

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGEM

AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE ESTAMPAGEM PROFUNDA DE CHAPAS DE AÇO
BH 180 e BH 220 UTILIZADO NA INDÚSTRIA AUTOMOBILÍSTICA

Fábio André Lora

Dissertação para obtenção do título de Mestre
em Engenharia

Porto Alegre
2009

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGEM

AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE ESTAMPAGEM PROFUNDA DE CHAPAS DE AÇO
BH 180 e BH 220 UTILIZADO NA INDÚSTRIA AUTOMOBILÍSTICA

Fábio André Lora
Engenheiro Mecânico

Trabalho realizado no Departamento de Metalurgia da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGEM), como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Processos de Fabricação

Porto Alegre
2009

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração de Processos de Fabricação e aprovada em sua forma final, pelo Orientador, Co-orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: Prof. Dr. –Ing. Lirio Schaeffer

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Paulo Victor Prestes Marcondes

Prof. Dr. –Ing. Lirio Schaeffer

Dr. João Henrique Corrêa de Souza

Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann
Coordenador do PPGEM

Dedico aos meus pais, Oscar Lora e Maria Luiza Lora e as minhas irmãs Paula Fernanda Lora e Juliana Lora que sempre foram meus amigos e incentivadores de meus estudos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Dr. –Ing. Lirio Schaeffer pelo estímulo, pela dedicação, oportunidade, confiança e esforço pessoal proporcionados;

Agradeço ao Laboratório de Transformação Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, coordenado pelo professor Dr. –Ing. Lirio Schaeffer, pela oportunidade e pronto atendimento quando precisei utilizar as máquinas e instrumentos necessários;

Agradeço aos amigos Msc. Luis Folle e Msc. Charles Chemale Yurgel, que sempre colaboraram para a realização da estrutura desta dissertação;

Agradeço ao SENAI CIMATEC BA, pelo apoio proporcionado em todas as solicitações feitas por mim para a realização deste trabalho: quanto a viagens, fornecimento de materiais e utilização de equipamentos para fabricação e ensaio de peças;

Por fim, agradeço a todos que direta ou indiretamente participaram comigo do trabalho dissertativo aqui presente. Reconheço, assim, todos os esforços que me rodearam, inclusive o meu próprio esforço e vontade de vencer.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	V
SUMÁRIO.....	VI
LISTA DE FIGURAS	VIII
LISTA DE SÍMBOLOS	XII
RESUMO	XV
ABSTRACT	XVI
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. ASPECTOS DA CONFORMAÇÃO DE CHAPAS METÁLICAS	3
2.1. Aços Microligados de Alta Resistência Para Conformação de Chapas	3
2.1.1. Aço <i>Bake Hardening</i>	5
2.2. Caracterização de Chapas Metálicas para Estampagem.....	8
2.2.1. Propriedades Mecânicas Convencionais	8
2.2.1.1. Ensaio de Tração	10
2.2.1.2. Anisotropia	10
2.2.2. Curva Limite de Conformação	14
3. PROCESSO DE EMBUTIMENTO PROFUNDO	18
3.1. Deformações na Chapa Metálica.....	18
3.2. Coeficiente de Atrito no Embutimento Profundo.....	21
3.3. Metodologia de Cálculo do Coeficiente de Atrito.....	23
4. ANALISE COMPUTACIONAL	28
5. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL PARA CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA...	32
5.1. Propriedades Mecânicas	32
5.1.1. Ensaio de Tração	32
5.1.2. Anisotropia	35
5.1.3. Curva Limite de Conformação	36
6. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL PARA CÁLCULO DO COEFICIENTE DE ATRITO	42
6.1. Comportamento das Deformações no Copo.....	44
6.2. Coeficiente de Atrito no Embutimento do Copo.....	47
6.3. Simulação Numérica do Processo de Embutimento.....	49
7. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	50
7.1. Propriedades Mecânicas	50

7.1.1.	Ensaio de Tração	50
7.1.2.	Anisotropia	51
7.2.	Curva Limite de Conformação	51
7.3.	Embutimento do Copo.....	53
7.3.1.	Deformações no Copo	53
7.3.2.	Coeficiente de Atrito	55
8.	CONCLUSÕES.....	58
9.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	59
	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	60

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Aplicação e características dos aços microligados. Fonte: Schaeffer 2009.....	5
Figura 2 – Comportamento da propriedades do aço BH antes e após a pintura. Fonte: Pereira 1997.....	6
Figura 3 – Relação da resistência mecânica com o soluto de carbono. Fonte: Berbenni 2004..	7
Figura 4 – Curvas de escoamento dos aços estudados por Rabello.....	10
Figura 5 – Processo de laminação que origina a anisotropia através da orientação dos grãos. Fonte: Schaeffer 2004.....	11
Figura 6 – Direção dos corpos de provas retirados da chapa para realização do ensaio de anisotropia. Fonte: Schaeffer 2004.....	12
Figura 7 – Curvas de Escoamento do aço BH estudado por Narayanasamy 2008.....	14
Figura 8 – Ferramental criado pela USP para análise da estampabilidade de chapas de aços laminadas a frio. Fonte: Corte & Conformação de Metais 2007.....	15
Figura 9 – CLCs construídas para o aço BH 180, através de diferentes modelos matemáticos e ensaios experimentais. Fonte: Wolfgang et al 1998.....	16
Figura 10 – Regiões avaliadas quanto à conformação e quanto à deformação, respectivamente. R1 e R2 – regiões avaliadas quanto a criticidade das deformações; A, B, C e D – regiões cujas deformações foram avaliadas. Fonte: Rabelo 2000.....	16
Figura 11 – Curva Limite de Conformação de Painel Externo da Porta com Aço BH 180. Fonte: Rabelo 2000.....	17
Figura 12 – Curva Limite de Conformação de Painel Externo da Porta com Aço BH 220. Fonte: Rabelo 2000.....	17
Figura 13 – Tensões atuantes na estampagem profunda. Adaptada de Batalha 2006.....	19
Figura 14 – Exemplo esquemático do comportamento das deformações. Fonte: Schaeffer 2004.....	20
Figura 15 – Transformações ocorrentes na estampagem profunda. Fonte: Schaeffer (2006)..	21
Figura 16 – Esquema do teste de embutimento profundo e as dimensões da ferramenta. Fonte: Kim 2008.....	22
Figura 17 – Ferramental utilizado por Kim para avaliação de lubrificantes no embutimento profundo de um copo. Fonte: Kim 2008.	22
Figura 18 – Regiões de maior influência das forças de atritos no processo de embutimento. Fonte: Carlsson 2005.....	24
Figura 19 – Tipos de esforços envolvidos no embutimento profundo. Fonte: Mielinik 1991.	24

Figura 20 – Croqui do processo de estampagem de um copo. Fonte: Folle 2008.....	25
Figura 21 – Faixa de segurança do prensa chapas para diferentes materiais. Fonte: Choudhury 2006.	28
Figura 22 – Conjunto montado no DynaForm para a simulação do processo de embutimento.	31
Figura 23 – Geometria dos corpos de prova utilizados para realização dos ensaios de tração. Dimensões em mm.	32
Figura 24 – Componentes utilizados na máquina de tração.	33
Figura 25 – Posicionamento do cdp nas garras da máquina de tração. (“A” – marca utilizadas para mensuração da variação do deslocamento necessário para o cálculo da anisotropia).	33
Figura 26 – Curva tensão verdadeira x deformação verdadeira do aço BH 180. Espessura 0,75mm.	34
Figura 27 – Curva tensão verdadeira x deformação verdadeira do aço BH 220. Espessura 0,75mm.	34
Figura 28 – Índice de anisotropia pela direção de laminação dos aços BH 180 e BH 220.	36
Figura 29 – Modelo da geometria dos corpos de prova, utilizado no ensaio de Nakajima.	37
Figura 30 – Esquema do processo de gravação dos corpos de prova.	38
Figura 31 – Corpos de prova a serem ensaiados com a marcação circular.	38
Figura 32 – Design do ferramental utilizado nos ensaios de Nakajima.	39
Figura 33 – Posicionamento dos componentes utilizados no ensaio.	39
Figura 34 – Corpo de prova ao final do ensaio.	40
Figura 35 – Corpos de provas ensaios. Numeração dos cp’s conforme tabela 8.	40
Figura 36 – Exemplo de elipses a serem mensuradas para levantamento da CLC.	41
Figura 37 – Curva limite de conformação dos aços BH 180 e BH 220.	41
Figura 38 – Esboço do processo de embutimento profundo. Fonte: Folle 2008.	42
Figura 39 – Chapas conformadas sem lubrificação, com a gravação de uma malha circular para análise das deformações. a) aço BH 180 e b) aço BH 220.	43
Figura 40 – Chapas conformadas com lubrificação do filme de teflon, com a gravação de uma malha circular para análise das deformações. a) aço BH 180 e b) aço BH 220.	43
Figura 41 – Comportamento das deformações ocorridas no copo de aço BH 180, estampado sem lubrificação.	44
Figura 42 – Comportamento das deformações ocorridas no copo de aço BH 180, estampada com lubrificação de filme de teflon.	44

Figura 43 – Comparação da CLC com as deformações do copo do aço BH 180, estampado sem lubrificação.....	45
Figura 44 – Comparação da CLC com as deformações do copo do aço BH 180, estampado com lubrificação de filme de teflon.....	45
Figura 45 – Comportamento das deformações ocorridas no copo de aço BH 220, estampada com lubrificação “a seco”.....	46
Figura 46 – Comportamento das deformações ocorridas no copo de aço BH 220, estampado com lubrificação de filme de teflon.....	46
Figura 47 – Comparação da CLC com as deformações do copo do aço BH 220, estampado com lubrificação “a seco”.....	46
Figura 48 – Comparação da CLC com as deformações do copo do aço BH 220, estampado com lubrificação “de contorno”.....	47
Figura 49 – Copo de aço BH 180 produzido no processo de simulação com lubrificação.	49
Figura 50 – Caminho de deformações no embutimento do copo de aço BH 180.	49
Figura 51 – Comparação entre as CLC para o aço BH 180.	52
Figura 52 – Comparação entre as CLC para o aço BH 220.	52
Figura 53 – Comparação entre as deformações reais e simuladas para o embutimento do copo de aço BH 180, com lubrificação de filme de teflon.	54
Figura 54 – Comparação entre as deformações reais e simuladas para o embutimento do copo de aço BH 220, com lubrificação de filme de teflon.	55
Figura 55 – Comparação entre as forças de embutimento experimental e simulada no processo com lubrificação de filme de teflon para o aço BH 180.....	56
Figura 56 – Comparação entre as forças de embutimento experimental e simulada no processo com lubrificação de filme de teflon para o aço BH 220.....	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação dos aços BH conforme as propriedades mecânicas. Fonte: Site Usiminas.....	7
Tabela 2 – Composição química das classes de aço BH. Fonte: Site Usiminas.....	8
Tabela 3 – Propriedades mecânicas dos aços estudados por Rabello. Fonte: Rabelo 2000.....	10
Tabela 4 – Determinação do índice de anisotropia por Rabelo. Fonte: Rabelo 2000.	13
Tabela 5 – Determinação do índice de anisotropia por Pereira. Fonte: Pereira 1997.	13
Tabela 6 – Propriedades mecânicas dos aços BH e IF extra galvanizado. Fonte: Narayanasamy <i>et al</i> 2008.	14
Tabela 7 – Características dos aços BH 180 e BH 220.	35
Tabela 8 – Dimensionamento dos corpos de prova utilizado no ensaio de Nakajima.	37
Tabela 9 – Forças máximas experimentais mensuradas nos processos ensaiados.	47
Tabela 10 – Parâmetros de entrada na formulação de Panknin.	48
Tabela 11 – Estimativa do coeficiente de atrito.	48
Tabela 12 – Comparação entre as propriedades mecânicas do aço BH 180.	50
Tabela 13 – Comparação entre as propriedades mecânicas do aço BH 220.	50
Tabela 14 – Comparação dos índices de anisotropia.....	51
Tabela 15 – Comparação dos resultados das forças de embutimento experimental e simulada.	56

LISTA DE SÍMBOLOS

A_0	Área inicial [mm^2];
A_i	Área instantânea [mm^2];
AL	Alongamento;
b_0	Largura inicial [mm];
BH	Aço microligado bake hardening
b_i	Largura instantânea [mm];
C	Coefficiente de resistência [MPa];
CP	Aço microligado com fases complexas;
D	Diâmetro do flange [mm];
D_0	Diâmetro inicial da geratriz [mm];
d_0	Diâmetro do punção [mm];
D_m	Diâmetro interno da matriz [mm];
DP	Aço microligado dupla fase;
E	Modulo de elasticidade [GPa];
F	Força instantânea [N];
F_A	Forças de atrito no embutimento [N];
F_{APC}	Força de atrito no prensa chapas [N];
F_{AR}	Força de atrito na passagem do raio da matriz [N];
F_{id}	Força ideal de embutimento [N];
F_{max}	Força máxima de embutimento [N];
F_N	Força normal do prensa chapas [N];

F_{RE}	<i>Força do retorno elástico no embutimento [N];</i>
h_c	<i>Altura do cilindro [mm];</i>
IF	<i>Aço microligado livre de interstícios;</i>
$IF-HSS$	<i>Aço de alta resistência livre de interstícios;</i>
k_f	<i>Tensão de escoamento [MPa];</i>
k_{f1}	<i>Tensão de escoamento na saída do raio da matriz [MPa];</i>
k_{f2}	<i>Tensão de escoamento no diâmetro externo da região do flange [MPa];</i>
k_{f_m}	<i>Tensão de escoamento média [MPa];</i>
l_0	<i>Comprimento inicial [mm];</i>
l_1	<i>Comprimento final [mm];</i>
LE	<i>Limite de escoamento [MPa];</i>
LR	<i>Limite de resistência [MPa];</i>
n	<i>Índice de encruamento;</i>
n_{90}	<i>Índice de encruamento a noventa graus da direção de laminação;</i>
P_b	<i>Pressão do prensa chapas [MPa];</i>
r	<i>Índice de anisotropia do material;</i>
r_{0°	<i>Índice de anisotropia do material a 0° da direção de laminação;</i>
r_{45°	<i>Índice de anisotropia do material a 45° da direção de laminação;</i>
r_{90°	<i>Índice de anisotropia do material a 90° da direção de laminação;</i>
r_c	<i>Raio do cilindro [mm];</i>
r_m	<i>Índice de anisotropia média do material;</i>

R_m	Raio da matriz [mm];
s	Espessura da geratriz [mm];
s_0	Espessura inicial [mm];
s_1	Espessura final [mm];
TRIP	Aço microligado de alta resistência com transformação induzida por plasticidade;
β	Relação de estampagem instantânea;
B_0	Relação de estampagem inicial;
β_i	Relação de Estampagem inicial;
Δr	Anisotropia planar;
ε	Deformação convencional;
μ	Coefficiente de atrito;
σ	Tensão convencional [MPa];
τ_a	Tensão de atrito [MPa];
φ	Deformação verdadeira;
φ_1	Deformação verdadeira radial ou no comprimento da chapa; φ_1 - φ_r - φ_l
φ_2	Deformação verdadeira tangencial ou na largura da chapa; φ_2 - φ_t - φ_b
φ_3	Deformação verdadeira na espessura da chapa (φ_s);
φ_A	Deformação verdadeira da área transversal;

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo a caracterização tecnológica dos aços Bake Hardening (BH 180 e BH 220); o cálculo do coeficiente de atrito; e a simulação numérica para validação dos dados analíticos durante o processo de estampagem profunda. A caracterização tecnológica foi realizada através da mensuração das propriedades mecânicas convencionais (limite de escoamento, limite de resistência, índice de encruamento, índice de anisotropia,...) e da curva limite de conformação. Para cálculo do coeficiente de atrito, foi utilizado o processo de embutimento profundo de um copo, no qual, através da mensuração da força máxima de embutimento, consegue-se estimar o coeficiente de atrito do processo pela formulação de Panknin. Com o auxílio da simulação computacional, pretende-se avaliar os resultados analíticos, a fim de validar o cálculo do coeficiente de atrito do processo através da comparação das forças máximas. A caracterização do material demonstra que tais materiais possuem boa estampabilidade. Foram analisadas as deformações que os copos obtiveram durante o processo de embutimento profundo, comprovando o aumento de espessura na região do flange. Os coeficientes de atrito, calculados no embutimento dos copos, foram dados de entrada no software de simulação para comparação das curvas das forças de embutimento, mostrando a coerência entre as curvas, validando assim uma metodologia para cálculo do coeficiente de atrito no processo.

ABSTRACT

This work has as objective the technological characterization of Bake Hardening steel (BH 180 e BH 220), the friction factor calculation and the numerical simulation for validation of analytical data during the deep drawing process. The technological characterization was carried out through the measuring of conventional mechanical properties (yield point, strength limit, yield index, anisotropy index,...) and forming limit curve. For calculation of friction factor, it was used the deep drawing process of a cup, in which, through the measurement of maximum force of deep drawing is possible to esteem the friction factor of this process through formulation of Panknin. With the support of computational simulation, the analytical results are intended to be evaluated, in order to validate the calculation of the friction factor of the process through the comparison of the maximum force. The characterization of the material shows that such materials have good drawability. The deformations that the cups got during the deep drawing process were analyzed, proving the raising of thickness in the region of the flange. The friction factors calculated in the deep drawing cups were entry data in the software of simulation to the comparison of the curves of the deep drawing power, showing the coherence between the curves, in this way validating a methodology for calculation of the factor of friction in the process.

1. INTRODUÇÃO

A manufatura de componentes que têm sua origem na transformação de chapas metálicas, exige, além das operações de estampagem profunda, outras etapas de trabalho como o corte, a dobra, a furação, entre outros. Os processos de fabricação que envolvem as operações de conformação de chapas metálicas têm sua origem numa matéria prima oriunda do processo de laminação. Os componentes manufaturados por esses processos destinam-se a uma infinidade de ramos industriais, tais como: a indústria automotiva, máquinas agrícolas, indústria aeroespacial, aparelhos de utensílios domésticos, construção civil, área médica, transportes, indústria eletrônicas, conforme Schaeffer 2004.

A indústria automobilística vem, ao longo dos anos, modificando as formas e projetos de fabricação de veículos, o que tem provocado um crescimento nas exigências com relação à estampabilidade a que são submetidas as chapas destinadas à fabricação de carrocerias de automóveis. Em particular, a procura do aumento da eficiência energética dos automóveis e recentemente as pressões por redução do nível de emissão de poluentes determinam um esforço para reduzir o peso dos veículos. Isto pode ser obtido com o uso de aços de alta resistência. A primeira linha desenvolvida pelas siderúrgicas foi a de aços endurecíveis por solução sólida e/ou aqueles endurecidos por precipitação, entretanto sua estampabilidade é limitada. Atualmente, entre os materiais que melhor apresentam uma solução de compromisso entre nível de resistência e estampabilidade são os aços BH (*Bake Hardening*) (Rabelo 2000).

A contínua busca por melhores propriedades mecânicas, leva a novos produtos colocados no mercado e os processos de simulação computacional fazem com que a caracterização mecânica dos produtos acabados e de sua matéria-prima sejam perfeitamente conhecidos (Rabelo 2000). Com isto, é necessário dispor de um profundo conhecimento acerca da influência de todas as variáveis sobre o processo de estampagem, para projetar adequadamente o ferramental, e escolher o material que melhor se encaixa para manufaturar um produto com formato e desempenho desejados.

Diante da crescente preocupação com a qualidade das chapas metálicas para a confecção de produtos estampados e diante de um mercado cada vez mais competitivo é de suma importância desenvolver uma metodologia de caracterização e controle de chapas metálicas para estampagem, assegurando produtos de excelente qualidade, baixo custo de produção e um baixo índice de refugo (Gorni 2006).

O desenvolvimento deste trabalho consiste na apresentação da caracterização das propriedades mecânicas e tecnológicas das chapas metálicas destinadas à estampagem de componentes mecânicos, empregando-se os materiais BH 180 e BH 220. Outro foco de estudo deste trabalho é o cálculo do coeficiente de atrito, durante o processo de estampagem profunda, através da mensuração da força máxima no processo de embutimento profundo, utilizando a formulação de Panknin. Por último, foi utilizada a simulação computacional para avaliar e comparar os resultados experimentais e analíticos.

A caracterização do material é um ponto extremamente relevante no processo de estampagem, sendo que, neste trabalho, as principais propriedades dos materiais estudados foram mensuradas e utilizadas no desenvolvimento do próprio trabalho.

O coeficiente de atrito é uma variável de extrema importância no desenvolvimento do processo, contudo buscou-se uma alternativa para mensurá-lo. Uma metodologia foi realizada, seguindo estudos anteriores, entretanto com outros materiais. O trabalho seguirá esta metodologia para os aços BH 180 e BH 220.

A simulação numérica é utilizada para realizar a validação dos resultados encontrados no procedimento experimental e analítico.

2. ASPECTOS DA CONFORMAÇÃO DE CHAPAS METÁLICAS

O objetivo final do processo de estampagem profunda é a manufatura de um produto, a partir de um *blank* de chapa, que venha a apresentar o formato desejado, sem defeitos ou falhas. O formato final do produto, após a estampagem, é definido pelo ferramental, *blank* e parâmetros de processo. Erros no projeto do ferramental ou no formato do *blank*, bem como a escolha inadequada do material a ser estampado e dos parâmetros de processo podem gerar um produto com formato inadequado ou falha (Ferrarini 2004).

A escolha adequada do material a ser estampado depende de suas propriedades mecânicas e tecnológicas. As propriedades mecânicas são obtidas por ensaios tradicionais, como ensaio de tração e de compressão, em busca das características inerentes ao material. As propriedades tecnológicas dos materiais são alcançadas através de ensaios específicos para o processo de manufatura pelas quais os materiais irão passar. No caso da conformação de chapas é requerido um conhecimento sobre a quantidade de deformação que o material aceite.

2.1. Aços Microligados de Alta Resistência Para Conformação de Chapas

As múltiplas facetas da moderna indústria de manufatura de materiais oriundos de chapas metálicas abrangem um largo espectro da economia mundial. A demanda tem origem desde a indústria automobilística, fabricação de motores elétricos até a indústria eletrônica. São produzidos componentes com poucas gramas até peças na ordem de 1000kg. Evidentemente, que é a indústria automobilística a grande força motora, que busca sempre componentes mais leves com o correspondente aumento de resistência mecânica (Schaeffer 2009).

Um dos objetivos mais importantes no desenvolvimento da carroceria do automóvel com chapa metálica é a combinação de força e estampabilidade. Estampabilidade é necessária quando a chapa é estampada em um painel, e a alta resistência é necessária depois da fabricação (JFE 2009).

Aço de alta resistência e baixa liga (HSLA – *High Steel Low Alloy*) é um tipo de aço que proporciona melhores propriedades mecânicas e maior resistência à corrosão do que os aços carbono. Aços HSLA variam de outros aços, porque eles não são feitos para atender uma

determinada composição química, mas sim para atender a determinadas propriedades mecânicas (All Metals & Forge 2009).

Os aços de alta resistência e baixa liga (HSLA) são aços que proporcionam maior relação força/peso, mais baixo teor de carbono que os aços convencionais e com um modesto preço. Tudo porque os aços HSLA são aços mais resistentes, que podem ser utilizados em seções mais finas, o que os torna particularmente atraentes para o transporte e componentes de equipamentos em que a redução de peso é um fator importante (Wikipedia 2009).

Ao longo do tempo, aços microligados de alta resistência mecânica foram desenvolvidos para atender às necessidades do mercado. Os primeiros aços fabricados foram os aços IF (*Interstitial Free* ou livre de interstícios), e posteriormente os aços BH (*Bake Hardening*).

Os aços microligados IF de elevada resistência para a estampagem são usados para peças complexas, como: janelas, portas e capôs de automóveis. São produzidos com baixíssimo teor de carbono e microligados com o titânio ou níbio. Estes são indicados para estampagem profunda (Schaeffer 2009).

Os aços *Bake Hardening* (BH) caracterizam-se por um acréscimo da tensão limite de escoamento (de aprox. 40 MPa) durante o processo de tratamento de recobrimento ou pintura (a uma temperatura de aproximadamente 170°C). São geralmente aplicados em peças visíveis, tais como: portas, capôs, portas traseiras, pára-lamas dianteiros e tetos, além de peças estruturais, tais como: assoalhos automotivos, reforços, suportes transversais e peças anexas para indústria automobilística (Gorni 2008).

Outros aços microligados foram criados com o passar do tempo, entre eles: o aço DP (*dual Phase* ou dupla fase), TRIP (*Transformation Induced Plasticity* ou Transformação Plástica Induzida) e os CP (*Complex Phases* ou Fases Complexas).

A melhor conformabilidade dos aços HSLA foi desenvolvida principalmente para a indústria automotiva para substituir peças de aço baixo carbono, reduzindo o peso sem sacrificar a resistência mecânica e a deformação. Automóveis de passeio são exemplos típicos de aplicações destes materiais que incluem componentes do chassi, reforço de peças da direção e da suspensão, pára-choques, e as rodas (All Metals & Forge 2009). Alguns exemplos da aplicação desses materiais podem ser vistos na figura 1, como também a relação da resistência com o alongamento dos mesmos.

