

## ESTAMPABILIDADE DOS AÇOS IF E AA PARA APLICAÇÃO AUTOMOTIVA

Marcelo Alves Fonseca, marcelo@unilestemg.br<sup>1</sup>

Willer Bastos Alves, willer\_bastos@yahoo.com.br<sup>1</sup>

José Carlos Lacerda, jlacerda@unilestemg.br<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Centro Universitário do Leste de Minas Gerais, Av. Presidente Tancredo Neves, 3500, Bairro Universitário, Coronel Fabriciano – MG.

**Resumo:** Neste presente trabalho será feito um estudo teórico e experimental sobre a característica de estampabilidade e propriedades mecânicas afins. São reportados aspectos microestruturais, de comportamento mecânico e seus efeitos na formabilidade por estampagem dos aços constituídos de matriz ferrítica para chapas de uso automotivo. Foram realizados ensaios de tração, embutimento pelo método Erichsen e ensaios pelo método de Lankford em corpos de prova do aço livre de intersticiais (IF) e para simples comparação os mesmos ensaios em corpos de prova de aço acalmados ao alumínio. Os resultados obtidos confirmaram melhores propriedades relacionadas a estampabilidade no aço Intersticial-Free (IF) em relação ao aço acalmados ao alumínio.

**Palavras-chave:** Formabilidade, Estampagem profunda, aços AA, Aços IF.

### 1. INTRODUÇÃO

A estampabilidade é uma propriedade tecnológica das ligas metálicas que depende essencialmente da composição química, microestrutura e textura cristalográfica. Tais aspectos exercem efeitos nas propriedades mecânicas dos materiais e portanto no desempenho nas operações de estampagem. A estampabilidade depende também das condições de processamento do material. Conforme Budinski (2002), os aços de qualidade para estampagem são aços laminados a quente ou a frio cujas características de ductilidade são adequadas para as operações de estampagem profunda.

No desenvolvimento de aços para chapas, devem ser visados o atendimento o às demandas sociais e aos requisitos de especificações técnicas. As demandas sociais principais dos aços para uso automotivo são: baixo custo, preservação ambiental e segurança veicular. Enquanto os requisitos das especificações técnicas são de propriedades mecânicas, principalmente quanto ao limite de resistência e de escoamento, ductilidade e tenacidade, bem como requisitos de estampabilidade. A resistência a corrosão também é uma característica relevante, cujos requisitos são diferenciados quanto ao tipo de produtos siderúrgicos em produtos planos revestidos e não revestidos.

Deverá ser analisado no presente trabalho, após uma adequada revisão da literatura, a estampabilidade dos aços de matriz ferrítica, especialmente os aços ao carbono AA e aços IF, através de parâmetros adequados para avaliação da estampabilidade.

#### 2.1. Objetivos

Analisar a estampabilidade dos aços livre de intersticiais (IF), tendo como base de comparação, um aço acalmado ao alumínio (AA), através de uma adequada revisão da literatura, seguido de experimentos de laboratório e análise de resultados, visando avaliar e comparar características mecânicas dos aços para aplicação automotiva.

### 2. REVISÃO DE LITERATURA

#### 2.1. Estampabilidade dos aços de matriz ferrítica

A estampabilidade dos aços depende de fatores diversos do material, como composição química, tamanho de grão, textura cristalina, presença e proporção de fases secundárias e suas características de tamanho, forma e distribuição. As condições de processamento também são relevantes para a estampabilidade, como natureza dos esforços e a geometria da deformação plástica, a temperatura e velocidade de deformação. Quanto maior a ductilidade de uma liga metálica, associada a uma resistência mecânica mínima para suportar os esforços de conformação, maior será a capacidade de ser processada por deformação plástica (Bresciani, 1997).

