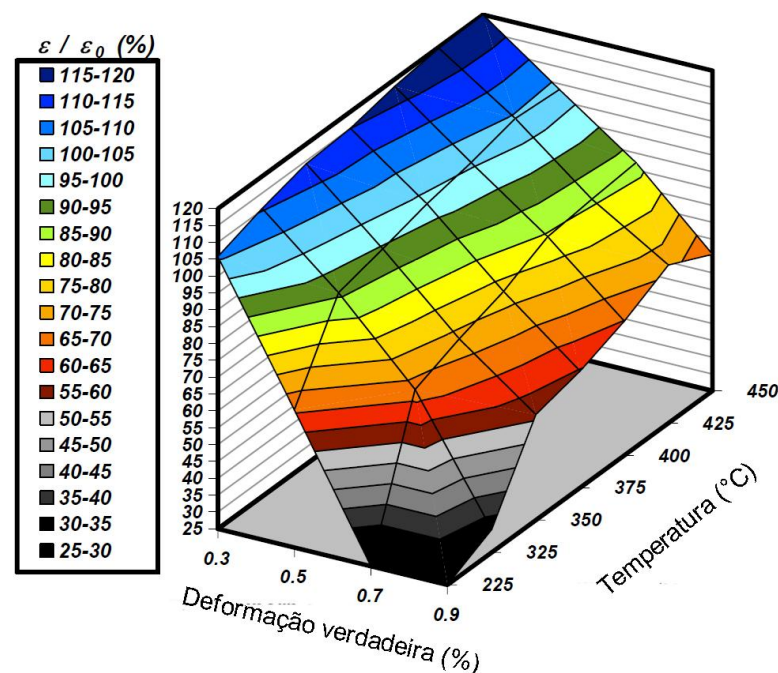


Figura 12 - Mapeamento dos parâmetros superplástico para ligas de magnésio (deformação, taxa de deformação e temperatura) (Abu-Farha, 2007)

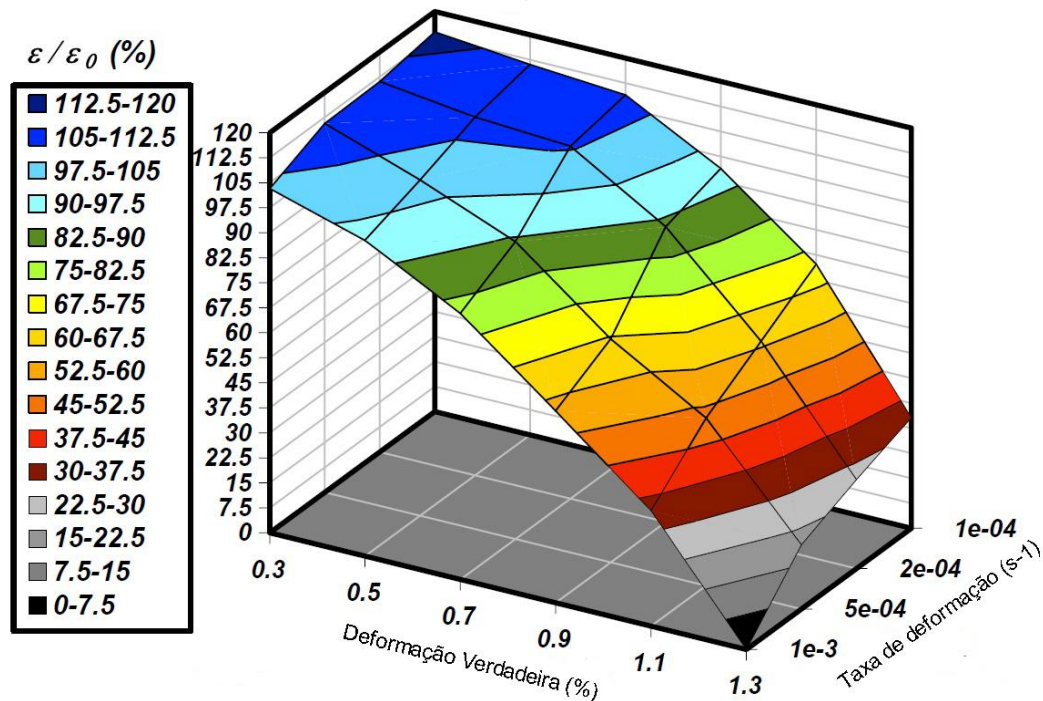


Figura 13 - Mapeamento dos parâmetros superplástico de ligas de magnésio (deformação, taxa de deformação e temperatura) (Abu-Farha, 2007)

Na Figura 4 e na Figura 12 se observa o comportamento superplástico da liga de magnésio AZ31; O mapeamento acima corresponde ao comportamento da liga de magnésio estudada em um processo superplástico com várias taxas de deformação e temperaturas (Abu-Farha, 2007). É interessante notar a interdependência das variáveis do processo.

1.5 Aplicações

A conformação de ampla gama de materiais em condição Superplástica permite obter peças de formato complexo com uma operação que não necessita de posterior acabamento e com elevada precisão.

Iniciou-se na indústria aeroespacial e tem-se difundido em outras áreas. Tendo como fator limitante o econômico, tanto pelo maior custo quanto pelo excessivo tempo de processo que o restringe a pequenos lotes. Porém a conformação superplástica apresenta vantagens únicas quando são requeridas configurações complexas.

1.5.1 Aeroespaciais

É a área com o maior uso dessa tecnologia, a referência (Bonet, 2006) mostra exemplos de componentes aeronáuticos fabricados por conformação superplástica em aço inoxidável.

O material básico utilizado é a liga Ti-6Al-4V, que apresenta grande resistência estrutural superior (Couto et al., 2006) .

Ligas com elevadas propriedades mecânicas, tais como superligas, são quase indeformáveis por métodos convencionais, pois as ferramentas de conformação não podem suportar as forças aplicadas.

A conformação destes materiais exige a utilização de outras técnicas mais sofisticadas, como o processo combinado entre Conformação Superplástica e junção por difusão – SPF/DB.

Um método alternativo para a fabricação de peças aeroespaciais é a utilização de técnicas de compressão isobárica de nano-pós em envelopes. As dificuldades encontradas na implementação da tecnologia destes envelopes utilizando processos de soldagem convencionais conduzem a considerar a conformação superplástica como opção. Para o retoque e acabamento das peças pode ter de recorrer o encadeamento de outros processos ao superplástico, como por exemplo, conformação incremental. (Robert, 2009)

1.5.2 Próteses

Em aplicações como biomaterial, o titânio e a liga Ti-6Al-4V tem sido usados desde 1960, com Ti-6Al-4V gradualmente substituindo o titânio comercialmente puro devido à resistência mecânica superior (Couto et al., 2006) .

Um controle microestrutural por meio de tratamentos térmicos, processamentos termomecânicos ou termoquímicos têm sido realizados na tentativa de aumentar a resistência e a tenacidade de ligas de titânio (Martin, 1998) (Weisset et al., 1998) .

Devido à bio-compatibilidade das ligas de titânio, o processo mostrou-se adequado para a confecção de próteses.



Figura 14 - Próteses conformadas superplasticamente

1.5.3 Outras aplicações

Listam-se várias outras aplicações para conformação superplástica (Osada, 1997) :

- Arquitetura: painéis e obras de arte;
- Esportivas: Tacos de golfe;
- Utilidades domésticas: Painéis em ligas de Titânio;
- Moldes para a fabricação de embalagens: Chapas em ligas de Titânio, Alumínio ou aço inoxidável substituem com vantagem moldes fundidos que necessitam armaduras de arame para a retenção do material da embalagem.

No CERN, o centro europeu de investigação para a física subatômica, em Genebra, no ano de 2008 foi desenvolvido um novo acelerador de partículas, o Large Hadron Collider (LHC), o que provocou novos pontos de vista sobre como explicar o comportamento das menores partículas da matéria. (Snippe, 2008)

Uma das partes de construção desse acelerador são esses dois perfis da Figura 15, a espessura do filme desse perfil deve ser tão fina quanto possível. Existem também algumas outras pré-condições que deveriam ser satisfeitas, sobretudo no quesito resistência a deformação. Em ambos lados do projeto do filme existe em princípio vácuo, mas pode, em algum momento, haver uma pequena diferença de pressão durante a realização do experimento, nesse caso a estrutura deve ser capaz de absorver a pressão sem deformar plasticamente.

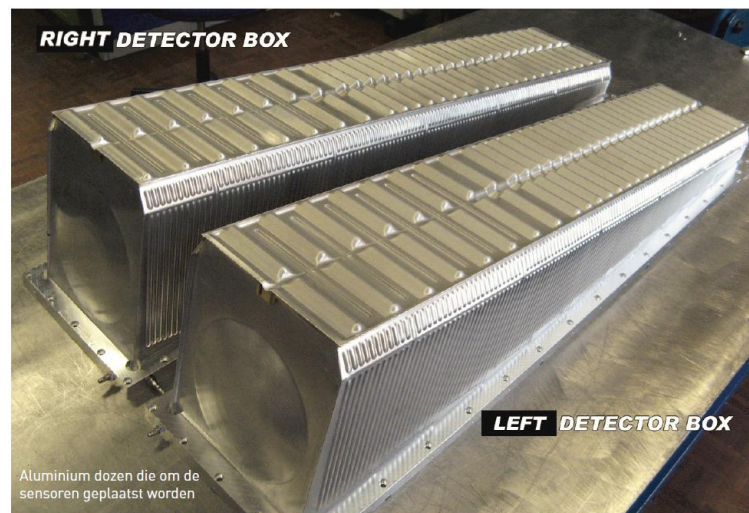


Figura 15 - Perfil usado na construção do acelerador de partículas. (Snippe, 2008)

Essas limitações e requisitos técnicos evidenciaram a necessidade de um estudo mais profundo sobre as características da liga AA5083, uma hidroconformação foi realizada, como se observa na Figura 17, e as curvas de tensão versus deformação foram levantadas, Figura 16.

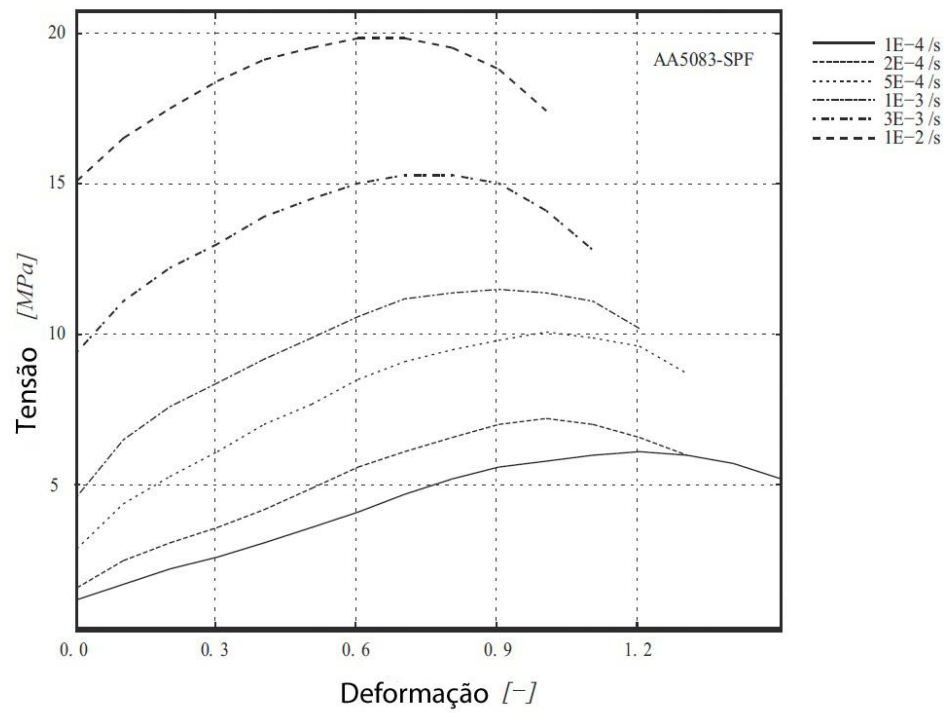


Figura 16 - Relações entre tensão e deformação em diferentes taxas de deformação da liga de alumínio AA 5083 em condições superplástica. (Snippe, 2008)

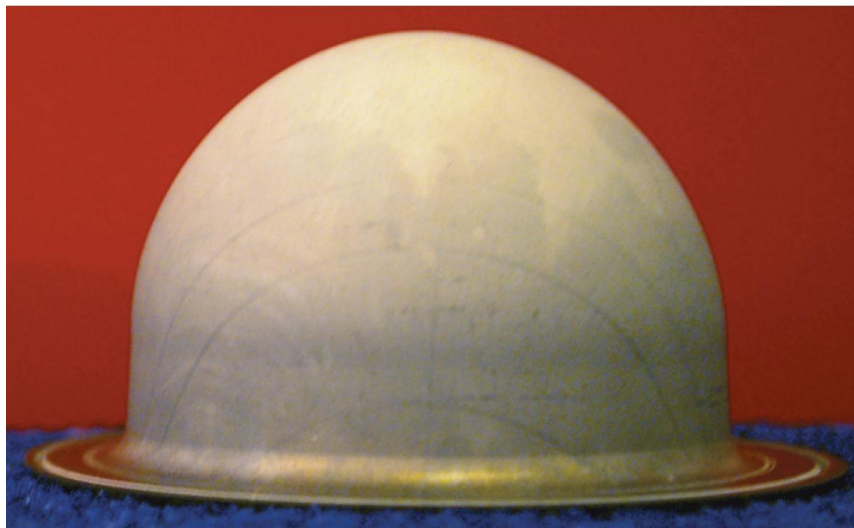


Figura 17 - Corpo de prova submetido a hidroconformação para levantamento dos dados necessários para a produção do perfil desejado do acelerador de partículas. (Snippe, 2008)

2 Modelagem do processo superplástico

As técnicas utilizadas para a conformação de material em regime superplástico são:

- Moldagem por sopro – “Blow Forming”;
- Moldagem a Vácuo – “Vacuum Forming”;
- Moldagem térmica – “Thermo Forming”;
- Processo combinado entre Conformação Superplástica e junção por difusão – SPF/DB;

Abordar-se-á a parte teórica do processo de conformação por sopro livre, utilizando uma ferramenta de expansão fluidoestática biaxial com contrapressão controlada.

2.1 Comparação entre Plasticidade e Superplasticidade

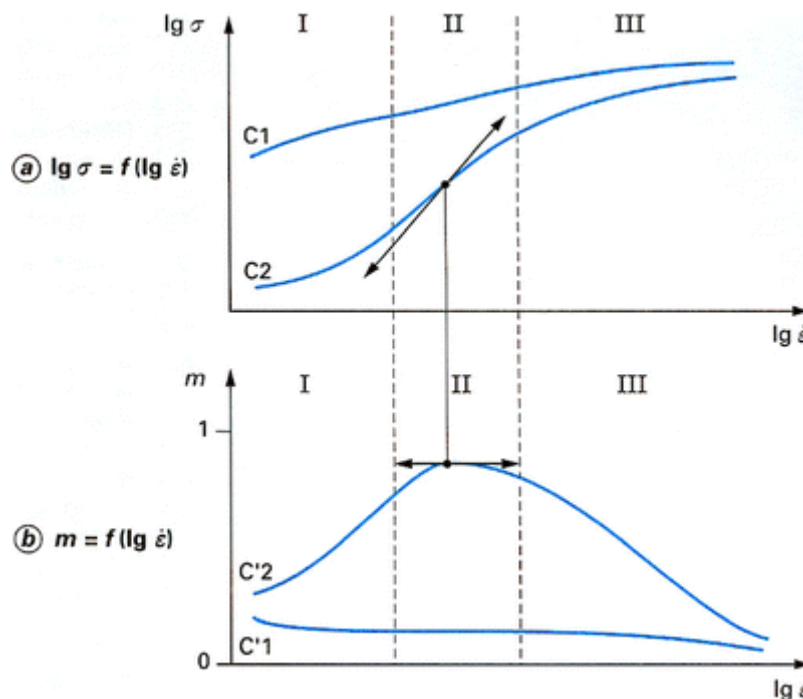


Figura 18 - C1, C'1 são gráficos típicos de materiais clássicos e C2, C'2 são gráficos típicos de materiais superplásticos. (Blandinet al., 1996)

No início do estudo das características superplásticas, o autor acredita ser importante uma comparação com outro processo, o plástico.

As diferenças básicas entre o comportamento plástico e superplástico estão resumidas na Tabela 6- Comparação entre Superplasticidade e Plasticidade, abaixo.

Tabela 6- Comparação entre Superplasticidade e Plasticidade. Adaptado (Boulos, 1999) (Vulcan, 2006) (Siegeret al., 1994)

Característica comparada	Superplasticidade	Plasticidade
Dependência de $\dot{\epsilon}$	Representa comportamento inelástico com alta sensibilidade a Taxa de deformação, alto valor de m	Representa comportamento inelástico que não depende da taxa
Dependência de n - expoente de encruamento	O efeito de encruamento e secundário durante o processo	Tensão de escoamento aumenta devido ao encruamento
Mecanismo físico de deformação	Rotação de grão e GBS são mecanismos primários que explicam o fenômeno	A vizinhança de grãos fica igual todo o tempo
Orientação do grão	Textura decresce (orientação de grão torna-se mais randômica com deformação)	Textura decresce (orientação preferencial na direção de início da deformação plástica)
Deformação inicial	Deformação inicial devido a GBS com difusão e discordância como mecanismo de acomodação	Deformação inicial devido à atividade de discordância
Anisotropia	Deformação reduz a anisotropia inicial	Deformação induz uma forte anisotropia
Falha	Falha devido a início e crescimento de cavitação, e finalmente por instabilidade geométrica	Falha devido ao material e instabilidade geométrica

Para ilustrar a diferença de comportamento da microestrutura entre um processo de conformação clássica e um processo superplástico, destaca-se a Figura 19, com a evolução da microestrutura e da textura de uma conformação plástica, como também a Figura 20 com o mesmo esquemático para a superplasticidade.

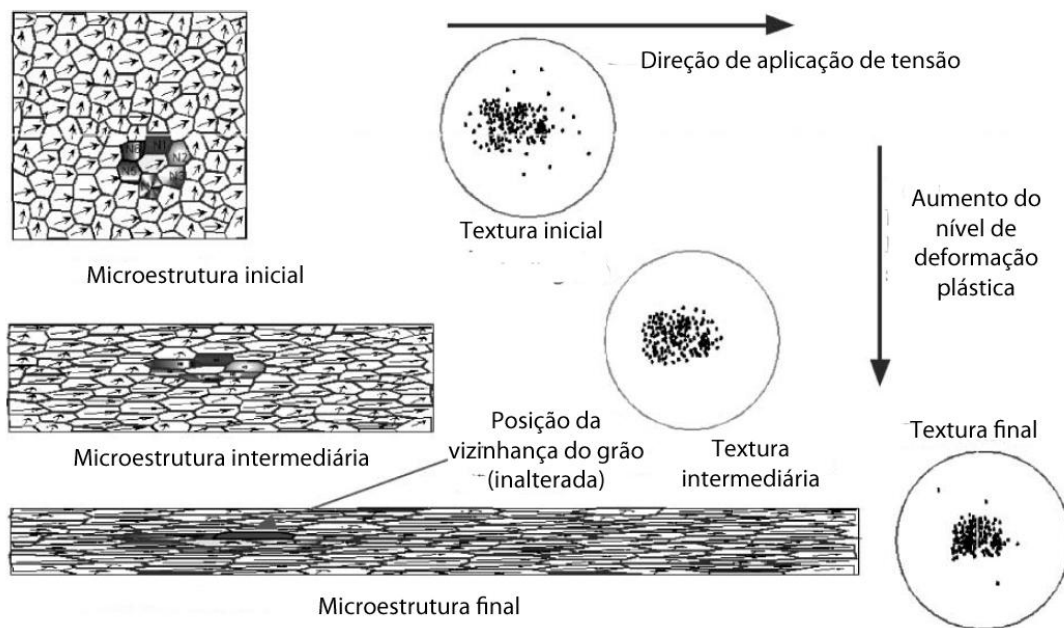


Figura 19 - Evolução da microestrutura e textura durante a deformação plástica. (Chandra, 2000)

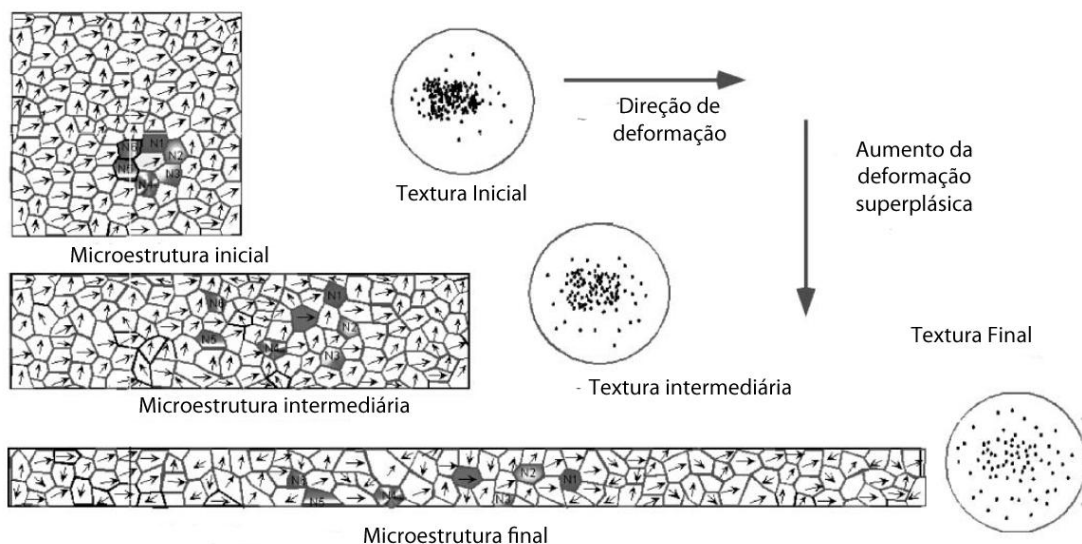


Figura 20 - Evolução da microestrutura e textura durante a deformação superplástica. (Chandra, 2000)

2.2 Abordagens do Escoamento Superplástico

As equações constitutivas da teoria superplástica expressam a relação entre a tensão de escoamento, deformação, taxa de deformação, temperatura e algumas quantidades microestruturais, tais como o tamanho médio de grãos e cavitação.

Essa relação matemática possui algumas constantes, tais como o módulo de Young, módulo de cisalhamento, a constante universal dos gases, e alguns parâmetros relacionados com o material, geralmente identificadas com as letras K , n , m e p .

Além disso, podem-se considerar outras variáveis microscópicas (densidade de deslocamento, densidade e orientação das cavidades) que, além de não serem fáceis de quantificar, tornam a equação constitutiva mais complexa de ser usada nos cálculos. Um grande problema, além do equacionamento dos modelos constitutivos para descrever o comportamento mecânico de materiais superplásticos, é a estreita faixa de temperatura e taxa de deformação em que o processo precisa manter-se para validar a teoria, é uma faixa bastante exigente.

Para traçar a equação constitutiva é necessário lembrar que a microestrutura influencia fortemente o comportamento elástico.

Para um estudo do material superplástico, temos de introduzir a relação entre os seguintes parâmetros:

- Tensão de escoamento;
- Deformação;
- Taxa de deformação;
- Efeitos da temperatura;
- Crescimento do grão (estática e dinâmica);
- Encruamento;
- Efeitos das Cavidades (nucleação, crescimento e coalescência);
- Alteração das propriedades termo-mecânicas do componente deformado.

Como se não bastasse, a equação constitutiva deve ser simples o suficiente para facilitar a avaliação experimental das constantes do material e / ou parâmetros do modelo com um número mínimo de ensaios e um alto grau de confiabilidade. Como também deve ser fácil de ser implementada em um código de computador.

Para aqueles que estudam o **comportamento dos metais**, uma equação foi formulada de forma adequada e validada experimentalmente, isso contribui para a mudança na condição de viabilidade de alcance do processo superplástico, ou para obter melhores condições de aplicação da teoria. Portanto, a pesquisa tende a ser direcionada para uma redução na temperatura ideal superplástica, aumentando a taxa de deformação, a extensão do intervalo de superplasticidade e melhoria das propriedades mecânicas após a conformação, reduzindo a cavitação.

Por outro lado, aqueles que buscam a **concepção do processo de conformação** têm como objetivo, conceber a equação constitutiva como uma representação matemática do comportamento do material durante a operação de formação em todas as faixas de taxa de deformação, tensão e temperatura, procurando uma fórmula simples para a implementação numérica. É nesse tipo de estudo que o controle assume um papel importantíssimo, sendo responsável pela aplicação das restrições do processo, controlando e aquisitando os dados necessário para o desenvolvimento da equação constitutiva como uma representação matemática.

Conseqüentemente, entre os dois grupos de estudiosos, pode haver uma dicotomia que leva a diferenças na formulação, na validade e aplicação das equações constitutivas.

Esse trabalho de formatura visa obter avanços nas duas áreas, tanto no estudo do comportamento das materiais, ao propor uma nova estratégia de caracterização das características reológicas do material, como também de concepção do processo, ao propor a instrumentação de uma ferramenta superplástica a ser desenvolvida.

2.3 Estado do conhecimento

Uma conformação superplástica, em suma, ocorre pela existência de uma estrutura com granulação fina em uma determinada área de temperatura, respeitando uma baixa taxa de deformação desde quando acontece o deslizamento de contorno de grão até a falha por ruptura extrema com alta taxa de deformação.

A conformação superplástica de lâminas de alumínio permite a fabricação de formas metálicas, que processos convencionais através de termo conformação “deep-drawing” não permitiriam.

Normalmente a conformação é realizada através de um mecanismo pneumático, que consiste na aplicação de uma pressão que exerce uma força de retenção suficiente para que ocorra a conformação.

É problemático, contudo o controle dessa pressão pneumática através do tempo, que é dependente de um valor de velocidade de deformação específico da liga conformada. Como já foi dito, essa taxa da velocidade de conformação é baixa e acarreta um longo tempo de processo. Caracterizando uma desvantagem desse processo. De forma resumida, uma aplicação de conformação superplástica bem realizada, traz importantes vantagens industriais:

- Pequeno custo relativo de fabricação e ferramental;
- Alta flexibilidade de construção e design;
- Componentes de baixa massa estrutural;
- Redução no número de componentes;
- Diminuição do tempo de fabricação (desde a construção até a fase de protótipo e produção);

É importante também listar as desvantagens:

- Grande diferença na espessura na superfície do componente;
- Alto custo energético de fabricação;
- Alto tempo de processo.

2.4 Fundamento da conformação superplástica

2.4.1 Materiais superplásticos

Para que obtenha um comportamento superplástico, os materiais devem ter uma estrutura de grão fina e estável.

Esses materiais podem ser divididos em três categorias:

- As ligas quase monofásicas;
- As ligas bifásicas;
- As ligas eutéticas e eutetóides.

Atualmente, somente duas famílias de ligas despertam interesse por aplicações industriais:

- As ligas de alumínio;
- As ligas de titânio;

2.4.1.1 Ligas de titânio

As ligas de titânio são presentes na área aeronáutica. Dessa forma são materiais caros e de conformação difícil. Eles são conformados principalmente por conformação superplástica.

Durante a conformação superplástica, para certos tipos de ligas, o fenômeno de cavitação é praticamente desconsiderado, esse fato reflete na qualidade mecânica das peças.

Entre as ligas de titânio com comportamento superplástico, a mais utilizada é a TA6V. é um tipo de liga bifásica, e uma das condições superplásticas é que o tamanho de grão deve ser inferior a 20 μ m. a temperatura de conformação deve estar no intervalo de 840°C e 980°C para a velocidade de deformação variando entre 10⁻⁵ e 10⁻³ s⁻¹. (Ghosh et al., 1982)

2.4.1.2 Ligas de Alumínio

As ligas de alumínio despertam interesse industrial por serem mais baratas, quando comparadas as ligas de titânio, e por serem menos densas e, portanto mais leves, as principais ligas de alumínio são:

- A série 2000, cujo elemento de liga é o Cobre;
- A série 7000, cujo elemento de liga é o Zinco;
- A série 8000, cujo elemento de liga é o Lítio.

As ligas da série 7000 são utilizadas principalmente na aeronáutica, mais particularmente a liga 7475. Para essa liga a temperatura de conformação deve estar entre 430°C e 530°C para as velocidades de deformação 10^{-4} à 10^{-3} s^{-1} . (Robert, 2009)

2.4.2 Parâmetros fundamentais da conformação Superplástica

A conformação superplástica das ligas de alumínio é principalmente caracterizado pela influência de três parâmetros :

- O tamanho de grão;
- A velocidade de formação;
- Temperatura.

2.4.3 Tamanho de grão

Alguns materiais superplásticos apresentam um comportamento que além de depender da taxa de deformação, podem ainda depender do tamanho dos grãos da microestrutura.

Pequenos tamanhos de grão e forma de grão globular representam os pré-requisitos mais importantes do material para uma conformação superplástica.

Tais estruturas metalográficas são obtidas por tratamento térmico ou termomecânico convencional (normalmente um tratamento de endurecimento seguido de uma recristalização).

A revisão dos aspectos mais importantes do comportamento de deformação superplástica do material é necessária porque os parâmetros específicos obtidos nos ensaios de caracterização do material são utilizados nos processos de conformação.

Relacionado ao tema, têm-se estudado intensamente, a superplasticidade do alumínio com magnésio, a liga de AlMg mostra, mesmo com uma estrutura que possui grande tamanho médio de grão, uma alta dependência entre a tensão de escoamento e velocidade de deformação (Vulcan, 2006) .

Enquanto um pequeno tamanho de grão seja altamente desejável para as características superplásticas, como também um elevado valor de m , essas condições não são suficientes para grandes deformações superplásticas. Sem um controle dedicado, durante a conformação, a cada variável do processo, pode ocorrer o crescimento do grão e conseqüente redução do valor de m , que acelera a localização de tensão. (Ghosh et al., 1982)

Uma grande variedade de compostos químicos foi utilizada para formar novas ligas com alumínio, tal como, cobre, zircônio e manganês. Buscando sempre atingir melhores condições de trabalho para a conformação superplástica.

O tamanho do grão é geralmente resultado de um adequado tratamento térmico e mecânico na produção do material.

Uma possibilidade de produção da liga de alumínio Superplástico AA5083 é mostrada na Figura 21 - Esquema de tratamento termo-mecânico para obtenção da liga AA5083 como tamanho de grão adequado para a conformação superplástica – a seguir.

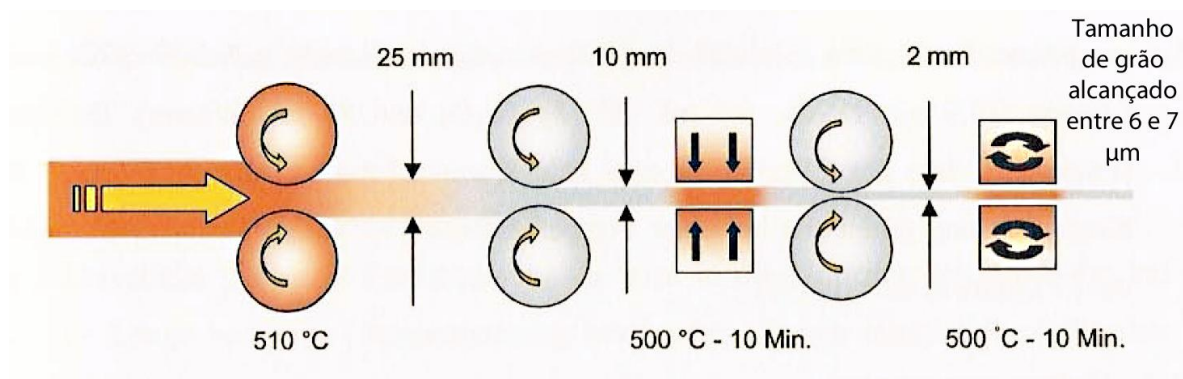


Figura 21 - Esquema de tratamento termo-mecânico para obtenção da liga AA5083 como tamanho de grão adequado para a conformação superplástica (Vulcan, 2006)

Nos materiais superplásticos a tensão é inversamente proporcional ao tamanho de grão.

Os mecanismos de deformação são uma forma de relacionar o comportamento das propriedades superplásticas com a estrutura interna dos materiais. Ao diminuírem os grãos, aumenta a tensão necessária para que as discordâncias vençam a barreira do número de grãos. *O contorno de grão funciona como uma barreira para a continuação do movimento das discordâncias devido às diferentes orientações presentes e também devido às inúmeras descontinuidades presentes no contorno de grão.*

Em modelos avançados de comportamento dos materiais superplásticos a equação de crescimento do grão é levada em consideração. Para isso são considerados o crescimento estático do grão, chamado de SGG (Static Grain Grown), e o crescimento dinâmico reforçado pela deformação, chamado de DEGG (Deformation-Enhanced Dynamic Grain Grown). Analisando estudos de crescimento de grão estático e dinâmico em função do tempo e $\dot{\epsilon}$ mostrou-se que a taxa de crescimento dinâmica é maior que a taxa estática para maiores valores de $\dot{\epsilon}$.

Como já foi visto pela equação (2), Os parâmetros que caracterizam o escoamento superplástico são, além da temperatura (T) e a taxa de deformação ($\dot{\epsilon}$) a microestrutura também.

De forma resumida, tem-se;

$$\sigma = f(\text{Microestrutura}, \dot{\epsilon}, T) \quad (5)$$

O mecanismo é caracterizado por uma curva deformação x tempo bastante estudada para fins de relacionar as características observáveis mecânicas com as teorias baseadas em investigações metalúrgicas microestruturais. A forma da curva chama-se Sigmoidal.

Caracterizar-se-á cada uma das três regiões da curva mostrada pela **Figura 22** abaixo.