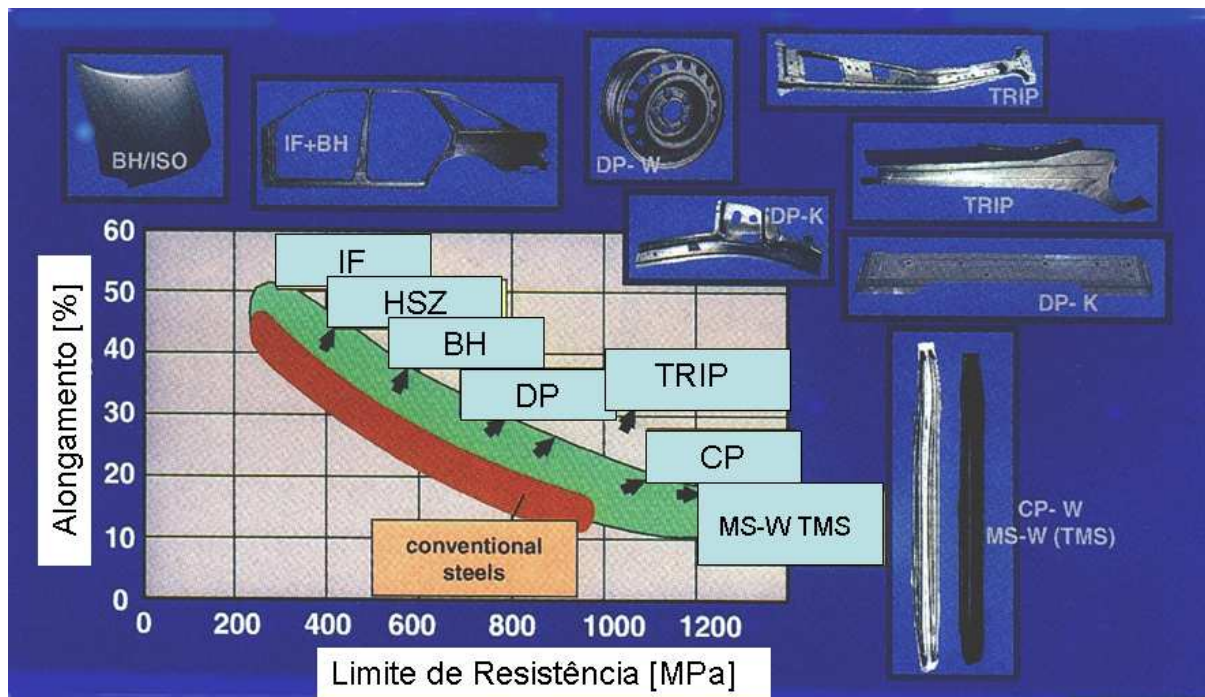


Figura 1 – Aplicação e características dos aços microligados. Fonte: Schaeffer 2009.

2.1.1. Aço *Bake Hardening*

No final do século XX a indústria siderúrgica japonesa introduziu, com grande sucesso, chapas de aço para a indústria automobilística, que apresentavam propriedades singulares. Eram muito macias, quando entregues ao fabricante. Ele podia dar à chapa a forma desejada, mas a chapa apresentava forte aumento da resistência mecânica na operação de pintura (efeito *bake hardening*). O emprego desse material, em painéis veiculares, permitiu a utilização de chapas mais finas, mais facilmente trabalhadas e com maior resistência no produto final. Os aços *Bake Hardening* (BH) são elaborados e tratados para que se obtenha um aumento significativo do limite de elasticidade durante um tratamento térmico à baixa temperatura, o que permite alcançar níveis de resistência maiores nos produtos, com um desempenho constante do ponto de vista da estampabilidade. Os ganhos proporcionados pelo tratamento de cozimento são chamados “efeito *bake hardening*” que é aproximadamente 40 MPa, conforme informado por Evando (2007). Este efeito é um fenômeno de envelhecimento controlado, conhecido como envelhecimento por deformação estática, ligado à presença de carbono e/ou nitrogênio em solução sólida, impedindo a movimentação das discordâncias através da segregação de átomos intersticiais. O comportamento do aço BH, antes da pintura e após a pintura, pode ser visto na figura 2.

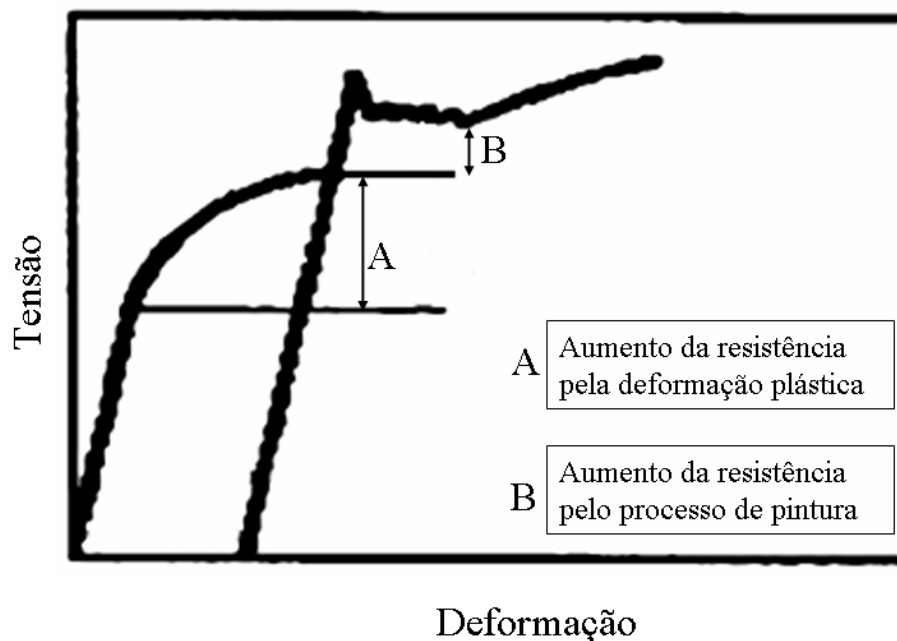


Figura 2 – Comportamento da propriedades do aço BH antes e após a pintura. Fonte: Pereira 1997.

Os aços, em geral, ganham resistência mecânica, quando são trabalhados a frio devido ao encruamento, como no caso da conformação de chapas metálicas. O aço BH também apresenta um aumento de resistência mecânica, quando é conformado parte A da figura 2. Entretanto, este aço, devido à sua aplicação, passa pelo processo posterior de pintura, sendo que este procedimento ocorre geralmente na temperatura de 170°C.

A vantagem da utilização dos aços BH ou com efeito *bake hardening*, que estes aços sofrem, corresponde, na habilidade desse material, endurecer durante o processo de pintura (como visto na parte B da figura 2). Ou seja, tem-se um aço com boa estampabilidade, e, controlando a quantia de soluto de carbono, pode-se otimizar a etapa de endurecimento, na pintura, depois da estampagem. Durante a etapa de estampagem, aumenta a densidade de discordâncias (encruamento) e o acúmulo de discordâncias no sistema de escorregamento são formadas, conforme informado por Berbenni (2004).

No processo de pintura, o aço BH tem um endurecimento, informa Jeong (2006). Esse aumento na resistência ocorre devido ao processo de fabricação desse material combinado com sua composição química e microestrutura. A quantidade de carbono nos aços, antes de serem conformados, é muito baixa, apresentando-se dissolvido na ferrita. Durante a pintura a 170°C, o carbono precipita na forma de carbetos preferencialmente próximo às discordâncias criadas na conformação da chapa, aumentando assim a resistência do material. Na figura 3

pode-se observar o comportamento do soluto carbono durante a manufatura de componentes fabricados de aços BH, relacionados com a resistência mecânica.

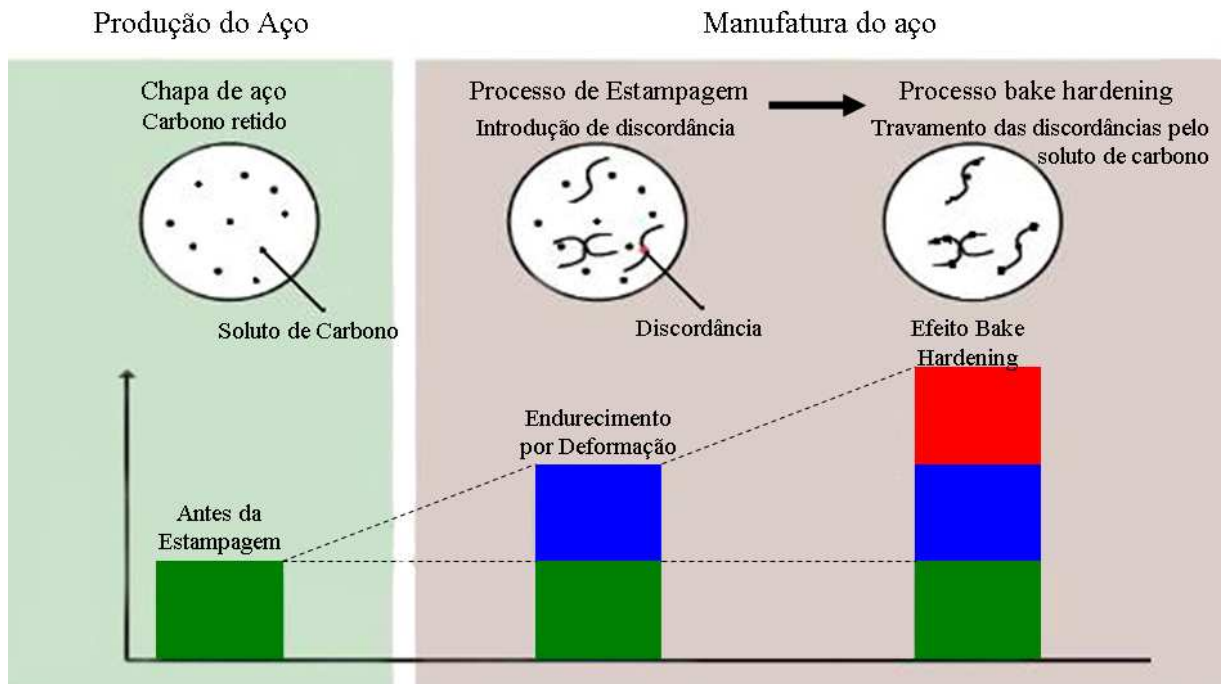


Figura 3 – Relação da resistência mecânica com o soluto de carbono. Fonte: Berbenni 2004.

A Usiminas (2009) classifica os aços *bake hardening* como materiais laminados a frio, sendo que dentro desta classificação encontram-se os aços microligados de alta resistência, como IF, DP e CP. Os aços BH são classificados por grau conforme a resistência mecânica e composição química da tira. Na tabela 1, pode-se observar os três tipos de aços BH que a Usiminas produz e suas propriedades. Já, na tabela 2, observa-se a composição química de cada grau de aço BH.

Tabela 1 – Classificação dos aços BH conforme as propriedades mecânicas. Fonte: Usiminas 2009.

Grau	LE (MPa)	LR (MPa)	Alongamento (%)	r ₉₀	n ₉₀
USI-BV-180	180 ~ 240	300 ~ 370	≥ 34	≥ 1,60	≥ 0,150
USI-BH-220	220 ~ 280	320 ~ 400	≥ 32	≥ 1,50	≥ 0,150
USI-BH-260	260 ~ 300	360 ~ 440	≥ 26		

Identifica-se, então, LE o limite de escoamento, LR o limite de resistência, r₉₀ o índice de anisotropia a 90° da direção de laminação e n₉₀ o índice de encruamento a 90° da direção de laminação.

Tabela 2 – Composição química das classes de aço BH. Fonte: Usiminas 2009.

Grau	Composição química (% em peso)					
	C	Mn	Si	P	S	Al
USI-BV-180	≤ 0,04	≤ 0,50	≤ 0,60	≤ 0,060	≤ 0,030	≤ 0,020
USI-BH-220	≤ 0,06	≤ 0,60	≤ 0,80	≤ 0,080	≤ 0,030	≤ 0,020
USI-BH-260	≤ 0,08	≤ 0,70	≤ 0,80	≤ 0,100	≤ 0,030	≤ 0,020

Os aços *bake hardening* foram escolhidos para serem estudados, neste trabalho, por terem uma grande aplicabilidade na cadeia automotiva, grande impulsionadora da tecnologia no Brasil, como também o seu ilustre comportamento durante a sua manufatura. O material do presente trabalho é proveniente da Usiminas. Neste trabalho, não serão avaliadas as características de endurecimento na pintura.

2.2. Caracterização de Chapas Metálicas para Estampagem

2.2.1. Propriedades Mecânicas Convencionais

Diante da crescente preocupação com a qualidade das chapas metálicas para a confecção de produtos estampados e diante de um mercado cada vez mais competitivo é de suma importância a caracterização e controle das propriedades mecânicas de chapas metálicas para estampagem, assegurando produtos de excelente qualidade, baixo custo de produção e um baixo índice de refugo, comenta Ferrarini (2004).

Segundo Tigrinho (2005), para obter êxito na estampagem de chapas metálicas, deve-se levar em consideração algumas variáveis, tais como: propriedades do material, coeficiente de encruamento e anisotropia, geometria da ferramenta, lubrificação na interface punção/chapa metálica e velocidade de conformação, sendo que todas estas variáveis estão inter-relacionadas.

O mais comum e tradicional dos testes para definir algumas propriedades mecânicas é o ensaio de tração. Extrai-se de um diagrama $\sigma \times \epsilon$ convencional algumas propriedades mecânicas fundamentais que ajudam a caracterizar um material, segundo Spim (2000):

- Módulo de elasticidade “E” [GPa]: uma medida de rigidez do material que relaciona a tensão e a deformação na zona elástica. Nessa região, após cessar o carregamento, o material retorna à condição inicial em relação à sua deformação;

- O limite de escoamento “LE” [MPa]: valor de tensão que marca a passagem da zona elástica para a zona plástica. Quando este valor de tensão não é bem definido, traça-se uma linha paralela à região linear da curva e deslocada 0,2% para a direita, sendo aceita a tensão de escoamento do material como o ponto de interseção entre a linha deslocada e curva obtida no ensaio;

- O limite de resistência “LR” [MPa]: a tensão máxima que o material suporta.

O corpo de prova, quando submetido ao estado de deformação característico de um ensaio de tração sofre um aumento do comprimento inicial (l_0) e conseqüentemente uma gradativa diminuição da secção transversal, considerando-se a lei de constância de volume (o volume do corpo de prova será constante, quando submetido à deformação). Mantendo a força do ensaio constante, e levando em conta a redução da secção transversal há um aumento da tensão obtida no ensaio, sendo esta a tensão verdadeira, conforme observado na equação 1. Através da tensão verdadeira e da deformação verdadeira (φ), sofrida pelo material, consegue plotar a curva de escoamento do material, referente à variação da tensão de escoamento (kf) que um material apresenta em função da deformação verdadeira (φ) que pode ser obtida pelo método exponencial de Hollomon, apresentado na equação 2. Para o cálculo da deformação verdadeira, realiza-se a equivalência das outras três deformações: deformação no comprimento “ φ_l ”(equação 3), deformação na largura “ φ_b ”(equação 4) e deformação na espessura “ φ_s ”(equação 5); resultando na deformação verdadeira equivalente vista na equação 6.

$$kf = \frac{F}{A_i} \quad (1)$$

$$kf = C \cdot \varphi^n \quad (2)$$

$$\varphi_l = \ln \frac{l_i}{l_o} \quad (3)$$

$$\varphi_b = \ln \frac{b_i}{b_o} \quad (4)$$

$$\varphi_s = \ln \frac{s_i}{s_o} \quad (5)$$

$$\varphi_{eq} = \sqrt{\frac{2}{3}(\varphi_l^2 + \varphi_b^2 + \varphi_s^2)} \quad (6)$$

onde k_f [MPa] é a tensão escoamento, F [N] o carregamento da força instantânea, A_i [mm²] é a área instantânea, C é a constante de resistência, φ é a deformação verdadeira, n é o índice de encruamento, l_0 [mm] o comprimento inicial, l_i [mm] o comprimento instantâneo, b_1 a largura instantânea, b_0 a largura inicial, s_i a espessura instantânea e s_0 a espessura inicial (Schaeffer 1999, Evangelista 2000). Quanto maior o grau de encruamento, maior o grau de homogeneização das deformações, isto é, o material distribui melhor as deformações ao longo de seu volume, conforme Eglan (2004).

2.2.1.1. Ensaio de Tração

Rabelo (2000) em estudos com os aços IF-HSS, BH 180 e BH 220 conseguiu caracterizar as propriedades mecânicas dos materiais através do ensaio de tração que podem ser vistas na tabela 3 e na figura 4.

Tabela 3 – Propriedades mecânicas dos aços estudados por Rabelo. Fonte: Rabelo 2000.

Amostra	LE (MPa)	LR (MPa)	AL (%)	n
IF-HSS	230	374	34	0,221
BH 180	205	335	40	0,206
BH 220	258	370	34	0,200

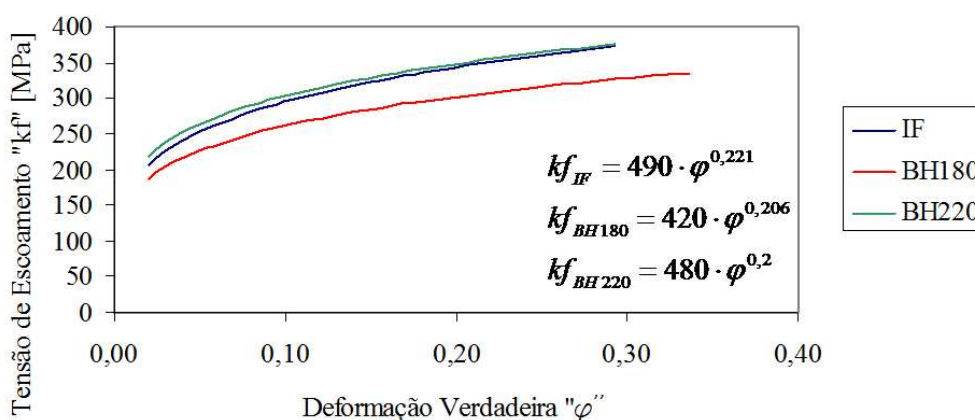


Figura 4 – Curvas de escoamento dos aços estudados por Rabelo.

2.2.1.2. Anisotropia

A anisotropia de um material é proveniente da laminação a frio da chapa, que resulta em diferentes propriedades mecânicas numa mesma chapa, em relação à direção de laminação. A

variação da anisotropia dentro do plano da chapa é chamada de anisotropia planar. Durante os processos de conformação de chapas, grãos cristalinos individuais são alongados na direção da maior deformação de tração. O alongamento é consequência do processo de escorregamento cristalino durante a deformação, como visto na figura 5.

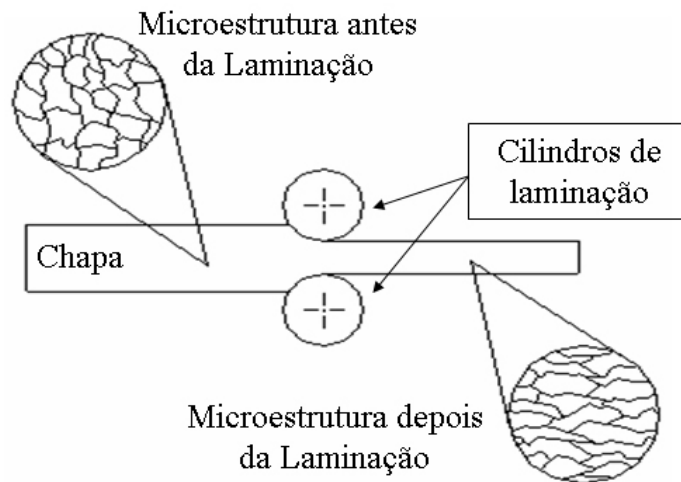


Figura 5 – Processo de laminação que origina a anisotropia através da orientação dos grãos.
Fonte: Schaeffer 2004.

O índice de anisotropia “r” é definido como razão entre as deformações principais na direção da largura (φ_2) e espessura (φ_3). Como o erro para medida da deformação na direção da espessura pode ser grande, quando se faz a análise em chapas é recomendada uma simplificação através da “Lei da Constância do Volume” (equação 7):

$$\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 = 0 \quad (7)$$

$$\therefore \varphi_3 = -(\varphi_1 + \varphi_2) \quad (8)$$

$$r = \frac{\varphi_2}{\varphi_3} = \frac{\varphi_2}{-(\varphi_1 + \varphi_2)} \quad (9)$$

onde φ_1 é a deformação no comprimento. A anisotropia apresenta valores diferentes, que dependem de como os corpos de prova são retirados de acordo com a direção que o material foi laminado (ver figura 6), uma vez que a laminação modifica a orientação da estrutura cristalina dos grãos que compõem o material.

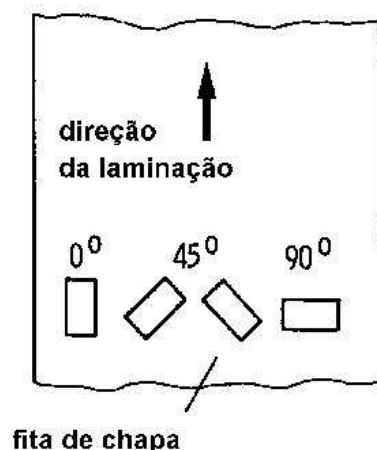


Figura 6 – Direção dos corpos de provas retirados da chapa para realização do ensaio de anisotropia. Fonte: Schaeffer 2004.

Utiliza-se o valor médio da anisotropia r_m para estimar o índice de anisotropia de um material, podendo-se ainda calcular a anisotropia planar (Δr), que determina a localização do “orelhamento” em uma peça cilíndrica em formato de copo.

$$r_m = \frac{1}{4}(r_{0^\circ} + 2 \cdot r_{45^\circ} + r_{90^\circ}) \quad (10)$$

$$\Delta r = \frac{r_{0^\circ} + r_{90^\circ}}{2} - r_{45^\circ} \quad (11)$$

Na equação 10 e 11, r_{0° representa o valor de anisotropia para um ensaio onde o corpo de prova é retirado na direção de laminação, r_{45° a 45° da direção de laminação e r_{90° o corpo de prova é retirado na direção perpendicular à laminação.

A anisotropia planar Δr mede a variação de r_m entre as direções longitudinal e transversal de laminação. Já o índice de anisotropia r_m é assim chamado porque mede a resistência à deformação na espessura da chapa, ou seja, é a anisotropia plástica através da espessura. O índice $r_m=1$, indica que existe igualdade entre a resistência à deformação na largura e na espessura. Para $r_m>1$, significa que a chapa oferece maior resistência à deformação plástica na espessura. O que se deseja para um aço de boa estampabilidade é que tenha um elevado de r_m e um Δr próximo de zero, conforme Acesita (2004). Costa (2003)

também afirma que quanto mais alto o valor de “ r_m ” maior a resistência do material à diminuição da espessura.

Segundo Novotny (2001), materiais anisotrópicos com r_m menor que 1, como alumínio por exemplo, não apresentam boa capacidade de se permitir estampar, pois para a mesma solicitação mecânica uma deformação na espessura será maior que na largura, isto é, há falha prematura na direção da espessura.

Os aços IF e BH são materiais que apresentam boa estampabilidade, conseqüentemente seus valores de anisotropia são maiores que um, como mostrados por Rabelo (2000), que determinou os valores da anisotropia para diversos tipos de aço, os quais são mostrados na tabela 4. Rabelo (2000) não divulgou os valores obtidos para o grau de encruamento nas diferentes direções de laminação (0, 45 e 90 graus), somente indicou o valor médio. Já, na tabela 5, Pereira (1997) determinou o índice de anisotropia para diferentes graus de aços BH.

Tabela 4 – Determinação do índice de anisotropia por Rabelo. Fonte: Rabelo 2000.

Material (aço)	r_m
IF – HSS	1,55
BH 180	1,57
BH 220	1,55

Tabela 5 – Determinação do índice de anisotropia por Pereira. Fonte: Pereira 1997.

Material (grau do aço BH)	r_m
<350 – A	1,6
<350 – B	1,4
>350	1,6

Narayanasamy *et al* (2008) estudaram os aços *bake hardening* e o aço livre de interstícios galvanizado, nos quais levantaram as propriedades mecânicas dos materiais em relação ao índice de encruamento, índice de anisotropia e a constante de resistência. Os estudos de Narayanasamy *et al* (2008) tiveram como base a caracterização desses materiais que são amplamente empregados na indústria automobilística, apresentando suas principais propriedades para serem conformados, conforme observado na tabela 6. Na figura 7 pode-se observar a curva de escoamento do aço BH estudado por Narayanasamy *et al* (2008) para as diferentes direções de laminação.

Tabela 6 – Propriedades mecânicas dos aços BH e IF extra galvanizado. Fonte: Narayanasamy *et al* 2008.