### 2.1.1. Influência da composição química e de aspectos estruturais do aço na estampabilidade

A composição química constitui um dos fatores principais para a qualidade de chapas de aço para a estampagem. Os aços para estampagem são usualmente de baixo teor de carbono, contendo valores na faixa de 0,04 a 0,15% de carbono no máximo, para não elevar excessivamente a quantidade de fase carboneto de ferro, principalmente na forma de perlita. O teor de manganês é usualmente na faixa de 0,10-0,50%, pois acima de 0,50%, pode elevar excessivamente a tensão de escoamento. O manganês confere boa trabalhabilidade a quente na fabricação da chapa, promove a obtenção de um tamanho de grão adequado à conformação, na etapa de recozimento em caixa e evita o efeito maléfico do enxofre na forma de sulfeto de ferro, que provoca a fragilidade a quente (Colpaert, 1974). A relação manganês/enxofre deve ser controlada para garantir propriedades mecânicas e a qualidade do acabamento superficial. O fósforo e o enxofre são considerados impurezas indesejáveis, que devem ser mantidas as mais baixas possíveis. O fósforo eleva a dureza formando solução sólida com a ferrita, porém o excesso provoca um efeito de fragilização a frio (Colpaert, 1974). O enxofre se apresenta normalmente na forma de inclusões lamelares de sulfeto de manganês, que reduzem a tenacidade e a ductilidade. Adições de cálcio modificam a morfologia destas inclusões, reduzindo tais efeitos maléficos, tornando-as globulares (Costa e Silva e Mei, 1998). Os elementos residuais como cobre, cromo, níquel, molibdênio, estanho e outros devem ser mantidos nos níveis os mais baixos possíveis devido aos efeitos de endurecimento de aço. O teor de oxigênio também deve ser baixo e controlado, sendo que a quantidade de oxigênio no metal líquido determina grau de desoxidação do aço e as características de solidificação no lingote. O excesso de desoxidantes, pode conduzir à formação de compostos complexos como aluminatos, silicatos e oxissulfetos, que podem ficar retidos no interior do lingote e provocar o início da fratura na conformação mecânica (Bresciani, 1997). O nitrogênio, do mesmo modo que o carbono, é um elemento de dissolução intersticial e pode provocar o efeito de envelhecimento por deformação plástica. Nos aços acalmados ao alumínio o nitrogênio se combina com o alumínio adicionado, formando inclusões de nitreto de alumínio, evitando um efeito indesejável de envelhecimento (Hosford and Caddell, 1993).

A microestrutura envolve principalmente aspectos da forma e do tamanho do grão, da morfologia dos carbonetos e das inclusões contidas. Grãos ferríticos de tamanho uniforme, e completamente recristalizados, são requisitos para boa estampabilidade; as chapas com tamanhos de grão entre 7 e 9 ASTM, no caso de laminados a frio, apresentam melhor condição para estampagem (Bresciani, 1997). As chapas laminadas a quente e galvanizadas tendem a apresentar uma granulação ligeiramente menor. Tamanhos de grãos ultrafinos podem conduzir a uma excessiva elevação da tensão de escoamento e uma maior dificuldade de se obter uma melhor textura com orientação preferencial durante o processamento. Entretanto grãos grosseiros conduzem à formação de defeitos na estampagem denominados, devido a sua aparência rugosa, de "casca de laranja" (Colpaert, 1974). Quanto aos carbonetos de ferro a melhor condição para conformação é uma distribuição aleatória na forma de pequenas partículas esféricas de cementita. Transformações no estado sólido do aço, como endurecimento por solução sólida, trabalho a frio, endurecimento por precipitação, tendem a reduzir a ductilidade. Tais fatores aumentam a resistência ao fluxo plástico, dificultando o movimento de discordâncias, elevando a resistência mecânica. Inclusões afetam o mecanismo de fratura dúctil, conforme a natureza, fração volumétrica, a forma e distribuição destas na matriz de ferrita. A ductilidade do aço decresce com o aumento da quantidade de inclusões presentes. A ductilidade na secção transversal dos aços pode ser consideravelmente melhorada pelo controle da forma de inclusões, com adições de cálcio, titânio e elementos terras-raras. Estes reagem com os sulfetos, substituindo inclusões duras, por inclusões macias esferoidais. Inclusões podem ser reduzidas na fabricação do aço por dessulfuração e refino a vácuo. (Hosford and Caddell, 1993).

