

## INFLUÊNCIA DO USO DE LUBRIFICANTES NO PROCESSO DE ESTAMPAGEM PROFUNDA COM CHAPAS ESPESSAS DE AÇO

MSc. Marco Fabricio Lopes Pereira da Silva, [fabricio.lopes@hp.com](mailto:fabricio.lopes@hp.com)<sup>1</sup>  
Prof. Dr. Sergio Tonini Butto, [sergio1@fem.unicamp.br](mailto:sergio1@fem.unicamp.br)<sup>2</sup>  
Dipl.-Ing. (FH) Stefan Schlerier, [stefan.schlechtriem@schaeffler.com](mailto:stefan.schlechtriem@schaeffler.com)<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Hewlett-Packard Brasil S.A., Avenida Tamboré, 74, Alphaville, 06460-000, Barueri - SP

<sup>2</sup>UNICAMP, Faculdade de Engenharia Mecânica, C.P. 6122, Barão Geraldo, 13083-970, Campinas - SP

<sup>3</sup>Schaeffler do Brasil Ltda., Av Independencia, 3500, Bairro do Éden, 18087-101, Sorocaba - SP

**Resumo:** O objetivo desse trabalho foi avaliar a influência da lubrificação no processo de embutimento profundo com chapas metálicas EPA de espessura 3,5mm e entender as ocorrências de defeitos como trincas, acabamentos indesejáveis, estrições e seus efeitos sobre as características dimensionais do produto. Foram aplicados experimentos planejados pelo método fatorial para análise da probabilidade de fratura dos corpos de prova em função do diâmetro externo do blanque, do raio da ferramenta, da atuação do prensa chapa. Também foram avaliados os desempenhos de cinco tipos de lubrificantes em função das fraturas e efeitos nos esforços de embutimento.

**Palavras-chave:** fratura, conformação mecânica, análise estatística, regressão logística binária.

### 1. INTRODUÇÃO

A estampagem profunda de componentes a partir de chapas espessas de aço é abundante nas indústrias metalúrgicas que buscam produtos robustos associado à complexidade geométrica, aplicados em condições específicas e extremas de trabalho, como fadiga, desgaste ou esforços como compressores, rodas de automóveis e embreagens.

A constante pesquisa, muitas vezes isolada nas indústrias, para reduzir perdas no processo é comum e de grande importância, porém de recursos limitados e às vezes insuficientes, que dificultam ou encarecem o sucesso para a resolução dos problemas associados ao uso de chapas espessas.

### 2. BIBLIOGRAFIA

Não há referencias bibliografias suficientes, que relatem ensaios associando estados de tensões, defeitos de produtos, regimes de lubrificação e tipos de lubrificantes, para estampagem profunda de produtos com chapas espessas e geometrias complexas, sendo necessário, buscar textos associados à estampagem de chapas finas para esta pesquisa.

#### 2.1. Variáveis do sistema de estampagem profunda

Características que determinem a estampabilidade do material podem prever se haverá ou não ruptura durante o processo de embutimento, como também a presença do retorno elástico, a rigidez do produto acabado e a ocorrência de rugas e defeitos de acabamento na superfície do material, dessa forma Schuler (1968) propõe o diagrama de relação do limite de estampagem profunda numa única operação para peças cilíndricas.

Schey (1996) avaliou o efeito da velocidade de conformação de chapas galvanizadas, eletro-galvanizadas e chapas laminadas a frio combinando a variação de velocidade com a viscosidade de lubrificantes, no regime hidrodinâmico. O parâmetro Sommerfeld de relacionamento entre a viscosidade dinâmica, velocidade de escorregamento e pressão de interface dos contatos, demonstrou que quanto maior a velocidade, menor é o coeficiente de atrito, devido ao aumento da espessura do filme lubrificante.

Considerando-se que o atrito é produzido pela ação recíproca das minúsculas irregularidades presentes nas superfícies em contato, Yang (1999) analisou o processo de embutimento profundo utilizando filmes espessos de lubrificação de modo a evitar o contato da peça com a ferramenta, desenvolvendo um modelo teórico desse processo dividido em duas fases estudo da deformação, demonstrando que quanto maior a viscosidade do lubrificante maior será a espessura do filme e melhor será sua atuação para diminuir o coeficiente de atrito. Salvo para os lubrificantes

sintéticos que possuem características específicas, devido os efeitos dos polímeros em determinadas situações de temperatura e pressão.

Keeler (2000) sugere remover os lubrificantes e aumentar a rugosidade na região do raio do punção onde o atrito deve ser máximo, para que não haja movimento relativo entre as superfícies da peça e ferramenta e o material não rompa, evitando a ruptura da chapa nessa região.

Nesta análise foram considerados os lubrificantes líquidos que durante a aplicação das forças sobre a chapa há uma adaptação microgeométrica, entre a ferramenta e a peça que afeta a continuidade do filme lubrificante e o escorregamento do material para dentro da ferramenta podendo evitar seu desgaste, defeitos e refrigeração da ferramenta.

Óleos como o AQUAMOVE 109 AS da empresa Tirreno (2004), que se caracteriza por uma película semi-secativa, são comumente aplicados a condições de proteção contra fatores ambientais que provocam oxidação em materiais metálicos, sem qualquer característica de efeito tribológico para a conformação do metal.

A simulação numérica sobre conformação de chapas metálicas tem sido útil para a indústria para comparações entre resultados práticos e teóricos gerando soluções de problemas e redução do tempo de fabricação. Tekkaya (2000) destaca a aplicação de técnicas e critérios de falhas pela simulação numérica, substituindo testes físicos e experimentos de avaliação de erros, permitindo maior precisão nas análises para eliminação de potenciais falhas e otimizações baseadas na análise mais sensível de parâmetros como geometrias, pressão, posição entre outros itens.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

A maior parte dos estudos experimentais e teóricos sobre estampagem profunda tem sido realizados em ensaios de embutimento de copos cilíndricos de fundo plano a partir de um blanque de diâmetro externo definido, chamado ensaio Swift, similar ao “Earing Test” sugerido pela norma ISO 11531 – Metallic Materials (1994).

Para elaborar este estudo com lubrificantes optou-se desenvolver um corpo de prova na forma cilíndrica, de grande ou média espessura e com furos laterais, para estudar a relação entre lubrificantes e variáveis do sistema, como força de embutimento, rugosidade, raios da ferramenta, atuação do prensa chapa e geometria do copo. Essa peça foi selecionada por analogias geométricas a uma carcaça embutida de embreagem automotiva.