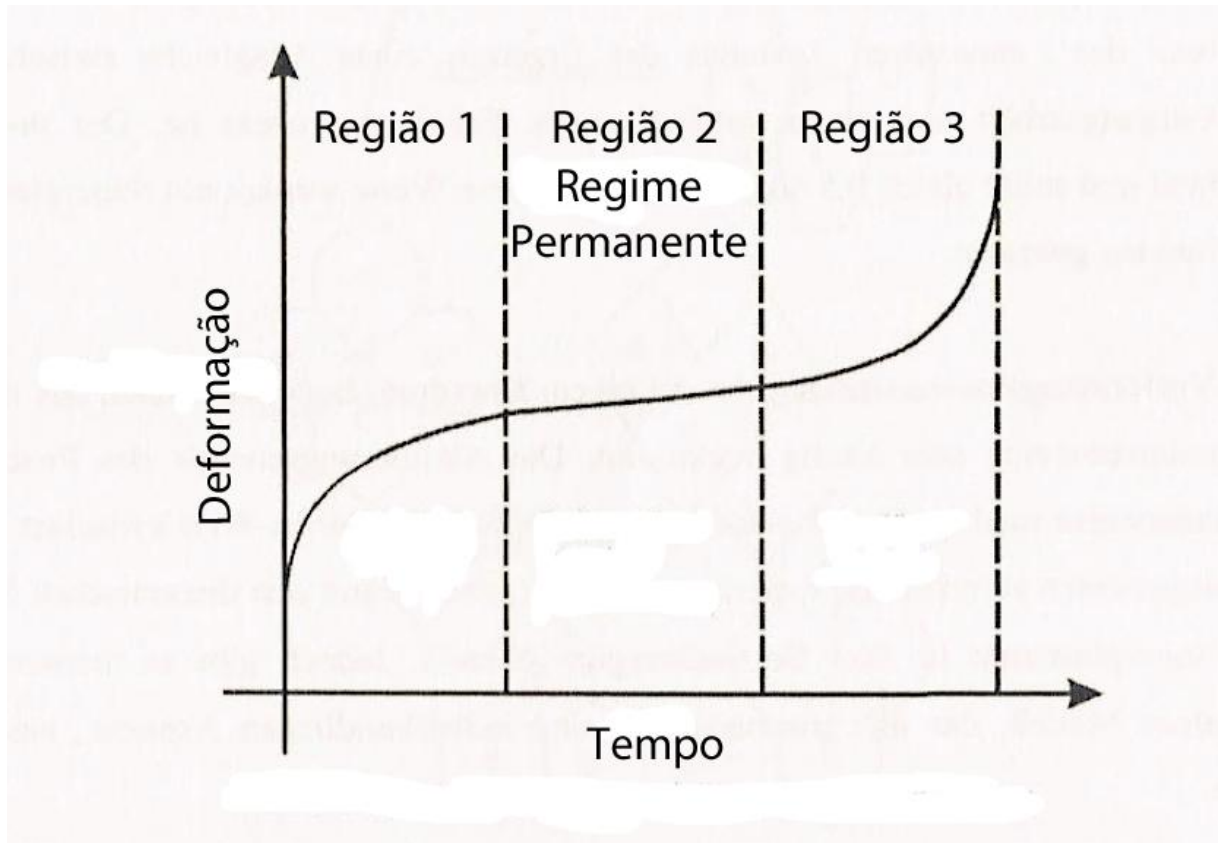


Figura 22 - Curva Sigmoideal - Deformação x Tempo

Seguem os gráficos $m \times \log \dot{\epsilon}$ (Figura 23) e $\sigma \times \log \dot{\epsilon}$ (Figura 24) também divididos nas respectivas regiões.

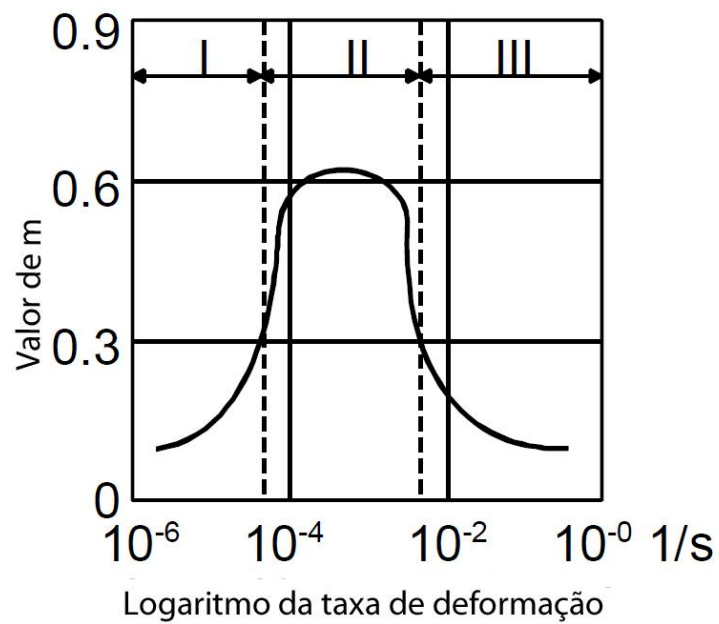


Figura 23 – Relação do índice de sensibilidade a taxa de deformação com a taxa de deformação (Siegeret al., 1994)

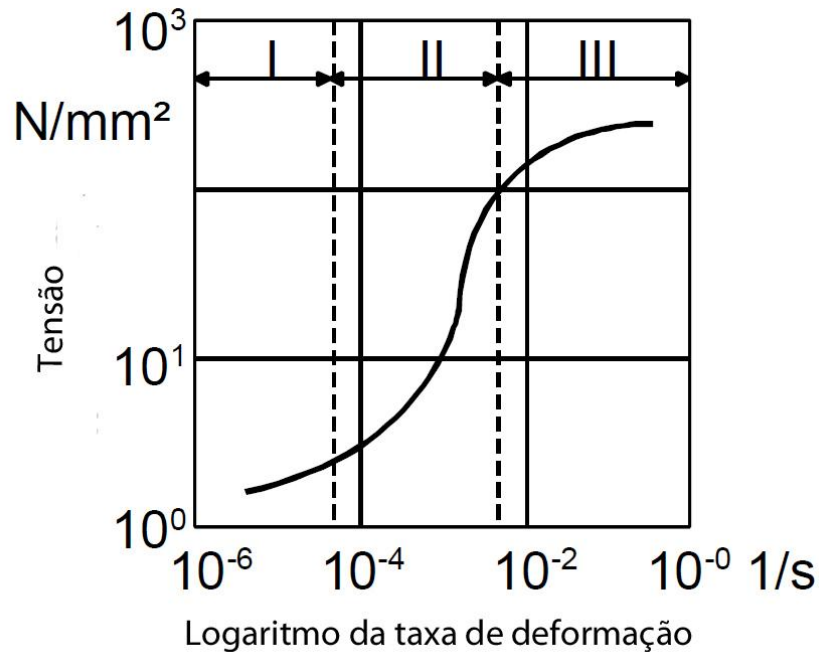


Figura 24 - Relação da tensão com a Taxa de deformação (Siegeret al., 1994)

O comportamento e caracterização das regiões são dados pela equação (6):

$$\log \sigma = C + m \log \dot{\epsilon} \quad (6)$$

Denominadas de Região 1, Região 2 e Região 3, cada uma apresenta diferenças em suas características microestruturais. (Samekto, 2005)

A caracterização da tendência Sigmoidal em termos destas três regiões é baseada principalmente no valor do expoente de tensão, n (caso dos ensaios de fluência) ou expoente de sensibilidade a taxa de deformação, m (caso dos ensaios de tração a quente, foco desse trabalho) onde temperatura, T e tamanho de grão, d são constantes.

Das três Regiões as Regiões 1 e 2 tem sido objeto de muitos estudos o que permitiram não somente estabelecer as características de deformação em ambas as regiões como fornecer interpretações destas características em termos de mecanismos de deformação.

A característica mecânica mais importante do material Superplástico é o expoente m , a Região 1 da Figura 22 mostra baixos valores de $(\dot{\epsilon})$ e m , na Região 2 os valores de $(\dot{\epsilon})$ e m são altos (regime superplástico) e na Região 3 os valores de $(\dot{\epsilon})$ voltam a ser baixos e m tem seu valor aumentado novamente.

Na região 1, a *influência da velocidade* no mecanismo de deformação é muito baixa, e a exata indicação do porque ainda não é bem entendida. Os resultados nessa região são freqüentemente limitados e inconsistentes. (Samekto, 2005) Do ponto de vista microestrutural é nessa região que o alongamento de grãos individuais é limitado;

Na região 3, ocorre grandes deformações em grãos individuais, devido a múltiplos deslizamentos. Nessa região o coeficiente de sensibilidade m assume geralmente valores próximos a 0,2 e o expoente de tensão n maior do que 3, com taxa de fluência sensível a mudança no tamanho de grão. O mecanismo predominante de deformação é a movimentação de discordâncias convencional, como o movimento de átomos e lacunas. (Samekto, 2005)

Na região 2, a existência de uma região estacionária é conhecida, na qual a velocidade de deformação é constante. É comumente aceito que a existência do estado estacionário é o resultado de um equilíbrio entre encruamento e um processo de recuperação de amolecimento. O Valor de m é máximo e deveria ser igual ou maior que 0,5. Esse valor coloca o fenômeno de superplasticidade nessa região.

Os mecanismos propostos e com boa concordância experimental para a acomodação da deformação superplástica são:

- Deslizamento de contornos de grão (GBS);
- Transporte de vacâncias pela rede cristalina e pelos contornos de grão;
- Processo combinado de deslocamento de discordâncias por empilhamento e deslizamento;
- Recuperação e recristalização dinâmica.

Do escoamento superplástico através de GBS e CGBS foram obtidos tanto as condições como parâmetros, que mantém estreita relação com a microestrutura, e definem a característica de deformação básica da liga superplástica, associada

principalmente através de resultados de ensaios de fluência e tração a quente. As relações utilizadas são do tipo:

- Relação entre tensão (σ) e taxa de deformação ($\dot{\epsilon}$);
- Relação entre taxa de deformação ($\dot{\epsilon}$) ou tensão (σ) e temperatura (T);
- Relação entre taxa de deformação ($\dot{\epsilon}$) ou tensão (σ) e tamanho de grão (d);
- Relação entre a contribuição da deformação (ϵ) para o deslizamento de contorno de grão (GBS em inglês), mecanismo principal no processo de autodifusão, e a deformação total (ϵ_r);
- Relação entre a cavitação e a contra pressão;

O mecanismo de comportamento fundamental que controla o fenômeno de plasticidade em alta temperatura em materiais policristalinos está relacionado pela conhecida Equação (7) MBD proposta por Mukherjee-Bird-Dorn, a qual tem sido utilizada a mais de três décadas, apresentando bons resultados com materiais como ligas metálicas.

$$\dot{\epsilon} = \frac{C_m D G b}{kT} \left(\frac{b}{d}\right)^q \left(\frac{\sigma}{G}\right)^{\frac{1}{m}} \quad (7)$$

C_m = Constante adimensional, incorpora todos os parâmetros estruturais, menos o tamanho de grão. Chamada de constante de microestrutura e de dependência do mecanismo de deformação;

Calcula-se também o expoente de difusão pela equação (8):

$$D = D_0 e^{-\frac{Q_c}{RT}} \quad (8)$$

Substituindo (8) em (7) tem-se:

$$\dot{\epsilon} = \frac{C_m D_0 e^{-\frac{Q_c}{RT}} G b}{kT} \left(\frac{b}{d}\right)^q \left(\frac{\sigma}{G}\right)^{\frac{1}{m}} \quad (9)$$

Esse modelo apresenta certas limitações, ele não permite levar em conta todos os fenômenos de difusão observados na superplasticidade e não traduz os diferentes mecanismos que explicam a deformação superplástica.

Sendo a Equação (7) MBD proposta por Mukherjee-Bird-Dorn um modelo reológico que analisa fisicamente a microscopia do comportamento da matéria. A dificuldade de medição das variáveis e a complexidade das considerações limitam sua aplicação.

Partido agora para uma análise de métodos por um modelo reológico que possuem as **características macroscópicas** do processo. Esses métodos se baseiam na física do sólido e na termodinâmica. (Aoura, 2004)

$$\sigma = f(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T, d, t) \quad (10)$$

A equação (9) acima pode ser reescrita da para relacionar a tensão de escoamento efetiva (σ_e), a taxa de deformação ($\dot{\varepsilon}$) e a deformação (ε); Na sua forma reescrita é chamada de Lei de potência ou equação de Ludwik ou Norton-Hoff (3):

$$\sigma_e = C \cdot \varepsilon^n \dot{\varepsilon}^m \quad (3)$$

No regime plástico a alta temperatura a influência de n (expoente de encruamento) é muito pequena e a influência de m (expoente de sensibilidade da taxa de deformação da tensão de escoamento) começa a ser dominante levando a Equação de Ludwik ou Norton-Hoff a ser relacionada pela expressão (4), conforme dito na introdução desse trabalho.

$$\sigma_e = C \cdot \dot{\varepsilon}^m \quad (4)$$

A vantagem desta lei de comportamento é que ela fornece uma boa aproximação do comportamento superplástico, com um mínimo de parâmetros experimentais.

É igualmente possível de encontrar uma lei de comportamento superplástico pelo modelo polinomial (11), conforme proposto por Ghosh e Hamilton em 1982. (Ghosh et al., 1982)

$$\text{Log } \sigma_0 = A_0 + A_1(\log \dot{\epsilon}) + A_2(\log \dot{\epsilon})^2 + A_3(\log \dot{\epsilon})^3 + A_4(\log \dot{\epsilon})^4 \quad (11)$$

Tem-se que $A_0 \dots A_4$ e B são constantes, σ_0 é a medida de tensão exclusiva do encruamento.

Essa lei reproduz mais fielmente o comportamento superplástico, porém ele é mais complexo experimentalmente. Dependendo das condições de ensaio, por exemplo, seriam necessários vários ensaios a tensão constante para levantar todos os coeficientes necessários ao equacionamento.

Depois de mostrada a lei da potência, conhecida fórmula de Norton-Hoff, analisa-se um **modelo baseado no crescimento do tamanho de grão**.

Experimentos que consideram o crescimento do tamanho de grão em vários metais e ligas indicam que tensão impede esse crescimento. Contudo, no processo da deformação superplástica, a tensão aumenta o crescimento de grão por deslizamento do contorno de grão (Grain Boundary Sliding). A energia de ativação em testes de alta temperatura aumenta a instabilidade no contorno de grão de materiais superplásticos. A diferença na energia de deslocamento entre os dois lados do contorno de grão significa que o contorno de grão desliza na direção da área deslocada.

Os grãos maiores se tornam maiores e os grãos menores se tornam menores. Como resultado, os grãos maiores englobam os menores devido o deslizamento direcional do deslocamento dos contornos de grão.

Crescimento de grão não é só resultado do tempo de afilamento (annealing time) nos testes térmicos; mas é também positivamente influenciado pela deformação. (Tanet et al., 2007)

2.4.3.1 Modelo 1 para crescimento de grão

Beck (Becket al., 1947) sugeriu um expressão empírica para o crescimento de grão:

$$d = C_1 t^p \quad (12)$$

Laker, Burke and Turnbull (Burke et al., 1952) deduziu a seguinte lei de crescimento de grão: (13)

$$d^2 - d_0^2 = C_2 e^{\left(-\frac{Q}{RT}\right)} \quad (13)$$

Usualmente em metais, vale a seguinte equação (14) derivada da equação (13):

$$d^2 - d_0^2 = k t^{n_1} \quad (14)$$

Sendo que k e n_1 são constantes e $0.5 < n_1 < 1$;

Análise metalográfica (Lianet al., 1995) mostrou que a migração de contorno de grão está relacionada com a mobilidade atômica, que é indicado por:

$$M = \frac{D_{gb0} e^{\left(-\frac{Q}{RT}\right)}}{kT} = \frac{D_{gb}}{kT} \quad (15)$$

A força motor (Driving force) é dada pela equação a seguir:

$$F = \frac{\Omega}{\delta} \frac{2\gamma}{d} \quad (16)$$

A força motor pode ser derivada e resulta como se segue:

$$F = \left(\frac{\Omega}{\delta} \frac{\partial \gamma}{\partial d} + \frac{\partial U_{gb}}{\partial d} \right) \quad (17)$$

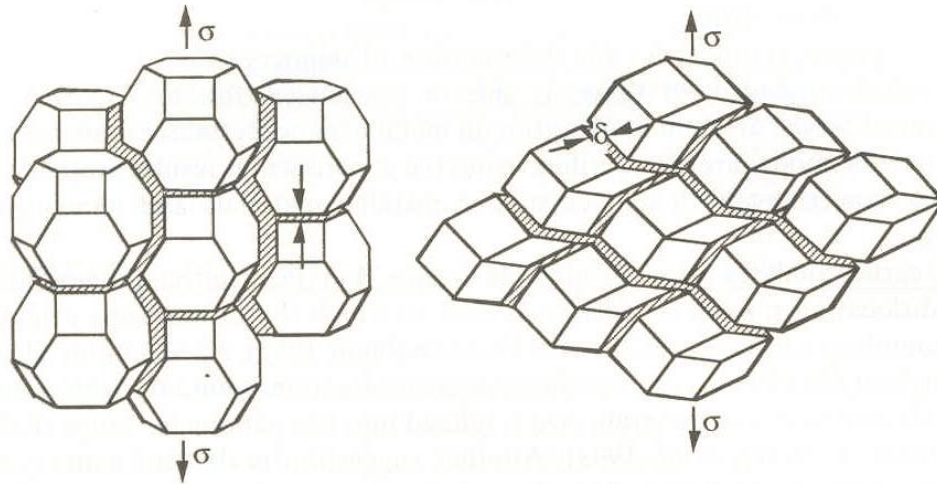


Figura 25 - Ilustração que mostra o significado da largura de grão (Engleret al., 2000)

Sendo $\frac{\partial U_{gb}}{\partial d} \ll \frac{\partial \gamma}{\partial d}$, assumindo $n_1=1$ e $d = MF$, o tamanho de grão pode ser escrito como: (Lianet al., 1995)

$$d^2 - d_0^2 = \frac{4\gamma\Omega}{\delta \left[\frac{D_{gb0} e^{\left(-\frac{Q}{RT}\right)}}{KT} \right] t} \quad (18)$$

2.4.3.2 Modelo 2 para crescimento de grão

Durante a conformação superplástica, na estrutura do material pode ocorrer um crescimento de grão que não pode ser desprezado. O crescimento de grão é determinado por uma parcela de evolução estática e outra parcela de evolução dinâmica esses mecanismos propostos são, na maioria das vezes, considerados independentes. (Aoura, 2004)

O crescimento estático do grão é devido à manutenção do material a alta temperatura, e pode ser considerado pela relação (19). (Verhoven, 1975)

$$d_s^p - d_0^p = Bt \quad (19)$$

t, B e p = Parâmetros constantes.

A taxa de crescimento estático do tamanho de grão pode ser calculada pela equação (20)

$$\frac{\dot{d}_s}{d} = \frac{B}{p} (d_0^p + Bt)^{-1} \quad (20)$$

Para citar outras equações que permitem o cálculo do crescimento estático do grão em função do tempo. Gosh e Hamilton (Ghosh et al., 1982) obtiveram a relação experimental (21) para uma liga de titânio TA6V a 927°C.

$$d(t) = d_0 \left(\frac{t}{10} \right)^p \quad (21)$$

Sendo:

$$p = 1.8[\dot{\varepsilon} + 0.0005]^{0.237} \quad (22)$$

O crescimento dinâmico do tamanho de grão ocorre essencialmente devido a deformação superplástica. Hamilton em 1989 mostrou que a taxa de crescimento dinâmico do grão pode ser escrita da seguinte forma (23):

$$\frac{\dot{d}_d}{d} = \lambda \dot{\varepsilon} \quad (23)$$

λ = é um parâmetro constante;

Para os casos onde a velocidade de deformação é constante, Sato (Sato et al., 1993) em 1993 propôs uma equação empírica (24) de crescimento de tamanho de grão durante a conformação superplástica, que se segue:

$$\ln \left(\frac{d}{d_s} \right) = \lambda \varepsilon \quad (24)$$

d = Tamanho do grão após o crescimento de grão estático;

Kim em 1999 mostrou que o crescimento dinâmico do tamanho de grão poderia também ser escrito da seguinte forma:

$$d_d = d_0 (e^{\lambda \varepsilon} - 1) \quad (25)$$

Conforme dito, o crescimento do tamanho de grão é resultado das contribuições de um processo de crescimento estático e de um processo dinâmico e o equacionamento pode ser obtido utilizando as equações (20) e (23):

$$\frac{\dot{d}}{d} = \frac{\dot{d}_d}{d} + \frac{\dot{d}_s}{d} = \lambda \dot{\varepsilon} + \frac{B}{p} (d_0^p + Bt)^{-1} \quad (26)$$

Baseado na forma fenomenológica do comportamento superplástico, a tensão σ mostra uma forte dependência da taxa de deformação $\dot{\varepsilon}$ e uma fraca dependência da deformação ε e do tamanho de grão d .

Assume-se que o material seja puramente inelástico e incompressível. A forma funcional da relação constitutiva é dada por:

$$\sigma = f(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, d) \quad (27)$$

Ou alternativamente a função pode ser também expressa em termos logarítmicos:

$$\ln \sigma = f(\ln \varepsilon, \ln \dot{\varepsilon}, \ln d) \quad (28)$$

Através da expansão acima em termos da série de Taylor em torno de um estado de equilíbrio dado, e desprezando os termos de ordem superior, a equação (27) pode ser escrita da forma (Chandra, 2000) :

$$\sigma = k_1 \cdot \varepsilon^n \dot{\varepsilon}^m d^p \quad (29)$$

Sendo que:

$$m = \frac{\partial \ln \sigma}{\partial \ln \dot{\varepsilon}}, n = \frac{\partial \ln \sigma}{\partial \ln \varepsilon}, p = \frac{\partial \ln \sigma}{\partial \ln d} \quad (30)$$

Lee em 1998, com seus trabalhos (Lee et al., 1998) e (Kim et al., 1998), partindo da Equação (7) MBD proposta por Mukherjee-Bird-Dorn, que é um modelo reológico que analisa fisicamente a microscopia do comportamento da matéria, através de algumas considerações que são discutidas é proposto um modelo que leva em consideração a lei de encruamento do material e a variação de m durante a conformação superplástica, esse modelo pode ser escrito da seguinte forma:

$$\sigma = k \left(\frac{d_s}{d_0} \right)^{mp} e^{\lambda mp \varepsilon} \dot{\varepsilon} \quad (31)$$

Na qual equação (31) a relação $\left(\frac{d_s}{d_0} \right)^{mp}$ representa o endurecimento estático e a relação $e^{\lambda mp \varepsilon}$ o dinâmico.

É importante deixar explícito que atualmente não há um único modelo que seja capaz de descrever todos os aspectos metalúrgicos e mecânicos envolvidos no processo de conformação superplástico.

Os parâmetros obtidos pelos ensaios mecânicos, nem sempre são reproduzidos exatamente durante a conformação, certas características observáveis durante os ensaios são indesejáveis, como a cavitação. O refinamento de parâmetros como temperatura, tempo de conformação, e controle da espessura de parede, contrapressão, modelo de controle implementado, condições de monitoramento do controle, passam a serem os objetivos buscados.

2.4.4 Taxa de deformação ($\dot{\varepsilon}$)

Para conhecer o comportamento superplástico é interessante compará-lo ao fenômeno plástico.

Para um material superplástico, a tensão de escoamento é fortemente dependente da velocidade de deformação. Para uma faixa de velocidade de

deformação é observado uma relação linear entre a velocidade de deformação e a tensão de escoamento, em uma escala bi-logaritmica.

De forma geral, o comportamento plástico de um metal pode ser representado pela expressão abaixo:

$$\sigma = K \varepsilon_t^n \quad (32)$$

Sabe-se que:

$$\varepsilon_t = \ln\left(\frac{l}{l_0}\right) \quad (33)$$

E para a superplasticidade, como já foi mostrado na introdução, tem-se:

$$\sigma_e = C \cdot \varepsilon^n \dot{\varepsilon}^m \quad (3)$$

Logo a equação (3) resultará na equação (4) com boa aproximação.

Desconsiderando então o termo de Encruamento, $n = 0$, característica de uma conformação superplástica, como se pode notar na equação (4):

, tem-se:

$$\sigma_e = C \cdot \dot{\varepsilon}^m \quad (4)$$

Como também:

$$\sigma_e = \frac{F}{A} \quad (34)$$

Percebendo a analogia entre os processos plásticos e superplásticos, precisa-se entender o cálculo da deformação para a superplasticidade.

Para corpos de prova de secção transversal retangular submetidos a tração, tem-se, três diferentes deformações:

$$\varepsilon_l = \ln \frac{l}{l_0} \quad (35)$$

$$\varepsilon_b = \ln \frac{b}{b_0} \quad (36)$$

$$\varepsilon_s = \ln \frac{s}{s_0} \quad (37)$$

Assumindo a conservação do volume:

$$A_0 l_0 = A_1 l_1 \quad (38)$$

$$l_0 b_0 s_0 = l_1 b_1 s_1 \quad (39)$$

$$\frac{l_0 b_0 s_0}{l_1 b_1 s_1} = 1 \quad (40)$$

Logo:

$$\sum_{i=1}^3 \varepsilon_i = 0 \quad (41)$$

Dessa forma, a deformação que permeia todo o desenvolvimento da superplasticidade é a maior das três deformações:

$$\varepsilon = \{|\varepsilon_l|, |\varepsilon_b|, |\varepsilon_s|\}_{max} \quad (42)$$

Logo a taxa de deformação ou velocidade de deformação ao longo do tempo é:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (43)$$

A superplasticidade ocorre em **dependência do material e dentro dos valores limites de temperatura de deformação e velocidade de deformação**. Para prática industrial, a superplasticidade das ligas de alumínio ocorre entre 10^{-5} e 10^{-2} s^{-1} no intervalo de taxa de deformação. (Vulcan, 2006)

A conformação de chapas metálicas caracteriza-se por um alto alongamento uniforme e por um baixo valor de taxa de deformação durante a sua conformação.

2.4.5 Temperatura de conformação

Superplasticidade, como já foi introduzido, para que ocorra uma boa conformação, o processo precisa ocorrer na região indicada na Figura 2 - Dependência entre a tensão de escoamento (σ_e) e a taxa de deformação ($\dot{\varepsilon}$) para diferentes temperaturas de conformação. Material: Formall545.

O impacto da temperatura sobre a tensão de escoamento e sobre a taxa de deformação está, para um amplo espectro de materiais, bem documentado.

Um aumento da temperatura de conformação gera uma diminuição na tensão de escoamento, a dependência entre tensão de escoamento e temperatura é maior para grãos finos do que para grãos grandes. O m (Sensibilidade a taxa de deformação) é dependente da temperatura e da taxa de deformação.

A temperatura de conformação superplástica para as ligas de alumínio está entre 475°C e 550°C , testes uniaxiais para determinação do alongamento máximo para liga de alumínio AA5083 foram conseguidos com a temperatura de conformação de 565°C . (Vulcan, 2006)

2.5 A estabilidade e os fenômenos limitantes do processo de conformação superplástico

2.5.1 Estabilidade plástica

O conhecimento do valor de m é fundamental para o comportamento superplástico. Ele está diretamente associado a estabilidade plástica do material durante a conformação.

Uma análise simplificada da estabilidade plástica, a partir de um ensaio de tração, tem-se a relação (44) que mostra a variação instantânea do corpo de prova da secção de área A , a seguir. (Bellet, 1988)

$$\dot{A} = \frac{dA}{dt} = - \left(\frac{F}{K} \right)^{\frac{1}{m}} A^{\frac{m-1}{m}} \quad (44)$$

Para os materiais convencionais o valor de m é baixo ($m \approx 0.1$), um crescimento significativo da velocidade de redução da secção A é observado; isso gera instabilidade da elongação plástica, logo causa a ruptura.

Por outro lado, para alguns materiais, é o processo de endurecimento que governa a estabilidade Plástica. A instabilidade aparece ainda que o efeito de encruamento seja insuficiente para compensar o amolecimento geométrico devido a diminuição da secção.

No caso dos materiais superplásticos, m tende a 1 e a velocidade de redução da secção A pode ser escrita da seguinte forma:

$$\dot{A} = \frac{dA}{dt} = - \left(\frac{F}{K} \right) \quad (45)$$

A redução progressiva da secção independe da A . De maneira qualitativa, ainda que a estricção apareça, a velocidade de deformação aumenta localmente isso causa um crescimento importante da tensão que por sua vez impede a evolução da estricção. A deformação então continua, e permite obter alongamentos maiores que o normal.

2.5.2 Cavitação

A cavitação está para a superplasticidade como falha, assim como a falha do material e as instabilidades geométricas estão para a plasticidade.

É uma das características, assim como temperatura e tamanho de grão, que influem no mecanismo de deslizamento de contorno de grão.

A característica intergranular do defeito sugere tal mecanismo. Um indício de que o escorregamento de contornos de grão é o mecanismo predominante é o número de cavidades que aumenta em taxas de deformação adequadas ao fenômeno superplástico (Osada, 1997) .

A maior parte das ligas superplásticas sofre cavitação interna durante a deformação. Cavitação é o de formação de vazios internos, que geralmente ocorre em materiais metálicos durante a conformação superplástica. Cavitação excessiva não só pode causar falhas prematuras, como impõe limitações significativas nas aplicações industriais dos componentes conformados superplasticamente.

A cavitação é responsável pela falha pré-matura dos materiais que sofreram cavitação durante o processo de conformação superplástica. Embora materiais com m elevado sejam capazes de evitar a constrição externa, a maioria dos materiais utilizados para conformação superplástica não conseguem evitar o crescimento da cavitação durante o processo de cavitação. (Samekto, 2005)

A cavitação, formação interna de micro vazios durante a conformação superplástica, é um problema da maioria da ligas superplásticas de alumínio.

Muitos fatores, incluindo a pureza, tamanho de grão, taxa de deformação, temperatura de conformação, contrapressão, influenciam a cavitação em ligas de alumínio.

Fatores que aumentam a tensão de escoamento da liga, incluindo grande tamanho de grão, alta taxa de deformação, e baixa temperatura de conformação, aumentam a tendência de ocorrer cavitação; que pode ser reduzida com a imposição de uma contrapressão.

Esse fenômeno de se manifesta pela junção das cavidades que aparecem durante a conformação e aquelas já existentes no material, assim ocorre o crescimento, conhecido como coalescência (Figura 26). Observa-se nas juntas de

grão triplas, a partir de fissuras pré existentes ou a partir de partículas intermetálicas formadas durante algum tratamento termo mecânico.

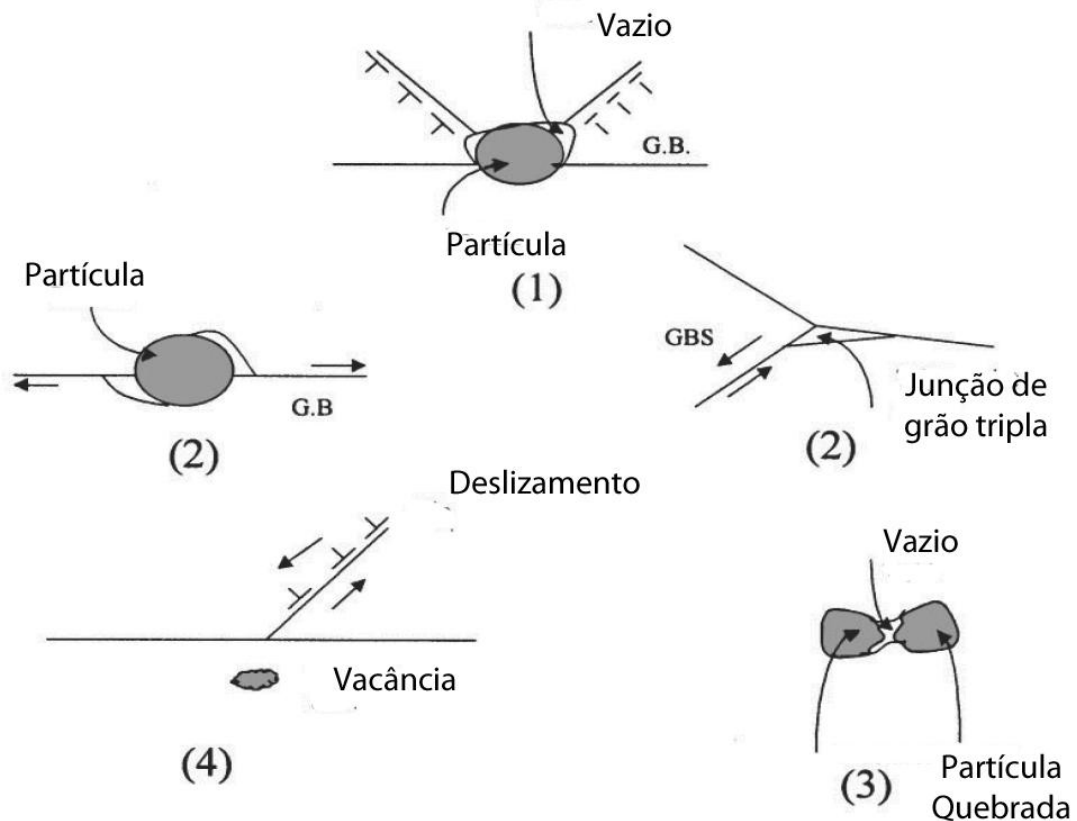


Figura 26 - Fenômeno da coalescência (Cappettiet al., 2010)

O processo de cavitação consiste em três etapas, que podem ocorrer simultaneamente.

O primeiro estágio é chamado de nucleação de cavidade. Esse processo substitui as irregularidades, onde, por exemplo, o mecanismo de acomodação não pode compensar completamente a não coerência de forma de grãos adjacentes.

O segundo estágio da cavitação é o crescimento. Com aumento da tensão, cavidades podem tornar-se maiores, e o fenômeno de *stress directed vacancy diffusion* ocorrerá. O crescimento da cavitação é uma causa de instabilidade do escoamento plástico. É a fase mais crítica, a dificuldade de modelamento resulta em uma dificuldade de controle desse efeito.