As inclusões são reduzidas na fabricação do aço pelos processos de refino, envolvendo reações de desoxidação e dessulfuração. As condições ótimas para dessulfuração no refino do aço segundo Costa e Silva e Mei (1998) são: alta basicidade, aço desoxidado e altas temperaturas (em torno de 1660°C). Entretanto o processamento sob escória redutora favorece a absorção de gases (hidrogênio e nitrogênio) pelo aço líquido, de forma que para produção de aços de melhor qualidade, torna-se necessária a desgaseificação posterior do aço através de processos de refino a vácuo (Costa e Silva e Mei, 1988).

A energia deformação plástica dos metais é convertida em sua maior parte em calor, conforme Dieter (1981). Quanto maior for a velocidade de deformação, menor será a dissipação de calor e portanto maior será a temperatura do produto fabricado. (Cetlin e Helman, 1993). Particularmente na deformação a quente, se a temperatura inicial do processo for excessiva, pode causar fusão do metal. Nos aços ligados tais aspectos são mais críticos, uma vez que a temperatura de recristalização é maior, enquanto a temperatura da curva liquidus é mais baixa, tornando mais estreita a faixa de temperatura adequada para conformação a quente (Budinski, 2002).

Nas operações de conformação a frio de chapas a temperatura e a velocidade de deformação influenciam principalmente no fenômeno de envelhecimento. O envelhecimento por deformação é um fenômeno dentre os mais comuns e mais críticos para conformação de chapas. Sua origem está relacionada a interação do movimento de discordância com os átomos de carbono e nitrogênio dissolvidos intersticialmente no ferro, sendo que este fenômeno se manifesta na conformação por uma elevação de dureza e retorno do patamar de escoamento após o material ter sido previamente deformado. Este fenômeno provoca a formação de linhas de distensão na peça conformada. (Chiaverini, 1984). Com o envelhecimento, o patamar de escoamento retorna, podendo provocar novamente defeitos superficiais na chapa conformada (Dieter, 1981). Os aços acalmados ao alumínio quando laminados a frio e recozidos são mais resistentes ao envelhecimento. O alumínio adicionado adequadamente retira o nitrogênio da condição de elemento dissolvido no ferro, promovendo a formação de uma dispersão fina de inclusões de nitretos de alumínio e portanto um refino estrutural dos grãos ferríticos do aço conforme Hosford and Caddell (1993).

## 2.2. Características principais dos aços AA e IF

As principais propriedades mecânicas requeridas para os aços destinados a chapas para estampagem especialmente para indústria automotiva, são conhecidas na literatura, conforme citadas por Chiaverini(1984), Chawla e Meyers (1982). Tais propriedades constituem principalmente, em uma combinação de elevado valor de alongamento, alto índice de encruamento  $n$ , e elevada relação entre o limite de resistência e limite de escoamento. Serão apresentadas a seguir as características básicas dos aços livre de intersticiais (IF) e dos aços acalmados ao alumínio (AA), atualmente aplicados estampagem a indústria automobilística.

### 2.2.1. Aços acalmados ao alumínio (AA)

Nos aços acalmados ao alumínio (AA), durante o refino dos mesmos, são desoxidados com o alumínio cuja quantidade adicionada é adequadamente maior que nos aços ao carbono comuns. O nitrogênio residual nos aços AA combina com o alumínio adicionado, que, além de se ligar no aço por solução sólida, formam inclusões de nitretos de alumínio dispersos, promovendo um refino estrutural e tornando as chapas mais resistentes ao envelhecimento por deformação plástica (Hosford and Caddell, 1993).

