

## **ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DA INDENTAÇÃO DE COMPONENTES TUBULARES DE AÇO POR PUNÇÕES COM EXTREMIDADE ESFÉRICA**

João Emanuel Soffiati, [sofft@terra.com.br](mailto:sofft@terra.com.br)  
Sérgio Tonini Button, [sergio1@fem.unicamp.br](mailto:sergio1@fem.unicamp.br)

**Faculdade de Engenharia Mecânica - UNICAMP**

Rua Mendeleiev, s/n - Cidade Universitária "Zeferino Vaz" Barão Geraldo - Campinas - SP  
Caixa Postal: 6122 CEP: 13.083-970

**Resumo:** Cravamento é um processo de conformação de metais a frio que apresenta baixo custo na utilização de fixação de componentes tubulares. O tipo de cravamento estudado é aplicado em projetos de componentes que necessitem transmitir movimento de rotação, similar às articulações de pedais de freios automotivos. Se a folga da articulação, neste caso, for menor que 0,02mm causará restrições no movimento da articulação, podendo não fechar a válvula de vácuo do sistema de frenagem causando a diminuição da eficiência, em contra partida, se a folga for maior que 0,15mm o acionamento do freio poderá apresentar ruídos. Outro problema é a presença de trincas passantes geradas pela escolha de parâmetros de processos inadequados no cravamento. Usualmente estes parâmetros não são especificados no projeto do sistema de frenagem, causando alta variabilidade no processo de manufatura. Este trabalho apresenta a análise de cravamento considerando seis fatores que foram escolhidos para iniciar a análise: geometria do punção, rugosidade do punção, diâmetro da ponta da haste a ser cravada, espessura da parede do componente tubular, profundidade da indentação e folga entre esfera e diâmetro do tubo para indentação. O processo de manufatura foi simulado experimentalmente através de um dispositivo especialmente projetado e montado para este trabalho e comparado com os resultados obtidos com o software MSC Superforge 2005

**Palavras-chave:** Cravamento, Indentação, Fissura, Trinca, Folga, Ensaio de cravamento.

### **1. INTRODUÇÃO**

Para atender à crescente necessidade de fornecimento de produtos com baixo custo e alto nível de qualidade, a Engenharia de Manufatura tem desenvolvido e buscado alternativas simples na construção e montagem de elementos de máquinas e peças automotivas. Elementos mecânicos para fixação tais como parafusos, anéis elásticos e rebites têm sido utilizados, todavia dependendo da aplicação os mesmos se tornam custosos e não confiáveis ao longo do tempo.

Neste trabalho é apresentada uma alternativa para o projeto de elementos mecânicos que requerem a transmissão de movimentos de rotação numa dada articulação, como o exemplo da figura 1, que apresenta a articulação da haste do pedal de freio de automóveis.

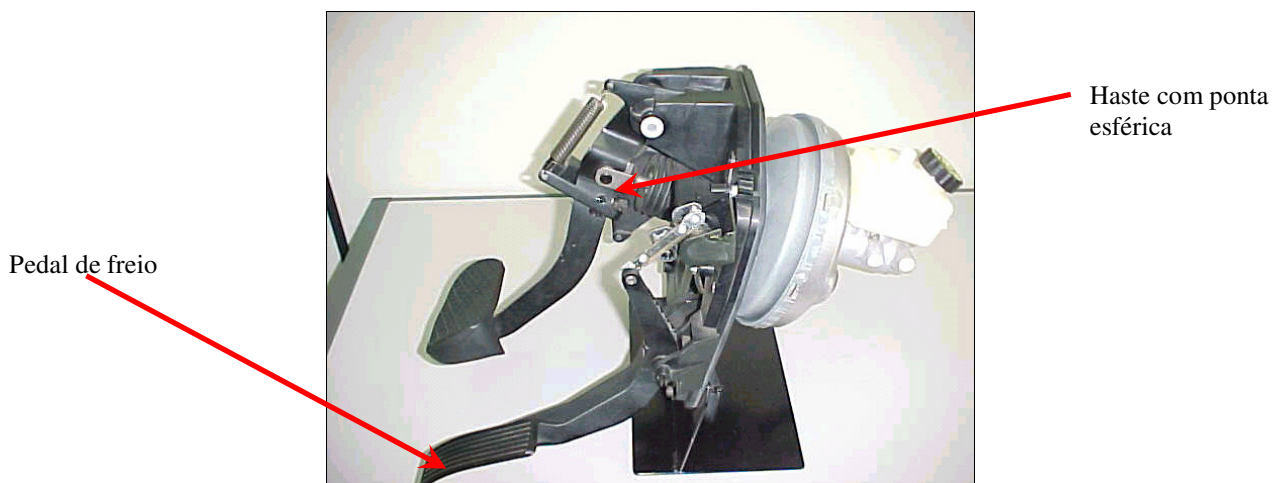


Figura 1 – Conjunto de acionamento de freio automotivo

No caso específico de pedais de freios de automóveis, a folga da articulação é de extrema importância, pois se for menor que 0,02mm, dado prático de processo de fabricação usual, poderá reter o movimento do pedal de frenagem e afetar a válvula de controle de vácuo no amplificador de força de frenagem. Outro requisito é que se a folga da articulação for maior que 0,15mm, serão gerados ruídos indesejáveis e não aceito pelo mercado consumidor.

## 2. OBJETIVOS

O objetivo principal deste projeto é estudar algumas variáveis envolvidas no processo de cravamento a frio de elementos mecânicos em hastes com ponta esférica, como apresentado na figura 2, de modo a torná-lo um processo de manufatura mais robusto que atenda a contento os requisitos de qualidade e segurança.

Como objetivos complementares têm-se: projeto, construção e montagem de dispositivo para simulação física do cravamento em questão, desenvolvimento de um modelo numérico, baseado no método dos volumes finitos, que fornecerá subsídios para verificar as variáveis mais importantes, verificação da presença de *trincas* nas indentações, de *folgas* no cravamento e determinação da curva de *força de indentação X profundidade* e da *força de extração da esfera*, em função das variáveis de influência definidas.

