

Uso do método dos tubos para calcular esforços compressivos no forjamento em matriz fechada

Fábio Junkes Corrêa, LdTM - UFRGS, Porto Alegre/RS
Lírio Schaeffer, LdTM - UFRGS, Porto Alegre/RS

Esse trabalho procura mostrar a sequência de cálculos e as interações realizadas para a construção de um modelo matemático a partir da Teoria Elementar da Plasticidade (TEP) para o processo de forjamento em matriz fechada. A TEP foi aplicada para dois corpos de prova cilíndricos de dimensões distintas e com volumes equivalentes. Ambos os corpos de prova foram forjados em matriz fechada, formando um flange conforme as dimensões da matriz empregada no forjamento. Por fim, obtiveram-se os valores dos esforços de compressão requeridos pela prensa de forjamento para ambos os casos, diferenciando-se por apresentar geometrias iniciais diferentes

Forjamento é um processo de conformação mecânica na qual um corpo metálico é submetido a esforços de compressão com o objetivo de deformar o material conforme a geometria propositada pelas matrizes.

Esse processo de conformação pode ser classificado como forjamento em matriz aberta ou em matriz fechada. No forjamento em matriz aberta, o corpo de prova é conformado entre duas matrizes de geometrias relativamente simples de modo que apenas uma parcela do corpo seja conformada pelas matrizes, enquanto que no forjamento em matriz fechada o corpo de prova é completamente envolvido pelas matrizes.

No primeiro caso o material conformado escoar de forma livre, já no segundo caso o material escoar de forma restrita pelas matrizes que envolvem o material [1]. Em meados dos anos 30 e 40, estudavam-se métodos numéricos baseados em teorias consistentes da plasticidade. As teorias baseadas na plasticidade foram desenvolvidas em função do carregamento e do escoamento, a partir de incrementos de tensões e deformações durante o forjamento.

Entretanto, os valores resultantes da teoria da plasticidade se processam em função do carregamento que depende da tensão, da deformação e de outros fatores adversos. No entanto, existem casos onde não são necessários programas computacionais por simulação numérica para a determinação dos valores de força e trabalho de conformação, possibilitando a aplicação de modelos matemáticos baseados na teoria da plasticidade [2].

Diversos pesquisadores têm usado diferentes métodos de análise para estudar o fluxo de metal durante o processo de conformação mecânica e estimar a carga de forjamento requerida para a operação. Esses métodos podem ser classificados como métodos analítico e numérico. Os resultados dos métodos experimentais vêm com o propósito de validar esses métodos em questão. Entretanto, tanto métodos matemáticos como numéricos têm como propósito reduzir o custo dos experimentos [3].

Em meios acadêmicos, medidas de otimização são estudadas com o propósito de reduzir custos nos processos de fabricação mecânica nas indústrias. Uma medida encontrada para a otimização dos processos é a simulação numérica. O uso da Teoria Elementar da Plasticidade (TEP) como método de otimização surge como alternativa

à simulação numérica. As noções básicas da TEP surgiram no ano de 1925 com Siebel e Karman para solucionar problemas de laminação. Nos anos seguintes Sachs estendeu a teoria para os processos de trefilação e extrusão, enquanto que Siebel e Pomp estenderam para o forjamento.

No desenvolvimento desta teoria, certas condições são consideradas. As ferramentas de trabalho possuem simetria para a formação de uma peça forjada simétrica, as massas e forças de inércia das ferramentas podem ser desprezadas, dentre outras. A tensão de escoamento k_f é dada em função da deformação (ϕ), da velocidade de deformação ($\dot{\phi}$) e da temperatura (θ) [4].

A Figura 1 mostra um elemento infinitesimal em uma peça conformada para os três métodos conhecidos da TEP:

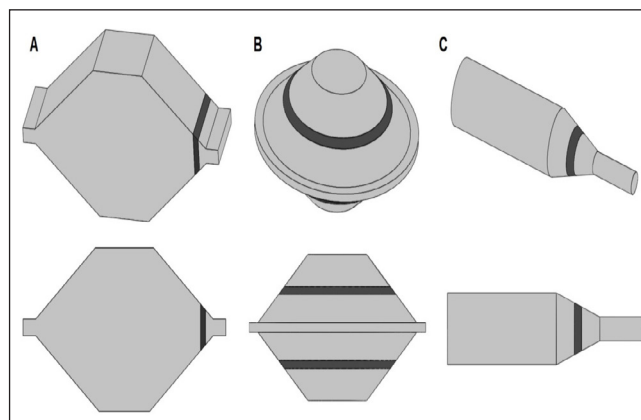


Figura 1. Representação de um elemento infinitesimal em uma peça conformada. a) Peça conformada de simetria plana (uso do método das tiras). b) Peça forjada em matriz fechada (uso do método dos tubos). c) Peça extrudada ou trefilada (uso do método dos discos).