Direção de Laminação	Índice de Encruamento “n”		Índice de Anisotropia “r”		Constante de resistência “C”	
	IF	BH	IF	BH	IF	BH
0°	0,250	0,166	1,866	1,825	520	410
45°	0,235	0,201	1,432	1,387	450	450
90°	0,233	0,133	1,462	1,321	380	415
Média	0,238	0,175	1,548	1,480	450	431,25

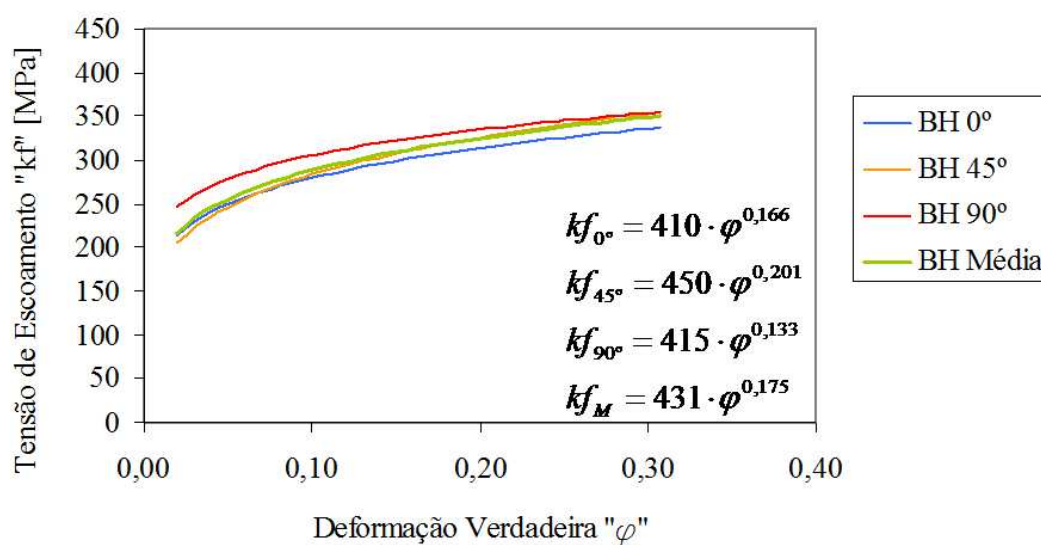


Figura 7 – Curvas de Escoamento do aço BH estudado por Narayanasamy 2008.

A figura 7 demonstra as curvas de escoamento encontradas por Narayanasamy *et al* (2008), em que o corpo de prova (cp), retirado a 45° da direção de laminação, apresentou o maior índice de encruamento, mostrando assim que este cp tem um maior aumento de resistência com o aumento da deformação.

2.2.2. Curva Limite de Conformação

Uma das principais características das chapas metálicas a serem estampadas é a Curva Limite de Conformação (CLC). A CLC é muito utilizada como uma análise de falha dos materiais, pois considera as possíveis deformações que um material pode suportar durante o processo de estampagem. Um dos métodos mais comum e muito utilizado na indústria e por pesquisadores é o método de Nakajima. O ensaio de Nakajima permite determinar a CLC com

auxílio e um ferramental simples empregando corpos de prova (cp's) com diferentes larguras. Este método utiliza a variação da espessura para mapear os dois quadrantes da curva.

Com relação à importância da estimativa da curva limite de conformação citam-se os novos desenvolvimentos de pesquisa, sendo realizadas no Brasil, onde a Universidade de São Paulo em parceria com empresas analisa as propriedades relacionadas à estampabilidade dos aços empregados na conformação, produzidos a partir de tiras a frio com o objetivo de aperfeiçoar os materiais e técnicas de fabricação. Para análise da estampabilidade é utilizado o ensaio de Nakajima e Marciniak (Corte & Conformação de Metais 2007). Um ferramental foi fabricado para maior capacidade de produção dos corpos de prova, conforme visto na figura 8 (Corte & Conformação de Metais 2007).

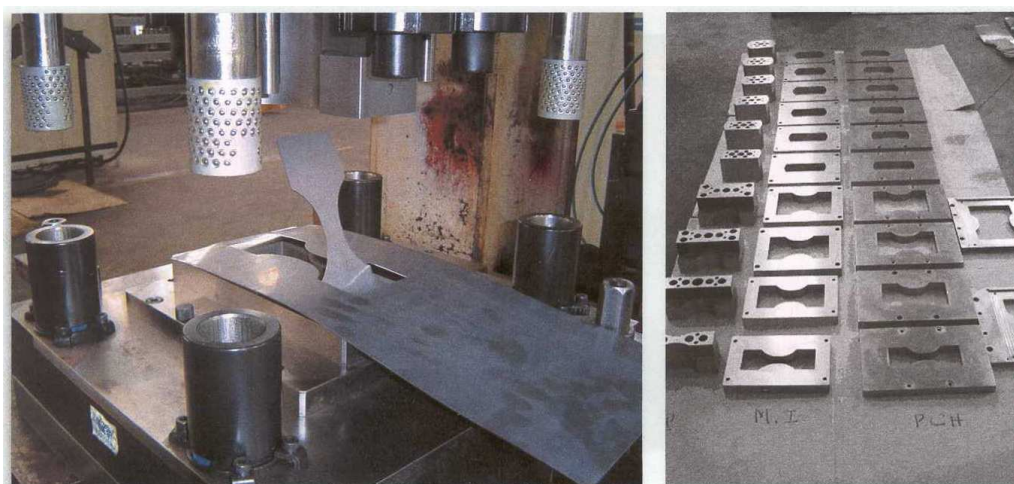


Figura 8 – Ferramental criado pela USP para análise da estampabilidade de chapas de aços laminadas a frio. Fonte: Corte & Conformação de Metais 2007.

Alguns trabalhos (Eglen 2004, Heber 2005, Lajarin 2008 e Lobão et al 2005) também utilizaram o ensaio de Nakajima para a determinação da CLC de seus materiais. Wolfgang et al (1998) definiram a CLC para o aço ZStE180 BH, no qual utilizaram três modelos matemáticos diferentes para definição da CLC (Modelo Swift-Hill, Modelo Swift-Hill Modificado e NADDRG) em comparação com os ensaios experimentais que foram realizados em uma máquina universal Erichsen para testes de diferentes materiais com corpos de prova de diferentes larguras e formatos. Os corpos de prova foram deformados por um punção rígido hemisférico sendo o diâmetro do punção igual a 100mm e a velocidade constante em todos os ensaios e igual a 0,5mm/s. As deformações limites foram determinadas por um padrão com grade circular de diâmetro de 2mm. Na figura 9 podem-se observar os resultados alcançados por Wolfgang et al (1998) em seu trabalho para aço BH 180.

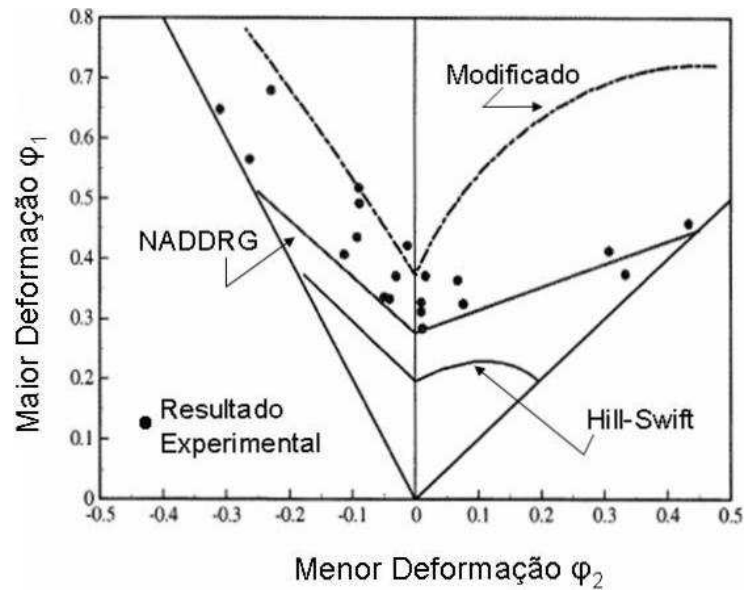


Figura 9 – CLCs construídas para o aço BH 180, através de diferentes modelos matemáticos e ensaios experimentais. Fonte: Wolfgang et al 1998.

Rabelo (2000), que trabalhou na manufatura de aços BH 180 e BH 220, utilizados na fabricação de painéis conformados de automóveis, analisou duas regiões do painel externo da porta lateral do automóvel, fabricadas pelo processo de estampagem, sendo que as regiões analisadas podem ser vistas na figura 10. As regiões selecionadas no componente mecânico foram escolhidas devido à alta solicitação durante a estampagem.

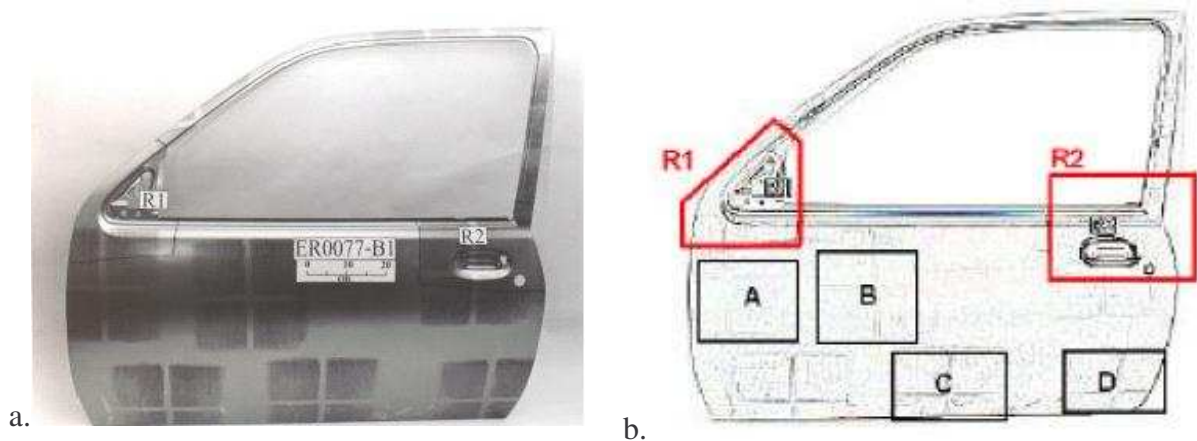


Figura 10 – Regiões avaliadas quanto à conformação e quanto à deformação, respectivamente. R1 e R2 – regiões avaliadas quanto a criticidade das deformações; A, B, C e D – regiões cujas deformações foram avaliadas. Fonte: Rabelo 2000.

Após a fabricação destes componentes, foram realizados ensaios para determinação das curvas limites de conformação dos materiais, no qual podem ser vistas na figura 11 e 12.

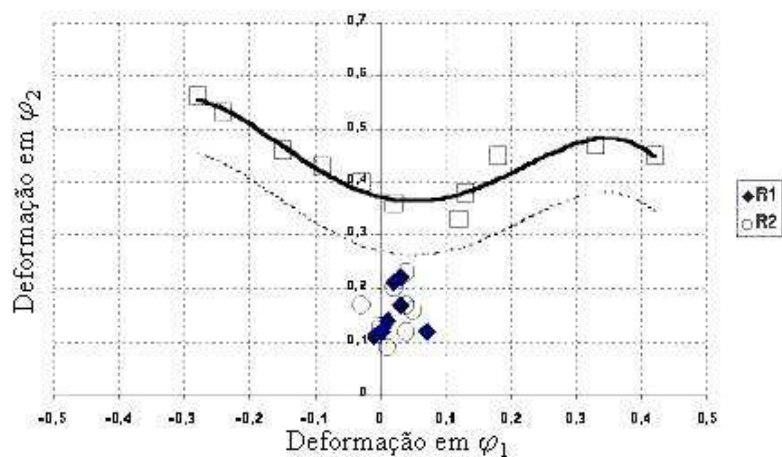


Figura 11 – Curva Limite de Conformação de Pannel Externo da Porta com Aço BH 180.
 Fonte: Rabelo 2000.

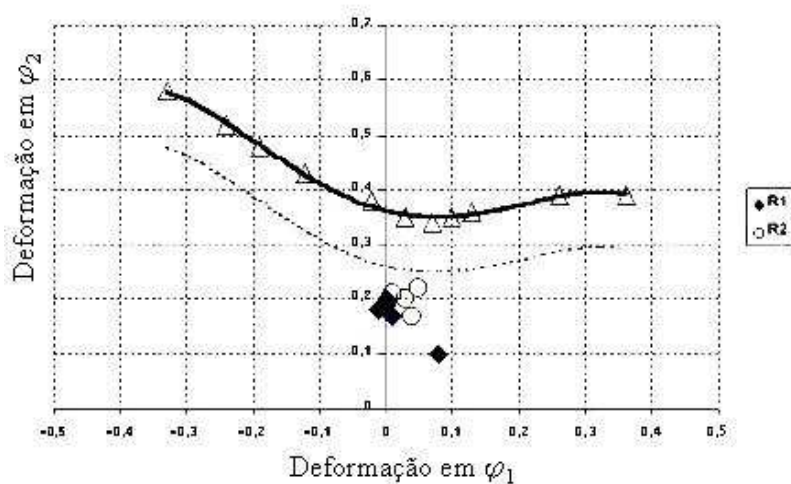


Figura 12 – Curva Limite de Conformação de Pannel Externo da Porta com Aço BH 220.
 Fonte: Rabelo 2000.

A margem de segurança equivalente, usada pela USIMINAS (fabricante do aço estudado), é de 10% de deformação quanto à avaliação do diagrama de limite de conformação, de modo a assegurar que, quando a peça estiver em produção, variações inerentes ao processo de estampagem e também de características do material possam ser absorvidas sem prejuízo para a sanidade da peça conformada (Rabelo 2000).

3. PROCESSO DE EMBUTIMENTO PROFUNDO

No desenvolvimento do processo de estampagem existem vários fatores que influenciam no alcance do produto. O atrito influencia diretamente na produção de fluxos irregulares de metal, aparecimento de tensões residuais, na qualidade superficial dos produtos, aumento do desgaste da ferramenta, elevação da temperatura e aumento do consumo de energia necessária à deformação (Da Silva 2008).

Os efeitos do atrito estão relacionados à dissipação de energia, por isso algumas vezes são considerados indesejáveis em processo de fabricação. A estimativa correta do coeficiente de atrito é uma das variáveis do processo de estampagem profunda mais importante, visto que esta é uma variável diretamente proporcional à força máxima aplicada no processo, como será demonstrado nesse trabalho.

O conceito básico de atrito pode ser descrito como a existência de uma força que restringe um movimento. A causa fundamental das forças de atrito entre superfícies metálicas parece residir em forças de atração entre as regiões em contato superficiais deslizantes. Estas superfícies apresentam irregularidades microscópicas que chegam a construir uma solda no estado sólido, resultado da deformação plástica localizada. As forças de atrito parecem ter sua origem na resistência ao cisalhamento destas uniões (Cetlin 1993).

Características elásticas e plásticas dos materiais podem dificultar o deslocamento relativo entre peças em contato (Wagoner 1997). As deformações durante o processo de conformação alteram a rugosidade superficial e eliminam a maioria dos efeitos elásticos na peça de trabalho, sendo assim de significativa influência nas forças de atrito (Da Silva 2008). A lubrificação pode ocorrer de três formas distintas, que influenciam diretamente no atrito dos materiais em contatos. São elas: i) Condições “a seco”: sem a existência de lubrificantes; ii) Condições “hidrodinâmicas”: quando existe uma espessa camada de lubrificante entre a matriz e o componente; iii) Lubrificação “de contorno”: existência de um filme de lubrificante envolvendo todo o material a ser conformado, sendo esta a situação mais amplamente encontrada em conformação de chapas metálicas.

3.1. Deformações na Chapa Metálica

Ao longo do processo de estampagem, a geratriz (ou *blank*) é submetida a diferentes tipos de deformação, até atingir a forma final, conforme pode ser observado na figura 13. O metal situado ao redor da base do punção é deformado radialmente para o interior da matriz,

reduzindo assim, seu diâmetro original até o diâmetro de conformação, que corresponde ao do punção. Assim, o metal sofre esforços de compressão na direção circunferencial e tração na direção radial (vide figura 13A). Nesta região é necessário cuidado para que não haja enrugamento na borda da peça, o que é feito por um sistema de pressão no anel de fixação ou prensa chapas. Se ocorrer enrugamento, as rugas serão transmitidas da borda para o interior da matriz, o que pode formar e propagar trincas, rompendo a lateral do copo. À medida que o material caminha em direção à matriz, ele é dobrado e depois desdobrado devido ao esforço trativo que ocorre na lateral do copo (figura 13B). Nesta região ocorre deformação plana; além disso, em geral, essa região é responsável pela homogeneização da espessura da parede pelo estiramento uniforme, conforme ilustra a figura 13C. Além de todos os esforços representados na figura 13, deve se considerar ainda o efeito do atrito que ocorre entre a geratriz e o prensa chapa (figura 13A), na região de dobramento da chapa, entre a matriz e a chapa (figura 13B), na lateral do copo entre chapa e punção e chapa e matriz (figura 13C), no interior do copo, entre punção e chapa (figura 13D) e no fundo do copo também entre punção e chapa (figura 13E) (Batalha 2006).

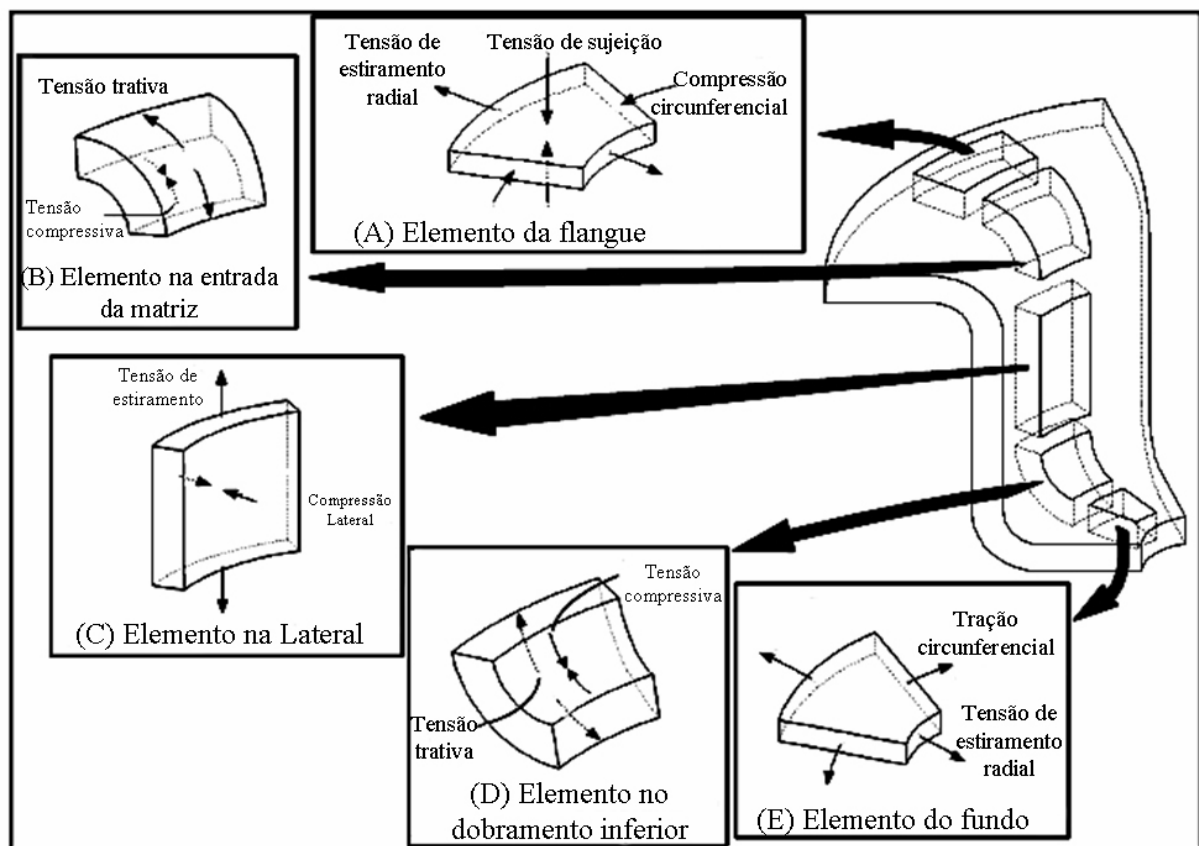


Figura 13 – Tensões atuantes na estampagem profunda. Adaptada de Batalha 2006.

Quando se realiza o embutimento profundo de um copo, diferentes formas geométricas ocasionam ao longo do corpo estampado diferentes regiões com deformações características em cada uma dessas regiões, conforme visto na figura 13. Deve-se observar que a deformação da espessura ($-\varphi_3$) é originada pela soma das outras duas ($\varphi_1+\varphi_2$), respeitando-se a Lei da Constância de Volume.

Nesse tipo de conformação é importante salientar que a altura de embutimento influencia na espessura final do copo, como por exemplo, na figura 14, onde a diminuição da deformação na espessura ($\varphi_3=\varphi_s$), na região lateral do copo. Uma deformação negativa significa uma redução da espessura (s_1) da chapa em relação a sua espessura inicial (s_0), conforme Schaeffer (2004). Na figura 14 observa-se o comportamento das deformações num copo quando embutido profundamente sem flanges.

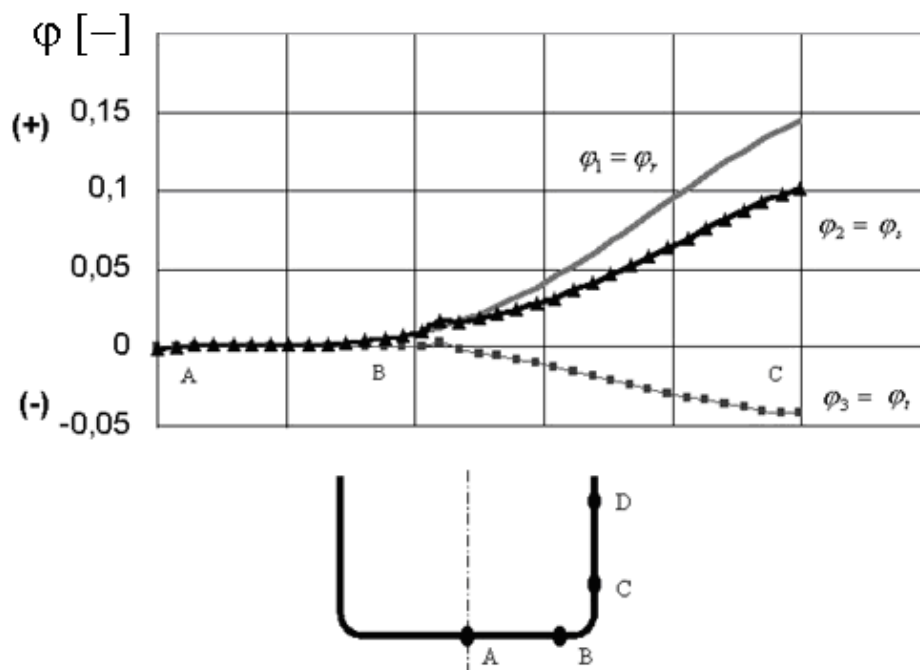


Figura 14 – Exemplo esquemático do comportamento das deformações. Fonte: Schaeffer 2004.

A presença do prensa chapas no processo de embutimento profundo tem uma função especial, que é evitar a formação de rugas na região do flange segurando a chapa na horizontal. Caso não houvesse a presença do prensa chapas ocorreriam rugas no componente estampado, conforme citado por Schaeffer (2006) e visto na figura 15, onde “d” é o diâmetro do punção.

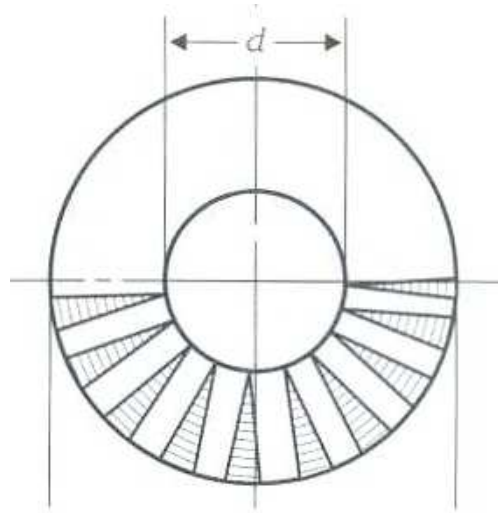


Figura 15 – Transformações ocorrentes na estampagem profunda. Fonte: Schaeffer (2006).

3.2. Coeficiente de Atrito no Embutimento Profundo

Existem vários métodos do cálculo do coeficiente de atrito, como o modelo de Coulomb. Fogg (apud Frantini, 2006), na década de 70 também trabalhou em condições de atrito que ocorriam nas conformações de chapas metálicas quando lubrificações pressurizadas eram utilizadas. Na mesma época, Kudo (apud Frantini, 2006) propôs um teste e desenho em chapas que o coeficiente de atrito era determinado pela medição direta das forças tangenciais e normais na superfície da matriz. Já Azushima (apud Frantini, 2006) desenvolveu um aparelho que conseguia determinar a influência da velocidade de estampagem no cálculo do coeficiente de atrito. Mas um grande avanço na determinação do coeficiente de atrito foi o modelo realizado por Wilson et. all (apud Frantini, 2006), os quais desenvolveram uma simulação de conformação de chapas metálicas reproduzindo as condições reais de estampagem e a fluência do metal nas matrizes.

Kim (2008) estudou a influência de diferentes lubrificantes no processo de estampagem, utilizando o método de embutimento profundo para o aço Dupla Face Galvanizado DP 590 GA, devido a este método ser o mais próximo dos processos utilizados nas linhas de produção. No embutimento profundo, o atrito mais grave está localizado na região do flange e as condições de lubrificação influenciam diretamente na redução que a flange irá obter no processo, como pode ser visto na figura 16 que demonstra o esquema da ferramenta utilizada por Kim em seus experimentos. Na figura 17 observa-se a ferramenta de embutimento profundo utilizada por Kim (2008).