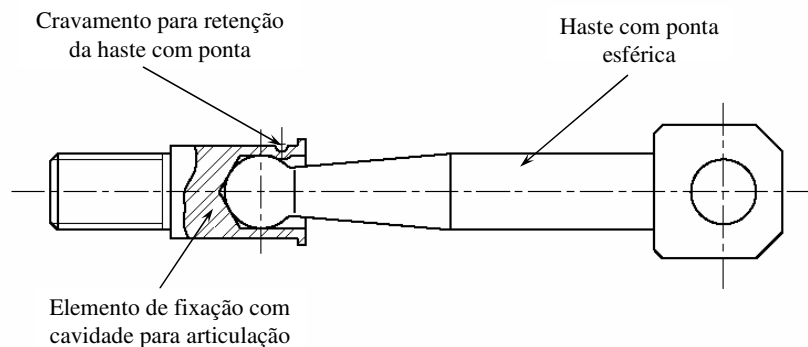


Figura 2 – Elemento mecânico fixado na ponta esférica através de processos de cravamento.

## 3 REVISÃO TEÓRICA

A influência da *geometria* de um punção utilizado no processo de cravamento pode ser verificada no modelo de *Energia de Penetração para Fratura* definido por Murty *et al.*, (1998), que supõe condições para que ocorra a fratura se a tensão gerada por um penetrador esférico exceder a tensão crítica de fratura por clivagem ( $\sigma_f$ ). A partir desse critério, tem-se que o valor da tensão no ponto de contato é conhecido como uma função da *profundidade da penetração*.

No trabalho de Ciavarella *et al.*, (1998), para estudo da influência de arestas arredondadas em indentações feitas por punções planos que têm a aplicação particular em testes de fadiga por fricção, é mencionado que para um perfeito contato plano, a pressão de contato interfacial é muito sensível a pequenas variações na *geometria* da superfície de contato, particularmente à presença de pequenas partículas próximos das arestas do punção. Se, entretanto, as arestas do punção são arredondadas, muitos destes problemas desaparecem, pois existe menor tendência de uma pequena partícula interferir no deslizamento do punção, e a pressão de contato cai continuamente até zero nas bordas de contato.

Também empregando o método de Muskhelishvili, (1977), para determinar o campo de tensões, Ciavarella *et al.*, (1998), apresentam um modelo para avaliar problemas de contato para a penetração de um punção com extremidade arredondada, e concluem que as tensões presentes no contato calculadas pelo método proposto representam cerca de 60% do valor encontrada para um caso Hertziano equivalente, o que significa que mesmo indutores com pequenos raios de curvatura influenciam significativamente o campo de tensões na região de contato.

Dini e Nowell, (2003), apresentam um modelo baseado na formulação Hertziana com o objetivo de determinar o coeficiente de atrito na região de deslizamento para o contato de uma superfície plana com uma superfície curva, que é uma *geometria* de contato similar à encontrada no cravamento com punções esféricos.

No artigo de Shirgaokar *et al.*, (2003), é descrito o cravamento de tubo metálico cilíndrico em projétil bélico depois de sua montagem. São utilizados seis cravadores que conformam indentações no tubo de um cartucho para preencher uma ranhura usinada no projétil. Um dos objetivos dos autores foi determinar um posicionamento ótimo entre os punções cravadores e a ranhura usinada no projétil, tendo demonstrado que a variação deste *posicionamento* tem grande influência na *força de extração* do projétil. Nesse trabalho, que também trata de cravamento de componentes

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

tubulares, tem-se no que se refere ao apoio do material cravado, uma situação semelhante no que diz respeito à posição do punção cravador em relação à esfera e à necessidade de realização de *ensaio de extração* dessa esfera, de modo que a *posição do penetrador* foi considerada uma variável a ser estudada.

O cravamento estudado é um processo de conformação plástica que utiliza punções com forma retangular, esférica ou combinação de ambas, de modo que sejam conformadas pequenas indentações igualmente espaçadas em um corpo tubular cilíndrico com o objetivo de que essas indentações possam reter a ponta esférica de uma haste.

Para se ter uma melhor compreensão do processo de cravamento e das variáveis envolvidas, foi elaborado um modelo físico simplificado que representa o processo de cravamento, que pode ser visto na figura 3.

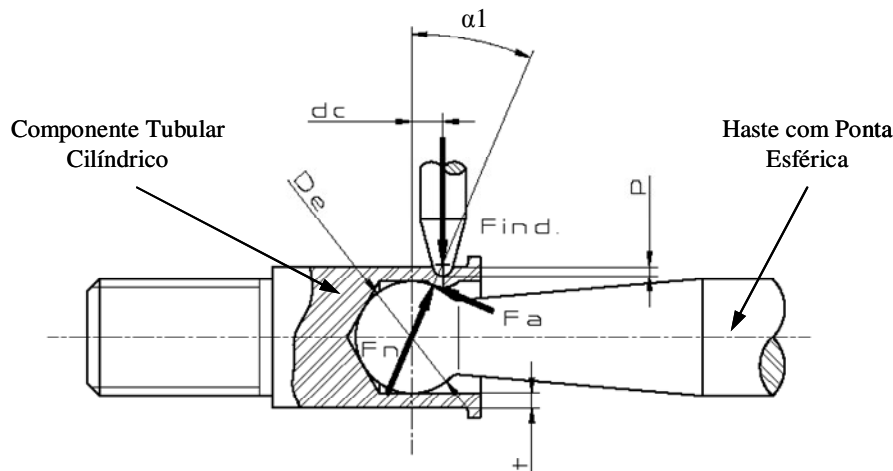


Figura 3 – Representação da composição de forças no cravamento

Onde:	$F_{ind}$	Força de indentação	$r$	Raio de ponta punção
	$F_a$	Força de Atrito	$\mu$	Coefficiente de atrito
	$F_n$	Força Normal	$De$	Diâmetro da Esfera
	$p$	Profundidade da indentação	$t$	Espessura da parede do tubo
	$\alpha_1$	ângulo de assento da calota		
	$dc$	distância entre o centro da esfera e o centro do punção		

Tem-se então a expressão desenvolvida nesse trabalho:

$$F_{ind} = \frac{F_a \cdot dc}{\mu \cdot \text{sen} \alpha_1} \cdot \frac{1}{\left[ \frac{De}{2} + t - p + r \right]} \quad [ 3.1 ]$$

Portanto a força de indentação é função das seguintes variáveis: a força de atrito, no caso foi avaliada pela *rugosidade*; o *diâmetro da esfera*, a *espessura* da parede do componente tubular, a *geometria* do punção, a *profundidade* da indentação e distância entre o centro da esfera e o punção, que pode ser também entendida como a *folga para indentação*.

#### 4 MATERIAIS, MÉTODOS E EQUIPAMENTOS

Para a avaliação do processo de cravamento e definição a priori das principais variáveis de influência sobre o processo, foi elaborado um *modelo numérico* para simulação, baseado no método de volumes finitos empregando o software MSC.Superforge 2005.