Para identificação e determinação das variáveis do sistema foi elaborado o diagrama de causa e efeito das fraturas, Fig. (1), permitindo definir as variáveis de influência e relacioná-las com as variáveis de resposta para elaboração do planejamento experimental.

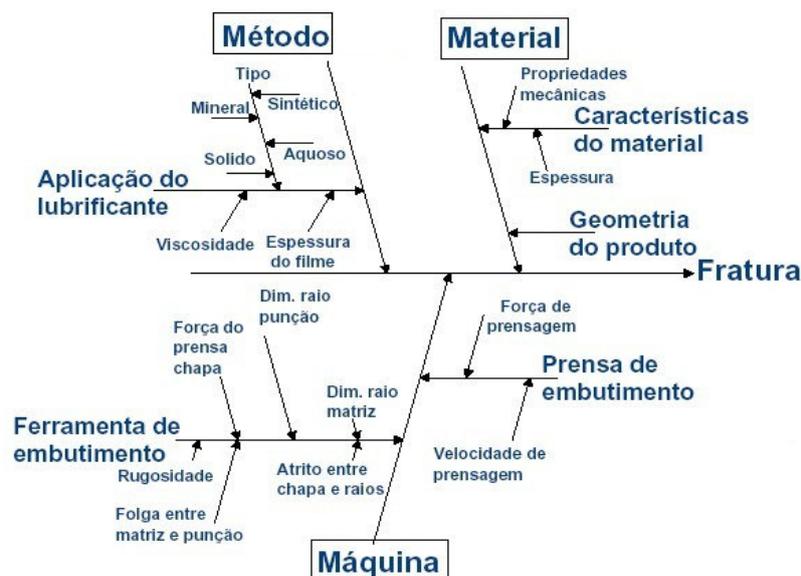


Figura 1. Causas e efeitos hipotéticos da falha.

Duas variáveis de resposta foram escolhidas para avaliação nos ensaios, uma contínua, caracterizada pela força de embutimento e outra dicotômica, associada ao evento de ocorrência ou não da fratura em função da lubrificação.

### 3.1 Especificações do material

Para estampagem de blanques de chapas laminadas a quente foi selecionado um aço-carbono para estampagem profunda, com espessura na ordem de 3,5 mm, avaliado quanto às características químicas, mecânicas e metalúrgicas conforme norma ABNT NBR 5906 EPA (1984).

Para avaliação da estampabilidade do material foram analisados fatores como o grau de anisotropia, o coeficiente de encruamento e a qualidade da superfície.

A avaliação da rugosidade e textura superficial do blanque, foi num rugosímetro modelo “Form TalySurf Series 2 PGI - Taylor Robson Pneumo”, com a medição da rugosidade também em geometrias não planas como por exemplo raio, aplicado nas amostras de fitas de aço nos sentidos de laminação 0°, 45° e 90°.

Para caracterização da textura superficial do material foram realizados ensaios no microscópio de varredura eletrônico do DEMA – FEM - UNICAMP com amostras de laminados a quente e laminados a frio.

Para avaliação da espessura inicial dos blanques utilizados nos ensaios, foram executados medições com um micrômetro de escala digital.

### 3.2 Especificação do corpo de prova e ferramental

O blanque para o ensaio de embutimento foi adaptado incluindo oito furos de diâmetro 15,3 mm no diâmetro primitivo de 108 mm do blanque para provocar maior severidade dos ensaios com características geométricas de produtos comerciais como rodas de aço e carcaças de embreagens automotivas, Fig. (5).

Baseando-se no diagrama de relação do limite de estampagem de Schuler (1968) o coeficiente de embutimento sugerido numa única operação é o índice  $\beta_0 = 2,0$ , denominado também limite de embutimento profundo ou razão crítica entre diâmetros externo do blanque e interno do produto determinando-se o diâmetro do punção da ferramenta e o diâmetro máximo do blanque.

A determinação da força de embutimento necessária permite dimensionar a maior parte dos elementos do sistema para executar o experimento. Schuler (1968) definiu a expressão para cálculo dessa força para uma peça cilíndrica como o produto entre a resistência a tração do material, a espessura da chapa e o diâmetro do punção.

A partir desses resultados foram determinados para a primeira fase, blanques com espessura de 3,5 mm e diâmetro externo nas dimensões de 185 mm, 175 mm, 165 mm, 155 mm, 145 mm e 135 mm, com previsão de força de embutimento na ordem de 340 kN, adequada para a prensa empregada nos ensaios.

Além da aplicação do modelo de Schuler para previsão dos esforços, também foram desenvolvidas simulações computacionais pelo método do volumes finitos no Laboratório de conformação de mecânica da UNICAMP, empregando-se o software comercial MSC Superforge 2005.

A ferramenta foi confeccionada com aço temperado, endurecido para trabalho a frio AISI D2, com 58/60 HRC.

A força de sujeição inicial necessária para o experimento foi determinada conforme Tschätsch (1997).

A delimitação do maior e menor raio de embutimento da matriz e punção para os ensaios foram baseados em dois modelos. A partir do modelo citado por Acesita (1997) usado para calcular raio de ferramentas para dobramento de chapas, determinou-se o menor raio (Rmd), aumentando-se a severidade do ensaio desse projeto.

Para os raios da ferramenta do ensaio, foram calculados as dimensões de 3 mm (modelo de cálculo processos de dobramento) e 12 mm (modelo de cálculo processos de embutimento). A partir desses resultados estimaram-se os raios de embutimento para ensaios com raio de punção e matriz com 6 mm e ensaios com raio de punção e matriz com 8 mm.

Para o experimento foram selecionados cilindros pneumáticos e molas para avaliar qual delas permite obter a força de sujeição estável e adequada aos ensaios.

Foram executados ensaios que permitiram comparar a estabilidade da força de sujeição entre molas helicoidais e cilindros de gás. Aplicando-se molas helicoidais, a elevação demasiada da força de sujeição, Fig. (4) provocaria interrupção indesejada do escoamento do blanque, seguido de ruptura do produto antes de atingir o fim do curso de embutimento.