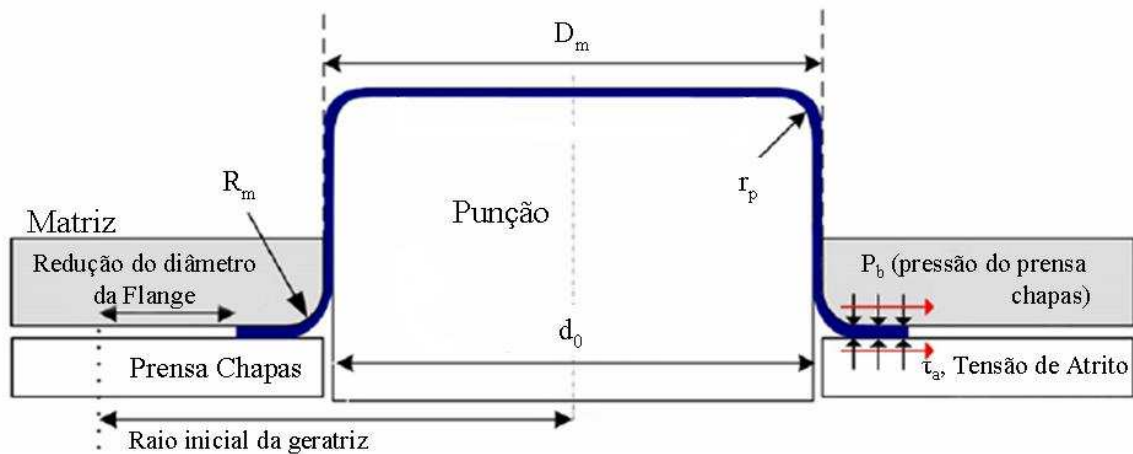


Figura 16 – Esquema do teste de embutimento profundo e as dimensões da ferramenta. Fonte: Kim 2008.

onde D é o diâmetro interno da matriz, r_m é o raio da matriz, r_p é o raio do punção e d_0 é o diâmetro do punção. Em seus experimentos foram utilizados 6 tipos de lubrificantes, velocidade do punção e rugosidades constantes e duas pressões diferentes da força de prensa chapas para realização do processo, sendo que os parâmetros de avaliação destes lubrificantes foram: a força máxima mensurada (menor força), máxima força do prensa chapas (maior força sem causar danos a chapa), a redução do diâmetro da flange (maior redução) e perímetro da área da flange (menor perímetro), no qual a indicação desses parâmetros mostram as melhores condições de lubrificação. Os lubrificantes que apresentaram melhores condições de trabalho foram os lubrificantes à base de polímeros com aditivos EP (*extra pressure*), não ocasionando fraturas aos corpos ensaios e com menores forças máximas, requeridas no processo, para ambas as forças de prensa chapas utilizadas.

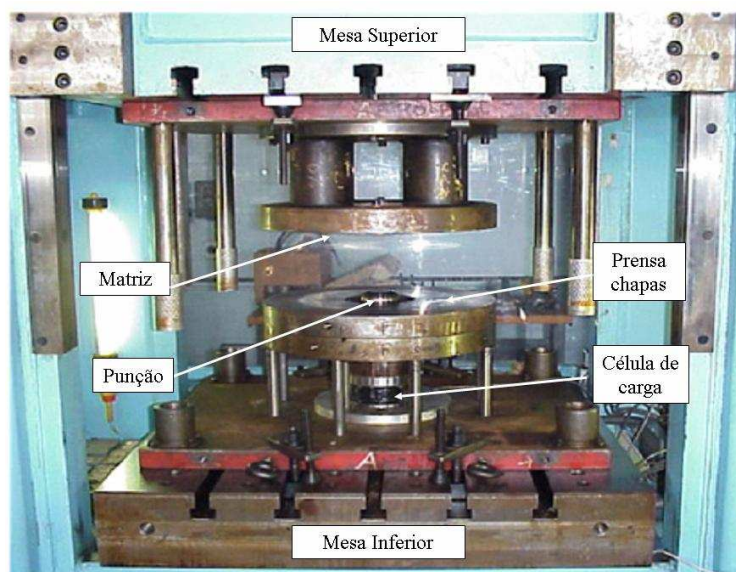


Figura 17 – Ferramental utilizado por Kim para avaliação de lubrificantes no embutimento profundo de um copo. Fonte: Kim 2008.

3.3. Metodologia de Cálculo do Coeficiente de Atrito

Um modelo apresentado recentemente, foi o cálculo do coeficiente de atrito através da mensuração da força máxima no embutimento profundo de uma caneca, apresentado por Folle (2008), ou seja, calcula-se o coeficiente de atrito diretamente da mensuração da força máxima no processo de embutimento profundo. Este realizou o embutimento na geometria de caneca e mensurou a força máxima do processo realizado. As equações de Panknin (1959) de cálculo da força máxima são utilizadas de maneira inversa, sendo que a variável a ser calculada pela formulação é o coeficiente de atrito. Folle (2008) realizou os ensaios com o material alumínio, no qual obteve resultados satisfatórios para a geometria testada, sendo que conforme a força de atrito aumentava, devido às condições superficiais da ferramenta, a força máxima do processo aumentava.

A formulação utilizada por Panknin (1959) para cálculo da força máxima de embutimento está baseada no cálculo de três forças distintas durante o processo de embutimento: Força Ideal (F_{id}), Forças de Atrito (F_A) e a Força do Retorno Elástico (F_{RE}), conforme equação 12.

$$F_{\max} = F_{id} + F_A + F_{RE} \quad (12)$$

A força total do punção para a deformação completa do copo corresponde á somatória de todos os esforços envolvidos na deformação da peça, inclusive a força de atrito. O esforço para deformação ideal aumenta continuamente devido ao efeito do encruamento na conformação plástica. A força global de atrito é basicamente composta pelo atrito entre o *blank* e o prensa chapa e entre a chapa e a matriz na região do raio, que parte de um pico de esforço (atrito estático para o atrito dinâmico) e diminui continuamente devido à diminuição da área de material sob o prensa chapas. Caso não exista folga entre punção/*blank*/matriz, o atrito deve se estabilizar em um valor mínimo diferente de zero. A uniformização da espessura da parede ocorre ao final de processo, após toda a área do *blank* estar contido no interior da matriz (Batalha 2006). A Força de Atrito é subdividida, por Panknin, em duas forças: Força de Atrito no Prensa Chapas (F_{APC}) e a Força de Atrito no Raio (F_{AR}), devido a serem as regiões interferência do atrito dinâmico na chapa, conforme observado na figura 18 de Carlsson (2005).

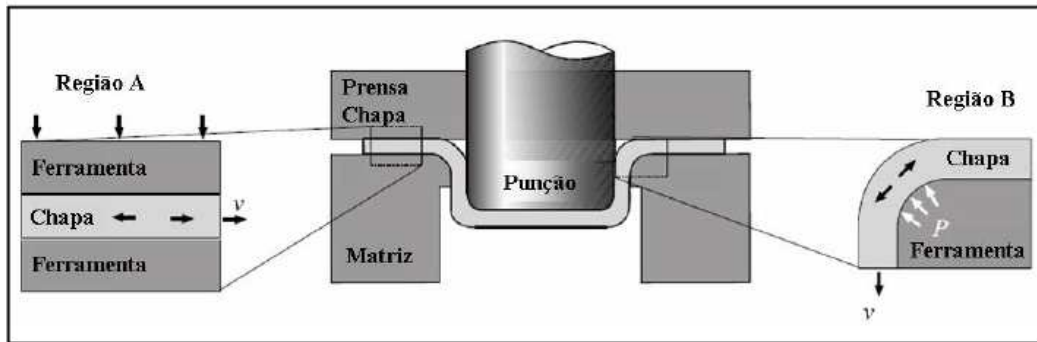


Figura 18 – Regiões de maior influência das forças de atritos no processo de embutimento. Fonte: Carlsson 2005.

As regiões onde o atrito tem maior efeito são as regiões A e B da figura 11, por se tratar dessas regiões as únicas com movimento relativo entre material e ferramenta. Nas outras regiões há apenas o atrito estático por não haver considerável movimento relativo entre material e ferramenta. O atrito estático geralmente não contribui com valores significativos, para a força total de estampagem. Na região A, as tensões são geralmente baixas, entre 1 e 10 MPa; porém, na região B as tensões são bastante superiores, atingindo valores da ordem de 100 MPa (Haar 1996). Na região de formação do copo, no interior da matriz, empregam-se comumente folgas da ordem de 10 a 20% da espessura do *blank*, além da utilização de lubrificação especificada por norma. A figura 19 ilustra um esboço dos esforços envolvidos na estampagem e a força global do punção. A figura 20 representa um croqui do processo realizado por Folle 2008 para cálculo da força máxima do processo.

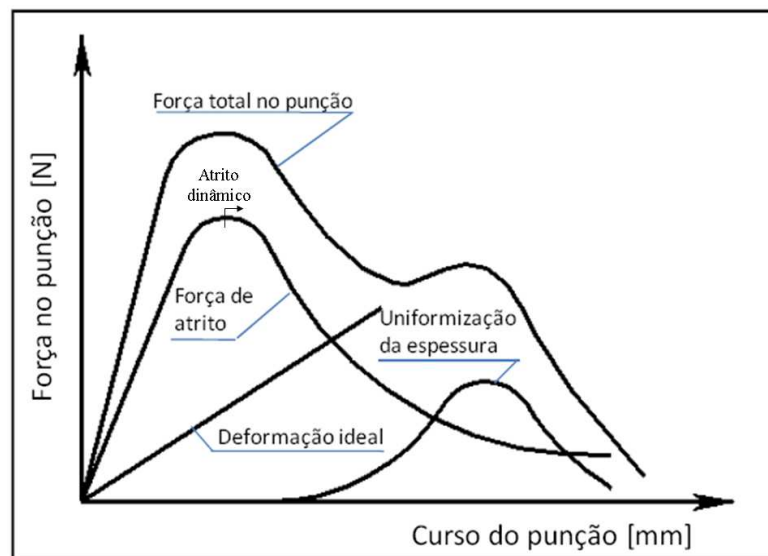


Figura 19 – Tipos de esforços envolvidos no embutimento profundo. Fonte: Mielinik 1991.

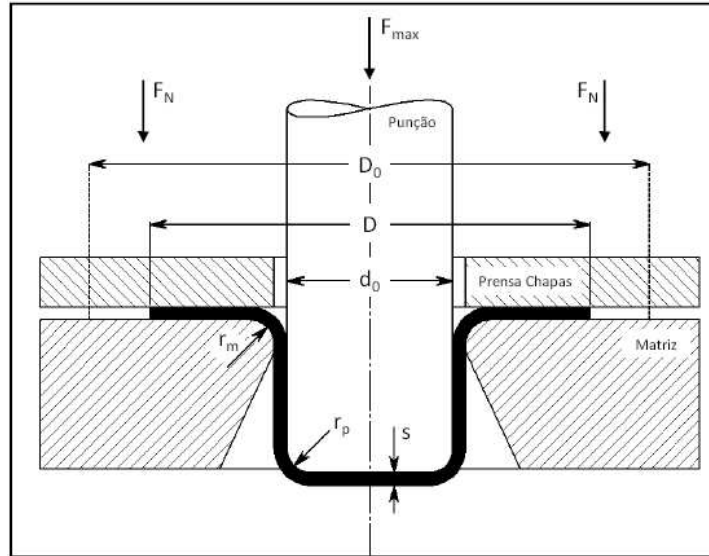


Figura 20 – Croqui do processo de estampagem de um copo. Fonte: Folle 2008.

As expressões para cada força atuante no processo são:

a) Força Ideal (F_{id})

$$F_{id} = A_0 \cdot kf_m \cdot \ln \frac{D}{d_0} \quad (13)$$

sendo

$$A_0 = \pi \cdot d_0 \cdot s \quad (14)$$

onde A_0 é a área da seção da caneca, “s” a espessura da chapa e D é o diâmetro do flange no momento da força máxima calculado por Siebel (1956) que é apresentado na equação 15.

$$D = \left(0,77 \cdot \frac{D_0}{d_0} + 0,23 \right) \cdot d_0 \quad (15)$$

onde D_0 é o diâmetro inicial do *blank*. Na equação 16 é calculada a tensão de escoamento média kf_m :

$$kf_m = \frac{kf_1 + kf_2}{2} \quad (16)$$

onde kf_1 é a tensão de escoamento da chapa na saída do raio e kf_2 a tensão de escoamento no diâmetro externo da região do flange. Como o cálculo dessas tensões de escoamento depende da região e de qual foi a deformação nela, é necessário saber como se calculam essas deformações. Assim, tem-se como deformação φ_1 após a passagem da chapa pelo raio da matriz:

$$\varphi_1 = \ln \left(\frac{\sqrt{D_0^2 + d_0^2} - D^2}{d_0} \right) = \ln \sqrt{\beta_0^2 + 1 - \beta^2} \quad (17)$$

Essa deformação pode ser calculada em função das relações de estampagem β_0 (relação de estampagem inicial) e β (relação de estampagem instantânea), onde tem-se que:

$$\beta_0 = \frac{D_0}{d_0} \quad (18)$$

e

$$\beta = \frac{D}{d_0} \quad (19)$$

A deformação na região do diâmetro externo do flange φ_2 é calculada por:

$$\varphi_2 = \ln \frac{D_0}{d_0} \quad (20)$$

Desta forma, pode-se calcular as tensões de escoamento kf_1 e kf_2 através da equação 6, onde C e n devem ser conhecidos para o material da chapa. Assim, kf_m pode ser determinado.

b) Força de Atrito

a. Força de Atrito no Prensa Chapas (F_{APC})

$$F_{APC} = 2 \cdot \mu \cdot F_N \cdot \frac{d_0}{D} \quad (21)$$

onde F_N é a força normal do prensa chapas e μ é o coeficiente de atrito entre a chapa e o prensa-chapas.

b. Força de Atrito na passagem do Raio da matriz (F_{AR})

$$F_{AR} = \left(e^{\mu \cdot \frac{\pi}{2}} - 1 \right) \cdot (F_{id} + F_{APC}) \quad (22)$$

Para a equação 22, μ representa o coeficiente de atrito entre a chapa e a matriz inferior na passagem do raio. A rigor, o coeficiente de atrito da equação 21 deveria ser tomado como diferente da equação 22; porém, neste estudo, considera-se que ambos são iguais durante todo o processo.

c) Força do Retorno Elástico

$$F_{RE} = \pi \cdot d_0 \cdot s \cdot kf_1 \cdot \frac{s}{4r_m} \quad (23)$$

Onde r_m representa o raio da matriz.

Por fim, para se obter a força máxima de embutimento pela equação de Panknin (1959), é necessário somar todos os efeitos das forças descritas acima, resultando na equação 12.

Esse método de cálculo será usado no presente trabalho porque ele usa o coeficiente de atrito como parâmetro de entrada para a determinação da força máxima. Além disso, pela relação de Panknin (1959), pode-se estimar também qual a contribuição das forças de atrito na força de embutimento.

4. ANALISE COMPUTACIONAL

Uma importante ferramenta que foi implementada no processo de estampagem foi a simulação computacional. Essa ferramenta auxilia tanto no dimensionamento de matrizes e no de desenvolvimento de peças finais quanto na validação dos processos experimentais.

Muitas pesquisas na área de conformação de chapas utilizam os métodos de elementos finitos (MEF) para avaliar o processo de embutimento profundo (Fereshteh-Saniee 2003, Shim1997, Menezes 2000, Pegada 2002, Hyunbo 2002, Altan 2000 e Choudhury 2006). Vários fatores são analisados quando se utiliza a simulação computacional no desenvolvimento do processo, como fluxo de material, distribuição das deformações, otimização da ferramenta e do *blank* e estimativa da força máxima necessária para realização do processo. Fereshteh-Saniee 2003 estudou o processo de embutimento profundo de um copo cilíndrico com foco no fluxo de material para a fabricação de peças sem defeitos e estimando as forças necessárias para a determinação da capacidade do equipamento. Em seus estudos a simulação numérica foi utilizada para comparação dos resultados analíticos e experimentais.

Choudhury (2006) estudou o efeito do coeficiente de atrito na região do prensa chapas, utilizando o software PAM-STAMP para diversos tipos de materiais. O autor estipulou forças mínimas necessárias no prensa chapas para que houvesse o enrugamento dos copos, sendo que o coeficiente de atrito foi mantido constante e igual a 0,15. Na figura 21, pode-se observar as diferentes faixas de segurança e de enrugamento, simuladas. Com a variação do coeficiente de atrito na região do flange alteram-se as forças atuantes, ou seja, uma menor força atuará se tiver um menor coeficiente de atrito.

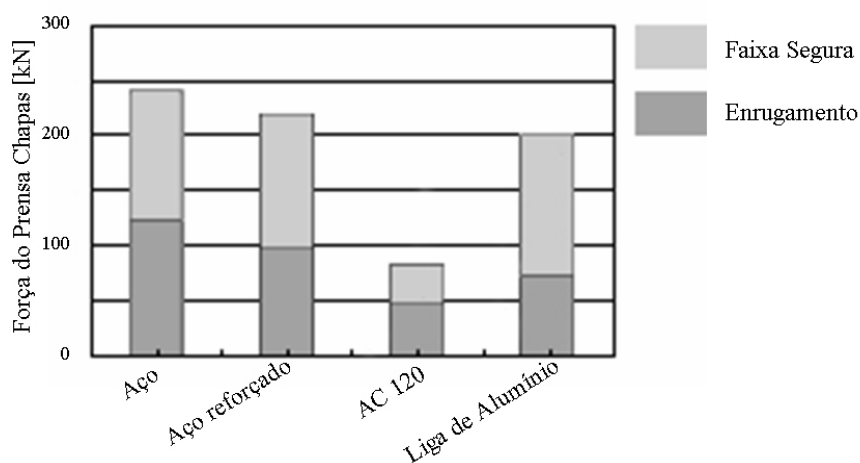


Figura 21 – Faixa de segurança do prensa chapas para diferentes materiais. Fonte: Choudhury 2006.

Para as análises com a simulação empregadas, no presente estudo, foi usado o software de simulação em estampagem eta/DYNAFORM Versão 5.6 com o solver LS-Dyna versão 971 (Eta/DYNAFORM, 2007). O eta/DYNAFORM é um software de simulação em estampagem que usa o LS-DYNA como “solver”. Este tem a capacidade de dar informações, no caso de uma estampagem, a cerca da estampabilidade das chapas, atuação do prensa chapas e do punção, retorno elástico, orelhamento, espessura da chapa durante o processo, tendências a rupturas prematuras, tendências a enrugamento e estampagem em múltiplos estágios.

Algumas propriedades particulares do DYNAFORM são descritas abaixo, isso ajuda a entender como foi executada a simulação:

Tipo de contato usado (“Contact interface”): “Form one way Surface to Surface”. Esse tipo de contato é usado para modelar corpos rígidos que usam elementos tipo casca ao qual é necessário que a espessura desse corpo rígido seja levada em consideração. O contato “(forming ou form) surface to surface” usa um recurso chamado projeção de nós (elementos) que consiste em fazer coincidir os nós da malha de uma superfície na outra, para que as forças possam ser transmitidas mesmo se não houver um perfeito acoplamento entre os nós das superfícies em contato. Esse recurso é muito preciso e bastante usado para o caso de conformação de metais onde um contato contínuo é necessário durante a simulação. A única desvantagem desse método é o alto custo de máquina para a simulação, ou seja, são necessários mais cálculos e a simulação é mais demorada.

Tipo de deslocamento empregado (“Process Type”): “Single Action”. O movimento das ferramentas é relacionado com o tipo de deslocamento das mesmas (*Draw Type*). Se for definida uma ação simples (“Single Action”), o movimento é executado pela matriz e o punção permanece estático, se for definida uma ação dupla (“Double Action”), o movimento é executado pelo punção e a matriz permanece estática, porém pode-se atribuir uma pressão de atuação entre ela e o prensa-chapas, por isso a definição de duplo efeito. No caso do simples efeito tanto o deslocamento como as forças de sujeição do prensa-chapas são atribuídas à matriz.

Propriedade aplicada à geratriz (“Material Property”): BELYTSCHKO-TSAY A propriedade BELYTSCHKO-TSAY é usada para definir o tipo de formulação matemática que será aplicada nos elementos tipo casca da geratriz. Essa propriedade é amplamente usada em simulações de estampagem. Para um elemento casca com cinco pontos de integração através

da espessura, o elemento BELYTSCHKO-TSAY requer 725 operações matemáticas comparado a 4050 operações geradas pelo elemento Hughes-Liu que era usado antes de ser criado o elemento BELYTSCHKO-TSAY. Esse tipo de elemento foi criado em 1981 por BELYTSCHKO e TSAY e é baseado numa combinação das formulações co-rotacionais e de velocidade de deformação. A eficiência desse elemento é obtida de uma formulação matemática simplificada que resulta dessas duas suposições cinéticas. A parte co-rotacional da formulação evita as complexidades dos mecanismos não lineares através do acoplamento de um sistema de coordenadas no próprio elemento. A parte da velocidade de deformação da formulação facilita a avaliação dos balanços energéticos entre os elementos (LS-Dyna, 2006).

A parte mais importante da simulação numérica é tornar esse processo de simulação o mais próximo de um ensaio real. Esse objetivo será alcançado se o programa obtiver o máximo de informações do ensaio, ou seja, o software deve receber as reais características do processo que está sendo simulado.

Dentro das principais características a serem fornecidas para a simulação estão as propriedades da chapa a ser estampada e as variáveis do processo. Com relação às propriedades das chapas pode-se citar: resistência mecânica, índice de encruamento, índice de anisotropia, curva limite de conformação, entre outras. Na realização do processo, outros parâmetros são necessários, como: velocidade do punção, diâmetro do *blank*, geometria da matriz e punção, força de prensa chapas e coeficiente de atrito.

Nesse trabalho, a simulação computacional foi utilizada para validação dos resultados encontrados analiticamente através dos modelos matemáticos. Na montagem do processo de simulação da fabricação da peça de trabalho, os componentes da ferramenta (punção, matriz e prensa chapas) foram definidos como modelo tipo casca, sendo esses elementos indeformáveis. A figura 22 mostra a construção do ferramental e material montado no simulador para a execução da estampagem com as malhas geradas e os detalhes de refinamento da malha nas regiões críticas. Os dados para alimentação do software, quanto às caracterizações do material, foram os mesmos levantados experimentalmente neste trabalho.

A curva tensão vs. deformação verdadeira é montada pelo DYNAFORM através de C e n dada pela equação 2, que foi criada por Hollomon para descrevê-la (equação 2). É uma boa aproximação desde que obedeça a algumas condições, como, por exemplo realizar o ensaio a temperatura ambiente. A parte inicial da curva tensão vs. deformação (parte elástica) é criada

pelo DYNAFORM, informando-se a deformação e tensão de escoamento e a parte final da curva (ruptura) também é informada por uma deformação final.

A Curva Limite de Conformação (CLC) também é criada pelo DYNAFORM através do “n”, dada pela equação 2, e pela espessura inicial da geratriz. Essa forma de criação da CLC foi concebida por Keeler através de uma relação empírica. A CLC criada por esse método é bastante próxima da maioria das CLC’s medidas através de ensaios, a principal diferença pode estar no ponto onde a CLC intercepta o eixo das ordenadas. Entretanto, esse ponto pode ser facilmente mudado já na entrada dos dados do DYNAFORM, o que deixa a curva bem próxima do caso real.

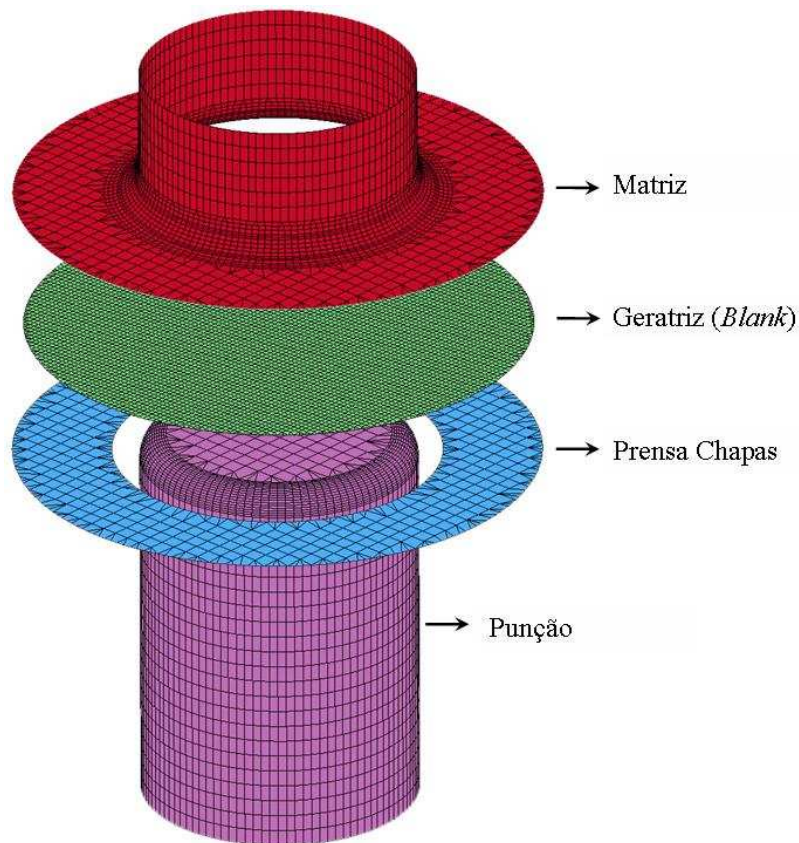


Figura 22 – Conjunto montado no DYNAFORM para a simulação do processo de embutimento.