Chapas finas de aços acalmados ao alumínio laminadas a frio apresentam valores típicos de coeficiente de encruamento  $n$  em torno de 0,22 a 0,26, enquanto valores típicos do índice de Lankford  $R_m$ , obtêm-se entre 1,4 a 1,8, conforme dados apresentados por Hosford and Caddell (1993).

### 2.2.2. Aços livre de intersticiais (IF)

O desenvolvimento de aços laminados a frio livre de átomos intersticiais teve sua origem no Japão, em 1960, durante testes efetuados para o desenvolvimento de chapas grossas. Observou-se que ligas com baixo teor de carbono e titânio apresentavam valores de limite de escoamento inferiores ao esperado. O desenvolvimento desse produto no Japão resultou no seu patenteamento em 1966 e início de sua comercialização em 1977. O aço IF foi uma grande solução para o problema de se obter laminados de alta estampabilidade decorrente do controle adequado das variáveis do processo de recozimento contínuo. Foi impulsionado pela indústria automobilística devido as vantagens de sua maior estampabilidade em relação aos aços acalmados comuns.

O aço IF apresenta teor de carbono extra-baixo e adição de Mn e de Ti como elemento de liga. Os elementos C e N do aço são retirados de solução sólida através da precipitação de carbonitretos de Ti, elemento que possui grande afinidade com aqueles elementos, mesmo quando adicionado em baixos teores. A retirada do C e do N de solução sólida e o processamento adequado na laminação e no recozimento posterior resultam em um aço com baixo limite de escoamento, alto alongamento total e excelentes propriedades de estampagem (Luiz, 2005). Essa combinação de propriedades torna o aço IF ideal para aplicação em painéis de automóveis com geometria complexa e elevadas deformações durante a conformação.

A denominação IF provém do fato do aço não ter átomos de carbono e nitrogênio livres para migrarem pelos interstícios da rede cristalina de átomos de ferro. Essa característica do aço é obtida por grande redução do teor de carbono e adição de elementos formadores de carbonitretos estáveis tais como nióbio e titânio.

Os fatores mais importantes para a obtenção de um bom produto de aço IF através da formação de texturas mais favoráveis à conformação são teor ultra-baixo de carbono, quantidade de titânio em excesso em relação ao valor estequiométrico, temperatura adequadas de acabamento e bobinamento na laminação a quente, bem como temperatura e tempo de recozimento controladas (Gorni, 2002). Entretanto, as chapas galvanizadas de aços IF produzidos somente com a adição de titânio como refinador de grão apresentam falta de aderência do revestimento superficial. A solução para tal problema tem sido o desenvolvimento aços IF produzidos com adições adequadas e controladas de titânio e nióbio.

Os aços IF apresentam normalmente valores de  $n$  e de  $R_m$  superiores aos aços acalmados comuns. Conforme dados apresentados por Hosford e Caddell (1993), chapas finas de aços AA laminadas a frio a apresentam valores típicos de coeficiente de encruamento  $n$  em torno de 0,30, enquanto valores típicos de  $R_m$  obtêm-se entre 1,8 a 2,5.

## 3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

### 3.1. Materiais utilizados

Os materiais utilizados neste trabalho foram chapas finas de aço laminadas a frio do Aço Livre de Intersticiais, também conhecido como "IF - Interstitial Free", e do aço SAE 1006 acalmado ao alumínio cuja valores de espessura e de composição química são apresentados na Tab. (1). Neste presente trabalho, por uma questão de simplificação de termos, tais materiais serão denominados como aço IF e AA, respectivamente.