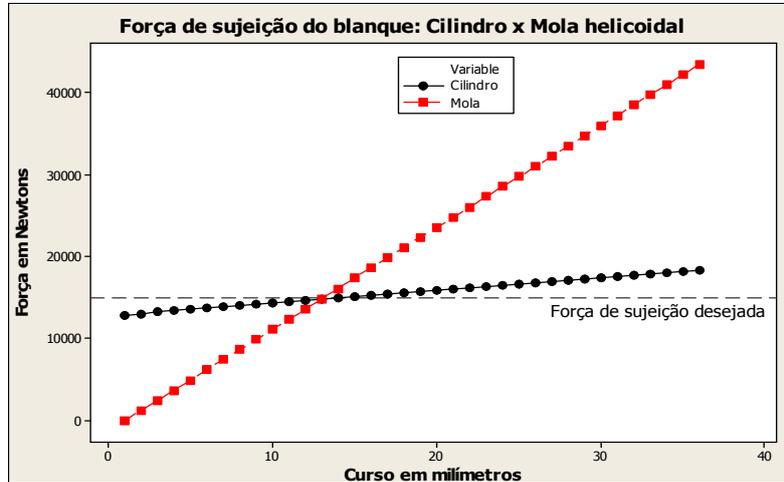


Figura 4. Comparativo entre a força de sujeição do cilindro de gás e mola helicoidal ao longo do curso de embutimento.

Já os cilindros de gás possuem maior estabilidade ao longo do embutimento permitindo manter quase a mesma força de sujeição desde o início até o fim do embutimento.

Para a medida das deformações na superfície da maioria dos materiais estruturais, normalmente são utilizados extensômetros elétricos de resistência com características definidas de resistência elétrica, constante do extensômetro e comprimento da grade de medida, podendo ser de dois tipos, extensômetro de fio ou extensômetro de película.

Esses dois tipos de extensômetros elétricos têm forma específica para cada aplicação. No caso de medidas de deformação na superfície de peças têm-se os estados uniaxial, biaxial e triaxial.

Os transdutores resistivos de deslocamento linear são sensores elétricos para medição de cursos entre 10 mm e 2000 mm, com linearidade média  $\pm 0,05\%$  F.E. com fixação através de olhais, presilhas ou flange, com haste ou cursor junto ao corpo. O retorno da haste é através de mola com um apalpador, ligação elétrica através de cabo ou conector.

Para medição das forças durante os do ensaio foram confeccionados três transdutores de força do tipo “Strain Gage”, à compressão, específicos para instrumentação da ferramenta com suas características baseadas nos cálculos dos esforços já citados.

Para aquisição de dados no percurso da ferramenta no embutimento do corpo de prova, foi instalado o transdutor resistivo de deslocamento, associado ao transdutor de força para obtenção das curvas de força por curso.

Para obter a rugosidade desejada nos pontos de contato da ferramenta com o blanque, os componentes da ferramenta foram confeccionados pelo processo de torneamento com parâmetros específicos, procurando-se a repetibilidade do acabamento entre torneamentos aos ensaios.

Os ensaios de rugosidade da ferramenta foram realizados no equipamento rugosímetro para raio modelo “Form TalySurf Series 2 PGI - Taylor Robson Pneumo” com incerteza de  $\pm 0.0281\mu\text{m}$ .

Para avaliação da textura superficial da ferramenta, foi aplicado o processo de transferência, não destrutivo, de microtextura de superfície “Repliset 3D Techniques” da Struers (2005), utilizando-se o sistema de réplicas em borrachas de silicone para inspeção de superfícies.

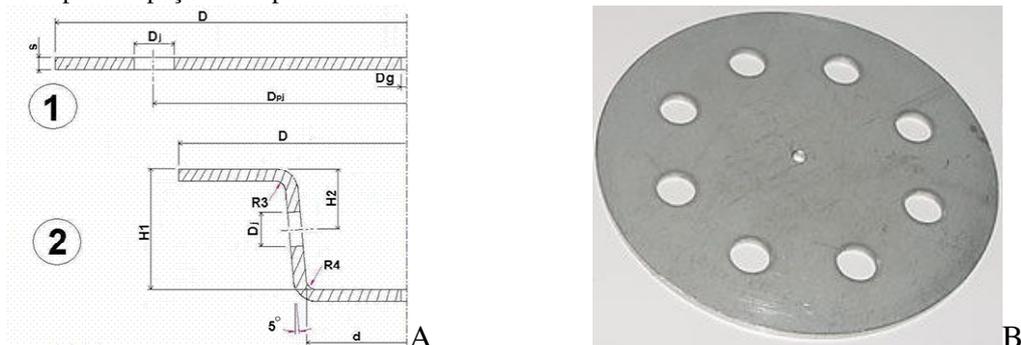


Figura 5. A - Esboço do corpo de prova antes (1) e após (2) embutimento. B – Imagem do corpo de prova antes do embutimento.

**V CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO**  
**14 a 17 de abril de 2009 - Belo Horizonte - Minas Gerais - Brasil**

### 3.3 Especificações do lubrificante

Os lubrificantes escolhidos para os ensaios foram indicados pelo fabricante FUCHS do Brasil S.A. (2000) e a seleção foi baseada pela severidade do tipo embutimento em função dos esforços aplicados. Plantoform 64, Extrudoil 319 HT, Renoform MZA 20, Renoform Press 10 e Renoform 74 EEP. Os lubrificantes determinados para os ensaios foram caracterizados para o experimento quanto ao tipo, aplicação e viscosidade em cSt [40°C], Tab. (7).

Tabela 7. Lubrificantes indicados pelo fabricante FUCHS do Brasil S.A. para o ensaio

	Fornecedor	Descrição	Tipo	Aplicação	Qtde	Viscosidade cSt [40°C]
Lubrificantes disponíveis:	FUCHS	37510 Plantoform 64	óleo sintético	Repuxo	5 litros	204
	FUCHS	Extudoil 319 HT	éster	Extrusão	3 litros	68
	FUCHS	37212 Renoform MZA 20	óleo mineral	Repuxo	1 litro	174
	FUCHS	37551 Renoform 74 EEP [Mineral Parafín.]	óleo mineral	Repuxo	3 litros	560
	FUCHS	40110 Renoform Press 10	pasta	Repuxo	3 kg	NA

NA – não aplicável para pastas.

### 3.4 Planejamento experimental

O planejamento fatorial tem sido muito aplicado em pesquisas básicas e tecnológicas e é classificado como um método do tipo simultâneo, em que as variáveis de interesse que realmente apresentam influências significativas na resposta são avaliadas ao mesmo tempo.

Para realizar um planejamento fatorial, escolhem-se as variáveis a serem estudadas e efetuam-se experimentos em diferentes valores destes fatores, observando-se a resposta para cada combinação correspondente.