O emprego de modernos tipos de chapas e a aplicação eficiente de programas computacionais na construção de ferramentas e no seu ajuste são condições necessárias para o aperfeiçoamento das tecnologias automotivas e de aplicações (Brenne 2008). Neste trabalho, a simulação numérica foi utilizada para validação do coeficiente de atrito encontrado através da força máxima no processo de estampagem profunda, sendo inserido todos os dados levantados durante o desenvolvimento do trabalho.

5. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL PARA CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA

Os procedimentos desenvolvidos para a caracterização das propriedades mecânicas e tecnológicas dos materiais estudados foram os ensaios de tração, ensaio de compressão, ensaio de anisotropia e o ensaio de Nakajima. Os ensaios de tração, compressão e anisotropia demonstram as propriedades mecânicas e o ensaio de Nakajima, as propriedades tecnológicas relacionadas às diferentes deformações sofridas pelos componentes estampados.

5.1. Propriedades Mecânicas

5.1.1. Ensaio de Tração

Para os ensaios de tração e anisotropia os corpos de prova foram dimensionados conforme a norma ASTM E 517-00. Entretanto, foi realizada uma simplificação de modo a facilitar a retirada dos corpos de prova, em que a geometria utilizada pode ser vista na figura 23.

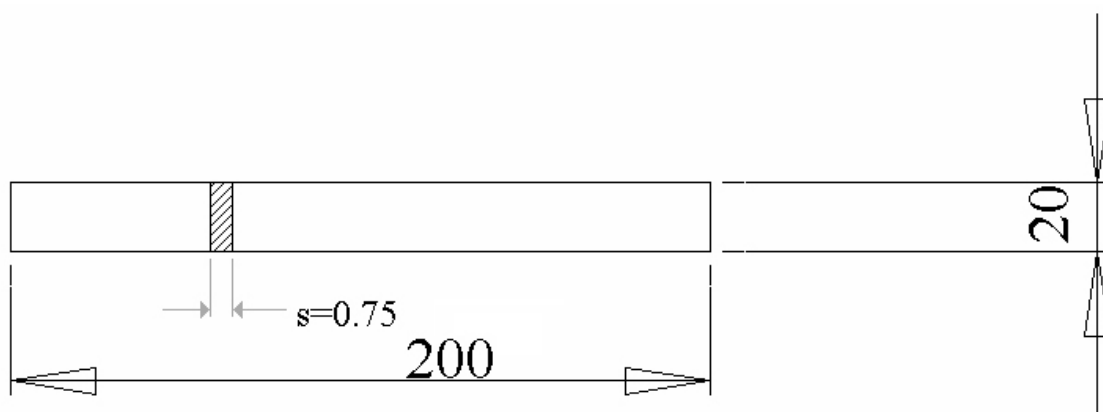


Figura 23 – Geometria dos corpos de prova utilizados para realização dos ensaios de tração. Dimensões em mm.

Para a realização dos ensaios utilizou-se uma máquina de tração uniaxial com capacidade de 10 toneladas, marca Kratos. O ensaio de tração consiste em fixar um corpo de prova na máquina uniaxial, a qual tem um conjunto de garras que permita prendê-lo e aplicar um carregamento, tracionando-o de modo uniaxial, com velocidade controlada e constante até a ruptura. Na figura 24, pode observar os componentes da máquina de tração utilizados e na figura 25 observar-se o posicionamento do corpo de prova (cp's) na máquina.

No ensaio, são registrados os dados da força F [N] (pela célula de carga) e aumento do comprimento l_0 [mm] (pelo sensor deslocamento). A força e o deslocamento, medidos durante

o ensaio de tração, no qual através das equações 1 a 6, chega-se a relação tensão de escoamento (k_f) versus deformação verdadeira (ϕ).

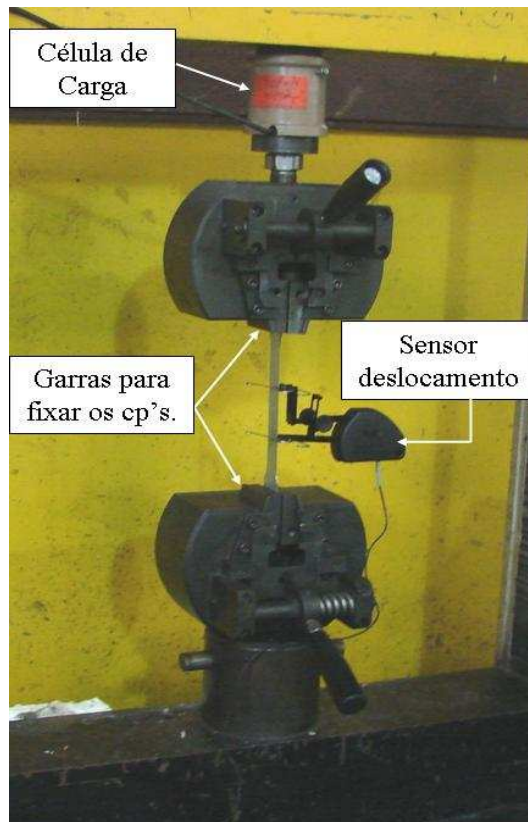


Figura 24 – Componentes utilizados na máquina de tração.

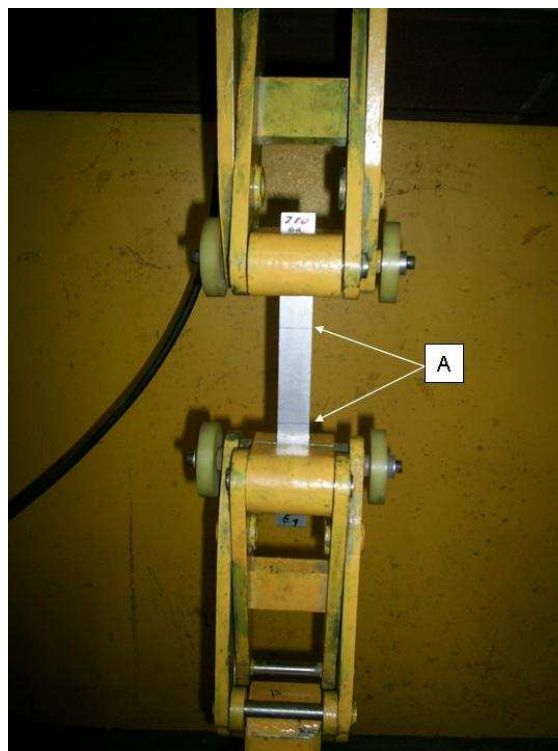


Figura 25 – Posicionamento do cdp nas garras da máquina de tração. (“A” – marca utilizadas para mensuração da variação do deslocamento necessário para o cálculo da anisotropia).

Resultados do Ensaio de Tração

Foram realizados ensaios de tração uniaxial para determinar as propriedades intrínsecas dos materiais aço BH 180 e BH 220. Segundo norma ASTM E 517-00, fez-se 15 ensaios, sendo cinco na direção de laminação, cinco a 45°, e o restante perpendicular à direção de laminação. Para levantamento de uma única curva de escoamento para cada material realizou-se uma média das três curvas encontradas (três direções de laminação), em que os resultados da média encontrada, podem ser vistos na figura 26 e 27 respectivamente. A curva de escoamento dos materiais foram criadas através da elaboração de uma curva exponencial, no qual é apresentada em cada figura (26 e 27).

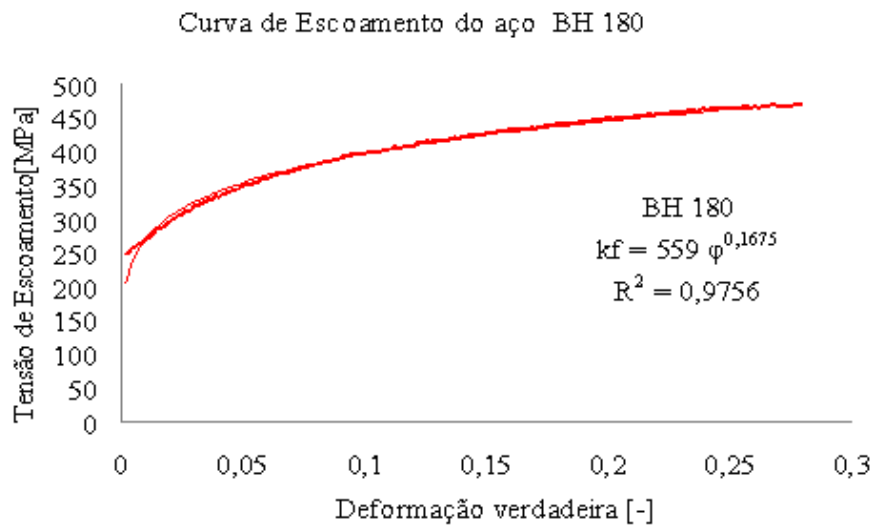


Figura 26 – Curva tensão verdadeira x deformação verdadeira do aço BH 180. Espessura 0,75mm.

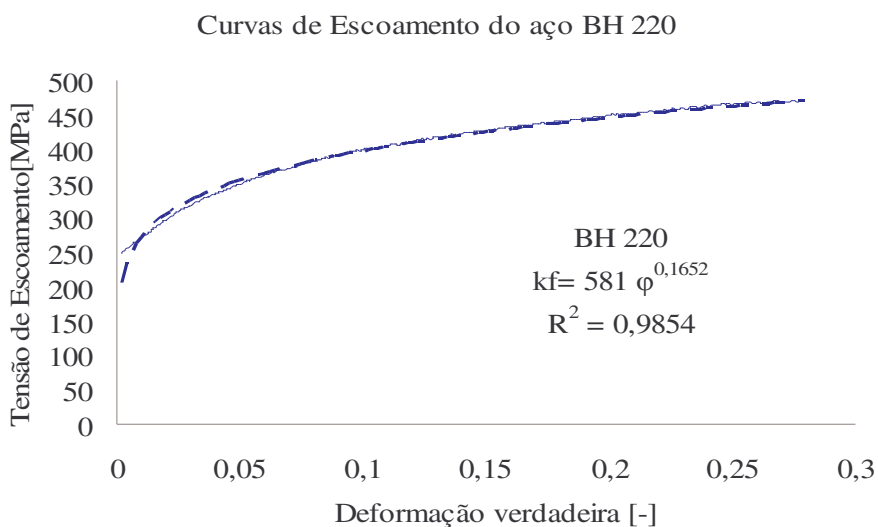


Figura 27 – Curva tensão verdadeira x deformação verdadeira do aço BH 220. Espessura 0,75mm.

Na tabela 7 pode-se observar os resultados obtidos dos dois materiais estudados.

Tabela 7 – Características dos aços BH 180 e BH 220.

Propriedades	BH 180	BH 220
Modulo de Young (N/mm ²)	170000	170000
Coefficiente de Poisson	0,28	0,28
Índice de encruamento	0,17	0,16
Coefficiente de resistência (C)	559	581
Tensão de escoamento “kf ₀ ” (N/mm ²)	250	250
Tensão máxima (N/mm ²)	448	468
Alongamento (%)	26	32
Deformação de escoamento [%]	0,2	0,2

5.1.2. Anisotropia

No ensaio de anisotropia, utiliza-se a mesma metodologia do ensaio de tração, entretanto o deslocamento foi pré-estabelecido baseado na alta deformação alcançada pelo material. Neste ensaio, o corpo de prova com as mesmas dimensões do corpo de prova do ensaio de tração foram tracionados durante um determinado deslocamento, e após esse deslocamento a carga foi suspensa.

Para atenuar o valor da imprecisão no ensaio utilizou o deslocamento de 15mm (25%) para todos os corpos de prova, ou seja, a imprecisão do equipamento seria a mesma para todos os corpos de prova.

O valor proposto para cálculo da anisotropia foi superior ao recomendando pela norma ASTM XXX que sugere que as deformações aplicadas sejam entre 15 e 20%, entretanto nos ensaios foram utilizados 25% de deformação devido ao material ter apresentado altas deformações e considerando que a anisotropia do material seja constante para nas deformações utilizadas para materiais que apresentam altas deformações.

Com esse deslocamento o material sofreu deformações plásticas que foram analisadas nas três principais direções de deformação (comprimento, largura e espessura). Como visto no capítulo 2.2.1.2, foi utilizada a “Lei da Constância do Volume” para calcular o índice de anisotropia.

As medidas realizadas nos corpos de prova, antes e após os ensaios, são inseridas numa planilha, a fim de fornecer os dados do índice de anisotropia.

A formulação utilizada na planilha pode ser vista na equação 24.

$$r = \frac{\varphi_2}{-(\varphi_1 + \varphi_2)} = \frac{\ln\left(\frac{l_i}{l_0}\right)}{-\left(\ln\left(\frac{l_i}{l_0}\right) + \ln\left(\frac{b_i}{b_0}\right)\right)} \quad (24)$$

Onde: r é o índice da anisotropia para a direção ensaiada, l_0 o comprimento inicial, l_i o comprimento instantânea/final, b_0 a largura inicial e b_i a largura instantânea/final.

Resultados para a Anisotropia

Na figura 28, pode-se observar a curva de anisotropia dos aços BH 180 e BH 220 através da aplicação de 25% de deformação para os cp's a 0°, a 45° e a 90° da direção de laminação.

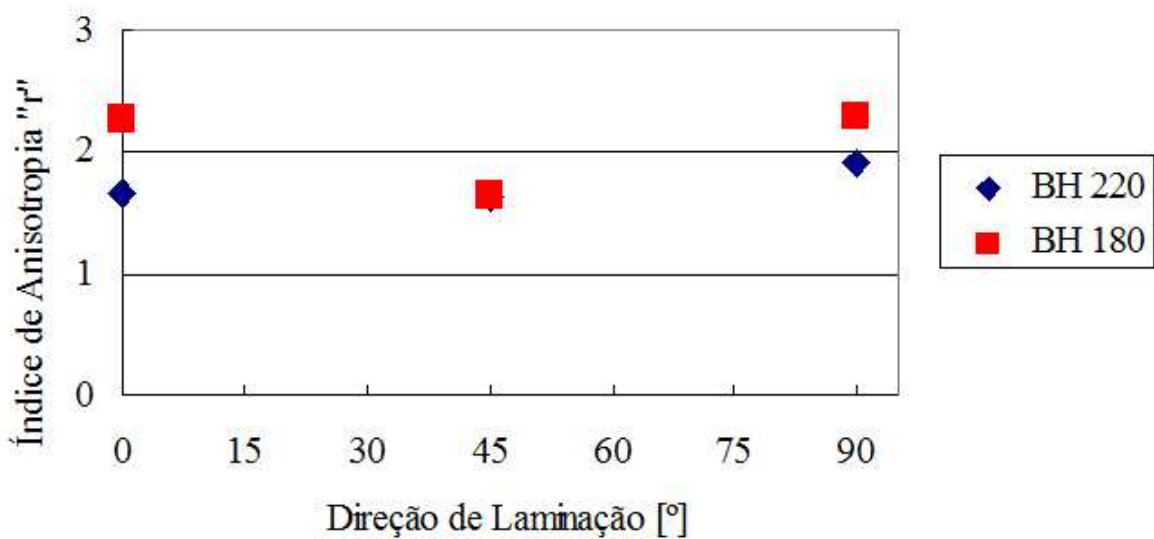


Figura 28 – Índice de anisotropia pela direção de laminação dos aços BH 180 e BH 220.

5.1.3. Curva Limite de Conformação

Para o levantamento das propriedades tecnológicas dos dois materiais estudados (aço BH 180 e BH 220) foi utilizada a metodologia de Nakajima modificado, que consiste na construção da Curva Limite de Conformação utilizando uma única ferramenta (matriz, punção

e prensa chapas) com a variação das dimensões dos corpos de provas. Tal método utiliza 8 (oito) corpos de provas, com dimensões variadas, conforme indicado na figura 29 e dimensionado na tabela 8. Estes corpos de prova são colocados em ferramenta composta de um prensa chapas com cordão esticador, que restringe o escoamento do material na região do prensa chapas e um punção cilíndrico de 50mm de diâmetro (raio de 4,5mm) que realiza uma força perpendicular ao posicionamento dos corpos de prova.

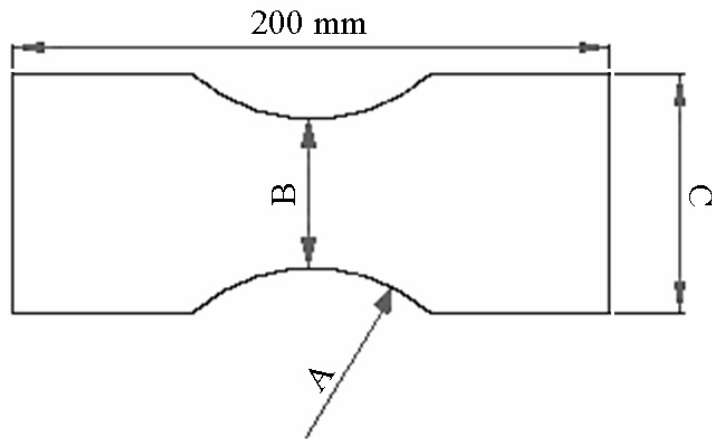


Figura 29 – Modelo da geometria dos corpos de prova, utilizado no ensaio de Nakajima.

Tabela 8 – Dimensionamento dos corpos de prova utilizado no ensaio de Nakajima.

cp	A [mm]	B [mm]	C [mm]
1	100	10	40
2	90	20	50
3	80	30	60
4	70	40	70
5	60	50	80
6	50	60	100
7	40	80	120
8	25	100	150

A variação das dimensões dos corpos de prova é realizada para ocasionar diferentes estados de tensão causando diferentes deformações nos cp's, visto que quanto maior a quantidade de material na largura, maiores serão as deformações de estiramento na peça: maior quantidade de material escoará para as laterais da peça, sabendo-se que, na direção principal do comprimento (φ_1), o material sempre estará sendo tracionado.

Os corpos de prova foram gravados com uma malha circular de diâmetro de 2,5mm, seguindo as orientações da norma ISO 12004:1997, que indica que a malha deve ser circular

ou quadrada com diâmetros ou arestas de 1 a 5mm. A gravação dos corpos de prova é realizada através de uma corrosão eletroquímica, não causando danos aos mesmos.

Para a gravação por corrosão eletroquímica utiliza-se uma fonte geradora de energia de 12 volts, uma ponteira de carbono, um pedaço de feltro, uma tela de nylon com a imagem a ser gravada e um líquido eletrólito. A ponteira de carbono é enrolada pelo feltro encharcado com o eletrólito, para que a corrente passe para a chapa. Entre o pano e a chapa é colocada a grade com a gravura, e na chapa é prendido um fio para que a corrente feche o circuito. Assim, esse eletrólito com uma corrente elétrica corrói a chapa. Na figura 30, tem-se um esquema do processo de gravação dos corpos de prova. Na figura 31, observam-se os corpos de prova com as gravações realizadas.

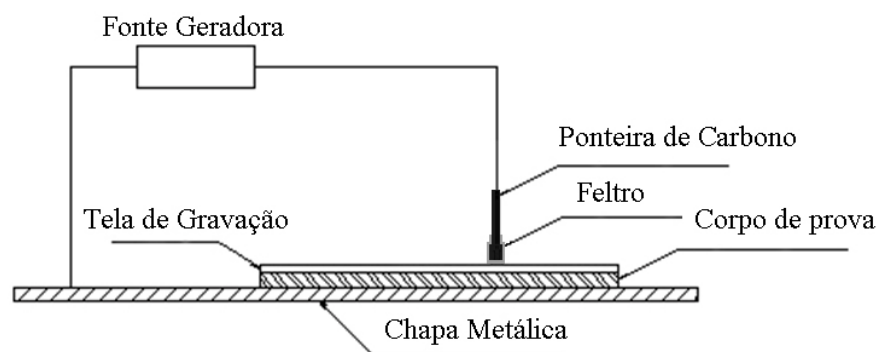


Figura 30 – Esquema do processo de gravação dos corpos de prova.

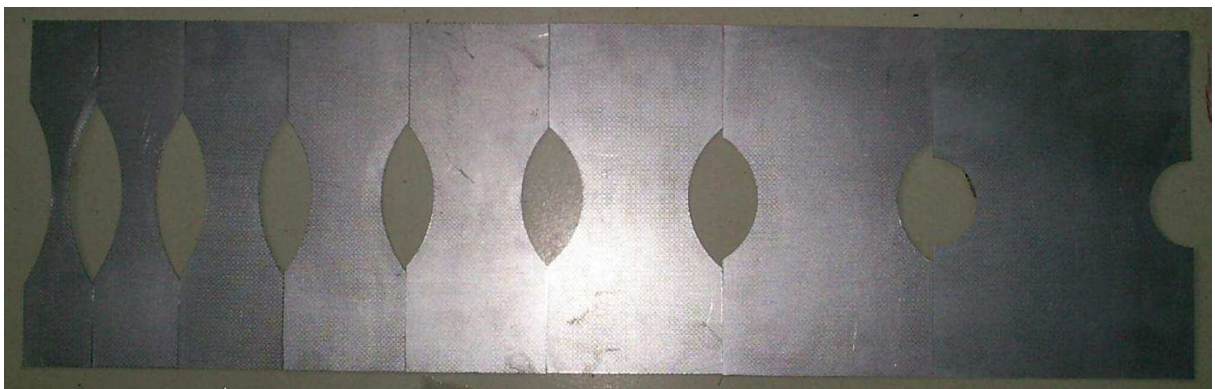


Figura 31 – Corpos de prova a serem ensaiados com a marcação circular.

O lubrificante utilizado para realizar o ensaio Nakajima foi um filme de poliuretano PU45 com 6mm de espessura e um diâmetro aproximado de 50mm, para minimizar o efeito do atrito e distribuir mais as deformações durante o ensaio, facilitando a obtenção da curva CLC. Cada disco foi posicionado entre o punção e o corpo de prova a ser ensaiado. Os ensaios

foram realizados numa prensa com duplo efeito marca Dan-Press, com velocidade pré-definida de 7,5mm/s para todos os ensaios. Após, o ensaio a medida dos círculos é realizada com uma régua calibrada para obter-se as deformações em cada círculo da malha, caracterizando assim as deformações principais ϕ_1 e ϕ_2 . Na figura 32, pode-se observar o projeto do ferramental, utilizado para a realização dos ensaios da CLC, fabricado com aço SAE 4340 temperado e revenido. Na figura 33, observa-se o posicionamento do lubrificante (escorado no punção), do corpo de prova e a geometria dos freios do prensa chapas.

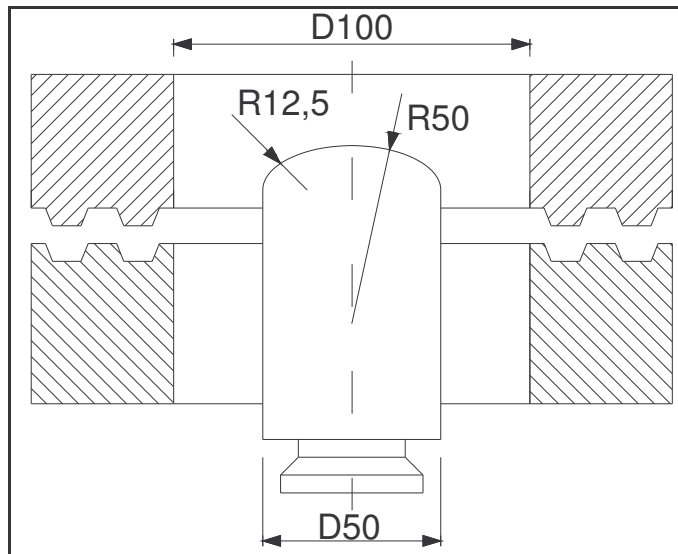


Figura 32 – Design do ferramental utilizado nos ensaios de Nakajima.

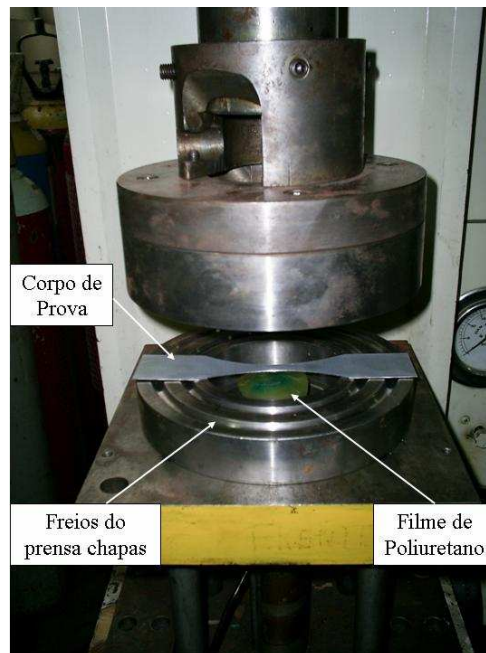


Figura 33 – Posicionamento dos componentes utilizados no ensaio.