A partir da análise do equilíbrio de forças numa zona de qualquer geometria, chega-se a uma equação diferencial ordinária (EDO) de 1ª ordem. A Figura 2 mostra a decomposição das tensões para uma tira infinitesimal, selecionada do componente forjado mostrado na Figura 1.a:

Cálculo de Esforço Compressivo no Forjamento

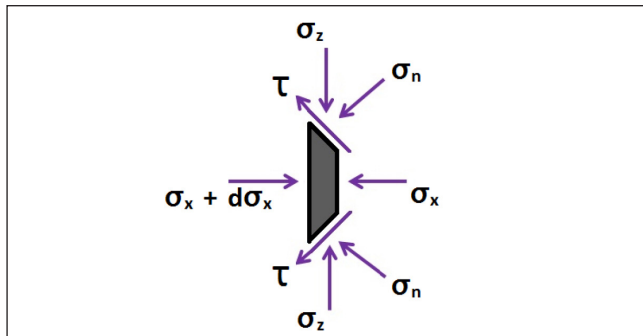


Figura 1.a. Decomposição das tensões de uma tira infinitesimal

Dependendo da geometria do componente a ser forjado, podem-se apresentar uma simetria plana ou axial, utiliza-se o método adequado a sua geometria. Nesta lógica, faz-se a discretização em elementos na forma de tiras, discos ou tubos, podendo prever o esforço em cada segmento. Para geometrias planas, usa-se o Método das Tiras (Figura 1.a) e, para simetria axial, usa-se o Método dos Tubos ou dos Discos, diferenciando-se conforme o tipo de conformação. Para cada método há uma equação adequada como [5]:

$$\frac{d\sigma_x}{dx} + \frac{2}{h} \cdot \sigma_x [\tan(\alpha + \rho) - \tan(\alpha)] - \frac{2}{h} \cdot k_f \cdot \tan(\alpha + \rho) = 0 \quad \text{Método das Tiras} \quad (1)$$

$$\frac{d\sigma_x}{dx} + \frac{2}{r} \cdot \sigma_x [\tan(\alpha + \rho) - \tan(\alpha)] - \frac{2}{r} \cdot k_f \cdot \tan(\alpha + \rho) = 0 \quad \text{Método dos Discos} \quad (2)$$

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{2}{h} \cdot \sigma_r [\tan(\alpha + \rho) - \tan(\alpha)] - \frac{2}{h} \cdot k_f \cdot \tan(\alpha + \rho) = 0 \quad \text{Método dos Tubos} \quad (3)$$

O Método das Tiras pode ser usado para o processo de laminação ou forjamento, onde há geometrias planas simétricas; o Método dos Discos se enquadra melhor para os casos de extrusão ou trefilação e; o Método dos Tubos se adequa ao forjamento em matriz fechada com geometrias simétricas [5].

Neste trabalho, o método utilizado para desenvolvimento do procedimento matemático foi o método dos tubos (Equação 3), visto que este método é adequado ao forjamento em matriz fechada, tratando-se de uma geometria simétrica.

Antes de resolver a equação diferencial é necessário o conhecimento da temperatura, a determinação das deformações (Equação 4) e das velocidades de deformações (Equação 5) para poder encontrar o valor da tensão de escoamento (Equação 6) e, com isso, calcular as tensões localizadas do corpo forjado [5]. As deformações (ϕ) em cada elemento são calculadas por:

$$\phi_i = \ln \frac{h_0}{h_i} \quad (4)$$

Onde,

$$h_0 \text{ [mm]} = \text{Altura inicial}$$

$$h_i \text{ [mm]} = \text{Altura instantânea}$$

As velocidades de deformações ($\dot{\phi}$) em cada elemento são calculadas por:

$$\dot{\phi}_i = \frac{v_m}{h_i} \quad (5)$$

Onde,

$$h_i \text{ [mm]} = \text{Altura instantânea}$$

$$v_m \text{ [m/s]} = \text{Velocidade da ferramenta}$$

A tensão de escoamento em cada elemento (kfi) é calculada por:

$$kfi = kf_0 \cdot e^{-m_1 \cdot T} \cdot \phi_i^{m_2} \cdot \dot{\phi}_i^{m_3} \quad (6)$$