Os ensaios foram divididos em duas fases, sendo a primeira sem lubrificantes, com a intenção de caracterizar combinações de variáveis que resultassem em corpos de prova no limite de ruptura para, posteriormente, ensaiar-se na segunda fase os blanques selecionados na primeira fase com a aplicação dos lubrificantes selecionados para os ensaios.

Para a primeira fase foram escolhidas as seguintes variáveis de influência para avaliar os fenômenos causadores das trincas, Tab. (8).

Tabela 8 - Planejamento do ensaio experimental correspondente a primeira fase, sem lubrificantes.

Raio punção/matriz		6		8	
Prensa chapa		com	sem	com	sem
Diâmetro externo	135	$Y_{6;c;135;1}$	$Y_{6;s;135;1}$	$Y_{8;c;135;1}$	$Y_{8;s;135;1}$
		$Y_{6;c;135;2}$	$Y_{6;s;135;2}$	$Y_{8;c;135;2}$	$Y_{8;s;135;2}$
	145	$Y_{6;c;145;1}$	$Y_{6;s;145;1}$	$Y_{8;c;145;1}$	$Y_{8;s;145;1}$
		$Y_{6;c;145;2}$	$Y_{6;s;145;2}$	$Y_{8;c;145;2}$	$Y_{8;s;145;2}$
	155	$Y_{6;c;155;1}$	$Y_{6;s;155;1}$	$Y_{8;c;155;1}$	$Y_{8;s;155;1}$
		$Y_{6;c;155;2}$	$Y_{6;s;155;2}$	$Y_{8;c;155;2}$	$Y_{8;s;155;2}$
	165	$Y_{6;c;165;1}$	$Y_{6;s;165;1}$	$Y_{8;c;165;1}$	$Y_{8;s;165;1}$
		$Y_{6;c;165;2}$	$Y_{6;s;165;2}$	$Y_{8;c;165;2}$	$Y_{8;s;165;2}$
	175	$Y_{6;c;175;1}$	$Y_{6;s;175;1}$	$Y_{8;c;175;1}$	$Y_{8;s;175;1}$
		$Y_{6;c;175;2}$	$Y_{6;s;175;2}$	$Y_{8;c;175;2}$	$Y_{8;s;175;2}$
	185	$Y_{6;c;185;1}$	$Y_{6;s;185;1}$	$Y_{8;c;185;1}$	$Y_{8;s;185;1}$
		$Y_{6;c;185;2}$	$Y_{6;s;185;2}$	$Y_{8;c;185;2}$	$Y_{8;s;185;2}$

As variáveis de resposta da primeira fase selecionadas para caracterizar o corpo de prova a ser usado na segunda fase foram ocorrência de fratura, relação entre o diâmetro inicial do blanque e o diâmetro final do corpo de prova embutido, força desenvolvida durante o embutimento, espessura média das paredes do corpo de prova entre os furos após o embutimento, espessura no fundo do corpo de prova após o embutimento, espessura na região do raio de dobra no fundo e no flange do corpo de prova após o embutimento e influência do prensa chapa.

Para a segunda fase foram escolhidas variáveis de influência para explicar como e quais lubrificantes favorecem a não formação de trincas, o menor esforço durante o embutimento e a maior estabilidade do processo, Tab. (9), raio do punção em dois níveis (6 mm e 8 mm), raio da matriz em dois níveis (6 mm e 8 mm), atuação do prensa chapa em dois

**V CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO**  
14 a 17 de abril de 2009 - Belo Horizonte - Minas Gerais - Brasil

níveis (com atuação - 1 e sem atuação - 0), diâmetro externo dos blanques em dois níveis (165 mm e 175 mm) e lubrificantes (Plantoform 64, Extrudoil 319 HT, Renoform MZA 20, Renoform Press 10 e Renoform 74 EEP).

Tabela 9. Planejamento do ensaio experimental correspondente a segunda fase, sem lubrificantes.

Raio punção/matriz		6				8			
Prensa chapa		com		sem		com		sem	
Diâmetro		d1	d2	d1	d2	d1	d2	d1	d2
Lubrificante	La	Y <sub>6.cd1.la.1</sub>	Y <sub>6.cd2.la.1</sub>	Y <sub>6.sd1.la.1</sub>	Y <sub>6.sd2.la.1</sub>	Y <sub>8.cd1.la.1</sub>	Y <sub>8.cd2.la.1</sub>	Y <sub>8.sd1.la.1</sub>	Y <sub>8.sd2.la.1</sub>
		Y <sub>6.cd1.la.2</sub>	Y <sub>6.cd2.la.2</sub>	Y <sub>6.sd1.la.2</sub>	Y <sub>6.sd2.la.2</sub>	Y <sub>8.cd1.la.2</sub>	Y <sub>8.cd2.la.2</sub>	Y <sub>8.sd1.la.2</sub>	Y <sub>8.sd2.la.2</sub>
	Lb	Y <sub>6.cd1.lb.1</sub>	Y <sub>6.cd2.lb.1</sub>	Y <sub>6.sd1.lb.1</sub>	Y <sub>6.sd2.lb.1</sub>	Y <sub>8.cd1.lb.1</sub>	Y <sub>8.cd2.lb.1</sub>	Y <sub>8.sd1.lb.1</sub>	Y <sub>8.sd2.lb.1</sub>
		Y <sub>6.cd1.lb.2</sub>	Y <sub>6.cd2.lb.2</sub>	Y <sub>6.sd1.lb.2</sub>	Y <sub>6.sd2.lb.2</sub>	Y <sub>8.cd1.lb.2</sub>	Y <sub>8.cd2.lb.2</sub>	Y <sub>8.sd1.lb.2</sub>	Y <sub>8.sd2.lb.2</sub>
	Lc	Y <sub>6.cd1.lc.1</sub>	Y <sub>6.cd2.lc.1</sub>	Y <sub>6.sd1.lc.1</sub>	Y <sub>6.sd2.lc.1</sub>	Y <sub>8.cd1.lc.1</sub>	Y <sub>8.cd2.lc.1</sub>	Y <sub>8.sd1.lc.1</sub>	Y <sub>8.sd2.lc.1</sub>
		Y <sub>6.cd1.lc.2</sub>	Y <sub>6.cd2.lc.2</sub>	Y <sub>6.sd1.lc.2</sub>	Y <sub>6.sd2.lc.2</sub>	Y <sub>8.cd1.lc.2</sub>	Y <sub>8.cd2.lc.2</sub>	Y <sub>8.sd1.lc.2</sub>	Y <sub>8.sd2.lc.2</sub>
	Ld	Y <sub>6.cd1.lc.1</sub>	Y <sub>6.cd2.lc.1</sub>	Y <sub>6.sd1.lc.1</sub>	Y <sub>6.sd2.lc.1</sub>	Y <sub>8.cd1.lc.1</sub>	Y <sub>8.cd2.lc.1</sub>	Y <sub>8.sd1.lc.1</sub>	Y <sub>8.sd2.lc.1</sub>
		Y <sub>6.cd1.lc.2</sub>	Y <sub>6.cd2.lc.2</sub>	Y <sub>6.sd1.lc.2</sub>	Y <sub>6.sd2.lc.2</sub>	Y <sub>8.cd1.lc.2</sub>	Y <sub>8.cd2.lc.2</sub>	Y <sub>8.sd1.lc.2</sub>	Y <sub>8.sd2.lc.2</sub>
	Le	Y <sub>6.cd1.le.1</sub>	Y <sub>6.cd2.le.1</sub>	Y <sub>6.sd1.le.1</sub>	Y <sub>6.sd2.le.1</sub>	Y <sub>8.cd1.le.1</sub>	Y <sub>8.cd2.le.1</sub>	Y <sub>8.sd1.le.1</sub>	Y <sub>8.sd2.le.1</sub>
		Y <sub>6.cd1.le.2</sub>	Y <sub>6.cd2.le.2</sub>	Y <sub>6.sd1.le.2</sub>	Y <sub>6.sd2.le.2</sub>	Y <sub>8.cd1.le.2</sub>	Y <sub>8.cd2.le.2</sub>	Y <sub>8.sd1.le.2</sub>	Y <sub>8.sd2.le.2</sub>