A figura 4 apresenta a tela do programa para o modelo elaborado para o cravamento e as variáveis estudadas.

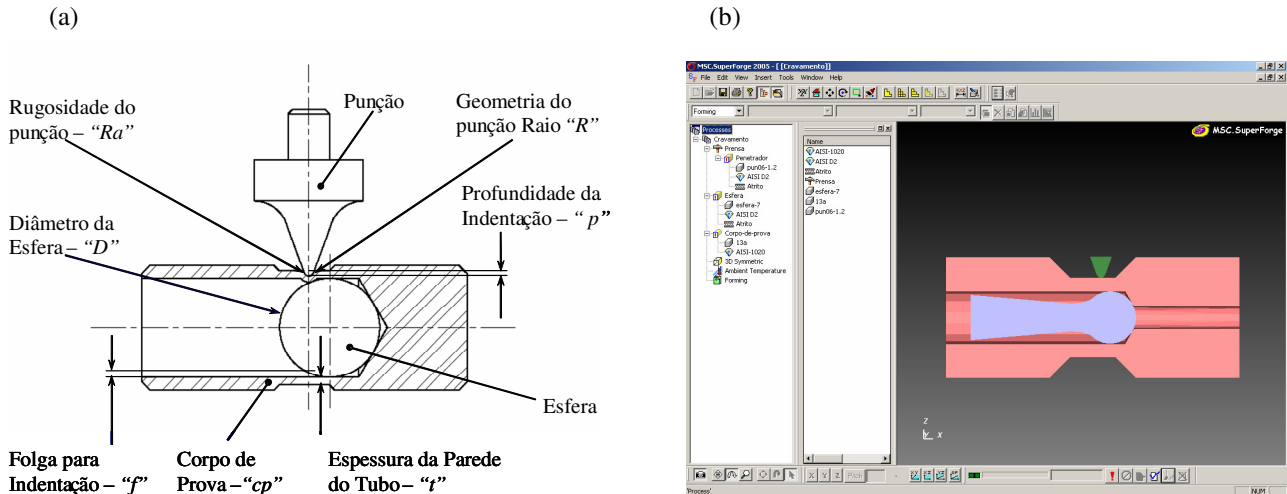


Figura 4 (a) Exemplo de tela do programa MSC.Superforge 2005, (b) Componentes mecânicos e variáveis estudadas.

Para minimizar o tempo de simulação através do *modelo numérico* definiu-se a simetria dos sólidos em relação ao plano mediano longitudinal, como mostrado na figura 4. Nessa figura pode ser observado o modelo empregado que consiste do penetrador com ponta esférica (cor verde), da esfera interna (em azul) e do corpo-de-prova a ser cravado (em vermelho), sendo que a prensa adotada para a simulação representa a prensa hidráulica empregada nos ensaios com velocidade média de 0,25 mm/s.

Para caracterizar as condições de atrito nas interfaces penetrador-cps e esfera-cps adotou-se um coeficiente de Coulomb igual a 0,2 pois a variável *rugosidade do punção* não pode ser modelada no programa utilizado, porém sabe-se que existe uma relação entre rugosidade e coeficiente de atrito conforme descrito por Lee *et al.*, (2002), a temperatura ambiente de 20 °C foi adotada considerando-se o processo como realizado a frio.

Em todos os modelos o tamanho do lado do elemento de volume foi adotado igual a 0,3mm. Foram elaborados modelos considerando cinco das seis variáveis propostas no plano de trabalho inicial.

Para o *modelo experimental*, as variáveis de influência foram selecionadas baseando-se na revisão teórica exposta, no modelo físico, no método numérico exposto e na experiência anterior do autor. Como variáveis de influência selecionadas têm-se: *Espessura da parede do tubo*; *Profundidade de indentação*, *Folga para indentação*, *Rugosidade do punção*; *Geometria do punção*; *Diâmetro da esfera*.

Além destas variáveis de influência, tem-se a variável *dureza do material*, neste trabalho foi considerada uma variação de dureza de 25 Brinell para os corpos de prova. Assumindo-se que a variação de dureza seja inerente ao processo de modo que pode ser verificada em lotes de mesma corrida.

Considerando-se todas estas variáveis, foi planejada a realização de um primeiro conjunto de experimentos num planejamento fatorial fracionado  $2^{6-1}$ , Montgomery *et al.*, (1991), ou seja, seis variáveis de influência com dois níveis para cada variável.

A escolha do experimento fatorial como primeira análise das variáveis escolhidas foi feita levando-se em consideração os aspectos:

1. Verificação da influência das variáveis quando as mesmas estão atuando em conjunto;
2. Verificação das interações de maior importância entre as variáveis estudadas;
3. Redução de custos e tempo, pois foi possível fracionar pela metade as combinações possíveis entre as variáveis de influência.

Como variáveis resposta definidas tem-se: força de indentação, força para extração da esfera, e folga entre a esfera e o corpo tubular. Após a execução dos ensaios de cravamento foi feita a verificação dos dados obtidos através da Análise de Variância – ANOVA, disponível no software comercial Minitab versão 2000, que permite calcular a significância dos efeitos das variáveis estudadas bem como sua ordem de influência na variável de resposta força de indentação. A *análise de fratura nas indentações* foi feita após a medição da *folga da esfera*. Esta análise consiste na verificação de presença de trincas com um microscópio eletrônico de varredura – MEV, e foi realizada no Laboratório de caracterização do DEMA-FEM.

Para *verificação de trincas passantes* foi feito um *ensaio de vazamento* para avaliar a perda de vácuo durante um período de tempo específico.

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

Uma vez feita a análise de fratura, foram feitos os ensaios de *extração da esfera*. A verificação dos dados obtidos também foi feita através de Análise de Variância – ANOVA, na qual foram calculadas as significâncias e a ordem de influência dos efeitos das variáveis estudadas.

Todos os resultados desses ensaios experimentais foram coletados e baseando-se no nível de significância de cada variável de influência estudada, foram selecionadas as duas variáveis de maior influência e foi planejado o segundo conjunto de experimentos baseado no planejamento aleatorizado por níveis com os objetivos de: validar os resultados do planejamento fatorial fracionado preliminar, replicar alguns ensaios, ter um melhor detalhamento da influência das duas principais variáveis estudadas.

Tendo reduzido o estudo para duas variáveis de influência, foram executados novos ensaios de cravamento, de medição da *folga para indentação*, medição da *folga entre a esfera e o componente tubular* e *ensaios de vazamento*, verificando-se a consistência dos resultados obtidos através da Análise de Variância – ANOVA.