A terceira fase alcança a falha mecânica, é a coalescência da cavitação, os vazios internos começam a se comunicar e geram o rompimento do material, conforme mostrado pela Figura 26.

2.5.2.1 Equacionamentos relativos ao crescimento da cavitação

Três principais mecanismos de geração de cavitação são amplamente aceitos, são eles:

- Crescimento controlado pela difusão (DIF);
- Crescimento controlado pela plasticidade (PLA);
- Crescimento controlado pela difusão plástica (SPD);

A cavitação total pode ser computada pela soma das três contribuições, cujas relevâncias dependem dos parâmetros de conformação. (Cappettiet al., 2010)

$$C_{V_{tot}} = C_{V_{PLA}} + C_{V_{DIF}} + C_{V_{SPD}} \quad (46)$$

Considera-se que o mecanismo de crescimento controlado pela plasticidade é dominante durante o processo para a maioria das conformações superplásticas. Faz-se uma primeira observação de que o número de cavitações f tende a crescer com o aumento da deformação. (Tanet al., 2007)

$$f = f_0 e^{(\bar{\beta}, \varepsilon)} \quad (47)$$

Essa função de condição de tensão pode ser expressa conforme a equação (48): (Tanet al., 2007)

$$\bar{\beta} = \beta D(\sigma) \quad (48)$$

$D(\sigma)$ = Função relacionada à condição de tensão.

Essa função relacionada a condição de tensão (Lianet al., 1995) é dada por:

$$D(\sigma) = 0.558 \sinh(X) + 0.008\xi \cosh(X) \quad (49)$$

$$X = \frac{1.5 \sigma_m}{\sigma} = \frac{1.5 (\sigma_m^0 + P_h)}{\sigma} \quad (50)$$

$$\xi = -\frac{3\dot{\epsilon}_2}{(\dot{\epsilon}_1 - \dot{\epsilon}_3)} \quad (51)$$

σ_m^0 = Tensão média enquanto a pressão hidrostática (é necessário que se diga que ao programar as equações acima, utilizar-se-á a pressão efetiva de conformação aplicada segundo a lei de ciclo de pressão escolhida);

2.5.3 Expoente de Sensibilidade à taxa de deformação

Um parâmetro bastante importante relativo ao fenômeno superplástico é o expoente de sensibilidade a taxa de deformação, m . Para um material ideal, a microestrutura se mantém constante, a tensão de escoamento pode ser medida realizando um ensaio de tração (respeitando as devidas diferenças e limitações comparativas com um processo de Blow Forming) com velocidade de deformação constante durante um intervalo de tempo medido, e realizar a medição de tensão durante a região 2, estacionária.

Nota-se que m representa a dependência da curva tensão x deformação em um escala bi-logaritmica.

É importante ressaltar que realizações experimentais são usadas para cálculo do expoente de sensibilidade utilizando suposições que não são possíveis, por exemplo, considerando a microestrutura do material como constante, chega-se a conclusões ambíguas do ponto de vista do mecanismo de deformação.

O expoente m representa a influência resistiva do material contra a formação da constrição. Informações na literatura têm mostrado que o valor de m aumenta o alongamento uniforme até o momento do rompimento.

Fala-se que $m = 1$ representa um comportamento Newtoniano, materiais com essa característica são considerados materiais superplásticos ideais.

A maioria dos materiais superplásticos possui m entre 0,4 e 0,8. (Vulcan, 2006)

A elongação máxima Δl antes da ruptura pode ser estimado pela equação (52) (Lianet al., 1986) .

$$\Delta l (\%) = \left[\left(\frac{m}{0.01} \right)^m - 1 \right] \times 100\% \quad (52)$$

O expoente de sensibilidade a taxa de deformação, m , pode ser derivado da derivada total da relação (2).

$$d\sigma = \left(\frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon} \right) d\varepsilon + \left(\frac{\partial \sigma}{\partial \dot{\varepsilon}} \right) d\dot{\varepsilon} + \left(\frac{\partial \sigma}{\partial T} \right) dT \quad (53)$$

Para análise do momento estacionário do processo, tem-se:

$$\frac{\partial \sigma}{\partial T} = 0 \quad (54)$$

Para o processo de conformação superplástica a influência da deformação sobre a tensão é desprezível, logo:

$$\frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon} = 0 \quad (55)$$

Conseqüência das conclusões acima representadas pelas equações (54) e (55), tem-se:

$$d\sigma = \left(\frac{\partial \sigma}{\partial \dot{\varepsilon}} \right) d\dot{\varepsilon} \quad (56)$$

A partir da equação (56) acima, tem-se a definição do expoente de sensibilidade a taxa de deformação m .

$$m = \frac{\partial \ln \sigma}{\partial \ln \dot{\varepsilon}} \quad (57)$$

A conformação superplástica realiza-se em uma estreita faixa de temperatura e de taxa de deformação, e é importante que, para o material utilizado, se conheça essa faixa o mais preciso possível.

Os parâmetros de material necessários (ϵ , $\dot{\epsilon}$, T) são determinados geralmente através de ensaio de tração uniaxial a quente com um valor constante da taxa de deformação.

Outros autores tentaram analisar o problema da estabilidade de tensão do ponto de vista de ambos os expoentes, expoente de encruamento n , e expoente de sensibilidade a taxa de deformação m , e obter uma forma analítica para o ensaio de tração uniaxial.

Os mais importantes resultados e perspectivas dessas investigações estão descritas a seguir:

Para uma constante taxa de deformação aplicada a ensaio de tração uniaxial inicia-se a instabilidade de tensão quando seguinte critério é alcançado: (Vulcan, 2006)

$$\frac{\partial \sigma}{\frac{\partial \epsilon}{\sigma}} = 1 \quad (58)$$

Com teste de tração real, essas condições ainda não foram alcançadas.

A instabilidade de deformação é fortemente dependente do expoente de encruamento n . A sensibilidade sobre a taxa de deformação leva a uma diminuição da deformação para um ensaio de tração com velocidade de teste constante aplicada.

2.5.3.1 Determinação da sensibilidade a taxa de deformação

O mais conhecido método de determinação do expoente de velocidade m é o Métodos de saltos de velocidade de Backofen. Este método calcula o valor de m através de saltos de velocidade. Os resultados são mais freqüentemente usados para traçar a região da curva entre $\ln \sigma - \ln \dot{\epsilon}$.

A análise dos dados desse método esta intimamente relacionada com o valor obtido. Observa-se pelo Figura 27 - Método para determinação do valor de m , que há duas possibilidades de cálculo para determinar o m , baseando-se em dois métodos abaixo descritos.

Método 1

$$m = \frac{\ln\left(\frac{F_E}{F_D}\right)}{\ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)} \quad (59)$$

Método 2

$$m = \frac{\ln\left(\frac{F_F}{F_D}\right)}{\ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)} \quad (60)$$

Confirma-se o sucesso do método 2 quando se compara com um teste de tração, são obtidos valores menores e mais precisos.

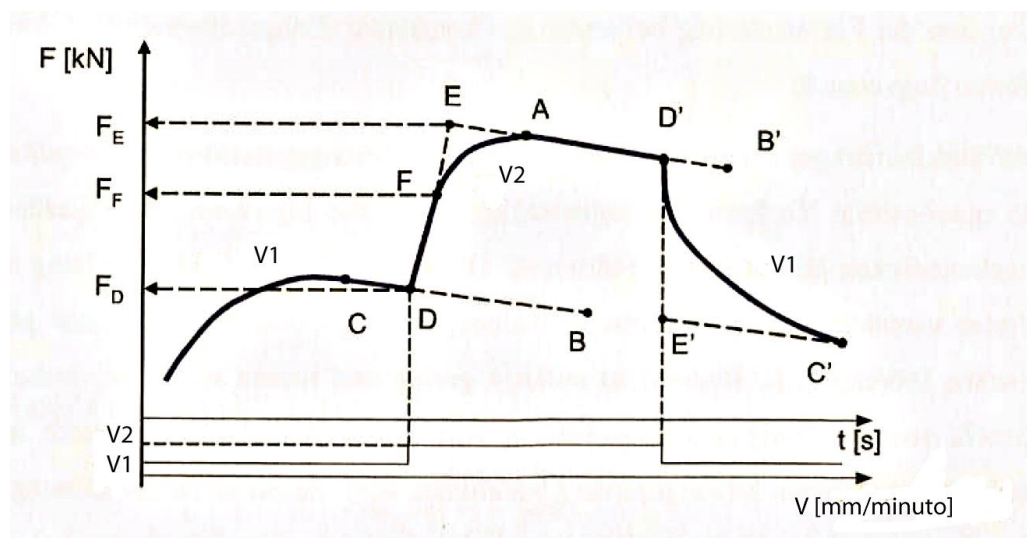


Figura 27 - Método para determinação do valor de m (Vulcan, 2006)

A dependência da sensibilidade a taxa de deformação m com a própria taxa de deformação $\dot{\epsilon}$ e a Temperatura de conformação para a liga de alumínio AA5083 foi estudada através de um ensaio de tração uniaxial nos trabalhos de Verma 1995

(Verma, 1995) , mostrado pelo Figura 28 abaixo, há dados de 3 ensaios a temperaturas diferentes.

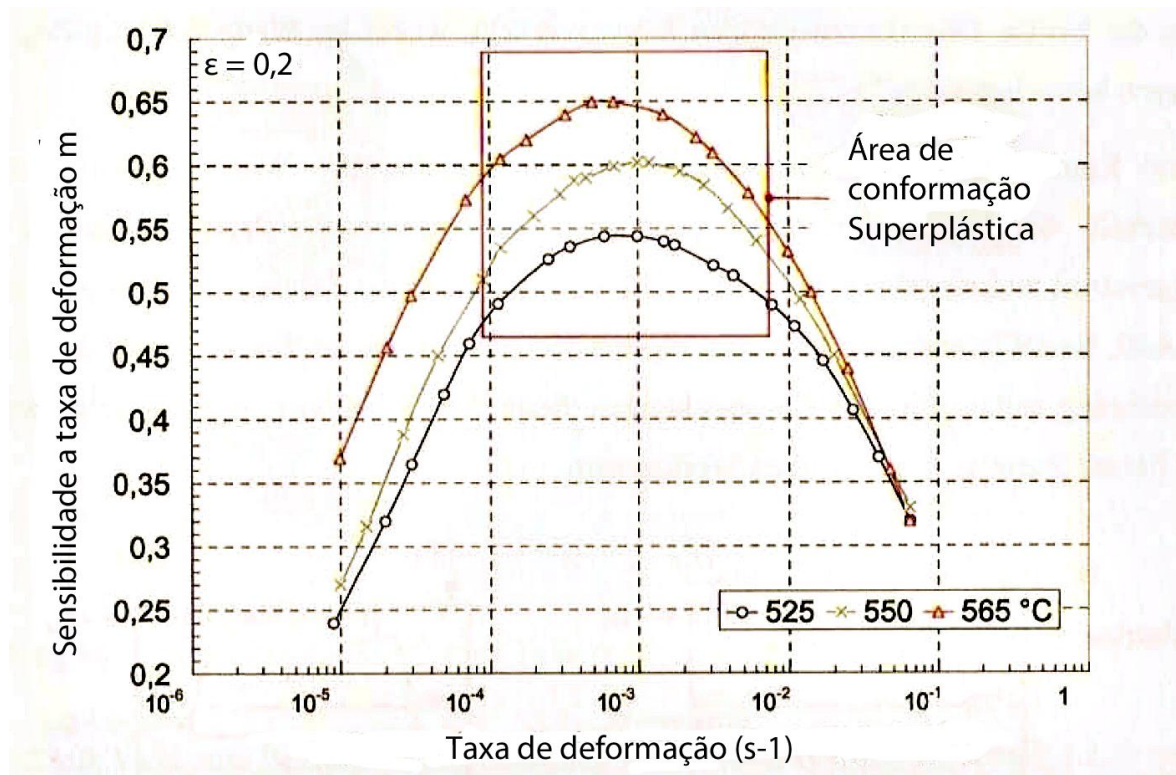


Figura 28 - Sensibilidade da taxa de deformação em função da própria taxa e da Temperatura de conformação. Material: AA5083. (Vulcan, 2006)

2.5.4 Retorno Elástico (Springback)

Muitos produtos na indústria automotiva são produzidos através de conformação por estampagem. Quando as ferramentas são retiradas após a conformação, o produto retorna devido à ação de forças internas. Como as tolerâncias geometrias podem ser rigorosas, esse retorno da forma esperada pode ser inaceitável. Em muitos casos são usados métodos de compensação de Springback. As ferramentas usadas para estampagem são modificadas, para que o produto final seja conformado dentro das tolerâncias esperadas. Na indústria, esse problema reflete em custo e tempo. Além do que, para alguns produtos, essas forças internas podem ser muito elevadas, e os métodos de compensação não funcionam.

É interessante ressaltar que a superplasticidade é uma tecnologia de conformação que não gera esse fenômeno. E baseando-se nos motivos acima citados, muitas empresas do setor privado investem em estudos relacionados a essa tecnologia.

2.6 Equação constitutiva considerando crescimento de grão e cavitação

Nas últimas três décadas, um grande número de modelos foi proposto para analisar as características da conformação superplástica. Modelos teóricos e observações microestruturais indicam que a mais importante característica microestrutural relacionada à superplasticidade é o GBS, deslizamento de contorno de grãos. (Baudelet et al., 1995)

Conseqüentemente, a maioria dos modelos considera a deformação superplástica como um processo que associa o fenômeno de GBS com o controle da taxa pelo processo de acomodação. Tais mecanismos de controle por acomodação podem ser observados nos trabalhos de Ashby and Verrall (1973), como Modelo de acomodação difusional, como também nos trabalhos de Ball & Hutchinson (1969) e Mukherjee (1971), como modelo de acomodação por empilhamento de discordâncias. Um terceiro modelo é aquele que considera um modelo composto por GBS e Fluência por discordâncias e foi proposto por Baudelet e Lian (1995) (Baudelet et al., 1995)

O equacionamento proposto será montado baseando-se no modelo composto (composite model) que considera GBS and Fluência por discordâncias (DC) de Baudelet e Lian.

O típico comportamento mecânico superplástico pode ser ilustrado por duas curvas, a primeira é a curva em forma de S, conhecida como “S-shaped” que descreve a relação entre a tensão ($\log(\sigma)$) e a taxa de deformação ($\log(\dot{\epsilon})$). A outra curva conhecida como “peak-shaped” descreve a relação entre o índice de sensibilidade a taxa de deformação m e a taxa de deformação ($\log(\dot{\epsilon})$).

Essas duas curvas podem ser divididas em três regiões, conforme a **Figura 23**, regiões marcadas com I, II e III.

Muitos experimentos mostraram que essas curvas são influenciadas pela temperatura T , tamanho inicial de grão d_0 e pela taxa de deformação $\dot{\epsilon}$. Conforme é possível analisar na figura

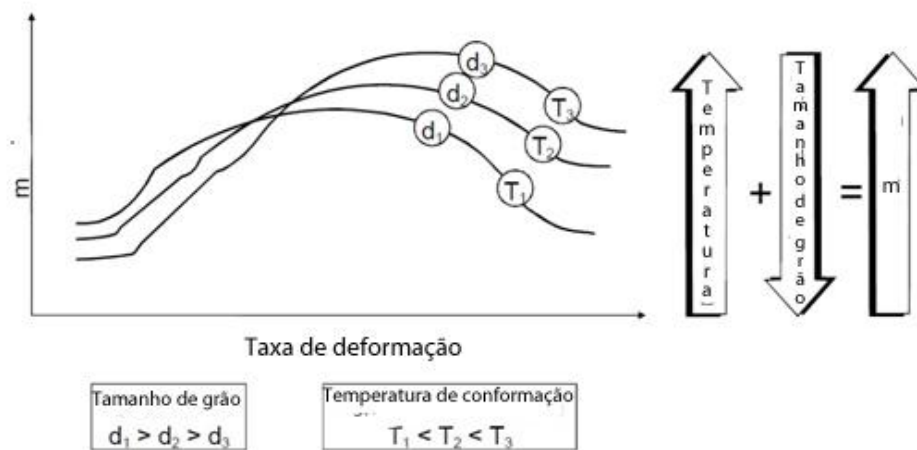


Figura 29 - Peak-shaped influenciada pela temperatura, tamanho inicial de grão e pela taxa de deformação. (Siegeret al., 1994)

A superplasticidade ocorre na região II com alta sensibilidade a taxa de deformação ($m \gg 0.5$) enquanto nas regiões I e III, os valores de sensibilidade a taxa de deformação são aproximadamente 0.2.

Para levar em conta esse comportamento típico, o modelo de transição fenomenológica foi proposto por Hart (Hart, 1967). O comportamento sensível a alta taxa de deformação pode ser simulado aplicando um método numérico de elementos finitos na lei constitutiva de fluência de materiais policristalinos afetados por GBS newtoniano.

O comportamento pode ser representado por:

$$\dot{\epsilon} = \alpha_2 (f\sigma)^n \quad (61)$$

Ou

$$\sigma = \frac{1}{f} A_2 (\dot{\epsilon})^{\frac{1}{n}} \quad (62)$$

$$\sigma = \frac{1}{f} \sigma_a (\dot{\epsilon}) \quad (63)$$

$\sigma_a (\dot{\epsilon})$ = lei constitutiva para Fluência por discordâncias;

f = Parâmetro de transição que é maior que 1 quando o GBS assume o fenômeno

n = Expoente de sensibilidade a tensão; Para o fenômeno de Fluência por discordâncias está no intervalo de 4-5;

Sendo:

$$A_2 = \left(\frac{1}{\alpha_2} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (64)$$

A_2, α_2 = constantes;

.

2.6.1 O “*modelo composto*” para superplasticidade

Do modelo de superfície composto, a tensão média aplicada é definida como (Baudalet et al., 1995) :

$$(a + b)\sigma(\dot{\epsilon}) = a\sigma_a(\dot{\epsilon}) + b\sigma_b(\dot{\epsilon}) \quad (65)$$

Observa-se na Figura 30 (a), os valores usados para calcular a fração de contribuição de tensão por GBS.

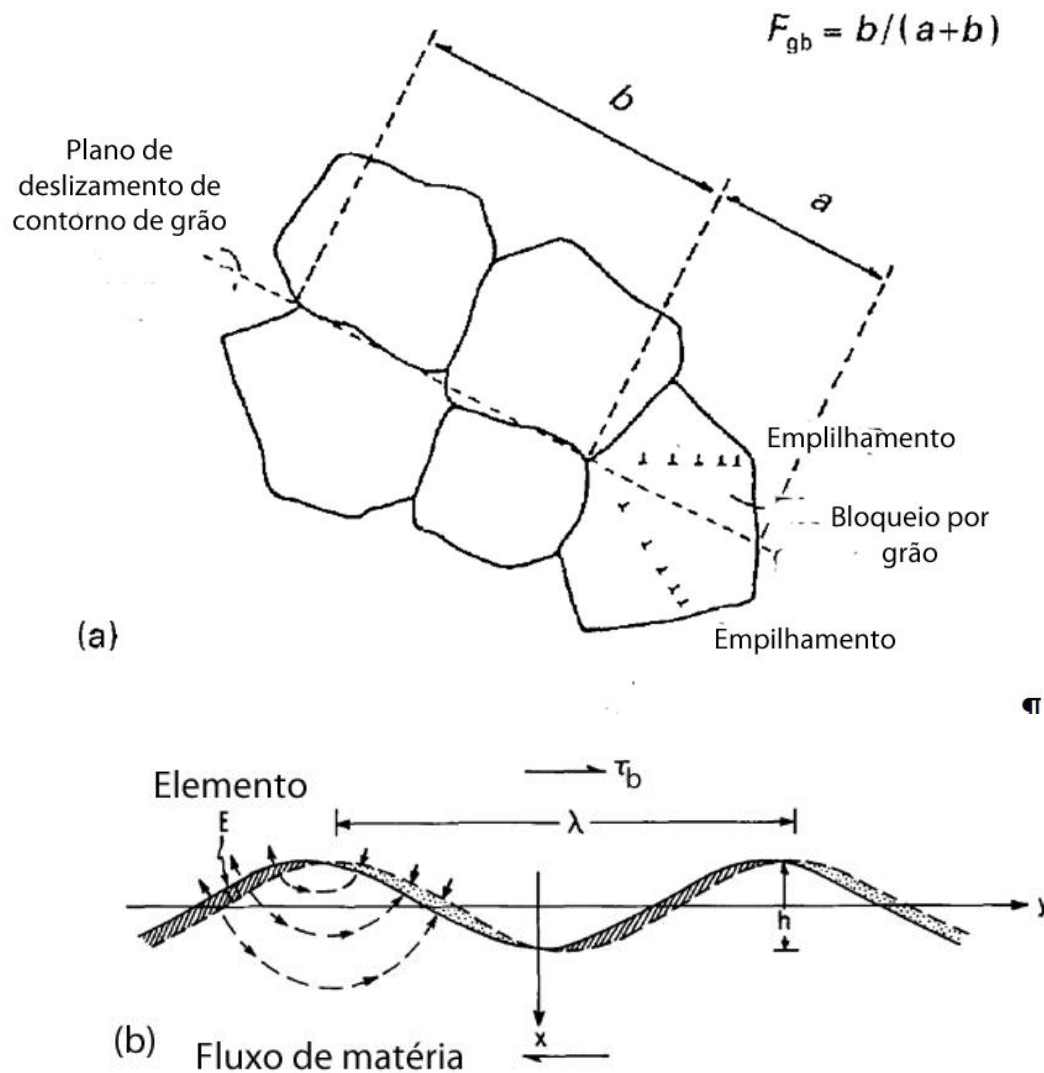


Figura 30 - (a) Ilustração esquemática da acomodação no modelo GBS por Ball e Hutchinson. (b) GBS por Raj e Ashby (Baudalet et al., 1995)

Pela equação (66) calcula-se a proporção da contribuição de tensão gerada pelo GBS (Baudalet et al., 1995) :

$$F_{gb} = \frac{b}{(a + b)} \quad (66)$$

Logo se pode reescrever a equação (65) da seguinte forma:

$$\sigma(\dot{\epsilon}) = \frac{a}{(a+b)} \sigma_a(\dot{\epsilon}) + \frac{b}{(a+b)} \sigma_b(\dot{\epsilon}) \quad (67)$$

Substituindo (66) e (63):

$$\sigma(\dot{\epsilon}) = (1 - F_{gb}) \sigma_a(\dot{\epsilon}) + F_{gb} \sigma_b(\dot{\epsilon}) = \frac{1}{f} \sigma_a(\dot{\epsilon}) \quad (68)$$

Relacionando as equações (63) e (68), tem-se:

$$f = \frac{1}{1 - F_{gb} \left(1 - \frac{\sigma_b}{\sigma_a}\right)} \quad (69)$$

Este modelo é aplicável para o caso em que a tensão aplicada é menor que a tensão de escoamento para Fluência por discordâncias (regiões I e II), como também é aplicável satisfatoriamente para a região de transição de I para II. Contudo, em taxas de deformações elevadas na região III, o modelo sempre fornece valores maiores que a tensão de escoamento. (Baudalet et al., 1995)

A região de transição entre as áreas II e III pode ser descrita pelo modelo de Ashby e Verrall, o Modelo de acomodação difusional (diffusion-accommodation model) é importante quando temperaturas são altas o suficiente para permitir difusão, e quando as deformações são grandes. O mecanismo é descrito por um modelo, do qual uma equação constitutiva aproximada (relação entre taxa de deformação, tensão e temperatura) é derivada. (Ashby et al., 1973)

Uma breve descrição fenomenológica do modelo de acomodação por difusão vai ser realizada baseando-se na Figura 31.

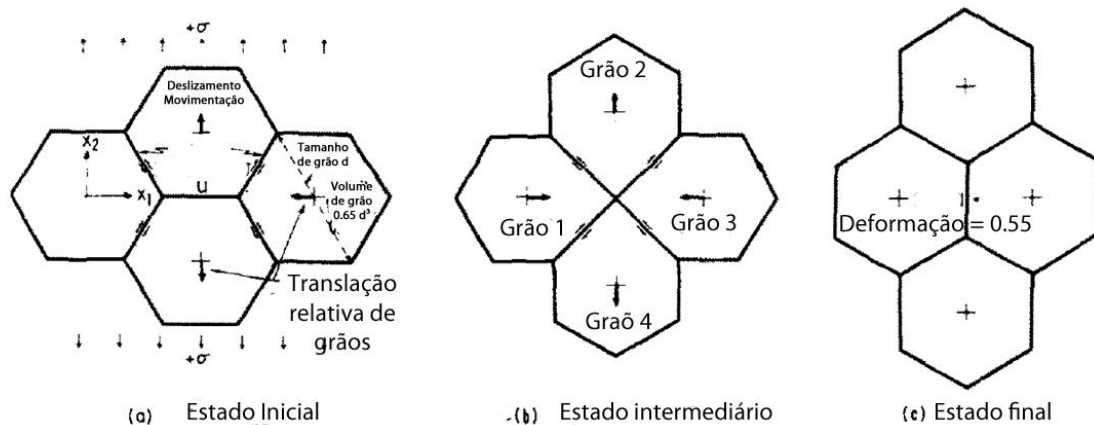


Figura 31 - O "Unit step" do processo de deformação. Um grupo de 4 grãos movem-se desde o estado inicial, através do estado intermediário até o estado final. Os estado inicial e final são termodinamicamente idênticos, embora tenham sofrido uma deformação. (Ashby et al., 1973)

O modelo "Unit step" do processo foi modelado considerando o grupo de quatro grãos como mostrado na Figura 31. Este movimento relativo faz o grupo como um todo mudar de forma. Durante essa variação da forma, os grãos sofrem deformação por acomodação que os permitem permanecerem juntos. No modelo essas deformações por acomodação (que são um pouco diferentes das deformações do grupo como um todo) são completadas por difusão. O processo real em três dimensões é bem mais complicado, porém o postulado básico que foi usado e a física envolvida devem gerar como resultados que diferem do fenômeno verdadeiro de uma constante numérica. (Ashby et al., 1973)

Seguindo o equacionamento do modelo de Ashby e Verrall, assume-se que a taxa de deformação total pode ser escrita como:

$$\begin{aligned}\dot{\epsilon} &= \alpha_2 (f\sigma)^n + \alpha_2 \sigma^n \\ &= (1 + f^n) \alpha_2 \sigma^n\end{aligned}\tag{70}$$

Ou isolando a tensão:

$$\sigma = A_2 \left(\frac{\dot{\epsilon}}{1 + f^n} \right)^{\frac{1}{n}}\tag{71}$$

O esquemático de GBS da Figura 30 (b) refere-se ao modelo de Raj e Ashby (Raj et al., 1971). Inicialmente deve-se entender que Raj e Ashby, em seu modelo, consideram uma tensão de cisalhamento τ_a aplicada em uma fronteira não linear, como pode ser exemplificado pela Figura 32.

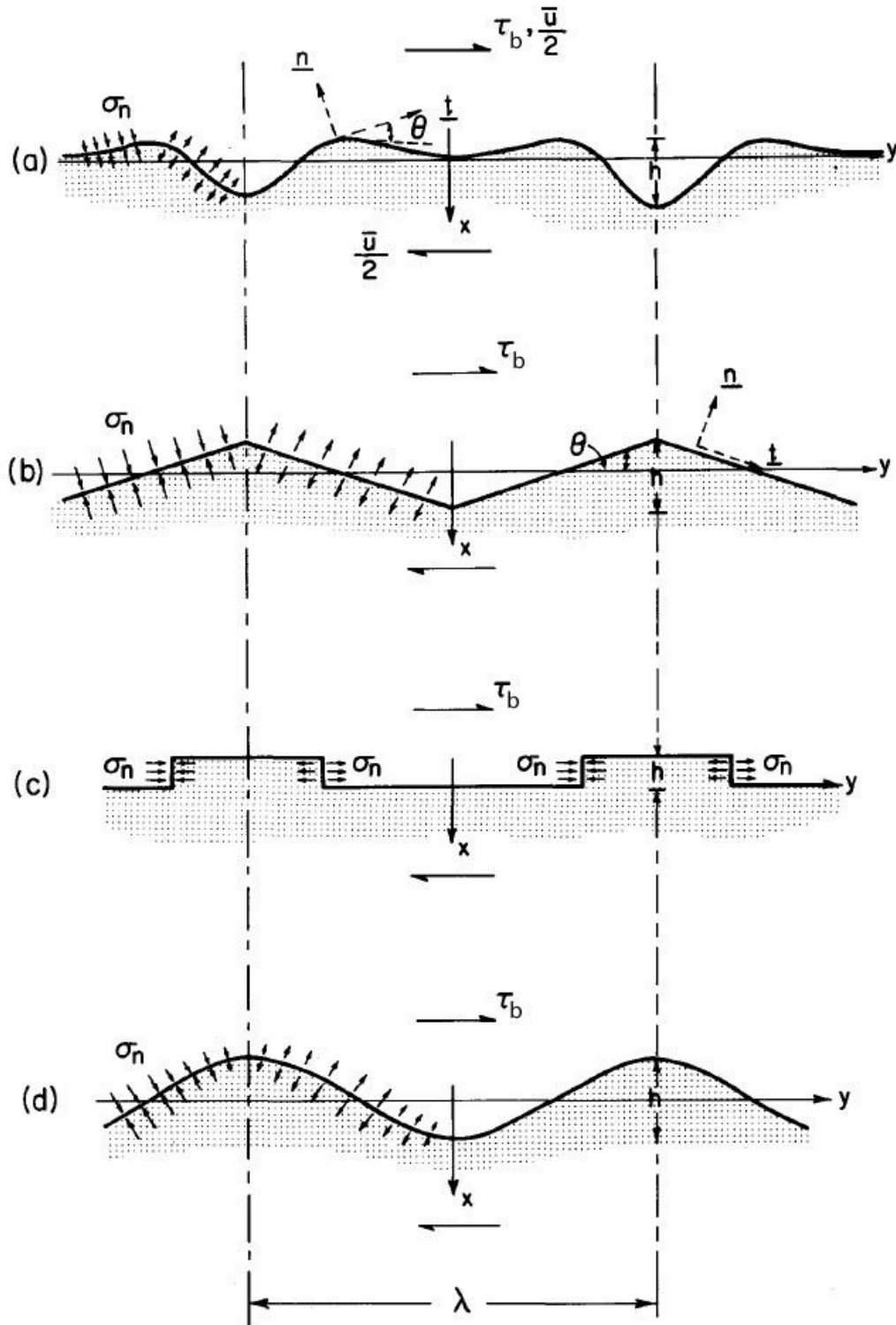


Figura 32 - quatro exemplos de fronteiras não linear. (Ashby et al., 1973)

A forma dessas fronteiras, ou qualquer outra fronteira que tenha dois eixos de simetria, pode ser descrita pelo serie de Fourier de Cosseno (Ashby et al., 1973) :

$$x = \sum_1^{\infty} h_n \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right) ny \quad (72)$$

Para uma fronteira descrita pela equação (72). A taxa de deslizamento de controle difusional $\dot{\bar{U}}$ é dada pela equação (73):

$$\dot{\bar{U}} = \frac{2}{\pi} \frac{\tau_b \Omega}{kT} \frac{\lambda}{h^2} D_v \frac{1}{\sum_1^{\infty} \left\{ \frac{\frac{h_n^2}{h^2}}{\frac{1}{n} + \frac{\pi \delta}{\lambda} \frac{D_{gb}}{D_v}} \right\}} \quad (73)$$

A tensão normal no plano da fronteira , $\sigma_n(0, y)$ é dado pela equação (74):

$$\sigma_n(0, y) = -\frac{\tau_b \lambda}{\pi h} \frac{\sum_1^{\infty} \left\{ \frac{\frac{h_n}{h}}{1 + \frac{n \pi \delta}{\lambda} \frac{D_{gb}}{D_v}} \operatorname{sen} \frac{2\pi}{\lambda} ny \right\}}{\sum_1^{\infty} \left\{ \frac{\frac{n h_n^2}{h^2}}{1 + \frac{n \pi \delta}{\lambda} \frac{D_{gb}}{D_v}} \right\}} \quad (74)$$

A fronteira senoidal é usualmente usada de forma aproximada para qualquer fronteira, utilizando período e amplitude padrão, conforme mostra Figura 32 (d). E sua forma é descrita pela equação (72) com as devidas simplificações, resultando:

$$x = \frac{h}{2} \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right) y \quad (75)$$

A equação (73) da taxa de deslizamento de controle difusional $\dot{\bar{U}}$ segue então as mesmas simplificações e resulta:

$$\dot{U} = \frac{8 \tau_b \Omega}{\pi kT} \frac{\lambda}{h^2} D_v \left\{ 1 + \frac{\pi \delta D_{gb}}{\lambda D_v} \right\} \quad (76)$$

Para grãos de tamanho pequeno, observa-se que:

$$\frac{\pi \delta D_{gb}}{\lambda D_v} \gg 1 \quad (77)$$

E a equação (76) torna-se aproximadamente:

$$\dot{U} = \frac{8 \tau_b \Omega \delta D_{gb}}{kT h^2} \quad (78)$$

Usando $\dot{\gamma} \approx \frac{2\dot{U}}{d}$ e $\Omega = b^3$ e h é proporcional a d , obtém (Baudalet et al., 1995) :

$$\tau_b = A_1^* \frac{kT}{\delta D_{gb}} \left(\frac{d}{b} \right)^3 \dot{\gamma} \quad (79)$$

Analogamente:

$$\sigma_b = A_1 \frac{kT}{\delta D_{gb}} \left(\frac{d}{b} \right)^3 \dot{\epsilon} \quad (80)$$

Onde A_1^* e A_1 são constantes ajustáveis dependentes do material. A equação (80) é a expressão para acomodação por difusão local por GBS baseada no modelo de Raj e Ashby.