**Tabela 1. Composição química e espessura dos aços IF e AA usados neste trabalho**

MATERIAL	ESPESSURA (mm)	COMPOSIÇÃO QUÍMICA (% em massa)					
		C	Mn	Si	P	S	Ti
SAE1006 AA	1,90	0,035	0,20	0,05	0,014	0,012	----
IF	2,01	0,0025	0,08	0,09	0,011	0,006	0,065

### 3.2. Análise Microestrutural

A microestrutura da amostra do aço IF fora observada por microscopia ótica, após ataque químico pelo reagente de Nital de uma seção realizada ao longo da espessura da chapa utilizada, a 90° com a direção de laminação. Foram analisados os principais constituintes microestruturais e outros aspectos microestruturais observados que influenciam na estampabilidade.

### 3.3. Ensaios Mecânicos

Foram confeccionados corpos de prova de amostras dos aços AA e IF para execução de ensaios de tração conforme normas ASTM E8 e ABNT NBR 6152 A amostra do aço AA foi fornecida na forma de chapas com 2,0 mm de espessura, retiradas de bobinas laminadas a frio e recozidas em forno contínuo. Através desses ensaios foram determinados os valores de limite de escoamento, limite de resistência e alongamento para ambos os aços, conforme a referida norma americana. Os corpos de prova foram retirados na direções 0°, 45° e 90° em relação a direção de laminação.

O índice de encruamento  $n$  determinou-se por cálculo a partir dos dados do ensaio de tração. Conforme demonstrado na literatura por diversos autores como por Garcia, Spim e Santos (2000) e por Dieter (1980), o expoente  $n$  é igual ao valor da deformação verdadeira correspondente a carga máxima obtida no ensaio de tração convencional.

Para executar o ensaio de Lankford, também foram usados corpos de prova, que foram retirados nas direções 0°, 45° e 90° em relação a direção de laminação. Através desse ensaio determinou-se os índices de anisotropia normal e índices de anisotropia planar,  $R_m$  e  $\Delta R$ , respectivamente. Os resultados tiveram como base de medida, o alongamento correspondente ao comprimento útil original de 50 mm. Tais ensaios acima citados foram realizados no Laboratório de Ensaios Mecânicos do Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da USIMINAS.

Para ensaios de embutimento pelo método Erichsen foram confeccionados corpos de prova a partir das amostras das chapas dos aços AA e IF, conforme norma brasileira. As chapas foram cortadas nas dimensões 80 mm de largura e 90 mm de espessura. Determinou-se a partir desse ensaio o índice de embutimento Erichsen (IE) para cada corpo de prova, determinando-se os valores médios e a variabilidade dos resultados através do desvio padrão das amostras dos aços correspondentes. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Ensaios Mecânicos dos Materiais do UnilesteMG, usando uma máquina de ensaios de embutimento marca Prufmaschinen, de pressão máxima do punção de 400 Mpa, provida de um relógio comparador de resolução de 0,1 mm.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. Análise Microestrutural

A microestrutura resultante da composição química do aço IF e das condições usadas na sua fabricação é apresentada na Fig.(1). Esta apresentou-se constituída predominantemente de grãos alongados de ferrita, na direção de laminação, envolvidos por grãos menores equiaxiais e ultrafinos. Isto indica que tenha ocorrido uma recristalização de forma parcial do aço durante a operação de recozimento contínuo. Pequenos precipitados, basicamente carbonitreto de titânio, foram detectados posteriormente observando-se com maior ampliação. Foram observados antes do ataque uma quantidade muito pequena de inclusões, basicamente constituída de sulfetos e óxidos, isoladas e de pequeno tamanho, como era esperado devido aos baixos teores de impurezas presentes no material.

### 4.2. Resultados obtidos dos Ensaios Mecânicos

A Tabela (2) e a Tabela (3) apresentam respectivamente as propriedades mecânicas dos aços IF e AA, utilizados neste trabalho, medidas nas direções paralela, perpendicular e a 45° em relação à direção de laminação. São apresentados nestas tabelas, o limite de escoamento  $\sigma_y$  o limite de resistência  $\sigma_u$  e o alongamento total  $\Delta L$ . Os valores de  $n$ , apresentados nas Tab. (2) e (3), foram calculados para cada direção de ensaio (0°, 45° e 90°), através do ajuste das curvas obtidas.