Para a realização dos ensaios de cravamento, foram projetados, construídos e montados os componentes do dispositivo de cravamento de acordo com o desenho do projeto que pode ser visto na figura 5 e está detalhado no relatório FAPESP, processo N°2004/00972-3.

O dispositivo de cravamento foi concebido para realizar ensaios de: cravamento do corpo de aço em esfera de diâmetros 7 e 12 mm, e extração (“pull out”) da esfera após o cravamento.

Esse dispositivo consta de três punções de cravamento para cravar três indentações, com profundidades controláveis, na superfície tubular externa do corpo de prova. Foi definida a utilização de três punções para o cravamento, pois isso possibilita uma condição de três apoios para a esfera, com estabilidade para medição da *folga da esfera* e da *força de extração* da esfera após cravamento. O dispositivo permite: o ajuste do *posicionamento dos punções* cravadores em relação ao centro da esfera do punção, o ajuste da *profundidade da indentação*, a equalização das três indentações na preparação dos experimentos.

Uma célula de carga foi acoplada em um dos punções de modo que foi possível a obtenção de resultados da *força de indentação* necessária para o cravamento em cada condição ensaiada. A célula de carga foi calibrada, tendo uma precisão de 0,05%, e capacidade de 100kN, disponível na prensa em que o dispositivo foi montado.

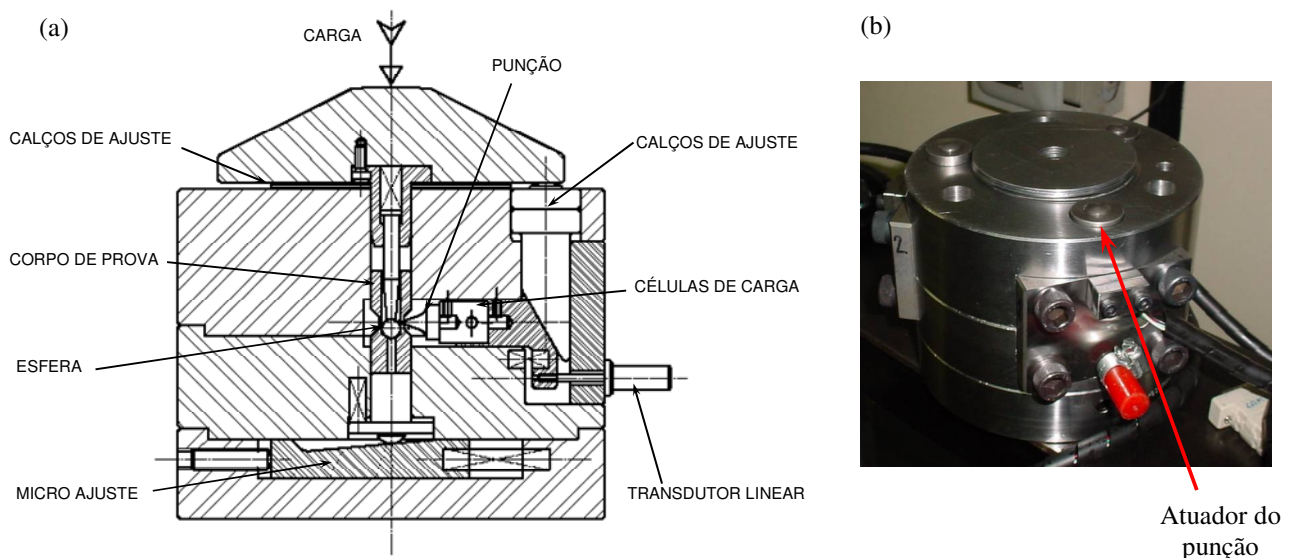


Figura 5 – (a) Desenho em corte do dispositivo para cravamento utilizado nos ensaios. (b) Dispositivo construído

Para ajustar o posicionamento dos punções em relação ao centro da esfera e proceder a equalização dos mesmos, foi utilizado um paquímetro de 150mm com precisão de 0,05mm, marca Mitutoyo.

Com a utilização do transdutor linear fixado diretamente no punção e da célula de carga acoplada no punção, a *profundidade de penetração do punção* pôde ser medida em função de seu deslocamento e desse modo foram obtidos resultados da *força de indentação* em função da *profundidade de penetração*. Para obtenção “on line” dos resultados dos ensaios, o transdutor linear e as células de carga foram conectados ao sistema de aquisição de dados Spider 8 – Catman. Com o dispositivo descrito foi possível levantar a curva *força de indentação x profundidade* para todos os experimentos e os resultados encontrados são apresentados e discutidos no próximo capítulo.

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

Desde que a tensão de escoamento do material a ser cravado é uma função somente da deformação, pode-se considerar que o valor da velocidade de avanço do punção não afeta o comportamento da deformação ou da *força de indentação*, (Shirgaokar *et al.*, 2001).

Considerando essa premissa, e os valores das *profundidades* utilizadas nos ensaios (0,50 e 0,85mm), e objetivando obter precisão na forma da curva *força de indentação x profundidade da indentação*, foi adotada uma velocidade média de avanço do punção igual a 0,25mm/s, com uma frequência de aquisição de dados de 1/25 segundo.

O material utilizado para os ensaios de cravamento a frio foi o aço AISI 12L14 equivalente ao 9SMnPb28 – DIN1651 – laminado a quente, tabela 1, que é um aço recomendado para usinagem em tornos automáticos, de alta velocidade, utilizados na produção seriada de peças de pequeno e médio porte. A análise por micro-sonda no MEV comprovou a composição especificada para esse material.

Tabela 1 – Composição Química do Aço AISI 12L14 - MATWEB, 2006.

Classificação	Composição Química ( % de massa )					
	C	Fe	Mn	P	Pb	S
Especificação AISI 12L14 (9SMNPB28)	Max. 0,15	97,91- 98,70	0,85 - 1,15	0,04 - 0,09	0,15 - 0,35	0,26 - 0,35
Valores encontrados na micro-sonda pelo MEV	NA	98,67	0,85	NA	0,30	NA

A faixa de dureza medida para esse material foi de 114 a 140 HB e esses resultados com o durômetro Otto Wolpert-Werke GmbH, tipo Testor HT Super, ano 1972, carga de 187,5 kgf e esfera de 2,5mm de diâmetro. Como essa variação da dureza é normalmente encontrada em um lote de produção de mesma corrida de laminação, obedecendo a uma variação estatística normal, foi assumido que essa faixa de variação é uma condição inerente ao processo, considerando-se também o fato de que para um controle da faixa de dureza menor que 25 Brinell tornaria o processo custoso e inviável em função de ser necessária a inspeção da dureza em praticamente em 100% das peças.