Sabe-se pela equação (8) aplicada a GBS, tem-se:

$$D_{gb} = D_{gb0} e^{-\frac{Q_c}{RT}} \quad (81)$$

A tensão por fluência por discordâncias pode ser expressa através da fórmula empírica:

$$\sigma_a = A_2^* \left[\frac{kT}{D_{gb0} e^{\left(-\frac{Q_c}{RT}\right)}} \dot{\epsilon} \right]^{\frac{1}{n}} \quad (82)$$

Após simplificação:

$$\sigma_a = A_2 (\dot{\epsilon})^{\frac{1}{n}} \quad (83)$$

Q_c = Energia de ativação, que pode ser ou por difusão de volume ou por difusão de contorno de grão;

Onde A_2^* e A_2 são constantes ajustáveis dependentes do material.

Substituindo na equação (63) as equações (83) e (80), têm-se: (Baudalet et al., 1995)

$$\sigma = A_2 \left(\frac{\dot{\epsilon}}{1 + f^n} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (84)$$

Onde:

$$f = \left\{ 1 - F_{gb} \left[1 - \frac{A_1 kT}{A_2 \delta D_{gb}} \left(\frac{d}{b} \right)^3 (\dot{\epsilon})^{1-\frac{1}{n}} \right] \right\}^{-1} \quad (85)$$

Resumidamente, tem-se o modelo de equações constitutivas da superplasticidade. São as equações (85), (84) e (18).

$$d^2 - d_0^2 = \frac{4\gamma\Omega}{\delta \left[\frac{D_{gb0} e^{\left(-\frac{Q}{RT}\right)}}{KT} \right] t} \quad (86 \text{ a})$$

$$\sigma = A_2 \left(\frac{\dot{\epsilon}}{1 + f^n} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (87 \text{ b})$$

$$f = \left\{ 1 - F_{gb} \left[1 - \frac{A_1 kT}{A_2 \delta D_{gb}} \left(\frac{d}{b} \right)^3 (\dot{\epsilon})^{1-\frac{1}{n}} \right] \right\}^{-1} \quad (88 \text{ c})$$

Esse modelo permite analisar o comportamento de materiais superplásticos como função da taxa de deformação, tamanho de grão, crescimento de grão e temperatura. Além disso, ele considera o GBS, fluência por discordância e o efeito de crescimento de grão.

Alguns resultados qualitativos de implementação desse modelo podem ser observados na literatura. (Tanet al., 2007)

Conforme apresentado na parte teórica desse trabalho, a alteração dos gráficos que são base da superplasticidade é conhecida, e pode ser observado em 2007 por Tan. (Tanet al., 2007)

A Figura 33 mostra os valores padrões da literatura, encontrado nas referências sobre chapas metálicas, já a Figura 34, como também a Figura 35, mostram os resultados calculados a partir da equação constitutiva proposta. Nota-se um bom funcionamento do comportamento das variáveis.

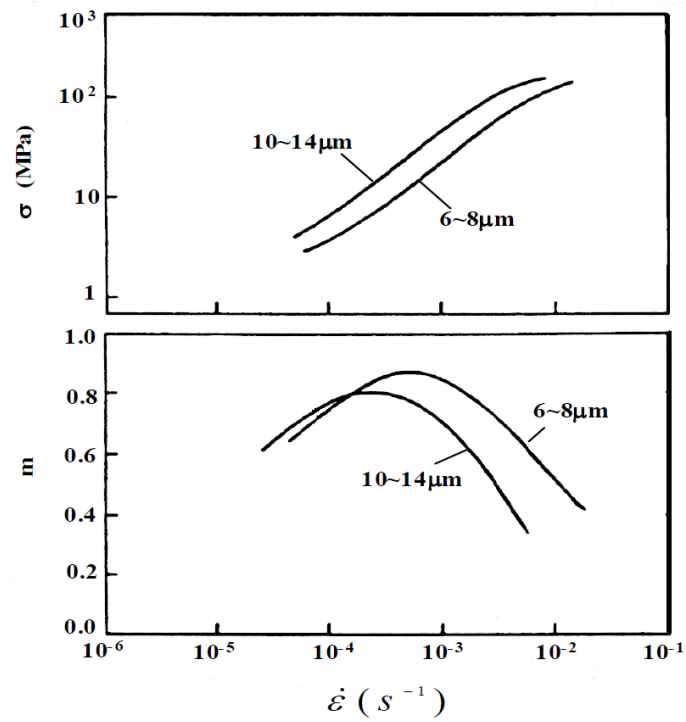


Figura 33 - A tensão de escoamento e o índice de sensibilidade a taxa de deformação versus a taxa de deformação para a liga de alumínio 7475 (Tanet al., 2007)

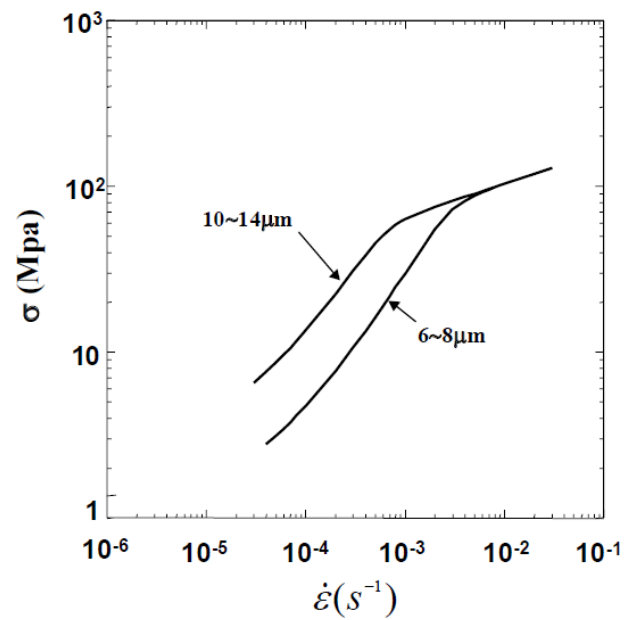


Figura 34 - A curva calculada de tensão de escoamento versus taxa de deformação para a liga de alumínio 7475. (Tanet al., 2007)

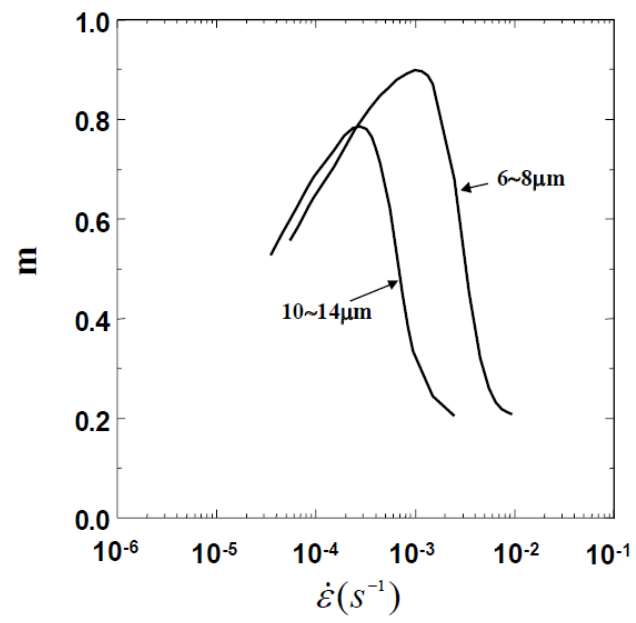


Figura 35 - A curva calculada de índice de sensibilidade da taxa de deformação versus taxa de deformação para a liga de alumínio 7475. (Tanet al., 2007)

3 Caracterização reológica dos materiais em conformação superplástica.

3.1 Histórico de métodos de caracterização

A caracterização reológica de um material é uma etapa importante no processo de simulação numérica de uma conformação. Os ensaios de tração, pela simplicidade e facilidade de realização, são os mais utilizados para identificar os modelos reológicos dos materiais no que cerne a superplasticidade. Por mais que não sejam ensaios que traduzam a conformação real em alguns aspectos. Por exemplo, as tensões aplicadas nos ensaios de tração comuns são unidimensionais enquanto que num expansão fluidoestática biaxial a tensão é sempre bidimensional.

É devido a esse e outros problemas que se busca estudar maneiras de identificar às características reológicas mais próximas as condições reais.

Inicialmente é interessante destacar quais são as características que são buscadas por esses ensaios. No caso do expansão fluidoestática biaxial são m (índice de sensibilidade a taxa de deformação), n (Expoente de encruamento) e K (constante do material).

Nos anos 60 alguns ensaios utilizavam ensaios de tração para levantar as características reológicas de expansão fluidoestática biaxial. Jovane propôs o primeiro modelo analítico para estudar a expansão fluidoestática biaxial hemisférica em 1962, o esquemático é mostrado na **Figura 36**. (Jovane, 1968)

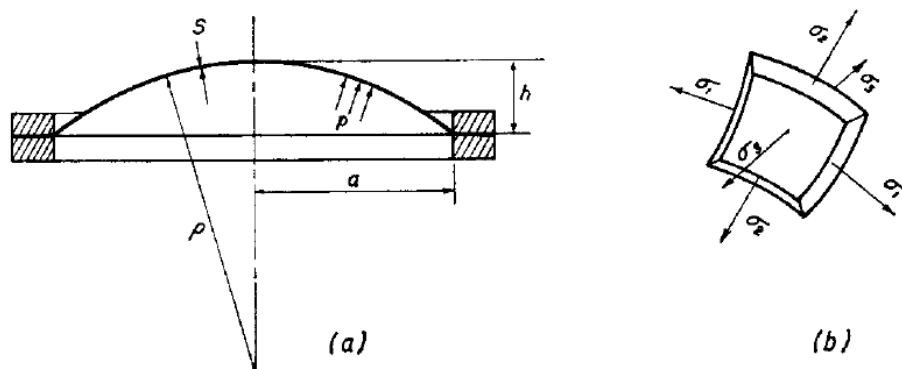


Figura 36 – (a) Diagrama esquemático de expansão fluidoestática biaxial que considera a distribuição de espessura uniforme e (b) esquema de tensões no elemento. (Jovane, 1968)

Em seguida, estudos experimentais e analíticos mostraram que a distribuição de espessura ao longo do corpo de prova depende do índice de sensibilidade a taxa de deformação, conforme mostra Figura 37. (Holt, 1970)

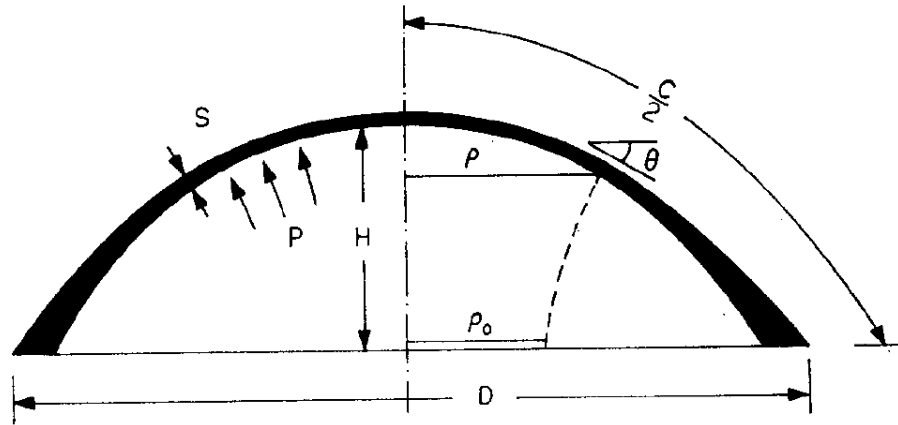


Figura 37 - Esquemático de expansão fluídoestática biaxial de trabalho que considera a espessura função do m . (Holt, 1970)

Outros trabalhos analíticos mostraram que a redução de espessura (thinning) da peça era mais importante que o coeficiente m na distribuição não uniforme da mesma. Essa redução de espessura é devido a um gradiente de tensão entre o pólo e a base do domo deformado, o esquemático do modelamento da Figura 38. (Ghosh et al., 1982)

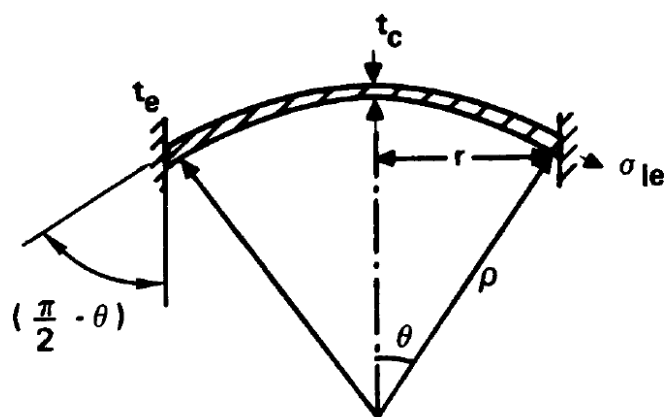


Figura 38 - Esquemático do ensaio de expansão fluídoestática biaxial que considera o gradiente de pressão para justificar a variação de espessura. (Ghosh et al., 1982)

A caracterização do processo também foi estudada para a **superfície cônica**, conforme trabalho de Holt. (Holt, 1970)

O procedimento apresentado por Jung-Hu (Cheng, 1994) é um dos primeiros estudos a propor uma metodologia de caracterização reológica a partir de ensaios de expansão fluidoestática biaxial livre. No entanto a identificação dos parâmetros reológicos teve como hipóteses a distribuição uniforme da espessura, conforme mostrado na **Figura 39**, e a utilização de ensaios a pressão constante, que também limitava o campo de aplicação desse procedimento.

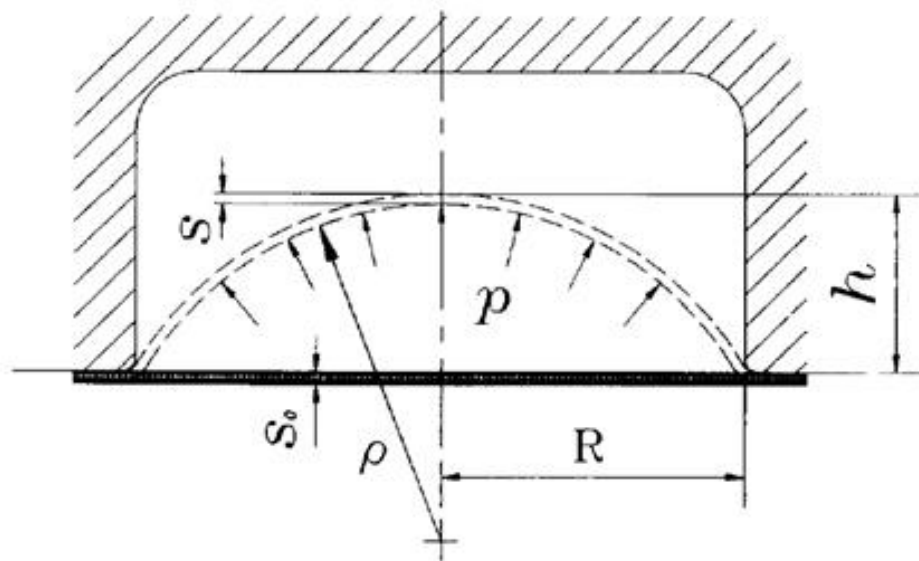


Figura 39 - Esquemático do processo de expansão livre superplástica com hipótese de distribuição uniforme de espessura. (Cheng, 1994)

Aoura realizou em 2004 também uma proposta de caracterização de ligas por ensaio biaxial (Aoura, 2004). Ele realiza ensaio a tensão constante, uma vantagem de sua modelagem é que a variação da espessura ao longo de um meridiano não é uniforme, como também ele realiza um estudo com a matriz cônica e uma matriz de geometria variável.

3.2 Caracterização das ligas para expansão fluidoestática biaxial

Os ensaios biaxiais para caracterização reológica dos materiais superplásticos são pouco citados na literatura. Geralmente o estudo é feito para expansão livre e para matriz cônica.

Três protocolos podem ser observados:

- Expansão fluidoestática biaxial à pressão constante;
- Expansão fluidoestática biaxial à velocidade de deformação constante;
- Expansão fluidoestática biaxial à tensão constante.

3.2.1 Expansão fluidoestática biaxial à pressão constante

Esses ensaios foram os primeiros a serem utilizados para estudo de materiais em conformação superplástica. (Jovane, 1968) A lei de pressão é uma das grandes dificuldades do modelamento dos ensaios de caracterização reológica, como no teste de expansão fluidoestática biaxial à pressão constante não é necessário modelar uma lei de pressão, está justificada a facilidade de realização desse teste quando comparado aos outros dois que aparecem na literatura.

Um método de estudo reológico à pressão constante já havia sido proposto por Jovane em 1968. (Jovane, 1968)

Outros trabalhos, no entanto, confirmaram a influência da pressão sobre a velocidade de deformação e sobre a distribuição de espessura ao longo da peça conformada.

Jovane (Jovane, 1968) mostrou que um ensaio a pressão constante provoca variações significativas na velocidade de deformação.

Os ensaios a pressão constante se adaptam melhor aos materiais que possuem o comportamento superplástico bem definido. (Aoura, 2004)

3.2.2 Expansão fluidoestática biaxial à velocidade de deformação constante.

São os mais práticos, o ciclo de pressão garante a velocidade de deformação constante no topo do domo conformado através de modelos analíticos ou numéricos.

No entanto nesse tipo de ensaio, o conhecimento dos parâmetros reológicos é indispensável, o que se observa geralmente é que esses ensaios oferecem a possibilidade de verificação dos modelos mecânicos em expansão fluidoestática biaxial (Jovane, 1968) e validação dos parâmetros reológicos obtidos à partir de ensaios de tração. (Aoura, 2004) .

No trabalho de Dutta e Mukherjee (1992) (Dutta et al., 1992) , sobre o pressuposto de uma velocidade de deformação no domo da calota deformada constante, é desenvolvida uma lei, equação (89), para o ciclo de pressão que atuará no ensaio seguindo a equação de Norton-Hoff.

$$P_h(t) = 4 \frac{e_0}{R_0} (1 - e^{-\dot{\epsilon}t})^{\frac{1}{2}} e^{-\frac{3}{2}\dot{\epsilon}t} K \dot{\epsilon}^m \quad (89)$$

As considerações que estão por trás da equação (89) são (Vulcan, 2006) :

- Critério de Von Mises;
- Lei do volume constante;
- Teoria da membrana (A tensão na direção perpendicular a peça é negligenciada);
- A área formada durante todos os tempo da conformação é considerada circular.

A seguir o modelo geométrico do expansão fluidoestática biaxial pneumático com matriz redonda do trabalho de Dutta (Dutta et al., 1992) .

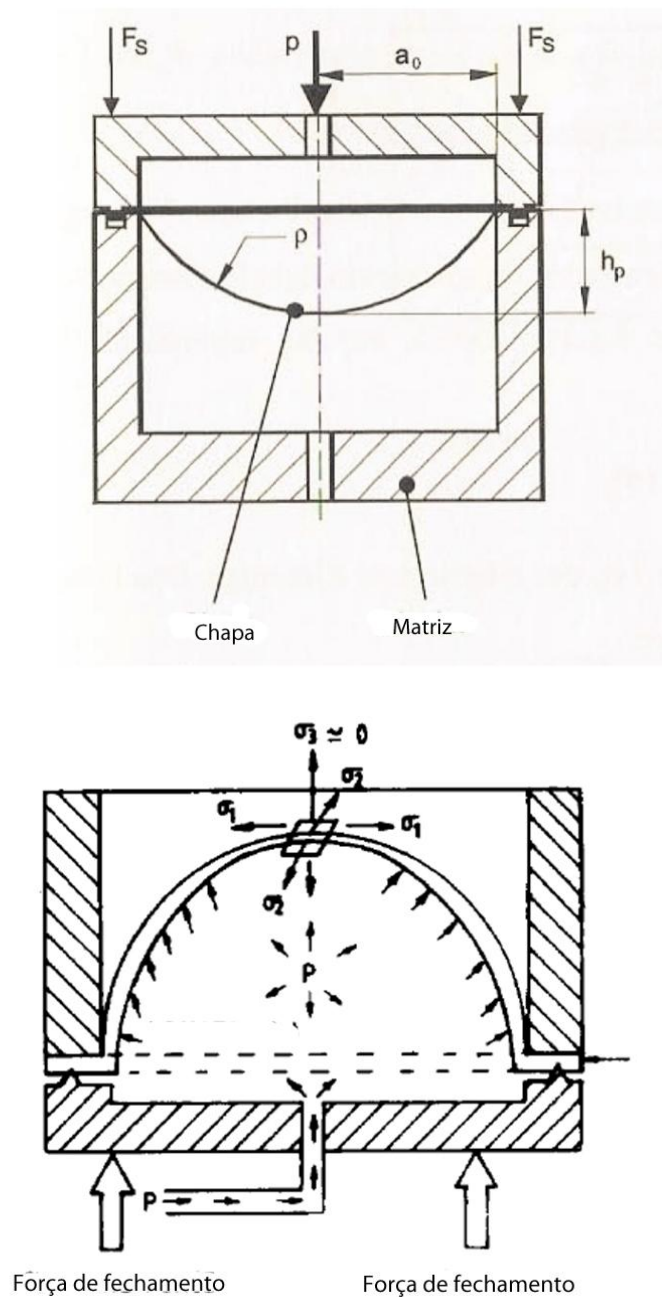


Figura 40 - Modelo geométrico de expansão fluidoestática biaxial pneumática com matriz redonda (Vulcan, 2006) adaptado de (Dutta et al., 1992)

Observa-se que no modelo de Dutta e Mukherjee (Dutta et al., 1992) a altura da calota (h_p) não é levado em consideração. Já no trabalho de Banabic (Banabic et al., 1999) em 1999, observa-se que a pressão já é uma função não só da variação da deformação, mas também da altura da calota. Conforme se observa pela equação (90):

$$P_h(t) = 2 \frac{1 + \alpha \left(\frac{b_0}{a_0}\right)^2}{\sqrt{1 + \alpha + \alpha^2}} \frac{e_0}{R_0} h_p \left(1 + \frac{h_p^2}{b_0^2}\right)^{\frac{3}{2-\alpha}} K \dot{\epsilon}^m \quad (90)$$

$$\alpha = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{1}{2} \left(1 + e^{1 - \frac{a_0}{b_0}}\right)$$

3.2.3 Expansão fluídoestática biaxial à tensão constante

Boulos (Boulos, 1999) estudou a conformação superplástica de matrizes cônicas. Mostrou-se em seu trabalho que para realizar ensaios à pressão e tensão constantes, é necessário que o ângulo no topo do cone varie em função da altura.

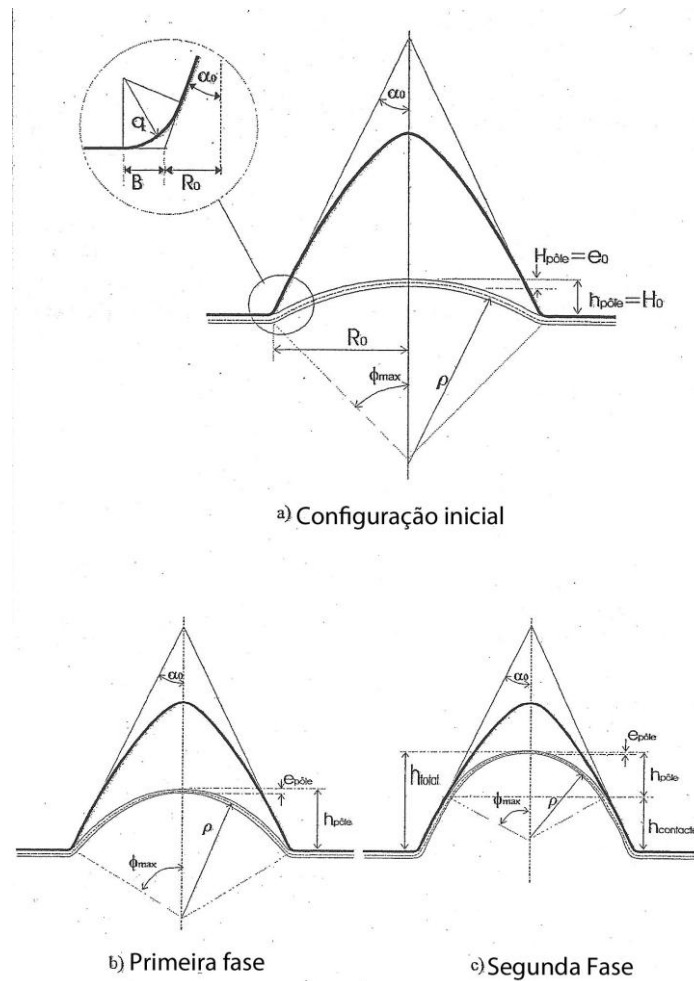


Figura 41 - Variação do ângulo do topo no trabalho do BOUDE em função da altura. (Boulos, 1999)

Esses métodos que utilizam matrizes cônicas ou prismáticas apresentam limitações em relação ao modelamento do contato entre a matriz e a peça de conformação. Esse coeficiente de atrito tem influência sobre a pressão de conformação e o tempo. (Aoura, 2004)

Aoura (Aoura, 2004) utilizou ensaios à tensão constante, para o estudo reológico de seu trabalho, no qual era preciso 4 ensaios à pressão constante, para que se calculassem os coeficientes A_0, A_1, A_2 e A_3 ; e de posse da equação de terceiro grau utilizada para modelar a curva tensão σ versus velocidade de deformação $\dot{\epsilon}$, a mesma pudesse ser derivada e gera-se a curva índice de sensibilidade a taxa de deformação m versus velocidade de deformação $\dot{\epsilon}$.

Quadro que resume a estratégia de ensaio de caracterização dos materiais proposta por Aoura (Aoura, 2004) .

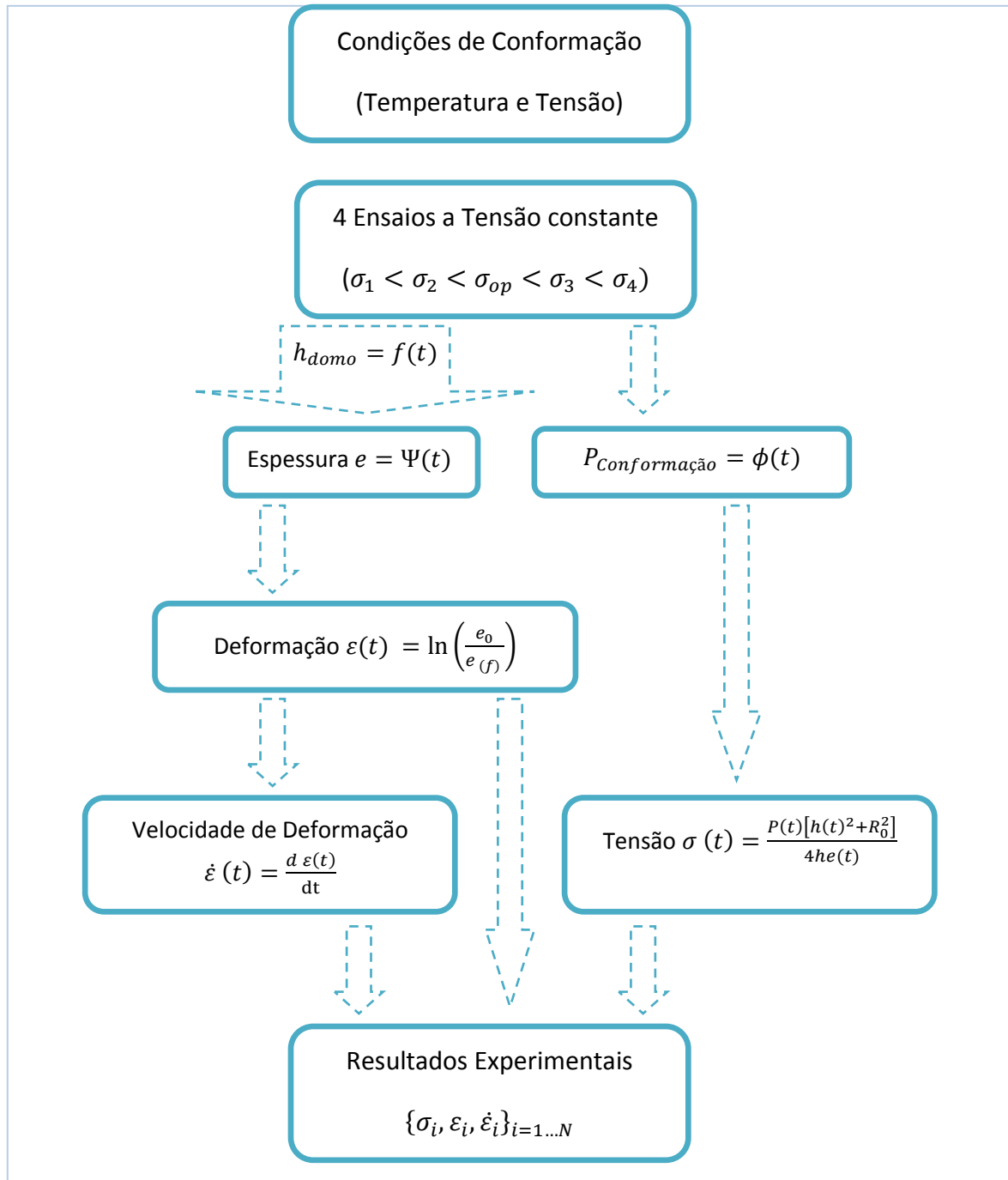


Figura 42 - Estratégia de ensaio de caracterização dos materiais. Adaptado (Aoura, 2004)

3.3 Proposta de estratégia de caracterização de expansão fluidoestática biaxial

3.3.1 Modelo analítico de expansão fluidoestática biaxial livre

3.3.1.1 Hipóteses

- As hipóteses aqui definidas seguem alguns trabalhos da literatura, como Jovane (Jovane, 1968), e estão listadas a seguir:
- O material é isotrópico e incompressível;
- A forma da peça deformada é perfeitamente esférica, apesar de que neste trabalho é analisada uma possibilidade de conformação com chapas elípticas; (Vulcan, 2006)
- A variação de espessura ao longo de um meridiano não é uniforme;
- As deformações e as tensões são homogêneas por toda a espessura do material;
- Não há movimento entre a matriz e a parte presa da peça.

3.3.1.2 Modelo analítico aplicado

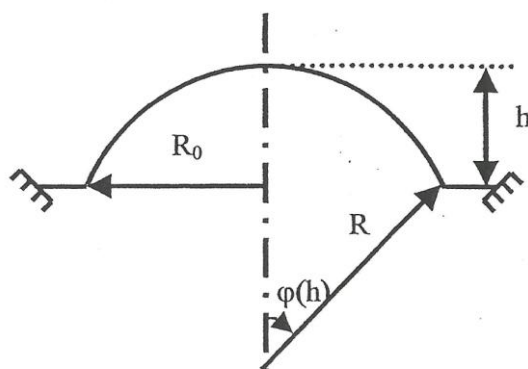


Figura 43 - Esquema de ensaio de expansão fluidoestática biaxial para uma peça fina. (Aoura, 2004)

A relação proposta por esse trabalho, equação(91), de formatura para gerar a função pressão de conformação obteve bons resultados na literatura (Aoura, 2004) (Jovane, 1968) .

$$P(h) = \frac{4\sigma_{eq}he(h)}{h^2 + R_0^2} \quad (91)$$

Porém, ela foi usada para ensaios que se preocupavam em estabelecer uma condição de tensão constante no topo da peça durante a conformação, essa hipótese caracteriza um dos tipos clássicos de ensaios de expansão fluidoestática biaxial descrito no item 3.2.3.

Por exemplo, Aoura em 2004 (Aoura, 2004) , utilizou essa relação de pressão para seu modelo de estudo reológico, e obteve bons resultados. Entretanto, uma das hipóteses assumidas por Aoura é que a σ_{eq} usada como tensão do topo do domo conformado no cálculo da pressão seria resultado obtido por ensaio de tração uniaxial.

O novo modelo proposto por esse trabalho de formatura consiste em medir, em cada amostragem do sistema de aquisição, valores referentes à tensão σ e espessura e , e assim utilizar a equação (91) para gerar o ciclo de pressão da conformação superplástica.

3.3.2 Escolha das condições de conformação superplástica

Antes de seguir para a caracterização do material é necessário conhecer a condição ótima de temperatura e uma estimativa de primeiro incremento de pressão que seja suficiente para começar o processo de conformação.

A temperatura ótima será objetivo da primeira etapa do ensaio. E a sua escolha pode-ser basear em estudos anteriores de caracterização reológica, no caso do presente trabalho da liga de alumínio 5058, ou realizar vários ensaios com o ciclo de pressão proposto variando a temperatura em cada ensaio, a temperatura que deverá ser escolhida é aquela que obter uma maior deformação antes da ruptura.

3.3.3 Determinação do ciclo de pressão

A dificuldade maior de um processo de conformação superplástica é a determinação da lei de pressão que atuará durante o processo. Por exemplo, Aoura em 2004, como não dispunha medições de espessura durante a deformação, precisou realizar quatro ensaios, a tensão constante, para levantar dados suficientes para estabelecer uma relação entre a pressão e a altura do domo conformado.

$$e(h) = a_0 + a_1 h + a_2 h^2 + a_3 h^3 \quad (92)$$

De posse da equação (92) Aoura (Aoura, 2004) utilizara a mesma teoria de ciclo de pressão da equação (91).

O presente trabalho propõe a aquisição da espessura em função do tempo, assim como aquisição da tensão em função do tempo, realizando as medições com a ARAMIS.

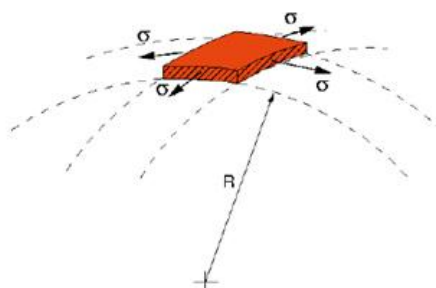


Figura 44 - Representação esquemática do campo de tensão Biaxial usado pelo ARAMIS (GOM, 2000)

Devido o estado de tensão biaxial Figura 44, a falha por estiramento local e seguido de ruptura ocorre consideravelmente para valores maiores quando comparado com testes de tensão uniaxiais.