**Figura 1. Aspectos da microestrutura do aço IF. Ataque com Nital a 4%. Ampliação: 200X (Luiz, 2005)**

Observa-se que o aço IF apresentou resultados de resistência mecânica mais baixos do aço AA medidos pelo limite de escoamento e limite de resistência, entretanto apresentando valores superiores de ductilidade medidos pelo alongamento em três direções. Tais resultados podem ser explicados pelos teores ligeiramente menores de elementos endurecedores da fase ferrita, como carbono, manganês e fósforo presentes no aço IF. Entretanto o mesmo apresentou valores médios mais altos do expoente de encruamento  $n$  do que o aço AA (0,244 contra 0,152). Acredita-se que isto se deve ao efeito do titânio formando compostos finos e dispersos de carbonitretos de Titânio, além de promover um refino estrutural. Isto se traduz em uma maior capacidade de encruamento nas operações de conformação mecânica a frio do aço IF, especialmente na estampagem profunda.

Os resultados do ensaio de Lankford para os aços IF e AA estão apresentados na Tab. (4). São mostrados o valor médio do coeficiente de anisotropia  $R_m$  (coeficiente de anisotropia normal) e o valor  $\Delta R$  (coeficiente de anisotropia planar). Observa-se que o aço IF apresentou resultados de índices de anisotropia normal ( $R_m$ ) mais altos do que o aço AA (1,941 contra 1,124). Tais resultados confirmam a maior tendência do aço IF se deformar preferencialmente na largura do que na espessura, fato que torna este melhor adequado para operações de estampagem profunda. Tais características de qualidade são obtidas através do controle da textura cristalina, que se desenvolve preferencialmente segundo determinadas combinações de planos e direções cristalográficas favoráveis a deformação plástica. O Resultado do índice de anisotropia planar ( $\Delta R$ ) do aço IF mais alto do que o aço AA (0,669 contra 0,495), revela a melhor qualidade de forma macrogeométrica das chapas após estampagem.

**Tabela 2. Propriedades mecânicas de tração do aço IF.**

Aço IF				
Direção	$\sigma_y$ (MPa)	$\sigma_u$ (MPa)	$\Delta L_{50mm}$ (%)	$n$
Longitudinal	170	290	49,0	0,249
Transversal	179	288	48,6	0,245
Diagonal	184	304	46,6	0,241

**Tabela 3. Propriedades mecânicas de tração do aço AA.**

Aço AA				
Direção	$\sigma_y$ (MPa)	$\sigma_u$ (MPa)	$\Delta L_{(50mm)}$ (%)	$n$
Longitudinal	281	336	38,3	0,157
Transversal	285	338	38,7	0,151
Diagonal	304	350	34,7	0,151

Os resultados dos Ensaio de Embutimento Erichsen são apresentados na Tab. (5). Verifica-se que o aço IF obteve valores superiores de profundidade de embutimento (IE) em relação aos obtidos com o aço AA, pelo método Erichsen. As cargas máximas atingidas no final de cada teste foram praticamente constante para o mesmo aço, sendo de 360 MPa no aço IF e de para 330 MPa no aço AA. Os valores médios de IE obtidos foram de 12,95mm para o aço IF e de 11,77mm para o aço AA, com desvio padrão de 0,151 e de 0,125mm, respectivamente.

**Tabela 4. Propriedades Mecânicas decorrentes do Ensaio de Lankford**

DIREÇÃO	Aço IF		Aço AA	
	Rm	$\Delta R$	Rm	$\Delta R$
Longitudinal	2,038	----	1,129	----
Transversal	2,512	----	1,613	----
Diagonal	1,606	----	0,876	----
Valores médios	1,941	0,669	1,124	0,495

**Tabela 5. Resultados obtidos do índice de ensaio de embutimento Erichsen( IE )**

Aço	Valor Médio	Desvio padrão
Aço AA	IE = 11,77mm	IE = 0,125mm
Aço IF	IE = 12,95mm	IE = 0,151mm

## 5. CONCLUSÕES

O aço IF apresentou melhores características de estampabilidade para aplicação automotiva que o aço AA, mesmo sendo este último reconhecido no mercado pelas suas boas propriedades para estampagem e operações conformação a frio de uma forma geral.