A rugosidade nos corpos de prova foi obtida por torneamento, com rugosidade em torno de 3,00  $\mu\text{m}$ , objetivando uma condição econômica e que permita o fácil deslizamento dos punções que conformarão o cravamento.

Cada variável foi avaliada em dois níveis num planejamento fatorial fracionado  $2^{6-1}$ , tendo como variável de resposta a *força de indentação*, realizando-se apenas um ensaio para cada uma das combinações fatoriais, experimento fatorial  $2^{6-1} - \frac{1}{2}$  fracionado.

O valor considerado como resultado de cada ensaio foi a máxima *força de indentação* medida em cada combinação, de modo que foi possível avaliar qual a combinação de níveis exigiu maior quantidade de energia para que o cravamento fosse executado.

Com relação à variável *geometria do punção* foram levados em consideração a superfície da indentação e o volume de material deslocado em função da profundidade da indentação.

Como proposto no plano de trabalho inicial, a *força de extração* da esfera é uma variável de resposta importante, pois pode ser associada à força de extração da haste do freio que é um dos requisitos do produto. Para avaliar essa *força de extração* foi empregado o mesmo dispositivo já apresentado inicialmente, utilizando-se um punção para empurrar a esfera pelo furo de menor diâmetro do CP e a célula de carga de 100 kN para medir a *força de extração* com precisão de 0,05%. A velocidade de extração adotada foi de 0,40 mm/s com frequência de aquisição dos dados igual a 1/25 segundos.

Considerando que os resultados obtidos nos ensaios de cravamento para a variável geometria do punção apresentaram uma condição crítica de conformação para a forma quadrada, isto é, uma maior força de indentação, foi então fixada a variável *geometria do punção* no nível forma esférica de raio igual a 1mm.

Portanto, para esses ensaios foram consideradas cinco variáveis de influência: *espessura do tubo; profundidade; folga para indentação; rugosidade e diâmetro da esfera*, sendo que cada uma das variáveis foi avaliada em dois níveis num planejamento fatorial fracionado  $2^{5-1}$ .

Após os ensaios de cravamento, foram utilizados os mesmos Cps para medição da *folga entre a esfera e o diâmetro interno do tubo*, sendo também consideradas as seis variáveis de influência definidas inicialmente, tendo como variável de resposta a *folga da esfera*.

Para verificação da presença de trincas passantes após o cravamento, foi realizado o *ensaio de vazamento* em todos cps descritos nos experimentos fatoriais fracionados e experimentos aleatorizados por níveis. Para o ensaio de vazamento foi utilizada uma rede de vácuo industrial mantida por uma bomba de vácuo marca Dositec, modelo DVM 250/100 - ano de fabricação: 04/2001 e o monitoramento da estabilização e queda de pressão foram feitos através da utilização de manômetro de vácuo.

## 5. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A simulação numérica foi feita considerando as variáveis de influência: *espessura do tubo*, *folga para indentação*, *geometria do punção* e *diâmetro da esfera* obedecendo aos mesmos níveis que foram utilizados no planejamento experimental, como pode ser visto na tabela 2.

Tabela 2 – Ensaios simulados numericamente.

	Ensaio	Espessura do Tubo (mm)	Folga para Indentação (mm)	Geometria do Punção Raio (mm)	Diâmetro da Esfera (mm)
<b>Punção Quadrado</b>	3	0,85	0,25	0	12
	4	1,25	0,25	0	7
	7	0,85	0,75	0	7
	8	1,25	0,75	0	12
<b>Punção Esférico</b>	19	0,85	0,25	1	7
	20	1,25	0,25	1	12
	23	0,85	0,75	1	12
	24	1,25	0,75	1	7

Para a análise do método numérico, foi levantada a curva *força de indentação X profundidade da indentação*, e foi considerado como profundidade máxima o valor de 0,85mm.

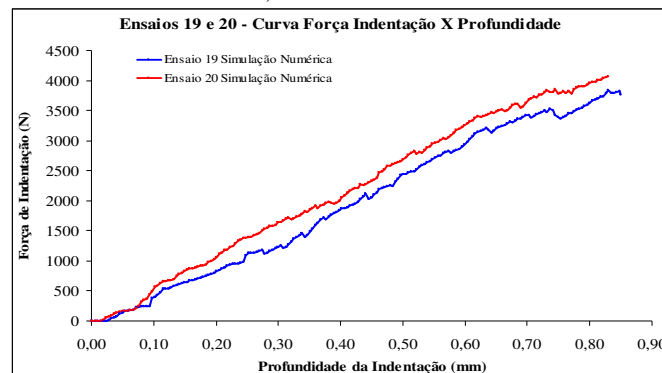


Figura 6 – *Força de indentação x profundidade da indentação*, ensaios 19 e 20.

A figura 6 apresenta os resultados de *força de indentação* em função da *profundidade da indentação* para um punção esférico e têm-se os ensaios 19 e 20, que possuem em comum a *folga para indentação* que é 0,25mm. Nesses ensaios, a inclinação das curvas é uniforme até a profundidade de 0,85mm, não apresentando pontos de inflexão.

O ensaio 20, embora apresente uma curva com mesma inclinação do ensaio 19, possui um nível mais alto de força e que está relacionado à maior *espessura da parede do tubo* utilizada nesse ensaio.

Na tabela 3 são apresentados os resultados da simulação numérica.

Nessa tabela consta para cada ensaio, a *força máxima de indentação*, a *tensão efetiva máxima*, a *relação tensão efetiva máxima / tensão de escoamento* e a *deformação plástica efetiva*.

Todos os parâmetros apresentados na tabela de resultados apresentam o mesmo efeito na energia de deformação, i.e., os valores de cada parâmetro aumentam conforme a profundidade da indentação aumenta, o que permite então o cálculo de um fator que relaciona esses parâmetros, denominado *fator de intensidade (Fi)*, que obedece a seguinte igualdade:

$$Fi = \frac{FI_{\max} \cdot \sigma_{\text{efet. max}} \cdot \epsilon_{\text{efet}}}{\sigma} \quad [4.1]$$

Em função do *fator de intensidade*, pode-se dizer que os ensaios 19, 03, 20 e 04 apresentaram na simulação numérica as maiores solicitações. A variável comum a esses ensaios é a *folga de indentação* de 0,25mm, que causa uma maior deformação do material e pode provocar o aparecimento de trincas passantes.

