

Orientador: Sergio Tonini Button

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

José Augusto Camargo Alves

**Estudo da Conformabilidade de Abas Convexas da
Liga de Alumínio AA2024-O no Processo de
Hidroconformação de Chapas**

Campinas, 2011

José Augusto Camargo Alves

Estudo da Conformabilidade de Abas Convexas da Liga de Alumínio AA2024-O no Processo de Hidroconformação de Chapas

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Sérgio Tonini Button

Campinas
2011

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

AL87e Alves, José Augusto Camargo
Estudo da conformabilidade de abas convexas da liga de alumínio AA2024-O no processo de hidroconformação de chapas / José Augusto Camargo Alves. --Campinas, SP: [s.n.], 2011.

Orientador: Sérgio Tonini Button.
Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Conformação de metais. 2. Métodos de simulação. 3. Ligas de alumínio. 4. Deformação (Mecânica). I. Button, Sérgio Tonini. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

Título em Inglês: Study on convex flanges formability of AA2024-O aluminum alloy sheets on hydroforming process

Palavras-chave em Inglês: Metal forming, Simulation methods, Aluminum alloy, Deformation (Mechanics)

Área de concentração: Materiais e Processos de Fabricação

Titulação: Mestre em Engenharia Mecânica

Banca examinadora: Anselmo Eduardo Diniz, Mariano Eduardo Moreno

Data da defesa: 30/09/2011

Programa de Pós Graduação: Engenharia Mecânica

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADEMICO

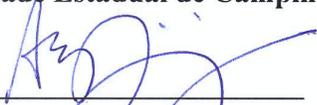
Estudo da Conformabilidade de Abas Convexas da Liga de Alumínio AA2024-O no Processo de Hidroconformação de Chapas

Autor: José Augusto Camargo Alves
Orientador: Sérgio Tonini Button

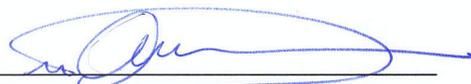
A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:



Prof. Dr. Sérgio Tonini Button, Presidente
Universidade Estadual de Campinas – DEMa – FEM



Prof. Dr. Anselmo Eduardo Diniz
Universidade Estadual de Campinas – DEF – FEM



Prof. Dr. Mariano Eduardo Moreno
Universidade Federal de São Carlos - CCET

Campinas, 30 de setembro de 2011.

Agradecimentos

Agradeço prioritariamente a Deus, pela minha vida e por todas as realizações que nela têm ocorrido.

Ao orientador e amigo Sérgio Tonini Button, pela oportunidade e confiança na realização deste trabalho, apesar de todos os percalços iniciais, bem como por suas valiosas considerações.

A minha família, principalmente a minha esposa Fernanda, pela paciência e auxílio na formatação deste trabalho e aos meus pais, José Carlos e Dalva, pelo constante apoio e confiança.

À Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP, pela oportunidade de desenvolvimento profissional e acadêmico, e aos seus docentes, pelo intenso conhecimento transmitido.

Aos meus gestores, Rodrigo Oliveira Leme e Vicente Henrique Alves Guedes de Camargo, pela confiança neste trabalho e pela constante preocupação com meu crescimento intelectual e profissional.

Aos meus grandes amigos Maique Antônio Rodrigues, Marcos Antônio Leite Silva e Marcos dos Santos Fernandes pelo suporte e considerações, que sem dúvida alguma foram fundamentais para realização deste trabalho.

Ao amigo Gustavo Henrique Pires pela ajuda nas buscas bibliográficas.

Aos amigos Luciano Eduardo de Oliveira e João Leme da Silva pelas valiosas sugestões gramaticais.

A EMBRAER S.A. que, por meio de seus funcionários e recursos, possibilitou o desenvolvimento deste trabalho.

*“Mestre não é quem sempre ensina,
mas quem de repente aprende”*

(João Guimarães Rosa)

Resumo

O processo *sheet hydroform*, ou hidroconformação de chapas, é realizado por meio de uma prensa composta por uma membrana de borracha, preenchido com um fluido hidráulico cuja função é atuar como uma matriz, exercendo esforços sobre uma chapa de metal (*blank*), que é então empurrada contra um punção rígido, fazendo-o adquirir o formato deste. Embora este processo seja amplamente utilizado para a produção de pequenos lotes de peças metálicas de formato complexo e de espessura reduzida, ele exige habilidades de quem o define, pois se por um lado pode ser visto como simples por empregar apenas um molde maciço, por outro, a ausência de um sistema macho-fêmea capaz de garantir um completo travamento do *blank* pode ser encarado como um problema por permitir movimentos indesejados do material, que muitas vezes resultam na formação de rugas ou outros defeitos. Baseando-se nesses conceitos, o propósito deste trabalho foi o de mapear, por meio de simulações e ensaios práticos, a conformabilidade de abas convexas da liga de alumínio AA2024-0 de quatro espessuras quando submetidas a diferentes combinações de raio de curvatura e comprimento de aba. Deste modo, foi possível definir quais combinações destes parâmetros possibilitam a obtenção de componentes conformados adequadamente, isentos de rugas e outros defeitos macroscópicos, e ainda, quais condições levam à formação de irregularidades na aba conformada acima do limite preestabelecido, exigindo o emprego de prensa-chapas especiais, também conhecidos como *dams*, capazes de evitar a ocorrência de tais desvios. Com base nos resultados obtidos pode-se constatar que a ocorrência de rugas está associada principalmente à altura da aba conformada e não se altera significativamente quando a espessura do *blank* é modificada. Além disso, foi possível notar que raios de curvaturas maiores proporcionam menores valores de deformação compressiva na região conformada, permitindo obter abas mais altas e sem rugas.

Palavras Chave: Conformação dos metais, métodos de simulação, ligas de alumínio, deformação (mecânica).

Abstract

Hydroform, or sheet metal fluid forming, is performed using a fluid cell press, in which the hydraulic fluid acts on the metallic blank pushing it against the male tool, acquiring its geometry. It is widely employed to manufacture small batches of complex and low thick components. If by one point of view it can be seen as simple, involving just a single rigid block as tool, by the other hand the absence of a rigid punch in certain cases can be a limitation, since it may allow the blank to move incorrectly during the process, causing wrinkles or other macro defects. Based on this limitation, the aim of this study was to define, using computational simulations and practical tests, the shrink flange formability limit of four different thickness aluminum alloy sheets when submitted to different combinations of curvature radius and flange length. As result, it could be seen which combinations can lead the material to be formed properly and which may cause failures, requiring special blank holders, known as dams, to avoid this problems. Based on the results, it can be verified that wrinkles nucleation is mainly associated with flange height and it does not change significantly when using blanks with different thicknesses. Furthermore, it could be noted that bigger curvature radius implies in smaller compressive strain on formed region, allowing to obtain higher flanges without wrinkles in these conditions.

Key Words: Metal forming, simulation methods, aluminum alloy, deformation (mechanics).

Lista de Ilustrações

Figura 2.1 – Redução na emissão de CO ₂ em função da redução de peso das principais categorias de transporte	4
Figura 2.2 – Evolução das propriedades mecânicas das ligas de alumínio no século XX.....	6
Figura 2.3 – Comparativo das curvas tensão x deformação da liga 2024 na condição O e W.....	9
Figura 2.4 – Modelo esquemático da operação de dobramento.	11
Figura 2.5 – Esquema dos esforços sofridos pela chapa durante a operação de dobramento.....	11
Figura 2.6 – Ensaio de dobra utilizando fator N.....	12
Figura 2.7 – Modelo esquemático do processo de embutimento e estados de tensão em elementos de diferentes regiões do componente.....	12
Figura 2.8 – Processo de embutimento profundo por estiramento.	14
Figura 2.9 – Classificação dos processos de hidroconformação.	15
Figura 2.10 – Etapas do processo de hidroconformação de tubos.....	16
Figura 2.11 – Principais restrições do processo de hidroconformação de tubos.....	17
Figura 2.12 – Comparativo de simulações e resultados experimentais da hidroconformação de tubos de cobre em “T”	18
Figura 2.13 – Etapas do processo de hidroconformação com <i>blanks</i> duplos.....	19
Figura 2.14 – Componente automotivo fabricado pelo processo de conformação de <i>blanks</i> duplos	19
Figura 2.15 – Componente resultante de hidroconformação combinada: tubos e <i>blanks</i> duplos	20
Figura 2.16 – Curvas tensão x deformação de ligas de alumínio obtidas em diferentes temperaturas.....	21

Figura 2.17 – Ensaios de embutimento realizados no processo de hidroconformação em temperaturas elevadas.....	22
Figura 2.18 – Modelo esquemático do processo de hidroconformação de abas	24
Figura 2.19 – Componentes com abas convexas e segmentos de aeronave que os utilizam.	25
Figura 2.20 – Aba convexa: Tendência de formação de rugas.....	27
Figura 2.21 – Aba côncava: Tendência ao estiramento e à ruptura.....	28
Figura 2.22 – Influência da pressão na qualidade das abas conformadas.....	31
Figura 2.23 – Parâmetros considerados no cálculo de deformação em abas convexas	32
Figura 2.24 – Ferramental com prensa-chapa (<i>dam</i>).	34
Figura 2.25 – Movimentação da chapa em um ferramental com <i>dam</i>	34
Figura 2.26 – Modelo esquemático do processo de hidroconformação com punção	36
Figura 2.27 – Comparativo de ensaios experimentais e simulações: Punção esférico e contra-pressão hidráulica.....	37
Figura 2.28 – Mapeamento de processo em função do curso do punção, força prensa-chapa e pressão do fluido	37
Figura 2.29 – Modelo de punção com cavidade	38
Figura 2.30 – Comparativo entre resultados de simulação e experimentais de um processo de hidroconformação empregando punção com cavidade	39
Figura 2.31 – Tensões atuantes em um plano de deslizamento.....	43
Figura 2.32 – Curvas de deformação para abas côncavas empregando-se diferentes critérios de escoamento.....	46
Figura 3.1 – Sequências de fabricação de componentes de liga de alumínio.	49
Figura 3.2 – Método de modificação do <i>blank</i> para alteração da altura da aba.	50
Figura 3.3 – Centro de usinagem três eixos utilizado para o fresamento dos <i>blanks</i>	51
Figura 3.4 – Dimensionamento do <i>blank</i>	52

Figura 3.5 – Equipamento para gravação da grade de círculos e <i>blank</i> conformado com círculos.	52
Figura 3.6 – Ferramentas empregadas para a execução dos ensaios.	55
Figura 3.7 – Preparação da ferramenta na prensa.	55
Figura 3.8 – Prensa com célula hidráulica empregada para a execução dos ensaios.	56
Figura 3.9 – Critério para posicionamento das ferramentas na gaveta da prensa.	57
Figura 3.10 – Dimensionamento da base para simulação.	60
Figura 3.11 – Malha da ferramenta empregada na simulação numérica computacional.	60
Figura 3.12 – Caracterização da membrana de borracha.	61
Figura 3.13 – Caracterização do material do <i>blank</i>	62
Figura 3.14 – Malha do <i>blank</i> e método de refinamento nas regiões críticas.	63
Figura 3.15 - Etapas de simulação utilizando ferramenta com raio curvatura de 100 mm.	64
Figura 3.16 – Gráfico da pressurização da membrana em função do tempo de conformação.	65
Figura 3.17 – Procedimento para verificação da altura da ruga e deformação dos círculos.	67
Figura 4.1 – Componente isento de rugas críticas ($R_C=100$ mm; $h=17,1$ mm; $e=1,0$ mm).	68
Figura 4.2 – Deformações observadas na aba do componente virtual ($R_C=100$ mm; $h=17,6$ mm; $e=1,0$ mm).	69
Figura 4.3 – Irregularidades nas abas virtual e real na condição limite ($R_C=100$ mm; $e=1,0$ mm).	70
Figura 4.4 – Deformações observadas na aba do componente virtual ($R_C=100$ mm; $e=1,0$ mm).	71
Figura 4.5 – Componente com rugas acima do limite ($R_C=100$ mm; $e=1,0$ mm).	71
Figura 4.6 – Irregularidades nas abas virtual e real na condição acima do limite ($R_C=100$ mm; $e=1,0$ mm).	72
Figura 4.7 – Mapeamento do processo para <i>blanks</i> de 1,0 mm de espessura.	74

Figura 4.8 – Valores de deformação compressiva crítica em função do raio de curvatura (Blanks de 1,0 mm de espessura).	76
Figura 4.9 – Mapeamento do processo para blanks de 1,27 mm de espessura.	77
Figura 4.10 – Valores de deformação compressiva crítica em função do raio de curvatura (Blanks de 1,27 mm de espessura).	78
Figura 4.11 – Mapeamento do processo para blanks de 1,6 mm de espessura.	80
Figura 4.12 – Valores de deformação compressiva crítica em função do raio de curvatura (Blanks de 1,6 mm de espessura).	82
Figura 4.13 – Mapeamento do processo para blanks de 2,0 mm de espessura.	83
Figura 4.14 – Valores de deformação compressiva crítica em função do raio de curvatura (Blanks de 2,0 mm de espessura).	84
Figura 4.15 – Sobreposição dos limites de conformabilidade de todas as espessuras.....	85
Figura A.1 – Resultados numéricos e experimentais para o componente com aba limite ($R_C=200$ mm; $e=1,0$ mm).	94
Figura A.2 – Componente isento de rugas críticas ($R_C=200$ mm; $e=1,0$ mm).	95
Figura A.3 – Resultados numéricos e experimentais para o componente acima do limite ($R_C=200$ mm; $e=1,0$ mm).	96
Figura A.4 – Componente com rugas acima do limite ($R_C=200$ mm; $e=1,0$ mm).	96
Figura A.5 – Resultados numéricos e experimentais para o componente com aba limite ($R_C=300$ mm; $e=1,0$ mm).	96
Figura A.6 – Componente isento de rugas críticas ($R_C=300$ mm; $e=1,0$ mm).	97
Figura A.7 – Resultados numéricos e experimentais para o componente com aba acima do limite ($R_C=300$ mm; $e=1,0$ mm).	97
Figura A.8 – Componentes com rugas acima do limite ($R_C=300$ mm; $e=1,0$ mm).	98
Figura A.9 – Resultados numéricos e experimentais para o componente com aba limite ($R_C=400$ mm; $e=1,0$ mm).	98

Figura A.10 – Componente isento de rugas críticas ($R_C=400$ mm; $e=1,0$ mm).....	99
Figura A.11 – Resultados numéricos e experimentais para o componente com aba acima do limite ($R_C=400$ mm; $e=1,0$ mm).	99
Figura A.12 – Componente com rugas acima do limite ($R_C=400$ mm; $e=1,0$ mm).	100
Figura B.1 – Resultados numéricos e experimentais para o componente com aba limite ($R_C=100$ mm; $e=1,27$ mm).	101
Figura B.2 – Componente isento de rugas críticas ($R_C=100$ mm; $e=1,27$ mm).	102
Figura B.3 – Resultados numéricos e experimentais para o componente com aba acima do limite ($R_C=100$ mm; $e=1,27$ mm).	103
Figura B.4 – Componentes com rugas acima do limite ($R_C=200$ mm; $e=1,27$ mm).....	103
Figura B.5 – Resultados numéricos e experimentais para o componente com aba limite ($R_C=200$ mm; $e=1,27$ mm).	104
Figura B.6 – Componente isento de rugas críticas ($R_C=200$ mm; $e=1,27$ mm).	104
Figura B.7 – Resultados numéricos e experimentais para o componente com aba acima do limite ($R_C=200$ mm; $e=1,27$ mm).	105
Figura B.8 – Componente com rugas acima do limite ($R_C=200$ mm; $e=1,27$ mm).	105
Figura B.9 – Resultados numéricos e experimentais para o componente com aba limite ($R_C=300$ mm; $e=1,27$ mm)	106
Figura B.10 – Componente isento de rugas críticas ($R_C=300$ mm; $e=1,27$ mm).	106
Figura B.11 – Resultados numéricos e experimentais para o componente com aba acima do limite ($R_C=300$ mm; $e=1,27$ mm).	107
Figura B.12 – Componente com rugas acima do limite ($R_C=300$ mm; $e=1,27$ mm).	107
Figura B.13 – Resultados numéricos e experimentais para o componente com aba limite ($R_C=400$ mm; $e=1,27$ mm)	108
Figura B.14 – Componente isento de rugas críticas ($R_C=400$ mm; $e=1,27$ mm).	108

Figura B.15 – Resultados numéricos e experimentais para o componente com aba acima do limite ($R_C=400$ mm; $e=1,27$ mm).	109
Figura B.16 – Componente com rugas acima do limite ($R_C=400$ mm; $e=1,27$ mm).	109
Figura C.1 – Resultados numéricos e experimentais para o componente com aba limite ($R_C=100$ mm; $e=1,6$ mm).	110
Figura C.2 – Componente isento de rugas críticas ($R_C=100$ mm; $e=1,6$ mm).	111
Figura C.3 – Resultados numéricos e experimentais para o componente com aba acima do limite ($R_C=100$ mm; $e=1,6$ mm).	111
Figura C.4 – Componente com rugas acima de limite ($R_C=100$ mm; $e=1,6$ mm).	112
Figura C.5 – Resultados numéricos e experimentais para o componente com aba limite ($R_C=200$ mm; $e=1,6$ mm).	112
Figura C.6 – Componente isento de rugas críticas ($R_C=200$ mm; $e=1,6$ mm).	113
Figura C.7 – Resultados numéricos e experimentais para o componente com aba acima do limite ($R_C=200$ mm; $e=1,6$ mm).	113
Figura C.8 – Componente com rugas acima do limite ($R_C=200$ mm; $e=1,6$ mm).	114
Figura C.9 – Resultados numéricos e experimentais para o componente com aba limite ($R_C=300$ mm; $e=1,6$ mm).	114
Figura C.10 – Componente isento de rugas críticas ($R_C=300$ mm; $e=1,6$ mm).	115
Figura C.11 – Resultados numéricos e experimentais para o componente com aba acima do limite ($R_C=300$ mm; $e=1,6$ mm).	115
Figura C.12 – Componente com rugas acima do limite ($R_C=300$ mm; $e=1,6$ mm).	116
Figura C.13 – Resultados numéricos e experimentais para o componente com aba limite ($R_C=400$ mm; $e=1,6$ mm)	116
Figura C.14 – Componente isento de rugas críticas ($R_C=400$ mm; $e=1,6$ mm).	117
Figura C.15 – Resultados numéricos e experimentais para o componente com aba acima do limite ($R_C=400$ mm; $e=1,6$ mm).	117

Figura C.16 – Componente com rugas acima do limite ($R_C=400$ mm; $e=1,6$ mm).	118
Figura D.1 – Resultados numéricos e experimentais para o componente com aba limite ($R_C=100$ mm; $e=2,0$ mm).	119
Figura D.2 – Componente isento de rugas críticas ($R_C=100$ mm; $e=2,0$ mm).	120
Figura D.3 – Resultados numéricos e experimentais para o componente com aba acima do limite ($R_C=100$ mm; $e=2,0$ mm).	120
Figura D.4 – Componente com rugas acima do limite ($R_C=100$ mm; $e=2,0$ mm).	121
Figura D.5 – Resultados numéricos e experimentais para o componente com aba limite ($R_C=200$ mm; $e=2,0$ mm).	121
Figura D.6 – Componente isento de rugas ($R_C=200$ mm; $e=2,0$ mm).	122
Figura D.7 – Resultados numéricos e experimentais para o componente com aba acima do limite ($R_C=200$ mm; $e=2,0$ mm).	122
Figura D.8 – Componente com rugas acima do limite ($R_C=200$ mm; $e=2,0$ mm).	123
Figura D.9 – Resultados numéricos e experimentais para o componente com aba limite ($R_C=300$ mm; $e=2,0$ mm).	123
Figura D.10 – Componente isento de rugas críticas ($R_C=300$ mm; $e=2,0$ mm).	124
Figura D.11 – Resultados numéricos e experimentais para o componente com aba acima do limite ($R_C=300$ mm; $e=2,0$ mm).	124
Figura D.12 – Componente com rugas acima do limite ($R_C=300$ mm; $e=2,0$ mm).	125

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Classificação das ligas de alumínio segundo <i>Aluminum Association</i>	5
Tabela 2.2 – Materiais utilizados para fabricação de punções rígidos	23
Tabela 2.3 – <i>Softwares</i> empregados para simulação do processo de conformação de <i>blanks</i>	42
Tabela 3.1 – Composição da liga AA-2024	47
Tabela 3.2 - Principais propriedades mecânicas da liga AA-2024-O.....	48
Tabela 3.3 – Raio mínimo de dobra em função da espessura da chapa AA2024-O.....	53
Tabela 3.4 – Categorias de hidroconformação em função da pressão aplicada.	58
Tabela 4.1 – Alturas de abas e de rugas obtidas com <i>blanks</i> de 1,0 mm de espessura.....	73
Tabela 4.2 – Deformações compressivas obtidas com <i>blanks</i> de 1,0 mm de espessura.....	75
Tabela 4.3 – Alturas de abas e de rugas obtidas com <i>blanks</i> de 1,27 mm de espessura.....	76
Tabela 4.4 – Deformações compressivas obtidas com <i>blanks</i> de 1,27 mm de espessura.....	78
Tabela 4.5 – Alturas de abas e de rugas obtidas com <i>blanks</i> de 1,6 mm de espessura.....	79
Tabela 4.6 – Deformações compressivas obtidas com <i>blanks</i> de 1,6 mm de espessura.....	81
Tabela 4.7 – Alturas de abas e de rugas obtidas com <i>blanks</i> de 2,0 mm de espessura.....	83
Tabela 4.8 – Deformações compressivas obtidas com <i>blanks</i> de 2,0 mm de espessura.....	83

Lista de Abreviaturas e Siglas

Letras Latinas

e - espessura do <i>blank</i>	[mm]
ϵ - dimensão do elemento da malha	[mm]
E - Módulo de Elasticidade	[MPa]
F - parâmetro de anisotropia do material	[]
G - parâmetro de anisotropia do material	[]
h - Altura da aba conformada	[mm]
K - coeficiente de resistência	[MPa]
L_B - Largura do <i>blank</i>	[mm]
M - Momento Torçor	[N mm]
m - parâmetro do material empregado nos critérios de escoamento	[]
n - coeficiente de encruamento do material	[]
N - parâmetro de anisotropia do material	[]
O - condição recozida da liga de alumínio	[]
p - pressão hidrostática	[N/mm ²]
r_m - coeficiente de anisotropia médio	[]
r_0 , r_{45} e r_{90} - valores de anisotropia nas direções 0°, 45° e 90°, respectivamente	[]
W - condição da liga de alumínio após tratamento térmico	[]
T - condição envelhecida da liga de alumínio	[]

.....

Letras Gregas

α - ângulo de dobra	[°]
β - parâmetro de anisotropia do material	[]
γ - parâmetro de anisotropia do material	[]
Δ_r - Coeficiente de anisotropia plana	[]
ϵ - deformação	[]
θ - seção circular	[°]
\emptyset - diâmetro	[mm]

σ_C - tensão compressiva	[N/mm ²]
σ_T - tensão trativa	[N/mm ²]
σ_{Mises} - tensão de escoamento obtida pelo critério de von Mises	[N/mm ²]
σ_{Hill48} - tensão de escoamento obtida pelo critério de Hill-48	[N/mm ²]
σ_{Hill90} - tensão de escoamento obtida pelo critério de Hill-90	[N/mm ²]
σ_{Barlat} - tensão de escoamento obtida pelo critério de Barlat	[N/mm ²]
ϕ - parâmetro de anisotropia do material	[]

.....

Abreviações

AQ - <i>as quenched</i> (condição da liga de alumínio imediatamente após o resfriamento)	[]
Al - Alumínio	[]
CO ₂ - dióxido de carbono	[]
$\epsilon_{\theta Max}$ - deformação máxima observada na direção tangencial da aba convexa	[]
$\epsilon_{\theta CR}$ - deformação compressiva crítica	[]
F _P - Força no punção de conformação	[N]
F _{PC} - Força no prensa- <i>blanks</i>	[N]
R _C - Raio de curvatura	[mm]
R _P - Raio da chapa plana	[mm]
r _{min} - raio mínimo de dobra	[mm]
S _i - parâmetros do critério de escoamento de Barlat	[]

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 Ligas de Alumínio.....	3
2.1.1 Aplicabilidade das ligas de alumínio no cenário atual.....	3
2.1.2 Classificação das ligas de alumínio.....	4
2.2 Classificação dos Processos de Estampagem.....	9
2.2.1 Dobramento	10
2.2.2 Estampagem Profunda.....	12
2.2.3 Estiramento	13
2.3 O Processo de Hidroconformação.....	14
2.3.1 Hidroconformação de Tubos	15
2.3.2 Hidroconformação com <i>blanks</i> duplos.....	18
2.3.3 Hidroconformação em meio aquecido	20
2.4 Hidroconformação com Punções Rígidos	22
2.4.1 Punções rígidos simples	23
2.4.1.1 Principal Aplicação: Conformação de Abas Convexas.....	25
2.4.1.2 Mecânica da Conformação de Abas Curvilíneas	26
2.4.1.3 Limites de Conformabilidade de Abas Convexas.....	28
2.4.2 Ferramenta com Prensa-chapa (<i>Dam</i>).....	33
2.4.3 Conformação de superfícies esféricas	35
2.4.4 Punção com cavidade	37

2.5 Vantagens e desvantagens do Processo de Hidroconformação de <i>Blanks</i>	39
2.6 Métodos de Simulação Numérica do Processo de Hidroconformação de Chapas	40
3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	47
3.1 Especificação da Liga de Alumínio AA2024	47
3.2 Planejamento dos Ensaios	49
3.3 Preparação dos Corpos de Prova.....	50
3.4 Ferramentas.....	54
3.5 Equipamento	56
3.6 Placa de Poliuretano	58
3.7 Simulações Numéricas	59
3.8 Etapas Empregadas para a Realização dos Ensaios Virtuais.....	63
3.9 Etapas Empregadas para a Realização dos Ensaios Práticos.....	66
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	68
4.1 <i>Blanks</i> de 1,0 mm de espessura	72
4.2 <i>Blanks</i> de 1,27 mm de espessura.....	76
4.3 <i>Blanks</i> de 1,6 mm de espessura	79
4.4 <i>Blanks</i> de 2,0 mm de espessura	82
5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	86
Referências Bibliográficas	89
APÊNDICE A – APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS	
EMPREGANDO <i>BLANKS</i> DE 1,0 MM DE ESPESSURA	94
A.1 Raio de Curvatura de 200 mm	94
A.1.1 Altura de aba limite	94
A.1.2 Aba acima do limite de conformabilidade.....	95

A.2 Raio de Curvatura de 300 mm	96
A.2.1 Altura de aba limite	96
A.2.2 Aba acima do limite de conformabilidade	97
A.3 Raio de Curvatura de 400 mm	98
A.3.1 Altura de aba limite	98
A.3.2 Aba acima do limite de conformabilidade	99
 APÊNDICE B – APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS	
EMPREGANDO <i>BLANKS</i> DE 1,27 MM DE ESPESSURA	
101	
B.1 Raio de Curvatura de 100 mm	101
B.1.1 Altura de aba limite	101
B.1.2 Aba acima do limite de conformabilidade	102
B.2 Raio de Curvatura de 200 mm	103
B.2.1 Altura de aba limite	103
B.2.2 Aba acima do limite de conformabilidade	104
B.3 Raio de Curvatura de 300 mm	105
B.3.1 Altura de aba limite	105
B.3.2 Aba acima do limite de conformabilidade	106
B.4 Raio de Curvatura de 400 mm	107
B.4.1 Altura de aba limite	107
B.4.2 Aba acima do limite de conformabilidade	108
 APÊNDICE C – APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS	
EMPREGANDO <i>BLANKS</i> DE 1,6 MM DE ESPESSURA	
110	
C.1 Raio de Curvatura de 100 mm	110
C.1.1 Altura de aba limite	110

C.1.2	Aba acima do limite de conformabilidade	111
C.2	Raio de Curvatura de 200 mm	112
C.2.1	Altura de aba limite	112
C.2.2	Aba acima do limite de conformabilidade	113
C.3	Raio de Curvatura de 300 mm	114
C.3.1	Altura de aba limite	114
C.3.2	Aba acima do limite de conformabilidade	115
C.4	Raio de Curvatura de 400 mm	116
C.4.1	Altura de aba limite	116
C.4.2	Aba acima do limite de conformabilidade	117
APÊNDICE D – APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS		
EMPREGANDO <i>BLANKS</i> DE 2,0 MM DE ESPESSURA		119
D.1	Raio de Curvatura de 100 mm	119
D.1.1	Altura de aba limite	119
D.1.2	Aba acima do limite de conformabilidade	120
D.2	Raio de Curvatura de 200 mm	121
D.2.1	Altura de aba limite	121
D.2.2	Aba acima do limite de conformabilidade	122
D.3	Raio de Curvatura de 300 mm	123
D.3.1	Altura de aba limite	123
D.3.2	Aba acima do limite de conformabilidade	124

1 INTRODUÇÃO

O processo de hidroconformação de chapas é muito empregado em segmentos industriais nos quais há a necessidade de fabricação de componentes estampados de alta complexidade geométrica com baixas demandas de fabricação. Emprega-se como ferramenta um bloco sólido que contém as características do produto que se deseja obter. Esse processo teve sua origem alguns anos antes da Segunda Guerra Mundial, em que punções de borracha rudimentares foram criados para conformação de componentes aeronáuticos na Alemanha e apresentaram resultados pouco satisfatórios em função da falta de experiência e utilização de equipamentos precários. No entanto, após várias décadas, no final dos anos 70, o processo de hidroconformação de chapas foi visto pelas indústrias automobilísticas e aeroespaciais como um potencial aliado para a eliminação de dificuldades na fabricação de peças de elevada complexidade geométrica. A partir daquele momento, diversas ramificações do processo passaram a ser amplamente investigadas e, por consequência, suas aplicações práticas aos poucos foram sendo difundidas. Nos dias atuais, a hidroconformação é empregada com êxito na fabricação de componentes estruturais de veículos e aeronaves. (ZHANG, 1999; LANG et al., 2004; ZHANG et al., 2004; ASSEMPOUR et al., 2009)

No entanto, se o processo de hidroconformação se tornou atrativo devido a sua simplicidade e baixo custo operacional, sob outro ponto de vista, verifica-se relativa complexidade associada a uma grande quantidade de variáveis que interferem no processo. Os graus de liberdade do material, resultantes da inexistência de uma matriz rígida, associados às instabilidades do material em condições de conformação crítica possibilitam a nucleação e propagação de irregularidades na aba conformada que, dependendo da severidade, podem resultar em rugas que, em alguns casos, levam ao descarte do componente.

Considerando que rugas são defeitos característicos de chapas de pequena espessura, as quais, por sua vez, têm se destacado nos últimos anos por representarem uma importante alternativa na redução de massa e consequente melhoria na eficiência energética dos meios de transporte, nota-se que grande parte das soluções adotadas empiricamente no passado com o objetivo de reduzir as limitações do processo não satisfazem os anseios da indústria moderna (LANG et al., 2007 e SAXENA e DIXIT, 2010). Assim, as diversas lacunas no domínio técnico do processo de hidroconformação existentes até os dias atuais, principalmente no que diz respeito

à definição de parâmetros, necessitam ser sanadas o mais breve possível. Neste contexto, a evolução dos equipamentos computacionais ocorrida nos últimos anos foi uma importante ferramenta para o preenchimento destas lacunas, pois permitiu ampliar a utilização de soluções numéricas para a otimização das características do produto e do processo, reduzindo, conseqüentemente, tempo e recursos gastos nas etapas de concepção e fabricação de um novo componente.

Diante do exposto, a motivação para realização deste trabalho fundamenta-se na pequena quantidade de trabalhos científicos disponíveis em todo o mundo abordando a conformabilidade de abas em componentes de liga de alumínio através da hidroconformação, embora seja este um processo de suma importância nos segmentos industriais em que são requeridos pequenos lotes de peças. Desta forma, este estudo tem o objetivo de definir limites de conformabilidade de componentes de liga de alumínio submetidos ao processo de hidroconformação de chapas, empregando um punção rígido simples para obtenção de abas convexas. O limite de conformabilidade é definido em função da não existência de irregularidades acentuadas nas abas conformadas, conhecidas como rugas. Esta análise será feita investigando, por meio de procedimentos práticos e computacionais, a interação entre os principais parâmetros do processo: raio de curvatura, altura da aba e espessura da chapa. A compilação destas informações será útil, pois permitirá antever eventuais limitações de conformação que um componente com características geométricas preestabelecidas possa vir a ter, permitindo assim especificar adequadamente a ferramenta para o item em questão de modo a evitar a incidência das rugas ou de outros defeitos macroscópicos resultantes da conformação.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será feita uma análise dos principais aspectos do processo de hidroconformação de chapas, abrangendo o contexto histórico, os parâmetros de maior influência, características do equipamento e dos materiais mais comumente empregados.

2.1 Ligas de Alumínio

Será feita a seguir uma descrição das ligas de alumínio, mostrando sua importância e aplicabilidade na indústria automotiva e aeroespacial. Além disso, será apresentada também a classificação de tais ligas.

2.1.1 Aplicabilidade das ligas de alumínio no cenário atual

Nas últimas décadas, o aquecimento da economia global e o surgimento de diversos mercados emergentes tais como China, Índia e Brasil, foram fatores decisivos para o aumento significativo da demanda por materiais e energia, atingindo patamares críticos incapazes de serem sustentados pelas reservas naturais a médio e longo prazo.

É neste cenário que as ligas de alumínio se destacam, pois embora tenham um custo aproximadamente cinco vezes superior à maioria dos aços, têm ganhado cada vez mais destaque nos segmentos industriais que primam pela redução de peso e eficiência energética de seus produtos, uma vez que apresentando peso específico cerca de três vezes inferior ao dos aços, são capazes de oferecer valores de resistência mecânica equivalentes ao de um aço de baixo carbono, combinando ainda elevada resistência à corrosão e tenacidade satisfatória. Com tais

características, os componentes fabricados a partir de ligas de alumínio tornam-se protagonistas no que diz respeito à redução nos índices de emissão de poluentes.

Ingarao et al. (2011) apresentam a quantidade de toneladas de dióxido de carbono (CO₂) não emitida na atmosfera em função da crescente incorporação de componentes de alumínio nas principais categorias de meios de transporte (Figura 2.1). Em um caminhão de médio porte, por exemplo, a incorporação de componentes de alumínio pode resultar em uma redução de até 2000 kg na massa total do equipamento, que por sua vez corresponde a 16 milhões de toneladas de CO não liberados na atmosfera.

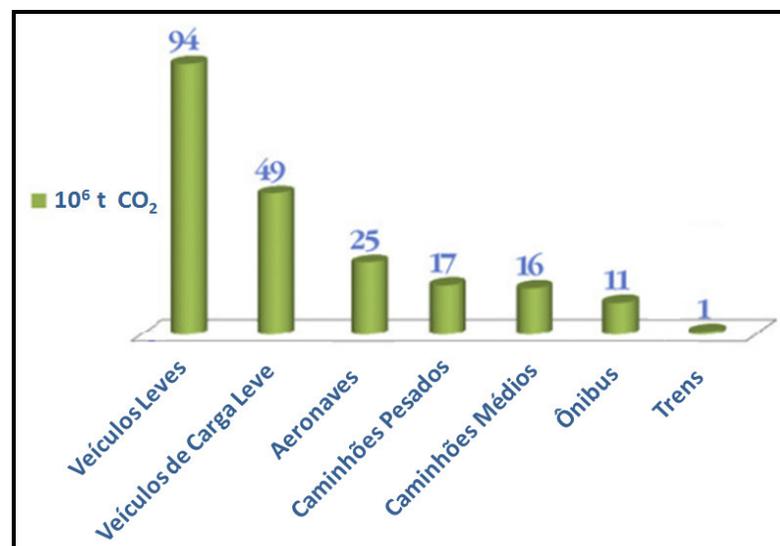


Figura 2.1 – Redução na emissão de CO₂ em função da redução de peso das principais categorias de transporte (INGARAO et al., 2011).

2.1.2 Classificação das ligas de alumínio

As ligas de alumínio são classificadas, de acordo com *Aluminum Association*, órgão responsável pela regulamentação das ligas de alumínio, em oito principais categorias conforme apresentado na tabela 2.1. Esta divisão é feita considerando-se os principais elementos de liga presentes no material, os quais têm a finalidade de garantir propriedades mecânicas específicas. Desta forma, a vasta possibilidade de combinar elementos de liga distintos com frações

percentuais variáveis na matriz de alumínio permite que as ligas sejam capazes de atender aos mais diversos requisitos exigidos pela indústria (HATCH, 1984).

Tabela 2.1 – Classificação das ligas de alumínio segundo *Aluminum Association* (HATCH, 1984)

Série 1000	<p>Série do alumínio puro (99,9%) também denominado comercial. Destaca-se pela resistência à corrosão, altos índices de condutividade térmica e elétrica e baixa resistência mecânica.</p> <p>Principais aplicações: Fabricação de utensílios domésticos, trocadores de calor, indústria química e farmacêutica e revestimentos de outras séries contra corrosão (camada alclad).</p>
Série 2000	<p>O cobre é o principal elemento de liga. Quando submetida a tratamentos térmicos de endurecimento por precipitação, esta liga apresenta alta resistência mecânica, alta ductilidade e boa usinabilidade.</p> <p>Principais aplicações: Indústria aeronáutica e equipamentos mecânicos em geral.</p>
Série 3000	<p>O manganês é o principal elemento de liga, materiais desta série não são tratáveis termicamente. Apresentam bons índices de resistência mecânica, de conformabilidade e soldabilidade.</p> <p>Principais aplicações: Tubos para trocadores de calor (radiadores) e antenas de TV.</p>
Série 4000	<p>Tem como principal elemento de liga o silício. Apresenta baixo ponto de fusão e não pode ser submetida a tratamentos térmicos.</p> <p>Principal aplicação: Material de adição em soldas de ligas de alumínio.</p>
Série 5000	<p>O magnésio é o principal elemento de liga. Tem aplicação é similar a da série 3000.</p> <p>Principais aplicações: Equipamentos de transporte e vergalhões para rebites.</p>
Série 6000	<p>Liga composta por Al-Mg-Si, podem ser endurecidas por precipitação para aumento de resistência mecânica. Apresentam ainda bons valores de conformabilidade e de resistência à corrosão.</p> <p>Principais aplicações: Fabricação de componentes da indústria naval, automobilística e aeronáutica.</p>
Série 7000	<p>Tem o zinco como o principal elemento de liga. Dentre todas as séries é a que apresenta os melhores valores de resistência mecânica e tenacidade quanto endurecida por precipitação.</p> <p>Principais aplicações: Fabricação de componentes aeronáuticos, máquinas e moldes.</p>
Série 8000	<p>O principal elemento de liga é o lítio.</p>

Além dos inúmeros benefícios descritos, as ligas de alumínio em geral apresentam ainda bons índices de conformabilidade, fomentando a realização de inúmeros trabalhos científicos no sentido de aprimorar o desempenho de tais ligas nos mais variados processos de conformação.

2.1.3 Ligas de alumínio empregadas na indústria aeronáutica

Embora diversos estudos apontem materiais compostos de fibra de carbono como uma tendência no segmento aeroespacial, os custos de fabricação e os requisitos de qualificação e implantação destes compostos limitam o sucesso e a aplicabilidade de tais materiais em aeronaves modernas e mantêm o destaque das ligas de alumínio como principais matérias-primas para fabricação de fuselagens e componentes estruturais. A razão para o sucesso destas ligas é a constante evolução pela qual elas passam, desde a década de 30, quando foram empregadas pela primeira vez por uma indústria aeronáutica, até os dias atuais, aprimorando continuamente a relação entre resistência mecânica e peso específico (WILLIAMS et al., 2003). Na figura 2.2 é apresentado o aumento do limite de escoamento alcançado por diversas ligas desenvolvidas nos últimos 80 anos.

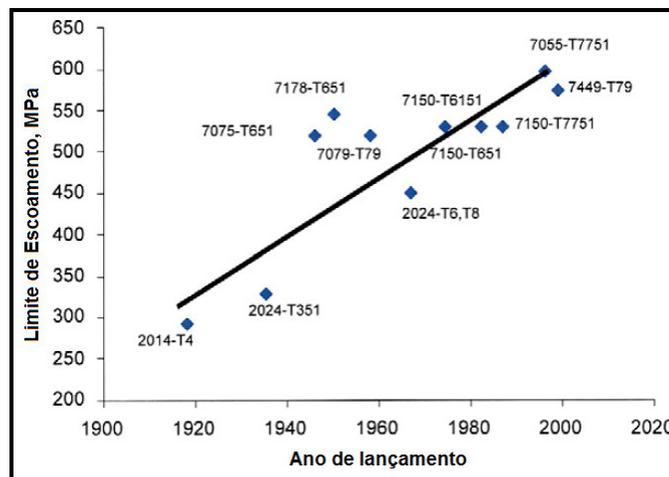


Figura 2.2 – Evolução das propriedades mecânicas das ligas de alumínio no século XX (WILLIAMS et al., 2003).

A liga 2024, embora apresente valores de resistência mecânica inferiores aos verificados para ligas da série 7000, destaca-se por diversos outros pontos favoráveis, tais como elevada resistência à fratura e à corrosão, além de tenacidade a fratura satisfatória, que garantem sua vasta aplicabilidade nos mais variados componentes estruturais aeronáuticos.

As ligas de alumínio empregadas no segmento aeronáutico são usualmente submetidas a um revestimento metálico denominado *clad*. Este revestimento consiste em uma fina camada de alumínio de elevada pureza que atua como uma barreira catódica, capaz de reduzir o potencial elétrico e, conseqüentemente, reduzir a tendência à formação de pequenas cavidades ocasionadas pela corrosão na superfície do metal, denominadas *pittings*. Desta forma, esta camada protege o substrato contra corrosão quando exposto a ambientes agressivos como aqueles em que aeronaves atuam (PRESUEL-MORENO et al., 2008).

Além da proteção *clad*, as ligas de alumínio empregadas na fabricação de aeronaves caracterizam-se por serem endurecíveis por precipitação. É importante ressaltar que as alterações metalúrgicas verificadas em tais ligas durante os tratamentos térmicos são significativamente diferentes daquelas observadas para os aços, embora a sequência de operações seja similar. Flow Pressure Systems AB (2002) descreve, de modo simplificado, as principais etapas desse tratamento.

A condição recozida, ou ainda “O”, é alcançada por meio de deformação plástica, usualmente resultante da operação de laminação ou extrusão, seguida de um tratamento térmico capaz de promover uma recristalização da estrutura do material. Os tempos e temperaturas de tratamento variam entre 350 °C e 400 °C dependendo da composição e características geométricas do material.

Os elementos de liga (cobre, zinco, magnésio e outros) adicionados à matriz de alumínio são solúveis na estrutura no momento da recristalização. Todavia, à medida que a temperatura cai, a solubilidade decresce e os elementos de liga precipitam-se na forma de partículas de segunda fase responsáveis por distorcer a microestrutura do material e dificultar o movimento das discordâncias, as quais, por sua vez, são responsáveis pela deformação plástica. Embora dificulte a deformação em alguns pontos, o resfriamento natural não pode ser visto como um método capaz de aumentar a resistência mecânica do material, uma vez que o particulado formado é distinto em tamanho e está distribuído na estrutura de forma muito irregular. O tratamento de endurecimento por precipitação tem justamente a função de promover a distribuição uniforme das

partículas de segunda fase, proporcionando ganhos significativos em termos de propriedades mecânicas. Este tratamento térmico é composto pelas etapas de aquecimento, resfriamento brusco e envelhecimento, as quais serão brevemente descritas a seguir.

Aquecimento: A liga deve ser aquecida até uma temperatura próxima à temperatura de fusão, usualmente na faixa de 500 °C e mantida nesta condição até que ocorra a dissociação completa dos elementos de liga, o que leva entre 10 e 30 minutos.

Resfriamento Brusco: Depois de concluído o processo de dissociação dos elementos, o material deve ser transferido imediatamente para um tanque contendo água a 40 °C, de modo a resfriá-lo bruscamente até a temperatura ambiente. Caso a transferência não seja feita em um tempo inferior a 10 segundos a precipitação começa a ocorrer de forma desordenada, prejudicando os ganhos esperados com resistência mecânica. Nesta etapa observa-se significativo empenamento das peças ocasionado pelo surgimento de tensões internas não-uniformes. A finalidade do resfriamento brusco é então trazer para temperatura ambiente a mesma solubilidade dos elementos de liga alcançada em temperaturas elevadas. Esta condição instável é definida como AQ (do inglês *as quenched*, que significa após resfriado) ou ainda *W*. É importante ressaltar que a nomenclatura AQ não é oficialmente reconhecida pela *Aluminum Association*, mas é uma maneira corriqueiramente empregada no meio industrial para se definir a condição obtida imediatamente após a conclusão do tratamento térmico.

Envelhecimento: Nesta etapa as partículas de segunda fase tendem a se agrupar ordenadamente, garantindo ao material maior resistência mecânica e menor ductilidade. Para algumas ligas este processo de aglomeração ocorre naturalmente em poucos minutos. Para outras pode ser necessário alguns dias. Nestes casos recorre-se a um artifício, denominado envelhecimento artificial, que consiste em submeter os componentes tratados termicamente em um ambiente brandamente aquecido, com uma temperatura de aproximadamente 200 °C, com o objetivo de acelerar o processo de agrupamento. Na nomenclatura de materiais envelhecidos é acrescentado o sufixo “T” (temperado). Na figura 2.3 é apresentado um comparativo, desenvolvido por Sala (2001), das curvas tensão x deformação da liga 2024 na condição recozida (*O*) e após tratamento térmico (*W*) comprovando o acréscimo de resistência verificado na condição final do material.

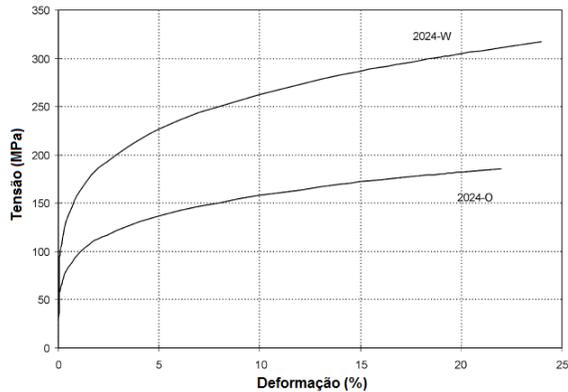


Figura 2.3 – Comparativo das curvas tensão x deformação da liga 2024 na condição O e W (SALA, 2001).

A conformação das ligas de alumínio pode ser executada tanto na condição *O* quanto *AQ/W* sendo a escolha feita em função das características do produto. Nos casos em que se necessita de elevados percentuais de estiramento, a conformação na condição recozida é a mais indicada, pois além de possibilitar alcançar maiores taxas de deformação, o tratamento térmico exerce também a função de aliviar as tensões internas do material. Por outro lado, em componentes de geometria menos complexa, a conformação na condição *O* não é vantajosa devido ao grande empenamento verificado durante o tratamento térmico, requerendo novas operações de conformação após o endurecimento para correção dos desvios.

Neste trabalho, optou-se por empregar a liga 2024 *clad*, na condição recozida, com o objetivo de se evitar a influência das instabilidades do material na condição *AQ/W* nos resultados experimentais.

2.2 Classificação dos Processos de Estampagem

Os avanços tecnológicos nos processos primários de laminação tornaram possível produzir maiores quantidades de chapas metálicas com custos menores. Por sua vez, a grande demanda mundial por automóveis, aeronaves e componentes metálicos diversos na última década fez com que grande fração destes laminados fosse então direcionada aos processos secundários de

estampagem capazes de converter chapas em produtos com geometrias variadas (MARNICIAK et al., 2002). Tais processos caracterizam-se por serem usualmente realizados a frio e consistem em submeter uma chapa plana a diversas transformações por meio da ação de punções e matrizes. Os esforços gerados pelas ferramentas permitem obter geometrias tridimensionais garantidas pela interação de estiramentos e compressões que ocorrem nos volumes infinitesimais que compõem o material (DIETER, 1988). Deste modo, pode-se afirmar que um processo de estampagem é decorrente da combinação em maior ou menor escala dos processos básicos de dobramento, estiramento e embutimento, descritos a seguir.