Na expansão fluídoestática biaxial, o campo de tensões é calculado pela ARAMIS utilizando a forma da peça conformada, a deformação total equivalente no topo do domo e a pressão aplicada sobre a peça. Observa-se que a teoria por trás da ARAMIS é a mesma em que se justifica a escolha das hipóteses desse trabalho de formatura.

De posse da espessura em função do tempo $e(t)$ e da tensão equivalente em função do tempo $\sigma(t)$, o ciclo de pressão é a aplicação da equação (93). É

necessário realizar um primeiro incremento de pressão ΔP para que o sistema se modifique e a lei de pressão possa começar a gerar os valores palores de pressão referência para o sistema de controle de pressão.

$$P(t) = \frac{4\sigma_{eq}(t)he(t)}{h^2 + R_0^2} \quad (93)$$

Esse primeiro valor de incremento de pressão pode ser ajustado experimentalmente. No início do processo, aplicar manualmente a primeira pressão no sistema e observar a deformação, como também observar o valor de pressão fornecido pela equação (93), através da ativação do sistema de controle de pressão, o set point do atuador do controle passará a receber o sinal referente ao ciclo de pressão regido pela equação (93).

3.3.4 Descrição do ensaio de caracterização reológica

A instrumentação que justifica todas as medições realizadas será apresentada no capítulo 4, Memorial descritivo do projeto dos sistemas de controle.

É interessante destacar que essa proposta de caracterização reológica (Figura 45) necessita de um único ensaio para obter os valores esperados, entendam-se valores esperados por m , n e k .

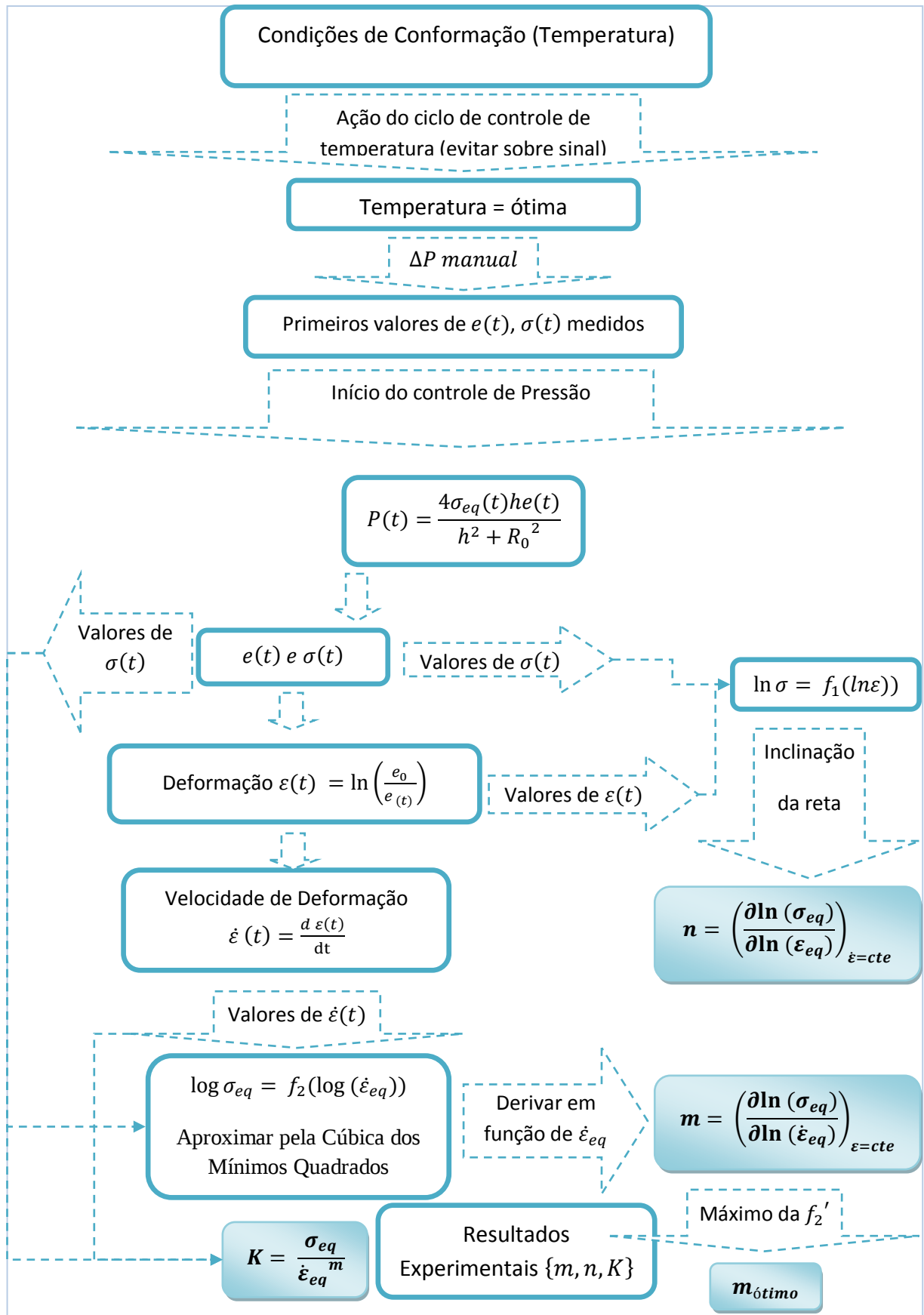


Figura 45 - Esquemático descritivo da nova proposta de caracterização reológica de expansão fluioestática biaxial livre

Em resumo, o ensaio é dividido em duas etapas:

A primeira etapa consiste em aquecer a peça, sem sobre sinal, até a temperatura ótima superplástica, caso seja conhecida, caso contrário, é preciso realizar o ensaio para várias temperaturas e escolher a que fornecer uma maior deformação antes do rompimento.

A segunda etapa refere-se a conformação em si. Através da aquisição de espessura em função do tempo $e(t)$ e da tensão equivalente em função do tempo $\sigma(t)$, o ciclo de pressão é a aplicação da equação (93).

Conforme mostra a Figura 45, há algumas etapas de tratamento dos valores aquisitados para que se calculem as variáveis resultantes do estudo reológico, entenda-se m , n e K .

3.3.5 Método de determinação do coeficiente m

O método utilizado para determinação do coeficiente m para a proposta de estudo reológico de ensaio biaxial de conformação superplástica é conhecido como método direto, utilizado nos ensaios de tração, esse método consiste em analisar e medir diretamente o gradiente, equação (94), da curva $\log \sigma_{eq} = f_2(\log (\dot{\epsilon}_{eq}))$.

$$m = \left(\frac{\partial \ln (\sigma_{eq})}{\partial \ln (\dot{\epsilon}_{eq})} \right)_{\epsilon=cte} \quad (94)$$

Para que se calcule a gradiente m , é necessário primeiro que seja conhecida a f_2 e para isso sugere-se o método de interpolação mínimos quadrados.

Resumidamente, levantam-se os pares $(\log \dot{\epsilon}_{eq}(t), \log \sigma_{eq}(t))$. Escolhe-se a curva de cúbica para a interpolação.

A idéia básica é tentar descobrir quais são os valores dos coeficientes a_0, a_1, a_2 e a_3 , de tal modo que a soma dos quadrados das distâncias (tomadas na vertical) da referida curva $\log \sigma_{eq} = f_2(\log (\dot{\epsilon}_{eq}))$, a cada um dos pontos dados $\log \sigma_{eq}(t)$ seja a menor possível, daí o nome Método dos Mínimos Quadrados.

Para obter tais coeficientes, devem-se conhecer conceitos de Derivadas Parciais, a Teoria de Máximos e Mínimos de funções de várias variáveis e as características de formas quadráticas positivas definidas de funções de várias variáveis envolvidas com o Teorema de Sylvester.

De maneira esquemática e prática apresentam-se aqui as fórmulas para a obtenção da Regressão Linear para a curva de mínimos quadrados Cúbica. (Piskounov)

Notações usadas na seqüência

n = Número de pares ordenados

$S_X = x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n$ = Soma dos x_i

$S_Y = y_1 + y_2 + y_3 + \dots + y_n$ = Soma dos y_i

$S_{XY} = x_1 y_1 + x_2 y_2 + x_3 y_3 + \dots + x_n y_n$ = Soma dos $x_i y_i$

$S_X^2 = (x_1)^2 + (x_2)^2 + (x_3)^2 + \dots + (x_n)^2$ = Soma dos x_i^2

$S_X^3 = (x_1)^3 + (x_2)^3 + (x_3)^3 + \dots + (x_n)^3$ = Soma dos x_i^3

$S_X^4 = (x_1)^4 + (x_2)^4 + (x_3)^4 + \dots + (x_n)^4$ = Soma dos x_i^4

$S_X^5 = (x_1)^5 + (x_2)^5 + (x_3)^5 + \dots + (x_n)^5$ = Soma dos x_i^5

$S_X^6 = (x_1)^6 + (x_2)^6 + (x_3)^6 + \dots + (x_n)^6$ = Soma dos x_i^6

$S_X^2 Y = (x_1)^2 y_1 + (x_2)^2 y_2 + \dots + (x_n)^2 y_n$ = Soma dos $x_i^2 y_i$

$S_X^3 Y = (x_1)^3 y_1 + (x_2)^3 y_2 + \dots + (x_n)^3 y_n$ = Soma dos $x_i^3 y_i$

Para obter a cúbica dos mínimos quadrados resolve-se o sistema de equações com 4 equações e 4 incógnitas a_0, a_1, a_2 e a_3 , colocado na forma matricial:

$$\begin{pmatrix} n & S_X & S_X^2 & S_X^3 \\ S_X & S_X^2 & S_X^3 & S_X^4 \\ S_X^2 & S_X^3 & S_X^4 & S_X^5 \\ S_X^3 & S_X^4 & S_X^5 & S_X^6 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_Y \\ S_{XY} \\ S_{X^2 Y} \\ S_{X^3 Y} \end{pmatrix} \quad (95)$$

Como os termos da primeira e última matriz são conhecidos, pode-se resolver o sistema invertendo a primeira matriz e multiplicando pela última.

3.3.6 Método de determinação do coeficiente n

O método utilizado para determinação do coeficiente n para a proposta de estudo reológico de ensaio biaxial de conformação superplástica é a análise da inclinação da reta de equação $\ln \sigma = f_1(\ln \epsilon)$.

$$n = \left(\frac{\partial \ln (\sigma_{eq})}{\partial \ln (\epsilon_{eq})} \right)_{\dot{\epsilon}=cte} \quad (96)$$

A literatura mostra resultados de ensaios que comprovam a teoria de negligenciar o coeficiente de endurecimento. (Aoura, 2004) (Vulcan, 2006)

3.3.7 Método de determinação da constante do material K

Para o cálculo da constante do material, deve-se utilizar a equação (97):

$$K = \frac{\sigma_{eq}}{\dot{\epsilon}_{eq}^m} \quad (97)$$

Pela arquitetura de instrumentação desse trabalho, são conhecidos os valores de σ_{eq} , $\dot{\epsilon}_{eq}$ e m em função do tempo.

Para o estudo da constante K são realizadas duas análises, a variação em função da deformação e do tempo de conformação.

4 Memorial descritivo do projeto dos sistemas de controle

Em qualquer setor tecnológico a parte experimental é de extrema importância, e para o sucesso, validação e interpretação de uma teoria, é necessário adquirir os dados de maneira correta, seja para posterior comparação, seja para controle do processo.

Dividem-se esses estudos por variáveis de monitoramento:

- Medição de deformação;
- Medição de pressão;
- Medição de temperatura;

Para cada variável de monitoramento foi proposto um sistema de medição e controle, cujo sensor escolhido atendesse as especificações do projeto do ferramental.

Segue um estudo da escolha baseando-se nas restrições do projeto. Como também uma proposta de controle para cada um dos seguintes sistemas:

- Sistema de medição de deformação;
- Sistema de medição de pressão;
- Sistema de medição de temperatura.

4.1 Esquemático de controle

Esse relatório técnico detalhará cada um dos sistemas de controle acima citados, porém inicialmente apresenta-se uma visão geral da proposta da ferramenta de conformação superplástica e a integração de seus sistemas de controle.

O presente trabalho foca-se em controlar as variáveis pressão e temperatura, e adquirir os valores de deformação durante a conformação, através dessas ações atuar no controle do processo de conformação superplástico.

De forma resumida, esse capítulo objetiva dar uma visão geral do setup experimental do controle que será desenvolvido nesse projeto.

Pode-se resumir o controle do processo em 3 partes:

- Monitoramento e atuação na temperatura;
- Monitoramento e atuação na pressão;
- Monitoramento da deformação da conformação.

Nos capítulos seguintes, serão detalhados as tentativas estudadas e as formas analisadas para a implementação da instrumentação proposta pelo autor, como também detalhar os motivos das escolhas pelos instrumentos de medição utilizados, aqueles que melhor se adequaram aos requisitos do projeto.

De maneira esquemática ilustra-se o setup experimental na Figura 46 abaixo.

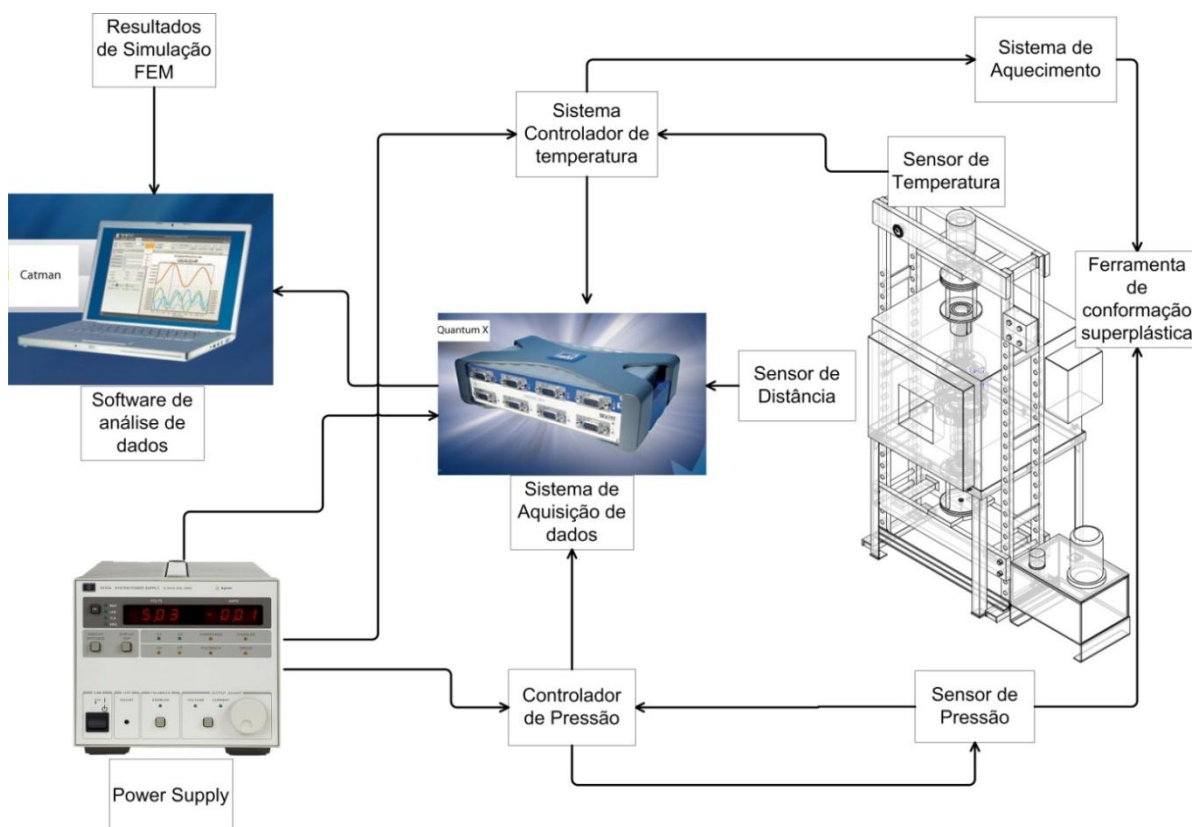


Figura 46 - Setup experimental da instrumentação do controle da ferramenta de expansão fluídoestática biaxial.

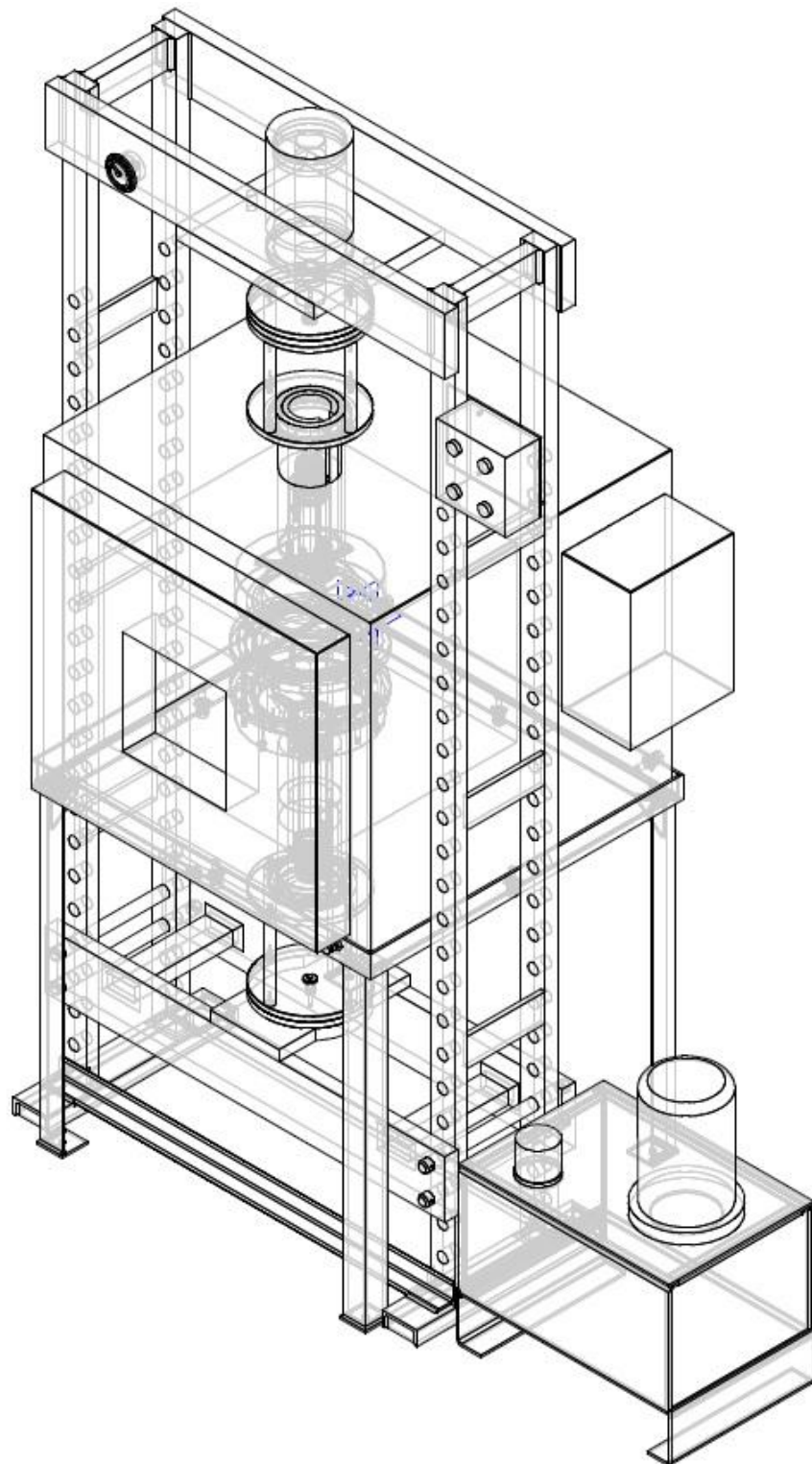


Figura 47 - Ferramenta de conformação Superplástica, objeto de aplicação do controle proposto

4.2 Critério de escolha dos Sensores

A escolha dos sensores do projeto dispositivo de expansão pneumático superplástico foi baseada nos seguintes fatores:

- Instalação e compatibilidade com os controladores;
- Repetibilidade da medição;
- Exigências da superplasticidade;
- Preço;
- Confiabilidade da medição;
- Faixa de atuação do sensor;
- Disponibilidade no mercado;
- Requisitos do projeto;
- Dificuldade no acesso a medição;
- Compatibilidade com o sistema de aquisição.

Para cada sensor será discutido o porquê da escolha dentre as possibilidades estudadas. Os fatores que levaram a descartar as opções que pareciam ser as melhores.

5 Sistema de medição de Deformação

5.1 Medição de deformação

A deformação é uma das variáveis a ser controlada nesse projeto, é interessante notar que até 1999, os equacionamentos referentes à pressão da conformação superplástica não levavam em consideração a altura do domo, h_p . Porém com os trabalhos analíticos e equacionamentos de Banabic (Banabicet al., 1999), chegou-se a uma expressão que relaciona a taxa de deformação, a altura do domo em conformação e outros parâmetros geométricos, com a pressão de conformação.

A seguir destacam-se alguns modos de medição de deformação do processo superplástico e os motivos que impedem que essas configurações sejam utilizadas no atual projeto:

5.1.1 Relógio comparador e câmera

Em 2006, Stefania FRANCHITTI, em seu doutorado (Franchitti, 2007) que tinha por finalidade a análise e modelamento da conformação superplástica, através do processo conformação superplástica por sopro, utilizando a liga de PbSn. Foi utilizado para monitorar a variação de altura da conformação um comparador analógico – Figura 48 – que realiza a medição através do contato com a chapa sob conformação. Entretanto, quando se trata de conformação superplástica, existe a diferença entre medição, monitoramento e controle, no seu trabalho, era necessário um registro em função do tempo dessa altura, por isso foi utilizado também uma câmera.

Com a câmera óptica e o relógio comparador foi possível levantar dados que relacionassem deformação da altura do domo medido com o tempo.



Figura 48 - Comparador analógico (Franchitti, 2007)

Adiante será mencionado o sistema de controle de pressão, capítulo 6.2.1, dessa tese de doutorado.

Abaixo um esquema da instrumentação realizada no processo.

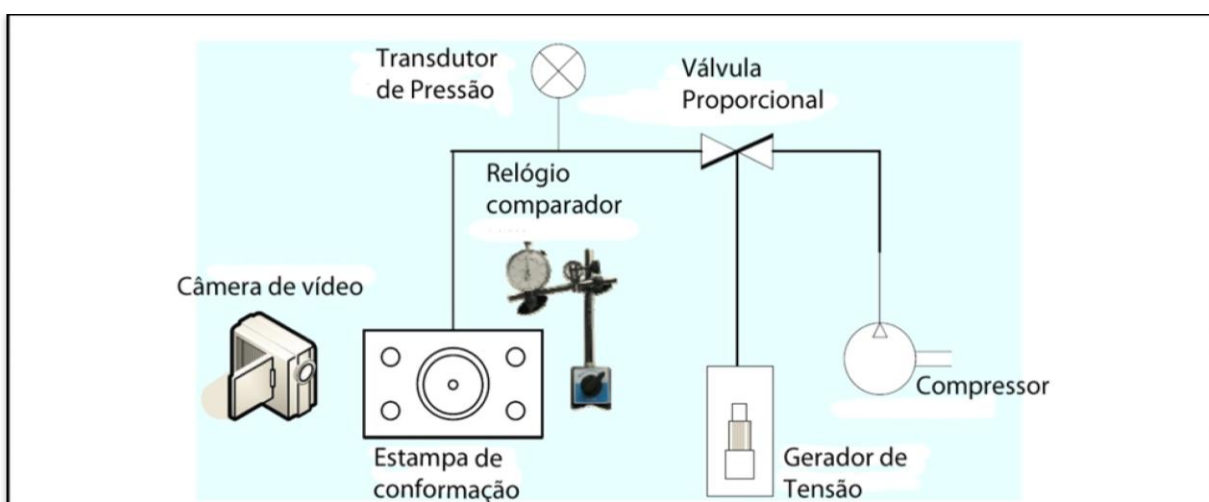


Figura 49 - Instrumentação da conformação superplástica da liga de PbSn; variáveis monitoradas são pressão e deslocamento. (Franchitti, 2007)

É importante salientar que essa solução não se aplica para o atual projeto, principalmente, pelos seguintes motivos:

- Não possibilita a análise triaxial de deformação;
- O sistema de medição possui contato com a peça que está sendo conformada;

5.1.2 LVDT

Jung-Hu em 1994 instrumentou um dispositivo de expansão fluídoestática biaxial para expansão livre, e para medição da altura do domo, foi utilizado um LVDT (linear variable differential transformer), como é possível observar na Figura 50, esse sensor realiza medição de deslocamento linear. (Cheng, 1994)

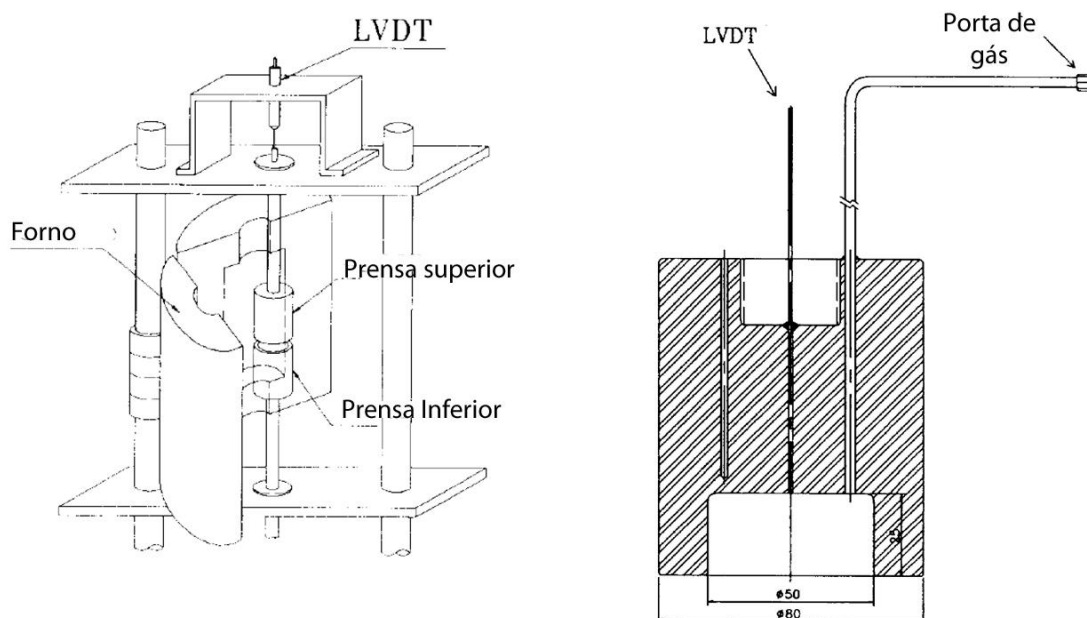


Figura 50 - Setup de ferramenta de expansão fluídoestática biaxial livre, indicando o sensor LVDT utilizado, junto com sua corte lateral. (Cheng, 1994)

5.1.3 Sistema Laser óptico

Em 2002, Iksoo Kim (Kim, 2002), em seu doutorado, que tinha como objetivo estudar a influência do estado de tensão sobre a conformabilidade e do comportamento de encruamento de aços, desenvolveu um sistema de medição com *laser de triangulação e câmera ótica* para realizar um levantamento multiaxial de deformação.

O dispositivo abaixo Figura 51 ilustrado realiza a *medição sem contato* da deformação durante a conformação, considerando alguns aspectos importantes deste projeto, torna-se possível o estudo da tensão de escoamento em função de parâmetros multiaxiais.

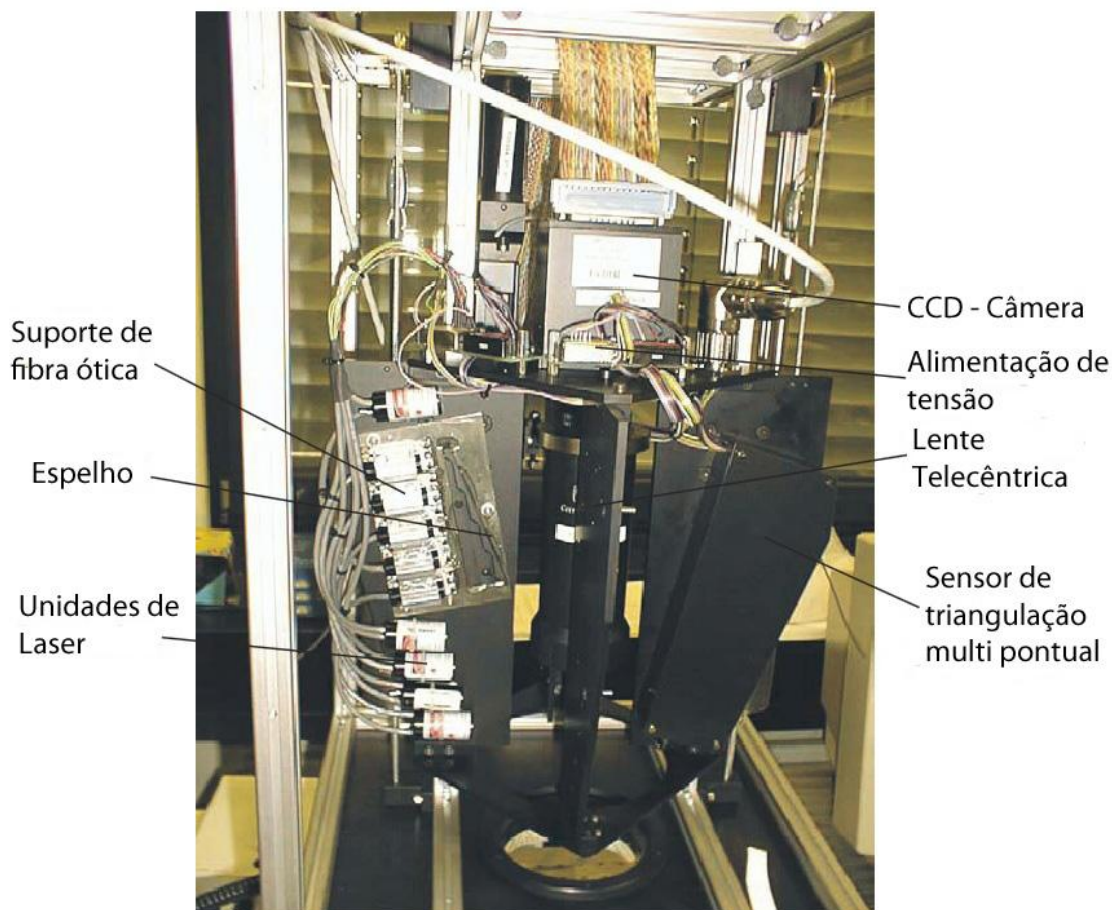


Figura 51 - Sistema de medição de deformação Laser Ótico (Kim, 2002)

5.2 Opções de sensor de deformação

A medição do deslocamento é um dos pontos críticos à instrumentação desse projeto de controle, o que na maioria dos trabalhos estudados sobre instrumentação de expansão fluidoestática biaxial foi utilizado um **LVDT** (linear variable differential transformer) que são sensores para medição de deslocamento linear, um dos pré-requisitos do projeto proposto ao controle, foi à *medição de fora do forno*, cujo

desenho esquemático está na Figura 47 abaixo, impossibilitando o uso desse tipo de sensor de contato.

Realizar essa medição de fora do forno foi o problema exposto para várias empresas, com a finalidade de dimensionar um sensor a laser que preenchesse os requisitos da medição. Os principais requisitos são:

- Medir através de uma janela de vidro de 8 mm de espessura e 26 mm de diâmetro.
- Distância de medição de no máximo 880 mm;
- Sensor deve ser calibrado para realizar a medição correta mesmo com variações de temperatura da ordem de 50°C;

Várias empresas (Acuity (2010) , Sick (2010) , Keyence (2010)) foram pesquisadas e verificou-se que um simples sensor a laser não funcionaria. Dentre os vários problemas destacam-se os mais significativos, o sinal de distância sofreria uma refração não controlada, no caminho de volta para a medição do sinal, por mais que a medição fosse realizada coaxialmente ao eixo do domo conformado, como a distância medida não é desprezível (chega a 900 mm), e para sensores de precisão, encontra-se na maior faixa de distância de aplicação Anexo (12.1), não haveria boa repetibilidade da medição.

Uma solução encontrada foram sensores a laser com **tecnologia de triangulação**, Anexo (12.1), Figura 52, por mais que houvesse problemas com o raio refletido e refratado na janela de vidro, a calibração do sensor é baseada na variação da posição da luz no CCD. O que eliminaria a defasagem de refração. O problema dessa aplicação foi o custo, por exemplo, essa linha de sensores na empresa Schalt possui um teto inferior de custo de R\$ 35.000,00.

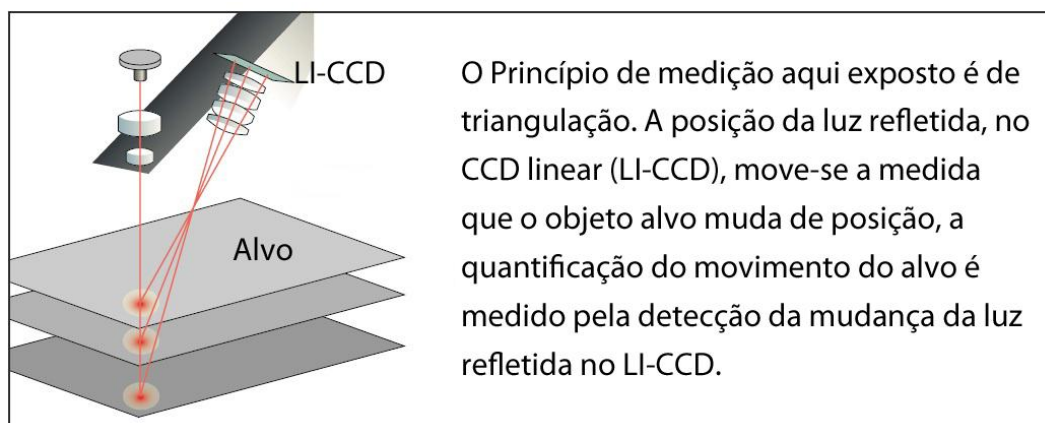


Figura 52 - Sensor a laser por triangulação

Outra solução estudada foi **medição de distâncias através de ultra som**, a motivação baseia-se no sistema **ser não invasivo e possuir um baixo custo de implementação**.