Os corpos de provas são ensaiados até a ruptura. A ruptura é realizada, para que se consiga achar as máximas deformações que o material alcança, medindo-se assim as elipses

inteiras mais próximas as rompidas. Na figura 34, observa-se o corpo de prova dentro da ferramenta, no momento da ruptura (final do ensaio). Na figura 35, pode-se observar corpos de prova de diferentes geometrias rompidos e com diferentes tipos de ruptura, que foram analisados, e na figura 36, observam-se exemplos de elipses a serem mensuradas para o levantamento da curva limite de conformação.

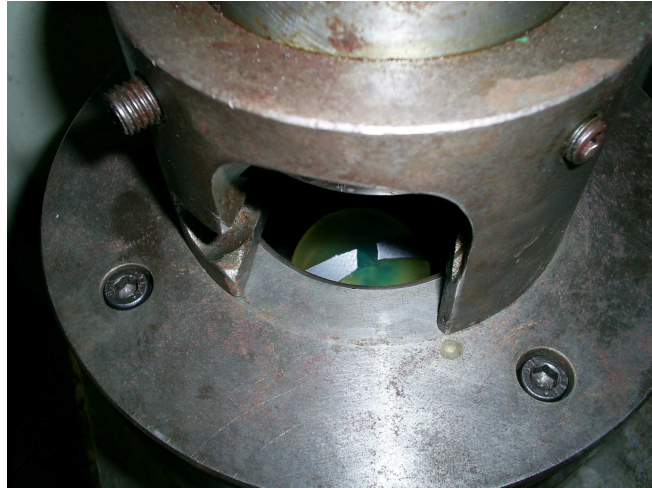


Figura 34 – Corpo de prova ao final do ensaio.

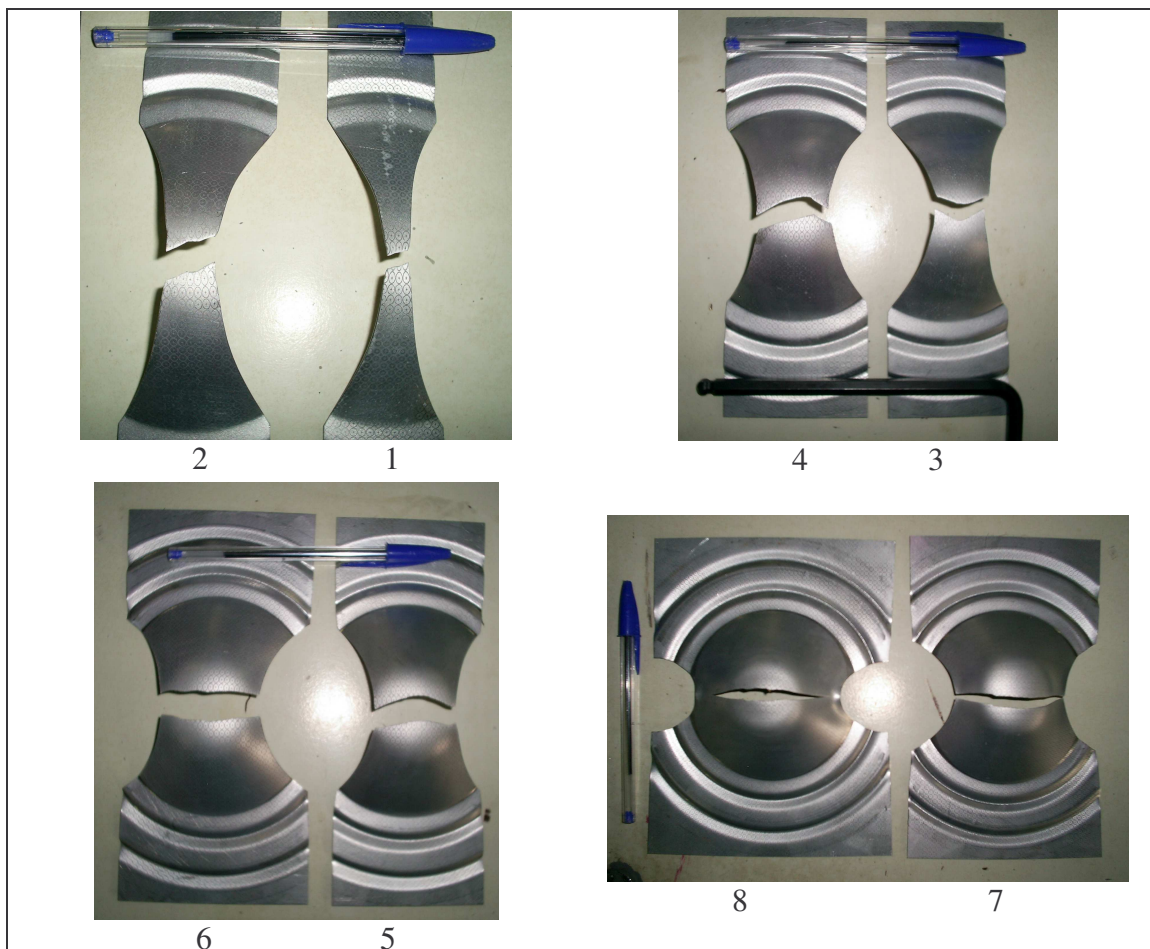


Figura 35 – Corpos de provas ensaios. Numeração dos cp's conforme tabela 8.

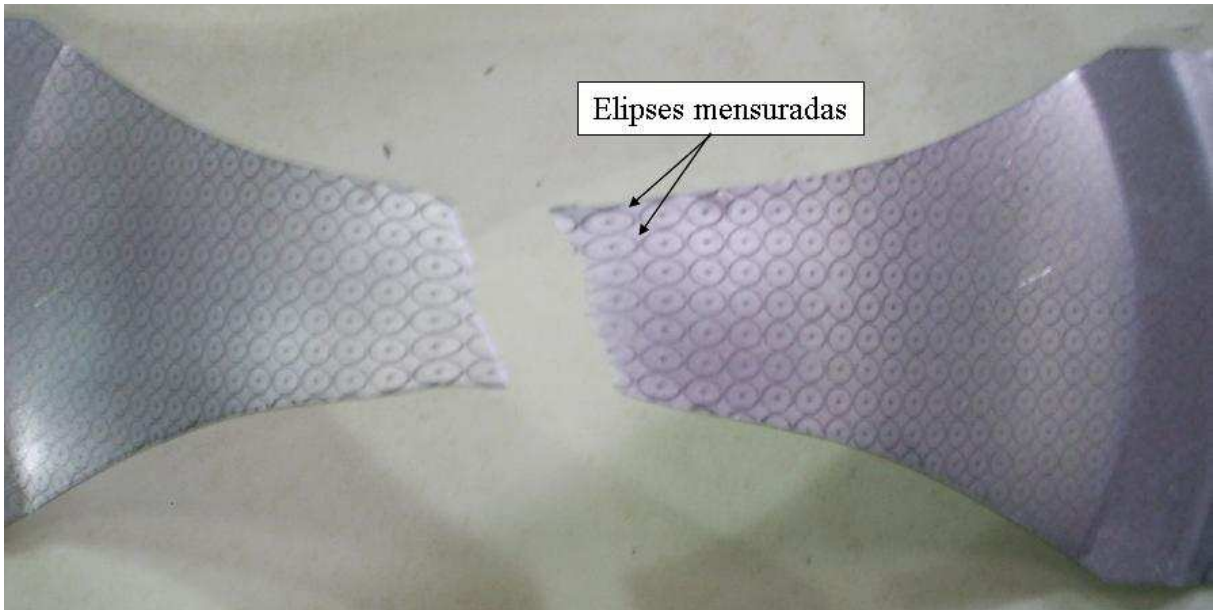


Figura 36 – Exemplo de elipses a serem mensuradas para levantamento da CLC.

Resultados das CLC

As curvas limites de conformação dos materiais estudados foram mensuradas através do ensaio de Nakajima, com visto no capítulo 2.2.2. Estas curvas podem ser vistas na figuras 37, para os aços BH 180 e BH 220.

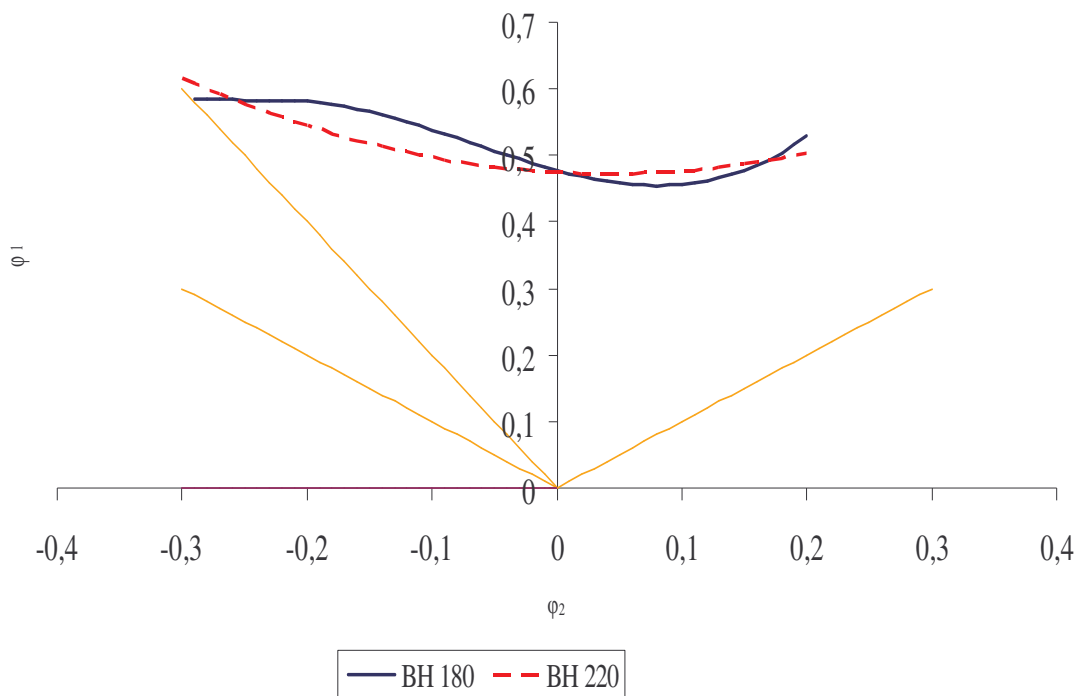


Figura 37 – Curva limite de conformação dos aços BH 180 e BH 220.

6. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL PARA CÁLCULO DO COEFICIENTE DE ATRITO

Para realização do cálculo do coeficiente de atrito foi realizado o embutimento dos materiais numa geometria cilíndrica em forma de um copo. Alguns parâmetros foram mantidos constantes, a fim de minimizar seus efeitos no processo, como: velocidade do punção (8mm/s), força do prensa chapas (35kN) e relação de estampagem ($\beta=2,2$).

Através desse ensaio mensurou-se a força máxima, no processo, com uma célula de carga e o deslocamento por um LVDT e utilizando-se a formulação de Panknin conseguiu-se calcular o coeficiente de atrito no processo de embutimento profundo. Na figura 38, pode-se observar o esboço do processo de embutimento profundo realizado.

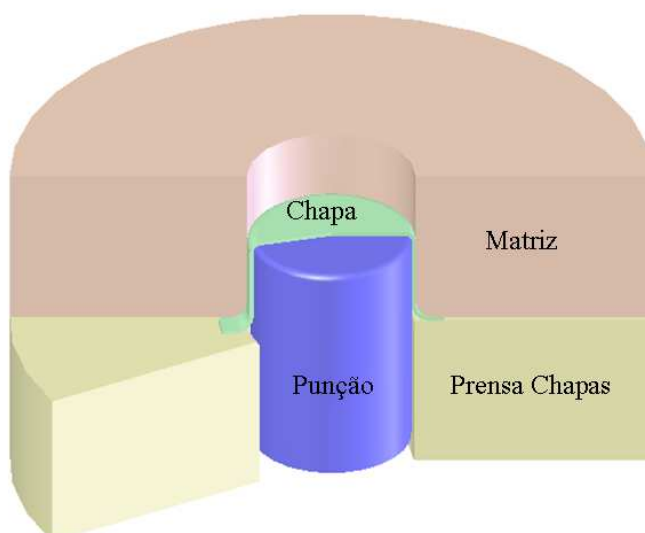


Figura 38 – Esboço do processo de embutimento profundo. Fonte: Folle 2008.

No processo de estampagem profunda de um copo a chapa metálica está sujeita a diferentes tipos de deformações, como visto no capítulo 3.1. As deformações podem ser mensuradas, mostrando assim o caminho de deformações que ocorrem na estampagem.

As deformações que ocorreram na conformação dos copos deste trabalho foram mensuradas através da gravação das geratrizes com uma malha circular de 2,5mm de diâmetro, a mesma utilizada no ensaio de Nakajima para levantamento da CLC. Após a conformação da geratriz, realiza-se a mensuração das elipses formadas na superfície externa do copo.

Com base nas condições de lubrificação, conceituadas anteriormente no capítulo 3, foram utilizados dois tipos de condições: o sem lubrificação, mais severo; e a lubrificação com filme de teflon que tende a ter os menores coeficientes de atrito no processo de estampagem. As superfícies dos componentes do ferramental utilizado foram polidas para minimizar ao máximo o efeito da rugosidade da ferramenta no processo.

Na figura 39, podem-se observar os copos conformados sem lubrificação com a gravação da malha circular e na figura 40 com lubrificação de filme de teflon.

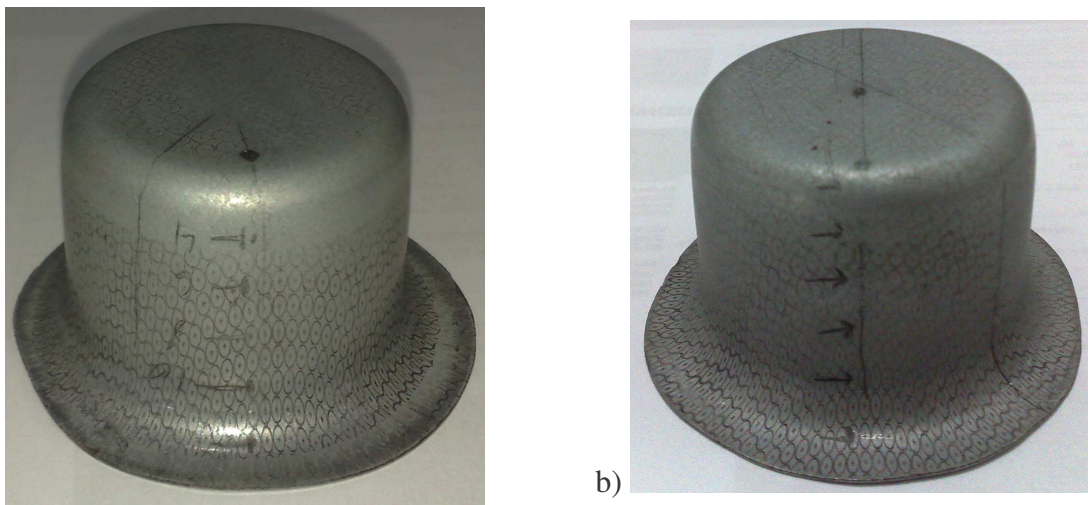


Figura 39 – Chapas conformadas sem lubrificação, com a gravação de uma malha circular para análise das deformações. a) aço BH 180 e b) aço BH 220.

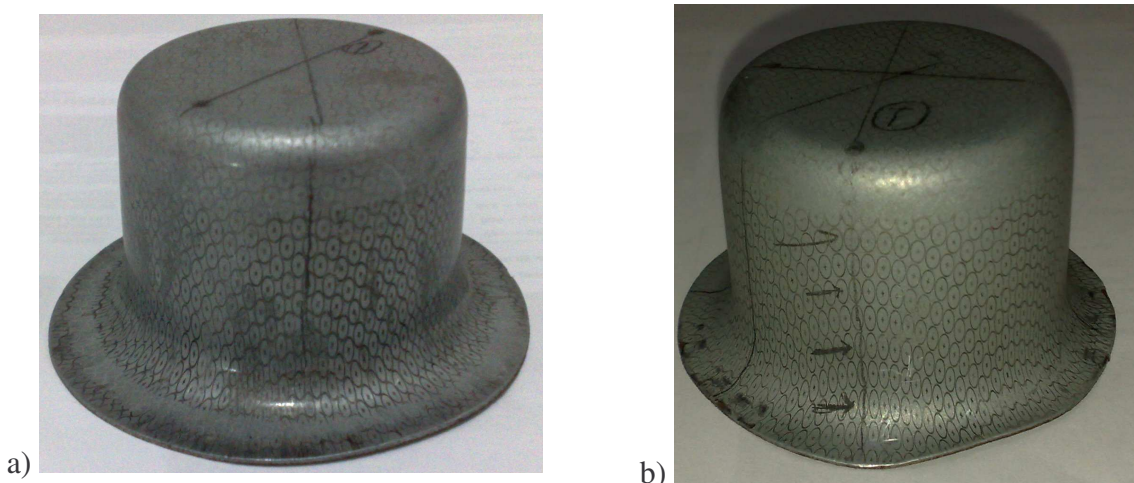


Figura 40 – Chapas conformadas com lubrificação do filme de teflon, com a gravação de uma malha circular para análise das deformações. a) aço BH 180 e b) aço BH 220.

Com a variação das dimensões das elipses formadas traçou-se uma linha perpendicular à deformação circunferencial, partindo-se do centro, e mensuraram-se as novas dimensões das elipses, mostrando assim o comportamento das deformações que ocorreram na peça.

6.1. Comportamento das Deformações no Copo

No ensaio de embutimento profundo foi realizada a mensuração das deformações para análise do comportamento nos copos durante o processo, o qual pode ser visto na figura 41 e 42, para o aço BH 180 sem lubrificação e de com filme de teflon respectivamente. Nas figuras 43 e 44, pode-se observar a comparação das deformações com a curva limite de conformação para os dois tipos de lubrificação ensaiados.

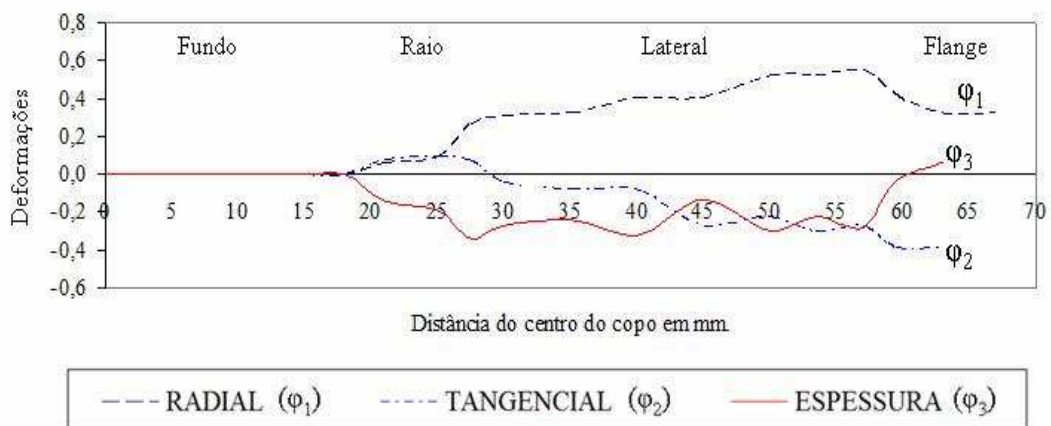


Figura 41 – Comportamento das deformações ocorridas no copo de aço BH 180, estampado sem lubrificação.

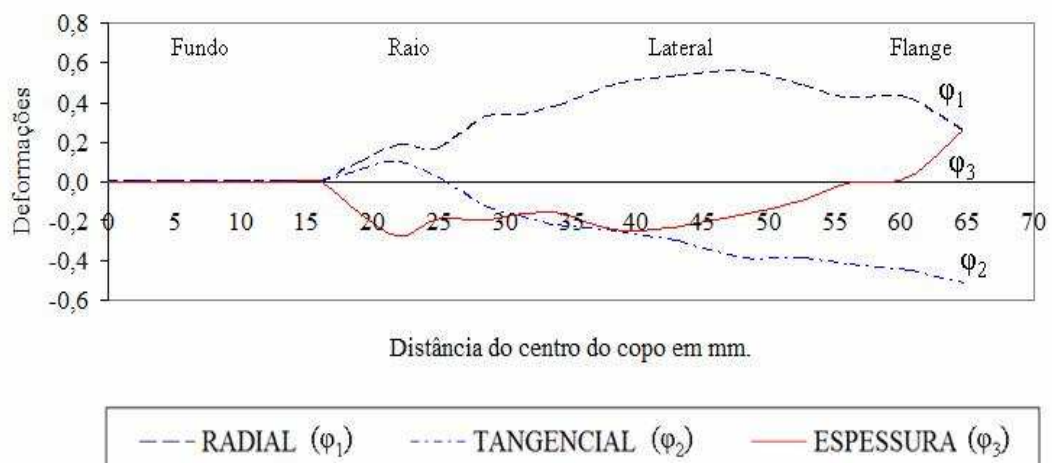


Figura 42 – Comportamento das deformações ocorridas no copo de aço BH 180, estampada com lubrificação de filme de teflon.

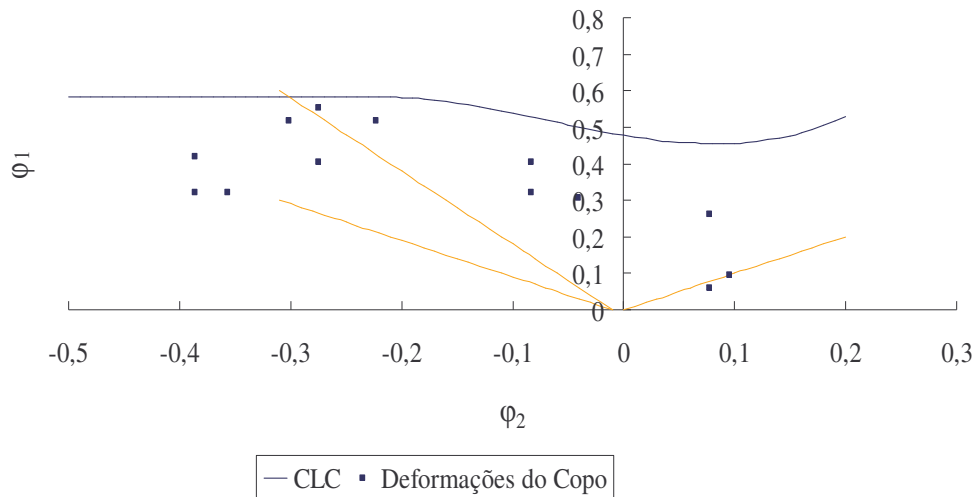


Figura 43 – Comparação da CLC com as deformações do copo do aço BH 180, estampado sem lubrificação.

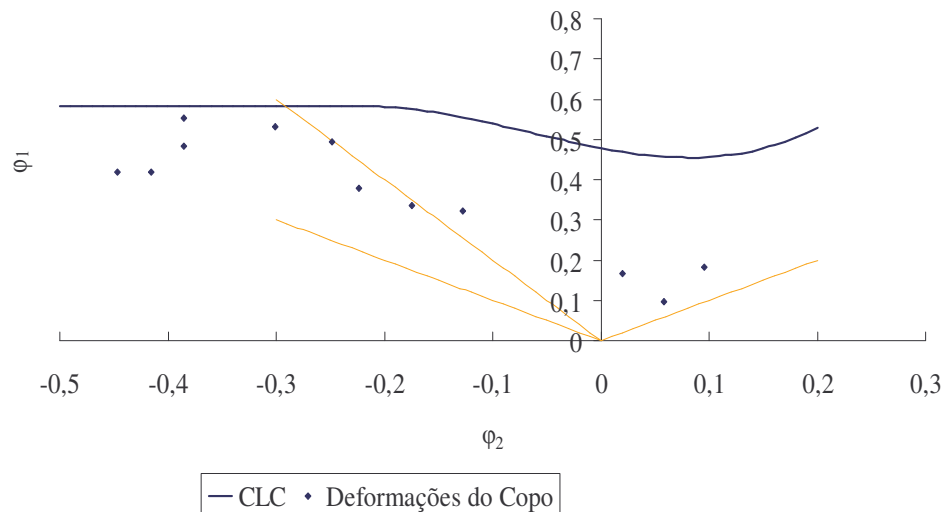


Figura 44 – Comparação da CLC com as deformações do copo do aço BH 180, estampado com lubrificação de filme de teflon.

Para o aço BH 220 os mesmos procedimentos foram realizados para análise das deformações ocorridas nos copos conformados. Na figura 45 e 46, pode-se observar o comportamento das deformações no processo de embutimento profundo com a utilização de diferentes tipos de lubrificação: sem lubrificação e com filme de teflon, onde estão representados os extremos das forças de atrito, menores e maiores respectivamente. Na figuras 47 e 48, pode-se observar a comparação da curva limite de conformação com as deformações sofridas na conformação do copo sem lubrificação e com filme de teflon.