2.2.1 Dobramento

Caracterizado por ser o mais simples dentre os processos de estampagem, o dobramento consiste em executar uma dobra em linha reta empregando-se um punção e uma matriz com formato em “V”. Os raios de dobra empregados são pequenos e, desta forma, atuam em uma região específica do material promovendo assim uma conformação localizada, isentando as outras regiões do componente de qualquer esforço ou tensão residual (DUFLOU et al., 2005). Na figura 2.4 é apresentado um modelo esquemático da operação de dobramento e os principais parâmetros do processo. Além disso, na mesma figura são apresentados alguns componentes dobrados.

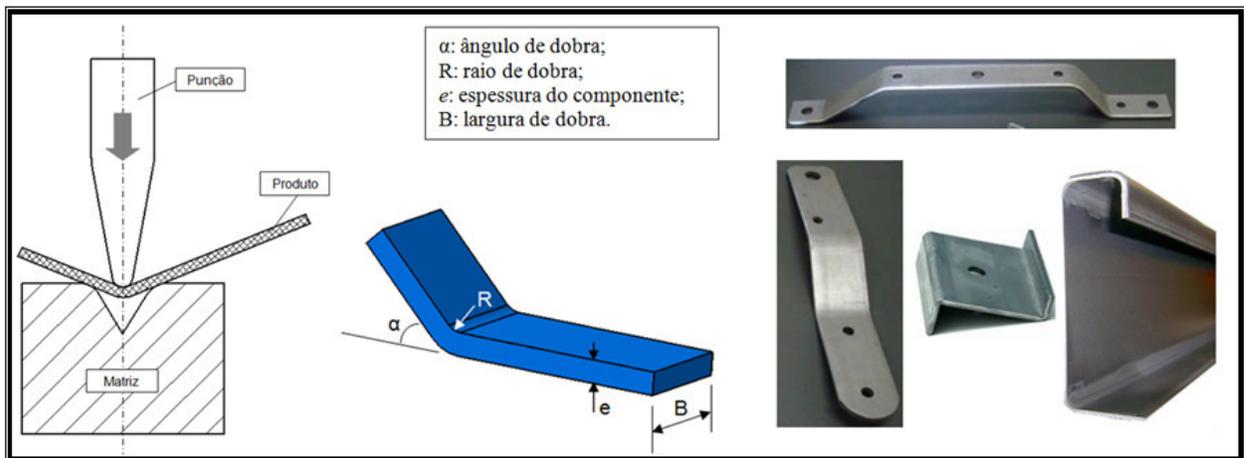


Figura 2.4 – Modelo esquemático da operação de dobramento (DIETER, 1988).

De acordo com Dieter (1988), à medida que a deformação plástica vai ocorrendo, a linha neutra vai sendo deslocada para a direção da superfície interna do produto. Como a deformação dos elementos é proporcional à distância entre eles e a linha neutra, as fibras localizadas na superfície externa do material estão sujeitas a esforços de tração numericamente maiores que os esforços de compressão sofridos pelas fibras internas, conforme representado na figura 2.5.

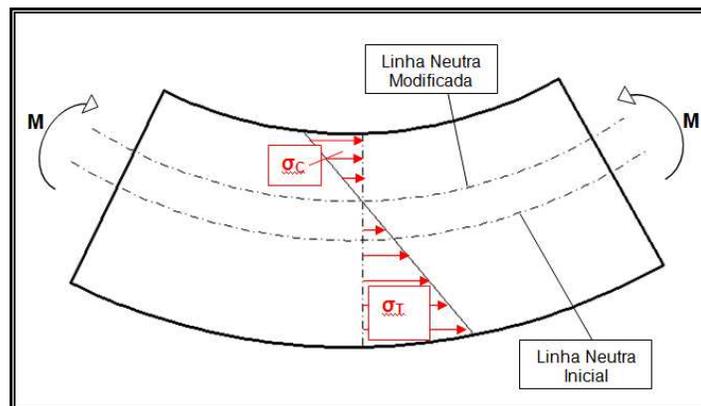


Figura 2.5 – Esquema dos esforços sofridos pela chapa durante a operação de dobramento. (MARNICIAK et al., 2002 – adaptada).

Com o objetivo de evitar falhas no material devido a um tracionamento excessivo, a norma AMS-QQ-A-250/5A (2007) estabelece um fator denominado N, que especifica um raio mínimo de dobra em função da espessura e das características do material empregado capaz de limitar a intensidade dos esforços na região das fibras externas. O cálculo é feito multiplicando-se o valor de N pela espessura do *blank*. O resultado desta operação refere-se ao menor diâmetro que pode ser empregado para obtenção de uma dobra de 180°, de acordo com o procedimento experimental definido pela ASTM E290 (2009) apresentado na figura 2.6.

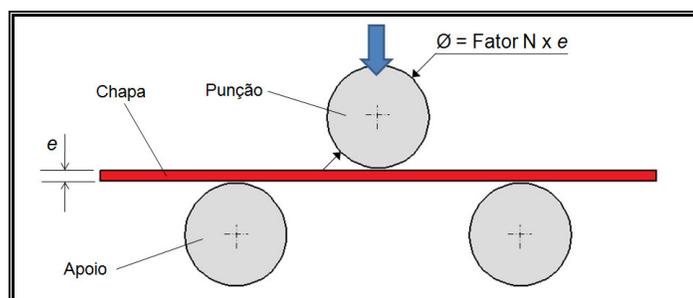


Figura 2.6 – Ensaio de dobra utilizando fator N (ASTM E290, 2009).

Posteriormente, será visto que a mecânica da formação de rugas no processo de hidroconformação, estudado neste trabalho, se assemelha fortemente à descrita nesse tópico para a operação de dobramento.

2.2.2 Estampagem Profunda

A aplicação mais comumente empregada deste método é voltada para conformação de copos a partir de *blanks* em formato de disco. À medida que o punção executa o seu movimento de descida em uma cavidade circular localizada no centro da ferramenta, a parede lateral do copo vai sendo formada e o diâmetro do disco é gradativamente reduzido. Neste processo, um prensa-chapas é utilizado para restringir os graus de liberdade do disco e também para evitar a formação de rugas durante o embutimento. Um modelo esquemático do processo é apresentado na figura 2.7.

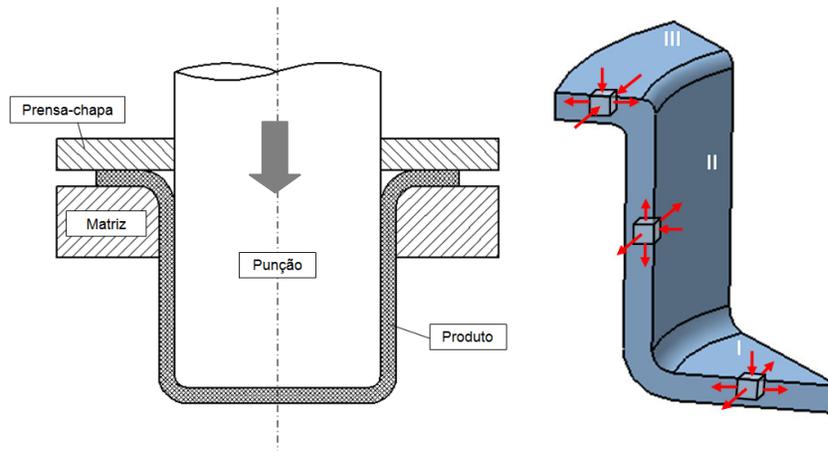


Figura 2.7 – Modelo esquemático do processo de embutimento e estados de tensão em elementos de diferentes regiões do componente (DIETER, 1988 – adaptado).

Analisando a região I nota-se que o material está submetido a tensões biaxiais de tração e com isso tende a adquirir as características geométricas do punção. Já na região III, a redução do diâmetro do disco é acompanhada de tensões compressivas na direção tangencial, que tendem a

originar rugas em chapas de menor espessura, caso o prensa-chapas não seja utilizado, pois segundo Bresciani Filho et al. (1986), em chapas mais espessas os esforços de compressão não são suficientes para provocar o enrugamento da aba. O resultado dos estados de tensão nas regiões I e III dá origem a esforços de estiramento no sentido longitudinal e compressivos na direção radial dos elementos da região II, os quais compõem a parede do copo conformado.

2.2.3 Estiramento

O processo de estiramento se caracteriza por possibilitar a obtenção de componentes com gradientes de tensão relativamente uniformes em toda a sua extensão. Com isso, é possível reduzir significativamente a incidência de retorno elástico (*spring-back*), uma das principais adversidades dos processos de conformação, pois permite que as tensões elásticas residuais promovam uma distorção do componente após a remoção dos esforços.

O processo de estiramento é restrito a materiais com boa ductilidade capazes de suportar altas taxas de deformação, uma vez que os níveis de tensão de tração impostos para obtenção de um componente de boa qualidade são bastante elevados (DIETER, 1988).

O estiramento tem princípio análogo ao embutimento. No entanto, neste caso, o esforço imposto à chapa é bastante alto e verifica-se uma significativa redução de espessura do componente devido ao travamento do disco por meio da utilização de *draw beads* (ver figura 2.8) durante a descida do punção.

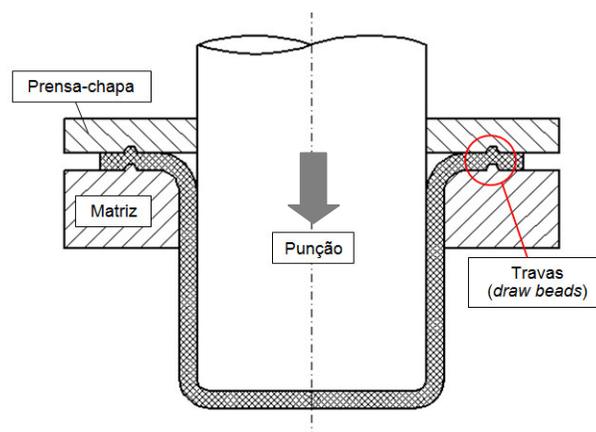


Figura 2.8 – Processo de embutimento profundo por estiramento.

Golovashchenko et al. (2011) avaliaram as limitações do processo de estiramento para componentes de alumínio de geometria complexa. Tais componentes, segundo os autores, apresentam regiões críticas, que se conformadas nos processos convencionais de estampagem, excedem os limites de conformabilidade do material, devido, majoritariamente, à grande profundidade de conformação requerida ou ainda aos pequenos raios exigidos em regiões de intenso estiramento, que atuam como potentes concentradores de tensão. Uma possível alternativa para o saneamento deste problema é a divisão da operação em dois ou mais estágios intercalados com tratamentos térmicos capazes de eliminar boa parte das discordâncias acumuladas na estrutura do material, permitindo desta forma, promover um movimento adequado da chapa sem que ocorra ruptura nas regiões de maior solicitação. No entanto, de acordo com os autores, os melhores resultados para o estudo em questão foram obtidos empregando-se uma combinação do processo convencional de estiramento, responsável por definir as características iniciais do produto, e uma etapa de hidroconformação, a qual foi capaz de conduzir o material por toda a extensão da ferramenta sem ocasionar a ruptura do componente.

A seguir serão apresentadas as principais subdivisões do processo de hidroconformação, que combinam características dos métodos de estampagem descritos anteriormente e permitem conformar componentes com geometrias diversas, atendendo a rígidos requisitos dimensionais.

2.3 O Processo de Hidroconformação

O processo de conformação com emprego de meio líquido é uma tecnologia recente que teve seus primeiros desenvolvimentos no início da década de 40, pouco antes da Segunda Guerra Mundial. Entretanto, nas últimas décadas, a crescente necessidade por componentes com geometria complexa e por métodos mais econômicos de fabricação ampliou significativamente o campo de aplicação da hidroconformação, despertando assim o interesse de pesquisadores em todo o mundo para o desenvolvimento de estudos capazes de tornar o processo cada vez mais robusto e com maior aplicabilidade (LANG et al., 2004).

Diversas ramificações da hidroconformação foram criadas com o objetivo de garantir a conformabilidade de diversas geometrias além de possibilitar atingir melhores índices de conformabilidade e faixas de tolerâncias mais apertadas. Na figura 2.9 são apresentadas as principais categorias do processo de hidroconformação (YADAV, 2008).

Nos ensaios experimentais deste trabalho, as forças de conformação serão resultado de pressão hidráulica, exercida por óleo pressurizado, transferida ao produto por meio de uma membrana de borracha, sendo classificado, portanto, como um processo que utiliza punção rígido e matriz hidráulica. No entanto, antes de abordá-lo, será feita uma breve apresentação, nos tópicos seguintes, dos outros processos classificados por Yadav (2008).

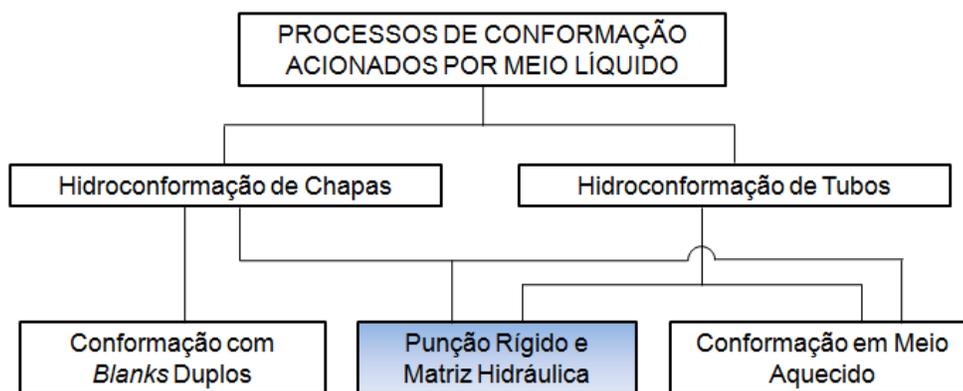


Figura 2.9 – Classificação dos processos de hidroconformação.

2.3.1 Hidroconformação de Tubos

De acordo com LANG et al. (2004) e KEIGLER et al. (2005), o processo de hidroconformação de tubos tornou-se bastante empregado na indústria automotiva pelo fato de possibilitar a fabricação de componentes com seções transversais variáveis com alta resistência mecânica, elevada precisão dimensional e baixos valores de *spring-back*. Na figura 2.10 é apresentado o princípio deste tipo de hidroconformação. Neste processo, um tubo é inserido no interior das matrizes que apresentam a geometria externa do componente a ser fabricado. Na sequência, dois punções móveis são inseridos e passam a exercer esforços capazes de vedar as extremidades do tubo e gerar tensões compressivas que fazem com que a conformabilidade do

componente seja aumentada. A partir desse momento, o fluido pressurizado é injetado no interior do tubo expandindo-o contra a parede da matriz, adquirindo então a geometria da ferramenta.

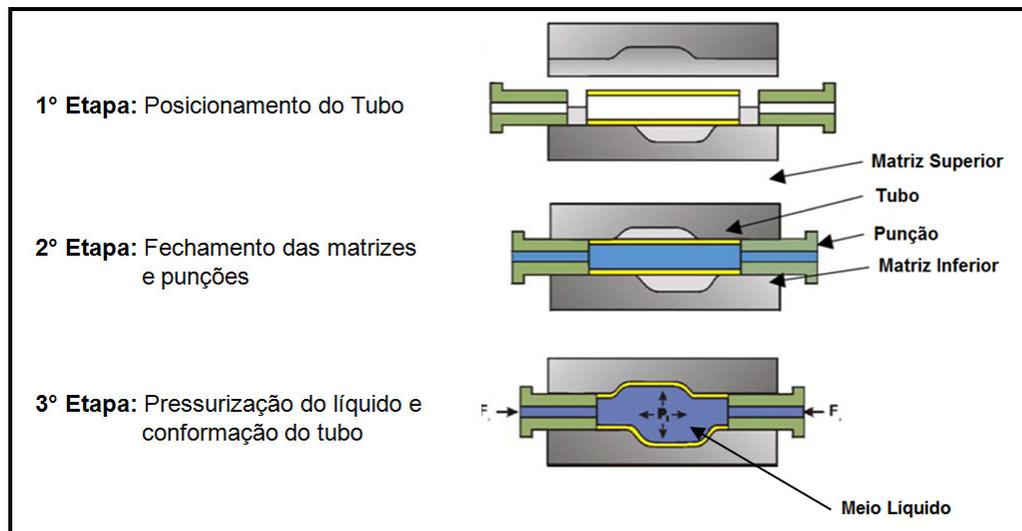


Figura 2.10 – Etapas do processo de hidroconformação de tubos (KEIGLER et al., 2005).

A hidroconformação de tubos, embora bastante simples conceitualmente, apresenta algumas limitações, que de acordo com Bortolussi (2001) devem ser respeitadas para garantir a qualidade do produto conformado, sendo elas:

- **Comprimento das regiões sem variação no diâmetro da seção transversal:** Estas regiões não devem exceder duas vezes o diâmetro externo inicial do tubo. Esta restrição tem o propósito de evitar o surgimento de flambagem, ou ainda a ocorrência de ruptura no material (Figura 2.11 “a”).
- **Raio de curvatura axial:** Quando for requerido, este raio deve ser pelo menos cinco vezes maior que o diâmetro externo inicial do tubo (Figura 2.11 “b”).
- **Seções longitudinais:** As ferramentas não devem ser projetadas com mudanças bruscas de diâmetro na seção longitudinal, pois tais variações súbitas podem provocar enrugamentos localizados que prejudicam o fluxo do material na direção axial.

- **Relação entre o diâmetro final do tubo e a espessura da parede:** Razões entre 20 e 45 são as mais adequadas para a relação entre o diâmetro final do tubo e a espessura da parede, respectivamente. Se esta relação ultrapassar 45, a probabilidade de ocorrência de falha é bastante elevada e por outro lado, valores inferiores a 20 não proporcionam índices de deformação adequados para garantir a qualidade do componente.

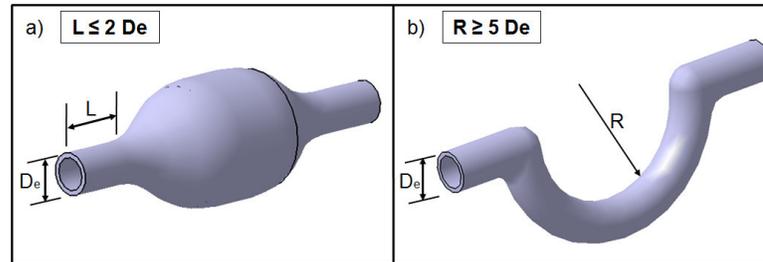


Figura 2.11 – Principais restrições do processo de hidroconformação de tubos.

Crapps et al. (2010) avaliaram o desempenho do processo hidroconformação de tubos de cobre em formato “T”. Por meio de ensaios práticos e simulações os autores puderam definir variáveis de entrada do processo (pressão do fluido e velocidade de preenchimento) capazes de inibir a ocorrência de rugas, ruptura ou redução excessiva de espessura. Na figura 2.12 são apresentados dois comparativos entre resultados experimentais e de simulação. Do lado esquerdo, tem-se uma condição adequada de conformação enquanto do lado direito, observa-se uma condição limite que favorece o aparecimento de rugas. A análise dos comparativos permite verificar a elevada precisão do método de simulação empregado em relação ao processo real, possibilitando antever situações críticas de operação sem a necessidade de executá-las na prática.

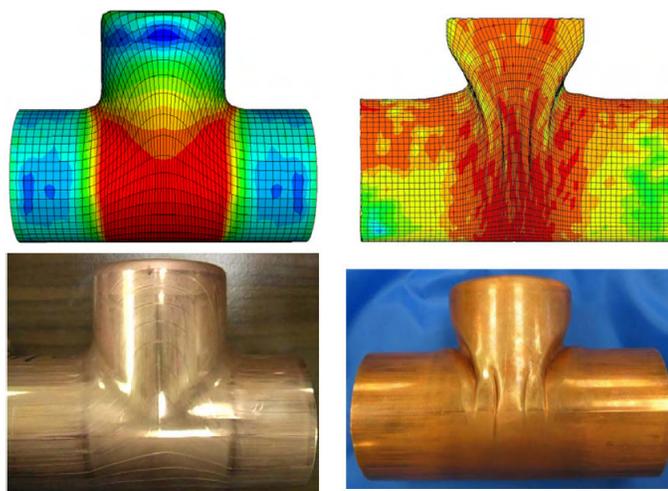


Figura 2.12 – Comparativo de simulações e resultados experimentais da hidroconformação de tubos de cobre em “T” (CRAPPS et al., 2010).

2.3.2 Hidroconformação com *blanks* duplos

No processo de hidroconformação com *blanks* duplos, duas chapas planas ou pré-conformadas, que podem inclusive apresentar espessuras distintas, são introduzidas, individualmente ou já soldadas, em um vão existente entre as matrizes superior e inferior. As chapas são fixadas por suas extremidades e fluido pressurizado é injetado entre elas, forçando-as contra as matrizes que têm as características dimensionais do componente que se deseja obter. Um modelo esquemático das etapas do processo é apresentado na figura 2.13. Embora um pouco mais complexa, a operação com *blanks* duplos é uma alternativa em relação à hidroconformação de tubos, pois com ela é possível obter componentes com geometrias complexas que requeiram grandes variações nos diâmetros das seções transversais (YADAV, 2008).

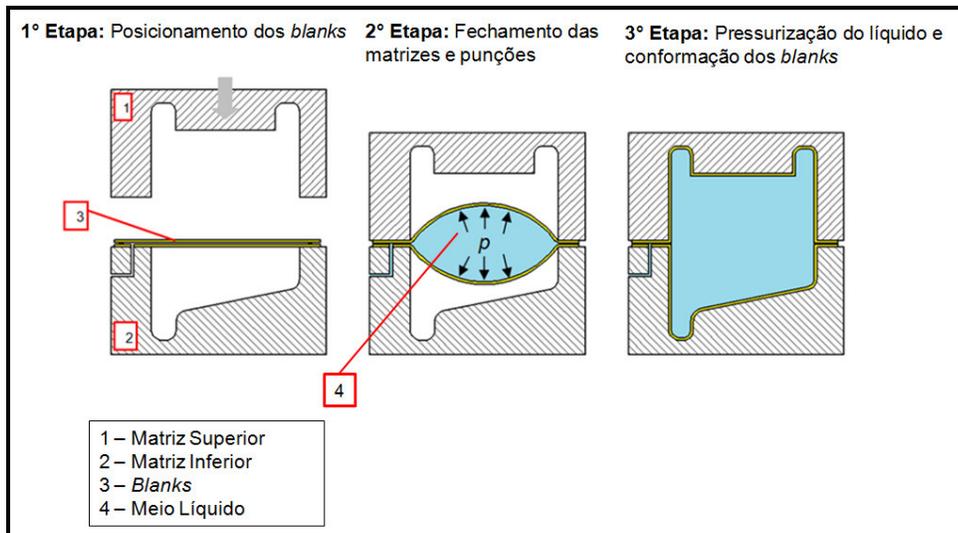


Figura 2.13 – Etapas do processo de hidroconformação com *blanks* duplos (YADAV, 2008).

De acordo com Hein et al. (1999), a conformação com *blanks* duplos permite promover uma distribuição homogênea de pressão em toda a extensão das chapas, aumentando assim a resistência do componente à torção. Além disso, o emprego deste processo faz com que muitas vezes o componente já saia pronto, eliminando, deste modo, a necessidade de solda para junção. Na figura 2.14 é apresentado um modelo de um componente de suspensão automotiva com algumas seções transversais evidenciando as geometrias não uniformes que podem ser obtidas neste processo.

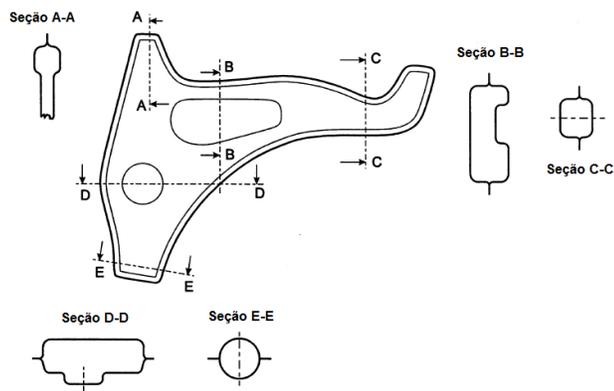


Figura 2.14 – Componente automotivo fabricado pelo processo de conformação de *blanks* duplos (HEIN et al., 1999).

Merklein et al. (2005) desenvolveram uma ferramenta que possibilitou combinar a hidroconformação de tubos e de *blanks* duplos, proporcionando a fabricação de um componente de alta complexidade com matérias-primas distintas em apenas um ciclo de fabricação. A maior dificuldade se deu na região de junção entre a região de tubo de aço IF260 e das chapas de aço maleável FePO4. Entretanto com o auxílio de um *software* de simulação, foi possível definir condições que satisfizessem os limites de conformabilidade dos materiais e permitissem a fabricação do componente apresentado na figura 2.15.

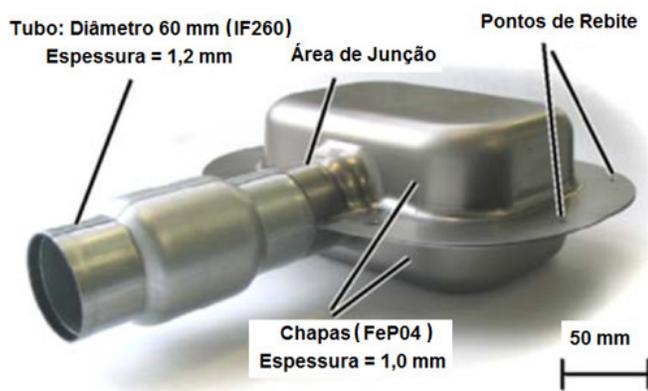


Figura 2.15 – Componente resultante de hidroconformação combinada: tubos e *blanks* duplos (MERKLEIN et al., 2005).

2.3.3 Hidroconformação em meio aquecido

De acordo com Mahabunphachai et al. (2010), a escassez de combustíveis fósseis e as mudanças climáticas associadas ao aquecimento global fizeram com que as indústrias automotivas e aeroespaciais se voltassem nos últimos anos para o desenvolvimento de equipamentos mais eficientes em termos de consumo de combustíveis e por consequência, mais corretos ecologicamente. A forma mais simples de alcançar melhor rendimento é por meio da redução da massa do sistema, o que pode ser conseguido de forma consistente substituindo chapas de aço empregadas na estrutura do componente por ligas de alumínio ou de magnésio. No entanto, sob o ponto de vista de conformabilidade, estas ligas designadas como leves apresentam módulos de elasticidade significativamente inferiores aos observados para os aços, o que resulta em maior suscetibilidade à formação de rugas e à ocorrência de *spring-back*.

A execução da operação de conformação em temperaturas elevadas é uma alternativa interessante na compensação da perda da capacidade de escoamento, pois valores próximos à temperatura de recristalização ativam planos adicionais de deslizamento que garantem melhores índices de deformação. Na figura 2.16, são apresentados curvas de tensão x deformação das ligas AA5182 e AA6016 em diferentes temperaturas, evidenciando a influência da temperatura na conformabilidade do material.

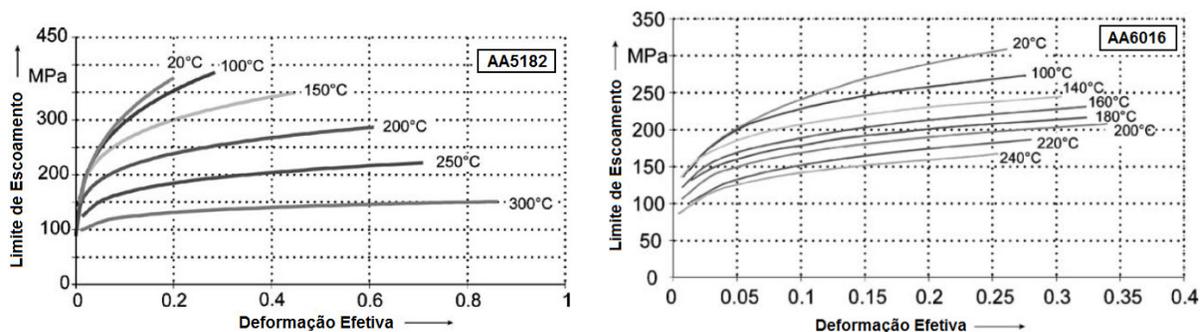


Figura 2.16 – Curvas tensão x deformação de ligas de alumínio obtidas em diferentes temperaturas (NOVOTNY e GEIGER, 2003).

A temperatura ideal de conformação varia em função da composição química do material a ser conformado. No caso de ligas de alumínio, o aquecimento excessivo pode resultar em crescimento de grãos ou até mesmo contribuir para a ocorrência de um envelhecimento da liga por meio da precipitação de seus elementos (NOVOTNY e GEIGER, 2003).

Para atender as necessidades da indústria que manipulam estas novas ligas, a hidroconformação em meio aquecido tem se tornado nos últimos anos um dos principais focos de estudos acadêmicos dentre todas as variações do processo de hidroconformação. Esse processo pode ser classificado, de acordo com Yadav (2008), em dois sub-processos, sendo eles:

1) Hidroconformação com matriz aquecida: Neste processo, algumas regiões da matriz e do prensa-chapas são aquecidas, mas o meio hidráulico permanece em temperatura ambiente. Assim, à medida que a conformação se desencadeia, o fluido tende a resfriar as regiões da chapa mais distantes das bordas aquecidas e com isso aumenta a resistência da mesma de modo a suportar conformações mais profundas, além de postergar a falha devido à redução excessiva da espessura.

2) **Hidroconformação com fluido aquecido:** Neste processo, a chapa, as matrizes superior e inferior e o óleo são aquecidos até a temperatura desejada. Em seguida, a chapa é travada entre as matrizes e o meio hidráulico aquecido força-o contra a matriz inferior de modo a adquirir a sua forma. Assim como no caso da matriz aquecida, o principal benefício deste processo é garantir ao material melhor conformabilidade sem ocasionar, no entanto, redução significativa de espessura que possa comprometer a integridade do componente conformado.

Mahabunphachai et al. (2010) realizaram testes de embutimento com as ligas AA5052 e AA6061 empregando o processo de hidroconformação com aquecimento do óleo hidráulico e também da matriz. Na figura 2.17, são apresentados os componentes das duas ligas conformados em diferentes pressões e temperaturas, na qual pode-se observar que os componentes conformados a temperatura de 300 °C apresentam os melhores resultados em termos de conformabilidade.

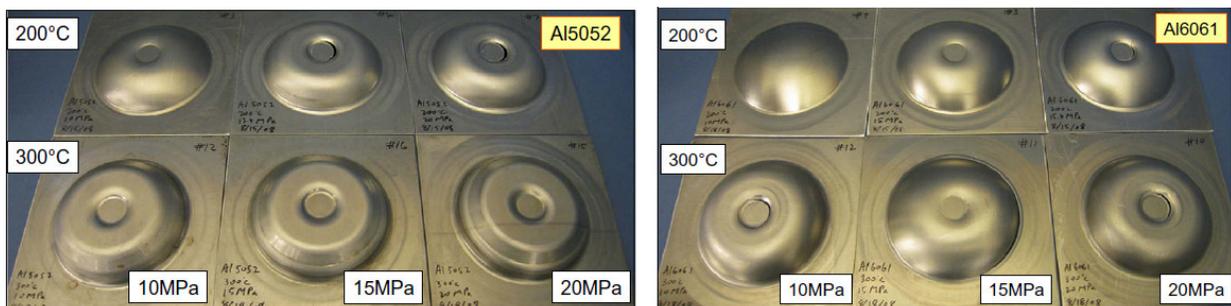


Figura 2.17 – Ensaio de embutimento realizados no processo de hidroconformação em temperaturas elevadas (MAHABUNPHACHAI et al., 2010).

2.4 Hidroconformação com Punções Rígidas

Os punções rígidos empregados no processo de hidroconformação apresentam-se em diferentes aspectos com o objetivo de atender as necessidades de conformação, como mostrado a seguir.

2.4.1 Punções rígidos simples

De um modo geral, pode-se afirmar que a hidroconformação de chapas com punções rígidos é, dentre os processos de conformação, o mais empregado para a fabricação de componentes de geometria complexa e com baixas demandas de produção, insuficientes para viabilizar o investimento em ferramentas tradicionais de maior custo financeiro. Os punções podem ser feito de plástico, madeira laminada, ligas metálicas com baixo ponto de fusão, ligas de alumínio e aço. Na tabela 2.2, são apresentadas as principais características de cada um destes materiais.

Tabela 2.2 – Materiais utilizados para fabricação de punções rígidos (ABB METALLURGY, 1990)

Material	Plástico (Epoxy / Poliuretano)	Madeira Laminada de Alta Resistência	Ligas com Baixo Ponto de Fusão (Zamac)	Ligas de Alumínio	Aço
Dureza (HB)	20-28	40	100 - 120	50 - 70	530
Usinabilidade	Razoável	Boa	Muito Boa	Boa	Difícil
Vida Útil	500 ciclos	1.500 ciclos	15.000 ciclos	1.500 ciclos	1.000.000 ciclos
Máx. Pressão	100 MPa	140 MPa	200 MPa	140 MPa	> 200 MPa

Material	Características
Plástico (Epoxy / Poliuretano)	- Baixo custo da matéria-prima; - Bolhas na estrutura do material podem inutilizar o bloco.
Madeira Laminada de Alta Resistência	- Garante melhor qualidade superficial ao componente conformado; - Material caro: poucos fornecedores qualificados no mundo.
Ligas com Baixo Ponto de Fusão (Zamac)	Facilidade na fundição possibilitando o reaproveitamento do material.
Ligas de Alumínio	Material que apresenta boa combinação de custo, facilidade na usinagem e durabilidade.
Aço	Ideal para fabricação de grandes lotes de peças com elevada espessura (até 16 mm).

Além disso, o processo de hidroconformação de chapas destaca-se pela simplicidade no que diz respeito à fabricação de componentes com abas côncavas e convexas em que os esforços impostos pela pressão do óleo sobre uma membrana de borracha são transferidos uniformemente para o *blank* fazendo-o adquirir a forma da ferramenta empregada sem ocasionar redução de espessura excessiva ou acúmulo de material na região da aba conformada (LANG et al., 2004; ASSEMPOUR et al., 2009). Na figura 2.18, é apresentado um modelo esquemático do processo.

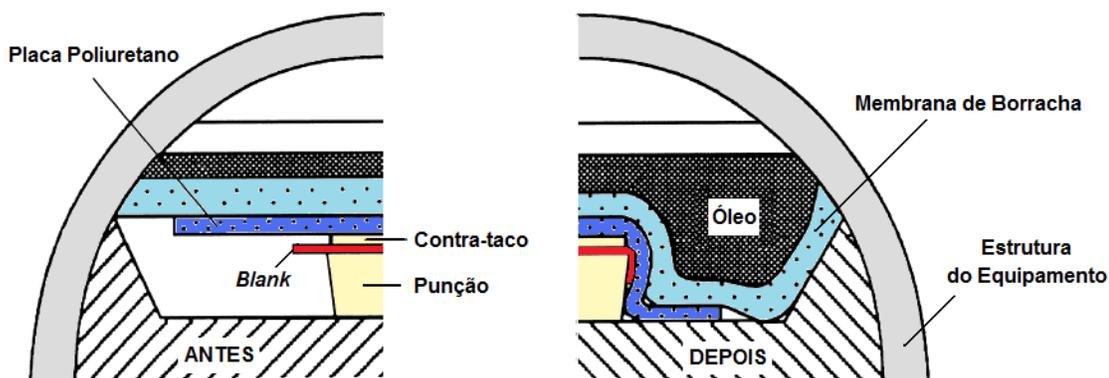


Figura 2.18 – Modelo esquemático do processo de hidroconformação de abas (ASNAFI, 1999).

Entre a membrana de borracha e o *blank* emprega-se uma placa de poliuretano com dureza média de 90 *Shore A*, com capacidade de se deformar elasticamente durante os ciclos de conformação. Essa placa tem a função de intensificar os esforços exercidos pelo meio líquido e evitar a ocorrência de defeitos no componente conformado.

2.4.1.1 Principal Aplicação: Conformação de Abas Convexas

A conformação de abas convexas é amplamente empregada na indústria aeronáutica para a fabricação de componentes de geometria aproximadamente circular reforçados com abas. Estes componentes formam o esqueleto da aeronave que tem a função estrutural de sustentar os revestimentos externos. Na atualidade, a imensa maioria das fuselagens são concebidas com esta configuração estrutural, denominadas semi monocoque. Na figura 2.19 são apresentados alguns componentes com abas convexas e segmentos de aeronaves nos quais tais produtos são utilizados.

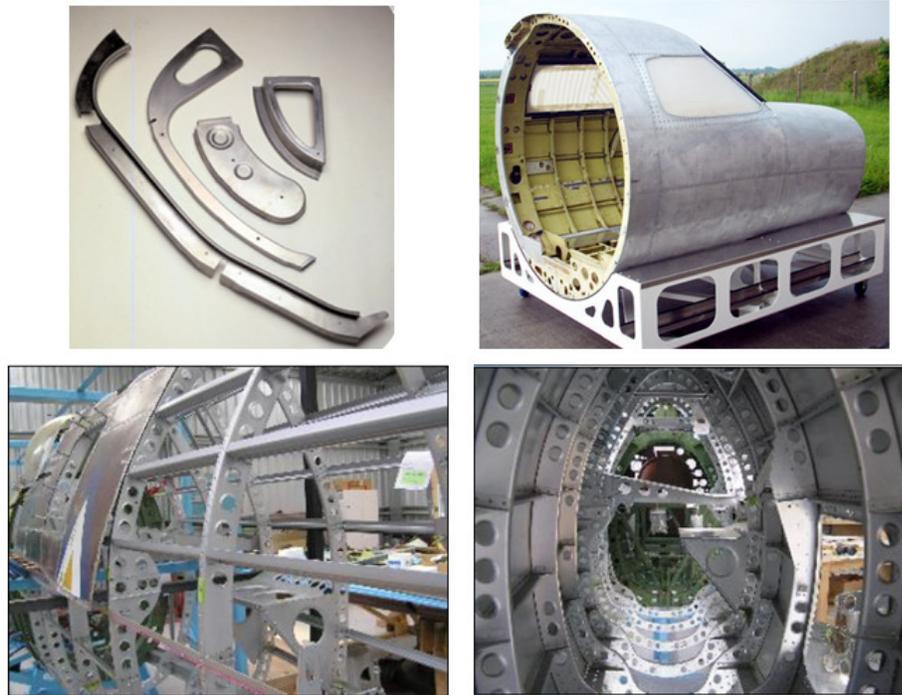


Figura 2.19 – Componentes com abas convexas e segmentos de aeronave que os utilizam.

A fuselagem dianteira caracteriza-se como uma das regiões mais complexas pelo fato de haver uma redução gradual do diâmetro da seção transversal à medida em que ocorre uma convergência com a aproximação da frente (“nariz”) da aeronave. Deste modo, as estruturas em “C” que sustentam esta fuselagem conseqüentemente tornam-se mais complexas para absorver esta variação de curvatura.

Embora seja possível a fabricação destes componentes por meio dos processos convencionais de conformação, a vasta diversidade e a demanda de fabricação limitada de cada um deles não são capazes de amortizar os custos de fabricação de ferramentas tradicionais, que requerem operações de usinagem precisas para garantir um ajuste correto entre punção e matriz.

2.4.1.2 Mecânica da Conformação de Abas Curvilíneas

Durante a conformação de abas convexas empregando-se um punção simples, o perímetro externo do *blank*, definido como “A” na figura 2.20, é forçado a adquirir um perímetro menor “B”, quando submetido a um ângulo de dobra α . Os valores dos perímetros são calculados a partir dos raios da peça plana (R_p) e do raio de curvatura (R_c), respectivamente. Esta redução no valor do perímetro é obtida por meio de deformações compressivas observadas na região da aba que a fazem alcançar a nova configuração. De acordo com Sala (2001), uma maneira eficaz de se mensurar as deformações decorrentes do processo de hidroconformação é através dos métodos da gravação de uma grade de círculos, a qual permite medir, ao final da operação, as distorções observadas em cada círculo e conseqüentemente definir a maior e menor deformação em qualquer ponto do componente conformado.

A inexistência de uma matriz rígida permite que as deformações compressivas ocasionem ondulações na aba à medida que a conformação transcorre e, dependendo das variáveis de entrada do processo, principalmente altura da aba, matéria-prima e espessura, tais ondulações podem atingir valores críticos capazes de ocasionar defeitos permanentes conhecidos como rugas. Este valor crítico é definido como instabilidade plástica do material e pode ser compreendido como um colapso do mesmo quando submetido à condições extremas de solicitação mecânica (HU et al., 2003; ZHANG et al., 2003; ABEDRABBO et al., 2005; LE PORT et al., 2010).

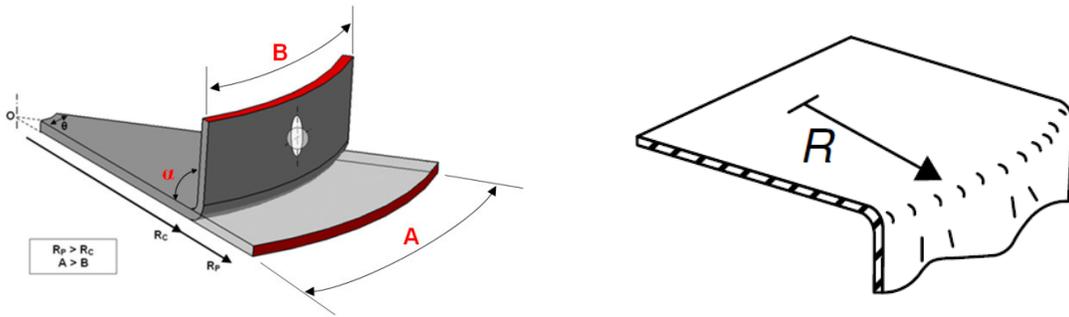


Figura 2.20 – Aba convexa: Tendência de formação de rugas (ASNAFI, 1999 - adaptado).

A nucleação e a propagação de rugas nas operações de conformação de chapas dependem fundamentalmente do estado de tensão desenvolvido durante o processo em alguma região crítica do componente conformado. Nos últimos tempos, a crescente utilização de chapas de espessuras reduzidas, as quais apresentam-se mais suscetíveis à formação de rugas, estimulou o desenvolvimento de métodos de análise capazes de estabelecer os limites do processo. O mais rudimentar dentre todos, conhecido como teste de Yoshida, embora útil, apresentava aplicabilidade limitada, pois consiste em aplicar esforços em uma chapa retangular plana, desprezando as variações do estado de tensão da chapa durante a conformação. (TUÊCU et al., 2001).

Hutchinson (1974) foi o primeiro pesquisador a desenvolver um equacionamento apto a avaliar a tendência de formação de rugas baseando-se em um estado de tensão biaxial imposto ao material atuando em um elemento com dupla curvatura. Anos mais tarde, a evolução de métodos computacionais permitiu detalhar os estados de tensão impostos a todos os elementos da chapa, bem como apresentar o trajeto percorrido pelas tensões e deformações à medida que a operação de conformação se desencadeia, facilitando a identificação e localização das instabilidades.

Embora com desenvolvimentos matemáticos distintos, diversos métodos se assemelham ao estabelecer que quanto maior for a capacidade do material de se deformar de maneira uniforme, independentemente da direção dos esforços aplicados, melhor será a capacidade do mesmo de resistir à ocorrência de instabilidade plástica.

Bortolussi (2001) destaca que as instabilidades plásticas podem ser difusas ou localizadas. A forma difusa está associada à modificação de uma grande área do material, como por exemplo, a estrição observada durante o ensaio de tração de um material dúctil. Já a forma localizada está relacionada à alteração de alguns poucos elementos em alguma região específica do corpo

conformado. É este segundo tipo o mais frequentemente observado nas operações de hidroconformação, sob o aspecto de ruga ou afinamento localizado.

O afinamento, ou ainda empensoamento, é um defeito característico da conformação de abas côncavas, pois neste caso um material plano que possui um perímetro externo “A” é forçado a adquirir um perímetro maior “B” para atingir a geometria final do produto (Figura 2.21). Este alongamento do perímetro é resultante do estiramento promovido por tensões de tração na direção tangencial ao raio de curvatura (R_C) que, se atingirem valores críticos, podem levar à falha do componente conformado.

A intensidade dos esforços de tração é inversamente proporcional ao raio de curvatura (R_C). Deste modo, quanto menor for o raio a ser dobrado, maiores serão os esforços trativos. Além disso, assim como ocorre com as abas convexas, as tensões atuantes na aba têm seus valores tendendo a zero na proximidade do raio e crescem com o aumento do comprimento da aba (HU et al., 2003).

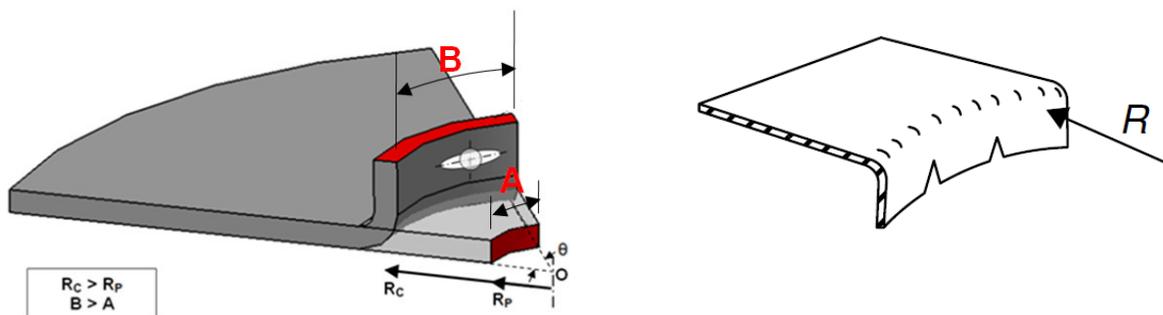


Figura 2.21 – Aba côncava: Tendência ao estiramento e à ruptura (ASNAFI, 1999 - adaptado).

2.4.1.3 Limites de Conformabilidade de Abas Convexas

Wang et al. (1995) foram os pioneiros no desenvolvimento de modelos matemáticos voltados para conformabilidade de abas capazes de prever as alturas máximas de aba que se pode obter em um processo convencional de conformação com punção e matriz rígidos. O equacionamento foi feito baseando-se em valores de tensão e deformação críticos, em função da combinação da geometria requerida e do material empregado. De acordo com os autores, a

intensidade de deformação compressiva que atua em uma aba convexa pode ser definida pela equação 2.1:

$$|\varepsilon_{\theta_{\max}}| = \ln \left[\frac{R_p}{R_C + \frac{e}{2} \left(\frac{R_p}{R_C} \right)^{\frac{1}{1+r_m}}} \right] \quad [2.1]$$

Em que:

$\varepsilon_{\theta_{\max}}$: deformação compressiva máxima observada na direção tangencial da aba convexa;

R_p : Raio da peça plana [mm];

e : espessura do *blank* [mm];

R_C : Raio de curvatura [mm];

r_m : Coeficiente de anisotropia médio do material.

De acordo com Dieter (1988) o coeficiente de anisotropia médio do material é definido pela equação 2.2.

$$r_m = \frac{r_0 + 2r_{45} + r_{90}}{4} \quad [2.2]$$

Em que:

r_m : Coeficiente de anisotropia médio do material;

r_0 , r_{45} e r_{90} : valores de anisotropia nas direções 0° , 45° e 90° , respectivamente.