Resumidamente, foi feita uma análise da diferença de impedância acústica característica entre os meios interno e externo ao forno, meio entre o alvo de medição e o transdutor emissor/receptor de ultra som. A elevada espessura do vidro e a dificuldade de trabalhar em elevadas temperaturas para garantir uniformidade das ondas enviadas e recebidas, inviabilizou essa solução. Fundamentava-se em um princípio interessante de Transmissividade, se a espessura do vidro fosse múltipla de meio comprimento de onda, consegue-se a transmissão total da onda propagada.

Após observar a necessidade de uma medição em mais de um ponto, buscou-se um sistema de medição 3D, que serviria como uma ferramenta para realizar um levantamento topográfico da conformação. No subcapítulo 5.1.3 Sistema Laser óptico, explica-se a importância aos estudos da superplasticidade da aquisição, além do valor da altura do domo, outros valores de deformação.

Em 2005, na Ecole des Mines de Paris, Ben Tahar (Ben Tahar, 2005), ao utilizar um sistema de monitoramento contínuo em uma ferramenta de hidroconformação para suprir a necessidade do projeto verificou que não era suficiente a altura do domo, necessitava medir as características de curvatura da peça conformada. Observa-se na Figura 53.

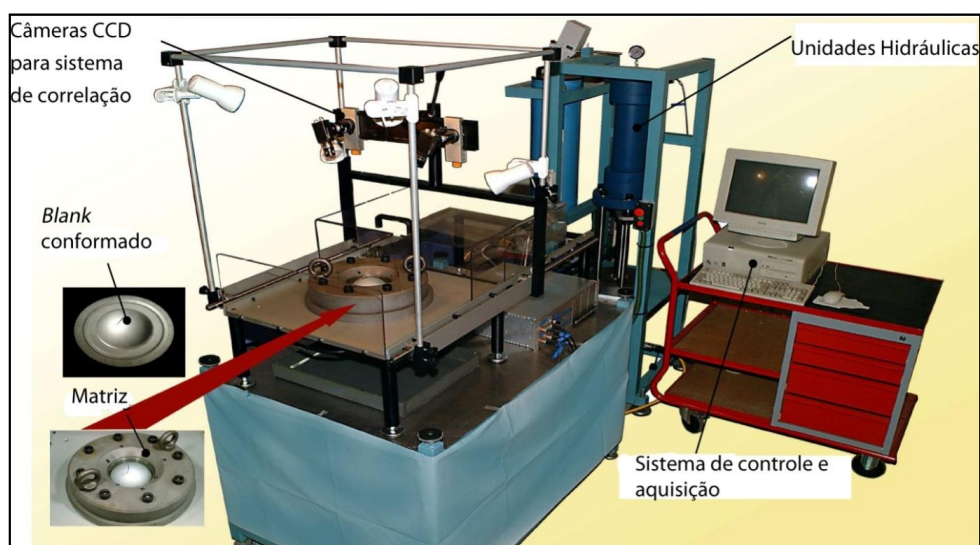


Figura 53 - Setup de uma ferramenta de hidroconformação que utiliza câmeras CCD para monitoramento de deformações. (Ben Tahar, 2005)

5.3 Sistema escolhido de monitoramento da deformação

A solução escolhida utiliza um sistema ótico moderno de medição ARAMIS da GOM (Brunswick, Alemanha). ARAMIS é um sistema para análise de formação Óptica 3D, com alta resolução temporal e de medida, assim como alta exatidão, fornece como medidas as coordenadas 3D de posicionamento, velocidade e aceleração, assim como gráficos de tensão deformação e taxa de deformação; o uso desse sistema preenche os requisitos necessários buscados.

O sistema possui atualizações “ARAMIS 5M” (tanto em software como em hardware) que o capacitam a realizar, em conjunto com computadores de alto desempenho, comparações de resultados de elementos finitos, com dados medidos previamente, ou mesmo uma comparação em tempo real que pode ser utilizada na configuração de um controle de malha fechada. (Merklein, 2009)

No detalhamento do novo modelo de caracterização reológica proposto nesse trabalho de formatura deixa bem evidente a importância de adquirir os valores de espessura do domo da peça conformada e da tensão do campo de tensão biaxial.

Para exemplificar o uso de um sistema ótico ARAMIS, abaixo esta a Figura 54 - Utilização do sistema ARAMIS no setup de do ferramental para uma expansão fluídoestática biaxial chamada de "Viscous Pressure Bulge" (VPB).

Esse estudo (Sigvantet al., 2009) referenciado pela figura do VPB utiliza o sistema ótico ARAMIS para medir tanto a geometria quanto a tensão de deformação usada.

Medidas contínuas de tensão de deformação e geometria são realizadas com as câmeras montadas no topo da ferramenta, depois do teste biaxial, a curva tensão x deformação foi plotada pelo programa que faz parte da suíte do sistema ARAMIS. As vantagens desse setup são o aumento na exatidão da medição quando comparado com métodos uniaxiais convencionais de medição, como também o fato que somente foi preciso um teste para determinar a curva completa de tensão deformação biaxial.



Figura 54 - Utilização do sistema ARAMIS no setup de do ferramental para uma expansão fluioestática biaxial chamada de "Viscous Pressure Bulge" (VPB) (**Sigvantet al., 2009**)

O software do sistema de medição ARAMIS, permite que até duas variáveis – duas deformações pontuais do processo filmado, por exemplo – sejam utilizadas, em tempo real, em uma malha de controle que envolva a planta do processo.

No modelo de caracterização reológica, as duas variáveis escolhidas são espessura e tensão do campo de tensão biaxial.

5.4 Detalhes do controle de Deslocamento

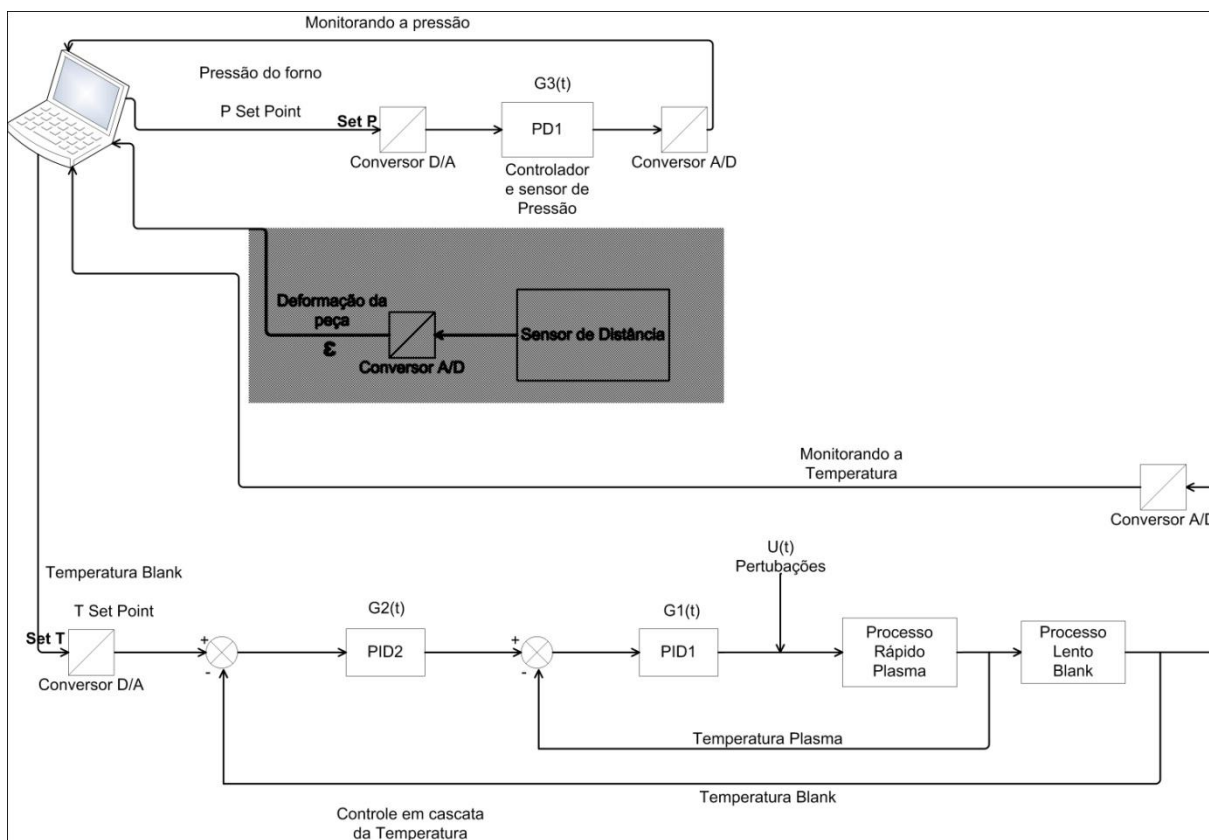


Figura 12 - Setup de controle com destaque no diagrama de blocos do sistema de controle de deformação

A utilização do sensor de distância, conforme destacado na imagem acima, é um dos pontos críticos do projeto da ferramenta, se for utilizada uma trena, e aquisitado somente o sinal de deslocamento referente à altura do domo, esse valor servirá de parâmetro de entrada das equações que controlam os atuadores das outras variáveis do processo, entenda-se a válvula de pressão e o aquecimento do forno. Entretanto se for utilizado sistema ARAMIS, além de uma aquisição de dados tri axiais, é possível também realizar um estudo comparativo e preventivo do valor da espessura durante o processo de conformação, em tempo real.

O processo de conformação superplástica se dá principalmente pela variação da pressão com o passar do tempo, ou seja, com a variação do fluxo de pressão. Tal

variação se faz necessária para que a *taxa de deformação permaneça constante durante a conformação superplástica*.

O Controle da taxa de deformação deve ser feito por meio da comparação entre a taxa de deformação requerida – taxa de deformação ótima especificada no projeto ($2,8 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$) e taxa de deformação observada na experiência. Sabendo-se que a determinação do set point de pressão para as válvulas dependerá dessa diferença entre as taxas de deformação.

A dependência da sensibilidade a taxa de deformação m com a própria taxa de deformação $\dot{\epsilon}$ e a Temperatura de conformação para a liga de alumínio AA5083 foi estudada através de um ensaio de tração uniaxial nos trabalhos de Verma, 1995 (Verma, 1995) , mostrado pelo Figura 28, há dados de 3 ensaios a temperaturas diferentes.

Do ponto de vista do posicionamento do sistema ARAMIS, é importante ressaltar alguns pontos do projeto:

- A concepção da ferramenta leva em consideração uma arquitetura modular, que facilitará a adaptação de uma base suporte das câmeras, uma segunda possibilidade seria a utilização da base da própria ARAMIS.
- Sobre a visualização do blank pelo sistema da GOM, ARAMIS, deve-se atentar pelo fato de que não se pode calibrar a câmera sem possuir uma imagem inicial do blank, fato que aconteceria se a câmera ficasse alinhada a horizontal. Para evitar esse erro a câmera deverá ser disposta com uma angulação em relação ao blank, o ângulo entre o eixo de visão da câmera e o vetor normal do blank deverá ser diferente de 90° .
- Depois de posicionada a câmera, sua calibração deve ser feita para ajustar as impropriedades de medida advindas da refração da janela de vidro.

Utilizar-se-á a janela de vidro da ferramenta para a aquisição das imagens que serão utilizadas no levantamento de dados do projeto. Na tabela abaixo estão dispostas as seguintes informações: a numeração dos itens das partes da ferramenta, o título dado para cada item, a quantidade utilizada, o código, o material e o peso em Kg estimado de cada item.

Tabela 7 - Itens do desenho da ferramenta em anexo plotado em A0 (Lopes, 2010)

Item	Título	Qtd.	Código	Material	Massa
1	Forno Jung 200L - 1200C	1	Forno Grion FC200-1asm		194,1 kg
2	Base matriz	1	05-2-00007-00.pwd	Aço	33,6 kg
3	Matriz superior	1	02-2-00017-00.pwd	Aço	40,2 kg
4	Espaçador	1	02-0-00002-00.asm		218 kg
5	Blank	1	21-2-00001-00.psm	ASTM AA 5083	0,3 kg
6	Arruela de cobre	2	rosetta rame M10.par	Cobre	0,0 kg
7	Arruela de pressão	6	Rosetta elast spacc D 10.par	SAE J 489	0,0 kg
8	Parafuso	6	Viteif M10 x 75.par	ASTM A-307 - 12.9	0,3 kg
9	Distanciador superior	1	03-0-00005-00.asm		42,5 kg
10	Distanciador inferior	1	03-0-00009-00.asm		57,8 kg
11	O-ring	2	O-ring 2217 (29,74x3,53).par	VITON - FPM	0,0 kg
12	Anel - Vidro temperado	2	VETRO D42x6.par	Vidro temperado	0,0 kg
13	Visor	2	30-2-00002-00.par	AISI 1020	0,3 kg
14	Parafuso sem cabeça	1	STEI M10x40.par	ASTM A-307 - 8.8	0,0 kg
15	Parafuso sem cabeça	1	STEI M12x20.par	ASTM A-307 - 8.8	0,0 kg
16	Suporte - Reator	1	03-0-00008-00.asm		52,2 kg
17	Niple	2	Adaptador MM M10x1 - 7-16 JIC.par	AISI 1020	0,1 kg
18	Prensa hidráulica motorizada 30 T ESP - Nowak	1	06-0-00001-00.asm		676,0 kg
19	Anel de vedação	1	54-2-00001-00.par	Alumínio AA 5050	0,0 kg

A Figura 55 mostra o desenho da janela da ferramenta, visão lateral e frontal.

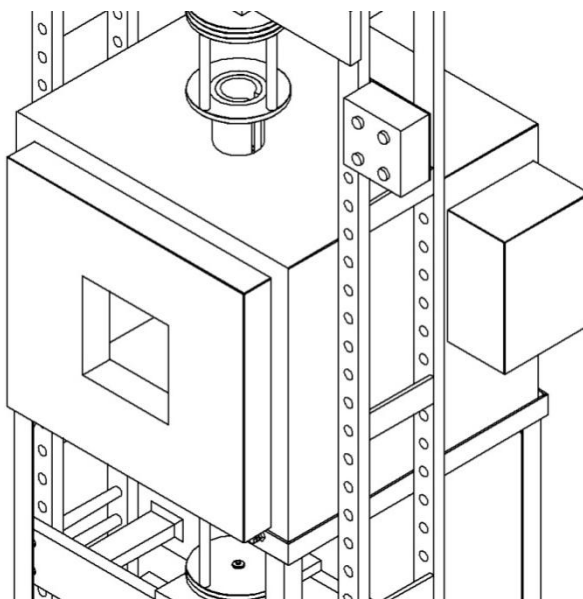


Figura 55 - Visão frontal da janela de vidro no desenho de conjunto da ferramenta com realce no forno (Lopes, 2010)

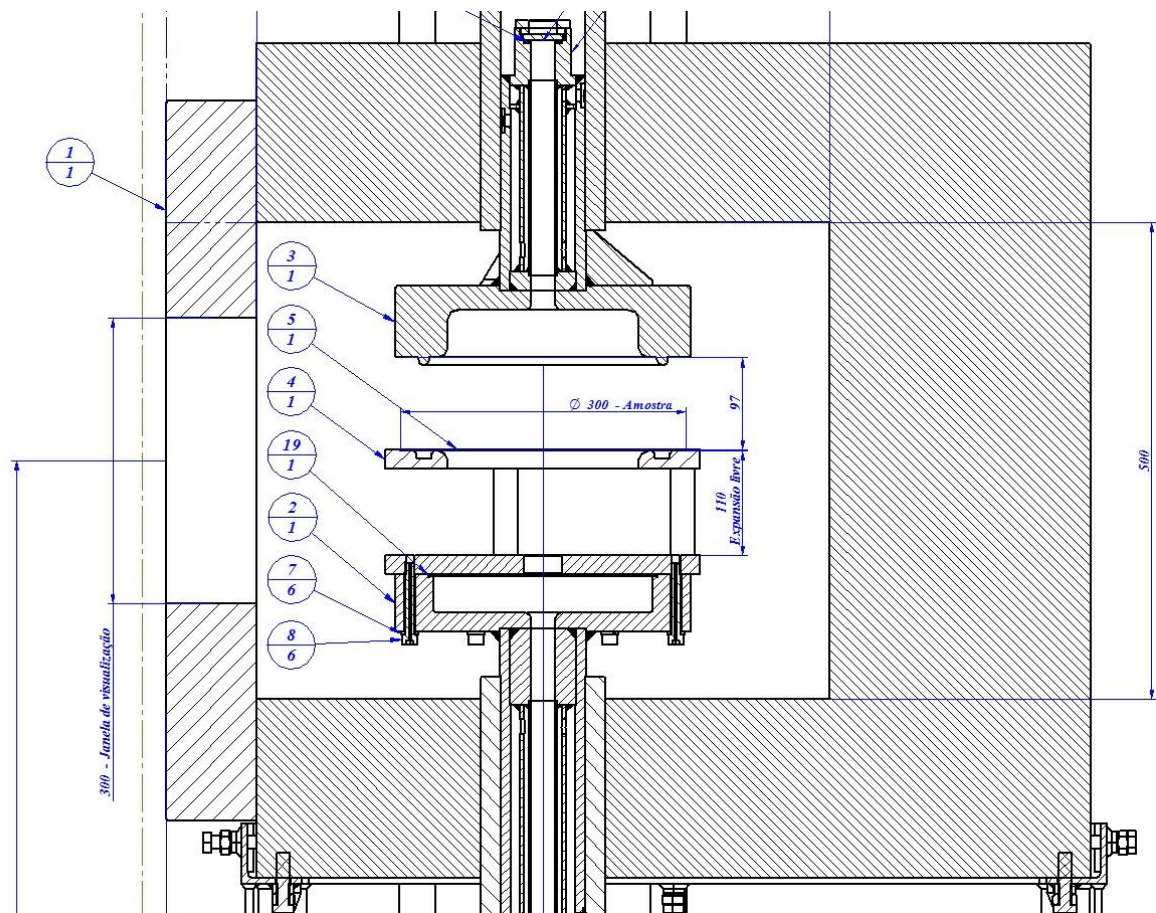


Figura 56 - Visão lateral da janela de vidro utilizada de acesso para o sistema de medição de deformação ARAMIS. (Lopes, 2010)

Do desenho acima há informações importantes a serem destacadas:

O volume interno da câmara do forno será de 600mm x 500mm;

O diâmetro da amostra está indicado por 300mm;

6 Sistema de medição de Pressão

6.1 *Medição de Pressão*

Uma das variáveis a ser controlada, a variação da pressão em função do tempo é uma característica importantíssima do processo superplástico, pois de modo simplista, pode-se dizer que está diretamente relacionada com a cavitação, problema da conformação superplástica quando não se aplica uma contra pressão correta durante a conformação.

Uma possibilidade de garantir uma constante taxa de deformação em função do tempo é o chamado “método direto”, quando se mede durante todo o tempo do processo o volume de gás que entra e que sai. O método indireto é outra possibilidade, através de cálculos analíticos ou através da simulação do processo por MEF, obtém-se o comportamento da pressão antecipadamente ao processo, e aplicam-se os dados obtidos através do controlador de pressão, realizando uma conformação controlada.

Esse *método indireto* é o modo utilizado nesse trabalho. As válvulas de pressão serão reguladas para atuar na pressão e contrapressão sempre objetivando manter a taxa de deformação constante, conclui-se então que o diferencial de pressão deve variar durante o processo.

Normalmente a pressão máxima alcançada no processo de conformação a sopro é de 0,69 a 6,4 MPa, porém tal valor depende muito do quanto se deseja conformar a peça e qual a taxa de deformação necessária.

É válido ressaltar que tanto a chapa quanto a matriz são mantidas aquecidas e sob temperatura constante (em torno de 550°C para alumínio do tipo AA5083) durante o processo de conformação a sopro/vácuo. Como também nas simulações de conformação superplástica, via elementos finitos, não é considerada a aplicação de uma contrapressão. Portanto se o material a ser conformado necessitar de contrapressão, para minimizar a cavitação, ver item 2.5.2, o valor da pressão obtida via simulação deve ser entendida como a diferença de pressão entre a superfície superior e inferior da chapa.

6.2 Opções de sensoramento de Pressão

6.2.1 Controle proporcional

Em 2006, Stefania FRANCHITTI, em seu doutorado (Franchitti, 2007) realizou a análise e modelagem da conformação superplástica, através do processo *conformação por sopro* de chapas de liga de PbSn. Não havia problema de oxidação ou degradação química, logo utilizou ar comprimido, não precisou utilizar gás inerte.

Ela utilizou um compressor marca Fini, com tanque de 50 litros, motor de 1 kW, que pode assegurar um fluxo constante de 106 litros de ar por minuto, com uma pressão máxima de 7,84 GPa (7,84 bar).

A válvula proporcional é uma FESTO modelo MPPE-3-1/8-10-010B, que ligada a uma fonte de tensão variável, permite o controle de pressão dentro do circuito.



Figura 57 - Válvula Proporcional (Franchitti, 2007)

Para a leitura da pressão, utilizou um transdutor Juno - Figura 58 - modelo 4 AP-39-020, adaptado para um sistema hidráulico e pneumático, o transdutor do tipo piezoelétrico se caracteriza por um desvio relativo de $\pm 0.5\%$ e de um campo de atuação de 0 - 1.96 MPa.



Figura 58 - Transdutor de pressão (Franchitti, 2007)

6.3 Sistema escolhido de monitoramento da Pressão

A Pressão está intimamente relacionada com a conformação do processo, como também é responsável pela não ocorrência da cavitação; vários trabalhos não se preocuparam com a cavitação e tinham como objetivo dados de deformação para comparação com dados de simulação por elementos finitos.

No ferramental proposto de expansão fluidoestática biaxial, no qual o autor desse relatório técnico realizará monitoramento e controle da pressão, o fenômeno da cavitação será analisado e o objetivo é evitá-lo com aplicação de contrapressão durante a conformação.

Em um primeiro momento, realizar-se-á a expansão livre da expansão fluidoestática biaxial para que se possa analisar a taxa de deformação da chapa através do sistema de controle de deformação.

Utilizando a configuração modular da ferramenta de conformação em desenvolvimento nesse projeto, em uma segunda etapa, será possível atuar com uma contra pressão e através dos resultados anteriores realizados com expansão livre, seria possível controlar o processo mesmo sem o controle da deformação, simplesmente atuando, com os dados levantados, diretamente na válvula de pressão.

A forma com que essa pressão é aplicada varia. A taxa de pressurização é adotada para manter a taxa de deformação induzida na chapa conformada dentro da condição superplástica. A determinação desta taxa de pressurização pode ser por

tentativa e erro ou métodos de modelagem analítica, sendo aplicada lentamente para prevenir taxas muito rápidas de deformação e evitar ruptura da chapa.

As bordas do blank do material são fixadas no dispositivo e não se deformam durante o processo de conformação.

Em torno destas bordas são utilizados sistemas de vedação para garantir a pressão dentro das câmaras e evitar a saída do gás.

As válvulas escolhidas foram dimensionadas por Lutero Harzer e a mim indicadas por comunicação pessoal, estão especificadas abaixo.

Tabela 8- Válvulas utilizadas no controle de pressão (Lopes, 2010)

NR.	CODIGO	QUANT.	DESCRIÇÃO	FABRICANTE
1	003-0001	1	Válvula proporcional - Festo – MPYE5-B	Festo
2	003-0002	1	Válvula proporcional - AirCom Pneumatik - Air Tronic PR000-5000	AirCom Pneumatik

Sobre o posicionamento, instalação e acesso a ferramenta de expansão fluídoestática biaxial do sistema de controle de pressão, tem-se a figura abaixo que mostra uma entrada de ar por dutos localizados na parte inferior à câmara do forno.

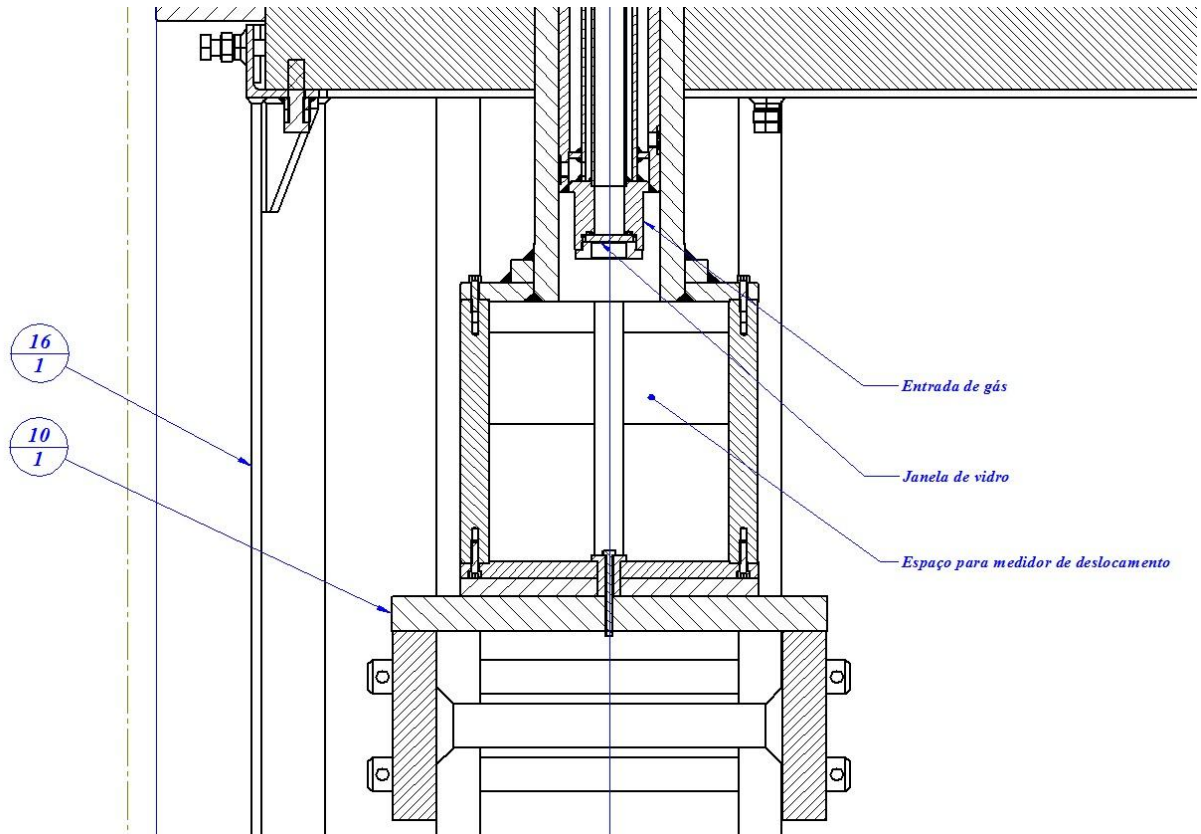


Figura 59 - Parte inferior da ferramenta de conformação superplástica com destaque no canal de entrada de ar (Lopes, 2010)

6.4 Diagrama de bloco do sistema de controle e monitoramento da pressão

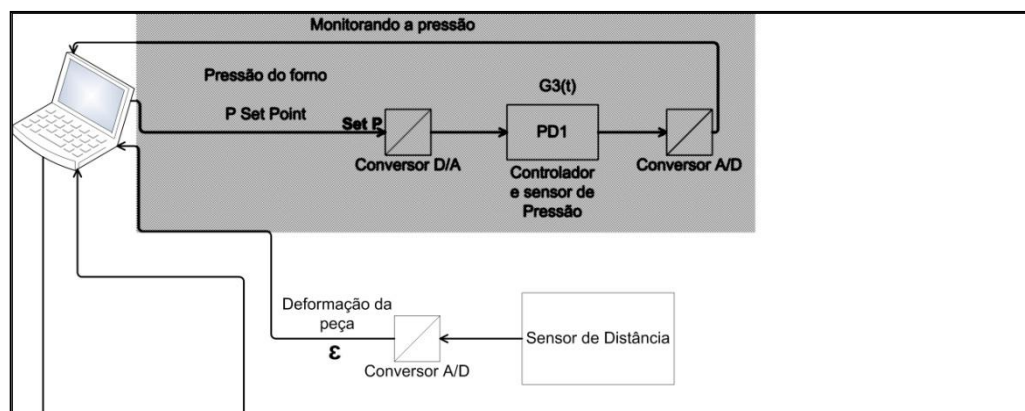


Figura 60 - Diagrama de bloco do sistema de controle de pressão (em destaque)

7 Sistema de medição de Temperatura

7.1 Medição de Temperatura

Várias técnicas de medição de temperatura já foram implementadas nos ferramentais de conformação superplástica, desde termopares até interferômetros a laser. Como discutido anteriormente, a temperatura está intimamente relacionada com a janela de superplasticidade, tendo relação direta com a tensão de escoamento do material, sendo necessário um controle dedicado.

A seguir exemplos de controle de temperatura de ferramentas de conformação superplástica.

7.2 Opções de sensor de temperatura

7.2.1 Aquecimento na base da ferramenta de “sheet-metal Forming”

Dröder (Dröder et al., 1999) , em 1999, buscando desenvolver técnicas para utilização de ligas de magnésio, baseando-se na limitação industrial da utilização dessas ligas através da fundição, buscou estudar o comportamento de tais ligas com o processo conhecido como “sheet-metal Forming”.

A ferramenta utilizada na pesquisa possuía um sistema de aquecimento, que de maneira resumida, aquecia a base de conformação por um sistema baseado nos fundamentos de Transferência de calor. Alguns detalhes de aquecimento serão abordados a seguir.

A Figura 61 abaixo mostra o porquê de se escolher a base como ponto de entrada de calor. O objetivo é manter a ferramenta na temperatura ótima que permita atingir a temperatura de conformação superplástica da liga de alumínio estudada.

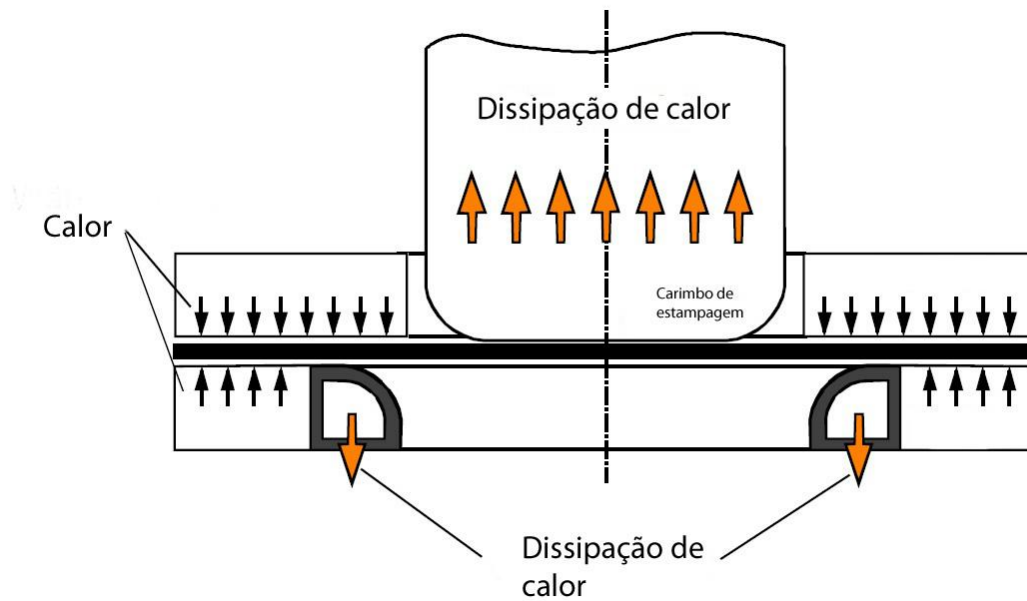


Figura 61 - Detalhes do fluxo de calor da ferramenta de estampagem (Dröderet al., 1999)

A importância da temperatura de conformação se evidencia durante esse trabalho, quando são propostas duas maneiras de aquecimento da placa, Figura 62, são explicadas vantagens e desvantagens de ambos os métodos, e conclui-se utilizar o aquecimento da placa dentro da ferramenta aquecida.

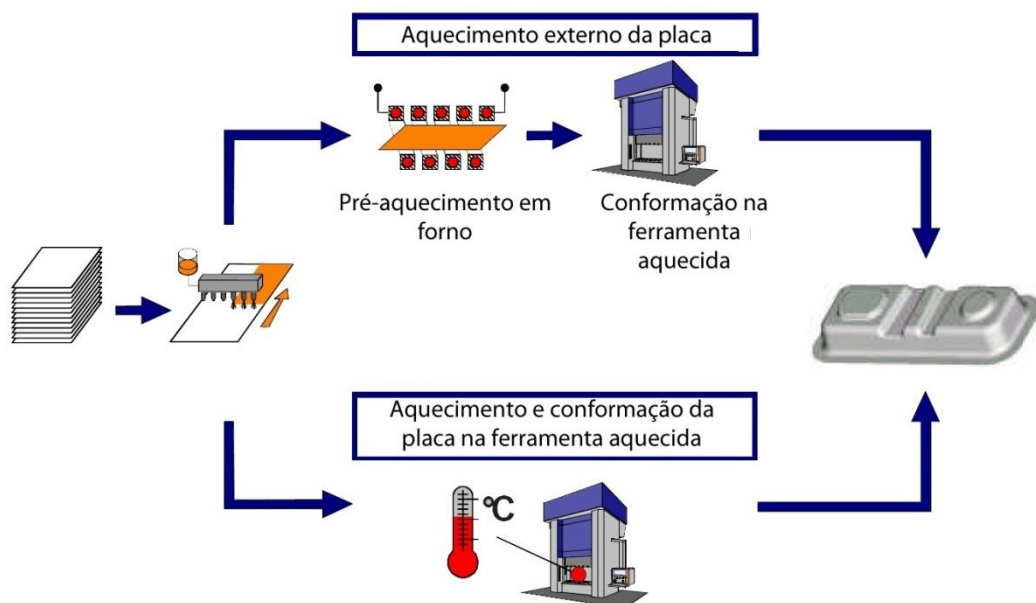


Figura 62 - Possibilidades de aquecimento da placa para processo "sheet-metal Forming" (Dröderet al., 1999)

A seguir mostram-se detalhes do funcionamento do aquecimento e do sistema de controle da temperatura.