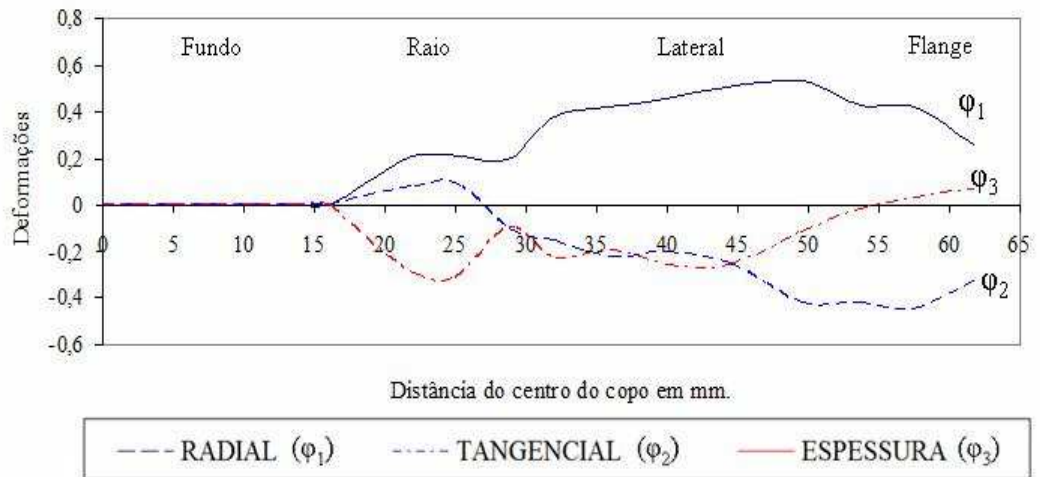


Figura 45 – Comportamento das deformações ocorridas no copo de aço BH 220, estampada com lubrificação “a seco”.

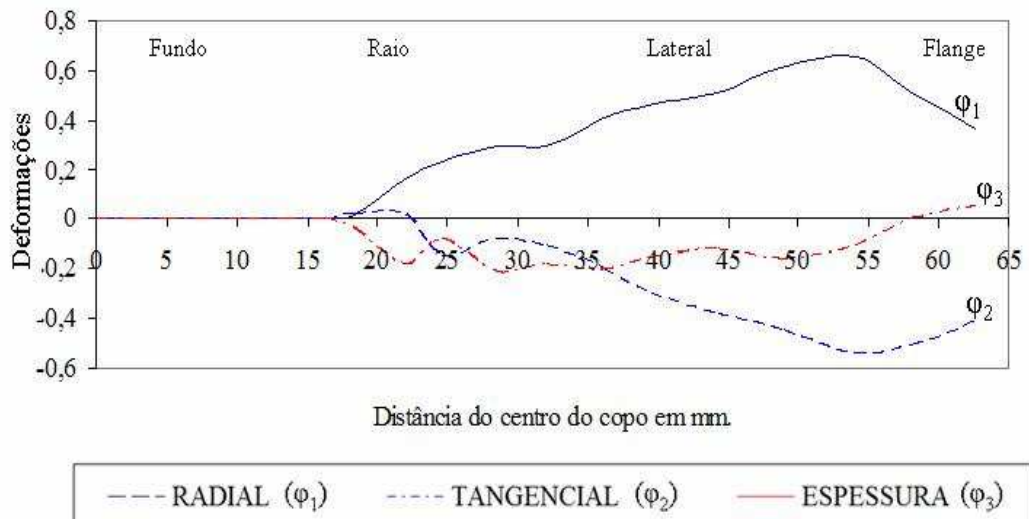


Figura 46 – Comportamento das deformações ocorridas no copo de aço BH 220, estampado com lubrificação de filme de teflon.

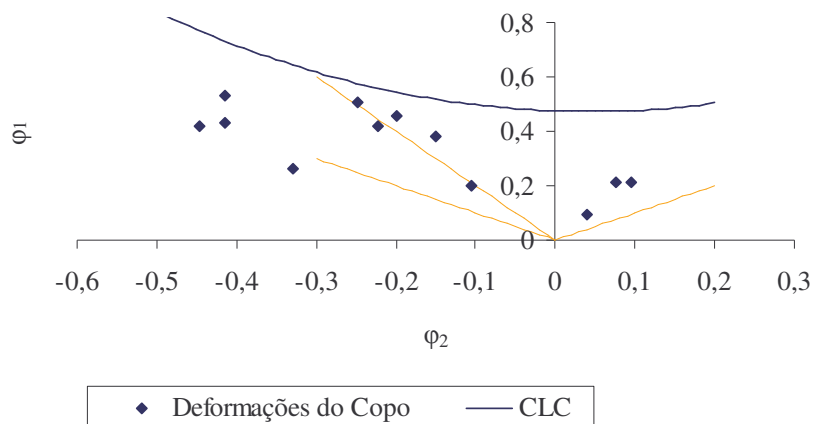


Figura 47 – Comparação da CLC com as deformações do copo do aço BH 220, estampado com lubrificação “a seco”.

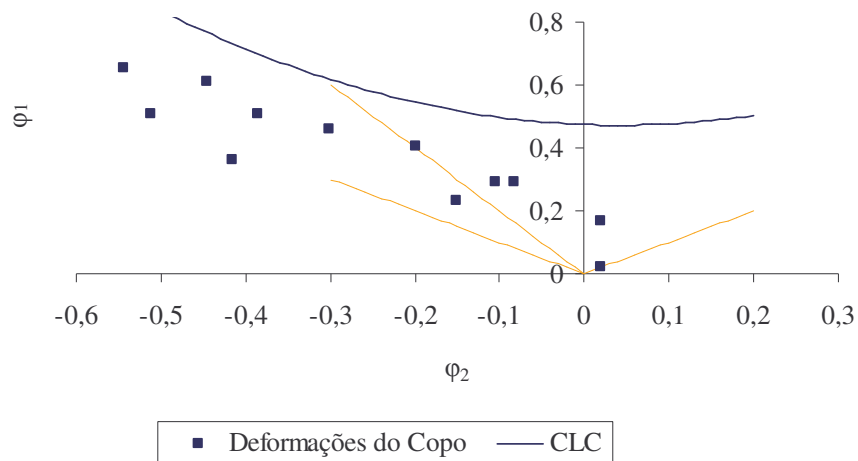


Figura 48 – Comparação da CLC com as deformações do copo do aço BH 220, estampado com lubrificação “de contorno”.

6.2. Coeficiente de Atrito no Embutimento do Copo

Para o cálculo do coeficiente de atrito, foi realizado o ensaio de embutimento profundo nas chapas metálicas (ver copos conformados nas figuras 39 e 40), mensurando-se a força máxima do processo, para cada material com as diferentes condições de lubrificação. Na tabela 9, podem-se observar as forças máximas de embutimento mensuradas experimentalmente para cada condição do processo.

Tabela 9 – Forças máximas experimentais mensuradas nos processos ensaiados.

Condição	Condição de lubrificação	Material	Força máxima experimental [kN]
1	“a seco” = sem lubrificação	BH 180	77
2	“de contorno” = filme de teflon	BH 180	66
3	“a seco” = sem lubrificação	BH 220	78
4	“de contorno” = filme de teflon	BH 220	66

Através da mensuração da força máxima do processo, o presente trabalho propôs estimar o coeficiente de atrito para o processo de embutimento profundo, utilizando a formulação de Panknin (equações 12 a 23). Na tabela 10, observam-se os dados de entrada

para o cálculo dos coeficientes de atrito, e , na tabela 11, os valores calculados para cada condição de lubrificação utilizada nos dois materiais.

Tabela 10 – Parâmetros de entrada na formulação de Panknin.

Parâmetros Geométricos			
Diâmetro do punção	d_0	50	mm
Espessura da chapa	s	0,75	mm
Diâmetro inicial do <i>blank</i>	D_0	110	mm
Raio da matriz	r_m	6,5	mm

Parâmetros Geométricos Calculados			
Diâmetro do flange	D	96,2	mm
Secção do copo	A_0	119,58	mm ²
Relação de estampagem	β_0	2,2	
Relação de estampagem (flange)	β	1,92	

Parâmetros do Material			
Coefficiente de resistência	C	Próprio de cada material	N/mm ²
Índice de encruamento	n		
Limite de Resistência do material	LR		N/mm ²

Cálculo das Tensões e Deformações			
Força máxima	F_{max}	Mensurada	kN
Deformação verdadeira antes	φ_1	0,38	
Deformação verdadeira depois	φ_2	0,79	
Tensão de escoamento antes	kf_1	Próprio de cada material	N/mm ²
Tensão de escoamento depois	kf_2		N/mm ²
Tensão de escoamento média	kf_m		N/mm ²

Tabela 11 – Estimativa do coeficiente de atrito.

Condição	Condição de lubrificação	Material	Coefficiente de atrito (μ)
1	“a seco” = sem lubrificação	BH 180	0,39
2	“de contorno” = filme de teflon	BH 180	0,19
3	“a seco” = sem lubrificação	BH 220	0,37
4	“de contorno” = filme de teflon	BH 220	0,17

6.3. Simulação Numérica do Processo de Embutimento

Na simulação, a peça estampada de aço BH 180, pode ser vista na figura 49, no qual foi simulada sem falhas e a figura 50, mostra-se o caminho de deformações do copo comparado com a curva limite de conformação. O mesmo procedimento foi utilizado para o embutimento do aço BH 220, entretanto com as propriedades mecânicas do próprio material.

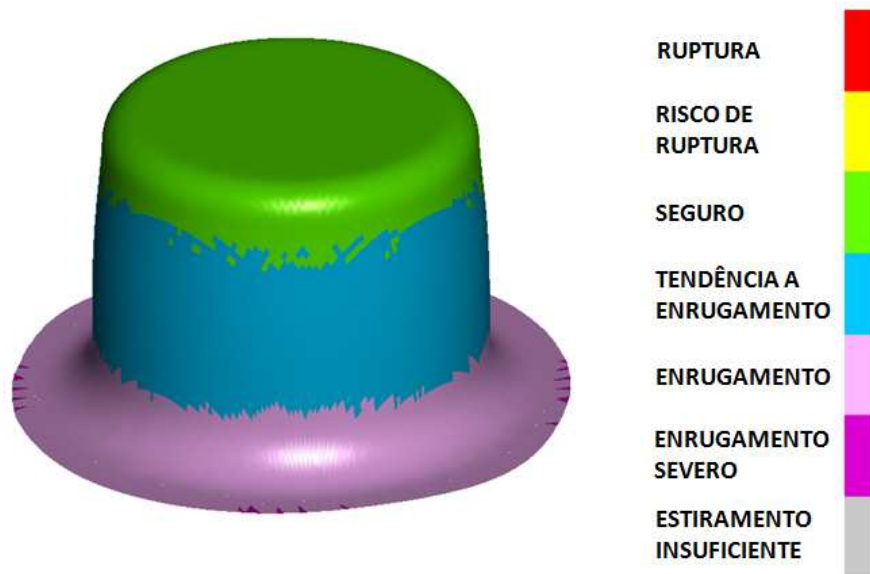


Figura 49 – Copo de aço BH 180 produzido no processo de simulação com lubrificação.

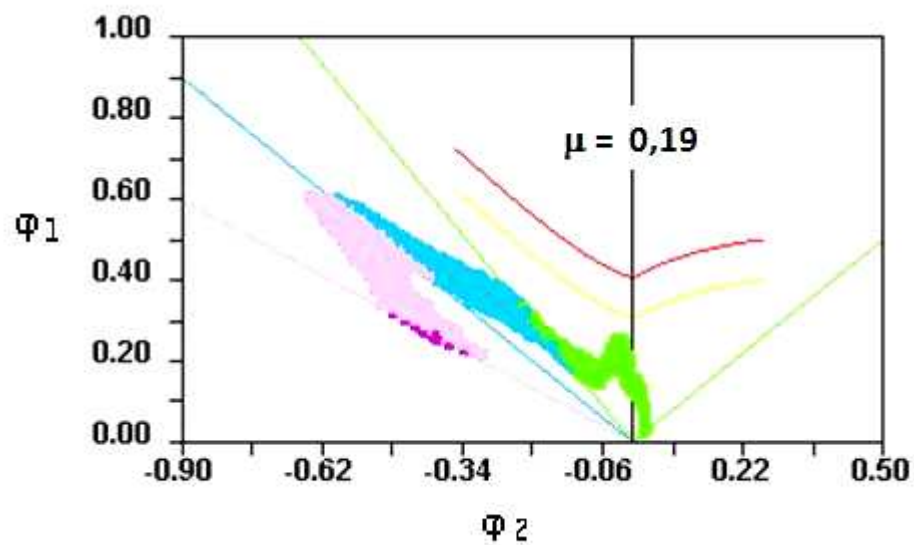


Figura 50 – Caminho de deformações no embutimento do copo de aço BH 180.

7. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

7.1. Propriedades Mecânicas

7.1.1. Ensaio de Tração

Conforme informado pela USIMINAS (2009), a classificação dos aços *bake hardening* é realizada pela composição química e pelas propriedades mecânicas dos aços. Na coluna do meio da tabela 7, observam-se as propriedades do aço BH 180, o qual alcançou valores compatíveis para o índice de encruamento, entretanto valores superiores para a tensão de escoamento e tensão máxima. Esse maior valor da tensão de escoamento e da tensão máxima é refletido na diminuição do alongamento do material. Na coluna da direita da tabela 7, observam-se as propriedades mecânicas do aço BH 220 que se encaixaram dentro da classificação, devido a tensão de escoamento e alongamento estarem dentro da faixa toleráveis, entretanto a tensão máxima teve valor 17% superior.

Em relação às propriedades mensuradas por Rabelo (2000), os resultados encontrados foram convergentes para o aço BH 220, o qual apresentou características similares. Entretanto, para o aço BH 180 o estudo, neste trabalho, encontrou uma resistência maior e um alongamento menor. Contudo, o índice de encruamento apresentou um valor inferior.

Na tabela 12, pode-se observar a comparação entre as propriedades mecânicas encontradas para o aço BH 180, no presente trabalho, por Rabelo (2000), e as informadas pela USIMINAS (2009). Na tabela 13, a mesma comparação é realizada para o aço BH 220.

Tabela 12 – Comparação entre as propriedades mecânicas do aço BH 180.

Trabalhos Propriedades	USIMINAS	Rabelo 2000	Experimentos próprios
LE [MPa]	180 ~ 240	205	250
LR [MPa]	300 ~ 370	335	448
AL (%)	≥ 34	40	26
n	≥ 0,150*	0,206	0,17

* Índice de encruamento à 90° da direção de laminação.

Tabela 13 – Comparação entre as propriedades mecânicas do aço BH 220.

Trabalhos Propriedades	USIMINAS	Rabelo 2000	Experimentos próprios
LE [MPa]	220 ~ 280	258	250
LR [MPa]	320 ~ 400	370	468
AL (%)	≥ 32	34	32
n	≥ 0,150*	0,200	0,16

* Índice de encruamento à 90° da direção de laminação.

7.1.2. Anisotropia

Os índices de anisotropia encontrados para os materiais estudados foram satisfatórios, comparados às determinações da USIMINAS (2009), visto que os dois tipos de aços alcançaram índices maiores que 0,15, como estipulado para r_p 's a 90° da direção de laminação. Já, comparados com os resultados encontrados por Rabelo (2000), os resultados são maiores (25% e 10% para os aços BH 180 e BH 220, respectivamente), o qual favorece o embutimento profundo dos aços deste trabalho.

Na tabela 14, pode-se observar o resultado alcançado para os índices de anisotropia dos dois materiais estudados em comparação com os valores referenciados por outros autores.

Tabela 14 – Comparação dos índices de anisotropia.

Trabalhos Propriedades	USIMINAS		Rabelo		Experimentos próprios	
	BH 180	BH 220	BH 180	BH 220	BH 180	BH 220
r_{0°	---	---	---	---	2,27	1,65
r_{45°	---	---	---	---	1,65	1,61
r_{90°	$\geq 0,150$	$\geq 0,150$	---	---	2,3	1,9
r_m	---	---	1,57	1,55	1,97	1,70
Δr	---	---	---	---	0,64	0,17

A anisotropia planar dos aços BH 180 e BH 220 foi diferente de zero, indicando o provável aparecimento do orelhamento quando tem-se o embutimento completo do *blank*. Entretanto, na comparação entre os dois materiais, o aço BH 220 tem menor tendência ao aparecimento de orelhas no processo de embutimento profundo que o aço BH 180 devido ao valor da anisotropia planar ser mais próximo de zero.

7.2. Curva Limite de Conformação

As curvas limites de deformação construídas, neste estudo, alcançaram resultados diferentes dos encontrados por Rabelo (2000) e por Wolfgang (1998), no qual utilizaram outros métodos de construção. Entretanto pode-se ressaltar que as curvas construídas apresentam uma tendência ao embutimento profundo, visto que as regiões do segundo quadrante das figuras as chapas metálicas conseguem maiores deformações devido à possibilidade de terem-se menores deformações na espessura do material. Na figura 51, pode-se observar a comparação entre as três curvas para o aço BH 180 e na figura 52 para o aço BH 220.

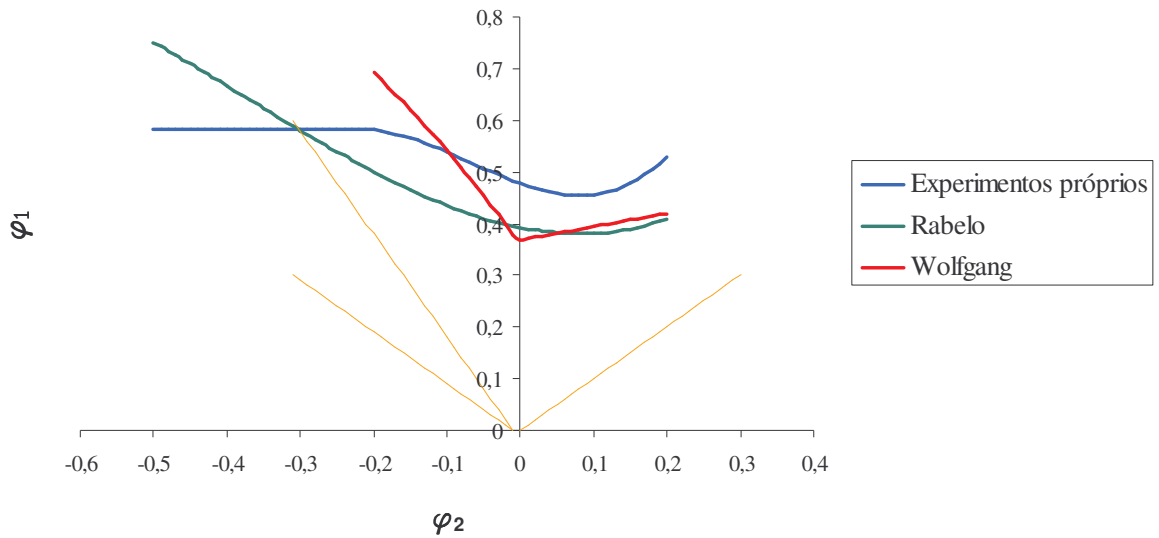


Figura 51 – Comparação entre as CLC para o aço BH 180.

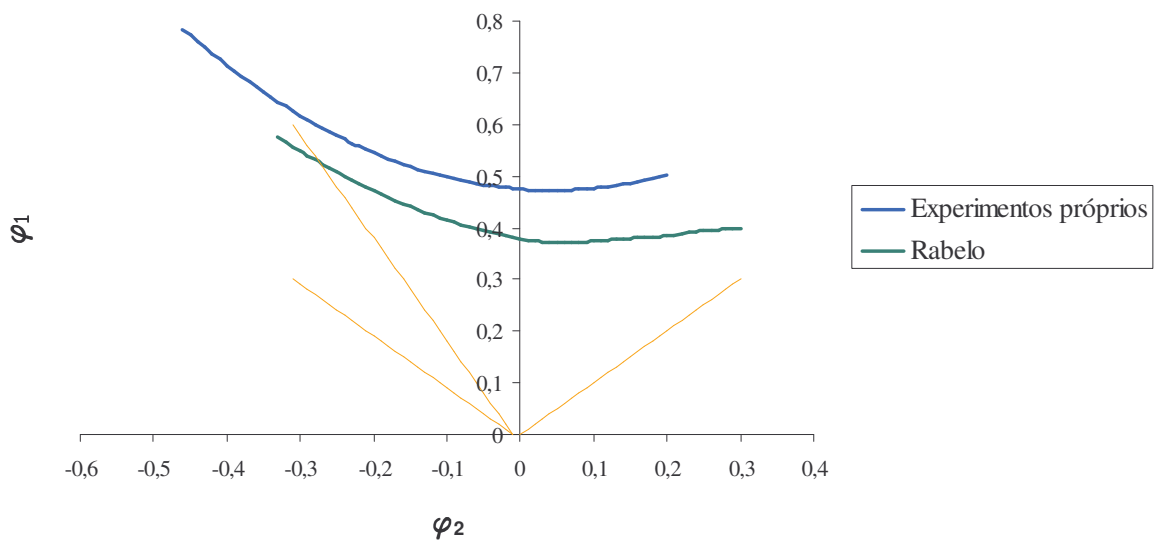


Figura 52 – Comparação entre as CLC para o aço BH 220.

Como os materiais foram ensaiados diferentemente, as CLC's dos materiais obtiveram valores diferentes para as máximas deformações, e essas diferenças estão inseridas nos diferentes ferramentais utilizados devido às restrições que as ferramentais impõem as deformações. Contudo, neste trabalho alcançaram-se deformações de estiramento maiores para o aço BH 220; já, na região de embutimento, teve-se aproximadamente uma média entre as outras duas curvas para o aço BH 180 e maiores deformações para o aço BH 220.

7.3. Embutimento do Copo

7.3.1. Deformações no Copo

Nas figuras 39 e 40, são observados os copos ensaiados com as diferentes condições de lubrificação, sendo que, em todas as condições, as chapas foram embutidas sem falhas nos produtos finais, como rugas, fissuras ou trincas.

As condições de lubrificação utilizadas realizaram os dois extremos de lubrificação, a condição “a seco” (sem lubrificação) com maior coeficiente de atrito e a condição “de contorno” (filme de teflon) apresentando os menores, concordando com Kim 2008. As figuras 41 e 45 apresentaram o comportamento das deformações, conforme esperado para a condição de lubrificação, pois, quando não há lubrificação, as forças de atrito serão maiores ocasionando um aumento de espessura na região do flange e uma maior estricção na parede do copo, tendo-se essa com menores espessuras. Já com a lubrificação com filme de teflon, ver figuras 42 e 46, o material teve menos influência da força de atrito do flange, escoando mais facilmente pelo raio e para o interior da matriz, causando menos interferência na parede do copo. Conforme Schaeffer (2004), um acréscimo da espessura é esperado na região do flange devido às deformações circunferenciais negativas da malha no embutimento profundo, como visto na figura 15: os triângulos irão se comprimir para que o material possa escoar para o interior da matriz.

Como observado nas figuras 41 e 42, a região que o punção atua pode ser dividida em duas partes: a parte inferior onde o material não altera suas dimensões, ou seja, não há deformação; e a região do raio do punção, em que acontece o estiramento do material, resultando sempre na deformação negativa da espessura, caracterizando assim um ponto de alto risco a fratura peça.

Na comparação das deformações sofridas na conformação do aço BH 180 (figuras 43 e 44) com a curva limite de conformação construída, as deformações no copo alcançaram grandes deformações circunferenciais (ϕ_2), entretanto não causaram a ruptura do material, pois estas deformações encontram-se abaixo do limite de deformação no comprimento (ϕ_1) e também as restrições impostas pela ferramenta de embutimento.

As deformações que ocorreram na fabricação de um copo, como visto nas figuras 39 e 40 através das elipses formadas, estarão sujeitas às deformações de embutimento profundo como as apresentadas nas figuras 43, 44, 47 e 48.

Na simulação numérica, com o software Dynaform, realizada para o embutimento do copo, foram avaliadas as deformações sofridas pelas geratrizes, com lubrificação de filme de teflon tanto para o aço BH 180 e BH 220. Na figura 53, pode-se observar a comparação entre as deformações simuladas ocorridas no embutimento do copo de aço BH 180 e as deformações reais. As deformações radiais e tangenciais tiveram caminhos semelhantes. Entretanto, as deformações simuladas da espessura mostram que a espessura da parede do copo tende a aumentar à 53mm de distância do centro do copo, ou seja, um pouco antes do raio da matriz.

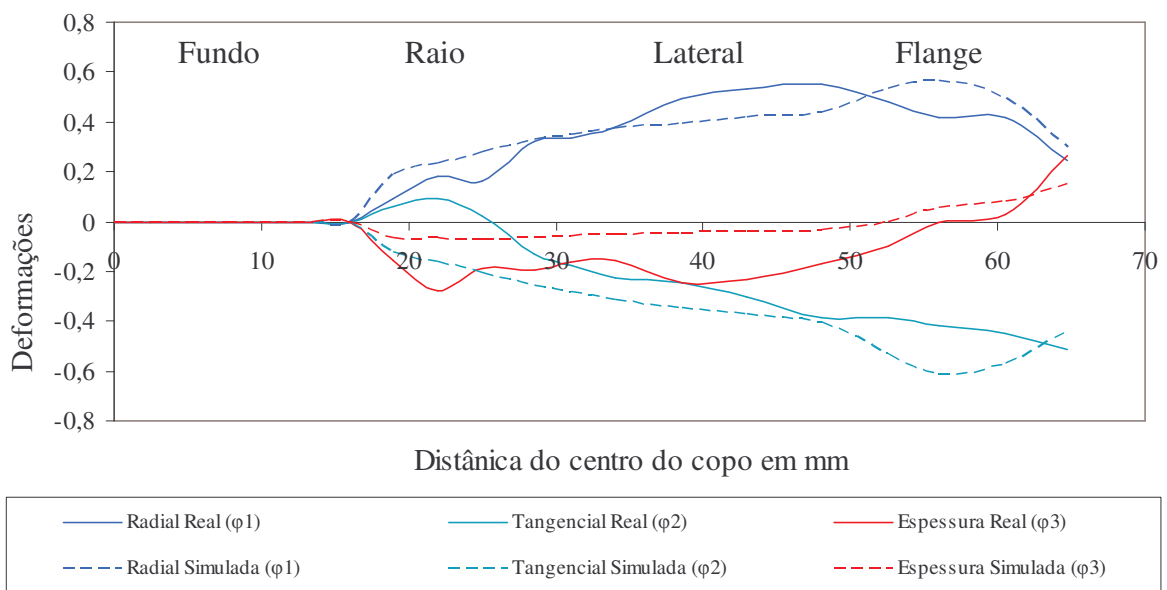


Figura 53 – Comparação entre as deformações reais e simuladas para o embutimento do copo de aço BH 180, com lubrificação de filme de teflon.