O valor de deformação compressiva máxima verificado na equação 2.1 não deve exceder o valor de deformação limite a partir do qual se inicia a nucleação das rugas definido de acordo com a equação 2.3.

$$\varepsilon_{\theta CR} = \left[\frac{1}{3} \left(\frac{e}{R_C} \operatorname{sen} \alpha \right)^2 \frac{E}{K} n \right]^{\frac{1}{n+1}} \quad [2.3]$$

Em que:

$\varepsilon_{\theta CR}$: deformação compressiva crítica;

α : ângulo de dobra [°];

K: coeficiente de resistência [MPa];

E: Módulo de Elasticidade [MPa];

n: coeficiente de encruamento do material.

Os coeficientes de resistência e de encruamento do material empregados na equação 2.3 permitem relacionar os valores de tensão e deformação de um material com comportamento elasto-plástico como apresentado na equação 2.4:

$$\sigma = K \varepsilon^n \quad [2.4]$$

Em que:

σ : tensão trativa [MPa];

K: coeficiente de resistência [MPa];

ε : deformação;

n: coeficiente de encruamento do material.

Asnafi (1999) verificou a aplicabilidade do modelo desenvolvido por Wang et al. (1995) no processo de hidroconformação e observou que o estado de tensão / modo de deformação observado para a conformação de abas convexas em tal processo é bastante complexo e pode ser dividido em três fases:

Primeira Fase: Esforços compressivos verificados na direção tangencial geram ondulações na aba, que tendem a se intensificar à medida que o processo se desenvolve e podem culminar na instabilidade plástica do material;

Segunda Fase: Na etapa pós-instabilidade, a continuidade dos esforços compressivos atuando na direção tangencial da aba favorece o crescimento das ondulações nucleadas na primeira fase em número e magnitude. As deformações observadas nesta etapa se assemelham bastante com as deformações verificadas na operação de dobramento descrita no item 2.2.1 deste trabalho;

Terceira Fase: Definida como pressurização, a terceira etapa consiste no momento em que a borda da aba conformada entra em contato com a ferramenta. Dependendo da intensidade dos esforços aplicados pelo fluido e da magnitude das ondulações existentes, pode-se ter neste momento uma planificação das irregularidades ou a formação de rugas permanentes.

Na figura 2.22 são apresentados componentes da liga AA2024-O com 1,0 mm de espessura e abas com altura de 27 mm e 40 mm conformadas com diferentes valores de pressão. As abas conformadas com pressão de 5 MPa representam as duas primeiras fases descritas acima, enquanto os componentes conformados com as pressões de 10, 20 e 70 MPa representam a etapa de pressurização.

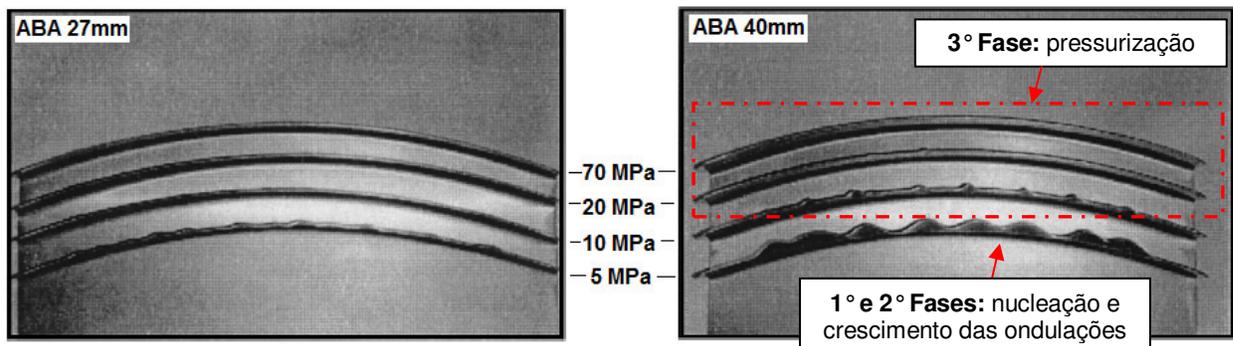


Figura 2.22 – Influência da pressão na qualidade das abas conformadas (ASNAFI, 1999).

Comparando os resultados teóricos e experimentais, foi possível constatar que o limite de deformação capaz de garantir uma aba isenta de rugas definido por Wang et al. (1995) para

punção e matriz rígida não é válido para o processo de hidroconformação, sendo neste segundo processo o valor limite muitas vezes superior ao definido pela equação 2.3. O autor observou ainda que a qualidade da aba conformada no processo de hidroconformação é fortemente dependente da pressão hidráulica empregada. O limite de conformabilidade foi definido por Asnafi (1999) em função da altura de ruga crítica existente no componente conformado. Segundo o autor, esta altura deve ser inferior a 0,5 mm, já que até este valor é possível planificar as rugas, empregando-se equipamentos específicos a esta finalidade, sem ocasionar irregularidades em outras regiões do componente.

Flow Pressure Systems AB (2002) também apresenta um modelo bastante simples para cálculo da deformação compressiva, empregando apenas o raio de curvatura e altura da aba apresentados na figura 2.23.

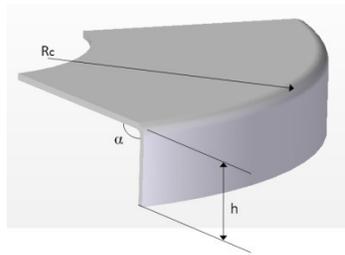


Figura 2.23 – Parâmetros considerados no cálculo de deformação em abas convexas (Flow Pressure Systems AB, 2002).

Utilizando os perímetros do semicírculo da peça plana e conformada e considerando-os comprimentos inicial e final, respectivamente no cálculo de deformação, chega-se à expressão 2.5.

$$\varepsilon = -\frac{h}{R_c} (1 - \cos[\alpha]) \quad [2.5]$$

Em que:

h : altura da aba conformada;

R_c : raio de curvatura;

α : ângulo de dobra.

Para os casos em que o ângulo de dobra for igual a 90° , a expressão pode ser simplificada:

$$\varepsilon = -\frac{h}{R_c} \quad [2.6]$$

Tem-se assim uma expressão que permite conhecer o valor de deformação compressiva na aba conformada por meio apenas dos valores de altura da mesma e do raio de curvatura da ferramenta.

As limitações dos métodos de cálculo propostos por Wang et al. (1995) e Flow Pressure Systems AB (2002) devem-se ao fato de tais modelos desprezarem a possibilidade de nucleação de rugas durante a conformação, apresentando um valor de deformação constante e válido para toda a extensão da aba. No entanto, nos casos em que há nucleação de rugas durante a conformação, os valores de deformação compressiva observados nessas regiões são significativamente maiores que os observados em uma aba perfeita.

Constata-se que, embora a hidroconformação de chapas com punção simples seja capaz de proporcionar limites mais altos de conformabilidade frente aos processos convencionais de conformação, à medida que a complexidade dos componentes aumenta, este tipo de ferramenta passa a apresentar limitações, tal como ocorrência de rugas, que mesmo com acréscimos nos valores de pressão não apresentam resultados satisfatórios. Em tais situações deve-se então optar por ferramentas mais elaboradas, equipadas com prensa-chapas, ou ainda *dams*, como são conhecidos os dispositivos de travamento de *blanks* no processo de conformação utilizando meio hidráulico.

2.4.2 Ferramenta com Prensa-chapa (*Dam*)

Dam é um termo de origem inglesa que significa barragem e, por similaridade, foi incorporado ao processo de hidroconformação de chapas para referir-se a uma base maciça posicionada em frente à ferramenta (Figura 2.24).

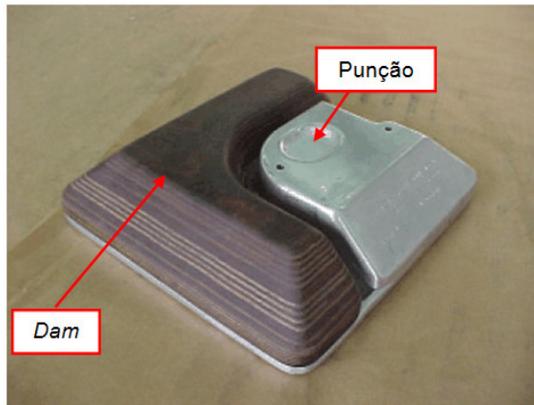


Figura 2.24 – Ferramental com prensa-chapa (*dam*).

Esta base tem a função de criar uma cavidade na região em que a aba será formada, sujeitando assim a chapa a esforços de grande intensidade impostos pela membrana de borracha. Estas tensões de tração atuando majoritariamente na direção vertical são capazes de ocasionar estiramentos que tendem a inibir a formação de rugas em componentes com curvatura convexa. Na figura 2.25 é apresentado um modelo esquemático do estiramento imposto à chapa quando se utiliza um ferramental com *dam*.

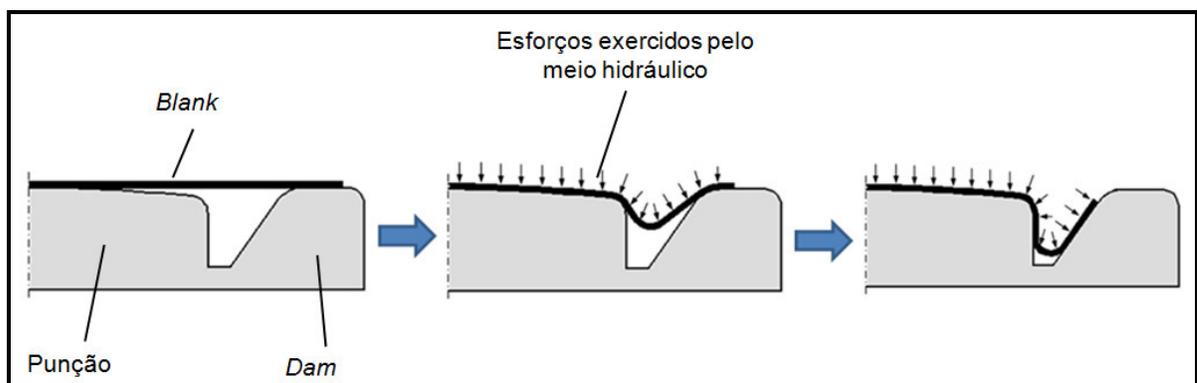


Figura 2.25 – Movimentação da chapa em um ferramental com *dam*.

A intensidade do travamento da chapa é definida fundamentalmente em função da magnitude da pressão hidráulica aplicada no processo e da área do *blank* apoiada no prensa-chapa. Essa tensão de travamento deve ser bem dimensionada para não exceder a tensão de

ruptura do material e ocasionar uma fratura e, também não ser muito reduzida, de modo a permitir a movimentação excessiva do material e consequente ocorrência de rugas nas abas.

Para garantir uma boa afinidade superficial entre a chapa metálica e o *dam*, usualmente opta-se por fabricar este último em madeira laminada de alta resistência. Todavia, nos últimos anos, novos desenvolvimentos viabilizaram o emprego de ligas de alumínio para a fabricação destes componentes sem prejuízos no que diz respeito ao escoamento da chapa. Independentemente do tipo de material empregado para a fabricação do prensa-chapas, para este conceito de conformação, é muito importante a utilização de lubrificantes, usualmente pastosos, ou ainda películas plásticas capazes de favorecer o escoamento do material e inibir a ocorrência de marcas na ferramenta decorrente do atrito excessivo. Entretanto, especial atenção deve ser dada à quantidade e ao modo de aplicação do lubrificante, pois são bastante específicos para cada aplicação e, caso utilizado em excesso, pode ocasionar marcas no produto ou rugas, devido ao deslizamento excessivo.

2.4.3 Conformação de superfícies esféricas

Quando o objetivo é a conformação de superfícies esféricas, outro conceito de ferramenta com travamento de *blank* é empregado. Ela consiste em um prensa-chapa análogo ao utilizado em operações convencionais de estiramento e um sistema de movimentação de um punção metálico responsável por pressionar a chapa contra uma “bolsa” hidráulica como se pode observar na figura 2.26.

Zampaloni et al. (2003) verificaram que a utilização desse tipo de ferramenta possibilita aumentar a precisão geométrica e retardar a falha de cascas esféricas, uma vez que a existência da pressão hidrostática do fluido atuando sobre a chapa faz com que esta se deforme de maneira mais uniforme e fique menos sujeita à formação de zonas críticas com intensa deformação plástica.

Os autores utilizaram o *software Ls-Dyna 3D*[®] e dois modelos de escoamento, *von Mises* e *Barlat e Lian* (1989), usualmente denominado critério *Barlat-89*, para simular as possíveis falhas e rugas resultantes do processo estudado empregando a liga de alumínio 3003-H14.

Observou-se que a ferramenta empregada apresenta um potencial bastante satisfatório para caracterização dos defeitos. No entanto, a qualidade dos resultados está intimamente relacionada à precisão na caracterização do material, já que tais parâmetros são responsáveis por definir o comportamento de escoamento do *blank* durante a operação.

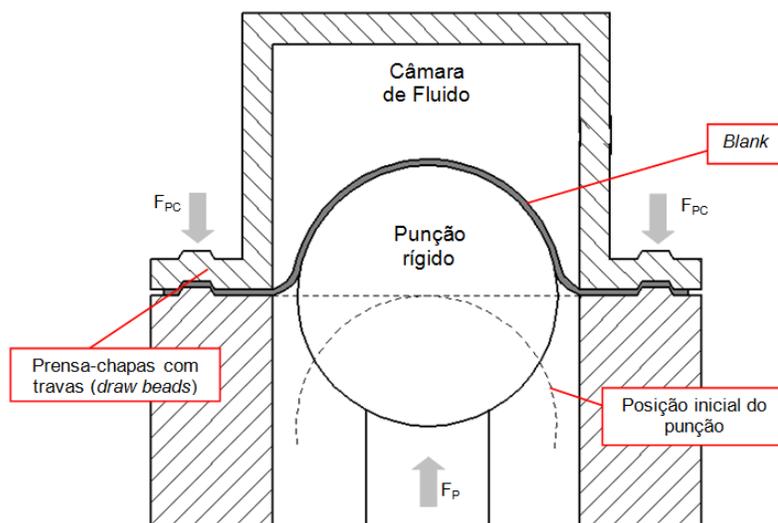


Figura 2.26 – Modelo esquemático do processo de hidroconformação com punção (ZAMPALONI et al., 2003).

Na figura 2.27 é apresentado um comparativo entre o *blank* conformado no processo real e nos dois modelos virtuais. Para todas as condições foi empregada uma pressão hidráulica de 0,5MPa e um curso do punção de 28,5 mm.

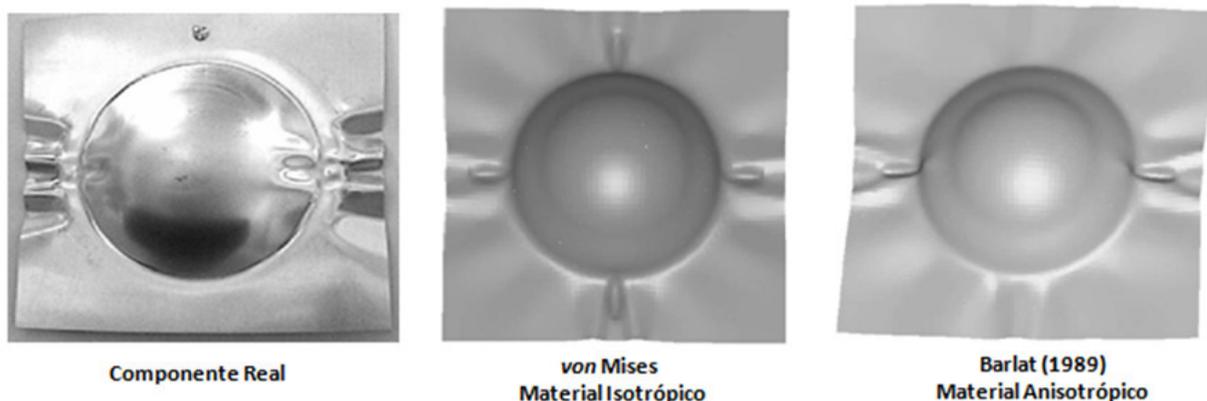


Figura 2.27 – Comparativo de ensaios experimentais e simulações: Punção esférico e contra-pressão hidráulica (ZAMPALONI et al., 2003).

Abedrabbo et al. (2005), observando as dificuldades na obtenção de resultados precisos no processo de conformação com punção esférico e contra-pressão hidráulica, elaboraram um mapa de processo, por meio de ensaios práticos e computacionais, estabelecendo condições seguras de conformação em função do curso do punção, da força de travamento do prensa-chapa e da pressão hidráulica empregada para a conformação da liga de alumínio AA6111-T4 em um processo análogo ao de Zampaloni et al. (2003). Esse mapeamento do processo é apresentado na figura 2.28.

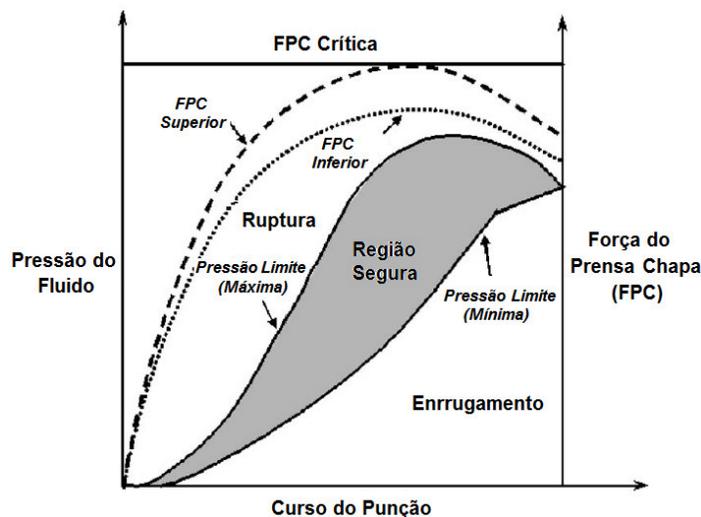


Figura 2.28 – Mapeamento de processo em função do curso do punção, força prensa-chapa e pressão do fluido (ABEDRABBO et al., 2005).

2.4.4 Punção com cavidade

Este tipo de ferramenta caracteriza-se por apresentar uma cavidade abaixo da superfície na qual a chapa é posicionada (Figura 2.29). À medida que a pressão do fluido aumenta, tende a ocorrer um travamento do *blank* contra a superfície da ferramenta, gerando um efeito análogo ao do *dam*. Com a continuidade do processo, o acréscimo de pressão ocasiona um estiramento da

chapa fazendo-a preencher a cavidade da ferramenta até se encostar-se ao fundo da mesma. Nesse tipo de conformação o percentual de estiramento é variável e mais acentuado nas regiões da chapa que tocam a ferramenta no final do processo.

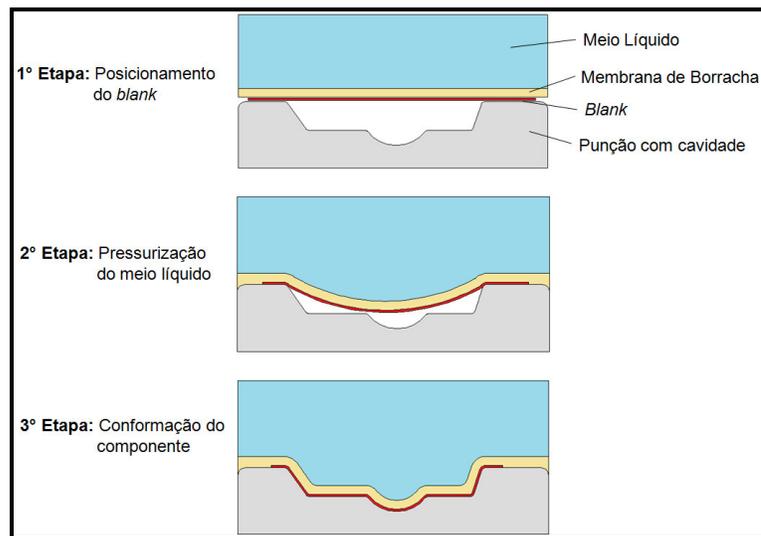


Figura 2.29 – Modelo de punção com cavidade (ABB METALLURGY, 1990).

Minutolo et al. (2006) desenvolveram, por meio da análise por elementos finitos, um mapeamento similar ao desenvolvido por Abedrabbo et al. (2005) para superfícies esféricas, relacionando o curso do punção com a pressão hidráulica empregada na conformação de um componente aeronáutico de aço Inconel 718. Na figura 2.30 é apresentado um comparativo mostrando a convergência entre os resultados simulados e experimentais do estudo em questão.

Os autores concluíram que a definição adequada dos parâmetros do processo, associada quando possível a pequenas modificações na configuração do produto, permitem aperfeiçoar o processo eliminando estágios de conformação.

Em alguns casos quando se utiliza punção com cavidade, a geometria da abertura pode ocasionar um aprisionamento do componente conformado em seu interior. Para estes casos a ferramenta deve ser composta de duas partes que possam ser desencaxadas para remoção do produto.

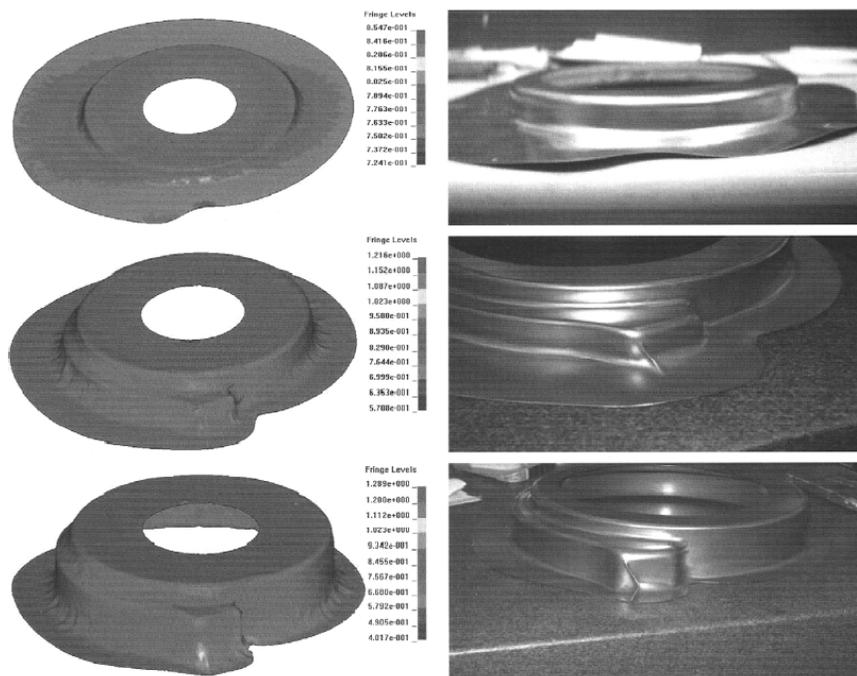


Figura 2.30 – Comparativo entre resultados de simulação e experimentais de um processo de hidroconformação empregando punção com cavidade (MINUTOLO et al., 2006).

2.5 Vantagens e desvantagens do Processo de Hidroconformação de *Blanks*

As principais vantagens do processo de hidroconformação estão associadas principalmente, de acordo com ABB Metallurgy (1990) e Abedrabbo et al. (2005), aos seguintes fatores:

- Necessidade de ferramenta composta por apenas uma parte com a geometria do componente a ser conformado, reduzindo os custos com matéria-prima, usinagem e com procedimentos de coordenação e alinhamento de diversos componentes de uma mesma ferramenta;
- Flexibilidade no material da ferramenta: A seleção do material empregado na fabricação do punção depende fortemente das características do produto que se deseja fabricar. Chapas de alta resistência mecânica e elevada espessura, por

exemplo, exigem ferramentas reforçadas fabricadas em aço ou ligas de alumínio. Todavia, caso o número de componentes a ser fabricado seja reduzido, outros materiais, tais como madeira, resinas e polímeros, tornam-se viáveis e possibilitam reduzir significativamente os custos da ferramenta;

- Baixo desgaste da ferramenta devido à inexistência de contato entre partes rígidas;
- A distribuição uniforme da pressão hidráulica possibilita manter uma homogeneidade de espessura no componente conformado e também retardar a ocorrência de fratura em situações extremas. Além disso, a inexistência de contato entre o produto e a matriz metálica evita a formação de riscos e marcas na superfície conformada.

Por outro lado, segundo Zampaloni et al., (2003), Zhang et al., (2004) e Assempour et al., (2009), os pontos desfavoráveis deste processo estão associados a:

- Baixa eficiência do processo, devido ao significativo tempo gasto para a obtenção da pressão hidráulica necessária e na preparação do processo para proteger regiões críticas das ferramentas que possam ocasionar danos à membrana;
- Necessidade de altos investimentos em prensas robustas nas quais seja possível alcançar índices elevados de pressão do meio hidráulico;
- Dificuldade de controlar a formação de rugas devido à inexistência de uma matriz rígida que restrinja os graus de liberdade do material durante a conformação;
- Necessidade de estabelecer procedimentos para escape do ar, de modo a não ocasionar “bolsões”, que em alta pressão possam ocasionar danos térmicos à membrana de borracha.

2.6 Métodos de Simulação Numérica do Processo de Hidroconformação de Chapas

Tekkaya (2000) afirma que os objetivos industriais para o emprego de *softwares* de simulação podem ser classificados em três principais grupos:

a) Redução do Ciclo de Fabricação:

- Verificação antecipada da possibilidade de fabricação do componente;
- Redução dos tempos de desenvolvimento de novos produtos;
- Redução de tempo gasto nas etapas de *try-out* (validação do primeiro produto);
- Rápida resposta a solicitações de modificações.

b) Redução de Custos:

- Produtos mais baratos;
- Matrizes mais simples e de menores dimensões;
- Aumento da confiabilidade.

c) Melhoria na Qualidade do Produto:

- Possibilidade de verificação da melhor matéria-prima para o componente;
- Possibilidade de produzir peças de maior complexidade;
- Garantia de repetibilidade do processo;
- Otimização das variáveis do processo.

Existe hoje uma significativa diversidade de *softwares* comerciais voltados à simulação do processo de conformação de chapas metálicas, que, embora desenvolvido por diferentes companhias, muitas vezes utilizam o mesmo método de cálculo. Na tabela 2.3 são apresentados os principais *softwares* disponíveis na atualidade acompanhados de seus respectivos métodos de cálculo.

O modelo estático implícito foi o primeiro empregado para simulação de *blanks*. Ele consiste em uma solução estática da deformação com base em critérios de convergência. A principal desvantagem deste modelo é que ele se torna muito complexo para situações em que se requer um elevado número de elementos.

Já o método dinâmico explícito caracteriza-se por ser um método robusto, mais rápido e menos dependente de memória computacional que o estático implícito por não fazer cálculos com base em critérios de convergência. Este método é bastante eficiente na determinação de rugas. Normalmente os locais de nucleação das rugas são definidos com precisão. Já a amplitude de tais rugas pode apresentar algumas discrepâncias em relação ao modelo real devido à dificuldade que os simuladores têm de solucionar as inconsistências numéricas e definir adequadamente o instante de nucleação das rugas.

O modelo de método inverso é uma simplificação da mecânica da operação de conformação, desprezando o contato existente entre chapa e matriz e ignorando o atrito, por exemplo. Com estas simplificações, é possível executar os cálculos a partir do componente conformado e retornar a condição inicial em que se tem o *blank* plano. Este método é indicado para estudos preliminares voltados para análise de possibilidade de fabricação, justamente por ser um método de cálculo rápido. Tem eficácia limitada para o refinamento do processo uma vez que em determinadas situações apresenta resultados pouco coerentes com os verificados na prática.

Tabela 2.3 – *Softwares* empregados para simulação do processo de conformação de *blanks*. (TEKKAYA, 2000)

Software	Companhia	Método Computacional
ABAQUS®	HKS - EUA	ESTÁTICO IMPLÍCITO
MARC®	MSC - EUA	
NIKE3D®	LSTC - EUA	
AUTOFORM®	AUTOFORM - SUIÇA	ESTÁTICO IMPLÍCITO ESPECIAL
ABAQUS® - Explícito	HKS - EUA	DINÂMICO EXPLÍCITO
LS-DYNA3D®	LSTC - EUA	
PAM-STAMP®	ESI - FRANÇA	
OPTRIS®	DYNAMIC SOFTWARE - FRANÇA	
AUTOFORM®-one step	AUTOFORM - SUIÇA	MÉTODOS INVERSOS
ISO-PUNCH®	SOLLAC - FRANÇA	
SIMEX2®	SIMTEC - FRANÇA	

Além do método de cálculo, o desempenho de um *software* de simulação depende significativamente do critério de escoamento utilizado para a caracterização do *blank*. Esses critérios são equações matemáticas que relacionam os estados de tensão capazes de promover o

escoamento do material. Entre os principais, destacam-se os critérios de von Mises, Hill-48 (Hill, 1950), Hill-90 (Hill, 1993) , e Barlat-89 (Barlat e Lian, 1989). Na figura 2.31 é apresentada uma superfície de escoamento e as tensões que nela atuam.

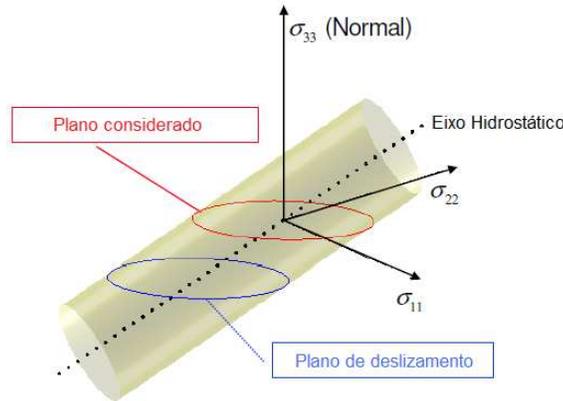


Figura 2.31 – Tensões atuantes em um plano de deslizamento.

O critério de von Mises, ou de máxima energia de distorção, válido para condições de escoamento isotrópico, estabelece que o escoamento ocorre quando o segundo invariante do tensor de tensão atinge um valor crítico (HOSFORD E CADDELL, 2011). A tensão efetiva, a partir da qual o escoamento ocorre, é definida pelo critério de von Mises por meio da equação 2.7.

$$\sigma_{Mises} = \frac{1}{\sqrt{2}} [(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2]^{\frac{1}{2}} \quad [2.7]$$

Em que:

σ_{Mises} é a tensão efetiva obtida pelo critério de von Mises;

σ_{11} , σ_{22} , σ_{33} são as tensões principais.

As chapas metálicas empregadas nos processos de estampagem, fabricadas por meio de processos de laminação, usualmente apresentam comportamento anisotrópico e são melhores representadas pelo critério de escoamento de Hill-48, que é uma generalização do critério de von Mises. A tensão equivalente resultante do critério de escoamento de Hill (1948) para um estado plano de tensão é dado pela equação 2.8 (HOSFORD E CADDELL, 2011).

$$\sigma_{Hill48} = \sqrt{\frac{1}{2} [N(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + F(\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + G(\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + 2N\sigma_{12}^2]} \quad [2.8]$$

Em que:

σ_{Hill48} é a tensão efetiva de escoamento para o critério de Hill-48;

N , F e G são parâmetros do material determinados a partir ensaios de tração nas direções dos eixos principais de anisotropia;

σ_{11} , σ_{22} , σ_{33} são as tensões principais.

O critério de escoamento de HILL-90 é baseado em uma função de escoamento não-quadrática. Esse critério é capaz de considerar diferentes comportamentos durante as etapas de dobra, principalmente para chapas de alumínio. A tensão de escoamento para esse critério, considerando um estado de tensão plano, pode ser escrita de acordo com a equação 2.9 (HOSFORD E CADDELL, 2011).

$$(2\sigma_{Hill90})^m = |\sigma_{11} + \sigma_{22}|^m + \varphi^m |\sigma_{11} - \sigma_{22}|^m + (\sigma_{11}^2 + \sigma_{22}^2)^{\frac{(m-1)}{2}} [\beta(\sigma_{11}^2 - \sigma_{22}^2) \cos 2\theta + \gamma(\sigma_{11}^2 - \sigma_{22}^2) \cos^2 2\theta] \quad [2.9]$$

Em que:

σ_{Hill90} é a tensão de escoamento para uma condição equi-biaxial de tensão;

φ , β e γ são constantes que caracterizam a anisotropia;

m é um parâmetro que depende do material.

Esse critério não é recomendável para avaliar os efeitos da anisotropia do material nos processos de conformação, visto que mudanças de textura alteram o parâmetro m e comprometem o desempenho do método.

Barlat e Lian (1989) também desenvolveram um método para cálculo do escoamento de chapas submetidas a um estado plano de tensões, conforme apresentado na equação 2.10. Esse critério é, em muitos casos, capaz de apresentar resultados de conformabilidade mais precisos que

obtidos pelos critérios de Hill, no entanto, o tempo de cálculo pode aumentar significativamente. Para metais com estrutura celular cúbica de face centrada, adota-se o valor de $m=8$, e para cúbica de corpo centrado, $m=6$ deve ser usado (HOSFORD E CADDELL, 2011).

$$2\sigma_{Barlat}^m = |S_1 - S_2|^m + |S_2 - S_3|^m + |S_3 - S_1|^m \quad [2.10]$$

Em que:

σ_{Barlat} é a tensão de escoamento definida pelo critério de Barlat;

S_i são valores resultantes de uma matriz composta por tensões em diversos planos associadas a parâmetros do material;

m é um parâmetro dependente do material.

As ligas de alumínio de alta resistência não são, em algumas situações, adequadamente caracterizadas pelos modelos descritos acima, permitindo que divergências sejam verificadas nas simulações de tais ligas. Além disso, o revestimento *clad* deve ser definido como homogêneo e perfeito. Deste modo, não é necessário considerá-lo como um material distinto da matriz, evitando assim o acréscimo de novas variáveis na simulação (TSENG et al., 2010).

Worswick e Finn (2000) analisaram a simulação do processo de conformação de um componente da liga AA5182-O com aba côncava circular e outro com aba côncava quadrática, empregando diferentes critérios de escoamento. Na figura 2.32, são apresentados os componentes com aba circular e quadrática, bem como as curvas de deformação com os diferentes critérios empregados.

Comparando os resultados obtidos com cada um dos três critérios de escoamento, verifica-se distribuição similar entre Hill (1948) e Barlat (1989) enquanto o critério de von Mises aponta para menores valores de deformação compressiva. A principal diferença entre os critérios de Hill-48 e Barlat-89 em relação a von Mises deve-se ao fato dos dois primeiros critérios considerarem o valor do coeficiente de anisotropia médio, r_m , enquanto von Mises, sempre considera o material como isotrópico, com R igual a unidade. Diante do exposto, fica claro que os critérios de Hill-48 e Barlat-89 são mais adequados quando se trabalha com materiais anisotrópicos.

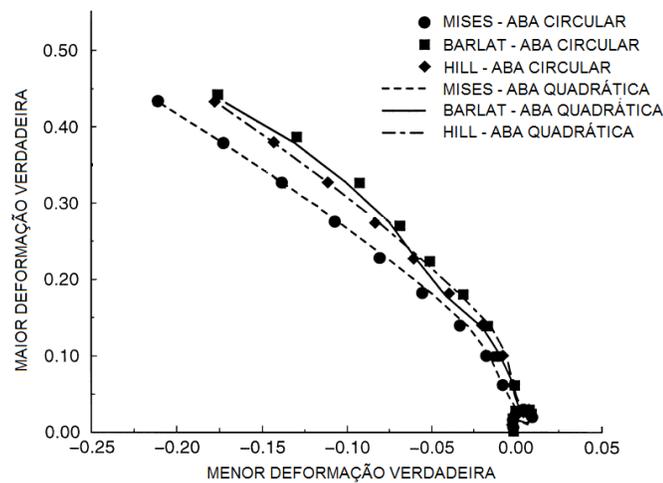
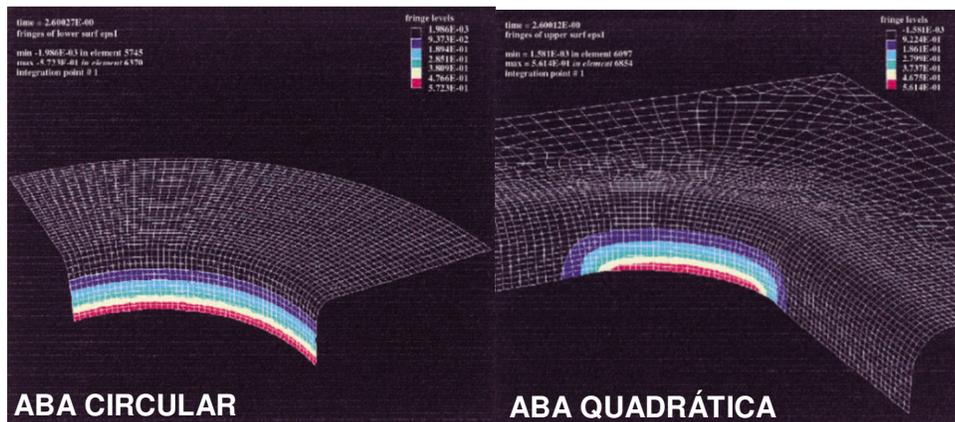


Figura 2.32 – Curvas de deformação para abas côncavas empregando-se diferentes critérios de escoamento (WORSWICK e FINN, 2000).

Diversos estudos apontam para o fato de que quando se trabalha com ligas de alumínio, o critério de Barlat-89 se destaca como melhor opção. No entanto, pelo fato de não apresentar expoente quadrático, o emprego deste critério exige maiores tempos de processamento, aproximadamente 25% superior ao requerido para o processamento do modelo que emprega critério de Hill-48.

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Neste capítulo, apresenta-se o detalhamento dos ensaios práticos e computacionais empregados para a análise de conformabilidade da liga de alumínio AA2024-O no processo de hidroconformação de abas convexas em função dos diversos parâmetros de entrada empregados (espessura da chapa, raio de curvatura e altura de aba). Além disso, nesta seção será apresentada também a metodologia empregada para análise dos resultados obtidos.

3.1 Especificação da Liga de Alumínio AA2024

Como já evidenciado anteriormente, analisou-se a conformabilidade da liga de alumínio AA2024 na condição recozida com o objetivo de definir os maiores valores de alturas de aba, observados para cada condição ensaiada, capazes de garantir uma superfície isenta de rugas. A liga AA2024, cuja composição é apresentada na tabela 3.1, foi selecionada por ser amplamente empregada na indústria aeronáutica para fabricação de componentes estruturais de geometria complexa, combinando bons índices de resistência mecânica e baixo peso específico, como se pode observar na tabela 3.2.

Tabela 3.1 – Composição da liga AA-2024 (AMS-QQ-A-250/5A; 2007)

Elemento	Quantidade
Cobre	3,8 - 4,9 %
Magnésio	1,2 - 1,8 %
Manganês	0,3 - 0,9 %
Ferro	0,50%
Silício	0,50%
Cromo	0,10%
Zinco	0,25%
Titânio	0,15%
Outros elementos	0,20%
Alumínio	Remanescente

Tabela 3.2 - Principais propriedades mecânicas da liga AA-2024-O.

	Valores Teóricos (AMS-QQ-A-250/5A; 2007)	Valores Práticos
Limite de Escoamento (MPa)	96	90,5
Limite de Resistência (MPa)	207 - 220	195
Alongamento (%)	10 - 12	12,5
Peso Específico (Kg/m ³)	2780	
r ₀	0,754	0,770
r ₄₅	0,786	0,792
r ₉₀	0,983	0,963

Após envelhecida, na condição T42, o limite de resistência mecânica da liga 2024 atinge valores próximos a 400 MPa, sendo equiparável ao de alguns aços com baixo teor de carbono.

Do ponto de vista da sequência do processo, os *blanks* podem ser conformados na condição recozida ou imediatamente após o tratamento térmico de endurecimento por precipitação dependendo das características do componente que se deseja obter. Se conformado na condição recozida, o componente é submetido ao tratamento térmico após a operação de prensa e em alguns casos pode apresentar algum empenamento. Por outro lado, se conformado na condição na condição *W*, após endurecimento, o componente tende a apresentar acentuado retorno elástico e ainda maior suscetibilidade a ruptura, devido à queda da ductilidade do material. Na figura 3.1 é apresentado um comparativo entre as duas sequências possíveis para o processo de fabricação de componentes de liga de alumínio.

Neste trabalho, os ensaios foram realizados com os *blanks* na condição recozida. Optou-se por esta condição pelo fato da aba convexa estruturar adequadamente o componente, evitando distorções durante o tratamento térmico. Além disso esse procedimento evita a influência das instabilidades das propriedades mecânicas verificadas no intervalo entre a execução do tratamento térmico de endurecimento por precipitação até o momento em que o material atinge a condição final de envelhecimento (T42), a qual é alcançada em poucas horas se mantido à temperatura ambiente.

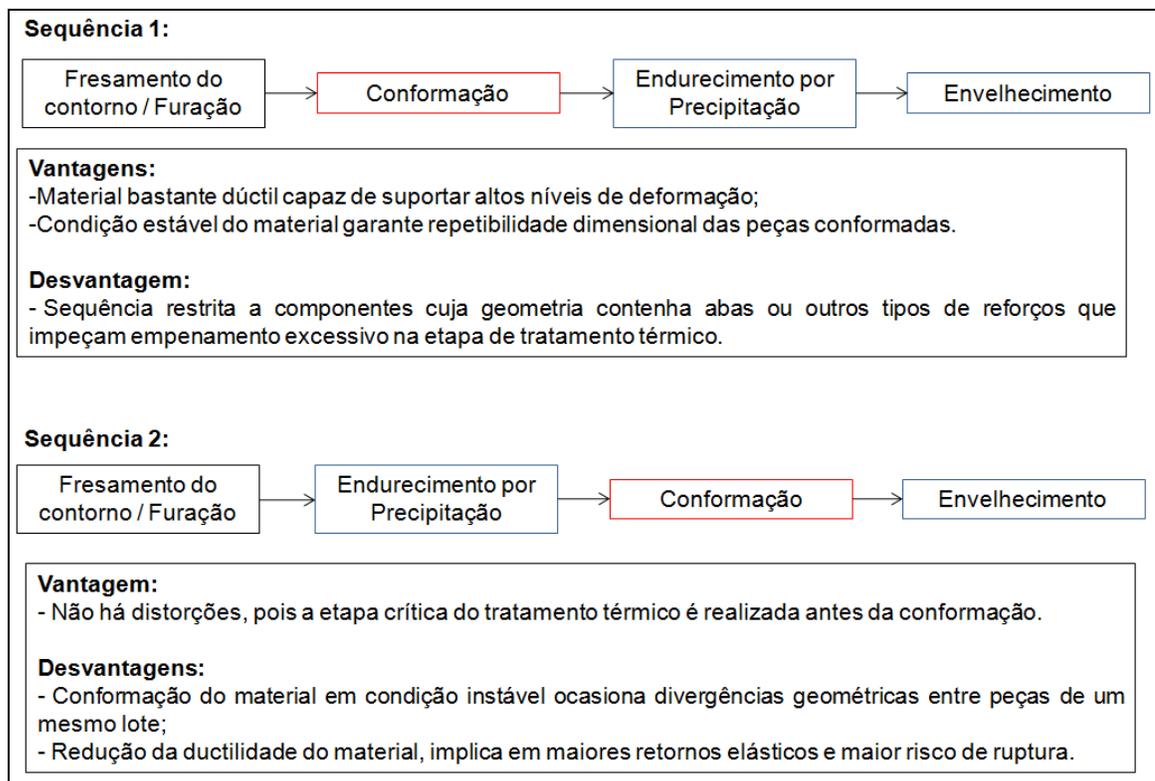


Figura 3.1 – Sequências de fabricação de componentes de liga de alumínio.

3.2 Planejamento dos Ensaios

Durante os ensaios preliminares as dimensões de abas a serem ensaiadas foram estimadas com o auxílio de simulações executadas no *software Pam-Stamp*[®] que predisseram, em função dos valores de deformação compressiva, quais os possíveis valores limites de altura das abas. Entretanto, em alguns casos observou-se discrepâncias entre os valores obtidos pelos dois métodos e diante disso, optou-se por realizar simultaneamente os ensaios práticos e virtuais.

Após definida a condição crítica por meio prioritariamente dos ensaios experimentais, os quais apresentaram maior tendência à formação de rugas, esta foi então executada virtualmente para verificação dos valores de deformação alcançados na região da aba convexa.

Na sequência, com o objetivo de confirmar a condição limite, novos ensaios práticos e virtuais foram executados com componentes apresentando altura de aba 2,0 mm maior que aquela estabelecida como crítica como esquematizado na figura 3.2. Deste modo, foi possível evidenciar

rugos com altura superior a 0,8 mm e valores mais intensos de deformações compressivas que aqueles verificados para a aba menor.

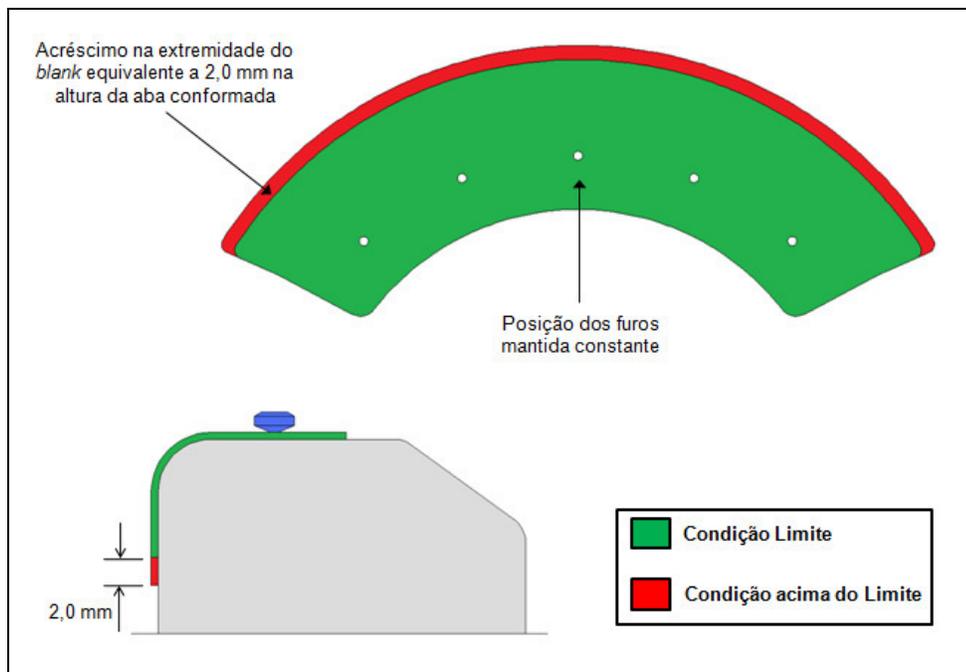


Figura 3.2 – Método de modificação do *blank* para alteração da altura da aba.

3.3 Preparação dos Corpos de Prova

Para obtenção da forma de segmento de aro, os corpos de prova tiveram seus contornos fresados em um centro de usinagem com três eixos (Figura 3.3). Os furos de 5,1 mm de diâmetro para posicionamento do *blank* no punção também foram feitos nesta etapa. Após fresados, os *blanks* foram rebarbados para evitar riscos de danos à ferramenta e à membrana de borracha.

Durante a etapa de ensaios preliminares evidenciou-se um relação de proporcionalidade direta entre o perímetro da aba e a tendência à formação de rugas. Todavia, observando as características dos componentes com abas convexas empregados no setor aeronáutico foi possível constatar que uma grande fração destes apresentou perímetro equivalente a aproximadamente duas vezes o raio de curvatura.



Figura 3.3 – Centro de usinagem três eixos utilizado para o fresamento dos *blanks*.

Desta forma, optou-se por padronizar o perímetro externo do *blank* em um valor equivalente a duas vezes a medida do raio de curvatura, como pode-se observar na figura 3.4. Com isso criou-se uma condição fiel às necessidades industriais atuais, bem como se estabeleceu um critério de proporcionalidade capaz de reduzir o efeito do comprimento da peça em relação à instabilidade do material, que por sua vez está associado ao surgimento de ondulações e, dependendo da criticidade, até mesmo de rugas. A largura do *blank* apoiada no punção (L_B) foi mantida constante em 30 mm, para os componentes conformados com os raios de curvatura de 100 e 200 mm, e 40 mm, para os *blanks* conformados com os raios de curvatura de 300 e 400 mm, visando garantir o correto assentamento do *blank* no punção e evitar qualquer movimentação durante a conformação da aba.