A microestrutura obtida do aço IF apresentando grãos parcialmente recristalizados e ultra finos certamente contribuiu para obtenção de melhores resultados de alongamento e do expoente de encruamento  $n$ , além de valores melhores de obtidos do índice embutimento, combinados com valores menores tensão de escoamento. Sabe-se que tal combinação de propriedades mecânicas corresponde a uma melhor adequação de características de qualidade dos aços para indústria automotiva

Pelos resultados obtidos neste presente trabalho, confirmou-se na prática, em condições de laboratório, que o aço IF apresenta melhores propriedades para estampagem, especialmente para indústria automotiva Tais resultados se justificam em função de suas características mencionadas neste trabalho em termos de composição química , microestrutura e textura cristalográfica.. Como sugestão para trabalhos futuros dentro do mesmo tema recomenda-se uma análise da textura cristalográfica do aço IF, confirmando a constituição neste aço de uma textura com orientações cristalográficas preferenciais mais favoráveis para conformação plástica e sua correlação com resultados de ensaios mecânicos.

## 6. REFERÊNCIAS

- ABNT NBR 6152, 1983, “Determinação de Propriedades Mecânicas a Tração de Materiais Metálicos”, ABNT.
- ASTM E 8, 1989, “Standart Terminology relating to methods of mechanical testing”, ASTM..
- Bresciani Filho, E., 1997, “Conformação plástica dos metais”, Campinas: Unicamp, SP.
- Budinski, K. and Budinski, M., 2002, “Engineering materials: properties and selection”, 7<sup>a</sup>.ed, Prentice Hall, New Jersey.
- Cetlin, P.R. e Helman, H.. 1993, “Fundamentos da Conformação Mecânica dos Metais”, 2<sup>a</sup>.ed., Ed. F.C.O./ UFMG, Belo Horizonte, MG.
- Costa e Silva, A.L., e MEI, P. R.,1988, “Aços e ligas especiais. Eletrometal Metais Especiais”, 2<sup>a</sup>.ed., Sumaré,SP.
- Chiaverini, V., 1984, “Aços e ferros fundidos”, ABM, São Paulo, SP.
- Colpaert, H., 1974, “Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns”, Ed. Edgard Blucher, São Paulo, SP.
- Dieter, G., 1981. “Metalurgia Mecânica”, Ed. Guanabara Dois, Rio de Janeiro, RJ.
- Garcia, A., Spim, M.J., e Santos, C. A., 2000, “Ensaio dos materiais”, Livros Técnicos e Científicos, Rio de Janeiro R.J.
- Gorni, A.A., Silveira, J.H.D., Almeida Filho, C., 2002, “Efeito do processo de laminação a quente sobre as propriedades mecânicas de chapas finas de aço IF laminadas a frio”, Seminário de Laminação, ABM, 2002, Ouro Preto, MG.
- Hosford, W.F. and Caddell, R.M., 1993, “Metal Forming: Mechanics and Metallurgy”, 2<sup>a</sup> ed., Prentice-Hall, New Jersey.
- Luiz, V.D., 2005, “Análise de Métodos para a Determinação Experimental da Curva Limite de Estampagem à Estricção de Chapas Finas de Aços para a Estampagem”, Dissertação de Mestrado, E. E. U. F.M.G., Belo Horizonte, MG.
- Meyers, M. A., Chawla, K.K., 1982, “Princípios de metalurgia mecânica”, Ed.Edgar Blucher, São Paulo, SP.

## 7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores citados no cabeçalho deste presente trabalho declaram para os devidos fins que são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no mesmo.