Na figura 54, observam-se as comparações realizadas entre as deformações reais e simuladas ocorridas no embutimento do copo de aço BH 220, com filme de teflon. As deformações radiais e tangenciais, reais e simuladas, apresentaram caminhos semelhantes, conforme caminhos traçados no embutimento do aço BH 180, sendo também que a deformação simulada da espessura mostra que a espessura da parede tende a aumentar um pouco antes do raio da matriz a aproximadamente 49mm do centro do centro do copo.

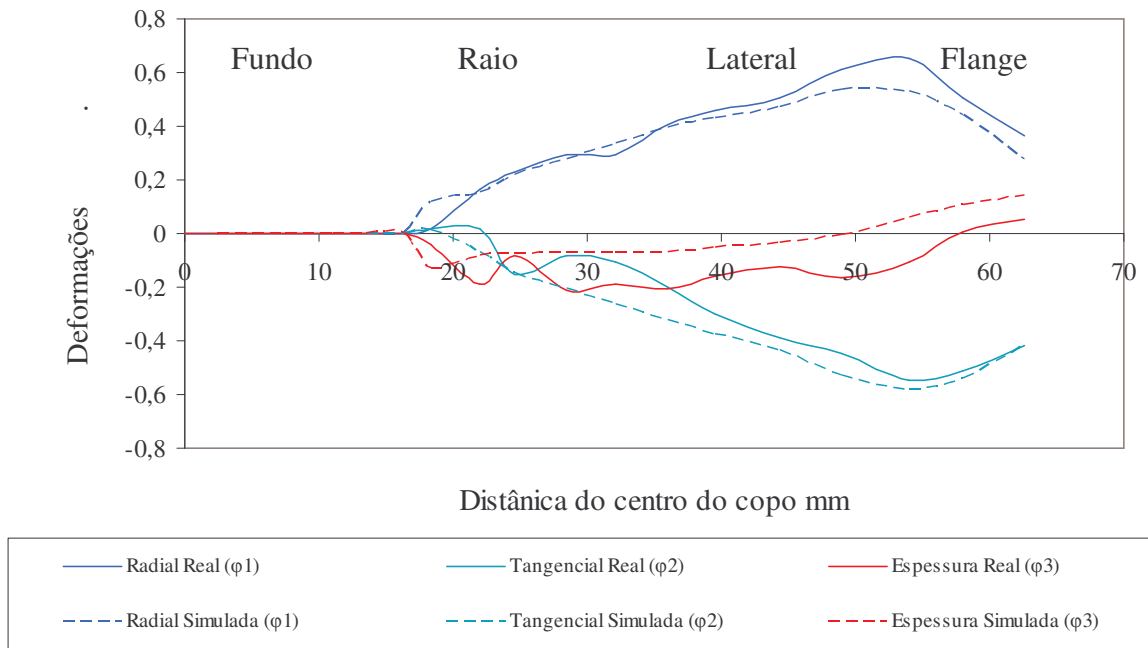


Figura 54 – Comparação entre as deformações reais e simuladas para o embutimento do copo de aço BH 220, com lubrificação de filme de teflon.

7.3.2. Coeficiente de Atrito

Na tabela 9, observa-se a influência dos tipos de lubrificações utilizadas no processo de embutimento profundo, como também observam-se que as maiores forças de embutimento para cada processo ocorreram sem lubrificação. Há um contato direto entre prensa chapas / geratriz e geratriz / matriz, o que significam maiores esforços para realização dos processos.

A tabela 11 demonstra os coeficientes de atrito estimados através da mensuração da força máxima de embutimento, em que o coeficiente de atrito será maior quando não existir lubrificação na ferramenta e com lubrificação de filme de teflon o coeficiente de atrito será menor.

Nas figuras 55 e 56, observa-se a comparação das curvas da força de embutimento para os processos com lubrificação de contorno para os aços BH 180 e BH 220 respectivamente. Estas foram as simulações que apresentaram êxito no produto final, visto que as simulações sem a presença de lubrificação apresentaram falhas no processo de embutimento, como a ruptura ou enrugamento do produto. Na tabela 15, apresentam-se os resultados experimentais e os das simulações para a força máxima no processo.

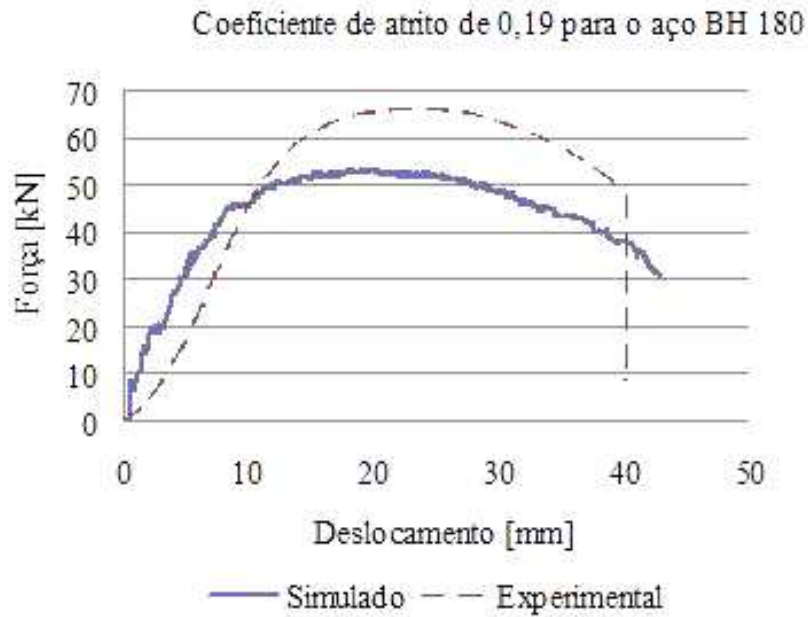


Figura 55 – Comparação entre as forças de embutimento experimental e simulada no processo com lubrificação de filme de teflon para o aço BH 180.

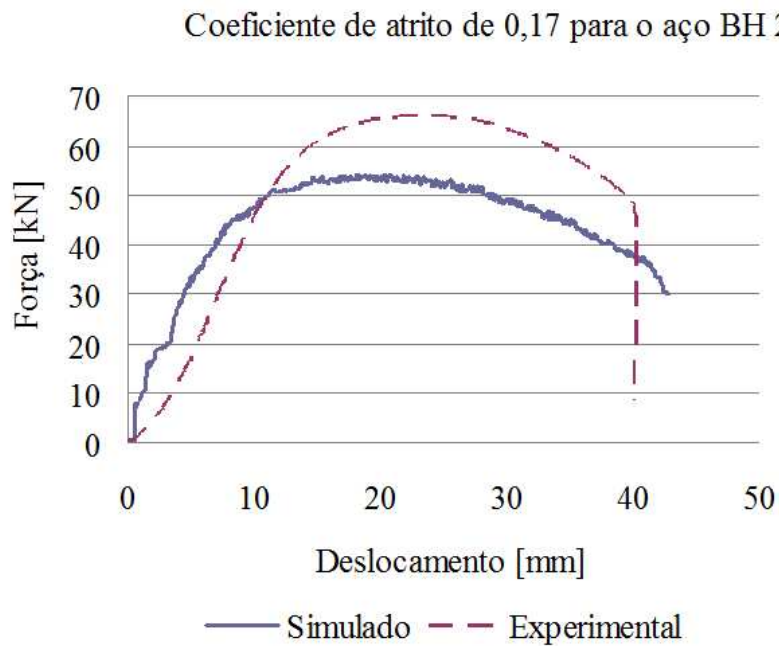


Figura 56 – Comparação entre as forças de embutimento experimental e simulada no processo com lubrificação de filme de teflon para o aço BH 220.

Tabela 15 – Comparação dos resultados das forças de embutimento experimental e simulada.

Condição	Tipo de lubrificação	Material	Força máxima experimental [kN]	Força máxima simulada [kN]
2	“de contorno” = filme de teflon	BH 180	66	53
4	“de contorno” = filme de teflon	BH 220	66	54

O cálculo do coeficiente de atrito realizou-se através da força máxima, obtida experimentalmente no processo de embutimento do copo, no qual esse coeficiente de atrito, calculado, foi inserido como parâmetro de entrada na simulação computacional para fins de validação do resultado analítico. Contudo, os resultados simulados obtiveram diferentes respostas às forças máximas, conforme visto nas figuras 55 e 56 e na tabela 15. As diferenças ocorridas nas forças máximas dos processos de embutimento de copo chegaram a 20% para o processo com o aço BH 180 e 18% com o aço BH 220.

A diferença das curvas de força dos ensaios pode ser explicada devido a fatores como: na simulação, o software realiza uma simplificação na força de atrito, considerada constante durante todo o processo, o que torna a curva mais “inchada”, ou seja, o punção realiza a força de atrito total desde o início do processo. Caso houvesse uma variação da força de atrito, ela tenderia a ficar mais esbelta, e a aumentar a força máxima de embutimento. Folle (2008) demonstrou esse efeito, quando trabalhou com diferentes rugosidades e diferentes lubrificantes para o embutimento de ligas de alumínio, sendo que quando obteve coeficiente de atrito baixo (por exemplo, $\mu=0,056$), a curva simulada tende a acompanhar a curva experimental para a força de embutimento. Entretanto, suas curvas tiveram valores iniciais maiores que as experimentais devido à simplificação do atrito.

8. CONCLUSÕES

De acordo com o objetivo do trabalho proposto, que consiste na caracterização mecânica e tecnológica dos aços BH 180 e BH 220 e o cálculo do coeficiente de atrito no processo de embutimento de copos, através da mensuração da força máxima no processo, conclui-se que:

- 1- As propriedades dos materiais foram obtidas através de uma sequência de ensaios (tração, anisotropia e Nakajima), onde através das propriedades levantadas, consegue-se alimentar softwares específicos de simulação de conformação de chapas aproximando-os dos processos reais e alcançando resultados similares aos experimentos reais;
- 2- A força máxima no processo de embutimento é influenciada pelo coeficiente de atrito que existe entre os componentes do processo, sendo de grande importância a sua estimativa correta, tanto para evitar possíveis falhas nos projetos como para prever o processo real;
- 3- À medida que há um aumento na força máxima devido às condições de lubrificação aplicadas ao processo de estampagem, há também um aumento progressivo da contribuição das forças de atrito, o que podem gerar rupturas prematuras da peça;
- 4- A simulação através do software Dynaform apresentou concordância com os ensaios práticos, entretanto quando se trabalhou com maiores coeficiente de atrito o software tendeu a se distanciar da realidade. Isso acontece provavelmente porque o software considera o atrito como uma constante durante todo o processo, deixando a curva da força de embutimento mais larga e baixa que o real;
- 5- Através das medições das deformações geradas em um copo, observou-se que houve deformações próximas à curva limite de conformação sem a ruptura da peça, atribuindo-se tal fenômeno às restrições dos diferentes ferramentais (ensaio e real);
- 6- Existem maneiras tradicionais de estimativa do coeficiente de atrito, entretanto o método apresentado de cálculo do coeficiente de atrito através da força máxima no processo também pode ser considerado válido, quando se trabalha com menores valores do coeficiente, baseado nos resultados alcançados;

9. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Após a realização do presente trabalho, algumas sugestões podem ser feitas para complementar o estudo:

- Avaliar as propriedades dos materiais após a conformação mecânica e do processo de envelhecimento, avaliando a influencia da deformação no aumento de resistência mecânica (efeito BH);
- Realizar o processo de embutimento variando-se a força do prensa chapas e analisando essa variação no coeficiente de atrito;
- Estampar outras geometrias e estudar a influência do coeficiente de atrito no processo.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ACESITA S.A. (2004) Cadernos da Assistência Técnica. Caderno 02. Julho.

ALL METALS & FORGE. (2009). *HSLA Steel*. Acessado em: 16 de junho de 2009, em: <http://www.steelforge.com/ferrous/hslasteel.htm>.

ALTAN T.; T. Oenoki, Thomas, W. (2000) *Process Simulation in Stamping – Recent Applications for Product and Process Design*. Journal of Materials Processing Technology. Vol. 98 Pág. 232-243.

BATALHA, G. F. (2006) *Nota de Aula da Disciplina Introdução a Manufatura Mecânica*. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

BERBENNI, S.; V. Favier, X. Lemoine; M. Berveiller. (2004) *A Micromechanical Approach to Model the Bake Hardening Effect for Low Carbon Steels*. Scripta Materialia. Vol. 51 Pág. 303-308.

BRENNE, T.; M. Thomma; (2008) *Simulação Abre Caminho para o Ferramental de Conformação Ideal*. Revista Corte & Conformação de Metais – Junho. Pág. 26-31.

CARLSSON, P. (2005) *Surface Engineering in Sheet Metal Forming*. Acta Universitatis Upsaliensis. Digital Comprehensive Summaries of Uppsala Dissertations from the Faculty of Science and Technology. Vol. 7. Uppsala.

CETLIN, P.R.; Helman, H. (1993) *Fundamentos da Conformação Mecânica dos Metais*. 2ed. Belo Horizonte. 170p.

CHOUDHURY, I. A., O.H. lai, L.T. Wong. (2006) *Pam-Stamp in Simulation of Stamping Process of an Automotive Component*. Simulation Modeling Practice and Theory. Vol. 14 Pág. 71-81.

CORTE & CONFORMAÇÃO DE METAIS. (2007) *Empresas e Universidades Firmam Parceria para Estudar a Estampabilidade de Tiras*. Revista Corte & Conformação de Metais – Março. Editora Aranda. Pg. 8-9.

COSTA, A.R. (2003) *Análise da Estampagem de Chapas Metálicas Utilizando Elementos Finitos*. 189F. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista

DA SILVA, G. C.; G. D. C. e Carvalho; J. L. Junior. (2008) *Método Numérico Avalia a Influência do Coeficiente de Atrito na Estampagem*. Revista Corte & Conformação de Metais – Junho 2008. Editora Aranda. Pág. 78-90.

EGLAN, Sergio Silveira Neto. (2004) *Desenvolvimento do Processo de Construção de Curvas Limite de Conformação*. Dissertação de Mestrado. PPGEM, Universidade Federal do Rio grande do Sul.

Eta/DYNAFORM. (2007) *User's manual*. Version 5.6. Engineering Technology Associates, Inc.

EVANDO Mirra de Paula e Silva. (2007) *A Experiência de Colaboração do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da UFMG com Empresas – Lições para a Lei de Inovação*. Revista Brasileira de Inovação, Rio de Janeiro (RJ), 6 (2), p.433-459, julho/dezembro 2007.

EVANGELISTA, Sérgio Henrique. (2000) *Diagramas de Limite de Conformação Aplicados à Análise por Elementos Finitos de Um Processo de Estampagem em Chapas Metálicas*. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

FERESHTEH-SANIEE, F.; M.H. Montazeran. (2003) *A Comparative Estimation of the Forming Load in the Deep Drawing Process*. Journal of Materials Processing Technology. Vol. 140 Pág. 555–561.

FERRARINI, José Luiz. (2004) *Caracterização de Chapas Metálicas para Estampagem*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

FOLLE, L. (2008) *Proposta de Uma Metodologia de Medição do Coeficiente de Atrito em Estampagem e Avaliação da Influência da Lubrificação e Condições Superficiais Via Simulação Numérica*. Dissertação de Mestrado. PPGEM, Universidade Federal do Rio grande do Sul.

FRATINI, L.; S. Lo Casto; E. Lo Valvo. (2006) *A Technical Note on an Experimental Device to Measure Friction Coefficient in Sheet Metal Forming*. Journal of Materials Processing Technology. Vol. 172 Pág. 16–21.

GORNI, Antonio Augusto. (2006) *Simulação dos Processos de Conformação de Chapas*. Revista Corte & Conformação de Metais. Dezembro. Editora Aranda. Pág. 16-19.

GORNI, Antonio Augusto. (2008) *Estudo Analisa Principais Propriedades dos Aços Usados na Indústria Automotiva*. Revista Corte & Conformação de Metais – Janeiro 2008. Editora Aranda. Pág. 22-31.

HAAR, R. T. (1996) *Friction in Sheet Metal Forming, the Influence of (Local) Contact Conditions and Deformation*. Thesis Universiteit Twente, Enschede.

HEBER Castro Silva. (2005) *Análise da Simulação Numérica do Ensaio de Nakazima Via Método dos Elementos Finitos*. Dissertação de Mestrado. Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

HYUNBO Shim. (2002) *Determination of Optimal Shapes for the Stampings of Arbitrary Shapes*. Journal Materials Processing Technology. Vol. 121 Pág. 116-122.

JEONG, W.C. (2006) Relationship Between Mechanical Properties and Microstructure in a 1.5% Mn–0.3% Mo Ultra-Low Carbon Steel with Bake Hardening. Materials Letters, doi:10.1016/j.matlet.2006.09.063.

JFE 21st Century Foundation. (2009). *Chapter 1 – Applications-Quest for New Breakthrough in Steel Materials – Strength and Formability of Automotive Steel Sheets – Bake-hardening Steel Sheets*. Acessado em 18 de novembro de 2008, em: http://jfe-21st-cf.or.jp/chapter_1/1b_2.html.

KIM, H., Altan, T., Yan, Q. (2008) *Evaluation of Stamping Lubricants in Forming Advanced High Strength Steels (AHSS) Using Deep Drawing and Ironing Tests*. J. Mater. Process. Tech., doi:10.1016/j.jmatprotec.2008.10.007.

LAJARIN, S. F., H. J. Lourenço, P. V. P. Marcondes. (2008) *Estudo Compara o Desempenho de Lubrificantes Líquidos e Sólidos na Conformação de Chapas*. Revista Corte & Conformação de Metais. Outubro. Pág. 70-79.

LOBÃO, M. C.; J. Bolsi; E. A. Fancello e C. A. S. de Oliveira. (2005) *Procedimentos Experimentais de Conformação E Simulação Numérica na Avaliação da Estampabilidade de Chapas*. Revista Corte & Conformação de Metais – Setembro. Pág. 62-70.

LS-DYNA, (2006), *Theory manual*. Livermore Software Technology Corporation, Livermore, California.

MENEZES, L.F.; C. Teodosiu. (2000) *Three Dimensional Numerical Simulation of the Deep Drawing Process Using Solid Finite Elements*. Journal Material Processing Technology. Vol. 97 Pág. 100-106.

MIELINIK, E.M. (1991) *Metalworking Science and Engineering*, McGraw-Hill.

NARAYANASAMY, R., Parthasarathi, N. L., Ravindran, R., C Sathiya Narayanan. (2008) *Strain Limit of Extra Galvannealed Interstitial-Free and Bake Hardened Steel Sheets Under Different Stress Conditions*. Journal of Iron and Steel Research, International. Vol. 15 (5). Pág. 56-60.

NOVOTNY, S.; Hein, P. (2001) *Hydroforming of Sheet Metal Pairs from Aluminium Alloys*. Journal of Materials Processing Technology. Vol. 115, Pág. 65-69, Abril.

PANKNIN, W. (1959) *Die Grundlagen des Tiefziehens im Anschlag Unter Besonderer Berucksichtigung der Tiefziehprüfung*. Forschungsberichte zur spanlose formgebung I. muchael triltsch verlag dusseldorf.

PEGADA, V.; Y. Chun; S. Santhanam. (2002) *An Algorithm for Determining the Optimal Blank Shape for the Deep Drawing of Aluminum Cups*. Journal Material Processing Technology. Vol. 125–126 Pág. 743-750.

PEREIRA, J. F. B.; R. de L. Naves. (1997) *Aços Bake Hardening – Aspectos do Desenvolvimento na Usiminas*. Contribuição Técnica ao 2º Congresso Internacional de Tecnologia Metalúrgica e de Materiais – ABM. São Paulo – SP. Outubro.

RABELO, G. B. da C.; Cetlin, P. R.; Meyer, L. C. de O. (2000) *Avaliação Comparativa de Aços Livres de Intersticiais e Aços Endurecíveis por Envelhecimento na Cura da Pintura da Classe de 220MPa de Limite de Escoamento*. XXXVII Seminário de Laminação, Processos e Produtos Laminados e Revestidos; ABM; Curitiba; PR.

SCHAEFFER, L. (1999) *Conformação Mecânica*. Imprensa Livre Editora. 167p.

SCHAEFFER, L. (2004) *Conformação de Chapas Metálicas*. Porto Alegre/RS: Imprensa Livre, 200p.

SCHAEFFER, L. (2006). *Fundamentos do Projeto de Ferramentas Para o Processo de Estampagem*. Revista Ferramental – Revista Brasileira da Indústria de Ferramentas. Ano I – Nº 6 – Maio/Junho. Pág. 39-44.

SCHAEFFER, L. (2009). *Novos Desenvolvimentos em Conformação Mecânica com Ênfase em Chapas Metálicas na Indústria Automobilística*. Acessado em 09 de abril de 2009, em: <http://www.ufrgs.br/ldtm/pesquisa/novosdesenvolvimentos/novosdesenvolvimentos.html>.

SHIM, H. B.; D.Y. Yang. (1997) *Elastic–Plastic Finite Element Analysis of Deep Drawing Processes by Membrane and Shell Elements*. Journal Manufacturing Science Engineering. Vol. 119 Pág. 341-349.

SIEBEL, S.; Panknin, W. (1956) *Das Tiefziehens im Anschlag*. Werkstatttechnik und maschinenbau. Pp 321-326.

SPIM, J.A.; Garcia, A.; Santos, C. (2000) *Ensaio dos Materiais*. Brasil: LTC – Livros

Técnicos e Científicos, 247p.

TIGUINHO, L. M. V. (2005) *Influência da Lubrificação na Estampagem Via Análise das Deformações Obtidas em Uma Chapa de Aço de Alta Estampabilidade*. Dissertação de Mestrado. Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Paraná.

USIMINAS. (2009). *USI-BH*. Acessado em: 13 de abril de 2009, em: [http://www.usiminas.com/irj/portal/anonymous?NavigationTarget=navext\(ROLES://portal_content/usiminas/internet/usiminas/estrutura/roles/br.com.us.e.role.us_e_navegacaopt/br.com.us.e.workset.us_e_navegacao/usiminas/wpcnavigation://wpccontent/Sites/E_Usiminas/Site%20Navigation/navigation.wpc/~2/I2_0/II2_0_1/III2_0_1_8\)](http://www.usiminas.com/irj/portal/anonymous?NavigationTarget=navext(ROLES://portal_content/usiminas/internet/usiminas/estrutura/roles/br.com.us.e.role.us_e_navegacaopt/br.com.us.e.workset.us_e_navegacao/usiminas/wpcnavigation://wpccontent/Sites/E_Usiminas/Site%20Navigation/navigation.wpc/~2/I2_0/II2_0_1/III2_0_1_8))

WAGONER, R. H.; Chenot, J-H. (1997) *Fundamentals of Metal Forming*. John Wiley & Sons.

WIKIPEDIA. (2009). *High-strength Low-alloy Steel*. Acessado em 16 de junho de 2009, em: http://en.wikipedia.org/wiki/HSLA_steel.

WOLFGANG Bleck, Zhi Deng, Kostas Papamantellos, Christopher Oliver Gusek. (1998) *A Comparative Study of the Forming-Limit Diagram Models for Sheet Steels*. Journal of Materials Processing Technology. Vol. 83. Pág. 223-230.

ANEXO I – PROPRIEDADES DOS MATERIAIS

	BH 180	BH 220
Curva de Escoamento (MPa)	$kf = 559 \cdot \varphi^{0,17}$	$kf = 581 \cdot \varphi^{0,28}$
Tensão de Escoamento (MPa)	$kf_0 = 250$	$kf_0 = 250$
Tensão Máxima (MPa)	448	468
Alongamento Máximo (%)	26	32
Índice de Anisotropia 0°	2,27	1,65
Índice de Anisotropia 45°	1,65	1,61
Índice de Anisotropia 90°	2,3	1,9
Índice de Anisotropia Médio	1,97	1,7
Anisotropia Planar	0,64	0,17
Nuvem de pontos da Curva Limite de Conformação. Espessura de 0,75mm; (φ_1 ; φ_2)		(0,77; -0,45)
		(0,71; -0,4)
	(0,58; -0,2)	(0,66; -0,35)
	(0,56; -0,15)	(0,61; -0,3)
	(0,53; -0,1)	(0,58; -0,25)
	(0,50; -0,05)	(0,58; -0,2)
	(0,47; 0)	(0,54; -0,15)
	(0,46; 0,05)	(0,52; -0,1)
	(0,45; 0,1)	(0,49; -0,05)
	(0,48; 0,15)	(0,48; 0)
	(0,53; 0,2)	(0,47; 0,05)
		(0,47; 0,1)
		(0,48; 0,15)
	(0,48; 0,2)	