O estudo foi feito empregando-se quatro diferentes espessuras de matéria-prima:

- 1,00 mm;
- 1,27 mm;
- 1,60 mm;
- 2,00 mm.

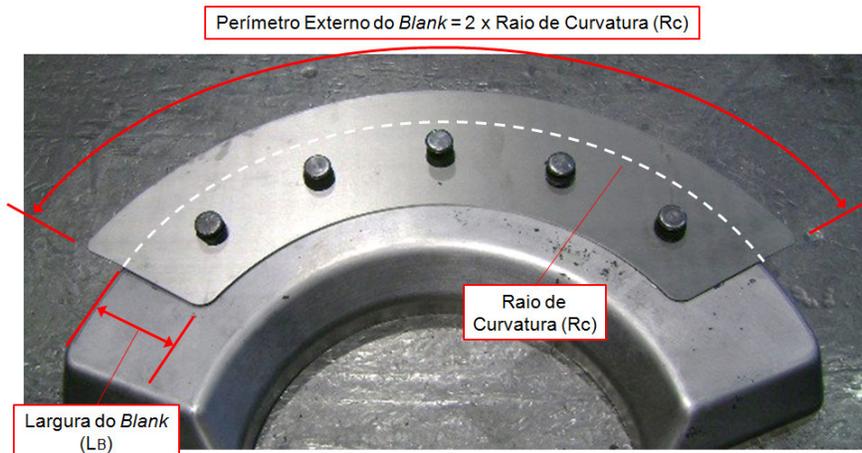


Figura 3.4 – Dimensionamento do *blank*.

Para que uma análise das deformações oriundas da conformação pudesse ser feita, empregou-se o método de gravação eletrolítica de uma grade de círculos de 2,5 mm de diâmetro, com a qual é possível medir as variações nas dimensões dos círculos em relação ao seu diâmetro inicial. O procedimento de gravação consistiu em posicionar sobre a superfície do *blank* uma tela semi-permeável, contendo a rede de círculos tangentes entre si. A seguir, conectou-se o rolo e base de aterramento no módulo eletrônico RB-200 da *Tecnigrav*[®] e aplicou-se um ácido apropriado, que atuou como eletrólito favorecendo a gravação dos círculos quando o módulo disponibilizou corrente elétrica no circuito. Na figura 3.5, é apresentado o aparato empregado para gravação, bem como um corpo de prova com os círculos deformados após a conformação. Este procedimento foi aplicado apenas para os *blanks* de 1,6 mm e 2,0 mm de espessura.

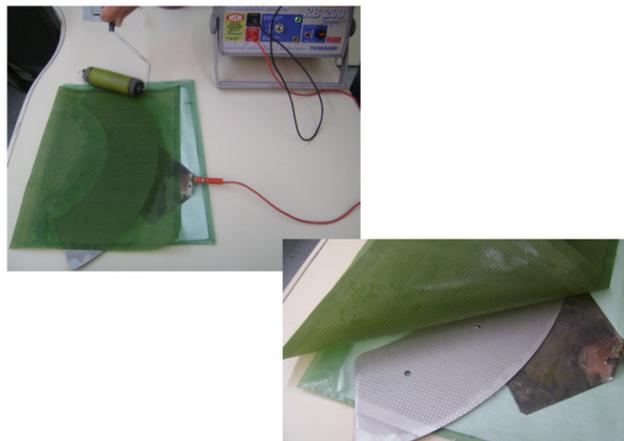


Figura 3.5 – Equipamento para gravação da grade de círculos e *blank* conformado com círculos.

Na fase de ensaios preliminares, alguns testes foram feitos modificando-se o sentido de corte do *blank* na chapa em relação à direção de laminação, pois verificou-se, com base nas propriedades mecânicas obtidas para a liga empregada neste trabalho, um coeficiente de anisotropia médio (r_m) igual a 0,829 e um coeficiente de anisotropia planar (Δr) igual a 0,075. Estes parâmetros estão associados, respectivamente, à habilidade da chapa de resistir ao afinamento ou ao aumento de espessura quando submetida a esforços externos e à formação de orelhas devido à variação de comportamento mecânico, que se pode verificar no plano da chapa. Materiais isotrópicos, nos quais tais variações não podem ser observadas, apresentam $r_m=1$ e $\Delta r=0$.

Apesar das chapas empregadas nos ensaios serem anisotrópicas, notou-se que a rotação da direção de laminação de 0° para 90° não representou qualquer influência nos resultados no que diz respeito ao surgimento de rugas ou em relação a acréscimos de espessura da chapa nas regiões conformadas.

Verificou-se, durante os ensaios preliminares, que os valores de raio mínimo especificados pela norma AMS-QQ-A-250/5A (2007) utilizando o fator N não foram capazes de evitar a incidência de trincas nessas regiões. Por esse motivo foram definidos, com base em ensaios experimentais, novos valores para o raio mínimo de dobra como pode-se observar na tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Raio mínimo de dobra em função da espessura da chapa AA2024-O.

Espessura do Material	Fator N	Raio Mínimo de Dobra (AMS-QQ-A-250/5A)	Raio Mínimo de Dobra (Ensaio Práticos)
1,0 mm	1	0,5 mm	2,5 mm
1,27 mm	1	0,6 mm	3,0 mm
1,6 mm	2	1,6 mm	4,0 mm
2,0 mm	2	2,0 mm	6,0 mm

A conformabilidade do *blank* foi avaliada em função da altura da maior ruga resultante na aba do componente. Rugas com altura superior a 0,8 mm apresentam um raio de dobra agudo em sua extremidade, que infringe o raio mínimo definido de acordo com o fator N e, conseqüentemente, possibilita o aparecimento de trincas nestes locais. Além disso, a existência de rugas com altura superior 0,8 mm usualmente resultam em interferências com outros componentes durante a etapa de montagem do componente conformado.

Flow Pressure Systems (2002) advertem ainda que para garantir a integridade do material, a distância entre picos de rugas vizinhas não deve ser numericamente inferior a três vezes a altura da aba conformada. Diante do exposto, neste trabalho, o limite de conformabilidade foi definido de acordo com a maior aba que pudesse ser obtida para cada condição estudada, que apresentasse rugas com altura máxima de 0,8 mm, respeitando entre si a distância estabelecida pela regra descrita por Flow Pressure Systems (2002).

3.4 Ferramentas

Os punções rígidos foram fabricados em alumínio AA7050, que se caracteriza pela satisfatória durabilidade e baixo desgaste quando submetidos a altos valores de pressão hidráulica. Os raios de curvatura analisados neste trabalho foram selecionados utilizando o mesmo critério de escolha das espessuras: maior frequência de aplicação prática na confecção de componentes estruturais aeronáuticos. Deste modo, os seguintes raios de curvatura foram empregados:

- 100 mm;
- 200 mm;
- 300 mm;
- 400 mm.

Para todos os raios de curvatura o ângulo de dobra foi mantido constante em 90°. Na figura 3.4 são apresentadas as ferramentas empregadas para a execução dos ensaios.

O posicionamento do *blank* na ferramenta foi feito por meio de pinos de 5,1 mm de diâmetro, distantes 25,0 mm do raio de dobra. Para todas as ferramentas empregadas, optou-se por cinco furos de posicionamento, exceto para aquela com raio de curvatura de 100 mm, que, em função de sua dimensão, permitiu utilizar apenas três furos, como mostra a figura 3.6. Todas as ferramentas foram fabricadas inicialmente com 40 mm de altura e chanfradas nas superfícies opostas à conformação com o objetivo de reduzir o estiramento na membrana de borracha em regiões sem importância para o processo. No entanto, nos ensaios com *blanks* de maior espessura,

as alturas das ferramentas com raio de curvatura de 300 mm e 400 mm não foram suficientes para conformar as abas limites. Nestes casos foi necessário acrescentar uma base de 10 mm sob as ferramentas, totalizando assim 50 mm de altura útil. A ferramenta com raio de curvatura de 100 mm teve sua concepção e processo de fabricação distintos das outras ferramentas e por esse motivo não pôde ser suavizada na região oposta à conformação.

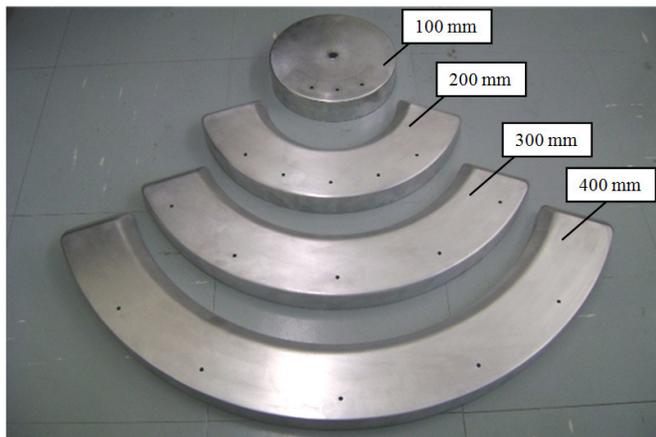


Figura 3.6 – Ferramentas empregadas para a execução dos ensaios.

Na figura 3.7, é apresentado o posicionamento da ferramenta com o *blank* na base da gaveta da prensa. Na mesma figura pode-se observar também a manta de poliuretano (PU), cuja finalidade será apresentada posteriormente no tópico 3.6.

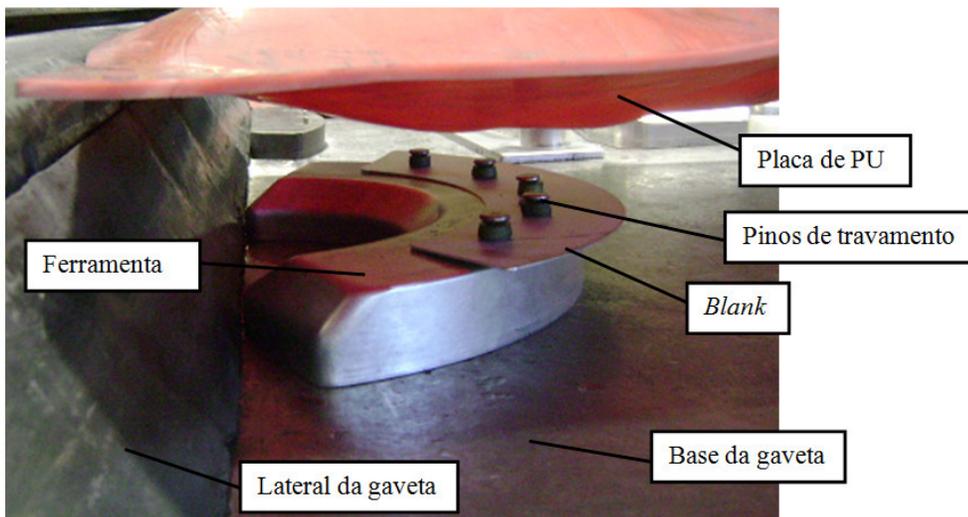


Figura 3.7 – Preparação da ferramenta na prensa.

Observando-se a interação entre o *blank* e a ferramenta durante os ensaios preliminares, notou-se que não houve, em qualquer estágio do processo de conformação de abas, aderência entre ambos que justificasse a utilização de lubrificantes. Por esta razão, optou-se por não empregar qualquer substância e/ou produto antiaderente, tais como películas a base de polímeros ou graxas, que são usualmente empregados para conformações críticas neste tipo de processo, mas que tem sua aplicação feita de maneira empírica sem qualquer padronização. Desta forma, a utilização de tais recursos nos experimentos poderia interferir aleatoriamente nos resultados obtidos.

3.5 Equipamento

Os ensaios foram realizados em uma prensa de célula hidráulica, também conhecida como prensa com membrana de borracha, apresentada na figura 3.8 com capacidade de pressurização de até 100 MPa instalada nas dependências da Embraer S.A., localizada na cidade de Botucatu.



Figura 3.8 – Prensa com célula hidráulica empregada para a execução dos ensaios.

A prensa apresenta duas áreas úteis de conformação de 2,5m x 1,2m. Estas áreas são chamadas de gavetas e são assim denominadas por se deslocarem entre as áreas de carregamento

e de pressurização com movimento análogo ao de uma gaveta. Diversas ferramentas podem preencher a área útil disponível permitindo que inúmeros componentes sejam conformados simultaneamente durante um ciclo de pressurização. Entretanto, para evitar a interferência entre os processos vizinhos, deve-se respeitar uma distância mínima entre as ferramentas equivalente a, no mínimo, uma vez e meia a altura da maior ferramenta, conforme ilustração apresentada na figura 3.9.

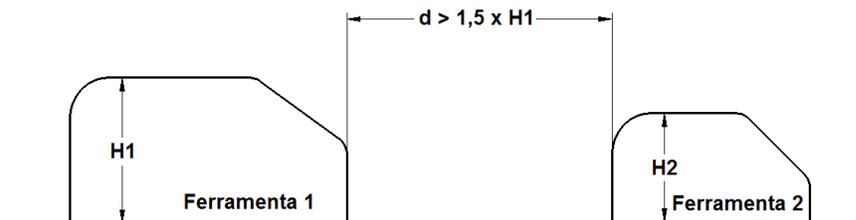


Figura 3.9 – Critério para posicionamento das ferramentas na gaveta da prensa.

A pressão hidráulica empregada para a execução dos ensaios foi padronizada em 41 MPa (6000 *psi*) para todas as espessuras empregadas nesse trabalho. Este valor foi definido durante a execução dos ensaios preliminares por representar um ponto de equilíbrio entre a qualidade do componente e a preservação da membrana de borracha. Tal fato foi evidenciado à medida que o emprego de pressões superiores a de 41 MPa pouco contribuíram para eliminação de rugas, mas por outro lado aceleraram significativamente o processo de degradação da membrana vulcanizada e da placa de poliuretano.

O manual do equipamento elaborado por Flow Pressure Systems AB (2002) afirma que a magnitude da pressão hidráulica empregada no processo pode ser classificada em algumas categorias, como apresentado na tabela 3.4, definidas arbitrariamente com base em critérios práticos, mas que são úteis se consideradas como valores de referência.

Para suportar os elevados índices de pressão requeridos para as mais diversas aplicações, os modelos atuais de prensas com célula hidráulica contam com uma tecnologia que consiste em enrolar milhares de metros de fio pré-tensionado no cilindro pelo qual o óleo a alta pressão circula. Este procedimento é capaz de criar forças compressivas na superfície do cilindro, reduzindo drasticamente as possibilidades de falha por fadiga, permitindo assim que o equipamento possa superar a marca de um milhão de ciclos de prensagens.

Tabela 3.4 – Categorias de hidroconformação em função da pressão aplicada.

Classificação	Faixa de Espessura
Super alto	Acima de 250 MPa
Muito alto	150 - 250 MPa
Alto	80 - 150 MPa
Médio	50 - 80 MPa
Baixo	35 - 50 MPa
Muito baixo	Abaixo de 35 MPa

3.6 Placa de Poliuretano

As placas de poliuretano (PU) são itens fundamentais para um bom desempenho do processo de conformação, pois são elas que entram em contato com o *blank* à medida que a pressão hidráulica aumenta e tendem a forçar o produto contra a ferramenta. Estas placas estão disponíveis no mercado em amplas faixas de espessura e dureza e são selecionadas de acordo com as características da conformação que se deseja executar. Caso o componente a ser conformado apresente tendência à formação de rugas, como as abas convexas tratadas neste estudo, deve-se optar por placas de média espessura, entre 5,0 e 7,0 mm, e dureza mínima de 90 *Shore A*. Com tais características a placa torna-se mais rígida e tende a expulsar as ondulações da aba conformada (ABB METALLURGY, 1990). Neste trabalho, após avaliar o desempenho de placas de diferentes propriedades e características nos ensaios preliminares, optou-se por empregar uma placa de 5,0 mm de espessura e 95 *Shore A* de dureza.

As dimensões da placa foram definidas para cada ferramenta de modo a garantir um excesso de cerca de duas vezes a altura da ferramenta, evitando assim uma eventual exposição do *blank* diretamente na membrana no decorrer da conformação. Em função da elevada dureza, a placa apresentou uma forte tendência de se deformar permanentemente. Assim, a cada ensaio, a placa foi reposicionada com o propósito de evitar deformações excessivas em regiões específicas que pudessem alterar suas propriedades mecânicas e interferir na conformação do componente.

3.7 Simulações Numéricas

O emprego do *software* de simulação *Pam-Stamp*[®] foi bastante útil na predefinição das alturas de abas a serem ensaiadas. Observando-se os valores de deformações compressivas resultantes nas abas conformadas, foi possível conhecer a severidade do processo para cada condição simulada e repetir na prática somente aquelas mais próximas das condições limites. Em algumas situações, observaram-se algumas discrepâncias entre os resultados do modelo virtual e do ensaio prático. Acredita-se que tais divergências sejam resultantes de instabilidades do processo difíceis de serem controladas, como por exemplo, eventuais desgastes da placa de PU ou variações na composição da matéria-prima, que mesmo em pequena escala podem interferir na conformabilidade do material. A seguir será feito um detalhamento dos parâmetros empregados na concepção dos componentes virtuais bem como dos critérios que definem o inter-relacionamento entre eles durante o desenvolvimento da conformação.

a) Base da Gaveta: Consiste uma superfície plana e rígida sobre a qual é posicionado o punção. O dimensionamento da base foi feito considerando-se um acréscimo equivalente a duas vezes a altura da ferramenta empregada, conforme ilustrado na figura 3.10. Como todas as ferramentas foram fabricadas com 40,0 mm de altura, o excesso em relação às extremidades das mesmas foi de 80,0 mm. Para os casos em que a altura da ferramenta teve que ser aumentada para 50 mm, as dimensões da base também foram readequadas. Os elementos da base foram definidos completamente rígidos e isentos de graus de liberdade de movimentos de rotação e/ou translação em quaisquer dos eixos. Como não exercem influência direta na conformação, os elementos quadrados foram dimensionados com 15,0 mm de lado. À medida que a conformação se desenvolve a membrana de borracha é preenchida com óleo e toca a base. Para este contato entre a membrana e a base foi estabelecido um coeficiente de atrito constante igual a 0,15. Esse valor foi definido com base em informações disponibilizadas pela equipe de desenvolvimento do *software* e validado com base em estudos comparativos entre resultados práticos e virtuais para diversas aplicações no processo de hidroconformação de chapas.

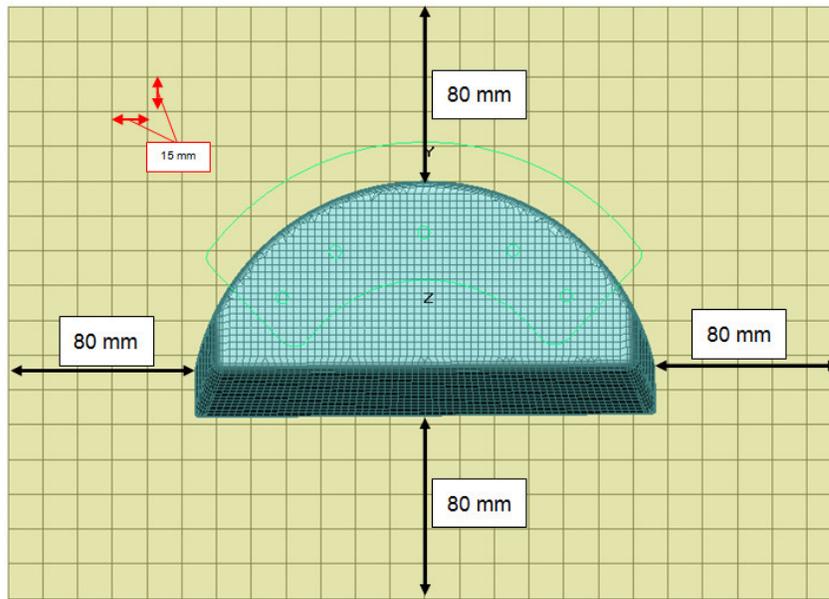


Figura 3.10 – Dimensionamento da base para simulação.

b) Ferramenta: A divisão dos elementos da ferramenta foi feita de modo que o refinamento resultante permitisse obter uma superfície isenta de irregularidades grosseiras que pudessem interferir na análise das ondulações na aba conformada. Por meio da execução de simulações preliminares, concluiu-se que elementos quadrados com até 10,0 mm de lado e com inclinação limitada a $3,0^\circ$ em relação aos elementos vizinhos são capazes de garantir resultados satisfatórios. Na figura 3.11, é apresentada a malha da ferramenta utilizada na simulação do processo de conformação hidráulica.

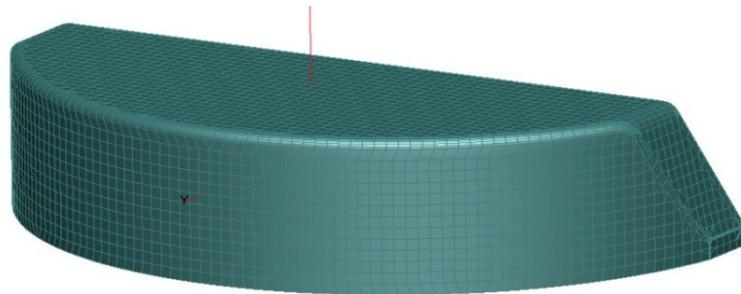


Figura 3.11 – Malha da ferramenta empregada na simulação numérica computacional.

Todos os elementos da ferramenta foram definidos como rígidos, ou seja, sem liberdade de rotação ou translação nos eixos x , y e z . Além disso, considerou-se um coeficiente de atrito de 0,15 entre a ferramenta e os elementos com os quais tem contato: membrana de borracha e *blank*.

c) Membrana de Borracha: Apresenta exatamente as mesmas dimensões da base. Este componente caracteriza-se por ser uma superfície com 6,0 mm de espessura cujo escoamento é definido pela lei de Mooney-Rivlin, que se destaca por ser a mais adequada para caracterização de materiais com comportamento visco-elástico (Figura 3.12) (PAM-STAMP USER GUIDE, 2009).

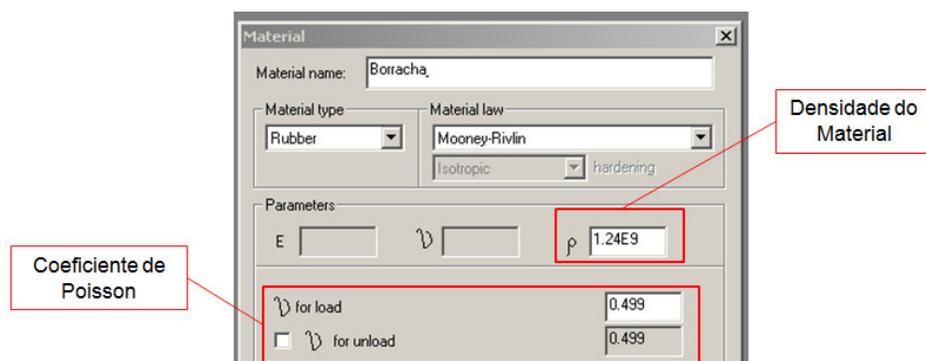


Figura 3.12 – Caracterização da membrana de borracha.

A dimensão dos elementos da membrana é determinada de acordo com a equação 3.1, a qual se baseia no menor raio da ferramenta observado na região de conformação.

$$e_{\text{Membrana}} = \frac{\pi r_{\text{min}}}{8} \quad [3.1]$$

Desta forma, quanto menores forem os raios existentes na região de conformação, maior será o refinamento dos elementos da borracha e consequentemente maior será o tempo necessário para execução dos cálculos numéricos.

Os parâmetros que caracterizam a borracha foram obtidos a partir de ensaios de tração realizados com um espécime da membrana devidamente preparado de acordo com as especificações previstas na ASTM D412 (2008) para tal finalidade. Os coeficientes coletados foram inseridos no *software* e definidos como valores padrão para todas as simulações.

A última etapa para caracterização da membrana está relacionada à definição do volume a ser preenchido, ou seja, o volume entre a base e a membrana excluindo o volume da ferramenta, ao tempo desejado para o preenchimento e a pressão máxima desejada.

Os elementos da extremidade da membrana são caracterizados como borda. Estes elementos bloqueiam a movimentação das bordas da membrana assim como acontece no processo real de hidroconformação.

c) **Blank:** Assim como a membrana de borracha, o *blank* também é definido como uma superfície sujeita a deformação, cujo escoamento é definido pela lei de Hill-90 (Figura 3.13). Embora Barlat-89 seja, segundo a literatura, o critério mais adequado para simulações do processo de conformação de ligas de alumínio, a lei de Hill-90 utilizada para caracterização do escoamento do *blank*, foi a que apresentou maior fidelidade, durante a etapa de validação do *software* às deformações verificadas experimentalmente e, por este motivo, foi definida como padrão para este material.

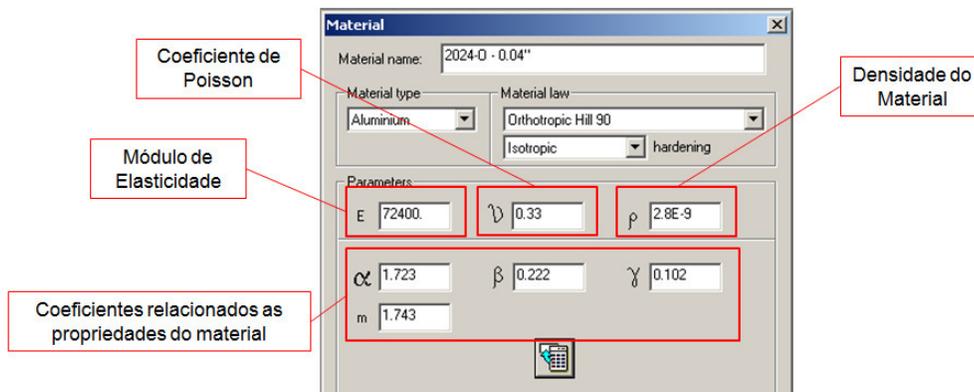


Figura 3.13 – Caracterização do material do *blank*.

O dimensionamento dos elementos do *blank* também é feito em função do valor do menor raio verificado na zona de conformação, utilizando-se a equação 3.2, análoga a empregada para definição dos elementos da borracha.

$$\epsilon_{blank} = \frac{\pi r_{min}}{6} \quad [3.2]$$

Entretanto, para um melhor desempenho durante o processamento da simulação, optou-se por trabalhar com elementos com dimensões maiores que aquelas resultantes da equação 3.2, empregando simultaneamente um recurso capaz de refinar a malha nas regiões mais solicitadas do produto e eliminar irregularidades grosseiras que possam, por exemplo, impedir um assentamento adequado do *blank* na ferramenta conforme ilustrado na figura 3.14.

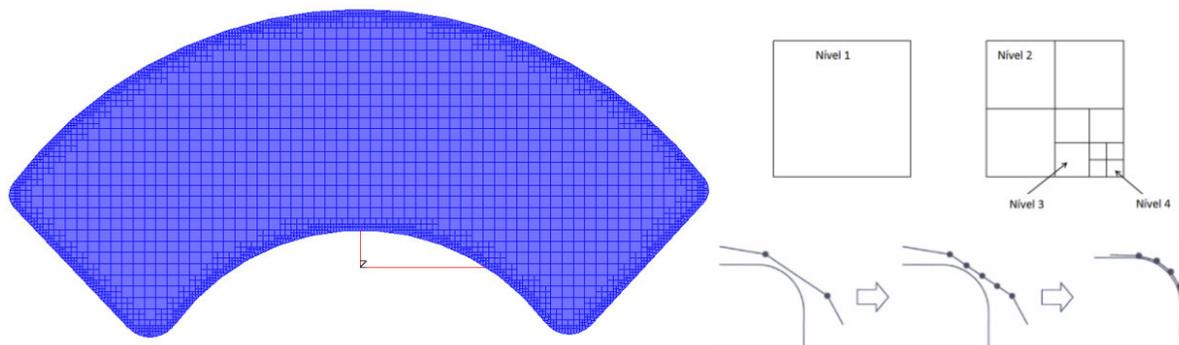


Figura 3.14 – Malha do *blank* e método de refinamento nas regiões críticas.

Para travamento do *blank* na ferramenta, selecionaram-se os nós localizados na mesma posição dos furos de 5,1 mm de diâmetro, utilizados para posicionamento do *blank* real na ferramenta. Esses nós foram definidos como “pinos”, que se caracterizaram por serem componentes rígidos sem graus de liberdade em quaisquer dos eixos cartesianos.

Assim como para os outros componentes, no caso do *blank*, também optou-se por empregar um coeficiente de atrito de 0,15 em relação a todos os outros componentes com o qual este manteve contato durante a operação virtual.

3.8 Etapas Empregadas para a Realização dos Ensaios Virtuais

A simulação foi dividida em estágios definidos em função do tempo e dos níveis de pressão hidráulica observados no decorrer do processamento (Figura 3.15). Com esta divisão, foi possível visualizar o andamento da conformação virtual, bem como suspender o processamento e

reiniciá-lo a partir da última etapa integralmente executada, nos casos em que houve problemas durante a simulação.

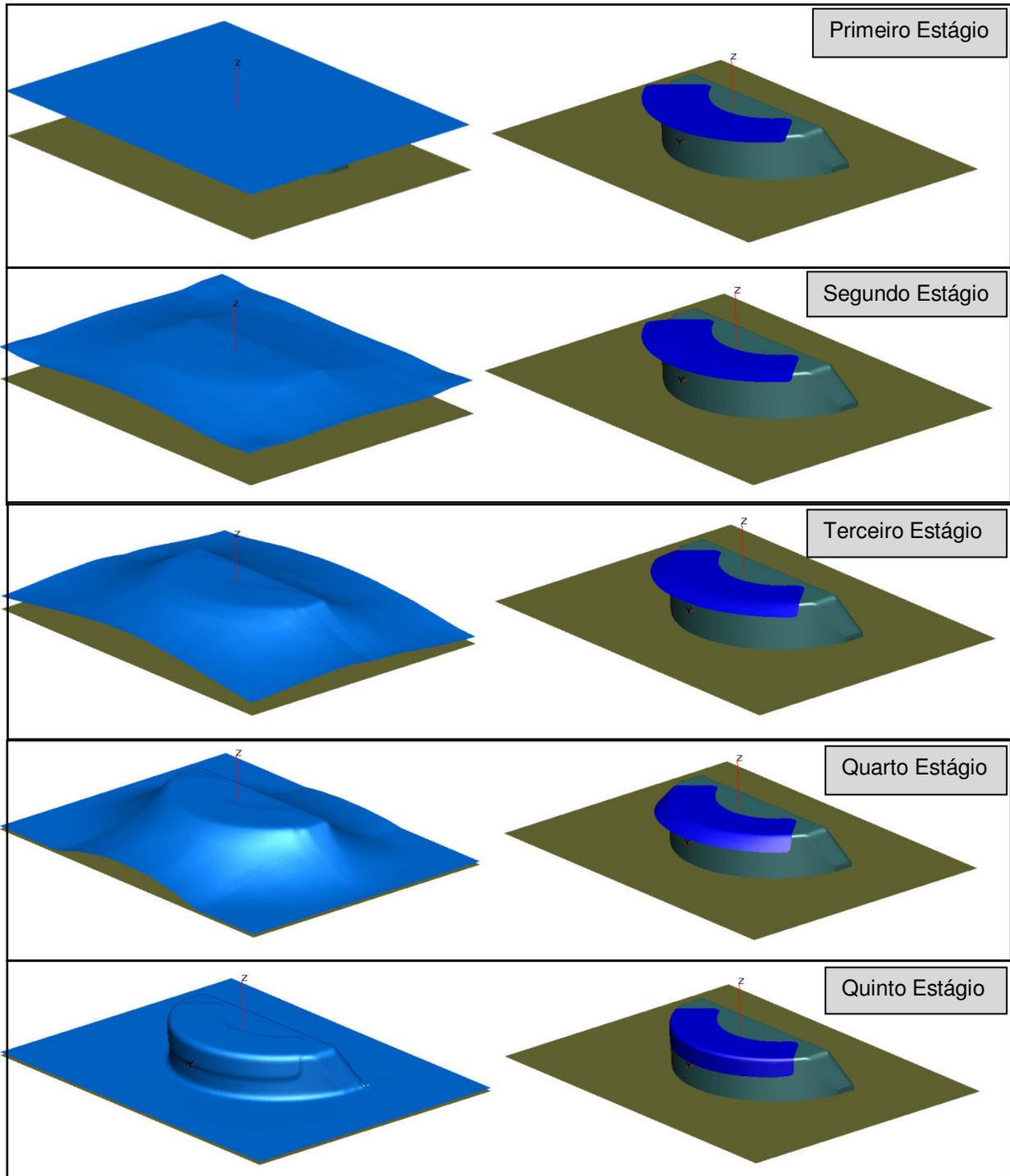


Figura 3.15 - Etapas de simulação utilizando ferramenta com raio curvatura de 100 mm.

Após a conclusão da simulação a análise foi feita da seguinte forma:

Primeira Etapa: Análise do gráfico da pressurização da membrana x tempo de conformação (Figura 3.16), com o objetivo de verificar se a pressão de 41 MPa (6000 *psi*) foi de fato atingida.

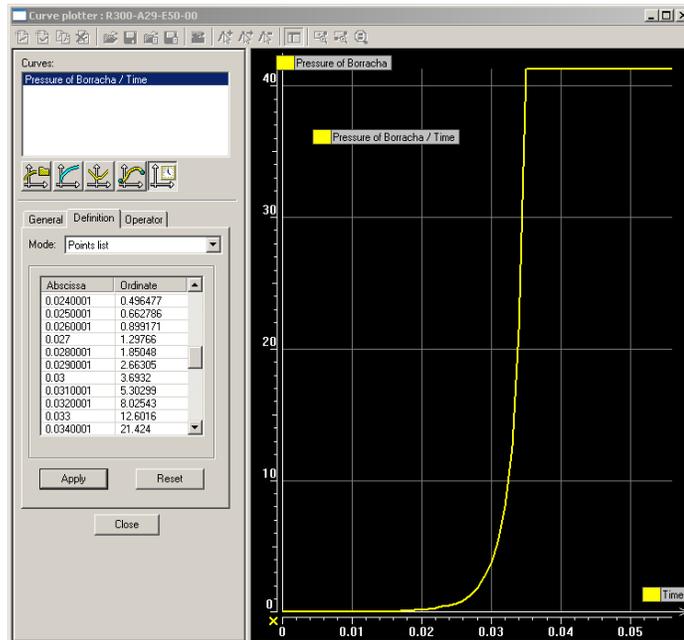


Figura 3.16 – Gráfico da pressurização da membrana em função do tempo de conformação.

Segunda Etapa: Análise das deformações na superfície externa do componente por ser esta a mais crítica em termos de deformação. Esta análise é feita por meio da escala de cores bem como por meio de vetores associados à deformação compressiva (*minor strain*).

Terceira Etapa: Nesta etapa a aba conformada é segregada do produto imediatamente abaixo do raio de dobra. Este procedimento foi feito para que os elementos desta região pudessem ser analisados isoladamente e coletados para elaboração do diagrama de deformação.

Quarta Etapa: Execução de corte transversal localizado a aproximadamente 3,0 mm da extremidade do produto com o objetivo de avaliar e medir as irregularidades resultantes na aba conformada.

3.9 Etapas Empregadas para a Realização dos Ensaios Práticos

Neste tópico, será feito um detalhamento das atividades práticas realizadas neste trabalho.

Primeira Etapa: Fresamento do contorno do *blank* e gravação eletrolítica da grade de círculos conforme apresentado no tópico 3.3. A gravação da grade de círculos não foi aplicada nos *blanks* de 1,0mm e 1,27 mm de espessura.

Segunda Etapa: Posicionamento da ferramenta na base da gaveta de conformação. Em função da necessidade de executar os ensaios simultaneamente com outras ferramentas na gaveta, com o objetivo de se manter uma condição real de trabalho, não foi estabelecido um local específico para cada ferramenta. A única ressalva foi a de que o posicionamento fosse feito de tal modo que a aba a ser conformada ficasse direcionada para o centro da gaveta, visando um melhor aproveitamento da pressão e uma menor influência das paredes laterais.

Terceira Etapa: Posicionamento do *blank* na ferramenta por meio de pinos. Na sequência, recobre-se a ferramenta e o *blank* com a placa de poliuretano nas dimensões adequadas. A cada estágio de conformação, a placa teve seu posicionamento alterado de modo a não ocasionar deformação excessiva somente nas regiões mais solicitadas.

Quarta Etapa: Programação da pressão e acionamento do equipamento para início do ciclo de conformação. A pressão 41 MPa (6000 *psi*), definida como padrão nos ensaios preliminares, por aliar boa conformabilidade das abas aos baixos índices de desgaste do PU e da membrana, levou em média quarenta segundos para ser atingida. Tão logo era alcançada, iniciava-se a despressurização da membrana, que levava cerca de trinta segundos para ocorrer, totalizando um pouco mais de 1 minuto para execução do ciclo completo de conformação. Embora a prensa apresente a possibilidade de manter a pressão 41 MPa (6000 *psi*) por até trinta segundos, este recurso não foi empregado neste trabalho, pois não resultou em melhorias na qualidade dos componentes conformados durante a etapa de ensaios preliminares.

Quinta Etapa: Repetição da terceira e quarta etapa para outros quatro *blanks*, totalizando cinco componentes conformados para cada condição investigada. A repetibilidade de cinco peças foi definida durante os ensaios preliminares por ser representativo do ponto de vista do surgimento e repetibilidade de rugas. Ainda nos ensaios preliminares, uma repetibilidade de quinze peças foi utilizada, mas não foi possível constatar em quaisquer dos componentes resultados distintos daqueles observados nas cinco primeiras peças.

Sexta Etapa: Análise e medição da altura de aba e das rugas resultantes, com o auxílio de um paquímetro. A altura de ruga foi obtida subtraindo-se do valor obtido no paquímetro a espessura do *blank* (Figura 3.17).

Além das rugas, nesta etapa executou-se a medição das deformações nos círculos, a qual foi bastante difícil de ser executada devido à convexidade da aba conformada.



Figura 3.17 – Procedimento para verificação da altura da ruga e deformação dos círculos.

Caso as rugas estivessem abaixo da altura máxima estabelecida de 0,8 mm, iniciava-se um procedimento iterativo de novos ensaios em que se acrescentam 2,0 mm na altura da aba do novo *blank*, como ilustrado na figura 3.2, visando aumentar a altura da aba até o momento em que a altura da ruga resultante da conformação da mesma excedesse o limite de 0,8 mm. Dessa forma, a condição ensaiada imediatamente antes da condição excedente era definida como a altura máxima de aba isenta de rugas críticas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, serão apresentados os resultados obtidos nos ensaios práticos e virtuais. Além disso, os resultados foram analisados para verificar a coerência destes em relação aos objetivos investigativos inicialmente propostos.

O componente obtido por meio de ensaio prático é apresentado na figura 4.1. Nesta figura as irregularidades na aba conformada são muito suaves, localizadas em regiões específicas localizadas muito próximas àquelas apontadas no ensaio virtual. Verifica-se deste modo que nesta condição de conformação o material ainda apresenta capacidade de absorver as deformações compressivas sem ocasionar a ocorrência de rugas.

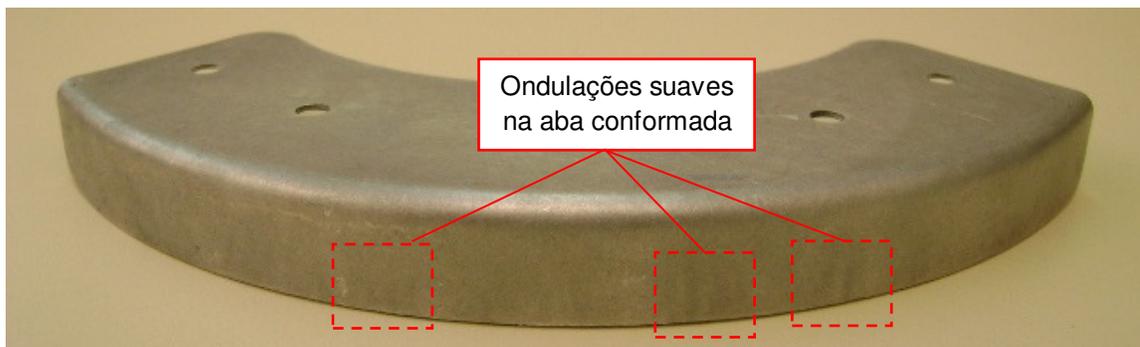


Figura 4.1 – Componente isento de rugas críticas ($R_C=100$ mm; $h=17,1$ mm; $e=1,0$ mm).

Na figura 4.2 é apresentado o componente virtual, de 1,0 mm de espessura e aba de 17,6 mm, conformado em uma ferramenta com raio de curvatura de 100 mm. Observa-se nesta figura que a geometria convexa da aba faz com que grande parte dos elementos conformados deforme-se compressivamente na direção tangencial da aba. Pode-se notar também a existência de algumas regiões críticas localizadas mais ao centro e próximas à extremidade da aba, nas quais há uma concentração de elementos, destacados em azul, sujeitos à deformações compressivas mais intensas.

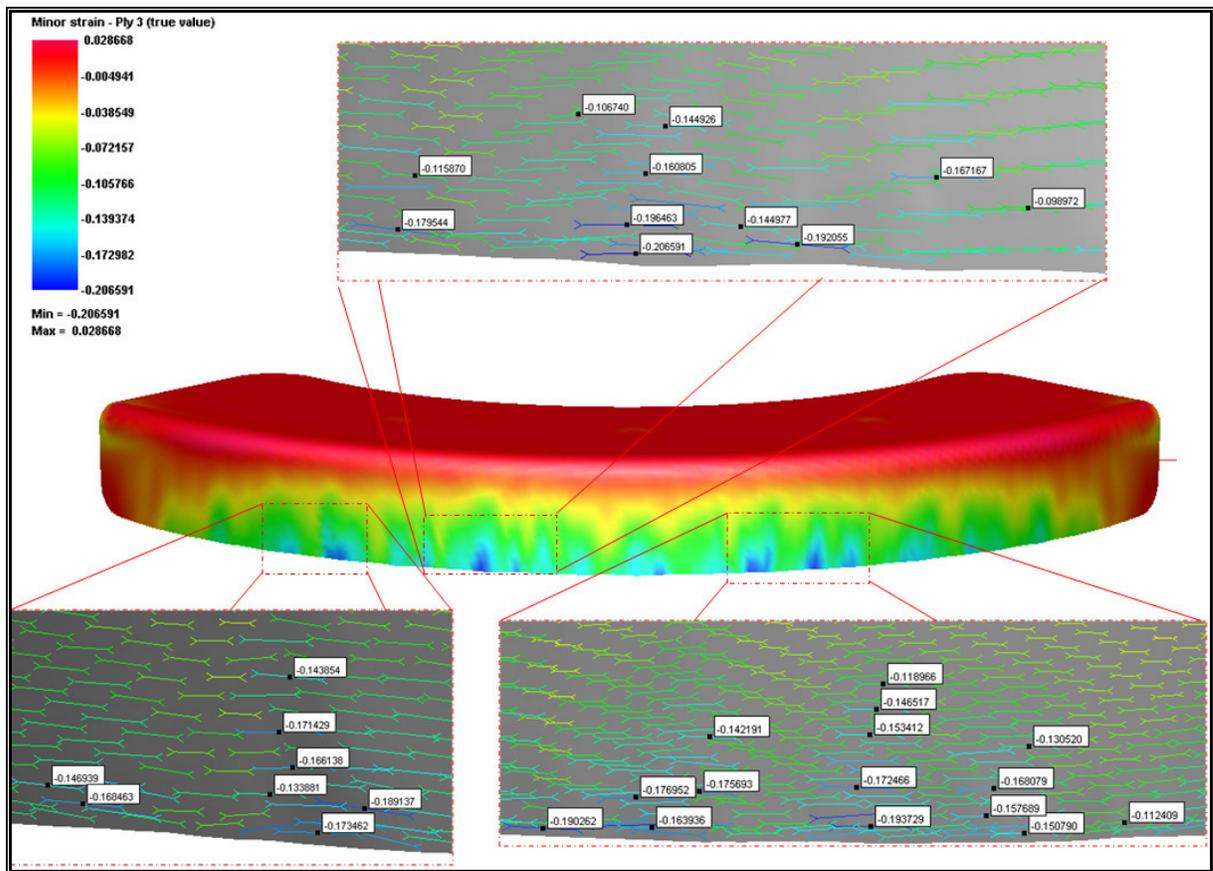


Figura 4.2 – Deformações observadas na aba do componente virtual
 ($R_C=100$ mm; $h=17,6$ mm; $e=1,0$ mm).

A figura 4.3 mostra uma seção da aba extraída do ensaio virtual de um plano localizado próximo à extremidade do produto e também uma vista superior da aba do componente obtido no ensaio prático. Observa-se, nos dois casos, que não existem rugas salientes que excedam o limite previamente estabelecido de 0,8 mm de altura.

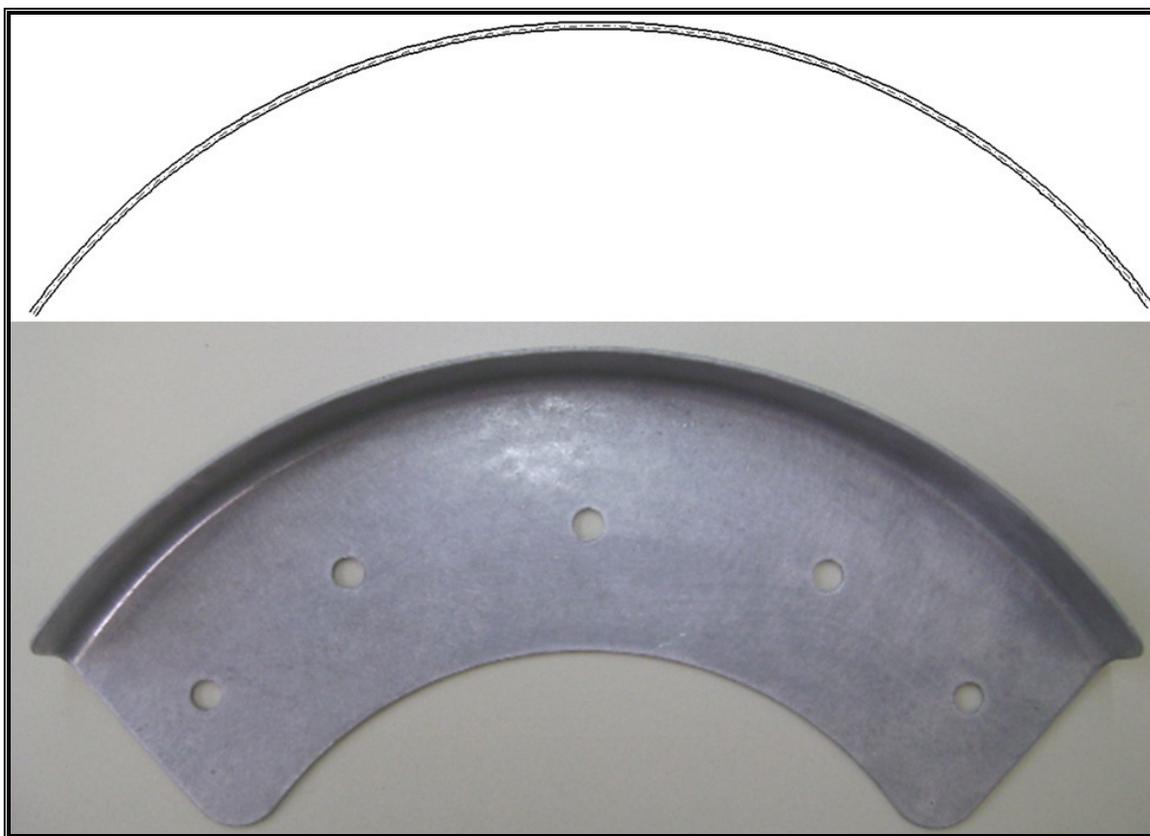


Figura 4.3 – Irregularidades nas abas virtual e real na condição limite
($R_C=100$ mm; $e=1,0$ mm).