Para o controle de temperatura de moldes e ferramentas, métodos diferentes são usados. Uma técnica muito comum é o uso de “Heizkühlgeräten” – Aparelho de aquecimento e resfriamento – que se caracteriza pela geração de calor fora da ferramenta aquecida. O transporte de calor para a ferramenta através de um sistema de canal que troca calor fundamentando-se nas leis de transferência de calor.

A estrutura básica de funcionamento do sistema de aquecimento durante a têmpera é mostrado na Figura 63 - Exemplo de sistema de aquecimento e controle com geração de energia externa a ferramenta, abaixo.

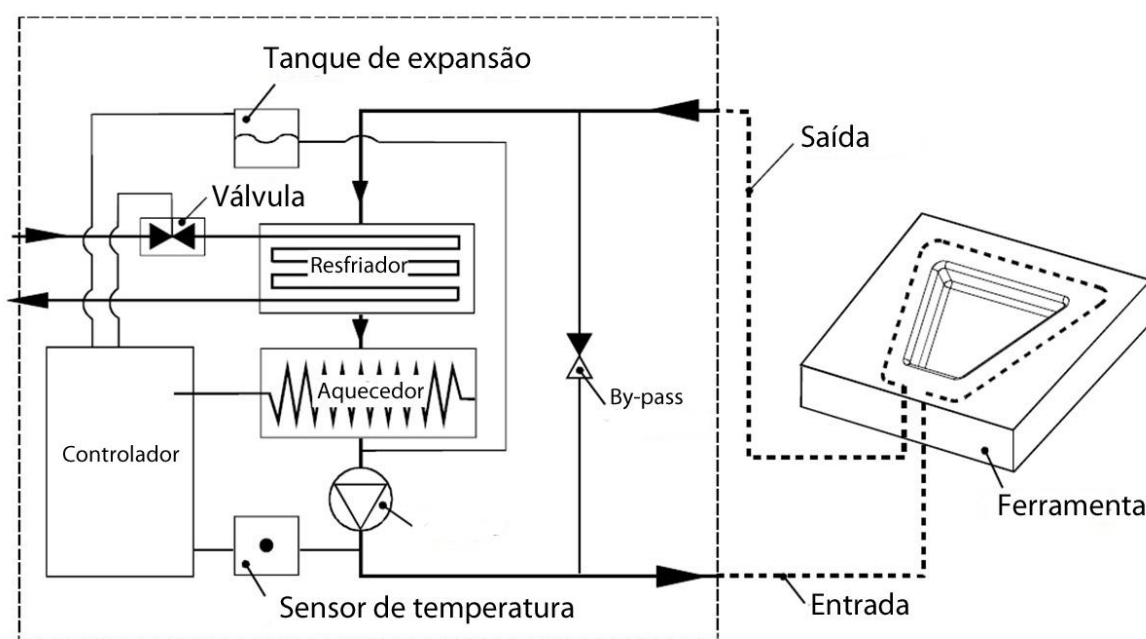


Figura 63 - Exemplo de sistema de aquecimento e controle com geração de energia externa a ferramenta (Dröderet al., 1999)

7.2.1.1 Termopares

É o sensor de temperatura mais comum e mais usado, dado sua facilidade de utilização, acurácia de medição, diversidade de modelos que permite aplicar esses sensores em ambientes diversos (altas temperaturas e pressões) e custo bom para o projeto.

O aparato do teste de expansão fluídoestática biaxial da Figura 64 mostra o posicionamento do termopar na parede da matriz cilíndrica. De forma resumida segue uma descrição do aparato; a folha de metal é presa entre a prensa chapa e a matriz cilíndrica, a ferramenta e a amostra da chapa são pré-aquecidas até a temperatura de conformação desejada antes que uma pressão gasosa constante seja aplicada da placa na base, atuando na deformação, na direção da ferramenta cilíndrica. A expansão livre da chapa segue sobre pressão constante até que seja interrompido o processo prematuramente ou ocorra o rompimento. Observa-se fundamentalmente do ponto de vista de controle, que é usado um estudo em malha aberta do sistema de pressurização.

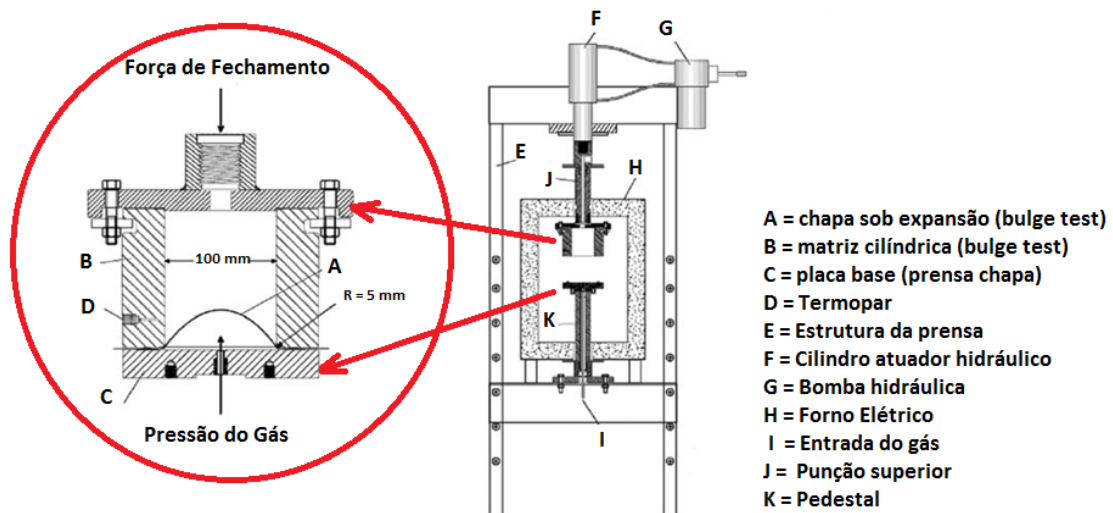


Figura 64 - (a) Detalhes do ferramental e amostra (b) Montagem do forno, prensa e ferramental de "expansão pneumática superplástica" (Vermaet al., 2009)

7.3 Sistema escolhido de monitoramento da temperatura

O Instrumento de medição do ambiente controlado será o termopar.

Após visita a empresa GRION fornos industriais, já se verificou dados relativos ao controle dessa temperatura, o sistema de controle será inteiramente especificado em relatórios posteriores. O termopar será instalado no ambiente do forno, junto à parede interna e sem contato com a ferramenta de conformação.

O instrumento de medição de temperatura da peça mostrou-se um problema após análise das características da ferramenta de expansão fluidoestática biaxial a ser monitorado.

Sem realizar contato, a opção com termopar não pode ser usada, assim perde-se uma opção de fácil implementação e bastante confiabilidade.

Varias soluções foram pensadas após esse problema, talvez uma braçadeira que pudesse acompanhar a expansão do ensaio de expansão fluidoestática biaxial durante a conformação. Mas foram rapidamente descartadas pela difícil aplicabilidade e principalmente dificuldade de garantir a repetibilidade da medição.

A solução escolhida foi um **pirômetro de radiação Infravermelho**. Os seguintes fatores foram analisados para o dimensionamento e escolha desse pirômetro:

- A saída do sinal do pirômetro precisa ser disponível para aquisição do sistema de aquisição do projeto de controle;
- O material do alvo de medição, esse pirômetro trabalha em uma banda espectral específica de materiais metálicos;
- O método de aquecimento por forno foi um dos critérios de escolha;
- A faixa de temperatura de medição desejada (de 20°C ambiente a 600°C, temperatura dentro da janela superplástica para o AA5083);
- Distancia desejada entre o Pirômetro e o Alvo: 50 mm - 900 mm;
- A presença de interferência na linha de visão do pirômetro, a janela de vidro de 26 mm de diâmetro por 8 mm de espessura;
- A presença de movimento do alvo, com uma velocidade estimada entre $10^{(-2)}$ m/s e $10^{(-6)}$ m/s;
- Análise do tempo de resposta desejado;

- Conhecimento da temperatura ambiente em volta do Pirômetro, especificação de que esse ambiente será controlado;

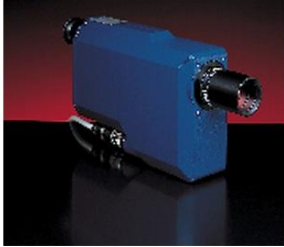
Pirometro de Radiação Infravermelho Série KT19 -50°C - 3000°C Instrumento para aplicações em indústria e pesquisa		• Sistema de medição independente • Display integrado LCD • Funções e parâmetros convenientemente programáveis por teclado no pirometro • Alinhamento do alvo feito com ótica ("thru-the-lens sighting") e ponteiro de laser integrados • Variedade completa de opções e acessórios
---	---	---

Figura 65 - Pirômetro de Radiação Infravermelho e algumas características

7.4 Detalhes do controle da temperatura

Nesses trabalhos sempre se comenta da dificuldade de controle da temperatura, um ponto que várias vezes foi citado é o de que a distância entre a matriz e o sistema de aquecimento é um problema cujo uma das causas é o tempo de encharcamento do aquecimento durante o processo de conformação. Para resolver esse problema várias soluções foram tentadas, como por exemplo, aguardar um intervalo de tempo suficientemente grande para que as temperaturas atinjam o equilíbrio esperado.

No sistema de controle de temperatura proposto, a temperatura será tratada como resultado de dois sinais, que deve permitir aquecer a peça até mesmo sem sobre-sinal, ou seja, sem aquecimento desnecessário da peça e conseqüentemente sem necessidade de espera do tempo de resfriamento e estabilidade da temperatura.

De maneira resumida, buscar-se-á o comportamento exemplificado para a temperatura e explicado na Figura 66.

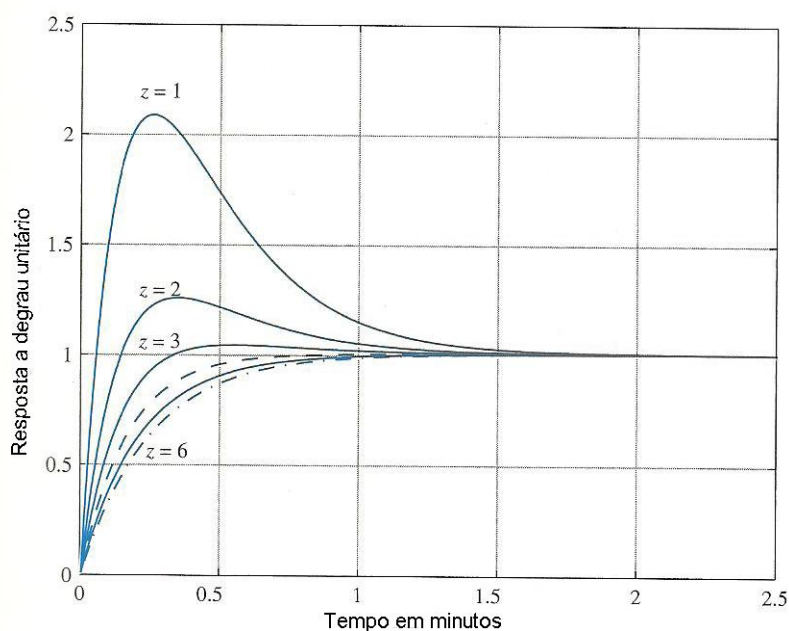


Figura 66 - Exemplo de comportamento buscado para a temperatura, gráfico referente a $Z=3$ (Franklin, 2009)

A princípio é importante destacar que serão aquisitadas duas medições de temperatura, a temperatura do forno – do ambiente de conformação – e da peça conformada (que realmente será o objetivo do controle).

Com essas duas medições é possível aplicar algumas teorias de controle que vão além de um simples PID, em razão de experiências adquiridas no estágio do autor desse relatório técnico é muito interessante ter mais de uma opção para o tratamento da temperatura. O gráfico da Figura 66 mostra o efeito de mudança da resposta de um sistema de segunda ordem quando se muda o zero da equação de transferência do sistema (malha e planta), de maneira sucinta, seria interessante conseguir o comportamento da temperatura exemplificado pelo gráfico de $Z=3$.

Sem se estender agora nos motivos do ponto de vista do controle, destaca-se a importância de uma segunda medição do ferramental para que a otimização do sistema de aquecimento seja possível, visando alcançar a janela de superplasticidade de uma maneira melhor do que esperar pelo tempo de encharcamento.

De posse da temperatura da peça e da temperatura do ambiente controlado, será possível avaliar situações limites de superplasticidade com muito mais profundidade. Além de possibilitar um estudo de tempo de aquecimento.

Serão utilizados dois controladores térmicos, que serão capazes de realizar o esquema de controle abaixo resumido na Figura 67 - Destaque no sistema de controle de temperatura, diagrama de blocos da malha de controle da temperatura.

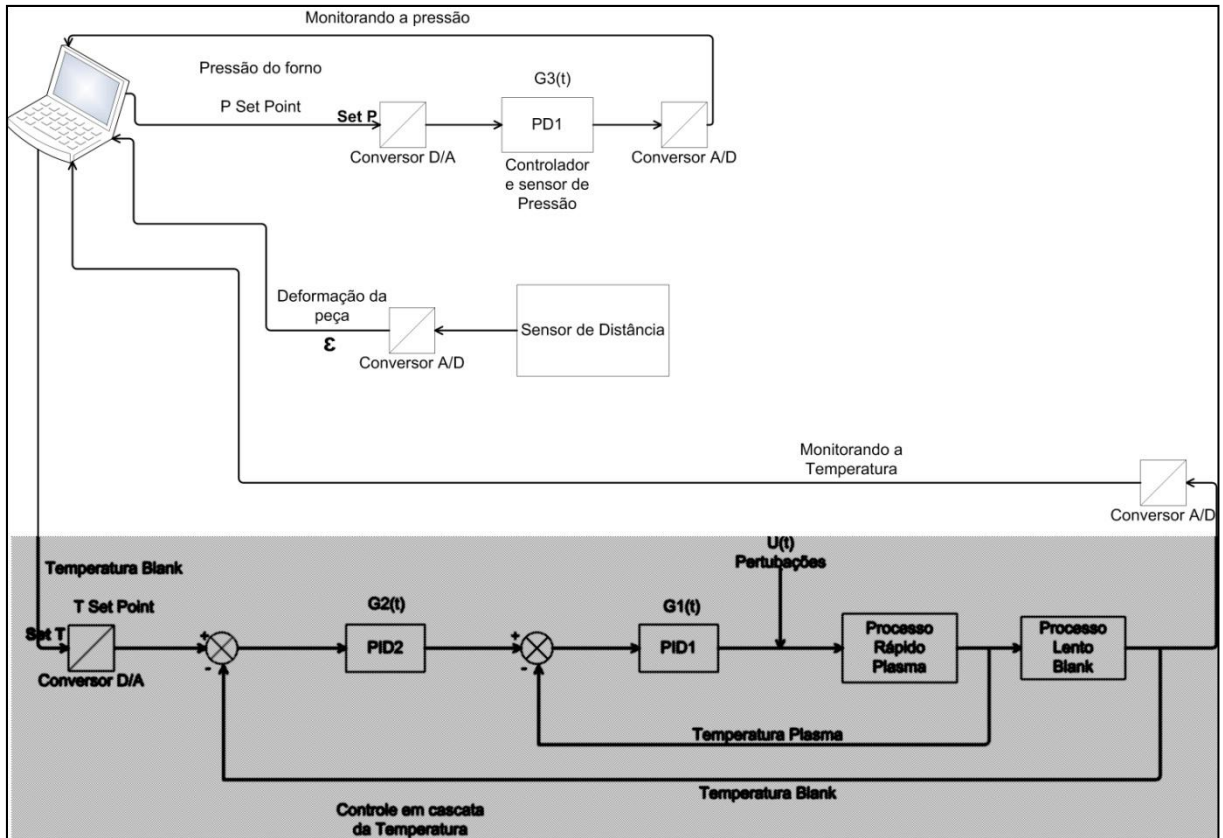


Figura 67 - Destaque no sistema de controle de temperatura, diagrama de blocos da malha de controle da temperatura

Abaixo há fotos (Figura 68, Figura 69 e Figura 70) dos controladores da empresa GRION fornos industriais e do forno que será utilizado para aquecer a ferramenta.



Figura 68 - Forno utilizado para aquecer a ferramenta de conformação superplástica



Figura 69 - Detalhes de conexões dos controladores



Figura 70 - Foto frontal dos controladores instalados na caixa de controle do forno

Do ponto de vista do posicionamento dos sensores de temperatura, a Figura 71 mostra a localização da câmera térmica anteriormente especificada.

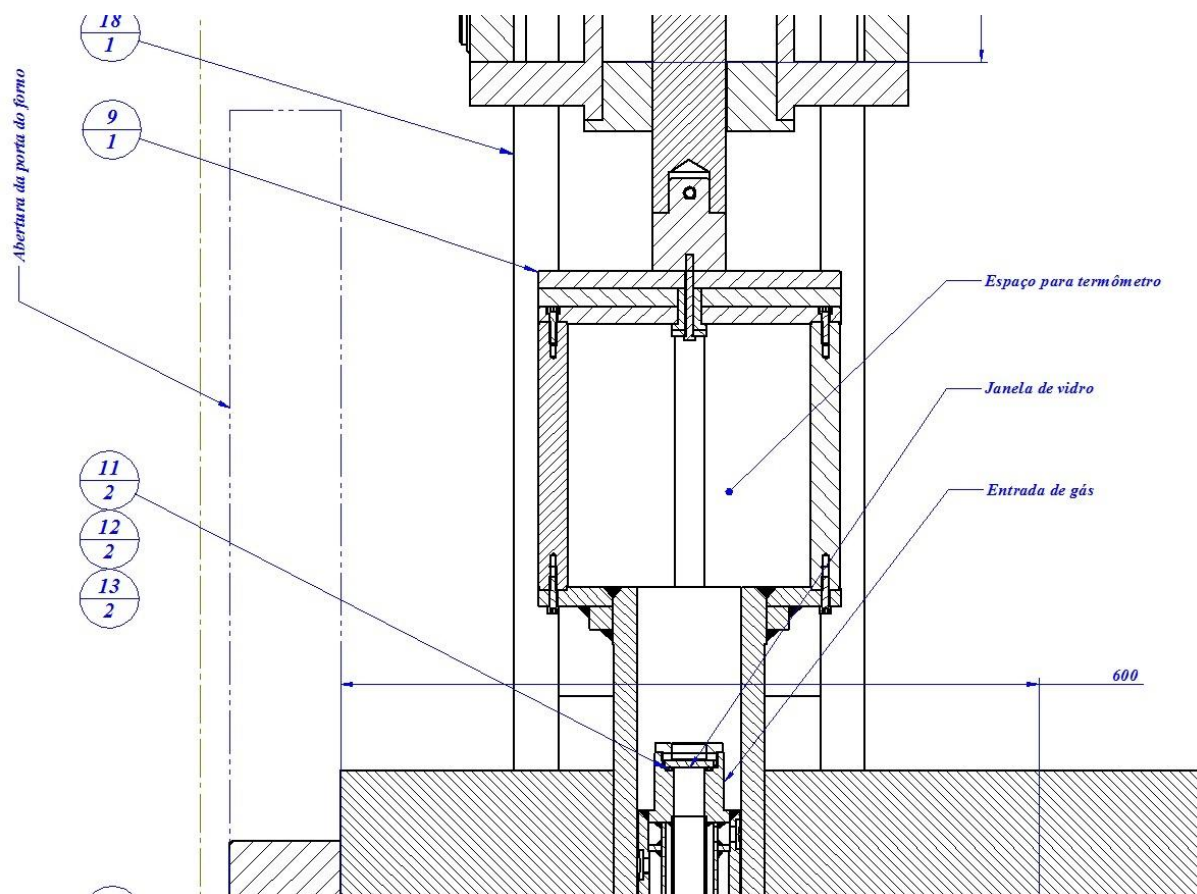


Figura 71 - Acesso superior da ferramenta superplástica, com destaque para a localização da câmera térmica

É interessante observar, na Figura 71, que já existe no projeto da ferramenta um acesso superior para entrada de gás, que justifica em uma segunda etapa do projeto analisar a cavitação como limitante e especificidade da conformação superplástica. Mais uma vez deixando evidente o caráter modular do pré-projeto da ferramenta.

Será importante a calibração do pirômetro infravermelho; no posicionamento indicado, chegarão ondas infravermelhas de várias partes da ferramenta, calibrá-lo na banda espectral do material emissor das ondas que se deseja medir será necessário.

7.5 *Resumo dos sistemas de controle integrados*

Uma vez que o processo de conformação adotado no presente projeto será um dispositivo nos moldes de termoconformação/conformação por sopro (Blow Forming) visando aperfeiçoar os métodos de controle e monitoramento do processo, deve-se considerar durante a conformação o controle de itens como:

- Temperatura ótima de conformação e de estabilidade da superplasticidade;
- Relacionada com a temperatura, está o melhor valor para a taxa de deformação;
- Espessura da chapa e sua conformação pela pressão do gás dentro da matriz;
- Curva de pressão x tempo;
- Falha induzida por início, crescimento e coalescimento de cavitação.

As informações exigidas para se projetar um processo de conformação Superplástico bem sucedido envolvem não só os itens acima citados, como também algumas características do material, como crescimento e distribuição de cavidades durante a conformação, e pré deformação de peças conformadas com melhor distribuição de espessura de parede.

O controle proposto nesse trabalho pretende em conjunto com os dados de simulação utilizando elementos finitos (Solosando, 2010), o desenvolvimento de uma planta do processo de conformação e analisar o comportamento dessa planta quanto à implementação do controle sobre o processo superplástico.

Os objetivos básicos da simulação do processo de conformação devem permitir o controle trabalhar com um ótimo ciclo de pressão/tempo de conformação que produza uma taxa de deformação em função da temperatura ou tensão de escoamento em conjunto com a previsão de distribuição de espessura final.

Os conhecimentos fundamentais necessários das equações que relacionam as grandezas acima e respectivos parâmetros associados ao processo de escoamento são também tão ou mais importantes do que controlá-los.

termopar do forno, e outro processo lento, que consiste no aquecimento da peça conformada e na medição da temperatura real da peça através de uma câmera térmica de infravermelho.

8 Sistema de fechamento/Sistema de vedação e estanqueidade;

Abaixo se verifica construtivamente o fechamento da matriz de conformação.

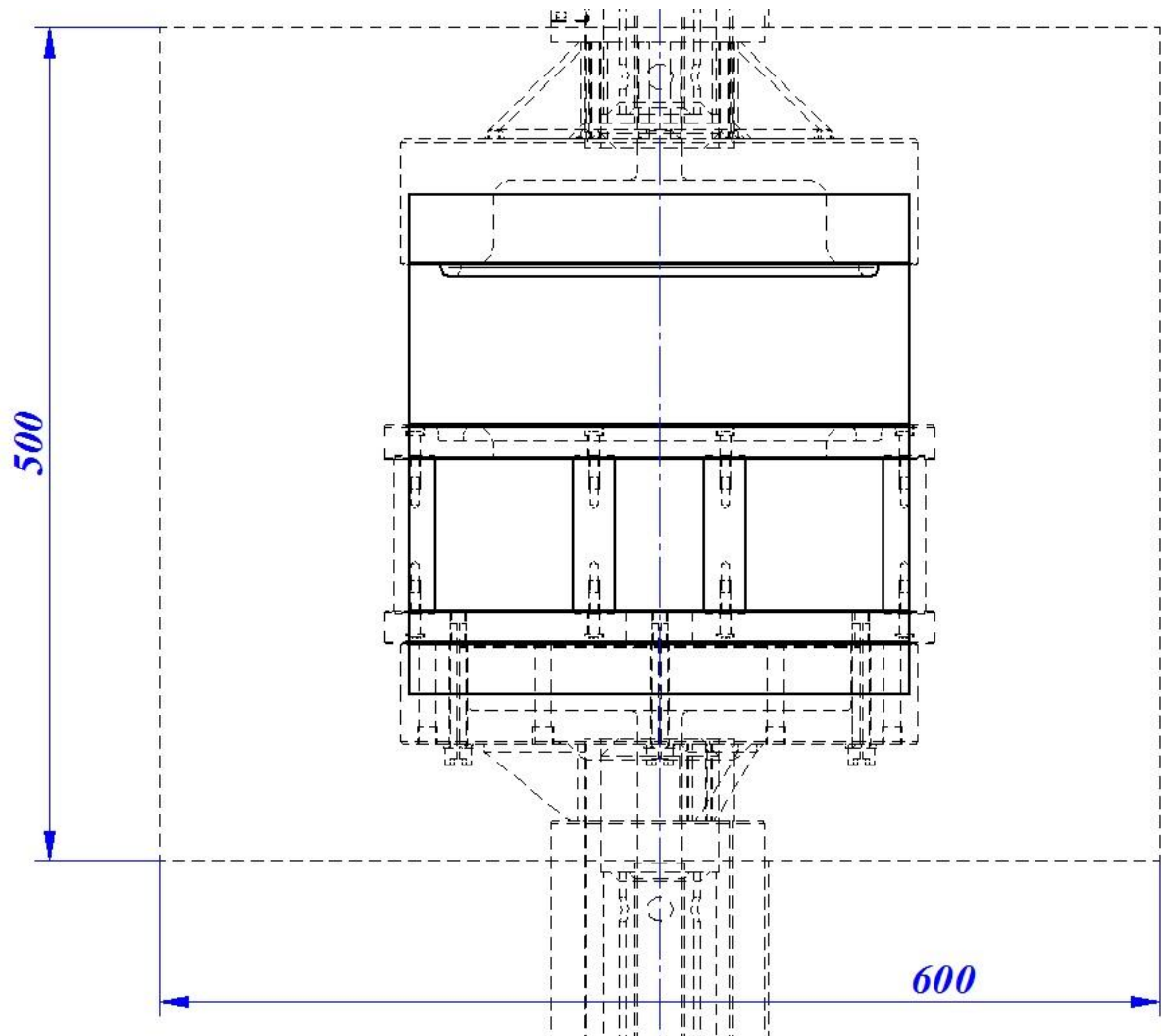


Figura 73 - Detalhes de construção do fechamento da ferramenta, desenho de conjunto do sistema de fechamento

Prensa hidráulica de 30 Toneladas, é a ferramenta responsável pela força de fechamento da câmara de pressão. Abaixo há uma tabela com parâmetros do projeto que foram usados para dimensionamento dessa prensa.

Tabela 9 - Tabela com parâmetros do projeto usados para dimensionamento dessa prensa
(Lopes, 2010)

Descrição	SI
Pressão máxima de trabalho	4 MPa
Contra pressão	0
Diferença de Pressão	4 MPa
Diâmetro da matriz	0,2 m
Força na matriz - máxima pressão	123 KN
Força na matriz - diferença de pressão	123 KN
Coeficiente de fixação	
Força na matriz - FIXAÇÃO	250 KN

Abaixo se observa o desenho explodido do sistema de fechamento.

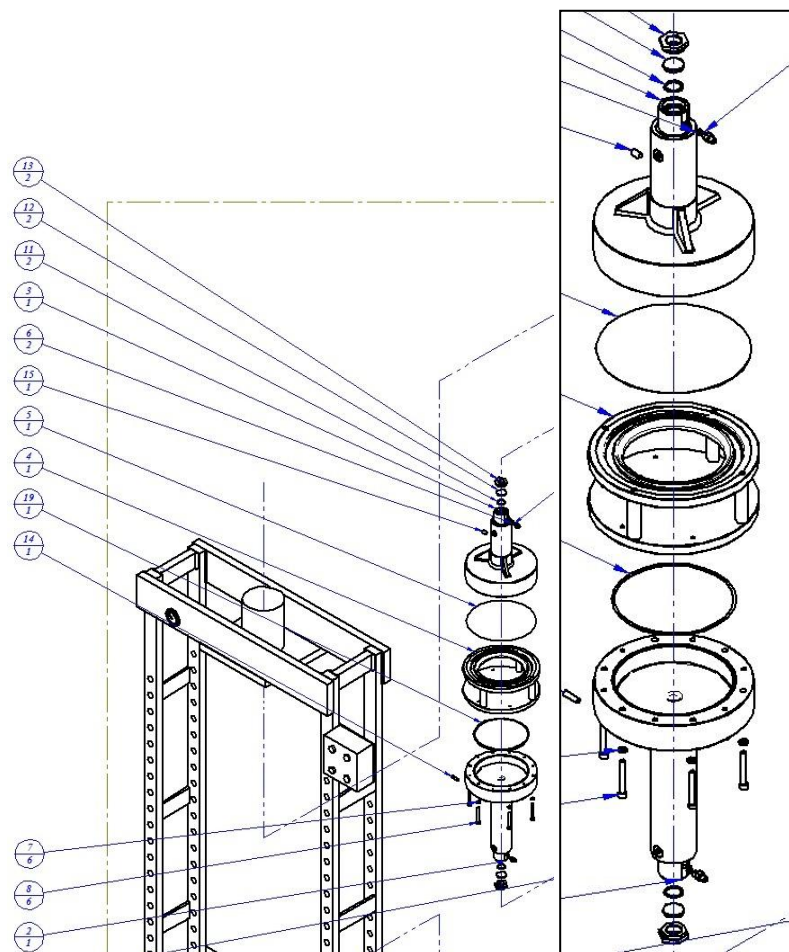


Figura 74 - Desenho explodido do sistema de fechamento

O sistema de fechamento deve ser explicado em detalhes, em razão das especificidades do projeto; o item 13 e 12, respectivamente o visor e o anel de vidro temperado, são indispensáveis para a leitura da temperatura da peça durante a conformação pelo pirômetro infravermelho.

Os itens 7 e 8 que são arruela de pressão e parafuso, respectivamente, em conjunto com a prensa hidráulica, caracterizam o sistema de fechamento, juntamente com o anel de vedação selando a base da matriz, respectivamente item 19 e 2.

9 Sistema óptico de medição de deslocamento (ARAMIS)

Já se apresentou de maneira superficial as possibilidades desse sistema de medição. Destaca-se a possibilidade de programar em **Python**, no próprio macro do programa, e utilizar até duas medidas realizadas pela aquisição de imagens da câmera. E juntamente com os outros sinais dos outros sensores desenvolver um sistema de controle otimizado para o processo de conformação em estudo.

A imagem abaixo mostra a interface amigável do software de utilização da ARAMIS. E observa-se também a opção de MACRO no menu de opções.



Figura 75 - Interface do software da ARAMIS, com destaque para a opção de MACRO no menu.

10 Conclusões

Sobre o controle, utilizado como instrumento para possibilitar o ajuste dos parâmetros necessários para o processo de conformação superplástico, varias técnicas já foram utilizadas. Por exemplo, o controle de medição de espessura é uma das dificuldades do processo, como as bordas do *blank* são presas ao ferramental durante o processo, o aumento de área significará em redução de espessura, já que seu volume é constante. Algumas técnicas, como reversão da pressurização (Ghosh et al., 2006), foram desenvolvidas para essa finalidade. Métodos de modelagem por elementos finitos – MEF – são atualmente empregados no projeto para a previsão e controle da geometria (parâmetros pré-estabelecidos de tempo e dimensão geométrica) da peça conformada, principalmente em relação à distribuição de espessura.

Sobre o controle proposto, a primeira etapa será aplicar uma tentativa de controle independente entre as variáveis. Pelas necessidades de projeto e pelas possibilidades de dimensionamento pré-projetadas, seria possível otimizar o processo com uma análise com características multivariáveis. De posse de resultados de elementos finitos simulando a conformação desejada, será possível atuar diretamente com os valores resultados da simulação, no entanto, através da lei de pressão proposta e das equações constitutivas, obter resultados comparativos úteis para melhorar os parâmetros de ensaios de conformação superplástico por expansão fluídoestática biaxial.

Sobre o modelo de caracterização reológica, a arquitetura de instrumentação proposta propiciou o desenvolvimento de um novo modelo de caracterização reológica do processo. Atuando diretamente através de uma lei de pressão, e utilizando os sinais de espessura do topo do domo da peça conformada, como também da tensão do campo de tensão biaxial, é possível realizar o estudo reológico do material com uma única etapa de conformação.

Sobre os sensores, será possível aplicar ciclos de pressão desejados com as válvulas dimensionadas; o sistema de controle de temperatura foi desenhado para aperfeiçoar o aquecimento e a estabilidade do processo e por fim o sistema de medição de deformação é um dos mais modernos sistemas de análise em tempo real com levantamento de superfícies 3D.

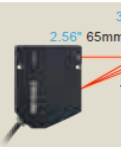
Por fim, *sobre a ferramenta*, tem sido possível desenvolver uma ferramenta que se adéqua as necessidades primeiras do projeto, e ao mesmo tempo seja flexível a alterações futuras – caráter modular – para implementação de condições de contorno imprevistas de projeto.