As variáveis de resposta selecionadas para avaliar o desempenho dos lubrificantes e entender as causas da fratura no produto durante o embutimento sobre condições específicas de processo foram:

- Ocorrência de fratura
- Esforço desenvolvido durante o embutimento
- Espessura das paredes entre os furos
- Espessura no fundo do corpo de prova
- Espessura no raio de dobra no fundo e no flange do corpo de prova
- Diâmetro externo do corpo de prova após embutimento
- Estricção da espessura nos pontos críticos do corpo de prova

Através do software estatístico MINITAB pode-se determinar a função probabilística a partir dos dados do experimento conforme Penha (2002), baseado no método de regressão logística binária, entre outros métodos de análise estatística.

$$P_i = \frac{e^{(\beta_c + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_i x_i)}}{1 + e^{(\beta_c + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_i x_i)}}$$

$P_i$  – probabilidade de resposta

$\beta_c$  – constante

$\beta_i$  – coeficiente da variável independente

$x_i$  – variável independente

Os testes estatísticos aplicados para validar e assegurar um modelo definido também permite identificar as variáveis que não se ajustam ao modelo ou que possuem influência significativa na estimação de parâmetros P-valor, Pearson, Desvio Residual e Hosmer-Lemeshow.

## 4 - RESULTADOS

### 4.1 Análise dos ensaios do material

O aço selecionado conforme norma ABNT NBR 5906 EPA (1984) para os ensaios de estampagem apresentou os resultados desejados quanto às suas características químicas, mecânicas e metalúrgicas desejadas e encontradas.

O coeficiente de anisotropia normal  $\bar{r}$  ficou abaixo de valores comuns encontrados para os aços efervescentes, que normalmente são próximos de 2.0 e o coeficiente de anisotropia planar  $\Delta r$  encontrado indica que há pequena probabilidade de surgimento de orelhas nos produtos embutidos.

O coeficiente de encruamento do material encontrado está próximo do valor esperado para os produtos de estampagem profunda.

Os valores obtidos de rugosidade do material nos ensaios nas três direções em relação à direção de laminação ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$  e  $90^\circ$ ), apresentaram rugosidade aritmética  $R_a$  1,58  $\mu\text{m}$ , 1,56  $\mu\text{m}$  e 1,49  $\mu\text{m}$ , rugosidade parcial  $R_z$  9,08  $\mu\text{m}$ , 9,32  $\mu\text{m}$  e 8,31  $\mu\text{m}$  e rugosidade total  $R_t$  10,65  $\mu\text{m}$ , 10,84  $\mu\text{m}$  e 10,03  $\mu\text{m}$  respectivamente, valores já esperados para esse tipo de material com superfície decapada, com passe de laminação de acabamento e rugosidade máxima esperada  $R_t$  de 15  $\mu\text{m}$ .

Quanto à rugosidade da ferramenta, os resultados da rugosidade aritmética  $R_a$  em  $\mu\text{m}$ , para as condições de raios da ferramenta 6 mm foi 0,68  $\mu\text{m}$  e 8 mm foi 0,53  $\mu\text{m}$ , da matriz e punção com tamanho da amostra igual a cinco.

O valor médio encontrado para a espessura da chapa foi próximo do valor nominal de 3,5 mm, e que o desvio-padrão é adequado para esse tipo de material laminado a quente (ABNT NBR 11888, Tabela 5, 1991).

A análise do processo pelo método dos volumes finitos elaborado no Laboratório de Conformação de Mecânica da UNICAMP permitiu prever o nível das tensões nas paredes do corpo de prova, como mostra a Fig. (3).

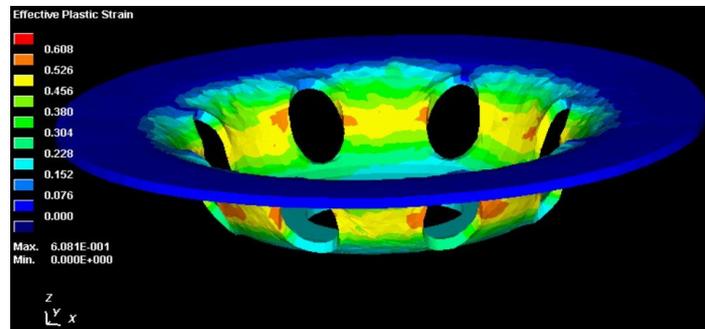


Figura 3 – Resultado da simulação para previsão dos esforços de embutimento.