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

Na análise experimental foram realizados três conjuntos de ensaios. O primeiro conjunto de ensaios de cravamento relativos ao experimento fatorial fracionado I teve por objetivo analisar seis variáveis de influência mencionadas inicialmente e tem como variável de resposta a *força de indentação* (N).

Tabela 3 – Resumo dos resultados da simulação numérica.

Resultados da Simulação Numérica					
Ensaio	Força de Indentação Máxima $F_{Imax}$ (N)	Tensão Efetiva Máxima $\sigma_{efet.max}$ (MPa)	Relação $\sigma_{efet.max} / \sigma_0$	Deformação Plástica Efetiva Máxima $\epsilon_{p\ efet}$	Fator de Intensidade ( $F_i$ ) x $10^3$ N
3	3242	875,20	3,72	0,904	10,91
4	3116	852,40	3,63	0,722	8,16
7	1929	780,80	3,32	0,441	2,83
8	2146	758,20	3,23	0,367	2,54
19	3838	878,70	3,74	0,938	13,46
20	4073	820,50	3,49	0,598	8,50
23	2047	750,30	3,19	0,343	2,24
24	3028	783,80	3,34	0,448	4,52

Principais Efeitos para: Força de Indentação (N)

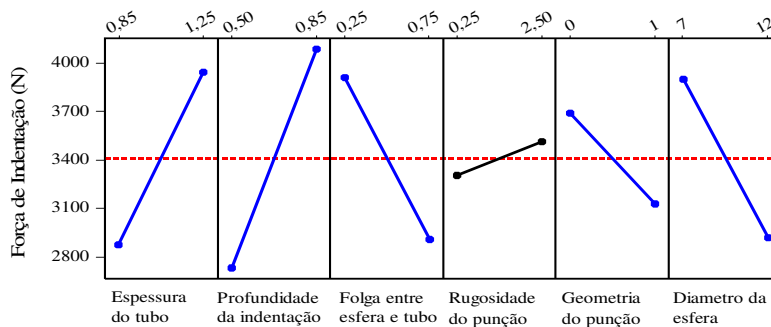


Figura 7 – Gráfico dos principais efeitos sobre a força de indentação

Na figura 7 são destacados em cor azul os efeitos das variáveis de maior significância no processo de cravamento, nesse experimento, embora o total de amostras seja 32, inferior a 50 observações que é um valor adequado para avaliar a normalidade pelo histograma, observa-se um alto grau de normalidade, como se verifica na figura 8.

Histograma dos Resíduos

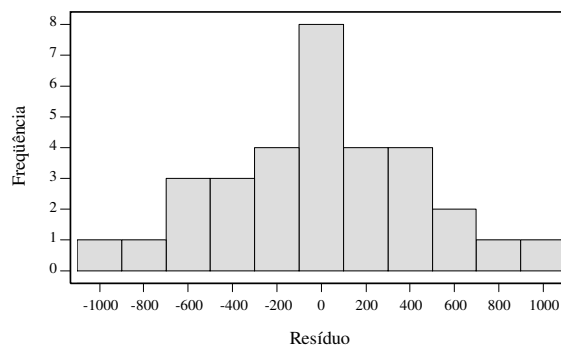


Figura 8 – Histograma dos resíduos sobre a *força de indentação*.

Este fato mostra consistência que houve na escolha das variáveis e que a faixa de Dureza utilizada (114 a 135 HB) não representa uma variável de influência significativa. Considerando que para os experimentos realizados não houve replicações das amostras e com a finalidade de confirmar os resultados obtidos nos experimentos fatoriais fracionados, foram realizados experimentos aleatorizados por níveis - PAN.



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

A figura 9 apresenta as curvas *força de indentação x profundidade* obtidas para alguns níveis estabelecidos para a variável de influência *folga para indentação*, sendo a espessura do tubo: 0,85mm.

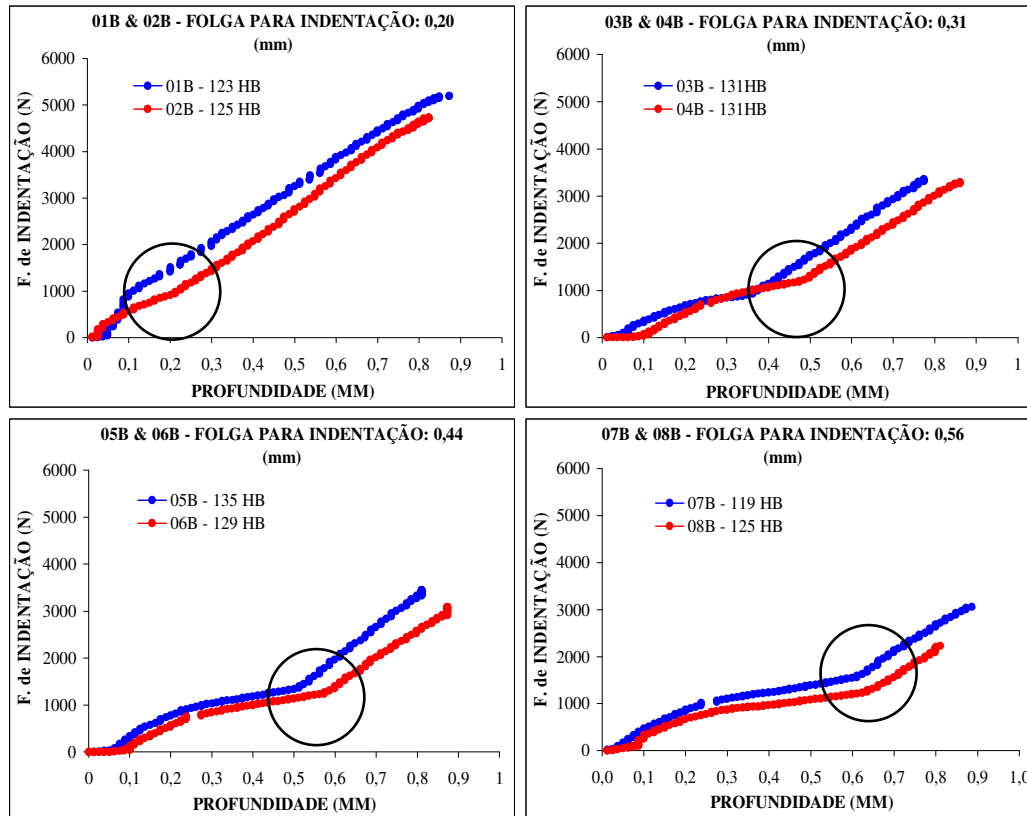


Figura 9 – Curvas de *força de indentação x profundidade* correspondendo as *folgas para indentação* de: 0,20; 0,31; 0,44 e 0,56mm. *Espessura do tubo*: 0,85mm.