Onde,

kfi [-] = Tensão de escoamento;
 kf_0 [-] = Tensão de escoamento inicial;
 T [°C] = Temperatura da peça a ser forjada;
 ϕ [-] = Deformação verdadeira;
 $\dot{\phi}$ [s⁻¹] = Velocidade de deformação;

Os valores de m_1 , m_2 , e m_3 são constantes características do material obtidas através de regressão matemática de uma curva experimental. Dependendo do material usado, essas constantes podem apresentar valores distintos [6].

A equação diferencial para o Método dos Tubos (Equação 3) pode ser simplificada em duas parcelas e resolvidas de forma independente segundo as Equações 7 e 8:

$$g(r_i) = \frac{2}{h_i} \cdot kfi \cdot \tan(\alpha + \rho) \quad (7)$$

$$f(r_i) = \frac{2}{h_i} [\tan(\alpha + \rho) - \tan(\alpha)] \quad (8)$$

Resolvendo-as, possibilita a resolução da equação diferencial para o Método dos Tubos, calculando, deste modo, a variação da tensão radial (Equação 9) de um elemento em relação ao posterior:

$$\frac{\Delta\sigma_{r_i}}{\Delta r_i} + f(r_i) \cdot \sigma_{r_i} - g(r_i) = 0 \quad \Delta\sigma_{r_i} = \Delta r_i \cdot [g(r_i) - f(r_i) \cdot \sigma_{r_i}] \quad (9)$$

Entretanto, determinando-se as variações das tensões localizadas radiais de um tubo ao subsequente, obtém-se a tensão radial naquele determinado tubo, segundo a Equação 10:

$$\Delta\sigma_{r_i} = \sigma_{r_i} - \sigma_{r_{i-1}} \quad \sigma_{r_i} = \Delta\sigma_{r_i} + \sigma_{r_{i-1}} \quad (10)$$

A aplicação da Teoria de Henri Tresca, a partir da tensão radial e da tensão de escoamento de um determinado tubo, permite calcular a tensão normal (Equação 11) desse tubo:

$$\sigma_{z_i} = \sigma_{r_i} - kfi \quad (11)$$

Com a tensão normal obtida em um determinado tubo, é calculada a tensão normal média (Equação 12) do tubo anterior com o seu subsequente:

$$\bar{\sigma}_{z_i} = \frac{\sigma_{z_i} + \sigma_{z_{i-1}}}{2} \quad (12)$$

Por fim, com as tensões localizadas média na direção normal à peça conformada, calcula-se a área superficial de contato (Equação 13) do tubo e, com isso, o esforço em cada tubo (Equação 14), possibilitando fazer um somatório para determinar o esforço máximo de forjamento da peça forjada:

$$\Delta A_i = \pi \cdot (r_i^2 - r_{i-1}^2) \quad (13)$$

$$F_i = \bar{\sigma}_{z_i} \cdot \Delta A_i \quad (14)$$

Cálculo de Esforço Compressivo no Forjamento

Metodologia

Como mostra a Figura 3, foram selecionados dois tarugos cilíndricos (tarugo a e tarugo b) de dimensões distintas, porém com volumes equivalentes.

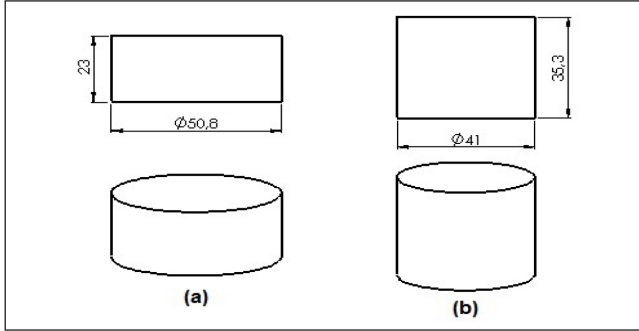


Figura 3. Decomposição das tensões de uma tira infinitesimal

Em ambos os corpos de prova, os cálculos foram procedidos para a mesma matriz (Figura 4), com a obtenção da mesma forma final, porém com valores de deformações e tensões diferentes em função das dimensões iniciais.