## 4.2 Análise dos ensaios com os lubrificantes

Foi controlada a quantidade de massa em gramas e em amostras de tamanho 8 ( $n = 8$ ) para cada tipo de lubrificante nos dois diâmetros de blanques distintos ( $De = 165\text{mm}$  e  $De = 175\text{mm}$ ). Dos lubrificantes aplicados nos blanques com rolo de espuma embebido, foi verificado que os de maior viscosidade eram os de maior massa e, conseqüentemente, mais difíceis de replicar sua quantidade sobre os demais blanques.

## 4.3 Análise dos resultados dos experimentos

Os resultados dos ensaios foram avaliados numa primeira fase, sem lubrificantes, para caracterizar as combinações de variáveis que resultassem em corpos de prova no limite de ruptura e, numa segunda fase, submetendo os blanques caracterizados na primeira com aplicação dos lubrificantes.

### 4.3.1 Resultados da primeira fase

O primeiro conjunto de experimentos, sem qualquer aplicação de lubrificante, teve como objetivo determinar as condições de ensaios que permitissem selecionar corpos de prova num limite crítico de ruptura, entender suas principais causas no sistema avaliado e planejar o segundo conjunto de experimentos com aplicação de lubrificantes.

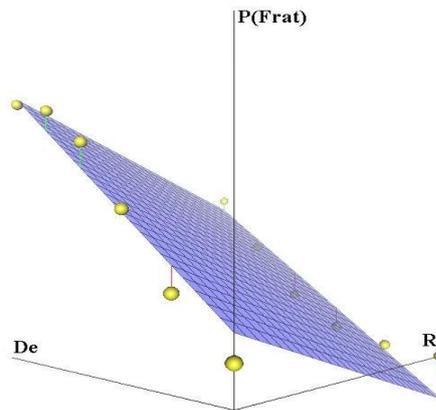
A ocorrência da fratura (Frat), caracterizada como variável de resposta em função das variáveis independentes, diâmetro externo do blanche ( $De$ ) e raio da ferramenta ( $R$ ), foi avaliado pelo método de regressão logística binária através dos indicadores dos testes de validação P-valor, Pearson e Hosmer-Lemeshow (Tabela 2).

Tabela 1 – Coeficientes obtidos por REGRESSÃO LOGÍSTICA para análise de probabilidade de fratura.

Previsão	Coefficiente	P-Valor (Coeficiente)	P-Valor (Pearson)	P-Valor (Desvio Residual)	P-Valor (Hosmer Lemeshow)
Constante	-8,8265	0,042	0,062	0,028	0,227
R	-1,1587	0,011			
De	0,102124	0,001			

**V CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO**  
**14 a 17 de abril de 2009 - Belo Horizonte - Minas Gerais - Brasil**

Aplicando-se o modelo de regressão linear sobre os resultados obtidos na primeira fase, a probabilidade do corpo de prova fraturar  $P(\text{Frat})_{\text{lin}}$  em função de tamanho do raio da ferramenta (R) e da dimensão do diâmetro externo do blanque (De) é representada pelo gráfico na Fig. 6, com coeficiente de correlação de 0,946.



$$P(\text{Frat})_{\text{lin}} = -0,929 + (-1,167 \times R) + (0,016 \times \text{De})$$

Figura 6 – Gráfico de correlação entre a probabilidade de fratura, raio da ferramenta e diâmetro externo do blanque.

Concluir para a primeira fase do experimento que a probabilidade de fraturar o corpo de prova é maior em função do diâmetro externo do blanque do que em função do raio da ferramenta e que, a partir dos testes estatísticos não foi evidenciada a influência do prensa chapa sobre a probabilidade de se fraturar o corpo de prova nesse ensaio.

Na seleção dos corpos prova para os ensaios com lubrificantes, através de técnicas estatísticas (ANOVA), foi identificada a probabilidade de fratura de 50%, sendo classificados corpos de prova acima e abaixo dessa faixa. Com probabilidade de fratura abaixo de 50% foram classificados como não fraturados e os com probabilidade de fratura acima de 50% como fraturados.

Quanto ao esforço desenvolvido no embutimento representado pela força máxima (Fmax), pode-se determinar que o diâmetro externo do blanque foi mais significativo que o raio da ferramenta, comprovado pelo modelo de regressão linear.

A espessura da chapa no raio da região do flange no corpo de prova (região 1 de maior tensão radial na parede) sofre influência do diâmetro externo do blanque (De), porém quando há atuação do prensa chapa (BH) a relação dessa espessura com o diâmetro externo do blanque aumenta, reforçando a hipótese de que quanto maior o diâmetro externo do blanque menor será a espessura nessa região do corpo de prova, conforme denotado pelos modelos “a” e “b”.

(a) Eraiofl (1) =  $6,068 - 0,01600 \text{ De}$   
CORR. = 0,610 (sem BH)

(b) Eraiofl (1) =  $8,454 - 0,03193 \text{ De}$   
CORR. = 0,931 (com BH)

A espessura da chapa no raio do fundo no corpo de prova sofre influência aproximadamente 10 vezes maior pelo raio da ferramenta (R) do que pelo diâmetro externo do blanque (De), denotados pelo modelo. Quanto maior o raio da ferramenta, provavelmente maior será a espessura do raio no fundo do corpo de prova, como mostrado pelo modelo “c”.

(c) Erauifun (2) =  $3,18 - 0,00516 \text{ De} + 0,0885 \text{ R}$   
CORR. = 0,633

Conforme mostrado nos modelos “d” e “e”, sem a atuação do prensa chapa a espessura no fundo do corpo de prova possui média correlação com o diâmetro externo do blanque. Aumentando-se o diâmetro externo diminui-se a espessura nessa região, sendo significativo apenas sem a atuação do prensa chapa conforme o modelo “e”.

(d) Efund (3) =  $3,450 - 0,000571 \text{ De}$   
CORR. = 0,274 (com BH)

(e) Efund (3) =  $3,534 - 0,001036 \text{ De}$   
CORR. = 0,534 (sem BH)

## V CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO 14 a 17 de abril de 2009 - Belo Horizonte - Minas Gerais - Brasil

Nessa análise para a espessura da parede no corpo de prova, modelos “f” e “g” nota-se a clássica relação entre do raio da ferramenta e do diâmetro externo do blanque, sugerindo-se uma maior espessura de parede ao aumentar-se o raio da ferramenta ou diminuir-se o diâmetro externo do blanque.

$$(f) \text{Epare (4)} = 6,40 + 0,615 R - 0,0535 De \\ \text{CORR.} = 0,711 \text{ (com BH)}$$

$$(g) \text{Epare (4)} = 7,88 + 0,427 R - 0,0518 De \\ \text{CORR.} = 0,643 \text{ (sem BH)}$$

Sabendo-se que quanto maior o raio da ferramenta, maior será espessura da chapa no raio do fundo no corpo de prova representado pelo modelo “c” da análise anterior, que conseqüentemente terá maior influência conforme descrito no modelo que segue, diminuindo a probabilidade da fratura do corpo de prova de modo mais significativo que as espessuras nas outras regiões.