Na figura 4.4, são apresentados os valores de deformação do componente virtual com aba de 19,6 mm. Pode-se observar o mesmo comportamento de formação de regiões críticas com acúmulo de elementos sujeitos à deformação compressiva como verificado para o item com aba de 17,6 mm. A diferença, entretanto, está na intensidade dos valores de deformação, que nesta condição de conformação, atingiu $-0,249$ para alguns elementos, enquanto para aba com altura de 17,6 mm o valor crítico verificado foi de $-0,207$. Com base nessas informações, constata-se que nos locais em que ocorrem nucleação e crescimento de rugas (Figura 4.5), há um acréscimo acentuado nos valores de deformação compressiva.

Os métodos analíticos representados pelas equações 2.1 e 2.6 também apontam para um agravamento da ordem de $0,02$ nos valores de deformação compressiva quando a altura da aba é aumentada em 2,0 mm. No entanto esse agravamento é menos intenso do que aquele apontado pela simulação, uma vez que a variável que está contribuindo para o acréscimo é o incremento na altura da aba e não a nucleação das rugas, como observado na simulação numérica.

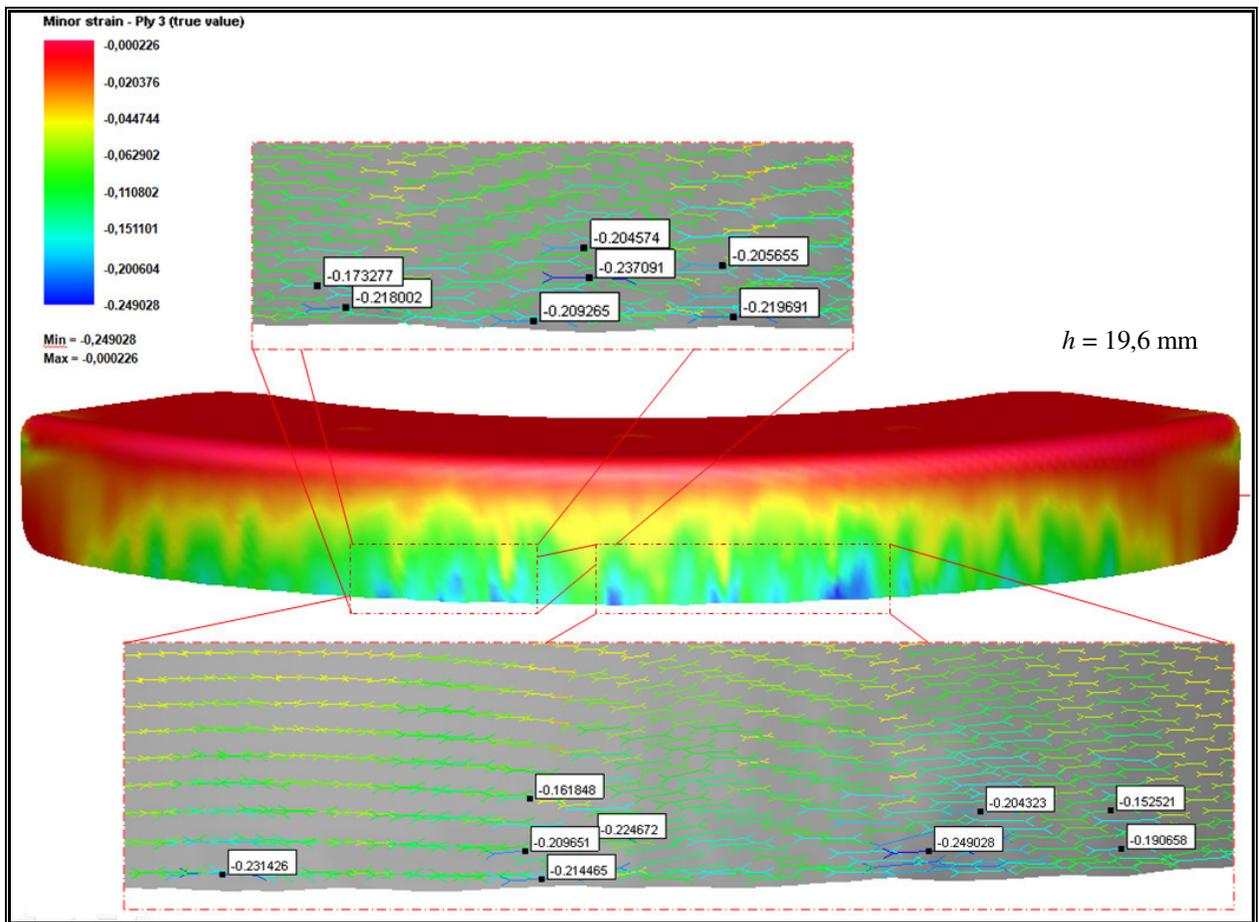


Figura 4.4 – Deformações observadas na aba do componente virtual ($R_C=100 \text{ mm}$; $e=1,0 \text{ mm}$).



Figura 4.5 – Componente com rugas acima do limite ($R_C=100 \text{ mm}$; $e=1,0 \text{ mm}$).

Na figura 4.6, é feita uma análise comparativa de uma seção da aba extraída do ensaio virtual de um plano localizado próximo à extremidade do produto e também em relação à vista superior da aba do componente obtido no ensaio prático. Analisando a seção resultante da simulação, observa-se a existência de uma irregularidade localizada, diferentemente da condição

anterior de altura de aba simulada com altura de 17,6 mm, em que nada pode ser visto. A amplitude da ruga é significativamente inferior àquela verificada para o componente obtido através do ensaio prático, cujos valores excederam o limite de conformabilidade previamente estabelecido, associado a uma altura de ruga de 0,8 mm. A divergência entre os valores de altura de ruga verificada entre os componentes práticos e virtuais deve-se a dificuldade de se ajustar adequadamente o modelo numérico de modo a permiti-lo identificar com exatidão o momento da nucleação e possibilitar obter as mesmas amplitudes de rugas observadas na prática.

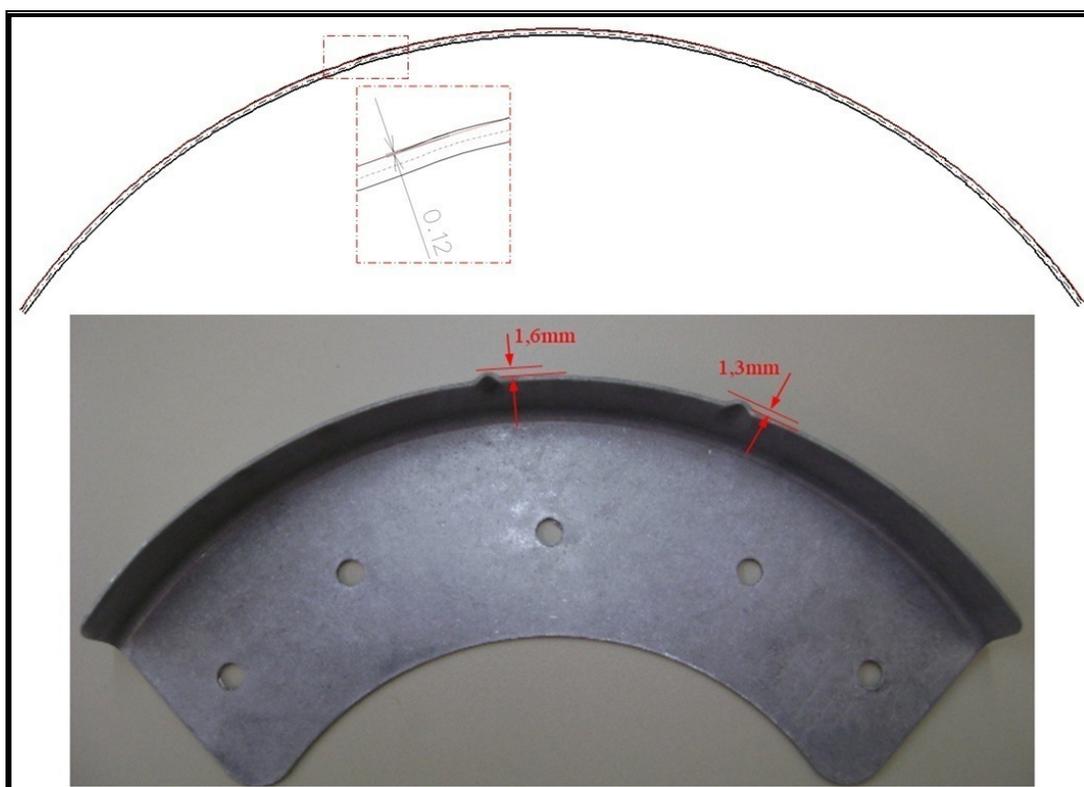


Figura 4.6 – Irregularidades nas abas virtual e real na condição acima do limite ($R_C=100$ mm; $e=1,0$ mm).

4.1 Blanks de 1,0 mm de espessura

Após executada a mesma análise descrita anteriormente para todos os raios de curvatura utilizados neste trabalho, cujos resultados são apresentados no apêndice A, foi possível verificar

os maiores valores de altura de aba que puderam ser alcançados para cada condição ensaiada sem exceder o limite de altura de ruga pré-estabelecido (Tabela 4.1). As rugas resultantes dos cinco componentes conformados para cada condição ensaiada foram majoritariamente similares em altura e posicionamento na aba. Para a espessura de 1,0 mm os componentes tendem a apresentar poucas rugas, as quais se caracterizam geralmente por serem estreitas e altas. Quando conformadas dentro do limite, esses componentes apresentam suaves ondulações distribuídas por toda a extensão da aba.

Tabela 4.1 – Alturas de abas e de rugas obtidas com *blanks* de 1,0 mm de espessura.

	Altura de Aba Prático (mm)	Altura de Aba Virtual (mm)	Desvio entre as alturas de aba - prático e virtual	Máx. Altura de Ruga Prático (mm)	Máx. Altura de Ruga Virtual (mm)	Desvio entre as alturas de ruga - prático e virtual
R100	17,1	17,6	2,8%	0,3	Não Mensurável	
	19,1	19,6	2,6%	1,6	0,1	92,5%
R200	22,3	22,1	0,9%	0,4	Não Mensurável	
	24,4	24,0	1,6%	1,1	0,1	90,9%
R300	29,0	29,0	0,0%	0,1	Não Mensurável	
	31,1	31,4	1,0%	1,9	Não Mensurável	
R400	29,9	29,5	1,3%	0,2	Não Mensurável	
	32,0	31,5	1,6%	0,8	Não Mensurável	

Na simulação numérica as amplitudes das rugas resultantes são menores que as verificadas para a mesma condição ensaiada na prática, evidenciando que o momento de nucleação definido pelo modelo numérico não está adequadamente calibrado.

Nos ensaios práticos observou-se que a nucleação de rugas na conformação de abas convexas sem matriz rígida está fortemente associada às características da placa de poliuretano empregada. Por ser um material maleável submetido a ciclos de alta pressão esse material está sujeito a uma variação de suas propriedades no decorrer de sua vida útil. Desse modo, pode-se afirmar que a divergência entre as alturas de rugas dos componentes reais e simulados, é resultado também da dificuldade de adequação de uma lei de escoamento capaz de caracterizar com fidelidade o comportamento da membrana de borracha no *software* de simulação.

Na figura 4.7, os máximos valores de altura de aba que puderam ser obtidos utilizando-se *blanks* de 1,0 mm de espessura, respeitando o critério de conformabilidade previamente estabelecido, são utilizados para construção do gráfico de conformabilidade. Observa-se que à medida que o raio de curvatura é aumentado, a área da aba conformada torna-se maior e permite uma melhor distribuição das tensões compressivas. Com isso os valores de deformação tornam-se

menos intensos e possibilitam obter abas mais altas e isentas de defeitos. Assim a melhor aproximação para o ajuste desses resultados se deu por meio de uma curva polinomial de segundo grau, que aumenta significativamente quando o raio de curvatura é aumentado, mas que apresenta uma tendência de se estabilizar para raios de curvatura maiores que 300 mm em torno de uma altura de aba de 30 mm. O valor do R quadrático representa o ajuste da curva em relação aos pontos definidos experimentalmente.

Combinações de altura de aba e raio de curvatura que resultam em pontos abaixo da curva são seguras, ou seja, a aba formada com os parâmetros selecionados é isenta de irregularidades. Já os pontos localizados acima da curva devem ser evitados, pois as abas em tais condições não podem ser conformadas utilizando-se ferramentas simples como as empregadas neste trabalho. Nestes casos torna-se necessário empregar ferramentas com *dam*, apresentadas no tópico 2.4.2, capazes de promover um estiramento da aba e evitar a nucleação de rugas.

Os resultados apresentados na tabela 4.1 foram obtidos empregando-se uma pressão de conformação de 41 MPa. Com base em alguns ensaios experimentais pode-se afirmar que um acréscimo na pressão de conformação não implica necessariamente em um deslocamento (*offset*) da curva para cima, uma vez que além da pressão hidráulica, diversas outras variáveis interferem no limite de conformabilidade do material.

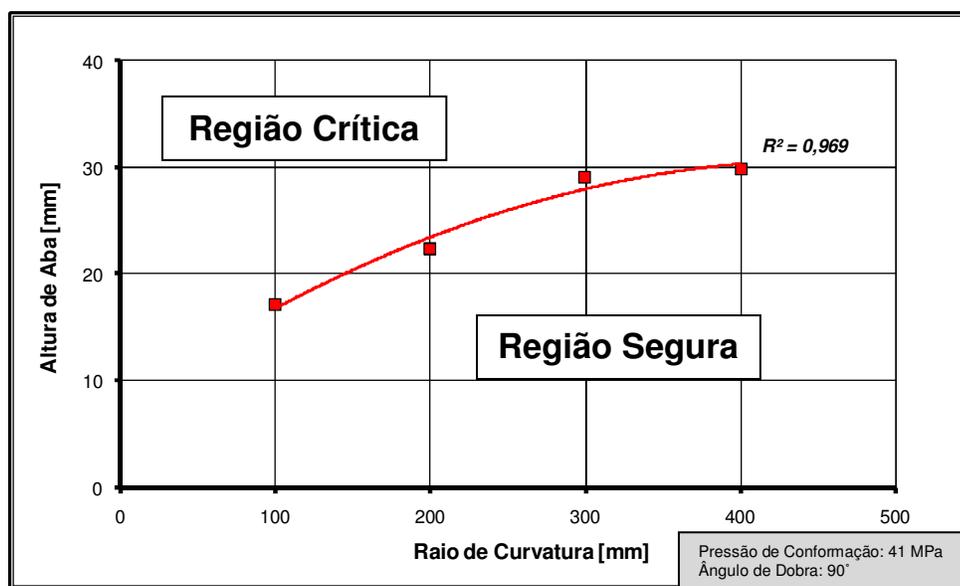


Figura 4.7 – Mapeamento do processo para *blanks* de 1,0 mm de espessura.

Além da definição das alturas de abas limite, foi possível também realizar uma análise comparativa dos valores de deformação compressiva associados a tais condições. Os valores comparados foram extraídos do *software* de simulação *Pam Stamp*[®] e dos métodos analíticos definidos por Wang et al. (1995) e Flow Pressure Systems AB (2002), equações 2.1 e 2.6, respectivamente e são apresentados na tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Deformações compressivas obtidas com *blanks* de 1,0 mm de espessura.

	Deformações Distribuídas			Deformações Localizadas
	$\epsilon_{\min.}$ (Método Analítico Wang (1995) - Eq. 2.1)	$\epsilon_{\min.}$ (Método Analítico - Flow (2002) - Eq. 2.6)	$\epsilon_{\min.}$ (Simulação Numérica - Região sem ruga)	$\epsilon_{\min.}$ (Simulação Numérica - Pico da Ruga)
R100	-0,1413	-0,1710	-0,1394	-0,2066
	-0,1584	-0,1910	-0,1511	-0,2490
R200	-0,0973	-0,1115	-0,0984	-0,1429
	-0,1067	-0,1220	-0,1168	-0,1699
R300	-0,0866	-0,0967	-0,0911	-0,1720
	-0,0930	-0,1037	-0,0682	-0,1815
R400	-0,0678	-0,0748	-0,0607	-0,1165
	-0,0727	-0,0800	-0,0488	-0,1284

Analisando os dados da tabela 4.2 e a figura 4.8 pode-se constatar que os resultados obtidos com o método de Wang et al. (1995) foram similares aos obtidos com o método Flow Pressure Systems AB (2002) que considera apenas as características geométricas do componente. Além disso, os valores de deformação compressiva na aba do componente simulado, nas regiões em que não houve nucleação de rugas, são convergentes com àqueles apresentados pelos modelos analíticos, comprovando que estes métodos calculam apenas um valor de deformação que é válido para toda a extensão da aba conformada e desprezam qualquer defeito localizado que possa vir a ocorrer. Com base nessas informações, pode-se concluir que os métodos analíticos são válidos para cálculos de deformação compressiva apenas em condições em que o limite de conformabilidade não for excedido.

Já para as condições de conformação em que o limite é excedido e a nucleação e crescimento de rugas ocorre, os valores de deformação tendem a serem mais críticos em regiões específicas e só podem ser observados por meio do resultado da simulação numérica. Os pontos referentes a esta condição distanciam-se dos demais no gráfico da figura 4.8. Como já observado anteriormente, a existência de um atraso na nucleação das rugas no método numérico resulta em rugas mais baixas que àquelas obtidas nos ensaios práticos. Caso não houvesse tal desvio, a

amplitude das rugas e os valores de deformação compressiva resultantes da simulação seria maiores, e os pontos azuis da figura 4.8 tenderiam a se distanciar ainda mais dos outros métodos.

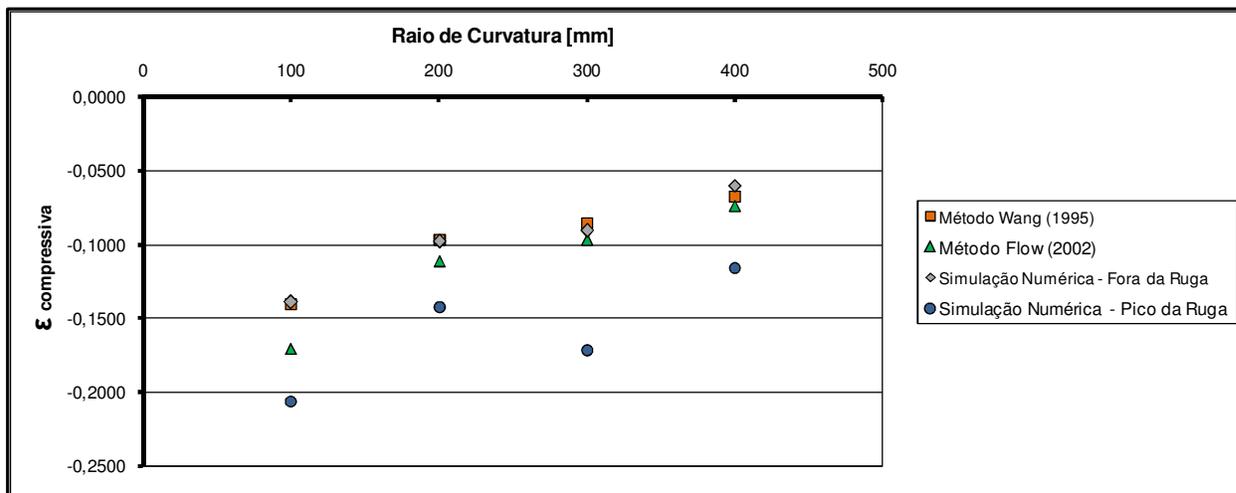


Figura 4.8 – Valores de deformação compressiva crítica em função do raio de curvatura (*Blanks* de 1,0 mm de espessura).

4.2 *Blanks* de 1,27 mm de espessura

Na tabela 4.3, são apresentados os valores de altura de aba e de ruga obtida para cada condição ensaiada. Os resultados referentes aos ensaios com *blanks* de 1,27 mm de espessura são apresentados no apêndice B.

Tabela 4.3 – Alturas de abas e de rugas obtidas com *blanks* de 1,27 mm de espessura.

	Altura de Aba Prático (mm)	Altura de Aba Virtual (mm)	Desvio entre as alturas de aba - prático e virtual	Máx. Altura de Ruga Prático (mm)	Máx. Altura de Ruga Virtual (mm)	Desvio entre as alturas de ruga - prático e virtual
R100	17,2	17,0	1,3%	Não Mensurável	Não Mensurável	
	19,8	20,4	2,9%	1,3	0,1	92,3%
R200	25,3	25,9	2,3%	Não Mensurável	0,2	
	27,0	27,1	0,4%	1,6	0,2	87,5%
R300	28,4	29,1	2,4%	Não Mensurável	Não Mensurável	
	30,2	31,1	2,9%	1,1	0,2	81,8%
R400	32,0	32,0	0,0%	Não Mensurável	0,1	
	34,5	34,6	0,3%	2,1	0,3	85,7%

Na figura 4.9, os máximos valores de altura de aba obtidos utilizando-se *blanks* de 1,27mm de espessura, respeitando o critério de conformabilidade previamente estabelecido, são utilizados para construção do gráfico de conformabilidade.

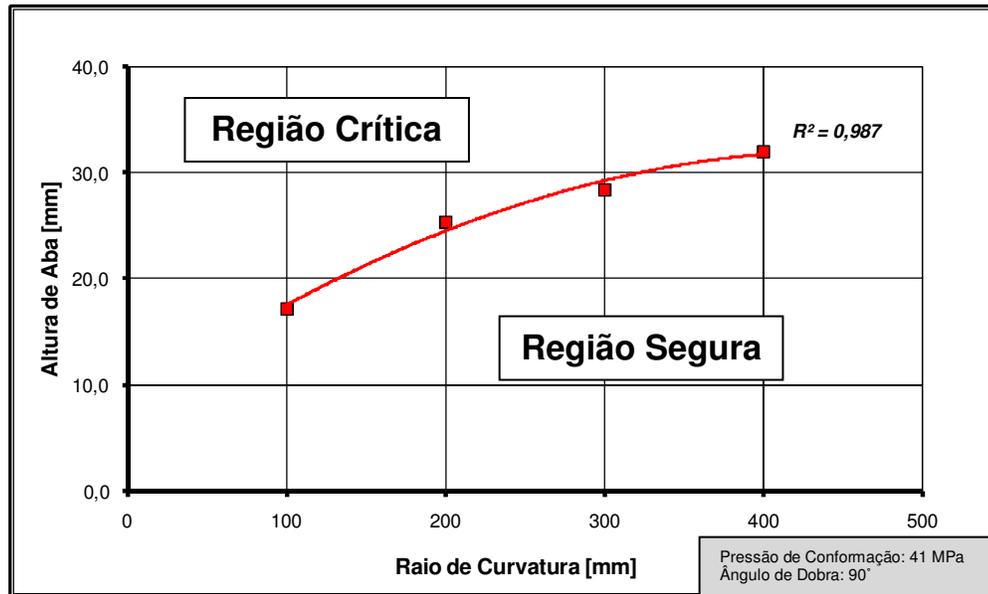


Figura 4.9 – Mapeamento do processo para *blanks* de 1,27 mm de espessura.

Assim como observado para os componentes de 1,0 mm de espessura, para os *blanks* de 1,27 mm também foi possível observar uma relação direta entre raio de curvatura e altura de aba limite. Abas em média 4,0 mm mais altas foram obtidas a cada evolução de raio de curvatura, exceto na mudança de 100 mm para 200 mm em que se obteve um aumento de 9,0 mm na altura da aba. Desse modo, pode-se afirmar que a curva limite de conformabilidade que representa essa situação é caracterizada por um polinômio de segundo grau, com menor tendência de estabilização para raios de curvatura maiores como observado para os *blanks* de 1,0 mm de espessura.

Observou-se ainda que para os *blanks* de 1,27 mm não houve uma relação gradual entre aumento da altura da aba e aumento da altura das rugas, ou seja, até que o limite de conformabilidade não foi atingido, apenas pequenas ondulações puderam ser observadas na aba conformada. No entanto, quando se conformou o componente com aba crítica, apenas 2,0 mm mais alta que a condição anterior, rugas de grande amplitude puderam ser observadas. Isso se deve ao fato de que os *blank* mais espessos tendem a apresentar maior resistência estrutural e

dificultam a nucleação de rugas. Todavia, apenas um pequeno incremento nos valores de tensão, resultantes de uma aba 2,0 mm mais alta, é capaz de ocasionar um desequilíbrio no estado de tensão e permitir que as rugas apareçam e cresçam de modo acentuado.

Na tabela 4.4 são apresentados valores de deformação compressiva extraídos do *software* de simulação *Pam Stamp*[®] e dos métodos analíticos definidos por Wang et al. (1995) e Flow Pressure Systems AB (2002), equações 2.1 e 2.6, respectivamente.

Tabela 4.4 – Deformações compressivas obtidas com *blanks* de 1,27 mm de espessura.

	Deformações Distribuídas			Deformações Localizadas
	$\epsilon_{\min.}$ (Método Analítico Wang (1995) - Eq. 2.1)	$\epsilon_{\min.}$ (Método Analítico - Flow (2002) - Eq. 2.6)	$\epsilon_{\min.}$ (Simulação Numérica - Região sem ruga)	$\epsilon_{\min.}$ (Simulação Numérica - Pico da Ruga)
R100	-0,1382	-0,1720	-0,1262	-0,1808
	-0,1604	-0,1980	-0,1326	-0,1908
R200	-0,1087	-0,1265	-0,0941	-0,1751
	-0,1162	-0,1350	-0,1183	-0,2188
R300	-0,0834	-0,0947	-0,0813	-0,1536
	-0,0889	-0,1007	-0,0925	-0,1755
R400	-0,0717	-0,0800	-0,0575	-0,1517
	-0,0775	-0,0863	-0,0618	-0,1639

Com base nos valores apresentados na tabela 4.4 foi possível elaborar o gráfico apresentado na figura 4.10.

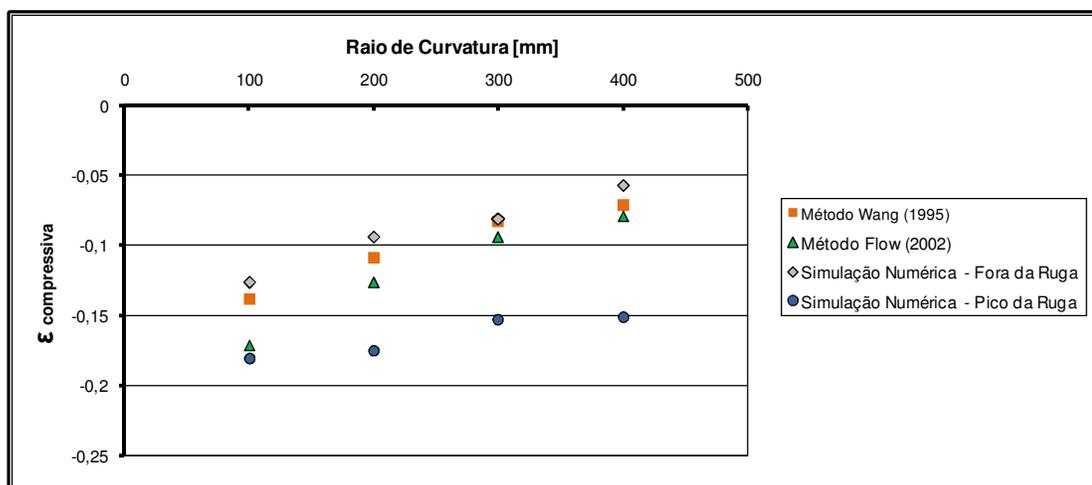


Figura 4.10 – Valores de deformação compressiva crítica em função do raio de curvatura (*Blanks* de 1,27 mm de espessura).

Assim como ocorreu com os componentes de 1,0 mm de espessura, os resultados dos métodos analíticos convergem com os valores de deformação fora da região da ruga, obtido por meio da simulação numérica, comprovando que esses métodos estão restritos ao cálculo de deformação em condições em que não ocorrem nucleação e crescimento de rugas. Já os pontos azuis da figura 4.10, referentes aos valores de deformação observados no pico da ruga, embora associados a rugas mais baixas que as observadas nos ensaios práticos, apresentam-se mais intensos e se distanciam dos outros métodos.

4.3 Blanks de 1,6 mm de espessura

Na tabela 4.5, são apresentados os valores de altura de aba e de rugas obtidos para cada condição ensaiada. Os resultados referentes aos ensaios com *blanks* de 1,6 mm de espessura são apresentados no apêndice C.

Tabela 4.5 – Alturas de abas e de rugas obtidas com *blanks* de 1,6 mm de espessura.

	Altura de Aba Prático (mm)	Altura de Aba Virtual (mm)	Desvio entre as alturas de aba - prático e virtual	Máx. Altura de Ruga Prático (mm)	Máx. Altura de Ruga Virtual (mm)	Desvio entre as alturas de ruga - prático e virtual
R100	19,8	20,0	1,0%	0,3	Não mensurável	
	21,3	22,0	3,2%	2,4	0,4	83,3%
R200	24,6	24,2	1,6%	Não mensurável	0,1	
	25,8	25,8	0,0%	1,4	0,1	92,9%
R300	30,9	30,6	1,0%	Não mensurável	Não mensurável	
	33,0	32,7	0,9%	1,3	0,1	92,3%
R400	39,9	39,5	1,0%	Não mensurável	Não mensurável	
	42,1	41,8	0,7%	0,4 (Rugas muito próximas)	0,6	33,3%

Para a espessura de 1,6 mm observou-se que as rugas resultantes nas abas conformadas tendem a se apresentarem mais largas e baixas, uma vez que materiais mais de maior espessura são mais resistentes e dificultam a formação de picos agudos.

Observou-se ainda que os componentes conformados abaixo do limite tendem a apresentar um maior número de ondulações na aba se comparado aos componentes de menor espessura. Para os ensaios realizados com o raio de curvatura de 400 mm, o componente com aba de 42,1 mm não atingiu o limite de conformabilidade em termos de altura de rugas. No entanto, a distância entre as rugas foi numericamente inferior a três vezes a altura da maior ruga. Como tal

condição pode comprometer a integridade do componente conformado, esta foi então também definida como um limite de conformabilidade.

As rugas resultantes da simulação numérica foram mais altas que as observadas nas espessuras anteriores, entretanto os valores obtidos ainda estavam abaixo do limite de 0,8 mm, e em alguns casos discrepantes em mais de 1,0 mm em relação a altura das rugas obtidas nos ensaios práticos. Por outro lado, o componente resultante da simulação numérica reproduziu a tendência observada nos ensaios práticos com *blanks* de 1,6 mm de espessura de apresentar diversas ondulações na aba conformada.

A partir dos dados apresentados na tabela 4.5, foi possível elaborar a curva limite de conformação em função da altura de aba do componente (Figura 4.11). Assim como observado para as outras espessuras, a altura da aba limite apresenta uma relação diretamente proporcional com o raio de curvatura. O que difere neste caso é que, embora também representada por um polinômio de segundo grau, os valores da aba continuam aumentando significativamente mesmo para os maiores raios de curvatura, não seguindo a tendência de estabilização para os raios de curvatura de 300 mm e 400 mm, observada nos gráficos anteriores. Esse efeito é resultante da mudança do critério do limite de conformabilidade, que passou a ser em algumas condições, definido pela distância entre picos de rugas e não pela amplitude das mesmas.

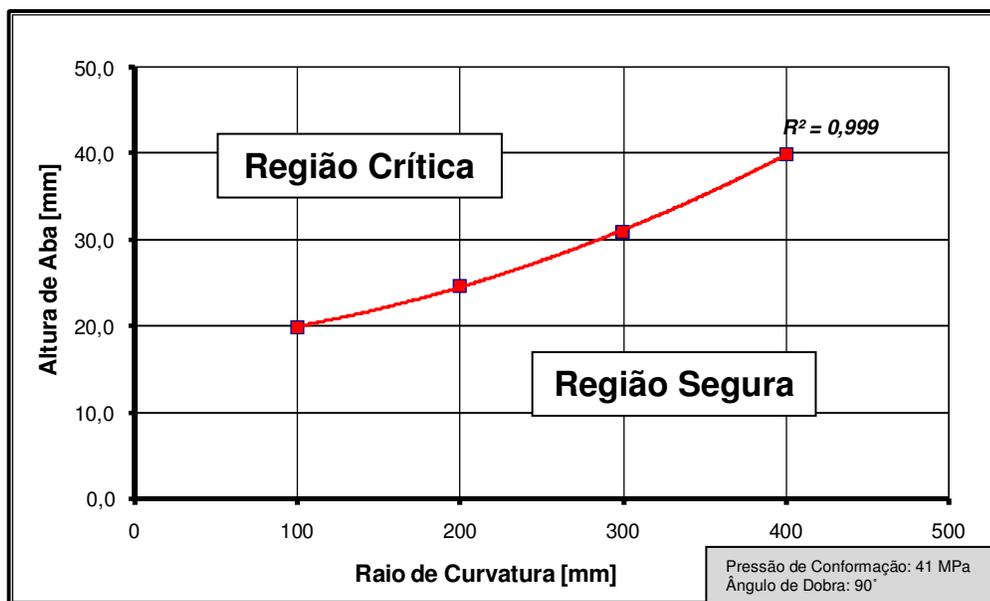


Figura 4.11 – Mapeamento do processo para *blanks* de 1,6 mm de espessura.

Em relação à análise dos valores de deformação compressiva, foram considerados os resultados das análises de deformação da grade de círculos gravada nas peças, além dos valores extraídos do *software* de simulação *Pam Stamp*[®] e dos métodos analíticos definidos por Wang et al. (1995) e Flow Pressure Systems AB (2002), equações 2.1 e 2.6, respectivamente. Estes valores são apresentados na tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Deformações compressivas obtidas com *blanks* de 1,6 mm de espessura.

	Deformações Distribuídas			Deformações Localizadas	
	ϵ_{\min} . (Método Analítico Wang (1995) - Eq. 2.1)	ϵ_{\min} . (Método Analítico Flow (2002) - Eq. 2.6)	ϵ_{\min} . (Simulação Numérica - Região sem ruga)	ϵ_{\min} . (Simulação Numérica - Pico da Ruga)	ϵ_{\min} . (Método dos Círculos)
R100	-0,1546	-0,1980	-0,1460	-0,2084	-0,18
	-0,1672	-0,2130	-0,1828	-0,3268	-0,20
R200	-0,0985	-0,1230	-0,1114	-0,1617	-0,10
	-0,1039	-0,1290	-0,0916	-0,1712	-0,13
R300	-0,0859	-0,1030	-0,0915	-0,1697	-0,10
	-0,0917	-0,1100	-0,1042	-0,1935	-0,12
R400	-0,0858	-0,0998	-0,0682	-0,1897	-0,11
	-0,0910	-0,1053	-0,0721	-0,2855	-0,12

Além dos métodos analíticos e numéricos, para os *blanks* de 1,6 mm de espessura, as deformações na região da ruga foram analisadas também pelo método da grade de círculos. No entanto, devido à geometria convexa da aba e às pequenas variações nas dimensões dos círculos, as medições obtidas não apresentam um alto nível de confiabilidade. Em função de tais desvios pode-se observar na figura 4.12 que embora medido no pico da ruga, o método da grade de círculos apresentou resultados mais convergentes com os métodos que medem a deformação distribuída do que em relação às deformações localizadas apresentadas pela simulação numérica.

Além do método da grade de círculos, os critérios de Wang, Flow e a simulação numérica medida fora da região da ruga apresentaram valores decrescentes de deformação compressiva a medida que o raio de curvatura aumentava, seguindo a tendência verificada para os *blanks* de 1,0 mm e 1,27 mm de espessura. Já os valores medidos no pico da ruga, por meio da simulação numérica, seguem a mesma tendência apenas para os raios de curvatura de 100 e 200 mm, mantendo-se estável para o raio de 300 mm e voltando a apresentar valores mais críticos para o raio de curvatura de 400 mm. Isso se deve a amplitude da ruga, de 0,6 mm, resultante da simulação do componente no raio de 400 mm, que implica em valores mais intensos de deformação compressiva.

Assim como para as outras espessuras, observa-se que a simulação numérica com *blanks* de 1,6 mm também apresentou resultados divergentes de altura de ruga em relação aos resultados

obtidos nos ensaios práticos, comprovando os erros de parâmetros inseridos no *software* que o impedem de definir com exatidão o momento de nucleação das rugas.

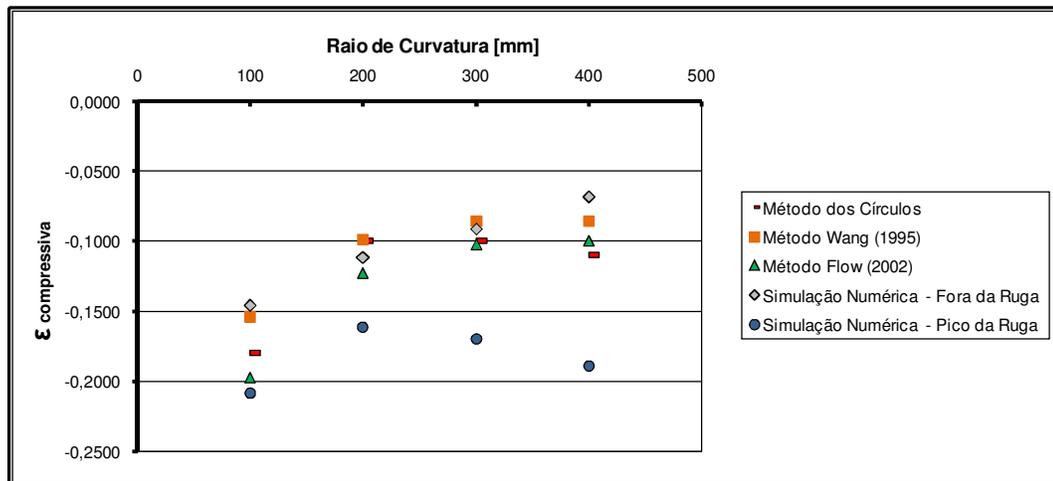


Figura 4.12 – Valores de deformação compressiva crítica em função do raio de curvatura (*Blanks* de 1,6 mm de espessura).

4.4 *Blanks* de 2,0 mm de espessura

Na tabela 4.4, são apresentados os valores de altura de aba e de rugas obtidos dos ensaios com *blanks* de 2,0 mm de espessura. Os resultados detalhados são apresentados no apêndice D.

Assim como ocorrido *blanks* de 1,6 mm conformados na ferramenta de 400 mm de raio de curvatura, os *blanks* de 2,0 mm com aba de 38,0 mm conformados com o raio de curvatura de 300 mm, não infringiram o limite de conformabilidade em termos de altura de rugas, mas por outro lado as rugas formadas não respeitaram a distância mínima entre si, superior a três vezes a altura da maior ruga, e portanto, esta condição foi definida como limite.

Não foi possível realizar os ensaios com os *blanks* de 2,0 mm na ferramenta com raio de curvatura de 400 mm devido ao fato da altura de aba resultante dessa combinação de variáveis estar muito próximo da altura da ferramenta, mesmo considerando a inclusão do calço de 10 mm na base da ferramenta. A decisão de não se fabricar novos calços mais altos foi baseada na falta de necessidade prática por componentes com abas convexas maiores que 50 mm e também pelos riscos de ruptura que uma ferramenta alta pode ocasionar na membrana de borracha.

Tabela 4.7 – Alturas de abas e de rugas obtidas com *blanks* de 2,0 mm de espessura.

	Altura de Aba Prático (mm)	Altura de Aba Virtual (mm)	Desvio entre as alturas de aba - prático e virtual	Máx. Altura de Ruga Prático (mm)	Máx. Altura de Ruga Virtual (mm)	Desvio entre as alturas de ruga - prático e virtual
R100	23,9	23,8	0,4%	0,4	0,2	50,0%
	25,9	26,1	0,8%	2,3	0,4	82,6%
R200	27,9	27,8	0,4%	0,2	0,1	50,0%
	30,2	29,9	1,0%	1,3	0,1	92,3%
R300	35,8	35,9	0,3%	0,2	0,1	50,0%
	38,0	37,9	0,3%	0,3 (Rugas muito próximas)	0,3	0,0%

Embora não se tenha o limite de conformabilidade para o raio de curvatura de 400 mm, o gráfico apresentado na figura 4.13 mostra a mesma tendência observada no gráfico para componentes de 1,6 mm de espessura de aumento significativo da altura da aba limite à medida que o raio de curvatura é aumentado, devido à alteração do critério de conformabilidade para o raio de curvatura de 300 mm.

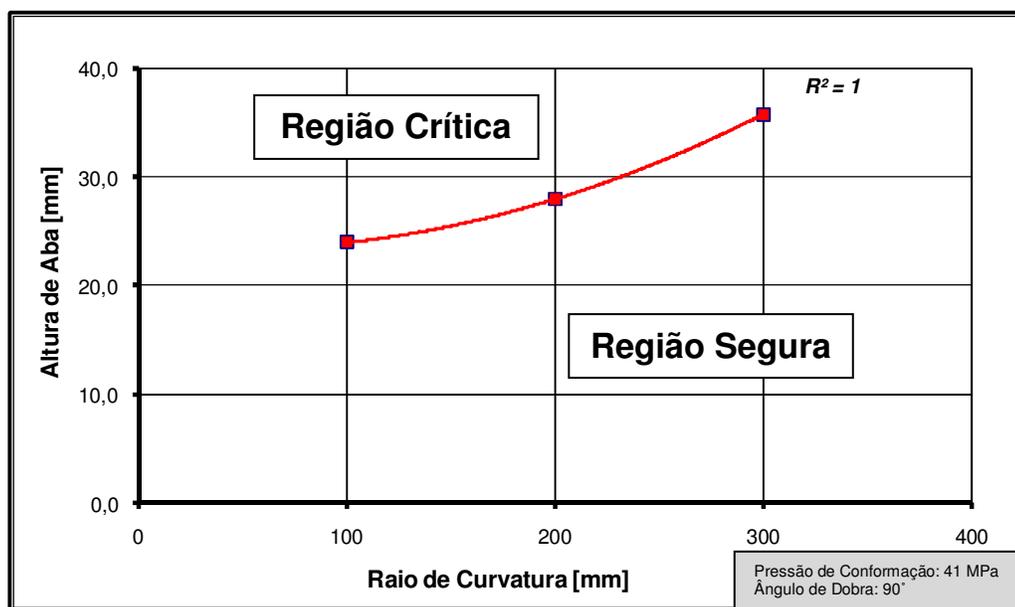


Figura 4.13 – Mapeamento do processo para *blanks* de 2,0 mm de espessura.

Tabela 4.8 – Deformações compressivas obtidas com *blanks* de 2,0 mm de espessura.

	Deformações Distribuídas			Deformações Localizadas	
	$\epsilon_{\min.}$ (Método Analítico Wang (1995) - Eq. 2.1)	$\epsilon_{\min.}$ (Método Analítico - Flow (2002) - Eq. 2.6)	$\epsilon_{\min.}$ (Simulação Numérica - Região sem ruga)	$\epsilon_{\min.}$ (Simulação Numérica - Pico da Ruga)	$\epsilon_{\min.}$ (Método dos Círculos)
R100	-0,1787	-0,2390	-0,1660	-0,2953	-0,22
	-0,1951	-0,2590	-0,2267	-0,4006	-0,26
R200	-0,1120	-0,1395	-0,0855	-0,1578	-0,11
	-0,1221	-0,1510	-0,1329	-0,2420	-0,14
R300	-0,0978	-0,1193	-0,0771	-0,1501	-0,13
	-0,1041	-0,1267	-0,0832	-0,1600	-0,14

Como já mencionado, os *blanks* de maior espessura tendem a apresentar, quando conformados, rugas mais baixas e largas. Os valores de deformação compressiva observados na região de rugas com tais características são baixos se comparados a uma ruga alta com dobra aguda em sua extremidade. É por esse motivo que se observa na figura 4.14 uma maior tendência convergência entre todos os métodos de cálculo de deformação analisados, mesmo considerando os pontos críticos obtidos por meio da simulação numérica. A exceção fica restrita ao raio de curvatura de 100 mm que por ser acentuado, implica em maior concentração das tensões compressivas, o qual, por sua vez, atua em regiões críticas desequilibrando o estado de tensão. Como consequência, foi possível observar, para essa condição de conformação, rugas mais altas nos ensaios práticos e na simulação, embora com amplitudes significativamente distintas.

A medição das deformações na grade de círculos, embora tenha resultado em valores imprecisos devido à dificuldade de medição, apresentou valores próximos aos obtidos pelos outros métodos.

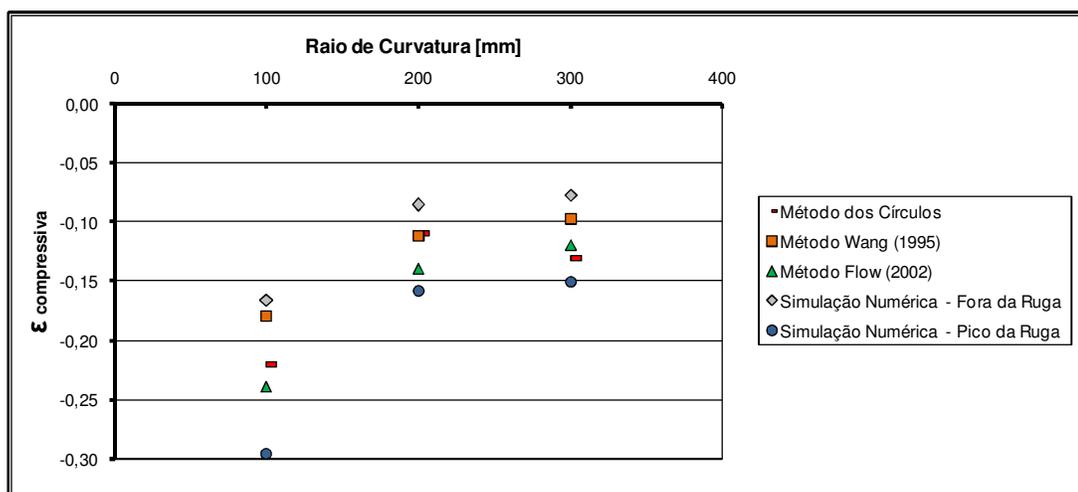


Figura 4.14 – Valores de deformação compressiva crítica em função do raio de curvatura (*Blanks* de 2,0 mm de espessura).

De um modo geral, pode-se afirmar que embora a dificuldade na caracterização do *software* de simulação tenha proporcionado atrasos no momento de nucleação de rugas, ocasionando divergências entre os resultados práticos e virtuais em termos de altura de rugas e valores de deformação compressiva, o gráfico de conformabilidade construído com base nos

defeitos observados nos ensaios práticos permitiram mapear adequadamente o processo de hidroconformação de chapas com abas convexas.

Na figura 4.15 é apresentada uma sobreposição dos limites de conformabilidade definidos para cada uma das espessuras analisadas nesse trabalho. Nela pode-se observar que os valores limite de altura de aba não variaram significativamente para os raios de curvatura de 100; 200 e 300 mm para os *blanks* de 1,0; 1,27 e 1,6 mm de espessura. Os *blanks* de 2,0 mm de espessura apresentaram valores de aba limite um pouco superiores para todos os raios de curvatura, em função do ganho de rigidez proporcionado pelo aumento na espessura, que dificulta a nucleação e crescimento das rugas.