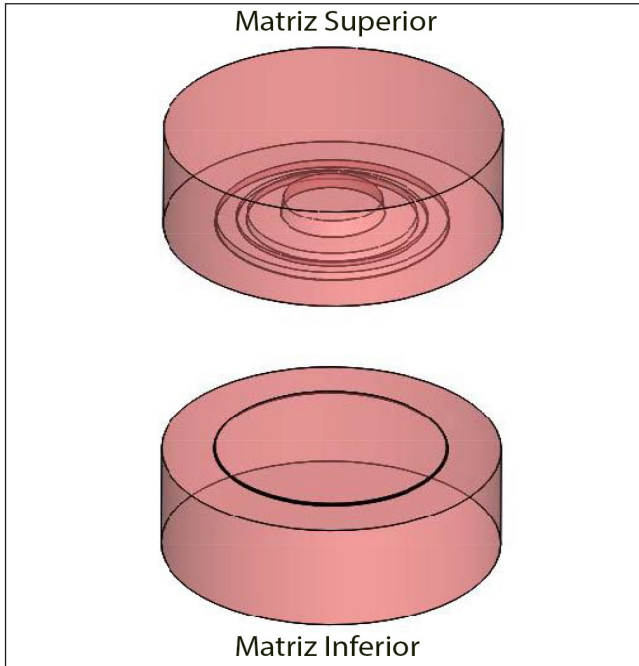


Figura 4. Matrizes para obtenção da forma final dos corpos de prova

Para a inicialização do procedimento matemático da TEP são necessários os dados de entrada, como os dados do material indicados na Tabela 1 e os dados do processo indicados na Tabela 2.

Tabela 1 - Dados do Alumínio AA 6351	
m_1	0,0043
m_2	0,055
m_3	0,089
Tensão de Escoamento inicial (kf_0)	299,7 N/mm ²

Fonte: Hensel & Spittel, 1978

Tabela 2 - Dados de entrada.	
Temperatura da matriz (T_{matriz})	150 °C
Temperatura da peça ($T_{peça}$)	450 °C
Dimensões do Tarugo a	ø50,8x23mm
Dimensões do Tarugo b	ø41x35,3mm
Velocidade da ferramenta (v_m)	6,7 mm/s
Atrito interfacial (μ)	0,4

O forjamento a quente foi considerado a uma temperatura acima da temperatura de recristalização e o atrito interfacial entre as matrizes e a peça foi estabelecido um valor significativamente elevado, devido às possíveis carepas que se formam durante o forjamento e não possuir lubrificação. Com a peça forjada em matriz fechada, obtém-se a peça flangeada (Figura 5). A partir das dimensões finais da peça forjada é aplicada a TEP.

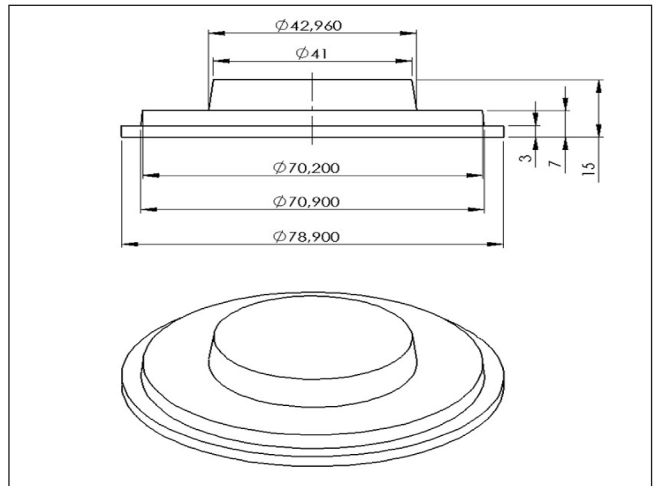


Figura 5. Flange após o forjamento do tarugo cilíndrico

Como ponto de partida, a peça é discretizada (Figura 6), dividindo-a em 22 tubos concêntricos. Com o valor do raio de cada tubo é calculado a variação radial de um tubo em relação ao seu subsequente. Essas variações radiais são usadas na Equação 9, onde se usa $\Delta r_i (r_i - r_{i-1})$ para calcular as variações das tensões nos tubos.