### 4.3.2 Resultados da segunda fase

O método de modelagem logística da fase anterior também foi aplicado nessa fase para correlacionar e identificar a função probabilística para resposta sobre os eventos de fratura e não fratura em função do raio da ferramenta (R), do diâmetro externo dos blanques (De), da atuação do prensa chapa (BH) e, principalmente, dos efeitos dos lubrificantes selecionados.

No caso investigado a lubrificação não influencia de forma significativa o comportamento de fraturas e não fraturas. Foram evidenciadas pelo modelo logístico influência direta do prensa chapa, e a interação do raio da ferramenta com o diâmetro externo do blanque sobre tais resultados.

Portanto não foi evidenciada a influência da lubrificação nos eventos de fratura e não fratura dos ensaios correspondentes, direcionando o estudo dos lubrificantes sobre as análises dos resultados dos esforços de embutimento e estrição da espessura do corpo de prova.

A força máxima na primeira fase sem lubrificação ficou inferior quando comparadas com a força máxima na segunda fase com lubrificantes. Isso pode ter ocorrido devido à preparação da ferramenta e sensores de força efetuados em momentos distintos para ambas as fases, permitindo apenas a comparação dos resultados da força máxima com lubrificantes, na segunda fase.

Apesar de não identificada à relação entre lubrificação e fraturas, pode-se notar a relação da força máxima de embutimento (Fmax) com os diferentes de lubrificantes aplicados, Extrudoil, Renoform Press 10, Renoform 74, Plantforme 64 e MZA 20.

Sobre a relação entre a força de embutimento e lubrificantes, quando os resultados dos ensaios foram segregados para raio da ferramenta com 8 mm, sem a atuação do prensa chapa e com diâmetro externo de 165 mm, o Extrudoil resultou em menor força máxima de embutimento se comparado com os demais lubrificantes.

A aplicação do raio menor da ferramenta, associada à diminuição da área de contato entre o blanque do corpo de prova durante o escoamento fez o raio da ferramenta de embutimento promover o aumento da tensão nesse ponto de contato resultando na ineficiência do embutimento por ruptura da película de lubrificante.

Sabendo-se a espessura final e inicial da chapa foi calculado o índice de deformação da espessura  $\epsilon$ , e identificada influência da lubrificação nas regiões 2 e 3 do corpo de prova denotados nos modelos de regressão que seguem. Na análise da diminuição da espessura da chapa no raio do fundo no corpo de prova, foi identificada influência direta do lubrificante na estrição dessa região e também sua influência indireta quando combinada com o raio da ferramenta de 8 mm. De certa forma a lubrificação tende a aumentar a estrição nessa região do corpo de prova conforme denotado pelo modelo a seguir e pelos resultados da Tabela 32, porém com o raio da ferramenta de 6 mm essa estrição não é significativa devido a interação do uso de lubrificante e o raio da ferramenta.

$$\text{draio\_fnd} = 42,9 - 4,13 R + 1,32 BH - 23,7 \text{ Lubrif} + 3,60 R * \text{Lubrif}$$

Na análise da deformação da espessura da chapa no fundo do corpo de prova, caracterizada pela espessura da chapa no fundo do corpo de prova, apesar de não haver ajuste perfeito do modelo (CORR. = 0,31) há tendência do aumento da deformação nessa parte do corpo de prova pela interação entre o prensa chapa e lubrificação simultaneamente.

$$\text{dfundo} = - 1,30 + 0,219 R + 1,18 BH * \text{Lubrificação}$$

## V CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO 14 a 17 de abril de 2009 - Belo Horizonte - Minas Gerais - Brasil

Portanto a influência dos tipos de lubrificante sobre a estricção da espesura na região do raio no fundo do corpo de prova com raio de 8 mm e sem prensa chapa, o MZA 20 e o Extrudoil mostraram estricção significativa quando comparadas com a situação sem lubrificante, associada ao raio do punção de embutimento e a lubrificação foi efetuada sobre o blanque que provocam maior escoamento e maior chance de ruptura do fundo do corpo de prova pela diminuição do atrito nessa região, confirmando a citação mencionada por Keeler (2000).

Com a atuação do prensa chapa e raio da ferramenta com 8 mm, somente o Extrudoil se destacou se comparado com a situação sem aplicação de lubrificantes, no efeito de estricção da espesura no raio do fundo do corpo de prova .

Na tentativa de correlacionar as variáveis citadas com os eventos fraturados e não fraturados não houve influência da lubrificação sobre os resultados de fratura, porém novamente foi identificada a relação com o raio da ferramenta (R) e a atuação do prensa chapa reforçando a hipótese de sensibilidade do produto em função a geometria da ferramenta.

### 5 - CONCLUSÕES

Os experimentos mesmo sem lubrificantes mostraram sensibilidade em função dos raios da ferramenta e do diâmetro externo dos blanques, evidenciado pelo modelo logístico da probabilidade de fratura. Ao se optar pelo um raio maior de embutimento na matriz, menor será a probabilidade do corpo de prova romper. Por outro lado se aumentarmos o diâmetro externo do blanque, maior será a probabilidade de ruptura do corpo de prova.

Na primeira fase conclui-se quanto menor o fator mínimo de embutimento a ser utilizado e maior o diâmetro blanque, maior será a probabilidade de fratura do corpo de prova. Conseqüência do aumento das tensões na região da aba, porém em proporções mais significativas que o previsto por Schluer (1968), devido à severidade em função das janelas na parede.

Também nessa fase os eventos de ruptura nos corpos de prova ocorreram na região do raio do flange, o qual sofre influência direta do diâmetro externo dos blanques.

Quanto à redução da espesura no raio do fundo do corpo de prova e da espesura da parede, os resultados são influenciados pelo diâmetro externo do blanque e pelo raio da ferramenta, porém com maior intensidade, ou seja, quanto maiores as reduções, maior será a probabilidade de fratura do corpo de prova.

Quanto aos ensaios com a aplicação de lubrificantes, somente foram evidenciadas alterações nos resultados de força máxima de embutimento nos ensaios planejados com raio da matriz e punção 8 mm sem a atuação do prensa chapa.