11 Cronograma do trabalho

Atividades/Meses	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Etapa 1 – Revisão bibliográfica	☒	☒	☒	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Etapa 2 – Dimensionamento do sensor de temperatura	☐	☒	☒	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Etapa 3 – Dimensionamento do sensor de deslocamento	☐	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☐	☐	☐
Etapa 4 – Aprofundamento teórico do processo	☐	☐	☐	☒	☒	☒	☒	☐	☐	☐
Etapa 5 – Definição do setup do sistema de controle	☐	☐	☐	☒	☒	☒	☐	☐	☐	☐
Etapa 6 – Aprofundamento teórico e Proposta de controle	☐	☐	☐	☒	☒	☒	☒	☐	☐	☐
Etapa 7 – Implementação do sistema de controle	☐	☐	☐	☐	☐	☒	☒	☒	☒	☒
Etapa 8 – Ajuste das condições de funcionamento do ferramental	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☒	☒	☐	☐
Etapa 9 – Planejamento experimental e preparação dos corpos de prova	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☒	☒	☐	☐
Etapa 10 – Realização dos experimentos de teste	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☒	☒	☒
Relatório Parcial (1° semestre)	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Relatório Final (1° semestre)	☐	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Relatório Parcial (2° semestre)	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☒	☐	☐	☐
Relatório Final (2° semestre)	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☒

12 Anexos

12.1 Especificações técnicas do Sensor de distância, Empresa Schalt

TYPE		MODEL	MEASURING RANGE	REPEATABILITY	SPOT DIAMETER
Super Precision	Small spot	LK-G10	 0.39° 10mm Measuring range 0.39°±0.04° 10±1mm	0.0004Mil 0.01 μm	0.79Mil 20μm
	Wide beam	LK-G15			0.79x19.7Mil 20x500 μm
High Accuracy	Small spot	LK-G32	 0.96° 25mm 1.18° 30mm 1.38° 35mm Measuring range 1.18°±0.2° 30±5mm	0.002Mil 0.05 μm	1.18Mil 30μm
	Wide beam	LK-G37			1.18x33.15Mil 30x850μm
Multi-Purpose	Small spot	LK-G82	 2.56° 65mm 3.15° 80mm 3.74° 95mm Measuring range 3.15°±0.59° 80±15mm	0.008Mil 0.2 μm	2.76Mil 70μm
	Wide beam	LK-G87			2.76x43.3Mil 70x1100μm
Long Distance	Small spot	LK-G152	 4.33° 110mm 5.91° 150mm 7.48° 190mm Measuring range 5.91°±1.57° 150±40mm	0.02Mil 0.5 μm	4.72Mil 120μm
	Wide beam	LK-G157			4.72x66.9Mil 120x1700μm
High-speed Long Distance	Small spot	LK-G402	 11.61° 300mm 15.75° 400mm 19.69° 500mm Measuring range 15.75°±3.94° 400±100mm	0.08Mil 2 μm	11.31Mil 290μm
	Wide beam	LK-G407			11.31x323.7Mil 290x8300μm
Ultra Long Distance	Small spot	LK-G502	 9.84° 250mm 19.69° 500mm 39.37° 1000mm Measuring range 19.69°-9.84°/+19.69° 500-250/+500mm	0.08Mil 2 μm	11.70Mil 300μm
	Wide beam	LK-G507			11.70x370.5Mil 300x9500μm

12.2 Tabelas com os critérios de escolha do pirômetro

Grupos para Aplicações em Linha

Grupo 0 - Temperaturas Elevadas e Metais

Grupo	0
Temperatura	140-3000°C
Materias	Metais, Silício
Aplicações	Fornos de clinker (cimento), filamentos, fornalhas, tratamento térmico, aquecimento indutivo, controle de qualidade, câmaras a vácuo

Produtos Recomendados	Banda Espectral	Descrição
KT19.01	2-2.7µm	KT19: Instrumento para indústria e pesquisa
KT19.02	2-4.5µm	

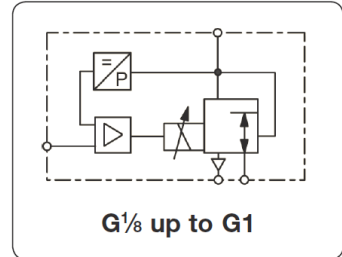
12.3 Data Sheet das válvulas de pressão dimensionadas para o projeto

12.3.1 AirTronic

Proportional Pressure Regulator "AirTronic"®

PR

Description	The pneumatic proportional valve controls the outlet pressure in proportion to an electrical command input signal. It comprises a complete closed loop servo system in a compact monoblock assembly with proportional solenoid valve, electronic regulator and internal pressure transducer. In the process, the outlet pressure is transformed into a proportional electrical signal and compared with the input signal. If the outlet pressure exceeds the preset setpoint, the valve exhausts down to the pressure desired. The valve has no constant bleed. At absence of input signal or supply voltage the valve exhausts. The power supply of the setpoint potentiometer is provided by the proportional valve via connector pin number 5.
Pressure transducer	Open transducers: 100 mbar, 500 mbar Capsuled transducers: 1 bar, 5 bar, 10 bar, 16 bar, 20 bar, 30 bar and 50 bar
Application examples	Proportional pressure regulators are being used for blowing machines, ultrasonic equipments, testing machines, painting systems, contouring systems, laser welding machines, textile machines, cheese presses, pneumatic brakes, clamping devices and medical engineering.



General technical features

Description	3-port/2-way valve with proportional magnet, integrated hybrid PCB and closed loop with pressure transducer in compact monoblock assembly.
Mounting position	upright $\pm 15^\circ$
Protection class	IP 54 with standard connector, IP 65 with special connector
Temperature range	0 °C up to 50 °C / 32 °F to 122 °F, high temperature version on request
Material	Body: brass (G$\frac{1}{8}$ and G$\frac{1}{4}$) or aluminium (G$\frac{1}{2}$ and G1) Inner valve: brass and SST Seals: NBR/Buna-N, on request EPDM or FKM, FKM at 50 bar version

Pneumatic features

Media	dry, lubricated, unlubricated and 50 μ m filtered compressed air or non-corrosive gases
Supply pressure	see chart, min. 10% above outlet pressure
Flow rate	see chart, at 7 bar inlet pressure and open outlet
Exhaust	same nominal size as on inlet valve, thus same relief capacity
Air consumption	without constant bleed

Electrical features

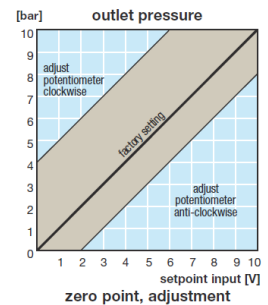
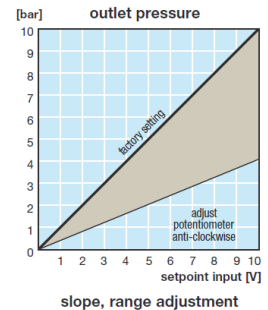
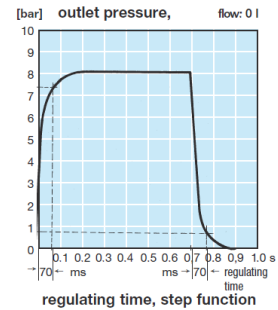
Supply voltage	24 V DC $\pm 15\%$ - 10%, residual ripple max. 10%
Command signal	power consumption 12 W at G $\frac{1}{8}$, 22 W at G $\frac{1}{4}$, 30 W at G $\frac{1}{2}$, 40 W at G1
Impedance	0 ... 10 V, 0 ... 20 mA, 4 ... 20 mA, digital 8 bit or Profibus DB, Interbus S etc. forward signal, reversible as option
Electrical connector	100 k Ω at voltage signal (0.1 mA current consumption) 500 Ω current signal
	circular plug according to DIN 43651, 7-pin plug for analogue signal 16-pin plug for digital signal

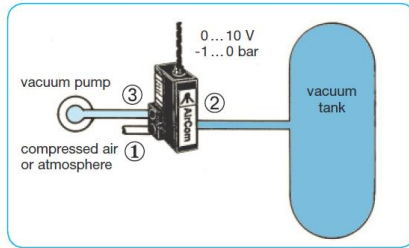
Accuracy

Linearity/Hysteresis	< 1% FS
Response sensitivity	< 0.1% FS
Repeatability	< 0.1% FS
Regulating time	< 1 s over the range, 70 ms at 10 to 90% or 90 to 10% of the range

Adjustment

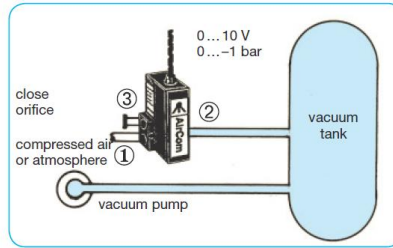
Zero point	calibration $\pm 10\%$ FS via potentiometer P2
Range	calibration + 5% FS or -10% FS via potentiometer P1
Amplification	calibration 1:1 up to 1:10 via potentiometer P7





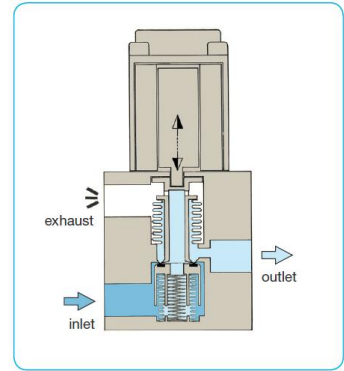
Downstream regulation (V1)

The vacuum pump saves energy and it is easy to fill the tank either with vacuum or pressure. A filter is recommended at orifice ③.



Upstream regulation (V2)

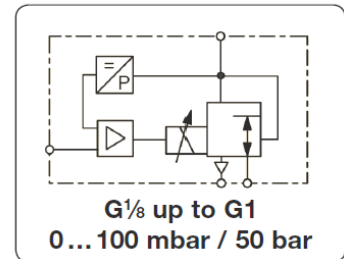
Upstream installation is preferred if rapid evacuation of a tank or system is required. A filter is recommended at orifice ③.



cross section

Proportional Pressure Regulator with Electric Regulation "AirTronic"® PR

Technical features	
• Pressure range	0...0.1 bar to 0...50 bar
• Command signal	0...10 V, 0...20 mA, 4...20 mA, digital
• Feedback signal	0...10 V, 0...20 mA, 4...20 mA
• Adjustment	zero point, range and amplification
• Pressure sensors	100 / 500 mbar, 1 / 5 / 10 / 16 / 20 / 30 / 50 bar
• Flow rate	250 / 820 / 1700 / 6500 l/min
• Linearity / Hysteresis	< 1 %
• Response sensitivity	< 0.1 % FS
• Repeatability	< 0.1 % FS
• Regulating time	< 1 s
• Power consumption	12 / 22 / 30 / 40 W
• Exhaust	full nominal size



Dimensions			Nominal size	K _v value (m ³ /h)	Flow rate l/min ^{*1}	Supply max. bar	Connection thread G	Pressure range bar	Order number
A	B	C							
mm	mm	mm	DN						

Proportional pressure valve						0 ... 10 V input signal, supply voltage 24 V DC, with coupling socket		PR	
35	80	63	3	0.2	250	2	G½	0 ... 0.1	PRA00-A100
						2		0 ... 0.5	PRA00-A500
						2		0 ... 1.0	PRA00-0100
						12		0 ... 6.0	PRA00-0600
						12		0 ... 10	PRA00-1000
						22		0 ... 20	PRA00-2000
52	114	74	6	0.6	820	2	G¼	0 ... 0.1	PR000-A100



PRA

						2		0 ... 0.5	PR000-A500
						2		0 ... 1.0	PR000-0100
						12		0 ... 6.0	PR000-0600
						12		0 ... 10	PR000-1000
						18		0 ... 16	PR000-1600
						22		0 ... 20	PR000-2000
						40		0 ... 30	PR000-3000
						60		0 ... 50	PR000-5000
70	150	101	12	1.2	1700	2	G½	0 ... 1.0	PR100-0100
						12		0 ... 6.0	PR100-0600
						12		0 ... 10	PR100-1000
						14		0 ... 12	PR100-1200
96	190	115	20	4.8	6500	2	G1	0 ... 1.0	PR200-0100
						12		0 ... 6.0	PR200-0600
						12		0 ... 10	PR200-1000
						14		0 ... 12	PR200-1200

Special options, add the appropriate letter

input signal	0 ... 20 mA							PR...1-....
	4 ... 20 mA	2		8 bit digital	with hold function			PR...3-....
	Interbus S	7		Profibus DP	from G¼ on			PR...8-....
feedback signal	0 ... 10 V							PR...1-....
	0 ... 20 mA	2				4 ... 20 mA		PR...3-....
ext. feedback signal	0 ... 10 V	4		0-20 mA	5	4 ... 20 mA		PR...6-....
deviant pressure range	indicate on order							PR...XX..
for vacuum	downstream regulation	V1		upstream regulation				PR...V2
for absolute pressure								PR...0A
protection class IP 65	special cable box, PRK-IP 65							PR...06
body made of stainless steel	valve body and inner parts, FDA-approved			G¼ only				PR...SS
body made of aluminium	only valve body, max. 20 bar			G¼ only				PR...19
for oxygen	specially cleaned, FKM elastomer							PR...15
ramp	delay 0.2...10 s, on request 20 s							PR...20
for hydrogen / helium	max. 10 bar, no Atex					from G¼ on		PR...0W

Accessories, enclosed

coupling socket	M12x1, 7-pin with 2 m cable		straight	PRK-A2L
	IP 65, for option 06		straight	PRK-I2L
			angular	PRK-C2L
other cable lengths	5 m or 10 m available			

*1 at 7 bar supply pressure and open outlet



PR1



example: combination PR with booster



PRK-A

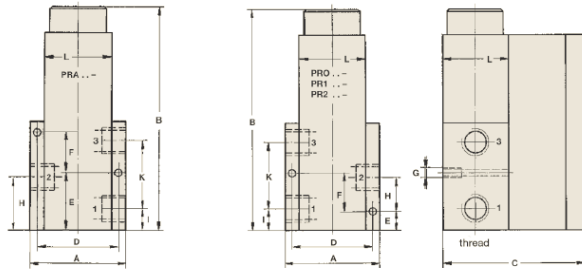
PRK-C

PDF CAD
www.aircom.net



Order example:
PRA00-A100

Dimensions and Connection Diagram "AirTronic"®

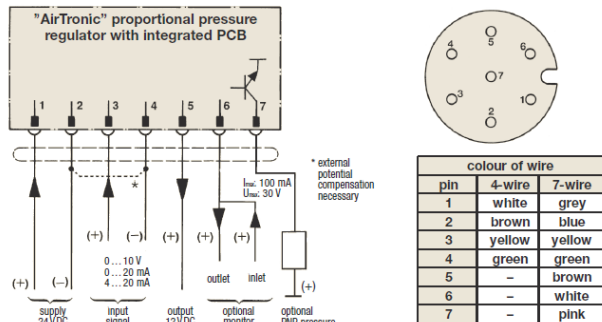


"AirTronic"® proportional pressure regulator with integrated PCB

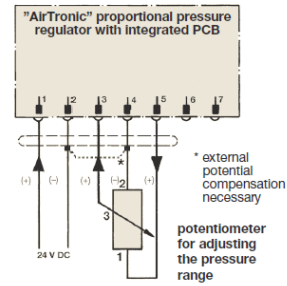
regulator	thread	A	B	C	D	E
PRA ...	G ½	35	80	63	29	18
PR0 ...	G ¾	52	114	74	43	10
PR1 ...	G 1	70	150	101	57.5	12
PR2 ...	G 1 ½	96	190	115	79	15

regulator	F	G	H	I	K	L
PRA ...	7	M 4	15	10	16.6	25
PR0 ...	20	M 5	17	11*	34	35
PR1 ...	28	M 6	23	15	48.5	45
PR2 ...	33	M 8	30	20	60	60

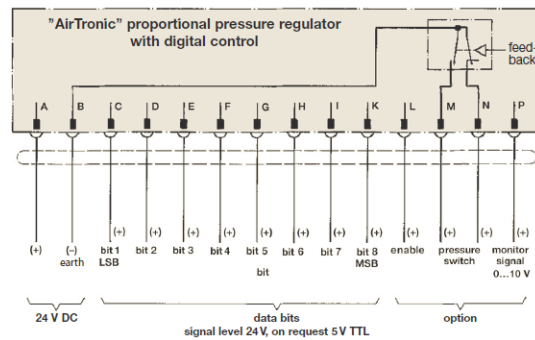
* 14 mm from 30 bar pressure range on



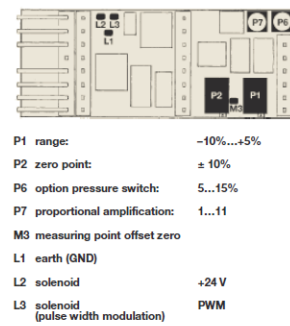
"AirTronic"® connection diagram



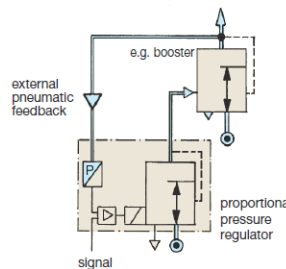
Connection diagram with potentiometer



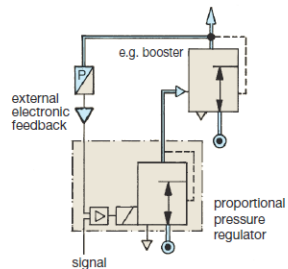
Connection diagram for digitally controlled proportional pressure regulator



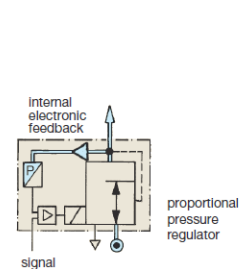
Adjustment of the proportional regulator



External pneumatic feedback through adapter manifold



External electronic feedback 0...10 V or 0/4...20 mA



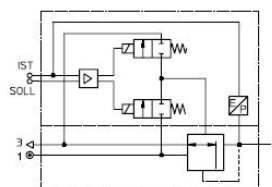
Internal electronic feedback as standard

12.3.2 Festo

Tipo MPPE-3-...-B



Controlada por chaveamento



Resposta rápida - controle preciso

Ajuste do nível de pressão.

- Proporcional ao valor de referência (set-point).
- Independente da vazão.

Sinal de entrada na forma de:

- tensão de 0 a 10 V.
- corrente de 4 a 20 mA.

Comando eletrônico por processador integrado com sensor de pressão interno.

- Sistema modular com faixa de pressão opcional.
- 0...1 bar, 0...2,5 bar.
- 0...6 bar, 0...10 bar.
- Adaptação especial para outras faixas de pressão.

Conexões:

- G1/8, G1/4 e G1/2.

Disponibilização de um sinal elétrico analógico proporcional ao real valor de pressão na saída da válvula para ser utilizado, por exemplo, por um CLP, dispositivo de monitoração etc.

Deteção do valor real de pressão possível também através de sensor externo.

Especificações técnicas de eletricidade

Tensão de Alimentação	$V_b = 24 \text{ V DC} \pm 25\%$
Ondulação residual (ripple)	10% da tensão contínua conforme DIN 41 775 in VB
Potência consumida	$P_{\max} = 3,6 \text{ W}$ com 30 V DC e tempo de ativação de 100%
Valor do sinal de entrada	
– tensão	$V_{\text{set}} = 0 \dots 10 \text{ V DC}$
– corrente	$I_{\text{set}} = 4 \dots 20 \text{ mA}$
Sinal de saída proporcional ao real nível de pressão	
– tensão	$V_{\text{act}} = 0 \dots 10 \text{ V DC}$
– corrente	$I_{\text{act}} = 4 \dots 20 \text{ mA}$
Valor do sinal de entrada de um sensor de pressão externo	
– tensão	$V_{\text{ext}} = 0 \dots 10 \text{ V DC}$
– corrente	$I_{\text{ext}} = 4 \dots 20 \text{ mA}$
Alimentação para potenciômetro externo	$V = 10 \text{ V DC}$, recomendação $R = 4,7 \text{ k}\Omega$
Classe de proteção	IP 65 conforme DIN 40 050 com conector
Característica de segurança	Com a ruptura do cabo de alimentação, a pressão de saída será mantida sem regulação.

Especificações técnicas da pneumática

Função		Válvula reguladora de pressão por acionamento elétrico							
Pressão de alimentação em 1 (valor máx. em parênteses)		2 (2 bar)		3,5 (4,5 bar)		7 (8 bar)		11 (12 bar)	
Pressão controlada em 2		0 ... 1 bar		0 ... 2,5 bar		0 ... 6 bar		0 ... 10 bar	
Vazão medida com a pressão máxima em 2 (l/min)	G1/8	360 l/min		600 l/min		600 l/min		1200 l/min	
	G1/4	700 l/min		1350 l/min		1900 l/min		2600 l/min	
	G1/2	2000 l/min		3700 l/min		6300 l/min		7000 l/min	
Meio		ar comprimido filtrado a 40 µm com ou sem lubrificação e gases neutros							
Temperatura do meio		0 – 60 °C							
Histerese (mbar)		30		40		40		50	
Tempo de resposta em 2 com a pressão máxima		1 bar		2,5 bar		6 bar		10 bar	
On *	(ms)	On		On		On		On	
Off **	(ms)		Off		Off		Off		Off
Volume = 0 Litro	G1/8	95	165	100	180	100	190	125	220
	G1/4	140	225	150	260	150	260	160	280
	G1/2	170	500	170	500	170	510	140	535
Volume = 0,7 Litro	G1/8	140	250	180	310	220	340	250	380
	G1/4	150	280	170	320	180	360	200	390
	G1/2	120	510	130	520	160	560	180	600
Volume = 2 Litros	G1/8	340	730	380	990	430	1250	600	1160
	G1/4	360	620	400	700	540	930	540	1050
	G1/2	330	600	410	720	570	1000	540	1000

* de 0 a 90% $P_{2\text{máx.}}$

** de 100 a 10% $P_{2\text{máx.}}$

13 Bibliografia

Abu-Farha K. *Integrated approach to the superplastic forming of magnesium alloys*. University of Kentucky, s.n., 2007.

American Society for Metals *AMS Handbook : Forming and Forging*. 9th Edition, 1988, Vol. Volume 14.

Aoura Y *Contribution a la modélisation du comportement superplastique des alliages métalliques pour les procédés de mise en forme*. 2004.

Ashby MF, Verral RA *Diffusion-accommodated flow and superplasticity*. s.l., Acta Metallurgica, 1973, Vol. 21, pp.149-162.

Backofen WA, Turner IR, Avery DH *Superplasticity in an Al-Zn Alloy*. s.l., Transaction ASM, 1964, Vol. 57, p.980.

Banabic D, Bălan T, Comsa DS *Closed-Form Solutions for Bulging Elliptical Dies*. Bamberg: Meisenbach, Geiger, Sheet Metal 1999, 1999.

Barnes AJ *Superplastic Forming 40 Years and Still Growing*. s.l., @ASM International, 2007.

—. *Superplastic Forming Aluminum Alloys*. s.l., Trans Tech Publications, 1994, Vols. Materials Science Forum Vols. 170-172 (1994) pp 701-714.

Baudelet B, Lian J *A composite model for superplasticity*. s.l., Journal of Materials Science, 1995, Vol. 30, pp.1977-1981.

Beck PA et al. *AIME*. s.l., Metals Technology, 1947. Apud . Tan, M J, Liew, K M e Tan, H. cavitation and grain growth during superplastic forming. 1. s.l. : International OCSCO World Press, 2007. p. 307. Vol. 24.

Bellet M *Modelisation Numerique di Formage Superplastique de Toles*. 1988.

Ben Tahar MM *Contribution a l'etude et la simulation du procede d' hydroformage*. Paris, s.n., 2005, Vol. Sciences Fondamentales et Appliquées, pp.54-56.

Bengough GD s.l., J. Inst. Metals, 1912, Vol. 7, p.123. (Apud Pós-doutorado Paulo Guanabara 2010).

Blandin J J Beck W , Curtis R, Bernhart G *Some new developments of SuperPlastic Forming in the framework of the Euro-SPF group*. Austin, s.n., 2008.

Blandin JJ, Suery M <http://www.techniques-ingenieur.fr/book/m613/1/superplasticite.html>. *www.techniques-ingenieur.fr*. [Online] 10 07 1996. <http://www.techniques-ingenieur.fr/book/m613/1/superplasticite.html>.

Bochvar AA, Sviderskaya ZA Ss.l., Izvest. Akad. Nauk SSSR, Otdel. Tekh. Nauk, 1946, Vol. 10, p.1001. (Apud Pós-doutorado Paulo Guanabara 2010).

BonetJ& Gil, A & Wood, R D & Said, R & Curtis, R V *Simulating Superplastic forming: comput. Methods Appl. Mech. Eng* 195. 2006, pp.6580-6603.

BoulosZ *Interactions Materiaux - Procédé dans la Mise en Forme Superplastique*. France, Ecole Nationale Supérieure D'arts et Métiers D'Angers, 1999, p.146. mémoire de thèse.

BurkeJE, TurnbullD *Progress in Metals Physics* 3. 1952. Apud . Tan, M J, Liew, K M e Tan, H. cavitation and grain growth during superplastic forming. 1. s.l. : International OCSCO World Press, 2007. p. 307. Vol. 24.

CappettiNet al. *A method for setting variables in Super Plastic Forming proces*. s.l., International OCSCO Wolrd Press, 2, 2010, Vol. 38, p.187.

ChandraN *Constitutive behavior of superplastic materials*. s.l., Pergamon, International Journal of Non-Linear Mechanics, 2000, Vol. 37, pp.461-484. Department of Mechanical Engineering, Florida State University, 2525 Pottsdamer Street, Tallahassee, FL 32310, USA.

ChengJH *The determination of material parameters from superplastic inflation tests*. Technology of Materials Processing Journaled.. Department of Mechanical Engineering, National Taiwan University, Taipei, Taiwan, Elsevier, 1994, Vol. 58, pp.233-246.

ChokshiAH, MukherjeeAK, LangdonTG Superplasticity in Advanced Materials. *Materials Science and Engineering R*. 1993, Vol. 6, pp.237-274. Reports R:10.

CoutoAAet al. *CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL DA LIGA Ti-6Al-4V COMERCIAL*. Foz do Iguaçu, PR, Brasil, s.n., 2006, pp.4365-4376.

Dobrzański L ATańskiT, Čížek L, Madejski J *Selection of heat treatment condition of the Mg-Al-Zn alloys*. 32/2, 2009, pp.203-210.

Dröder, KlausG *Doktor-Ingenieur Dissertation "Untersuchungen zum Umformen von Feinblechen aus Magnesiumknetlegierungen"*. Korbach, s.n., 1999.

DuttaA, MukherjeeAK *Superplastic forming: an analytical approach*. s.l., Materials Science and Engineering,, 1992, Vol. A 15 7, pp.9 - 13.

EdingtonJW, MeltonKN, CutlerCP Superplasticity. *Progress in Materials Science*. 1976, Vol. 21, pp.61-158.

EnglerO, PadmanabhanKA, LückeK *A model for superplastic flow induced texture annihilation*. s.l., Modelling Simul. Mater. Sci. Eng, 2000, Vol. 8, pp.477-490.

FieldsDS, StewartTJ *Strain effects in the superplastic deformation of 78Zn-22Al*. Great Britain, Pergamon Press, 1971, Vol. 13, pp.63-75.

FranchittiS *Tesi di Dottorato - Analisie e Modellazione Dei Processi di Formatura Superplastica*. s.l., Università Degli Studi di Cassino, 2007.

FranklinGF & Powell, J D & Emami-Naeini, A *Feedback Control of Dynamic Systems*. s.l., Pearson, 2009, Vol. 6a. edição.

GhoshAK, HamiltonCH *Influences of Material Parameters and Microstructure on Superplastic Forming*. s.l., AMERICAN SOCIETY FOR METALS AND THE METALLURGICAL SOCIETY OF AIME, 1982, Vol. VOLUME 13A, pp.733-743. METALLURGICAL TRANSACTIONS A.

GhoshAK, HamiltonCN *Superplastic sheet forming: ASM Handbook*. 2006, Vol. 14B Metalworking: Sheet Forming.

GOM[Online]GOM, 2000. http://www.gom.com/industries/sheet-metal-forming/fileadmin/user_upload/industries/yield_stress_EN.pdf.

HartEW *Acta Metall.* 1967, Vol. 15, p.1545. Apud "Badelet, B e Lian, J. A composite model for superplasticity. s.l. : Journal of Materials Science, 1995. pp. 1977-1981. Vol. 30."

HigashiK *unpublished research, university of Osada Prefecture*. 1992.

HoltDL *An Analysis of Bulging of a Superplastic Sheet by Lateral Pressure*. s.l., Pergamon Press, 1970, Vol. 12, pp.491-497.

JenkinsCH Ms.l., J. Inst. Metals, 1928, Vol. 40, p.21. (Apud Pós-doutorado Paulo Guanabara 2010).

JovaneF *An Aproximate Analysis of the superplastic forming of a thin circular diaphragm: Theory and Experiments*. Great Britain, Pergamon, 1968, Vol. 10, pp.403-427.

Keyence no Brasil. *Schalt Sensores*. [Online]Aschall Sensores, 2010. <http://www.schalt.com.br/>.

KimI *Einfluß des Spannungszustandes während des hydraulischen Einfluß des Spannungszustandes während des hydraulischen*. Aachen, Shaker Verlag, 2002.

KimJS, NamWJ, LeeCS *Effect of beta Volume Fraction on Dynamic Grain Growth during Superplastic Deformation of Ti3Al-based Alloys*. Pohang, Metals And Materials, 1998, Vol. 4, pp.1041-1046.

laser measurement sensors and scanners. *Global launch page for laser distance measurement sensors and scanners*. [Online]Schmitt Industries, Inc, 2010. <http://www.acuitylaser.com/>.

LeeJHet al. *Microstructural evolution during superplastic bulge forming of Ti-6Al-4V alloy*. s.l., Mat. Sc. & Eng. A, 1998, Vol. 243, pp.119-125.

LianJ, BadeletB *Mat. Sc. and Eng. 84*. 1986, p.157. Apud (Tan, Liew e Tan 2007).

LianJ, ValievRX, BadeletB *On the enhanced grain growth in ultrafine grained metals*. s.l., Acta Metallurgica, 43, 1995, Vol. 11, pp.4165-4170.

- Lianj, ValievRZ, BaudaletB** *On The Enhanced Grain Growth In Ultrafine Grained Metals*. mater.metall.Actaed.. s.l., Pergamon, 1995, Vol. 43, pp.4165-4170. Printed in Great Britain.
- LopesLH** *Construção de um prensa para conformação superplastica, relatorio interno, comunicação pessoal*. São Paulo, s.n., 2010.
- Majak JPohlakM, Küttner R** *A simple algorithm for formability analysis*. s.l., Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 2007, Vol. 1/22.
- MartinP** *Effects of hot working on the microstructure of Ti alloys*. s.l., Materials Science and Engineering, 1998, Vol. 243, pp.25-31.
- MerkleinM** *Annual Report 2009 Tätigkeitsberich Lehrstuhl für Fertigungstechnologie*. Erlangen, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2009, p.84.
- OsadaK** *Commercial applications of superplastic forming*. *Journal of Materials Processing Technologies*. 21, 1997, pp.241-245.
- PearsonCE**s.l., J. Inst. Metals, 1934, Vol. 54, p.111. (Apud Pós-doutorado Paulo Guanabara 2010).
- PiskounovN** *Cálculo diferencial e integral*. Porto, Lopes e Silva.
- RajR, AshbyMF** *On Grain Boundary Sliding and Diffusional Creep*. s.l., Metallurgical Transactions, 1971, Vol. 2.
- RobertC** *Contrinution a la Simulation des procedes de mise en forme, Application au Formage Incremental et au Formage Superplastique*. Laboratoire Arts et Métiers ParisTech d'Angers, l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 2009.
- RosenhainW., EwendD.** *Intercrystalline cohesion in metals*. s.l., Journal Institute of Metals, 1912, Vol. 8, pp.149-173. [Apud (Shepard e Giedt 1958)].
- SamektoH** *Finite Element Simulation des superplastischen Umformprozesses für Aluminiumlegierung 5083*. Stuttgart, DGM informationsgesellschaft mbH, 2005.
- SatoE, KuribayashiK** *Superplasticity and deformation induced grain growth*. s.l., Iron Steel Inst. Jpn., 8, 1993, Vol. 33, p.825.
- ShepardLA, GiedtWH** *Transgranular and Intergranular fracture*. Washington, National Advisory Committee for Aeronautics, 1958.
- SICK.COM homepage. *Sick Sensor Intelligence*. [Online]© 2010 SICK AG, 2010. <http://www.sick.com/group/EN/home/Pages/homepage1.aspx>.

SiegerK, WerleT *Manufacturing Examples and Fundamentals*. Institut für UmformtechnikStuttgartUniversität.. 1994. TALAT Lecture 3801.

SigvantMet al. *A viscous pressure bulge test for the determination of a plastic hardening curve and equibiaxial material data*. Published online: 28 May 2009, Springer/ESAFORM 2009, 2009.

SnippeC *Superplasticiteit bij CERN*. s.l., GOLDEN DELICIOUS, 2008, pp.76-78.

SnippeQH C, & Meinders, V T *Extracting Material Data for Superplastic forming simulations*. Golden, s.n., 2009, Vol. IDDRG 2009 International Conference. International Deep Drawing Research Group.

SolosandoSG & Bortolussi *Relatorio convenio FEI-EMBRAER - Conformação superplastica, n. 1*. Centro Universitario da FEI - Fundação de Ensino Inaciana, Sao Bernardo do Campo, s.n., 2010. p.40 paginas.

TanMJ, LiewKM, TanH *cavitation and grain growth during superplastic forming*. s.l., International OCSCO World Press, 1, 2007, Vol. 24, p.307.

UnderwoodEE *A Rewiew of superplasticity and Related Phenomena*. s.l., Journal of Metals, 1962, Vol. 14, p.914.

VerhovenJD *Fundamentals of physical Metallurgy*. New York, s.n., 1975, p.209.

VermaR.& Ghosh, A. K. & Kim, S. & Kim, C. *Grain refinement and superplasticity in 5083 Al*. s.l., Elsevier Science S.A., 1995, Vols. Materials Science and Engineering A191 (1995) 143-150.

VermaRet al. *The Finite Element Simulation of high-temerature Magnesium AZ31 Sheet Forming*. s.l., JOM, 2009. (61) .

VulcanM. *Der pneumatische Tiefungsversuch und seine Anwendug in der superplastischen Aluminium-Blechumformung*. s.l., Universidade de Stuttgart, 2006. Tese de doutorado.

Weissl, SemiatinSL *Thermomechanical processing of beta titanium alloys-an overview*. s.l., Materials Science and Engineering, 1998, Vol. 243, pp.46-65.

XuC *Superplastic flow in a nanostructured aluminum alloy produced using high-pressure torsion*. *Materials Science Engineering A*. 2009, Vol. 500, pp.170-175.