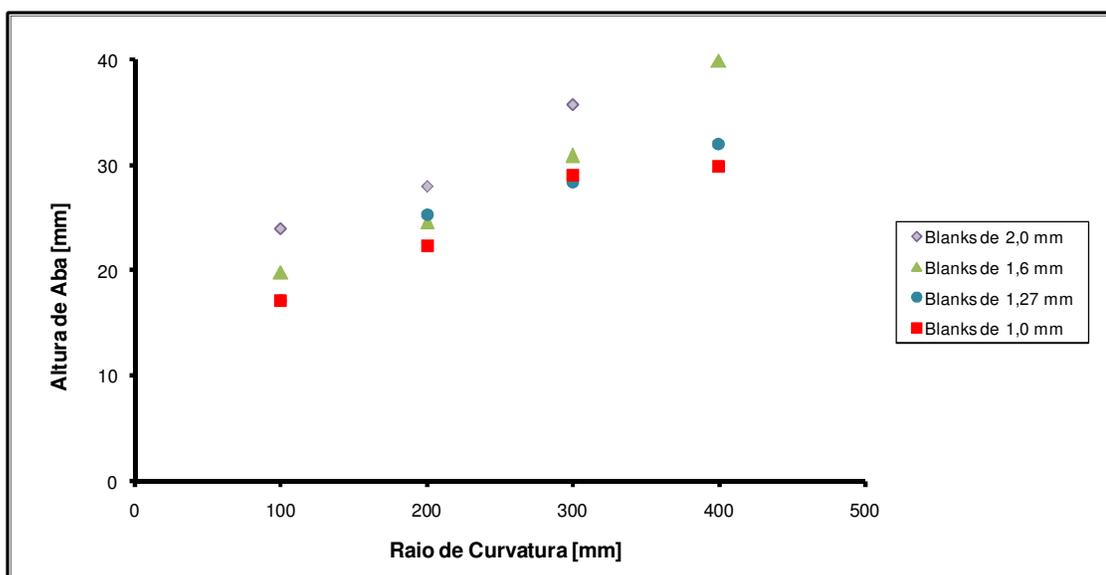


Figura 4.15 – Sobreposição dos limites de conformabilidade de todas as espessuras.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir dos resultados obtidos neste trabalho e considerando os objetivos inicialmente propostos, pode-se concluir:

- Os limites de conformabilidade de componentes da liga 2024-O com abas convexas, submetidos ao processo de hidroconformação de chapas, foram adequadamente definidos para cada condição ensaiada com base nas alturas de rugas resultantes da conformação. Com tais informações é possível antever, para cada combinação de espessura do *blank* e raio de curvatura requeridos, se haverá restrições ou não à conformação de uma determinada altura de aba, permitindo especificar de maneira precisa a ferramenta de conformação mais adequada.

- A altura da aba crítica não se altera significativamente em função da espessura do *blank* conformado.

- *Blanks* de baixa espessura tendem a apresentar rugas estreitas e altas, enquanto *blanks* mais espessos apresentam ondulações por toda a extensão da aba e rugas mais baixas e largas. Desta forma, embora as rugas das chapas mais espessas não tenham ultrapassado o limite de 0,8 mm de altura, elas violaram o critério de espaçamento entre elas, definido em função da altura da maior ruga.

- Existe uma relação inversamente proporcional entre o raio de curvatura da ferramenta e o valor da deformação compressiva crítica. Assim quanto maior o raio de curvatura, menor o valor da deformação independentemente da espessura do *blank* conformado e conseqüentemente maior a altura da aba que pode ser obtida sem a ocorrência de rugas.

- Os métodos analíticos para cálculo da deformação compressiva em abas convexas, resultam em valores genéricos, válidos para qualquer região da aba conformada. Todavia, esses métodos são incapazes de identificar e calcular adequadamente os valores de deformação para condições críticas nas quais há nucleação e crescimento de rugas.

- Na simulação numérica as rugas resultantes são muito menores que as verificadas para a mesma condição ensaiada na prática, evidenciando desvios na calibração dos parâmetros envolvidos no cálculo do instante de nucleação das rugas.

- Os valores de deformação compressiva crítica definidos pelo *software Pam-Stamp*[®] embora maiores que os valores observados por meio dos métodos dos círculos e analíticos, são possivelmente menos intensos que os valores observados na prática, uma vez que tais valores foram avaliados em rugas com amplitudes inferiores às verificadas nos ensaios práticos, devido aos atrasos na nucleação das mesmas.

Diante a abrangência do assunto, serão apresentados a seguir alguns tópicos de sugestões para trabalhos futuros que poderiam contribuir significativamente para um melhor entendimento do processo de hidroconformação de chapas:

- Desenvolver procedimentos que permitam caracterizar adequadamente os parâmetros relacionados ao cálculo do instante de nucleação de rugas no *software* de simulação, possibilitando obter resultados de altura de rugas e valores de deformação compressiva mais próximos dos resultados obtidos nos ensaios práticos.

- Desenvolver procedimentos que permitam caracterizar adequadamente a membrana de borracha no *software* de simulação, garantindo maior confiabilidade aos resultados da simulação.

- Analisar a conformabilidade de abas convexas de *blanks* na condição solubilizada (AQ/W), uma vez que apesar de instável, esta condição é amplamente empregada para conformação de abas convexas.

- Ampliar os procedimentos e análises feitas neste trabalho com a liga de alumínio 2024, para a liga 7475, a qual também é bastante empregada na fabricação de componentes aeronáuticos.

- Estudar os limites de conformabilidade de abas côncavas para se evitar a ocorrência de trincas, uma vez que os esforços atuantes em tais abas são de tração. Componentes com este tipo de aba são frequentemente utilizados no segmento aeronáutico.

Referências Bibliográficas

ABB Metallurgy. *Quintus Flexform Manual*. Suécia, 1990.

AMS-QQ-A-250/5A. *SAE Technical Standards*, 2007.

ASTM D412-06a - Standard test methods for vulcanized rubber and thermoplastic elastomers - Tension. Filadélfia, 2008.

ASTM E290-09 - Standard test methods for bend testing of material for ductility. Filadélfia, 2009.

Abedrabbo, N.; Zampaloni, M. A.; Pourboghrat, F. Wrinkling control in aluminum sheet hydroforming. *International Journal of Mechanical Sciences*. Vol. 47, p. 333-358, 2005.

Asnafi, N. On stretch and shrink flanging of sheet aluminium by fluid forming. *Journal of Materials Processing Technology*. Vol. 96, p. 198-214, 1999.

Assempour, A.; Emami, M. R. Pressure estimation in the hydroforming process of sheet metal pairs with the method of upper bound analysis. *Journal of Materials Processing Technology*. Vol. 209, p. 2270-2276, 2009.

Barlat, F.; Lian, J.; Plastic behavior and stretchability of sheet metals. Part I: a yield function for orthotropic sheets under plane stress conditions. *International Journal of Plasticity*. Vol. 5, p. 51-66, 1989.

Bortolussi, R. *Análise Numérica e Experimental da Hidroconformação de Produtos Tubulares*. 122 p. Tese (Doutorado) - FEM - UNICAMP, Campinas, 2001.

Bresciani Filho, E. *Conformação Plástica dos Metais*, 4ª. Edição, Editora da Unicamp, 1986.

- Crapps, J.; Marin, E.B.; Horstemeyer, M.F.; Yassar, R.; Wang, P.T. Internal state variable plasticity-damage modeling of the copper tee-shaped tube hydroforming process. *Journal of Materials Processing Technology*. Vol. 210, p. 1726–1737, 2010.
- Dieter, G. E. *Mechanical Metallurgy*. Cingapura. McGraw-Hill, 1988.
- Duflou, J. R.; Váncza, J.; Aerens R. Computer aided process planning for sheet metal bending: A state of the art. *Computers in Industry*. Vol. 56. P.747–771, 2005.
- Flow Pressure Systems AB. *Quintus Fluid Cell Press Manual*. 2002.
- Golovashchenko, S. F.; Bessonov N. M.; Ilinich, A. M. Two-step method of forming complex shapes from sheet metal. *Journal of Materials Processing Technology*. Vol. 211, p. 875–885, 2011.
- Hatch, J. E. Aluminum: properties and physical metallurgy. Ohio: American Society for Metals Park, 1984. 424p.
- Hein, P.; Vollertsen, F. Hydroforming of sheet metal pairs. *Journal of Materials Processing Technology*. Vol. 87, p. 154-164, 1999.
- Hill, R. Theory of yielding and plastic flow of anisotropic metals. *Proceedings of the Royal Society*. Vol. 193, p. 281-297, 1948.
- Hill, R. A user-friendly theory of orthotropic plasticity in sheet metals. *International Journal of Mechanical Sciences*. Vol. 35, p. 19-25, 1993.
- Hosford, W. F.; Caddell, R. M. *Metal Forming Mechanics and Metallurgy*. Quarta edição. Nova York. Cambridge University Press, 2011.

- Hu, P.; Li, D. Y.; Li, Y. X. Analytical models of stretch and shrink flanging. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. Vol. 43, p. 1367-1373, 2003.
- Hutchinson, J. W. Plastic buckling. *Advances in Applied Mechanics*. Vol.14, p.67–144, 1974.
- Ingarao, G.; Di Lorenzo, R.; Micari, F. Sustainability issues in sheet metal forming processes: an overview. *Journal of Cleaner Production*. Vol. 19, p. 337-347, 2011.
- Keigler, M.; Bauer, H.; Harrison D.; Silva A. K. M. Enhancing the formability of aluminium components via temperature controlled hydroforming. *Journal of Materials Processing Technology*. Vol. 167, p. 363-370, 2005.
- Lang, L.H.; Wang, Z.R.; Kang, D.C.; Yuan, S.J.; Zhang, S.H.; Danckert, J.; Nielsen, K.B. Hydroforming highlights: sheet hydroforming and tube hydroforming. *Journal of Materials Processing Technology*. Vol. 151, p. 165-177, 2004.
- Lang, L.; Li, T.; Zhou, X.; Danckert, J.; Nielsen, K.B. The effect of the key process parameters in the innovative hydroforming on the formed parts. *Journal of Materials Processing Technology*. Vol. 187-188, p. 304-308, 2007.
- Le Port, A.; Thuillier, S.; Manach, P. Y. Occurrence and numerical prediction of surface defects during flanging of metallic sheets. *International Journal Material Forming*. Vol. 3, p. 215–223, 2010.
- Mahabunphachai, S. e Koç, M. Investigations on forming of aluminum 5052 and 6061 sheet alloys at warm temperatures. *Materials and Design*. Vol. 31, p. 2422-2434, 2010.
- Marniciak, Z.; Duncan, J. L.; Hu, S. J. *Mechanics of Sheet Metal Forming*. Londres: Butterworth-Heinemann, 2002. ISBN 0-7506-5300-0.

- Merklein, M.; Geiger, M.; Celeghini, M. Combined tube and double sheet hydroforming for the manufacturing of complex parts. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. Vol. 54, p. 199-204, 2005.
- Minutolo, F. C.; Durante, M.; Formisano, A.; Langella A. Optimization of a hydroforming process to realize asymmetrical aeronautical components by FE analysis. *Intelligent Production Machines and Systems*. p. 241-246, 2006.
- Novotny, S.; Geiger M. Process design for hydroforming of lightweight metal sheets at elevated temperatures. *Journal of Materials Processing Technology*. Vol. 138, p. 594–599, 2003.
- Pam-Stamp 2G & Pam-Tube 2G. *User Guide*. Paris, 2009.
- Presuel-Moreno, F.; Jakab, M. A.; Tailleart, N.; Goldman, M.; Scully J. R. Corrosion-resistant metallic coatings (2008). *Materials Today*. Vol. 11, p. 14-23, 2008.
- Sala, G. A numerical and experimental approach to optimise sheet stamping technologies: part II - aluminium alloys rubber-forming. *Materials and Design*. Vol. 22, p. 299-315; 2001.
- Saxena, R. K.; Dixit, P.M. Prediction of flange wrinkling in deep drawing process using bifurcation criterion. *Journal of Manufacturing Processes*. Vol. 12, p. 19-29, 2010.
- Tekkaya A. E. State-of-the-art of simulation of sheet metal forming. *Journal of Materials Processing Technology*. Vol. 103, p.14-22, 2000.
- Tseng, H. C.; Hung, J. C.; Hung, C.; Lee, M. L. Experimental and numerical analysis of titanium/aluminum clad metal sheets in sheet hydroforming. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. Vol. 54, p. 93-111, 2010.

- Tuğcu, P.; Neale, K.W.; Wu, P.D.; MacEwen, S.R. Effect of planar anisotropy on wrinkle formation tendencies in curved sheets. *International Journal of Mechanical Sciences*. Vol. 43, p. 2883–2897, 2001.
- Wang, C. T.; Kinzel, G.; Altan, T. Failure and wrinkling criteria and mathematical modeling of shrink and stretch flanging operations in sheet-metal forming. *Journal of Materials Processing Technology*. Vol. 53, p. 759-780, 1995.
- Williams, J. C.; Starke Jr., E. A. Progress in structural materials for aerospace systems. *Acta Materialia*. Vol. 51, p. 5775-5799, 2003.
- Worswick, M.J.; Finn, M.J. The numerical simulation of stretch flange forming. *International Journal of Plasticity*. Vol. 16, p. 701-720, 2000.
- Yadav, A. D. Process analysis and design in stamping and sheet hydroforming. 223p. Tese (Doutorado). *The Ohio State University*, 2008.
- Zampaloni, M.; Abedrabbo, N.; Pourboghrat, F. Experimental and numerical study of stamp hydroforming of sheet metals. *International Journal of Mechanical Sciences*. Vol. 45, p. 1815–1848, 2003.
- Zhang, S. H. Developments in hydroforming. *Journal of Materials Processing Technology*. Vol. 91, p. 236-244, 1999.
- Zhang, G. E.; Yao, J.; Hu, S. J.; Wu, X. Shrink Flanging with Surface Contours. *Journal of Manufacturing Processes*. Vol. 5, p. 143-153, 2003.
- Zhang, S.H.; Wang, Z.R.; Xu, Y.; Wang, Z.T.; Zhou, L.X. Recent developments in sheet hydroforming technology. *Journal of Materials Processing Technology*. Vol. 151, p. 237-241, 2004.

APÊNDICE A – APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS EMPREGANDO *BLANKS* DE 1,0 MM DE ESPESSURA

Neste apêndice são apresentados os resultados contidos nas tabelas 4.1 e 4.2. Os resultados referentes aos ensaios empregando ferramenta com raio de curvatura de 100 mm já constam no corpo do capítulo 4 e por este motivo não serão apresentados nesta seção.

A.1 Raio de Curvatura de 200 mm

A.1.1 Altura de aba limite

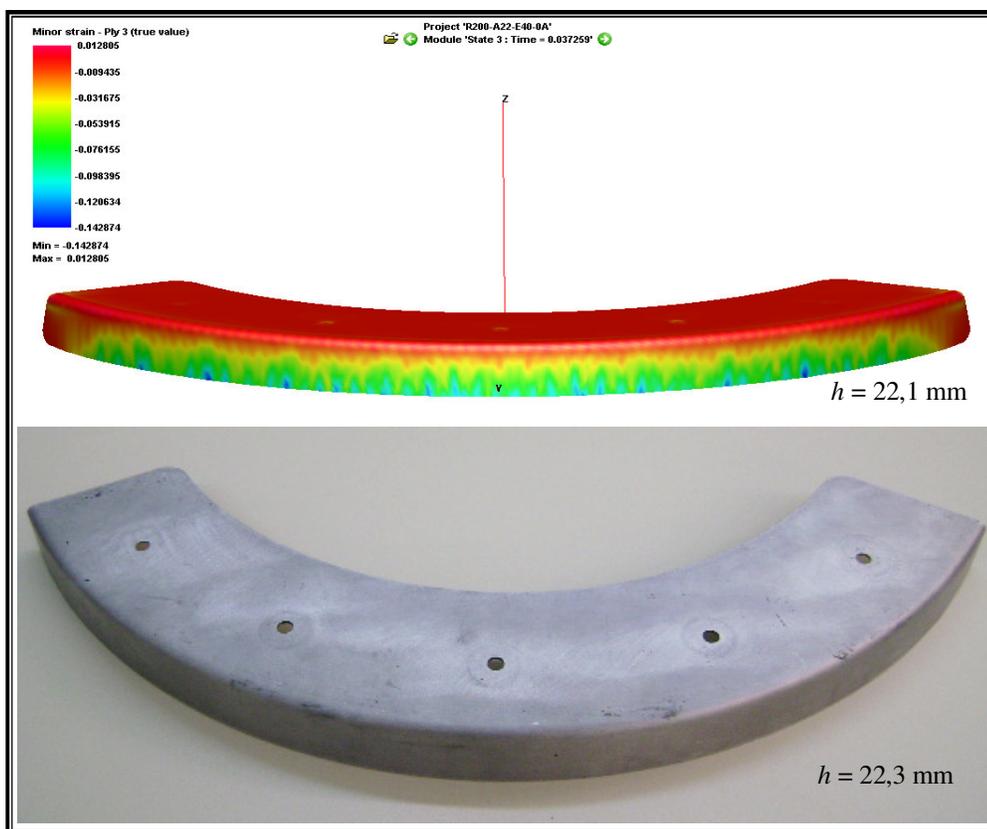


Figura A.1 – Resultados numéricos e experimentais para o componente com aba limite ($R_C=200 \text{ mm}$; $e=1,0 \text{ mm}$).

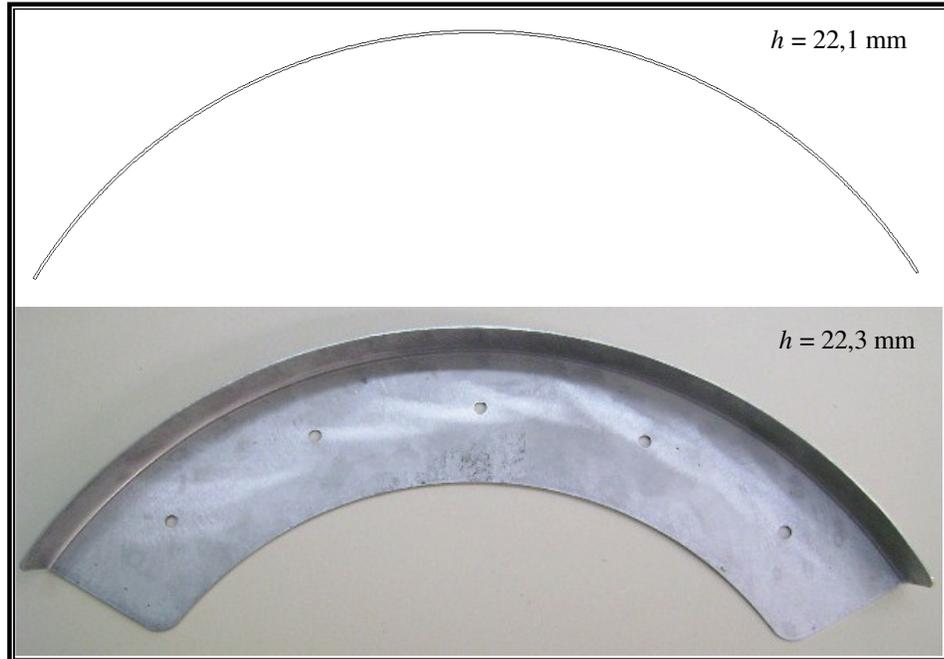


Figura A.2 – Componente isento de rugas críticas ($R_C=200$ mm; $e=1,0$ mm).

A.1.2 Aba acima do limite de conformabilidade

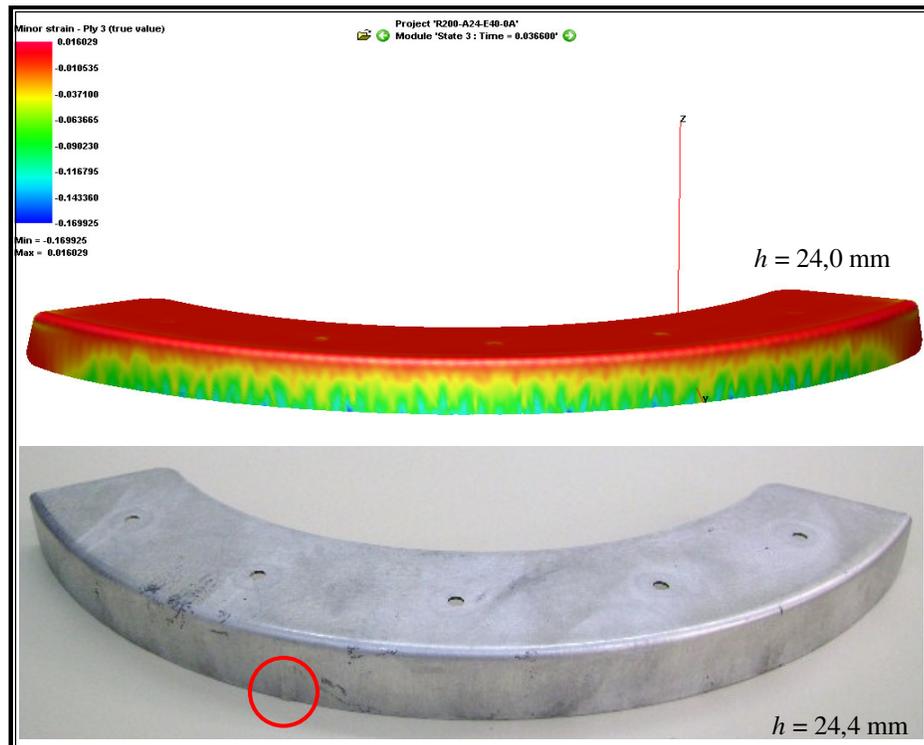


Figura A.3 – Resultados numéricos e experimentais para o componente acima do limite

($R_C=200$ mm; $e=1,0$ mm).

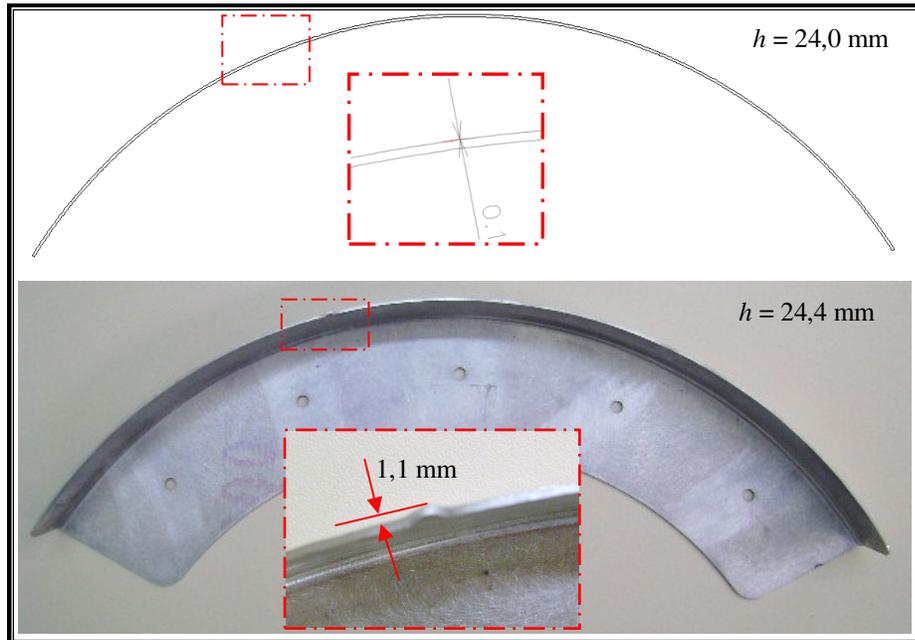


Figura A.4 – Componente com rugas acima do limite ($R_C=200$ mm; $e=1,0$ mm).

A.2 Raio de Curvatura de 300 mm

A.2.1 Altura de aba limite

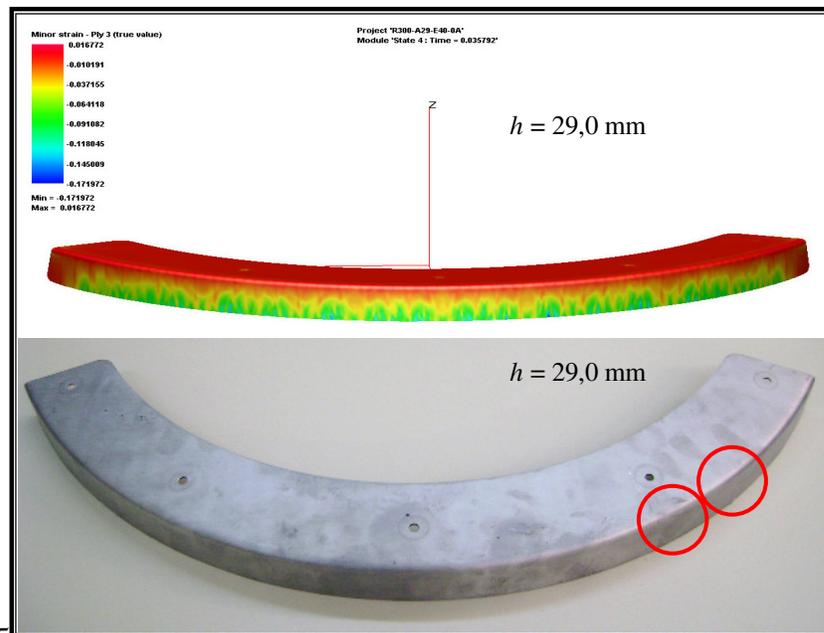


Figura A.5 – Resultados numéricos e experimentais para o componente com aba limite

($R_C=300$ mm; $e=1,0$ mm).

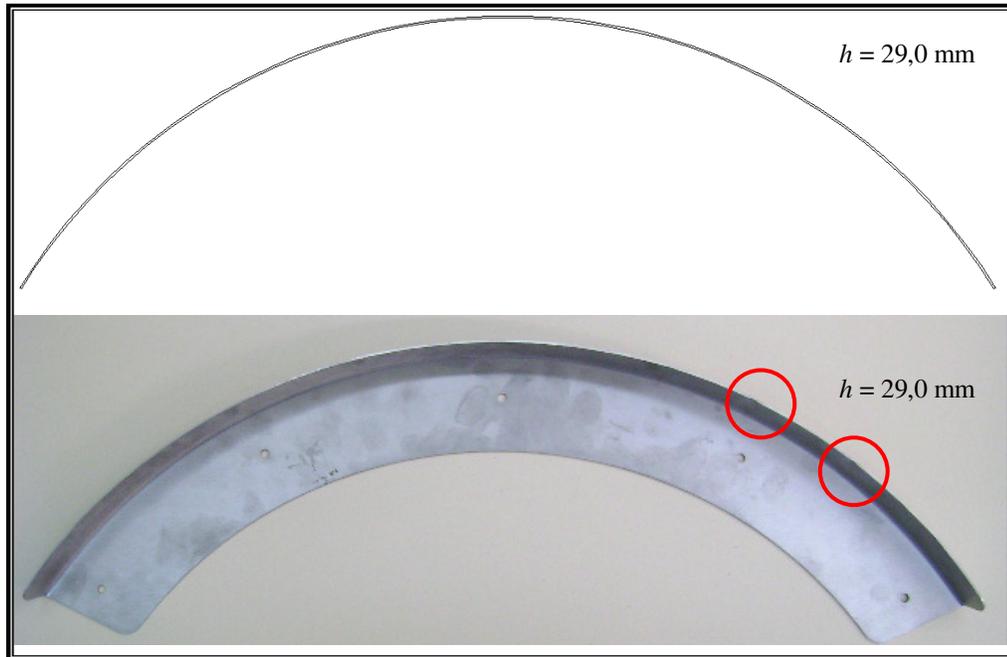


Figura A.6 – Componente isento de rugas críticas ($R_C=300$ mm; $e=1,0$ mm).

A.2.2 Aba acima do limite de conformabilidade

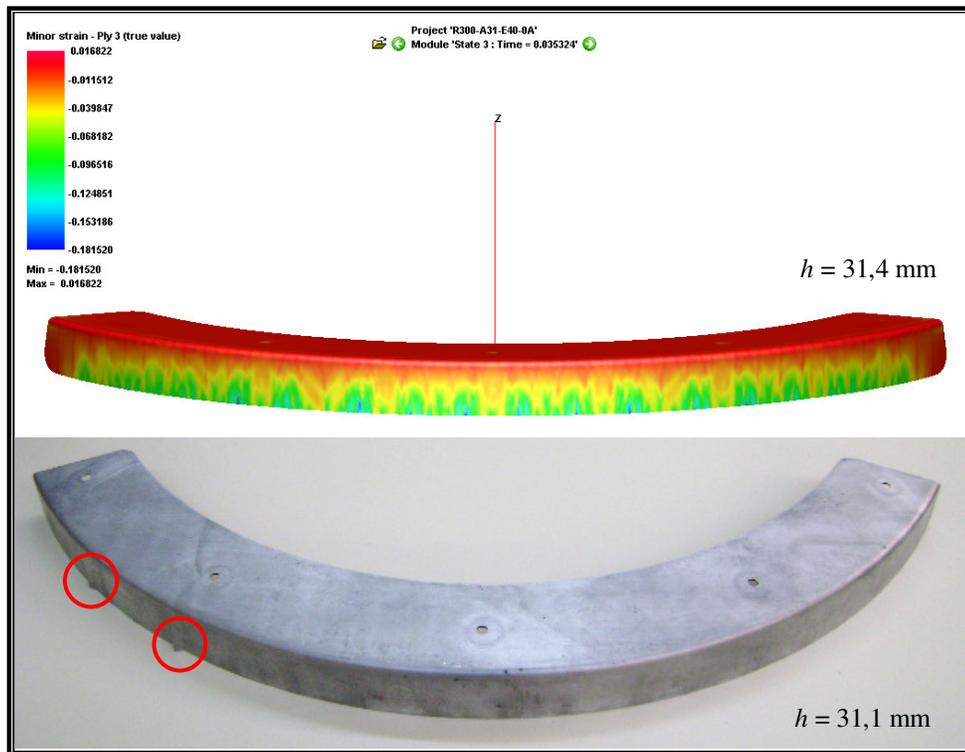


Figura A.7 – Resultados numéricos e experimentais para o componente com aba acima do limite ($R_C=300$ mm; $e=1,0$ mm).

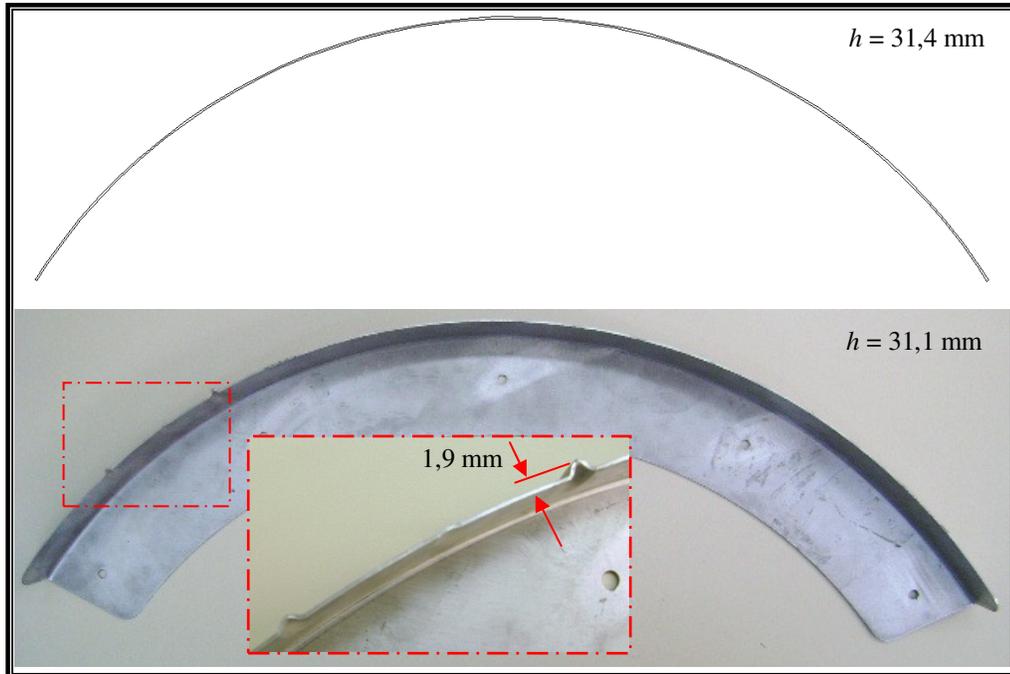


Figura A.8 – Componentes com rugas acima do limite ($R_C=300 \text{ mm}$; $e=1,0 \text{ mm}$).

A.3 Raio de Curvatura de 400 mm

A.3.1 Altura de aba limite

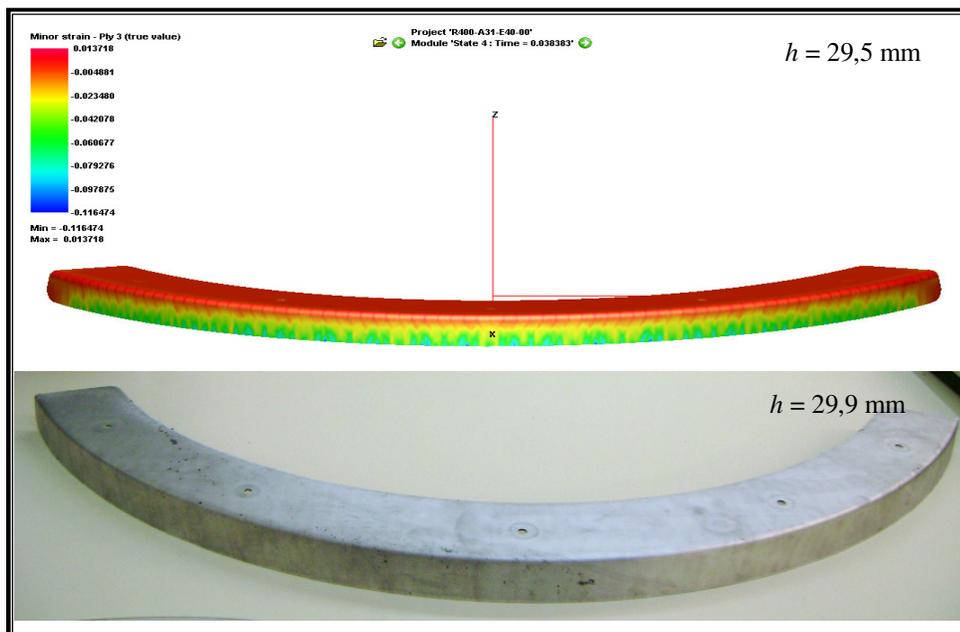


Figura A.9 – Resultados numéricos e experimentais para o componente com aba limite ($R_C=400 \text{ mm}$; $e=1,0 \text{ mm}$).

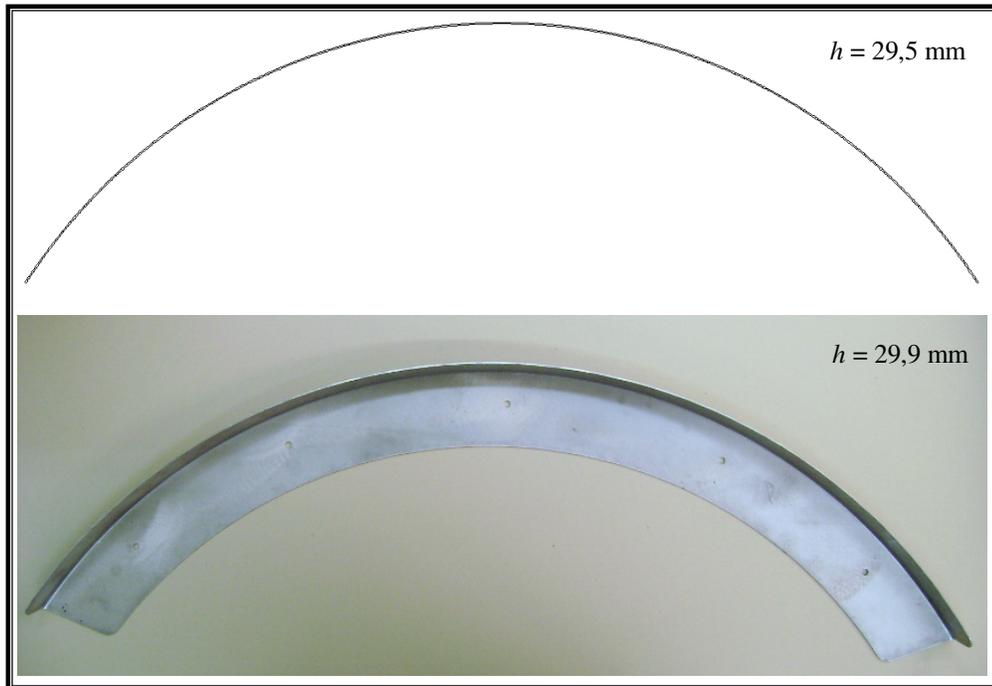


Figura A.10 – Componente isento de rugas críticas ($R_C=400$ mm; $e=1,0$ mm).

A.3.2 Aba acima do limite de conformabilidade

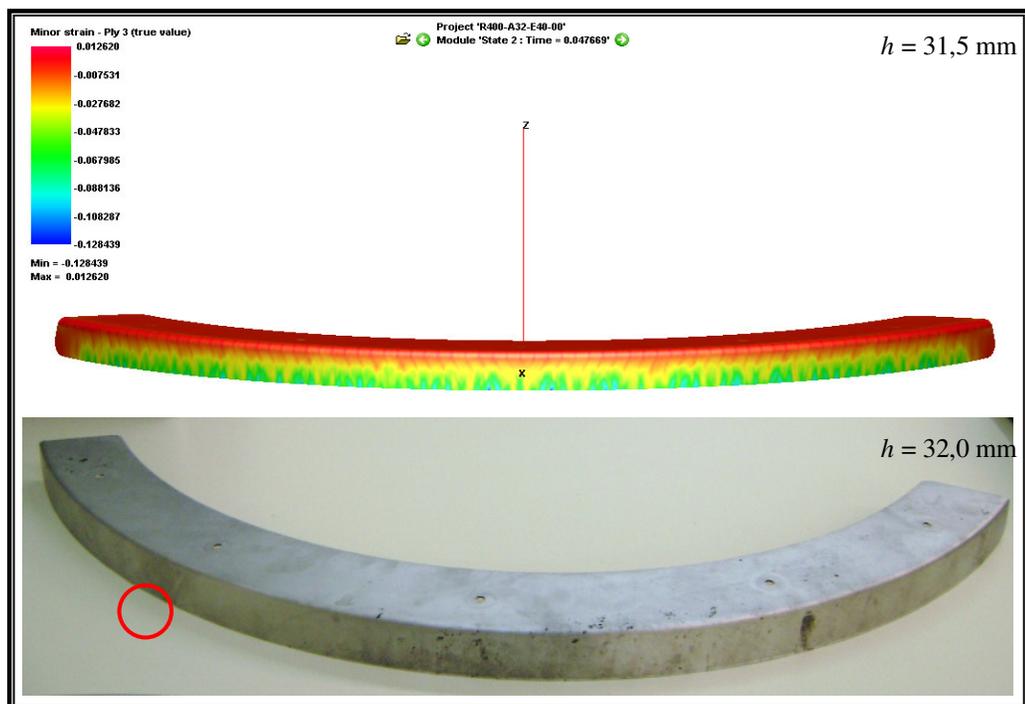


Figura A.11 – Resultados numéricos e experimentais para o componente com aba acima do limite ($R_C=400$ mm; $e=1,0$ mm).

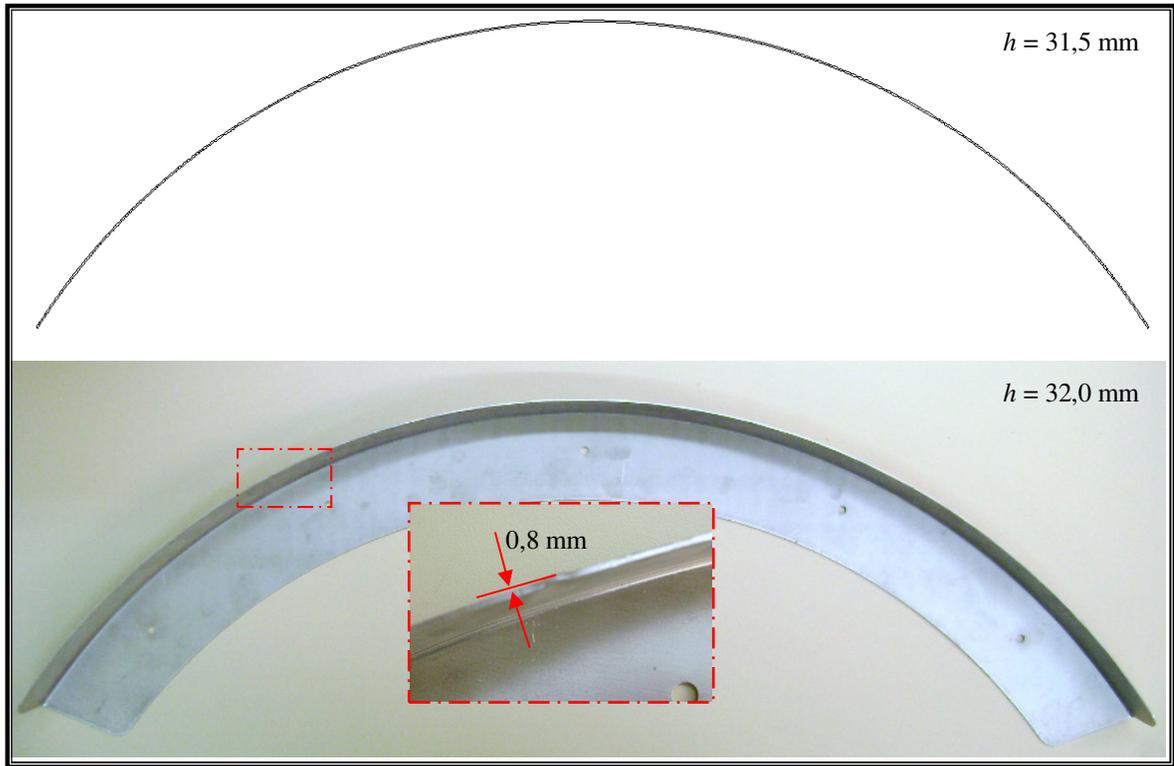


Figura A.12 – Componente com rugas acima do limite ($R_C=400 \text{ mm}$; $e=1,0 \text{ mm}$).

APÊNDICE B – APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS EMPREGANDO *BLANKS* DE 1,27 MM DE ESPESSURA

Neste apêndice são apresentados os resultados que estão contidos nas tabelas 4.3 e 4.4.

B.1 Raio de Curvatura de 100 mm

B.1.1 Altura de aba limite

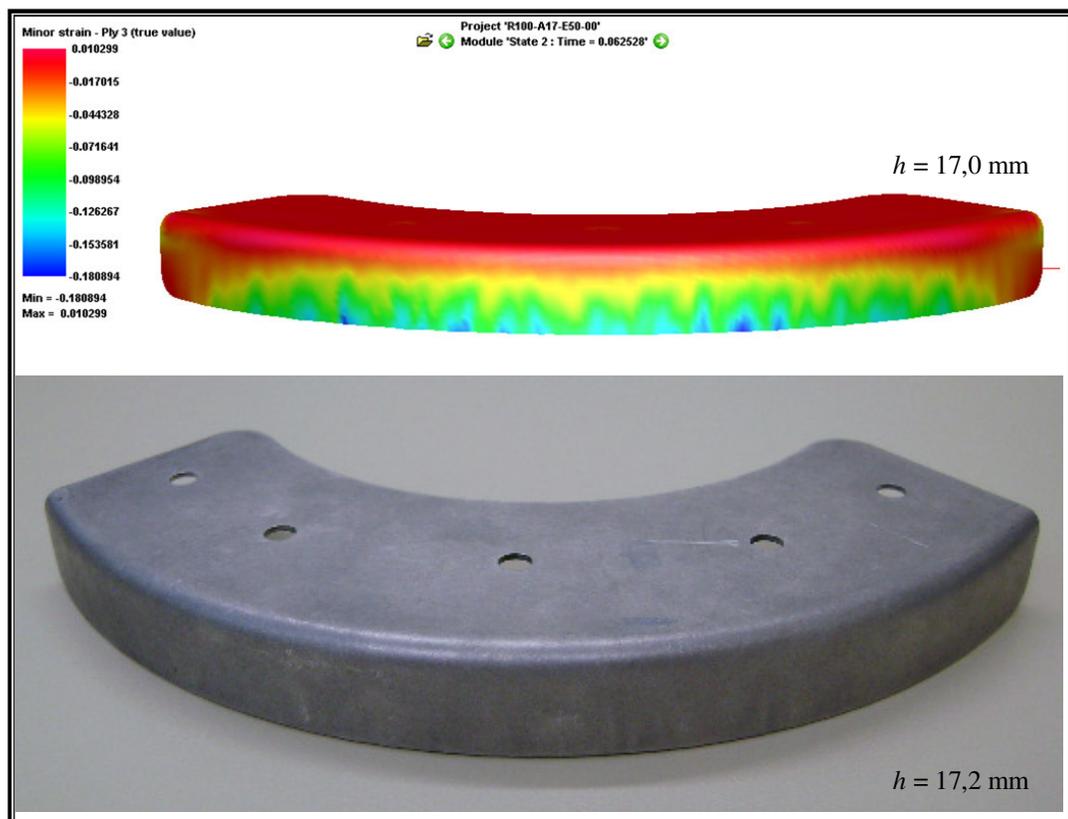


Figura B.1 – Resultados numéricos e experimentais para o componente com aba limite
($R_C=100$ mm; $e=1,27$ mm).

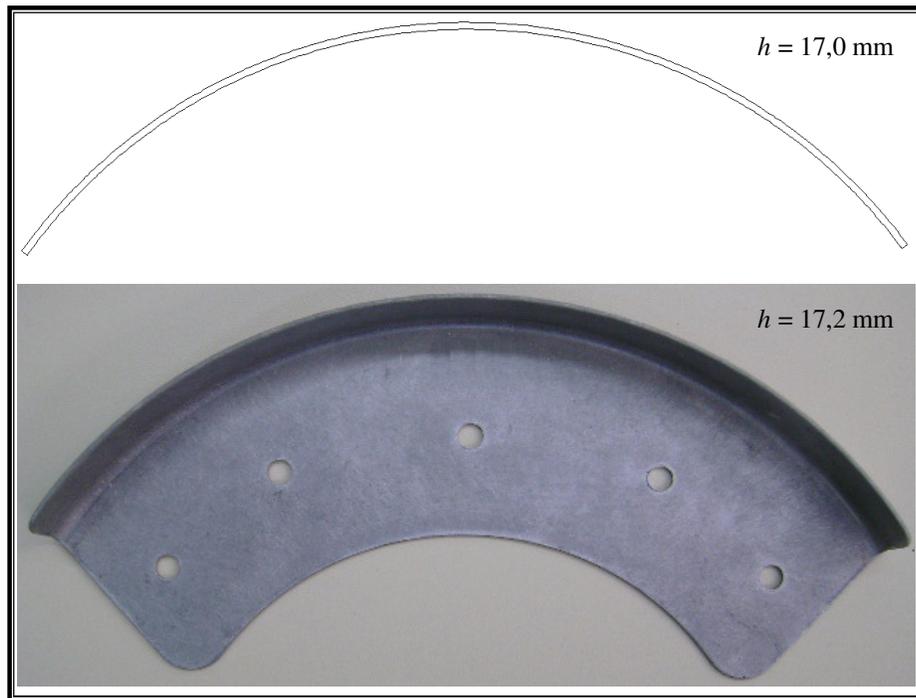


Figura B.2 – Componente isento de rugas críticas ($R_C=100$ mm; $e=1,27$ mm).