Dessa forma não se recomenda o uso de lubrificantes com o objetivo de evitar a fratura, preocupando-se apenas com os raios da ferramenta e com o diâmetro externo do blanque. Uma menor probabilidade de fratura foi obtida com utilizando-se raio maior na ferramenta, 8 mm e o diâmetro externo do blanque com 165 mm, sem a atuação do prensa chapa.

Com a lubrificação, a força de embutimento diminuiu quando comparado com os resultados de ensaios sem a aplicação de lubrificantes.

O Extrudoil se destacou dentre os demais em melhor desempenho para força e estricção, em condições específicas de raio da ferramenta, diâmetro do blanque e atuação do prensa chapa, promovendo valores de força e estricção inferiores quando comparado sem lubrificação.

Além do Extrudoil, o lubrificante MZA 20 também se destacou sobre os demais e em ensaios sem lubrificação, quanto estricção da espesura, aplicando-se raio da ferramenta de 8 mm e sem a atuação do prensa chapa.

Também foi identificado comportamentos significativos de estricção nos ensaios com raio da ferramenta 8 mm alternando-se a atuação do prensa chapa. Porém, nos ensaios planejados com o raio da ferramenta de 6 mm não foram identificadas alterações de estricção na espesura, comprovando a inatividade da lubrificação nessa condição.

Recomenda-se que em trabalhos futuros equivalentes quanto avaliação de fratura, esforços de embutimento e estricção da espesura em corpos cilindricos, aplique-se ensaios planejados que incluam tratamentos de TiN sobre a ferramenta de embutimento conjugando-se ou não com aplicação de lubrificantes.

Para escala de produção, quanto os lubrificantes destacados nesse trabalho é recomendado outros estudos que incluam formas de aplicação, superfícies dos produtos e ferramentas, sendo viável contatar o fornecedor para obter detalhes quando os processos exijam tratamentos térmicos posteriores ao uso desses lubrificantes.

### 6 – AGRADECIMENTOS

A todos que apoiaram a realização desse trabalho, inclusive colaboradores das empresas Schaeffler do Brasil Ltda e Fuchs do Brasil S.A.

V CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO  
14 a 17 de abril de 2009 - Belo Horizonte - Minas Gerais - Brasil

## 7 – REFERÊNCIAS

- ABNT NBR 11888, 1991; ABNT NBR 5906, 1984; ABNT NBR 6108; ABNT NBR 11888, 1992; ABNT NBR 11889, 1992; International Standard ISO 11531: 1994(E) Metallic Materials – Earing Test  
ACESITA, Estampagem dos aços inoxidáveis, 1997.  
BRESCIANI FILHO, E. (Coord.), Conformação Plástica dos Metais, 4ª. Edição, Editora da Unicamp.  
Deng, Zhi; Lovell, M.R., Effects of lubrication and die radius on the friction behavior of Pb-coated sheet steels (Wear, Volume: 244, Issue: 1-2, August 20, 2000, pp. 41-51).  
Han, S. S. The Influence of Tool Geometry on Friction Behavior in Sheet Metal Forming (Journal of Materials Processing Technology, Volume: 63, Issue: 1-3, January, 1997, pp. 129-133).  
Hosmer, D.W. & Lemeshow, S., 1989, Applied Logistic Regression, John Wiley & Sons, Inc.  
Keeler, S. P., To Lube or Not to Lube, Magazine Metal Forming, p. 68-69, April 2000.  
Penha, Renata Neves; Um Estudo Sobre Regressão Logística Binária; Trabalho de formatura da Universidade Federal de Itajubá, Instituto de Engenharia Mecânica, Departamento de Produção; 2002.  
SCHEY, J. A., Tribology in metalworking (friction, lubrication and wear), 2. Edition, ASM, M. Park, 1984.  
Schey, John A., Speed effects in drawbead simulation (Journal of Materials Processing Technology, Volume: 57, Issue: 1-2, February 1, 1996, pp. 146-154).  
Schuler, L. Manual Schuler, Prenses y sus Aplicaciones, 4.ed.Stuttgart, 1968.  
Schuler, Metal Forming Handbook, Springer-Verlag Berlin Heidelberg – 1998.  
Tekkaya, A. E., State-of-the-art of simulation of sheet metal forming (Journal of Materials Processing Technology, Volume: 103, 2000, pp. 14-22).  
Tschätsch, Heinz: Praxiswissen Umformtechnik Vieweg Verlag, Wiesbaden 1997.  
Tirreno, DESENGRAXANTE. DEGREASING. COMPOUND. Catálogo de Óleos Oil Catalog, 2004.  
Yang, Tung-Sheng, Full film lubrication of deep drawing (Tribology International, Volume: 32, Issue: 2, February, 1999, pp. 89-96).

## 8. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

## INFLUENCE OF THE LUBRICANT IN THE PROCESS OF DEEP DRAWING WITH THICK STEEL SHEET METALS

MSc. Marco Fabricio Lopes Pereira da Silva, [fabricio.lopes@hp.com](mailto:fabricio.lopes@hp.com)<sup>1</sup>  
Prof. Dr. Sergio Tonini Butto, [sergio1@fem.unicamp.br](mailto:sergio1@fem.unicamp.br)<sup>2</sup>  
Dipl.-Ing. (FH) Stefan Schuster, [stefan.schlechtriem@schaeffler.com](mailto:stefan.schlechtriem@schaeffler.com)<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Hewlett-Packard Brasil S.A., Avenida Tamboré, 74, Alphaville, 06460-000, Barueri - SP

<sup>2</sup>UNICAMP, Faculdade de Engenharia Mecânica, C.P. 6122, Barão Geraldo, 13083-970, Campinas - SP

<sup>3</sup>Schaeffler do Brasil Ltda., Av Independencia, 3500, Bairro do Éden, 18087-101, Sorocaba - SP

**Abstract:** *The objective of this work was to evaluate the influence of lubrication in the process of deep drawing with sheet metal thickness of 3.5 mm EPA and understand the causes of defects such as cracking, unwanted finishes, stretching and effects on the dimensional characteristics of the product. We applied the method factorial experiments designed to examine the probability of fracture of bodies of evidence in relation to the outer diameter of blank, the radius of the tool, the performance of the blank holder. Were also evaluated the performance of five lubricants in terms of fractures and effects on efforts to deep drawing.*

**Keywords:** *cracking, mechanical forming, statistical analysis, binary logistic regression*

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.