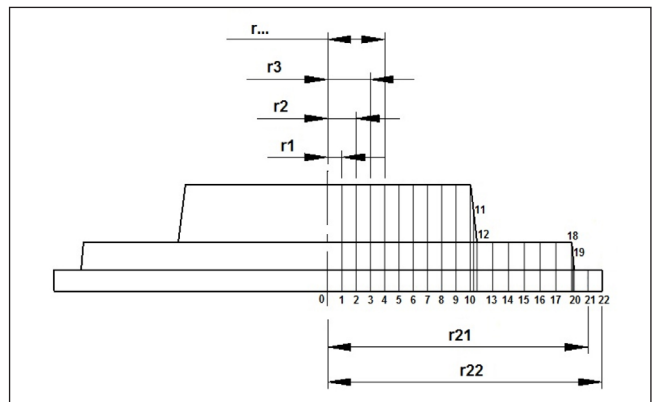


Figura 6. Discretização do Flange.

Cálculo de Esforço Compressivo no Forjamento

Resultados

A partir da equação ordinária diferencial para o método dos tubos (Equação 3), inicia-se procedimento matemático, aplicando-se as equações subsequentes, visando calcular o esforço em cada tubo concêntrico.

O procedimento é executado de forma sequencial, sendo que cada estágio subsequente depende dos dados anteriores para prosseguir os cálculos. O modelo matemático foi aplicado para ambos os corpos de prova. A Tabela 3 mostra a aplicação dos cálculos, baseadas na TEP, para o corpo de prova de Ø50,8x23mm.

O somatório das forças localizadas em cada tubo permite a determinação do valor da força total de 1.717,9kN ou 174,9 toneladas. Para o corpo de prova de Ø41x35,3mm, a aplicação da TEP está mostrada na Tabela 4. Para o segundo corpo, o somatório das forças localizadas em cada tubo resulta na força total de 1.741,7kN ou 177,4 toneladas.

Conclusões

Com o desenvolvimento da Teoria Elementar da Plasticidade para o forjamento dos dois tarugos cilíndricos, obtiveram-se resultados para cada situação. No entanto, observou-se que o segundo corpo apresentou um valor de esforço total um pouco superior, devido a sua altura inicial ser maior, requerendo, para a formação da peça, maiores deformações localizadas, acarretando em maiores tensões localizadas.

A aplicação da TEP é relativamente simples, podendo se comportar como uma ferramenta de trabalho eficiente nas indústrias quando há o conhecimento pleno do modelo matemático, reduzindo custo de implantação de software de simulação computacional.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Programa Bragecristim do CAPES por apoiar projetos conjuntos de pesquisa entre grupos brasileiros e alemães, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo financiamento das bolsas de pesquisa, ao Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM) e à Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

Referências bibliográficas

- SCHAEFFER, L. Forjamento. 1ª Edição. Porto Alegre – RS: Editora Imprensa Livre, 2001.
- EDELMAN, F.; DRUCKER, D.C. Some extensions of elementary plasticity theory. Journal of the Franklin Institute, Volume 251, Issue 6, Pages 581-605, June 1951.
- FERESHTEH-SANIEE, F.; JAAFARI, M.. Analytical, numerical and experimental analyses of the closed-die forging. Journal of Materials Processing Technology. Volumes 125-126, Pages 334 – 340, September 2002.
- SCHAEFFER, L. Conformação Mecânica. 2ª Edição. Porto Alegre – RS: Editora Imprensa Livre, 2004.
- SCHAEFFER, L.; ROCHA, A. S. Conformação Mecânica: Cálculos Aplicados em Processos de Fabricação. 1ª Edição. Porto Alegre – RS: Editora Imprensa Livre, 2007.
- HENSEL, A.; SPITTEL, T. Kraft- und Arbeitsbedarf bildsamer Formgebungsverfahren. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1978.