O ponto de inflexão identificado na figura 9 relaciona-se com a profundidade em que a curva tem um aumento de inclinação, que ocorre após o contato do material sobre a superfície da esfera, o que caracteriza uma maior energia de deformação no processo, que poderá causar a nucleação de trincas, e portanto, deve ser evitada. As mesmas observações mencionadas para o experimento realizado para espessura de 0,85mm quanto aos pontos de inflexão são também verificadas para a espessura de 1,25mm.

No segundo conjunto de ensaios, para a extração da esfera e medição da *força de extração* foram considerados os seguintes aspectos: o resultado do primeiro conjunto de ensaios de cravamento, em que se observa uma maior solicitação à resistência do material para o punção de forma quadrada e o alto custo dos cps utilizados nos experimentos. Assim, para todos os ensaios adotou-se para a variável de influência *geometria da punção*, a forma esférica. Foi medida a profundidade de indentação de cada cp após o levantamento das curvas de *força de indentação X profundidade* e estabelecido os níveis corretos de profundidade para a variável de resposta *força de extração da esfera*.

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

Principais Efeitos para: Força de Extração (N)

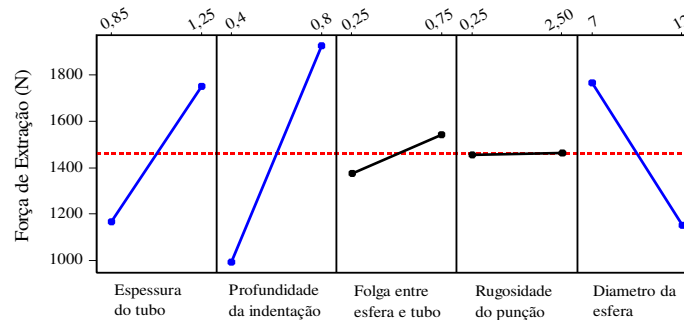


Figura 10 – Gráfico dos principais efeitos sobre a *força de extração*.

Na figura 10, com significância de 10% as variáveis de influência: *espessura de parede do tubo*, *profundidade de indentação*, e *diâmetro da esfera* são causas de variações na *força de extração*.

No terceiro conjunto de experimentos a variável de resposta *Folga da Esfera*, com significância de 10%, teve como variáveis de influência: *profundidade de indentação*, *diâmetro da esfera* e *folga para indentação* são causas de variações na *folga da esfera* após cravamento. Na figura 11 são destacados em cor azul os efeitos de maior significância para esta variável.

Principais Efeitos para: Folga da Esfera (mm)

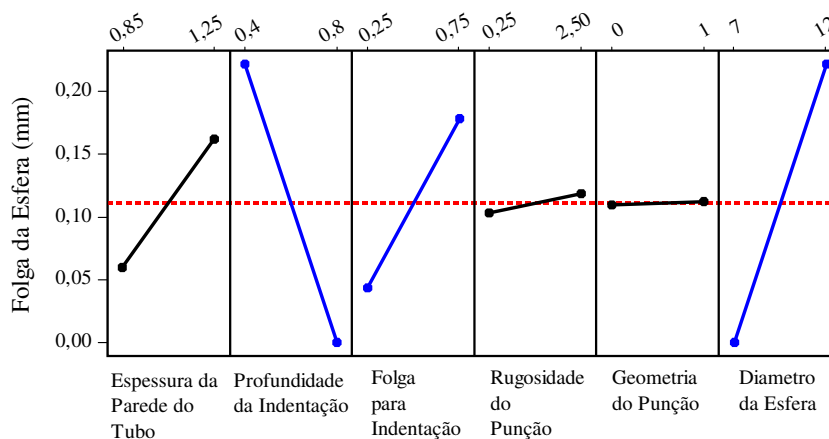


Figura 11 – Gráfico dos principais efeitos, destacando-se as variáveis de maior influência sobre a *folga da esfera*.

Uma vez obtidos os resultados pelo método numérico e pelo método experimental, apresentados na tabela 4, foi possível fazer uma análise comparativa entre os mesmos.

Comparando-se esses valores, tabela 4.3, observa-se para o punção de forma quadrada uma grande diferença entre os resultados obtidos.

Para esse punção, as *forças de indentação* obtidas no método numérico para as amostras 03, 04, 07 e 08 na profundidade de 0,85mm são de 31 a 48% menor que as *forças de indentação* obtidas no método experimental.

Em contra partida, para o punção esférico os resultados obtidos para as *forças de indentação* são mais próximos, sendo que para as curvas das amostras 19 e 20, a diferença entre os resultados obtidos para a *profundidade de indentação* de 0,85mm variou de 2 a 9%.

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

Tabela 4 – Força de indentação obtida para métodos numérico e experimental, considerando a *profundidade de indentação* igual a 0,85mm.

	Número do Ensaio	Espessura do Tubo (mm)	Folga entre Esfera e D. Interno do Tubo (mm)	Geometria do Punção Raio (mm)	Diâmetro da Esfera (mm)	Força de Indentação M.Numérico (N)	Força de Indentação M. Experimental (N)	Diferença no Resultado (N)	Diferença no Resultado (%)
<b>P. Quadrado</b>	3	0,85	0,25	0	12	3190	4605	1415	31%
	4	1,25	0,25	0	7	3115	5763	2648	46%
	7	0,85	0,75	0	7	1914	3680	1766	48%
	8	1,25	0,75	0	12	2142	3521	1379	39%
<b>P. Esférico</b>	19	0,85	0,25	1	7	3838	4237	399	9%
	20	1,25	0,25	1	12	4073	4164	91	2%
	23	0,85	0,75	1	12	2040	1695	-345	20%
	24	1,25	0,75	1	7	3037	4427	1390	31%

## 6. CONCLUSÕES

### *Conclusões dos Resultados dos Experimentos Fatoriais Fracionados*

Considerando que a qualidade e a segurança dos resultados estão implícitas nos altos índices de significância estatística alcançados nos experimentos, concluiu-se que:

1. A variável *diâmetro da esfera* tem diferentes efeitos sobre as variáveis de resposta estudadas. Considerando que o requisito funcional do projeto de ausência de trincas passantes seja primordial, a utilização de esfera com diâmetro de 12mm é recomendável no processo de cravamento em relação à esfera de 7mm, pois apresenta menores *forças de indentação*, o que deve causar um acúmulo de tensões internas logo abaixo da indentação. Todavia quando se deseja um aumento na *força de extração da esfera* e redução da *folga da esfera*, a esfera de 7mm apresenta melhores resultados;
2. As variáveis *espessura do tubo* e *folga para indentação* devem ter um controle mandatório no processo de cravamento, pois são características críticas, já que apresentam influência significativa nas variáveis de resposta *força de indentação* e *força de extração da esfera*;
3. A variável de *influência geometria* do punção tem influência significativa na *força de indentação*, sendo que a forma esférica oferece uma menor *força de indentação* e portanto é recomendável que os punções cravadores possuam formas arredondadas;
4. A variável de influência *profundidade de indentação* é a variável de maior influência na *força de indentação*. Assim, no processo de cravamento deve-se buscar a máxima profundidade admissível para garantir a não formação de fissuras.
5. As variáveis de influência: *profundidade de indentação*, *diâmetro da esfera* e *folga para indentação* são causas de variações na *folga da esfera* após cravamento.
6. Para o dimensionamento das especificações de processos para um dado *diâmetro de esfera*, num processo de cravamento similar ao apresentado, dev ser considerado: o *posicionamento* e *profundidade da indentação*, tomando-se o cuidado em considerar a *folga para indentação* necessária para dar liberdade à conformação do material sem gerar acúmulo de tensões indesejáveis que poderão gerar fissura ou trincas, maximizando a *força de extração* da esfera através do aumento da *espessura do tubo* e permitindo uma folga entre o tubo e a esfera adequada de 0,05mm a 0,15mm em função do controle da *profundidade da indentação*.

### *Conclusões dos Resultados do Método Numérico*

1. Tanto a *força de indentação* como a *tensão efetiva* e a *deformação plástica efetiva* foram maximizadas quando utilizado o valor mínimo para a variável de influência *folga para indentação*. Utilizando o índice *fator de intensidade* concluiu-se que a variável *folga para indentação* é a de maior influência na *força de indentação*, *tensão efetiva* e

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

*deformação efetiva* quando comparada com as variáveis de influência: *espessura da parede do tubo e forma geométrica do punção*.

2. Em análise comparativa entre o método numérico e o método experimental, foi verificado uma significativa diferença entre os resultados obtidos para punção de *forma quadrada*. Para o punção de *forma quadrada* a diferença de resultado chegou a 48% enquanto que para o punção de *forma esférica* a forma da curva *força de indentação x profundidade* e a *força de indentação* foram muito próximos: dois ensaios com diferença da *força de indentação* abaixo de 10% e dois ensaios com a *força de indentação* sendo 20 e 30% diferentes dos correspondentes ensaios experimentais. Conclui-se que o modelo numérico apresentado com a utilização do software MSC.Superforge 2005 não apresentou equivalência de resultado para a *força de indentação* quando se utiliza punção de *forma quadrada*.

## 7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pelo auxílio financeiro que permitiu a concretização desta pesquisa.

## 8. REFERÊNCIAS

- [1] Ciavarella, M., Hills, D.A., Monno, G., The influence of rounded edges on indentation by a flat punch, *Instn Mech Engrs*, (1997), pp. 319-327.
- [2] Dini, D., Nowell D., Prediction of the slip zone friction coefficient in flat and rounded contact, *Wear* 254 (2003), pp. 364-369.
- [3] Lee, B.H., Keum, Y.T., Wagoner, R.H., Modeling of the friction caused by lubrication and surface roughness in sheet metal forming, *Journal of Material Processing Technology* 130-131 (2002), pp. 60-63.
- [4] Murty, K.L., Mathew, M.D., Miraglia, P. Q., Shah, V.N., e Haggag, F.M, Non-destructive evaluation and fracture properties of materials using stress-strain microprobe, North Caroline State University, Materials Research Society, Pennsylvania, USA (1998), pp. 327-337.
- [5] Mushkelishvili, N.I., *Singular Integral Equation* (Traduzido por Radock, J.R.M.) – Noordhoff International Publishing (1977), in.
- [6] Montgomery, D.C., *Design and Analysis of Experiments*, 3<sup>a</sup> ed., John Wiley and Sons, 1991, in.
- [7] Shirgaokar, M., Cho H., Ngaile G., Altan, T., Yu, J.-H., Balconi J., Rentfrow R., Worrell, W.J. Optimization of mechanical crimping to assemble tubular components, *Journal of Materials Proc.Technology* 146 (2004), pp.35-43.

## 9. DIREITOS AUTORAIS

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

# NUMERICAL AND EXPERIMENTAL ANALYSIS OF THE INDENTATION OF TUBULAR STEEL COMPONENTS WITH SPHERICAL-ENDED PUNCHES

**João Emmanuel Soffiati**

State University of Campinas - DEMA-FEM-UNICAMP, CP 6122, 13083-970 – Campinas – SP  
[sofft@terra.com.br](mailto:sofft@terra.com.br)

**Sérgio Tonini Button**

State University of Campinas - DEMA-FEM-UNICAMP, CP 6122, 13083-970 – Campinas – SP  
[sergio1@fem.unicamp.br](mailto:sergio1@fem.unicamp.br)

**Abstract.** *Indentation is a cold metal forming process that presents low costs and avoids the use of a forming die since just a punch is necessary. During indentation a small cap is formed on the spherical support surface of the mechanical component being deformed. This process is applied in the design of components that need to transmit rotation, like in joining stems of brake pedals and in similar mechanisms of machine-tools. For vehicular brakes the joining clearance is very important because if it is less than 0.02 mm the brake movement will be restrained affecting all the breaking system; if that clearance is greater than 0.15 mm the brake would become excessively noisy. Another problem with this*

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

*system is the presence of cracks generated by the wrong choice of indentation process parameters. Usually these parameters are not specified in the product design leading to high process variability. This work presents the analysis of indentation with spherical-ended punches to define the main factors that affect the process. Six factors were chosen to start the analysis: punch geometry, surface roughness of the punch, diameter of the punch end, thickness of the tubular component, indentation depth, and position of indentation load. A mathematical model based on the slab method was built to this analysis. The results of this model were compared to results obtained with the software MSC.Superforge 2005 and to results from experimental tests held in a device especially designed and assembled for this work.*

**Keywords:** indentation, numerical method, metal forming

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