B.1.2 Aba acima do limite de conformabilidade

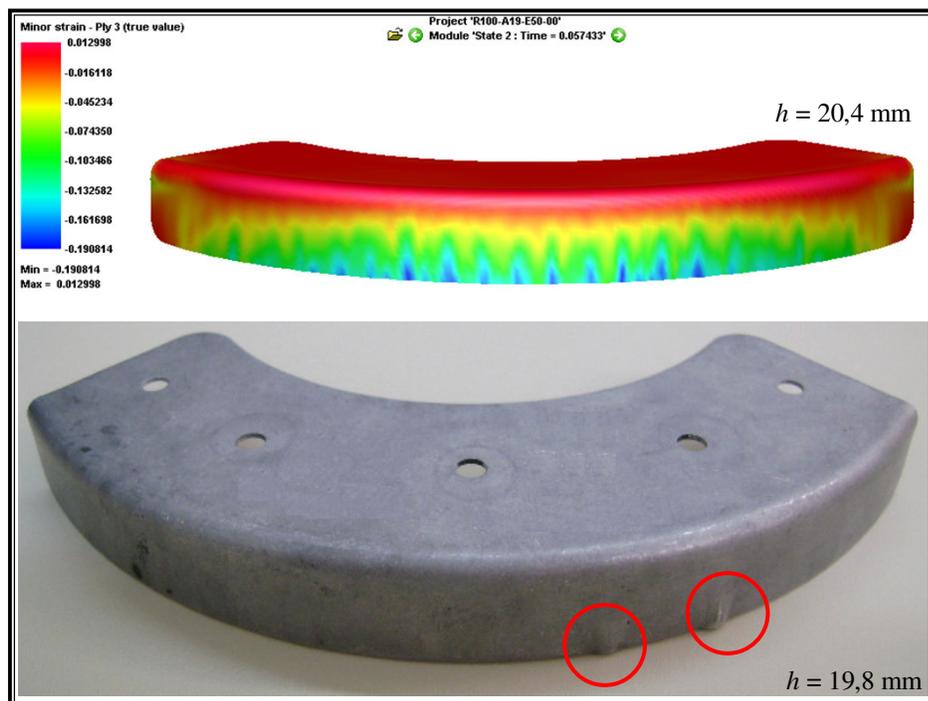


Figura B.3 – Resultados numéricos e experimentais para o componente com aba acima do limite ($R_C=100$ mm; $e=1,27$ mm).

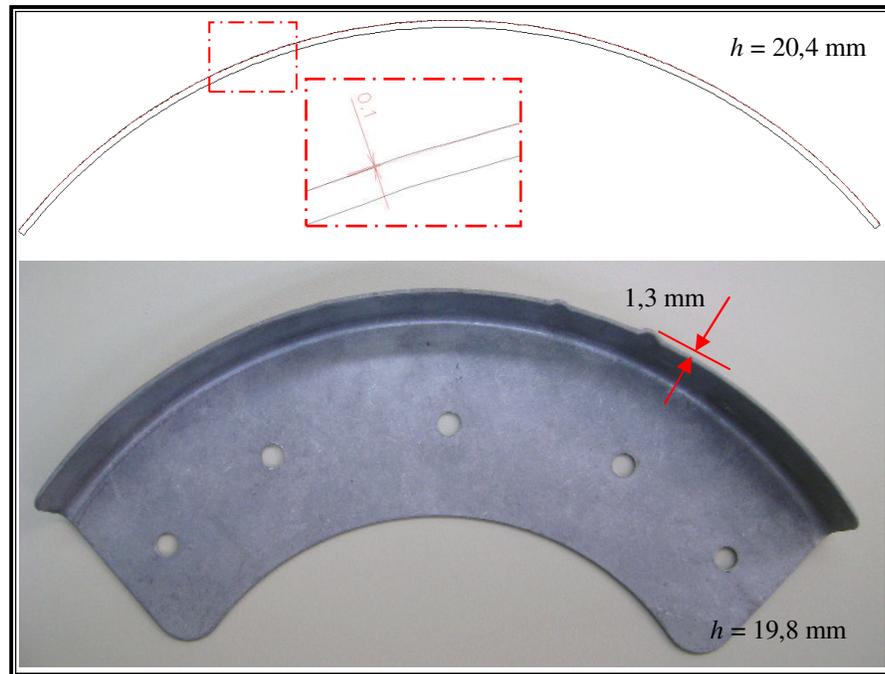


Figura B.4 – Componentes com rugas acima do limite ($R_C=200$ mm; $e=1,27$ mm).

B.2 Raio de Curvatura de 200 mm

B.2.1 Altura de aba limite

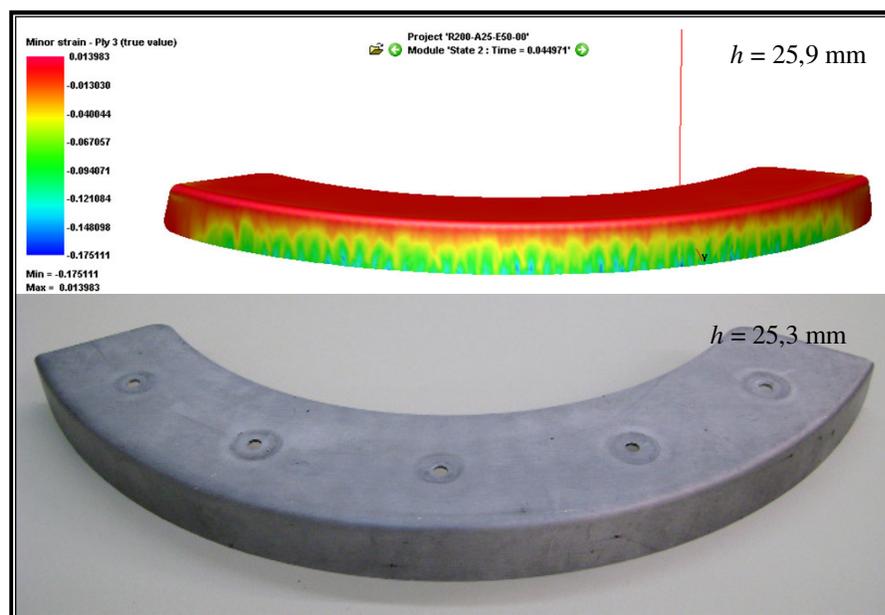


Figura B.5 – Resultados numéricos e experimentais para o componente com aba limite
($R_C=200$ mm; $e=1,27$ mm).

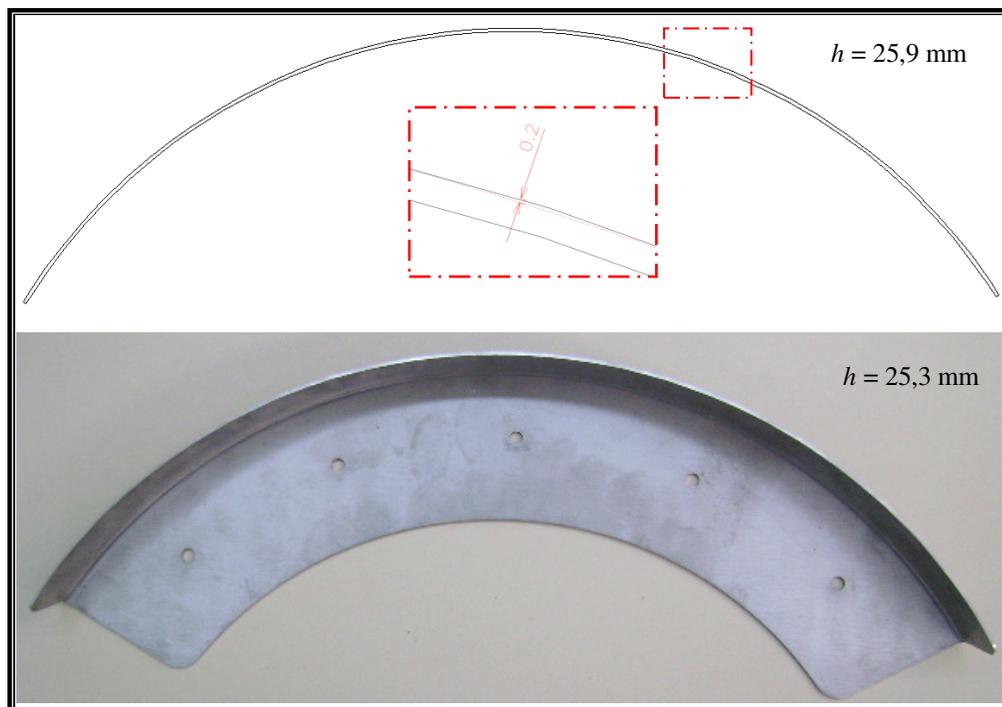


Figura B.6 – Componente isento de rugas críticas ($R_C=200$ mm; $e=1,27$ mm).

B.2.2 Aba acima do limite de conformabilidade

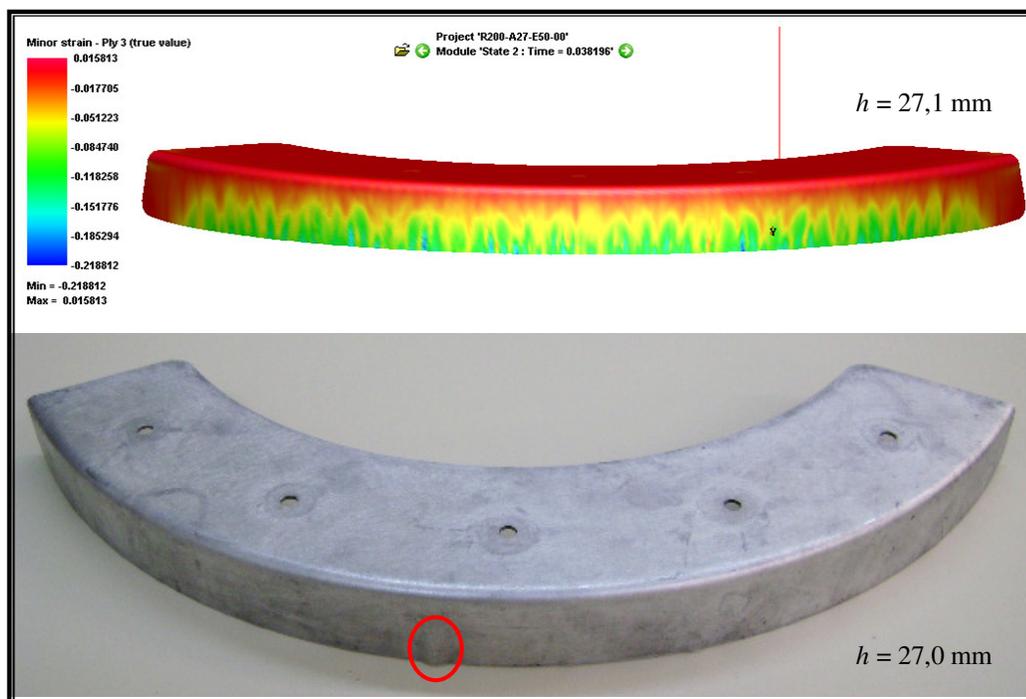


Figura B.7 – Resultados numéricos e experimentais para o componente com aba acima do limite ($R_C=200$ mm; $e=1,27$ mm).

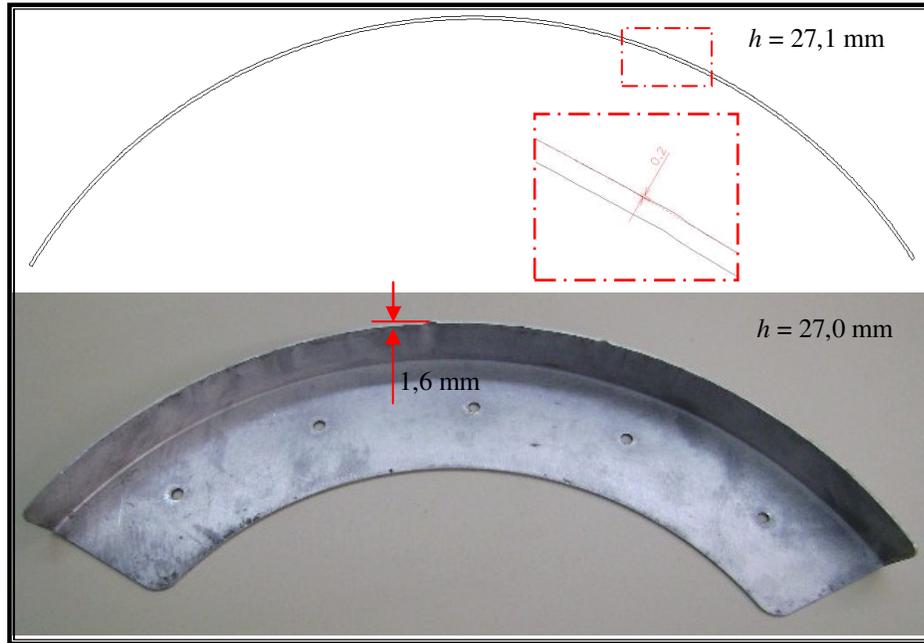


Figura B.8 – Componente com rugas acima do limite ($R_C=200$ mm; $e=1,27$ mm).

B.3 Raio de Curvatura de 300 mm

B.3.1 Altura de aba limite

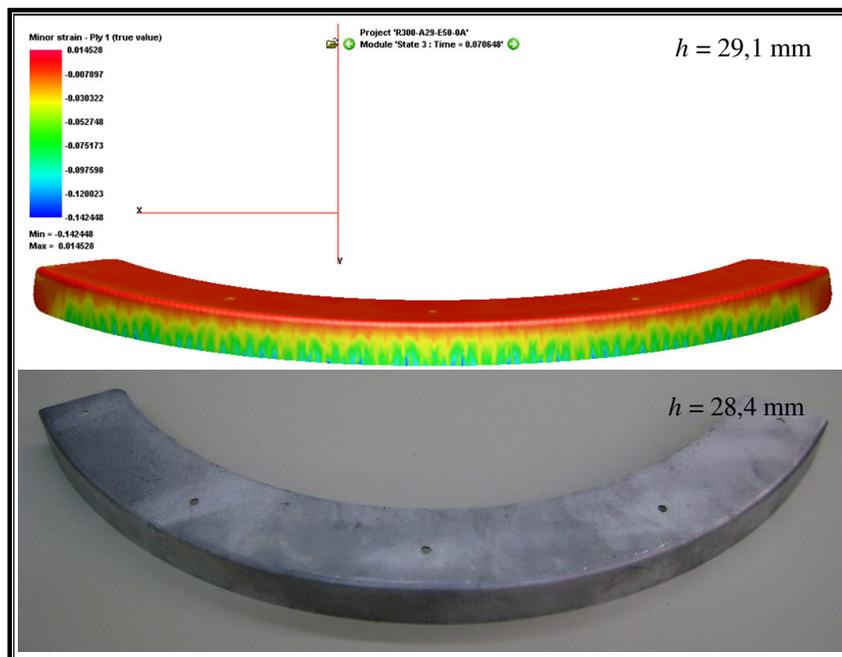


Figura B.9 – Resultados numéricos e experimentais para o componente com aba limite
($R_C=300$ mm; $e=1,27$ mm)

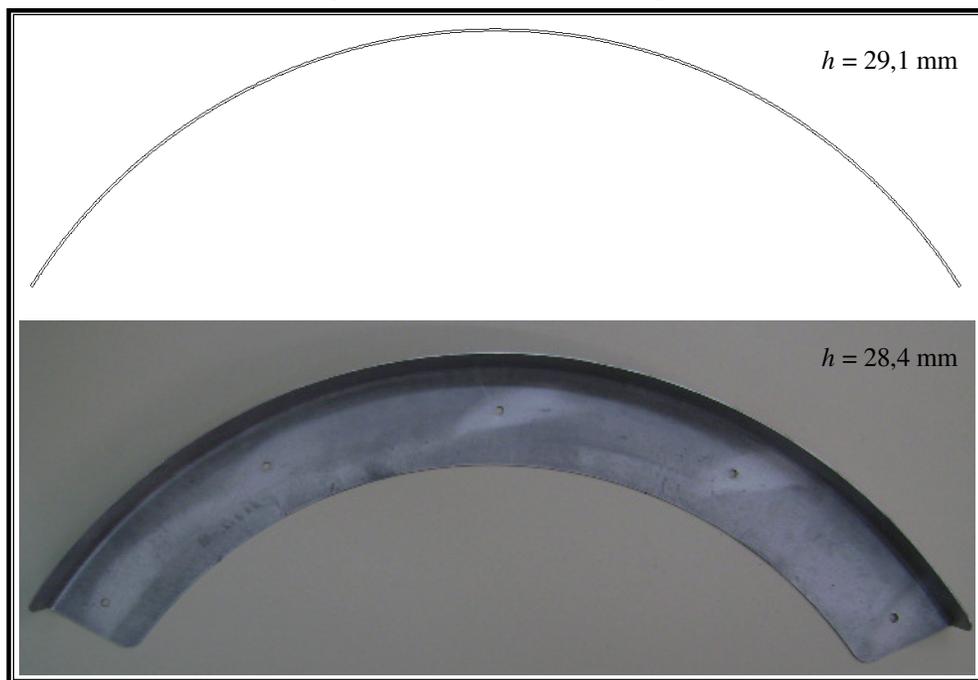


Figura B.10 – Componente isento de rugas críticas ($R_C=300$ mm; $e=1,27$ mm).

B.3.2 Aba acima do limite de conformabilidade

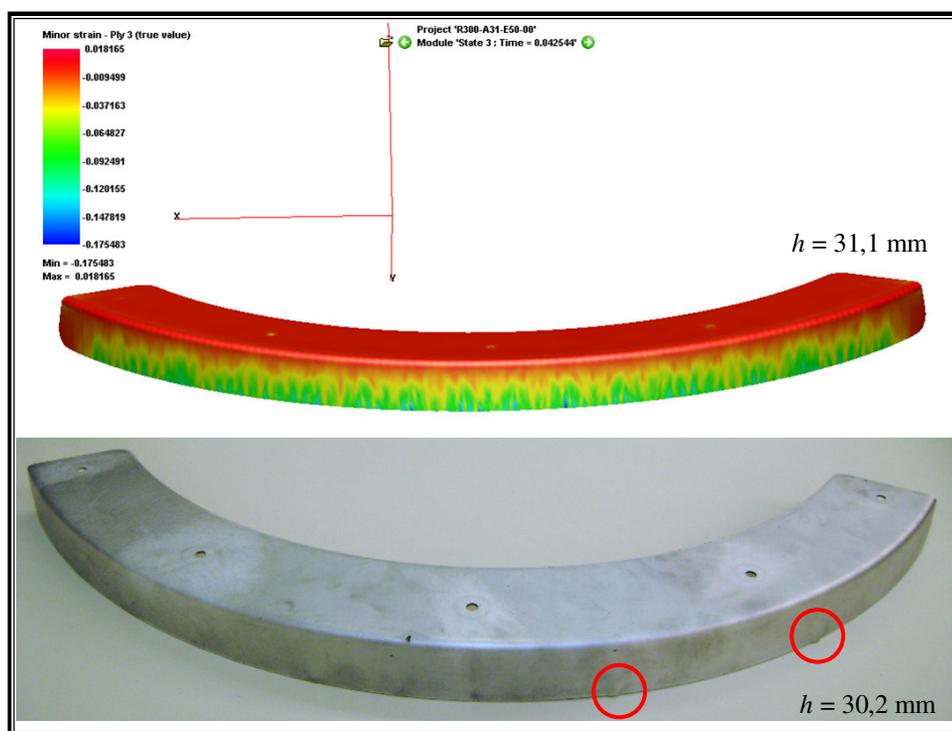


Figura B.11 – Resultados numéricos e experimentais para o componente com aba acima do limite ($R_C=300$ mm; $e=1,27$ mm).

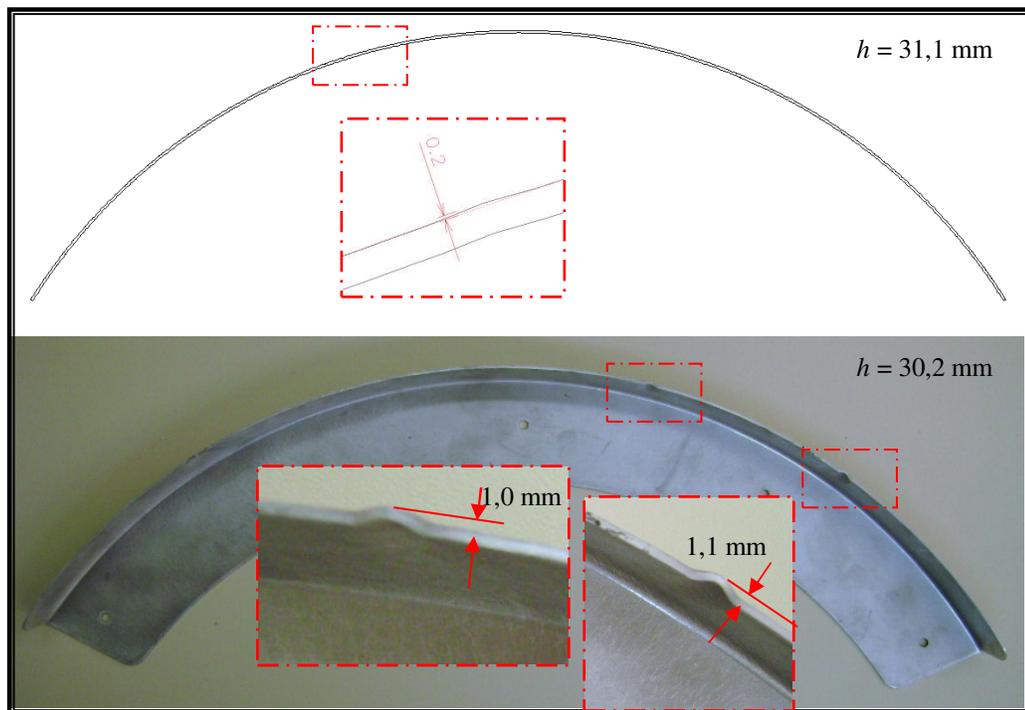


Figura B.12 – Componente com rugas acima do limite ($R_C=300$ mm; $e=1,27$ mm).

B.4 Raio de Curvatura de 400 mm

B.4.1 Altura de aba limite

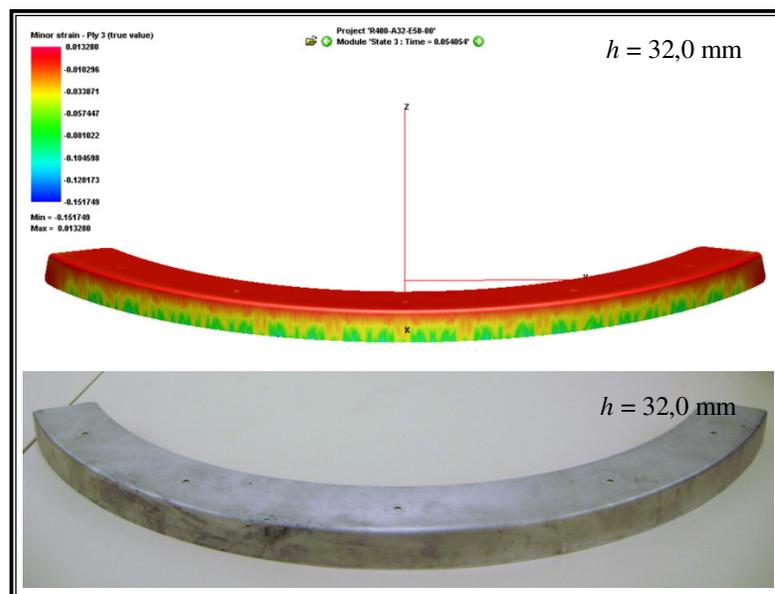


Figura B.13 – Resultados numéricos e experimentais para o componente com aba limite
($R_C=400$ mm; $e=1,27$ mm)

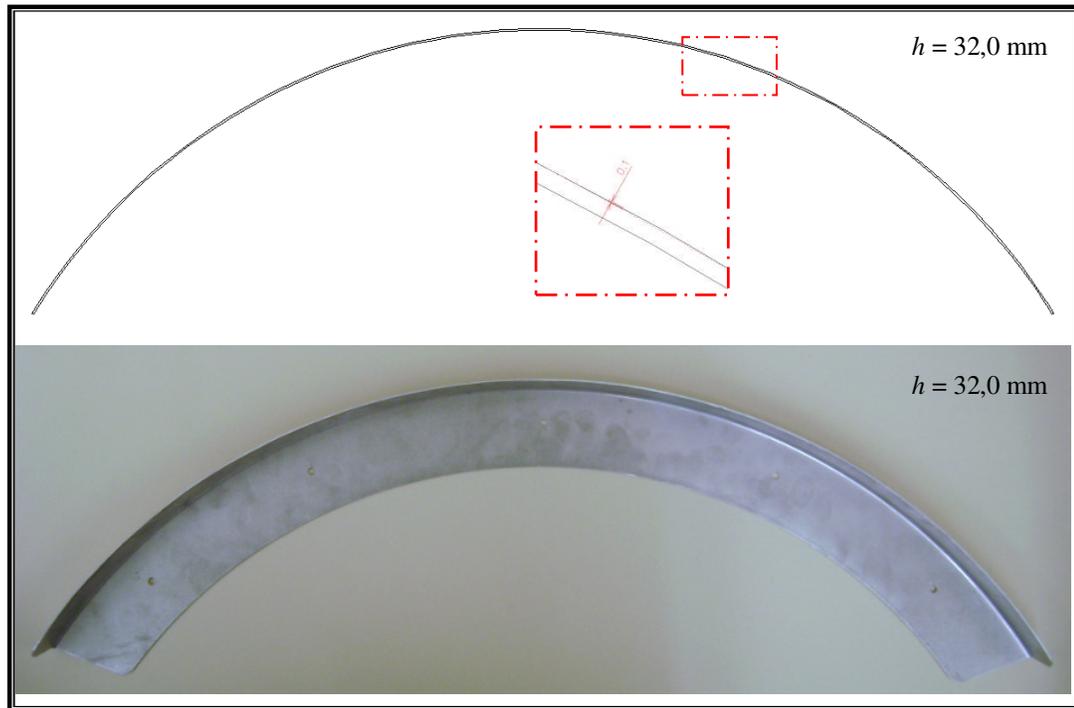


Figura B.14 – Componente isento de rugas críticas ($R_C=400$ mm; $e=1,27$ mm).

B.4.2 Aba acima do limite de conformabilidade

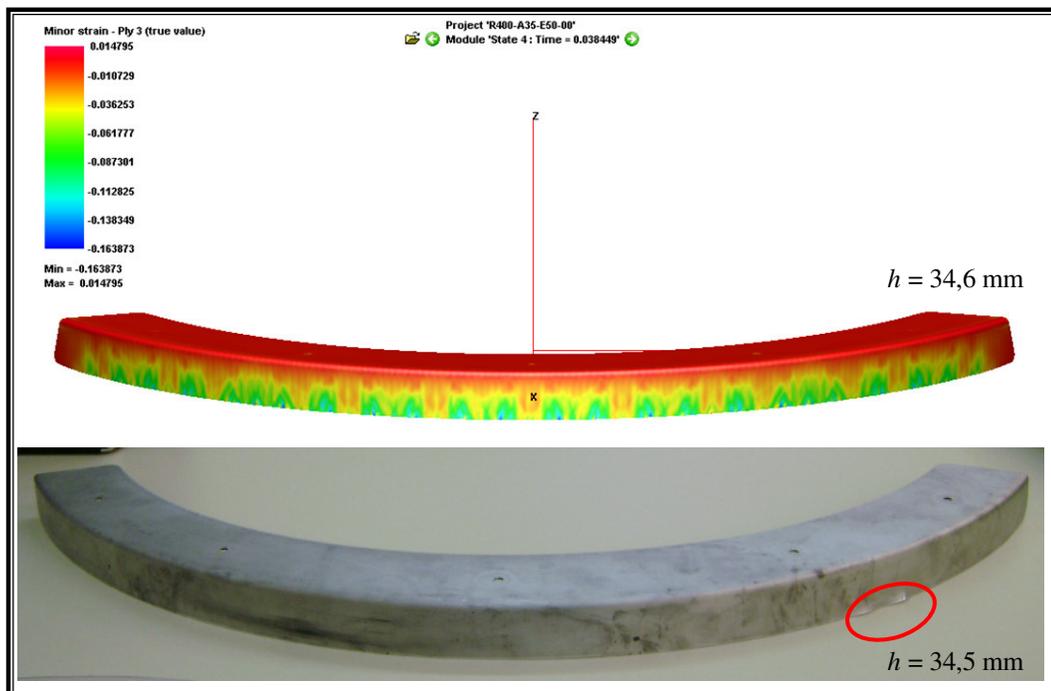


Figura B.15 – Resultados numéricos e experimentais para o componente com aba acima do limite
($R_C=400$ mm; $e=1,27$ mm).

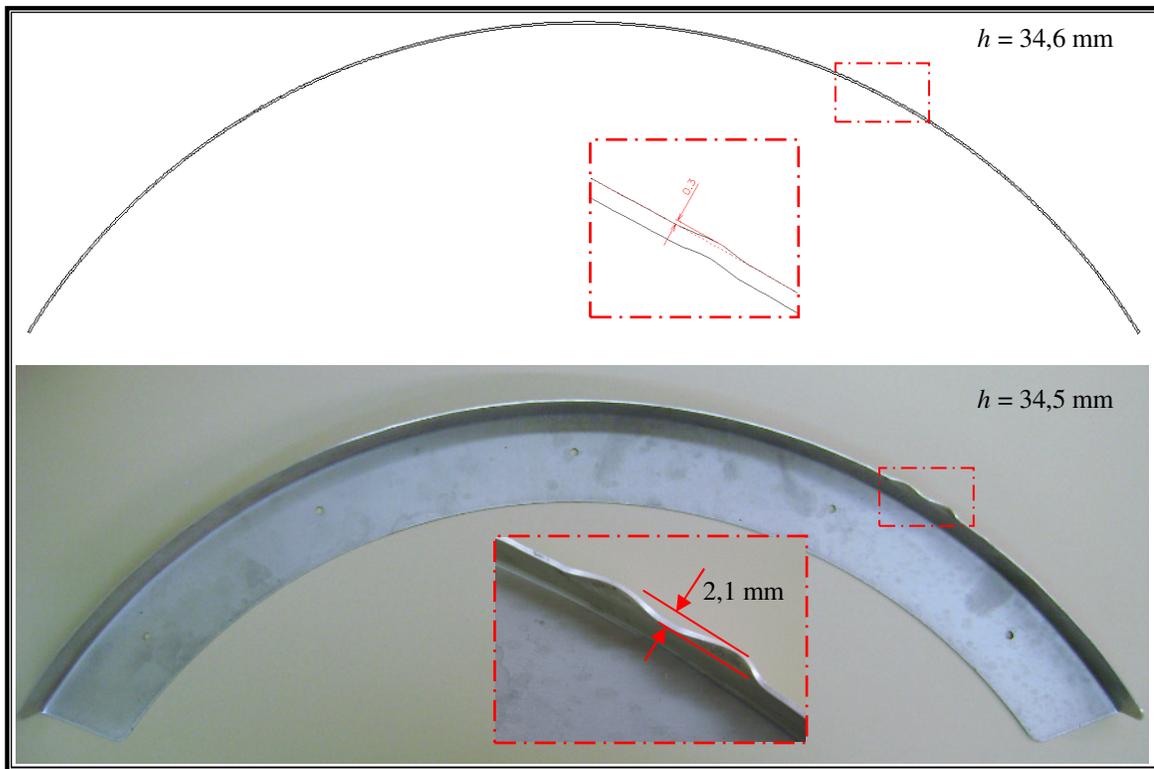


Figura B.16 – Componente com rugas acima do limite ($R_C=400$ mm; $e=1,27$ mm).

APÊNDICE C – APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS EMPREGANDO *BLANKS* DE 1,6 MM DE ESPESSURA

Neste apêndice são apresentados os resultados que estão contidos nas tabelas 4.5 e 4.6.

C.1 Raio de Curvatura de 100 mm

C.1.1 Altura de aba limite

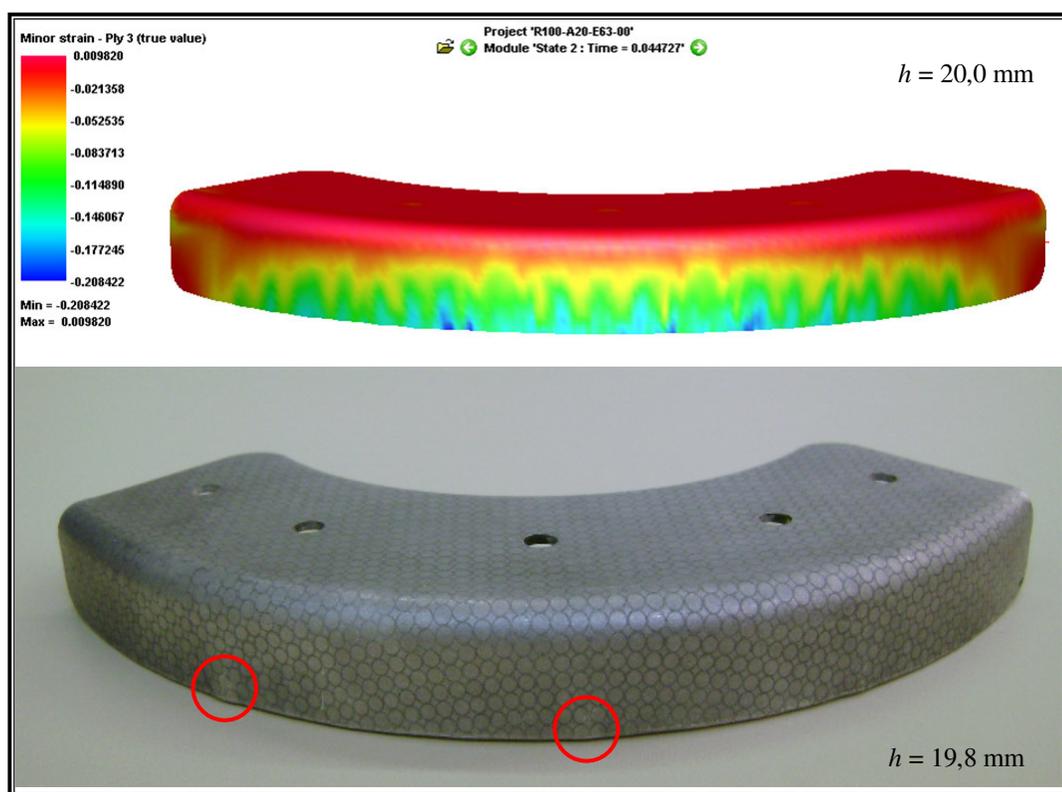


Figura C.1 – Resultados numéricos e experimentais para o componente com aba limite ($R_C=100$ mm; $e=1,6$ mm).

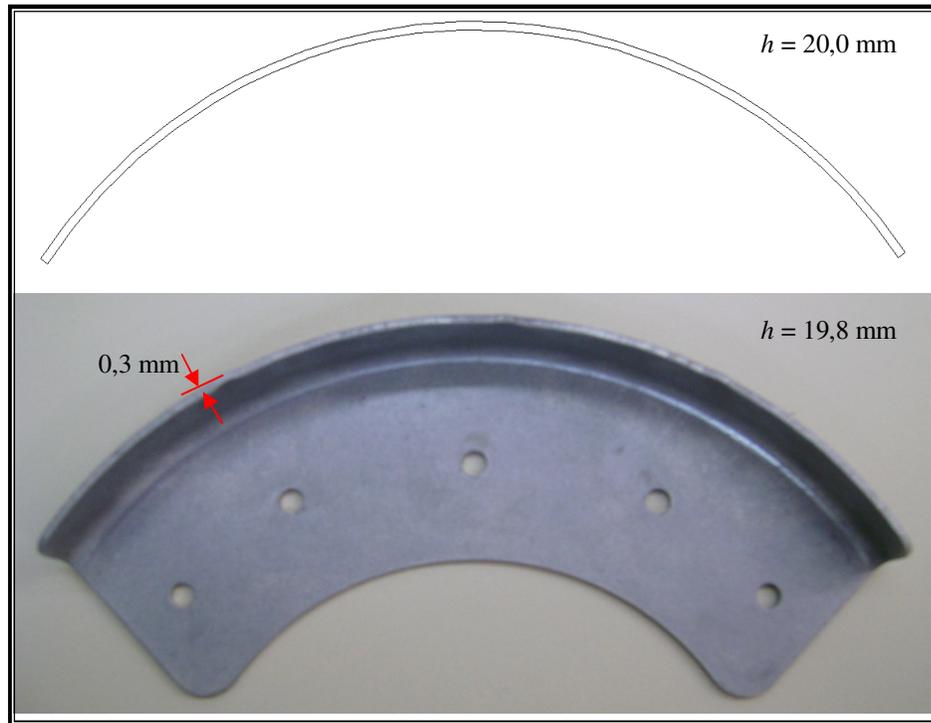


Figura C.2 – Componente isento de rugas críticas ($R_C=100$ mm; $e=1,6$ mm).

C.1.2 Aba acima do limite de conformabilidade

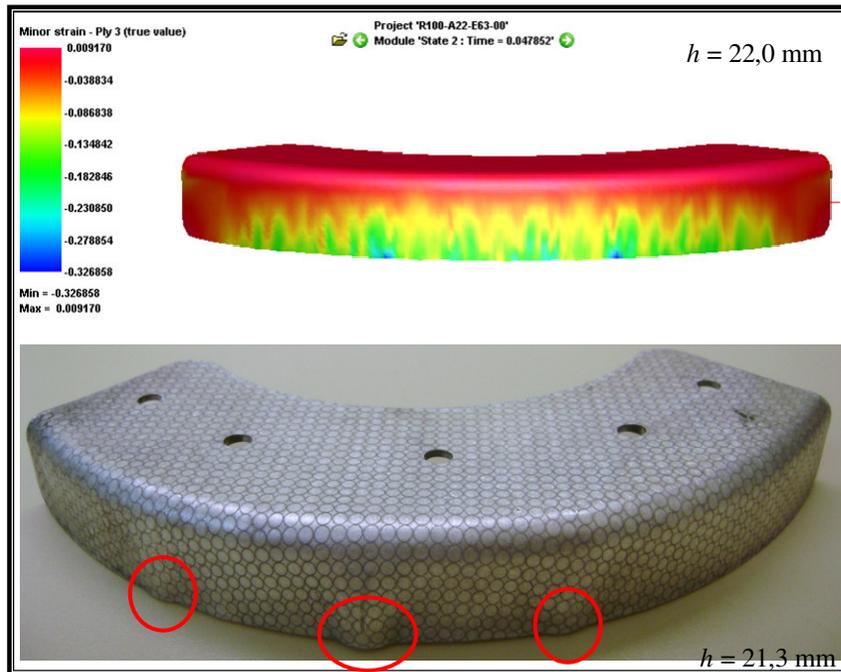


Figura C.3 – Resultados numéricos e experimentais para o componente com aba acima do limite de conformabilidade ($R_C=100$ mm; $e=1,6$ mm).

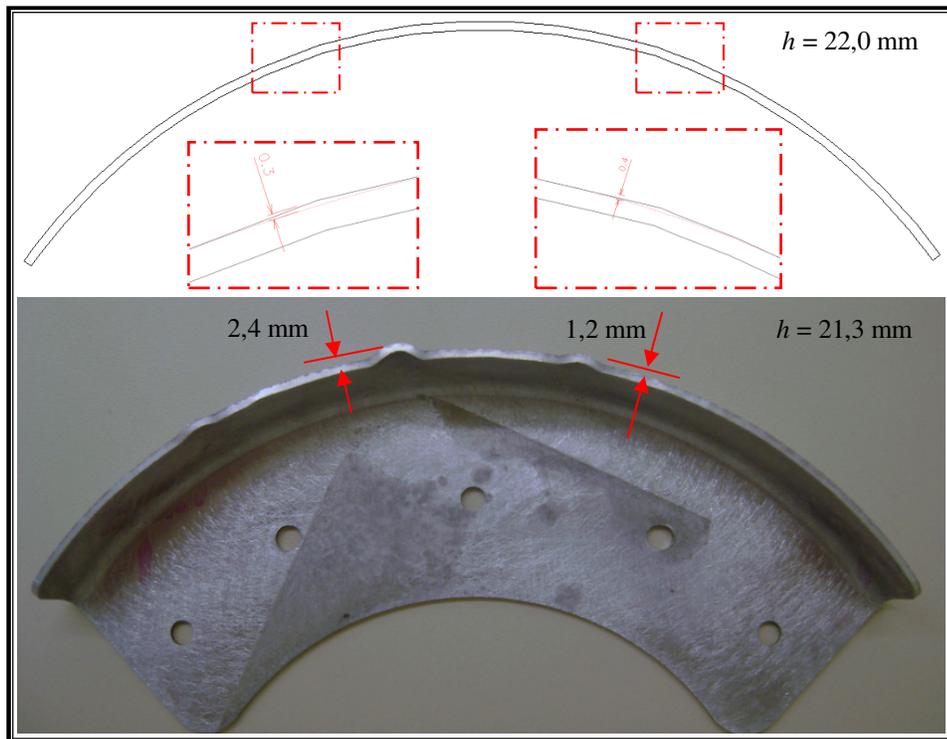


Figura C.4 – Componente com rugas acima de limite ($R_C=100$ mm; $e=1,6$ mm).

C.2 Raio de Curvatura de 200 mm

C.2.1 Altura de aba limite

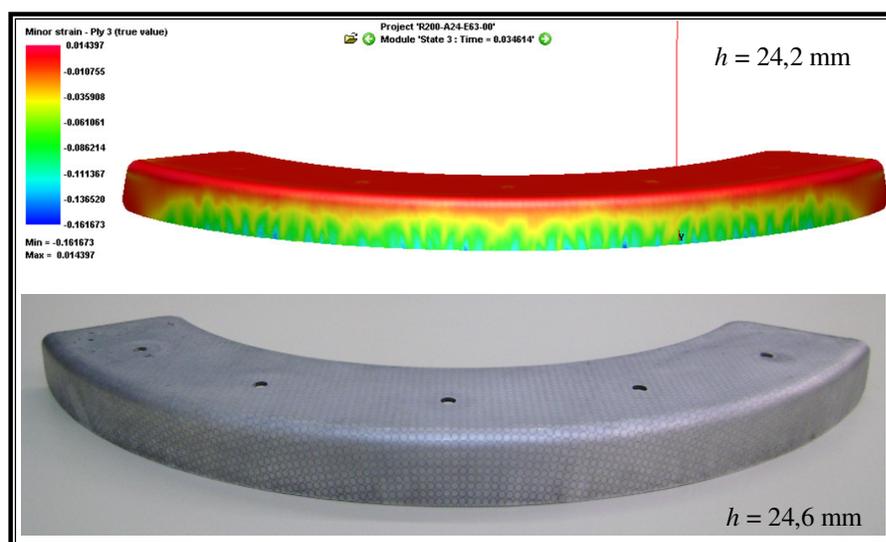


Figura C.5 – Resultados numéricos e experimentais para o componente com aba limite ($R_C=200$ mm; $e=1,6$ mm).

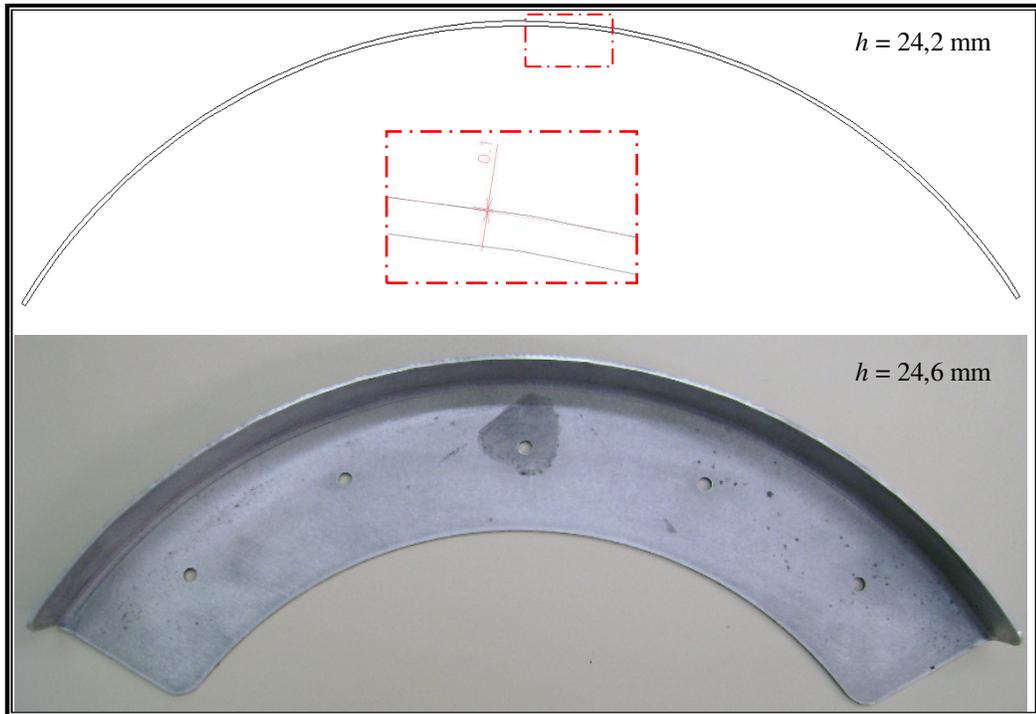


Figura C.6 – Componente isento de rugas críticas ($R_C=200$ mm; $e=1,6$ mm).

C.2.2 Aba acima do limite de conformabilidade

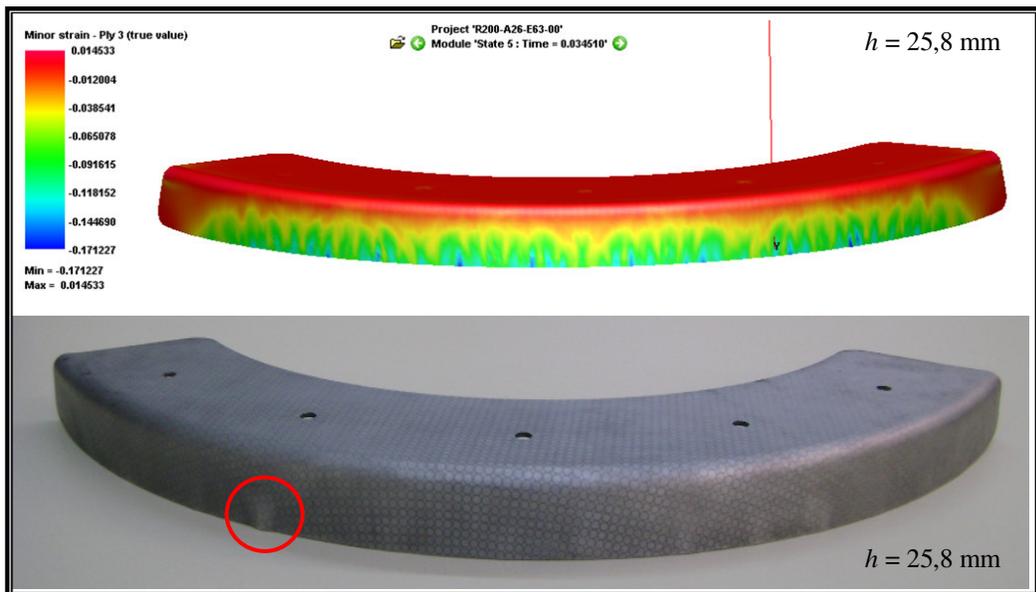


Figura C.7 – Resultados numéricos e experimentais para o componente com aba acima do limite ($R_C=200$ mm; $e=1,6$ mm).