Tabela 3 - Resultado dos cálculos de TEP para tarugo de Ø50,8x23mm

Linha i	r _i (mm)	Δr _i (mm)	α _i (rad)	h _i (mm)	φ _i	φ _i ' (S ⁻¹)	k _n (MPa)	g(r _i)	f(r _i)
0	0,00		0,00	15,00	0,43	0,45	38,45	2,05	0,05
1	2,05	2,05	0,00	15,00	0,43	0,45	38,45	2,05	0,05
2	4,10	2,05	0,00	15,00	0,43	0,45	38,45	2,05	0,05
.
.
21	37,45	2,00	0,00	3,00	2,04	2,23	48,35	12,89	0,27
22	39,45	2,00	0,00	3,00	2,04	2,23	48,35	12,89	0,27

Tubo i	σ _{ri} [MPa]	Δσ _{ri} [MPa]	σ _{zi} [MPa]	σ _{zi} ⁻ [MPa]	ΔA _i (mm ²)	F _i (kN)
#	-1402,9	0,0	-1441,3	#	#	#
1	-1260,8	-142,1	-1299,3	-1370,3	13,2	-18,1
2	-1132,8	-128,1	-1171,2	-1235,3	39,6	-48,9
.
.
21	-25,8	-39,5	-74,1	-93,9	458,0	-43,0
22	0,0	-25,8	-48,3	-61,2	483,2	-29,6

Cálculo de Esforço Compressivo no Forjamento

Tabela 4 - Resultado dos cálculos de TEP para tarugo de Ø41x35,3mm

Linha i	r_i (mm)	Δr_i (mm)	α_i (rad)	h_i (mm)	φ_i	$\dot{\varphi}_i$ (S ⁻¹)	k_{fi} (MPa)	$g(r_i)$	$f(r_i)$
0	0,00		0,00	15,00	0,86	0,45	41,28	2,20	0,05
1	2,05	2,05	0,00	15,00	0,86	0,45	41,28	2,20	0,05
2	4,10	2,05	0,00	15,00	0,86	0,45	41,28	2,20	0,05
.
.
21	37,45	2,00	0,00	3,00	2,47	2,23	50,47	13,46	0,27
22	39,45	2,00	0,00	3,00	2,47	2,23	50,47	13,46	0,27

Tubo i	σ_{ri} [MPa]	$\Delta\sigma_{ri}$ [MPa]	σ_{zi} [MPa]	σ_{zi}^- [MPa]	ΔA_i (mm ²)	F_i (kN)
#	-1422,5	#	-1462,5	#	#	#
1	-1278,4	-144,1	-1318,3	-1390,4	13,2	-18,4
2	-1148,4	-129,9	-1188,4	-1253,4	39,6	-49,6
.
.
21	-26,1	-40,0	-74,9	-94,9	458,0	-43,5
22	0,0	-26,1	-48,9	-61,9	483,2	-29,9

FEIMAFE 2013

14ª Feira Internacional de Máquinas-Ferramenta e Sistemas Integrados de Manufatura

3 a 8 Junho 2013

2ª a 6ª das 10h às 19h | Sábado das 9h às 17h

Anhembi | São Paulo - SP

Inovações tecnológicas esperam por você.

Programe-se para visitar a **FEIMAFE**, a principal vitrine com foco em Máquinas-Ferramenta e Controle de Qualidade na América Latina. Aproveite essa oportunidade para pesquisar novos produtos, soluções e tendências, ampliar sua rede de relacionamento e realizar ótimos negócios.

Confira os setores do evento



MÁQUINAS-FERRAMENTA



AUTOMAÇÃO



CONTROLE DE QUALIDADE

INTEGRADO À FABRICAÇÃO



ACESSÓRIOS

DISPOSITIVOS E COMPONENTES



FERRAMENTAS

Venha se surpreender com as novas tecnologias do mercado.

Faça seu credenciamento online gratuito e participe. Disponível até 31/05/2013.

Salve este link no celular ou tablet



Acompanhe as novidades da Feimafe e do setor acessando o site ou o facebook.

www.feimafe.com.br /  www.facebook.com.br/feimafe

Apoio Institucional

Organização e Promoção



CSMF
Câmara Setorial de Máquinas-Ferramenta e Sistemas Integrados de Manufatura

CSHPA
Câmara Setorial de Equipamentos Hidráulicos, Pneumáticos e de Automação Industrial

CSQI
Câmara Setorial de Máquinas, Equipamentos e Instrumentos para Controle de Qualidade Ensaio e Medição



 **Reed Exhibitions Alcantara Machado**



Proibida a entrada de menores de 16 anos, mesmo que acompanhados. Evento exclusivo e gratuito para profissionais do setor que fizerem o seu pré-credenciamento até o dia 31/05/2013 através do site ou apresentarem o convite do evento no local. Caso contrário, será cobrada a entrada no valor de R\$ 55,00 no balcão de atendimento.