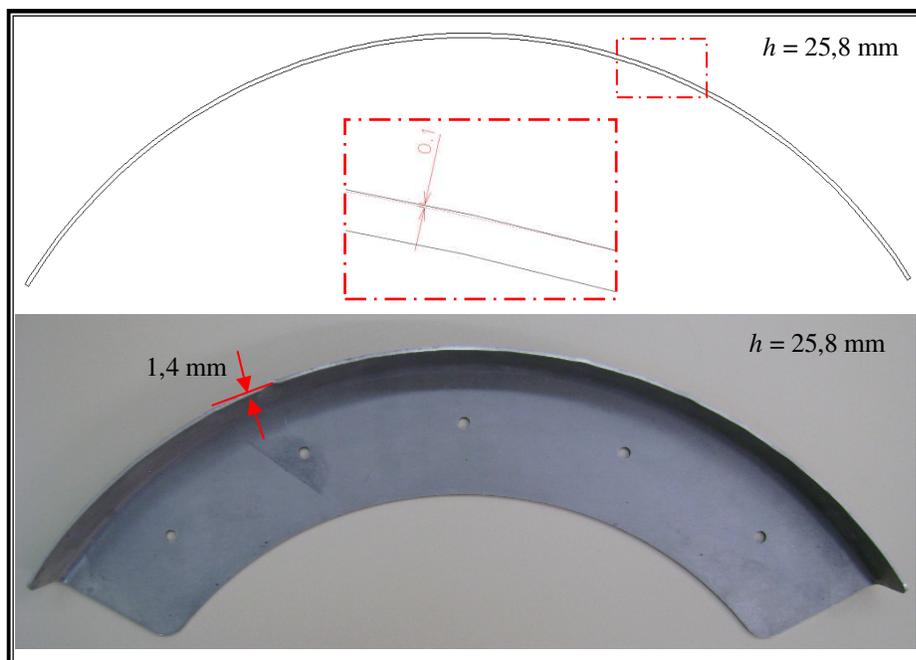


Figura C.8 – Componente com rugas acima do limite ($R_C=200$ mm; $e=1,6$ mm).

C.3 Raio de Curvatura de 300 mm

C.3.1 Altura de aba limite

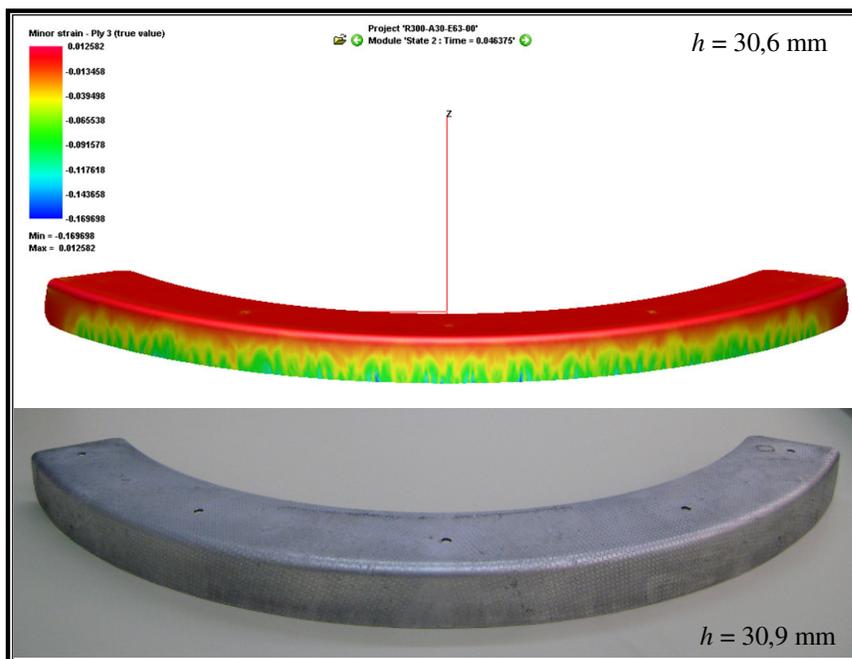


Figura C.9 – Resultados numéricos e experimentais para o componente com aba limite ($R_C=300$ mm; $e=1,6$ mm).

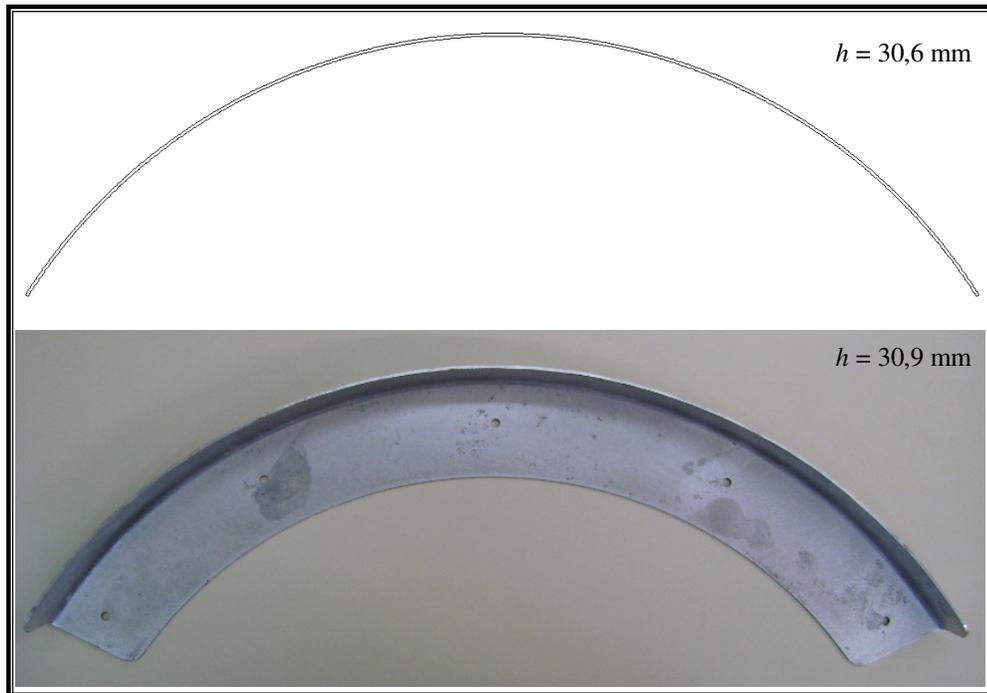


Figura C.10 – Componente isento de rugas críticas ($R_C=300$ mm; $e=1,6$ mm).

C.3.2 Aba acima do limite de conformabilidade

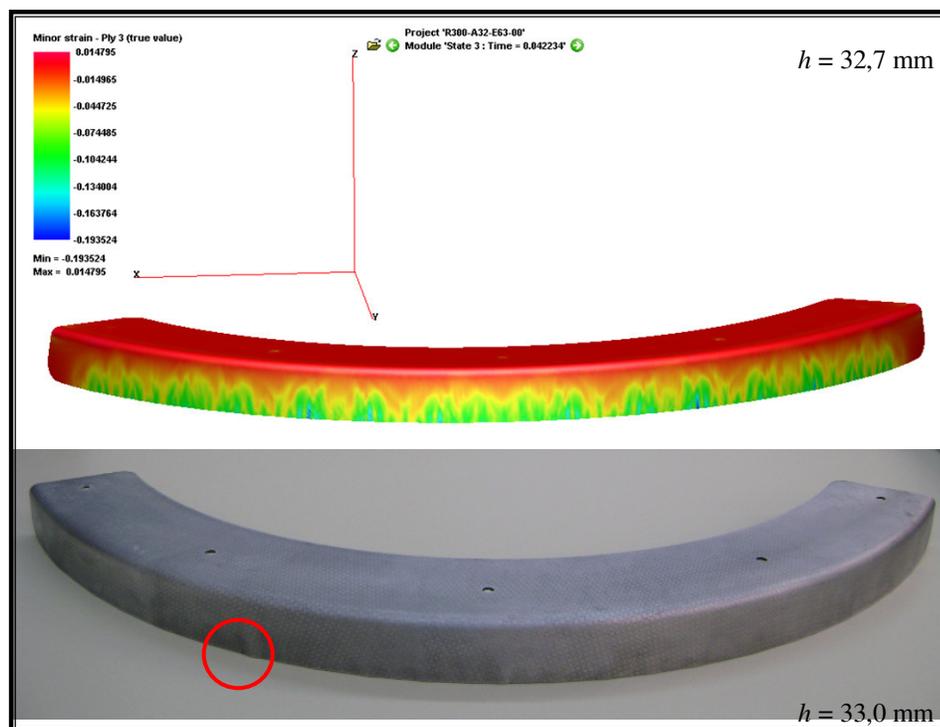


Figura C.11 – Resultados numéricos e experimentais para o componente com aba acima do limite ($R_C=300$ mm; $e=1,6$ mm).

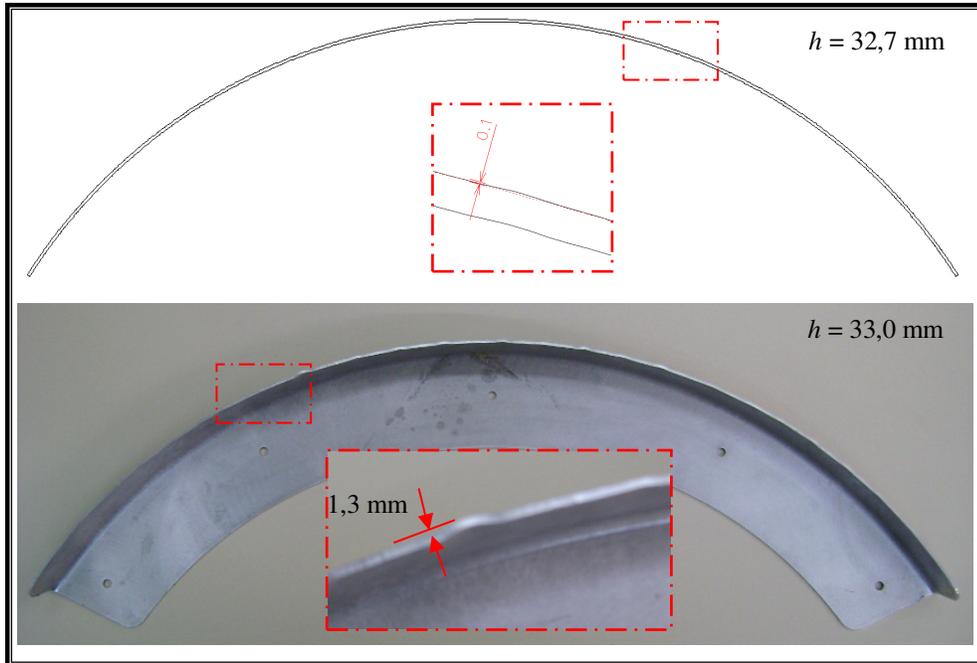


Figura C.12 – Componente com rugas acima do limite ($R_C=300$ mm; $e=1,6$ mm).

C.4 Raio de Curvatura de 400 mm

C.4.1 Altura de aba limite

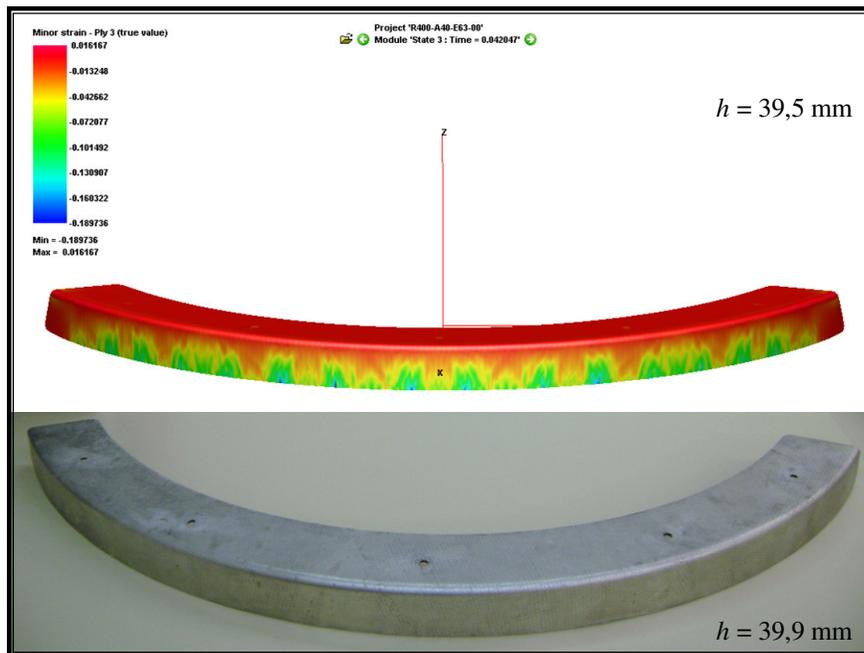


Figura C.13 – Resultados numéricos e experimentais para o componente com aba limite ($R_C=400$ mm; $e=1,6$ mm)

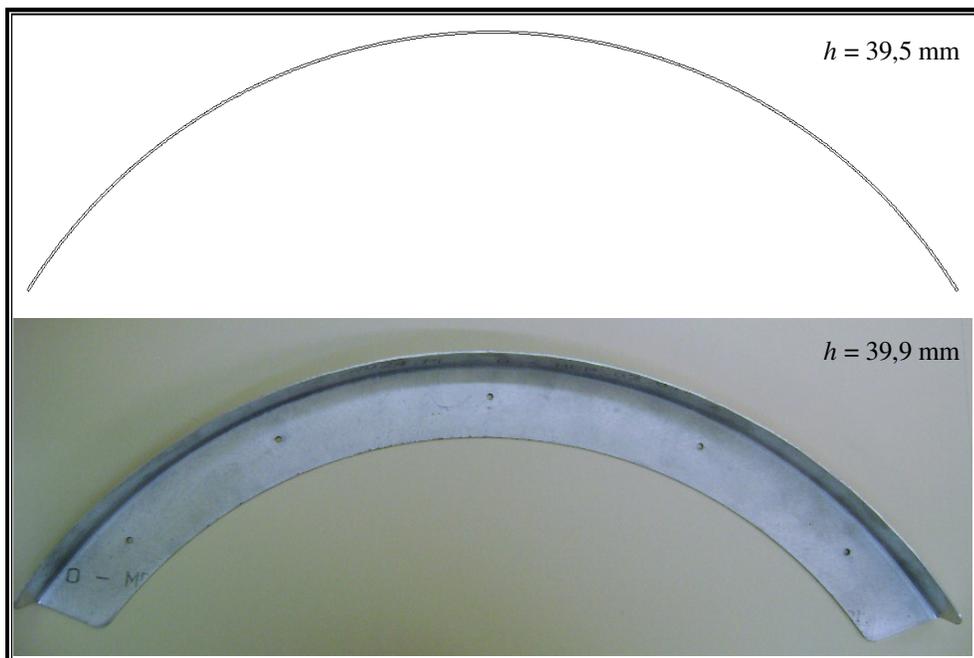


Figura C.14 – Componente isento de rugas críticas ($R_C=400$ mm; $e=1,6$ mm).

C.4.2 Aba acima do limite de conformabilidade

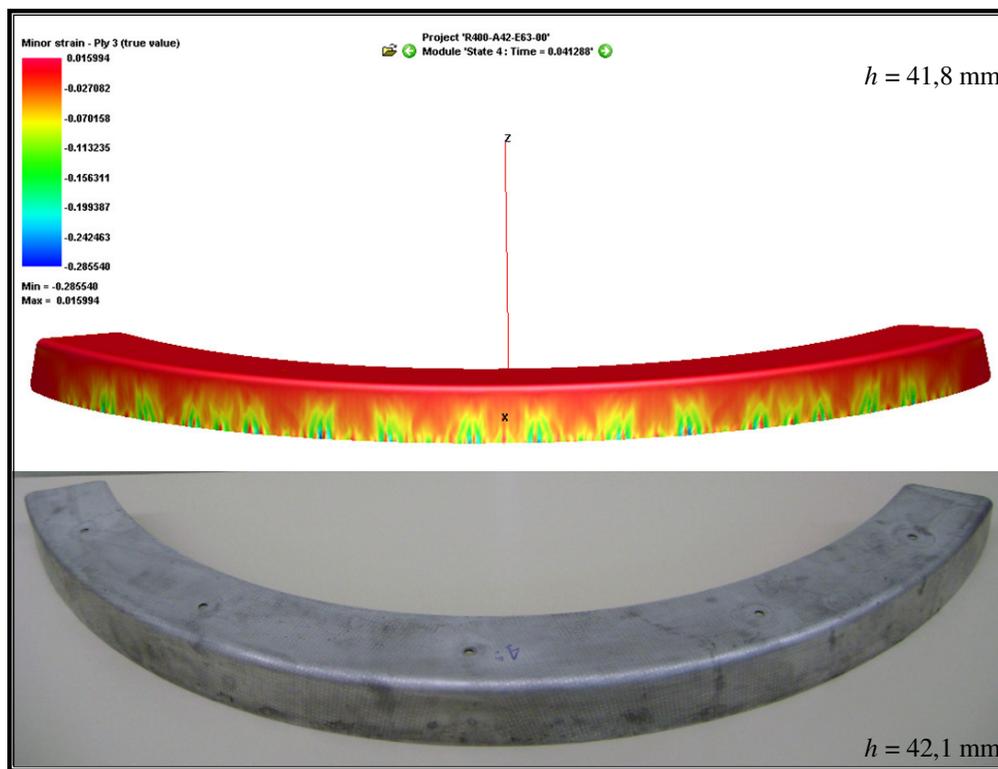


Figura C.15 – Resultados numéricos e experimentais para o componente com aba acima do limite ($R_C=400$ mm; $e=1,6$ mm).

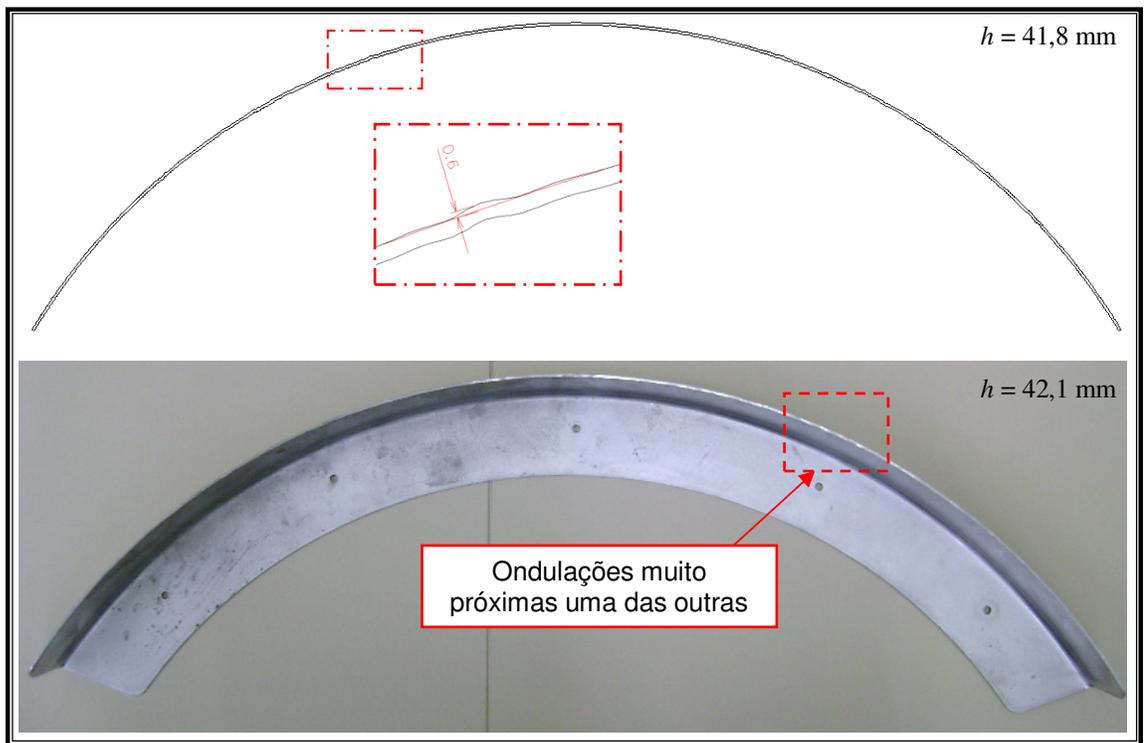


Figura C.16 – Componente com rugas acima do limite ($R_C=400 \text{ mm}$; $e=1,6 \text{ mm}$).

APÊNDICE D – APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS EMPREGANDO *BLANKS* DE 2,0 MM DE ESPESSURA

Neste apêndice são apresentados os resultados que estão contidos nas tabelas 4.7 e 4.8.

D.1 Raio de Curvatura de 100 mm

D.1.1 Altura de aba limite

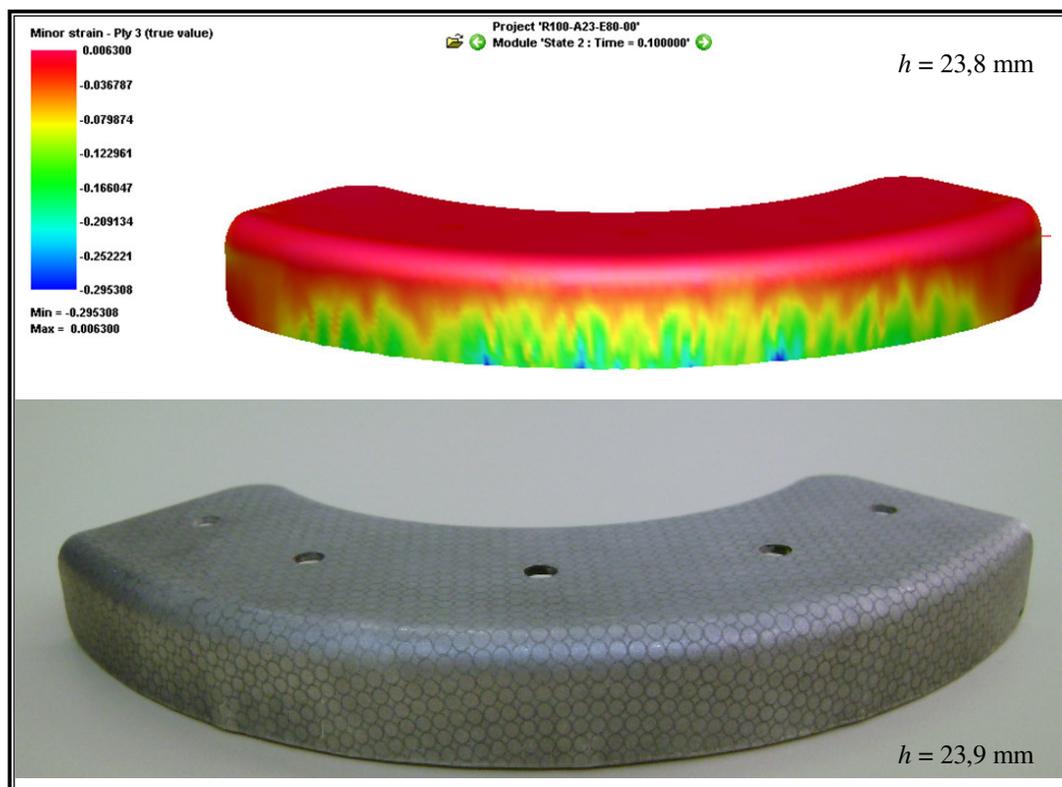


Figura D.1 – Resultados numéricos e experimentais para o componente com aba limite
($R_C=100$ mm; $e=2,0$ mm).

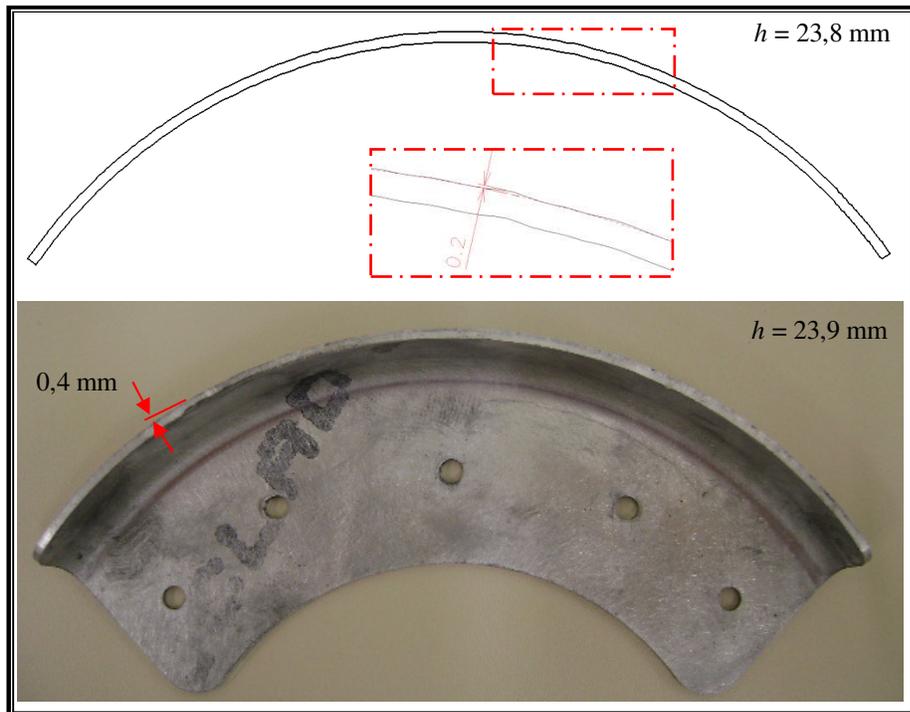


Figura D.2 – Componente isento de rugas críticas ($R_C=100$ mm; $e=2,0$ mm).

D.1.2 Aba acima do limite de conformabilidade

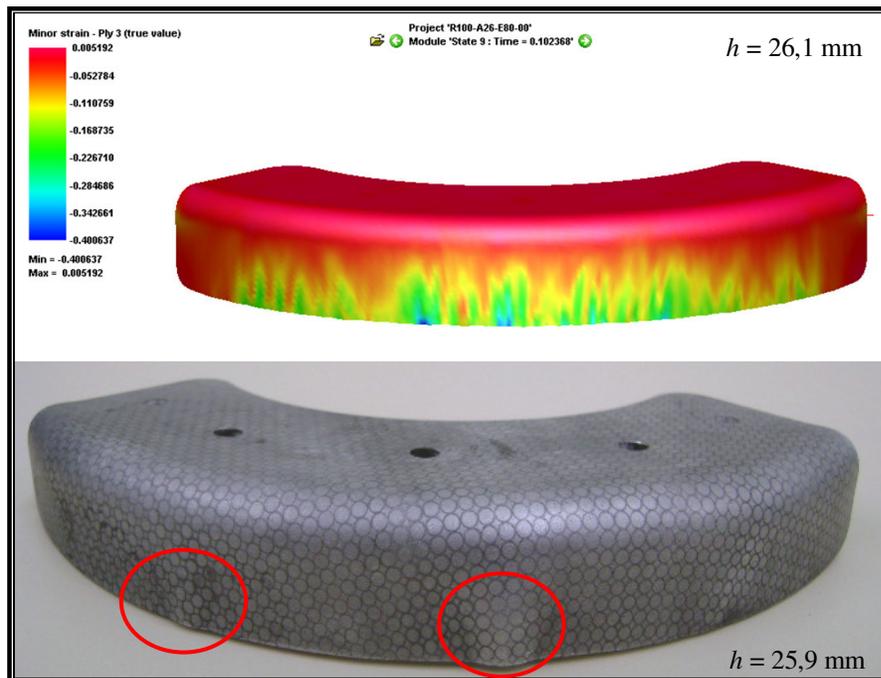


Figura D.3 – Resultados numéricos e experimentais para o componente com aba acima do limite de conformabilidade ($R_C=100$ mm; $e=2,0$ mm).

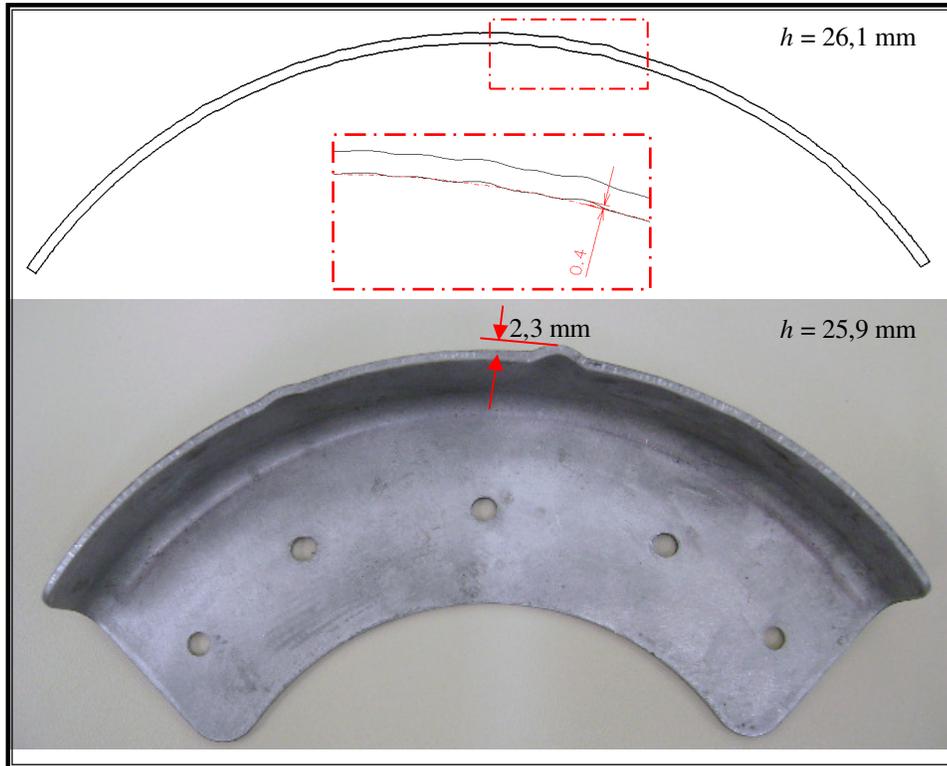


Figura D.4 – Componente com rugas acima do limite ($R_C=100$ mm; $e=2,0$ mm).

D.2 Raio de Curvatura de 200 mm

D.2.1 Altura de aba limite

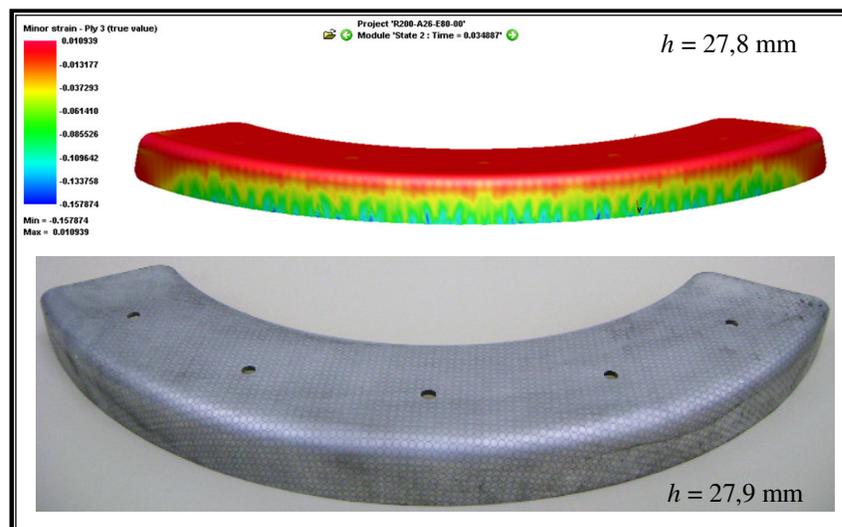


Figura D.5 – Resultados numéricos e experimentais para o componente com aba limite ($R_C=200$ mm; $e=2,0$ mm).

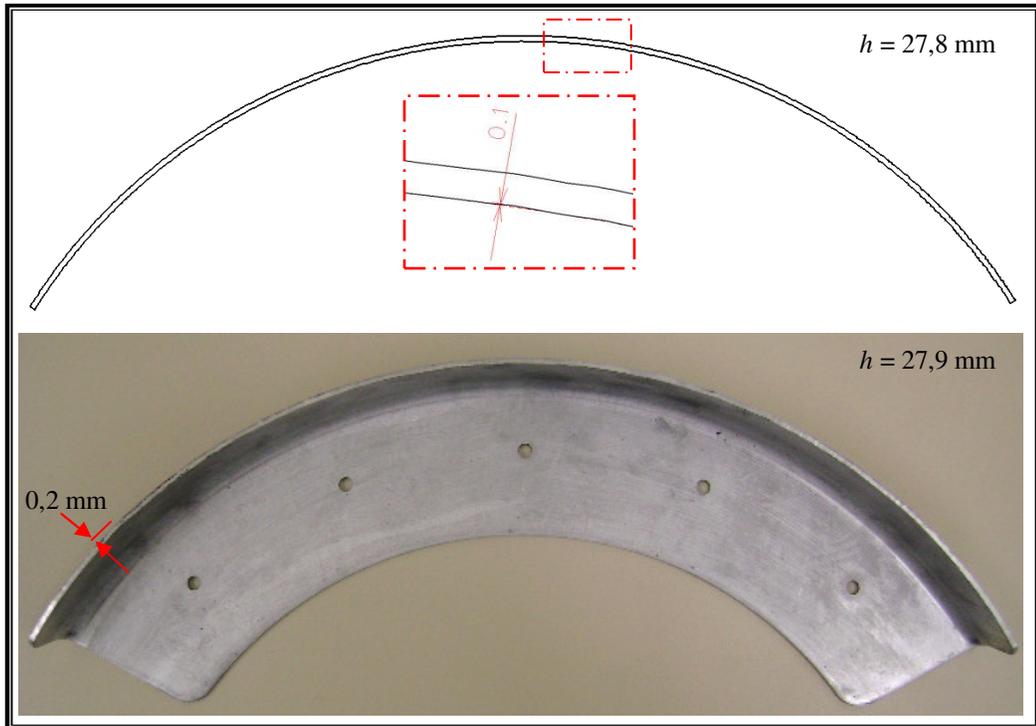


Figura D.6 – Componente isento de rugas ($R_C=200$ mm; $e=2,0$ mm).

D.2.2 Aba acima do limite de conformabilidade

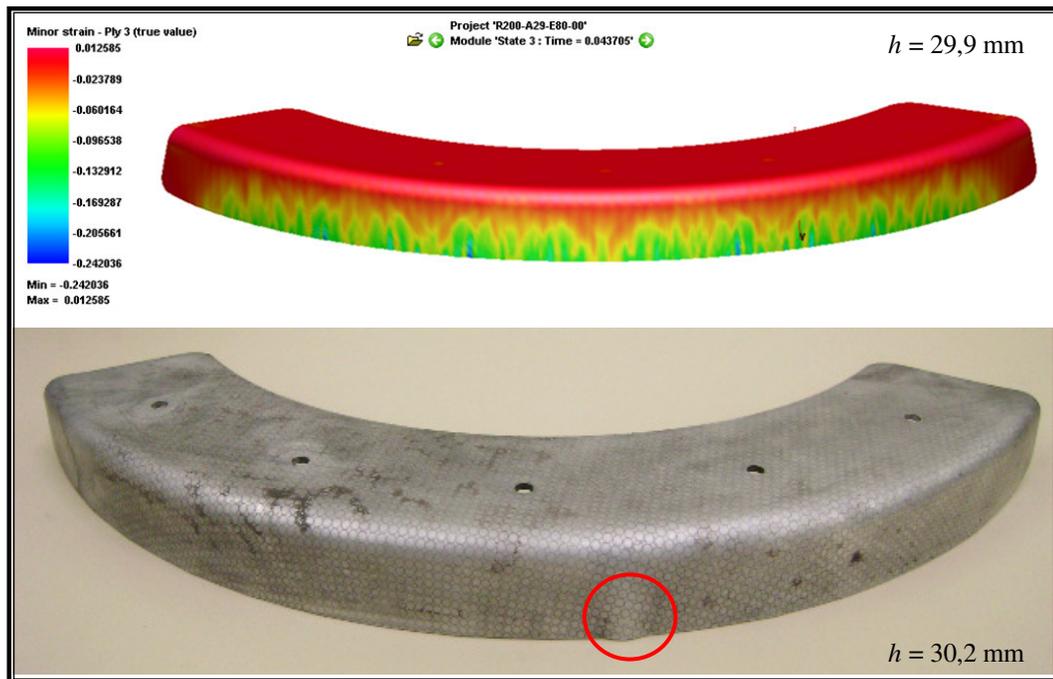


Figura D.7 – Resultados numéricos e experimentais para o componente com aba acima do limite de conformabilidade ($R_C=200$ mm; $e=2,0$ mm).

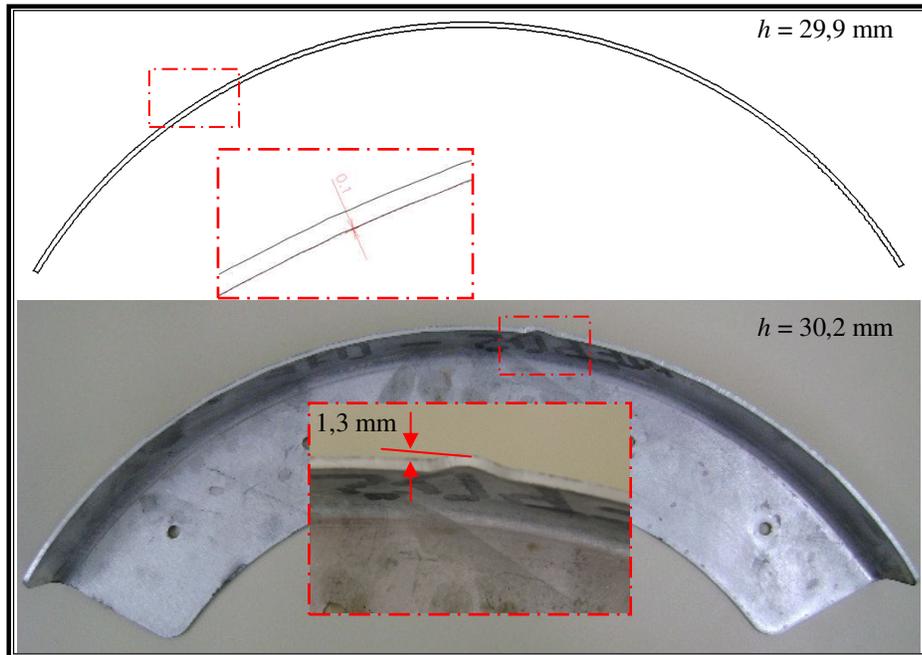


Figura D.8 – Componente com rugas acima do limite ($R_C=200$ mm; $e=2,0$ mm).

D.3 Raio de Curvatura de 300 mm

D.3.1 Altura de aba limite

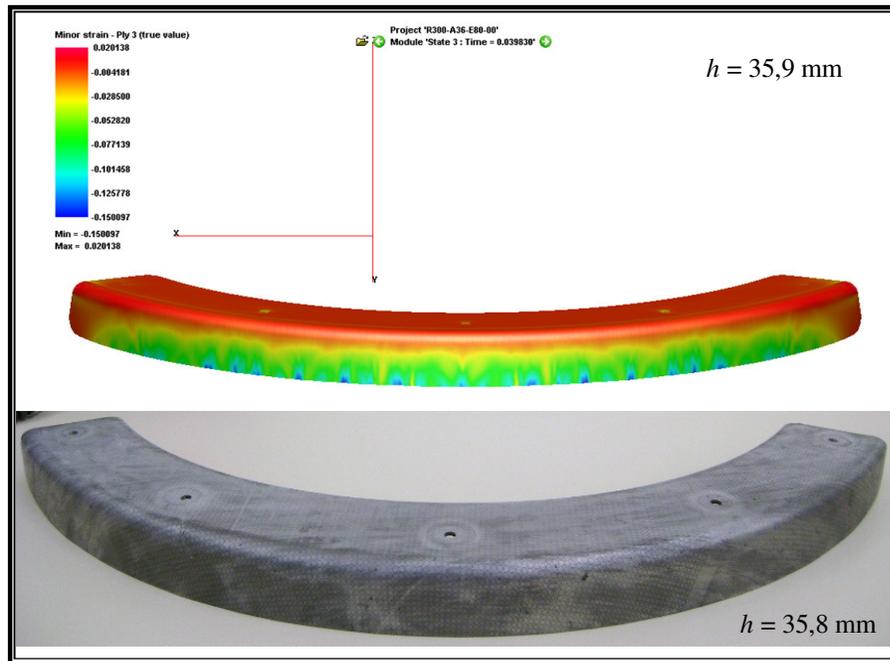


Figura D.9 – Resultados numéricos e experimentais para o componente com aba limite ($R_C=300$ mm; $e=2,0$ mm).

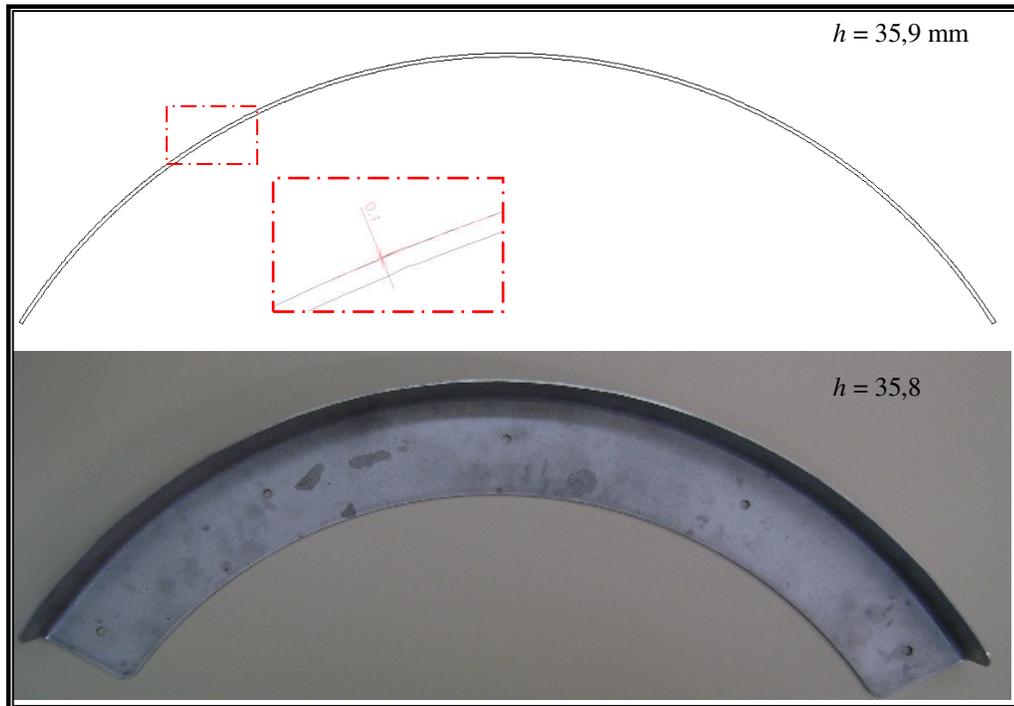


Figura D.10 – Componente isento de rugas críticas ($R_C=300$ mm; $e=2,0$ mm).

D.3.2 Aba acima do limite de conformabilidade

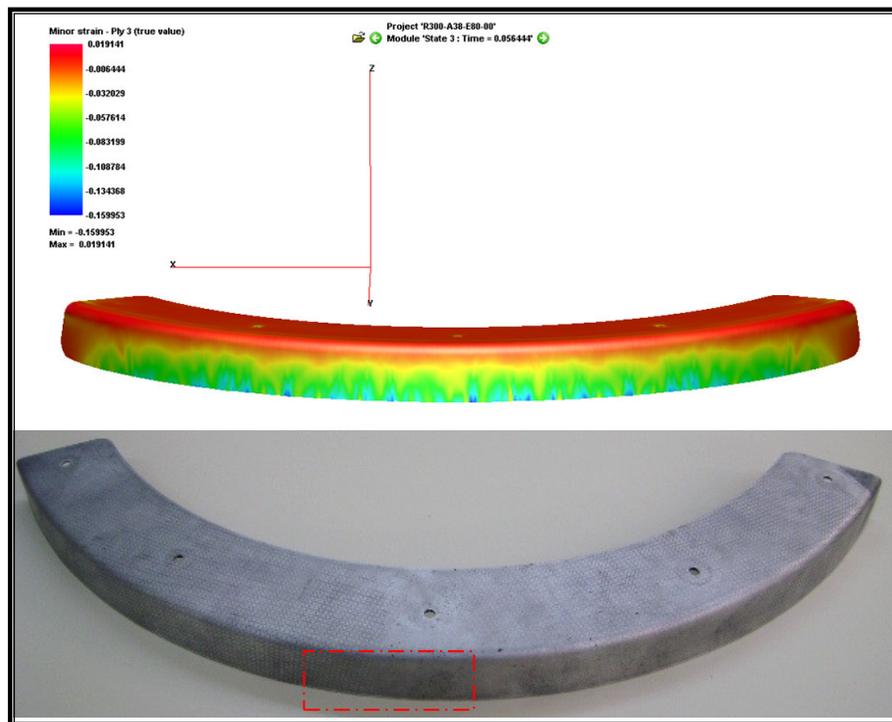


Figura D.11 – Resultados numéricos e experimentais para o componente com aba acima do limite ($R_C=300$ mm; $e=2,0$ mm).

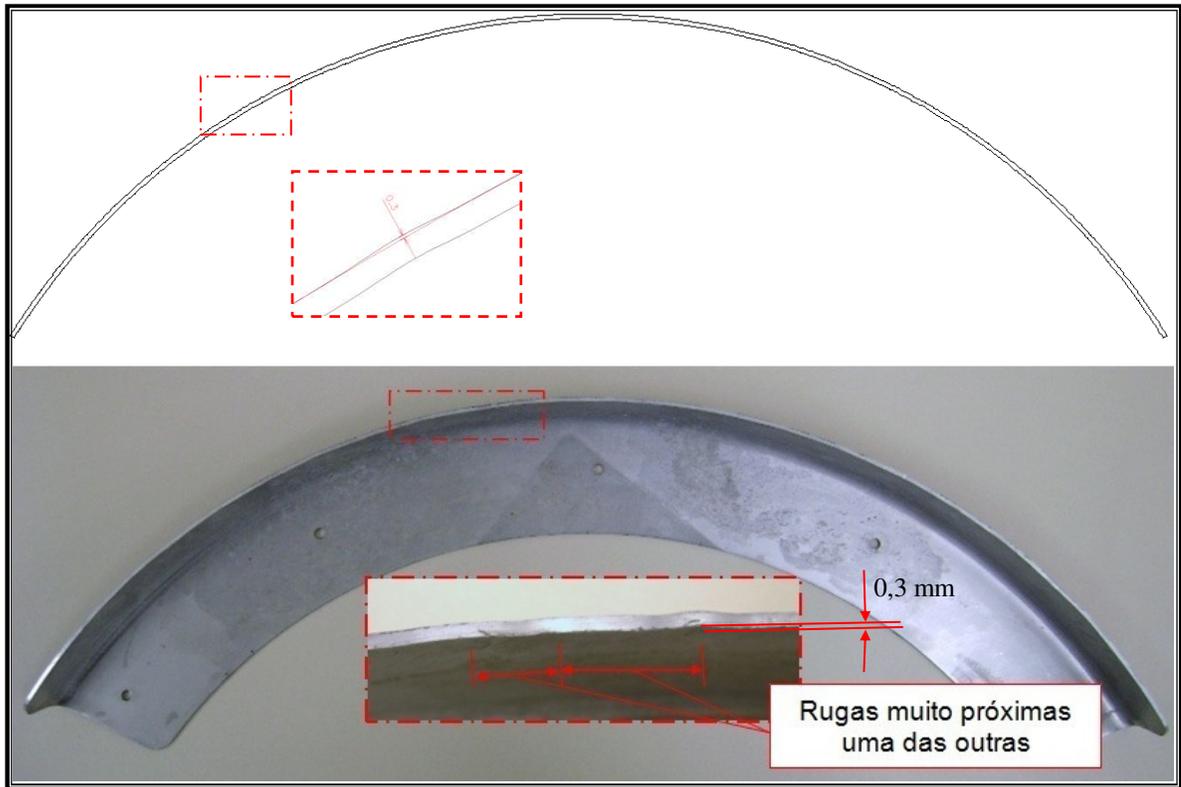


Figura D.12 – Componente com rugas acima do limite ($R_C=300$ mm; $e=2,0$ mm).