

Fundido ou Forjado?

Uma Avaliação Realística

Uma apresentação honesta das vantagens e limitações de ambos os processos que permitirá ao leitor uma determinação segura de qual o melhor caminho a seguir quando considerar Fundidos ou Forjados.

Autores:

**Malcolm Blair and Raymond W. Monroe
Steel Founder's Society of America, Barrington, Illinois**

Tradução:

Prof. Dr. Guilherme Marconi Silva

Muito tem sido dito e escrito pela indústria de forjados sobre a vantagem dos produtos forjados sobre os produtos fundidos. Tais artigos, com manchetes do tipo: “Upgrade to forgings” tem a intenção de relegar os fundidos a uma condição de inferioridade e de menor confiabilidade. Todos sabemos que fundidos e forjados partem de processos iniciais bastante parecidos e que os fundidos podem ter vantagens bastante distintas sobre as outras formas de produtos, inclusive forjados.

O Processo

A maioria dos componentes de aço tem seu início como fundido: o metal passa por fusão, vazamento em um molde e solidificação. No caso do processo de Fundição, devido ao fato do molde ter a forma próxima à forma final da peça, o que resta a fazer são algumas operações de acabamento.

No caso dos Forjados a primeira forma é um lingote. Lingotes normalmente são de grandes dimensões com seções retangulares e bastante pesados. Estes lingotes, ou placas ou tarugos são forjados no perfil em martelos e prensas. Muita usinagem é requerida até sua configuração final.

A tabela 1 mostra procedimentos típicos de Fundição e Forjamento para fabricação de uma válvula de 250 mm de diâmetro.

**Tab. 1-Comparação passo-a-passo
para a produção de uma válvula de 250 mm ϕ**

Forjamento	Fundição
1-Em uma aciaria	1-Em uma fundição
a-Fundição de um lingote	a-Desenvolvimento de modelos e caixas de macho
b-Redução do lingote em billets	b-Preparação dos moldes e dos machos
2-Na Forjaria	c-Fusão da carga metálica
a-Compra de lingotes ou billets	d-Vazamento do metal líquido nos moldes
b-Desenvolvimento de matrizes	
c-Aquecimento dos lingotes ou billets	Resfriamento (solidificação)
d-Realização da 1ª operação de forjamento	e-Desmoldagem
e-Reaquecimento da peça	f-Corte de canais e massalotes
f-Realização da 2ª operação de forjamento	g-Tratamento térmico
g-Reaquecimento da peça	h-Acabamento
h-Realização da 3ª operação de forjamento	i-Usinagem final
i-Repetição dos passos de C a H para a outra metade	
j-Usinagens	
k-Soldagem das duas metades	
l-Tratamento térmico	
m-Usinagem final	

Apesar de haver uma extensa área de utilização em comum, existe uma tendência de se usar forjados exclusivamente em determinadas aplicações e os fundidos em outra.

Espessura de Parede e Forma

Como no forjamento o metal é deformado no estado sólido, então grandes esforços são requeridos para se mudar as formas iniciais para a configuração desejada. Quanto maior a espessura de parede maior será a força de deformação necessária, em termos práticos, há um limite de secção e/ou espessura de parede a ser produzido pelo forjamento.

Isto não significa que grandes secções não possam ser forjadas, mas quando o são, somente pequenas deformações superficiais com pouca redução na secção transversal são obtidas.

Por outro lado, no processo de fundição, o metal parte do estado líquido preenchendo diretamente o molde até a forma desejada. Por conseguinte os componentes fundidos podem ter as mais variadas formas e secções.

Para componentes de grandes secções a combinação Fundido/Soldado é mais adotada que a combinação Forjado/Soldado. A principal razão é que poucas peças estão envolvidas e o fundido tende a ter melhor soldabilidade.

No forjamento o metal sólido é forçado na cavidade da matriz, na fundição o metal é vazado na cavidade do molde. O líquido pode preencher facilmente todas as partes da cavidade. Entretanto, à medida que se aumenta a complexidade da forma a praticidade do forjamento diminui. Para o fundido não há limitação da complexidade da forma.

Composição Química

A questão da composição tem duas partes: o que pode ser obtido em fundições e forjarias, e o que pode ser fundido ou forjado.

Os forjados são produzidos a partir de lingotes fabricados em aciarias e com composição produzida nas aciarias, que tendem a produzir faixas limitadas de composição e uma solicitação específica pode sair proibitivamente cara. Nas fundições devido a grande flexibilidade a diversidade de composições químicas obtidas é virtualmente ilimitada.

Apesar de uma única fundição não poder fabricar todas as ligas já concebidas, é sempre possível obter-se uma única composição para se encontrar um requerimento específico entre o grande número de fundições disponíveis a um custo inferior em relação às outras formas de fabricação.

A presença de quantidades controladas de ferrita em certos aços inoxidáveis aumenta a resistência à corrosão ao trincamento e melhora a soldabilidade. A ferrita ocorre controladamente na maioria dos aços inoxidáveis fundidos para produzir combinações controladas de características. Entretanto, a ferrita inviabiliza a capacidade de deformação plástica a quente sendo desta forma prejudicial nos casos de produtos forjados.

A importante classe dos aços endurecíveis por encruamento não é forjada. Estes aços são geralmente as ligas de alto Mn(13%) que se tornam duros à medida que se deformam no trabalho.

Propriedades Mecânicas

As principais propriedades mecânicas de interesse pelos projetistas são: Resistência, Ductilidade e Dureza. Mas como o usuário fica sabendo quais as características das peças?

Para aços fundidos é relativamente fácil. Se o componente é feito de uma liga padrão, as características estão informadas na especificação padrão. Se for feito de alguma outra liga os testes padronizados de tração fornecerá os valores. Estes valores serão referentes à direção a qual foi realizado o teste e às medidas tomadas neste sentido.

Muitas peças são feitas de produtos laminados como barras ou chapas. O processo de laminação muda as propriedades do metal. A maior vantagem é o aumento da resistência na direção da deformação ou eixo longitudinal. Ambos, laminação e forjamento têm propriedades

direcionadas pelo processo de deformação. Entretanto a Tensão Limite de Resistência o Alongamento Percentual e a Resistência ao Impacto diminuem na direção transversal ao eixo de laminação ou forjamento. Os laminados e forjados são anisotrópicos, isto é, apresentam diferentes valores de propriedades para diferentes direções. No caso de ligas equivalentes, a ductilidade e a resistência ao impacto do aço fundido ficam entre os valores longitudinais e transversais apresentados pelo forjado. No fundido o metal é isotrópico, apresentando propriedades similares em todas as direções.

A figura 1 a seguir apresenta a demonstração gráfica da relação entre as propriedades mecânicas de um aço laminado e o ângulo de inclinação do corpo de prova tomado para teste.

A figura 2 também a seguir ilustra a influência da taxa de redução de forjamento na anisotropia de um aço forjado com 0,35% C. Para efeito de comparação as propriedades de um aço fundido com 0,35% C estão mostradas em (*).

Com respeito às propriedades, nos forjados, a maior parte das referências provém de características longitudinais, para se obter características transversais é necessária uma requisição específica.

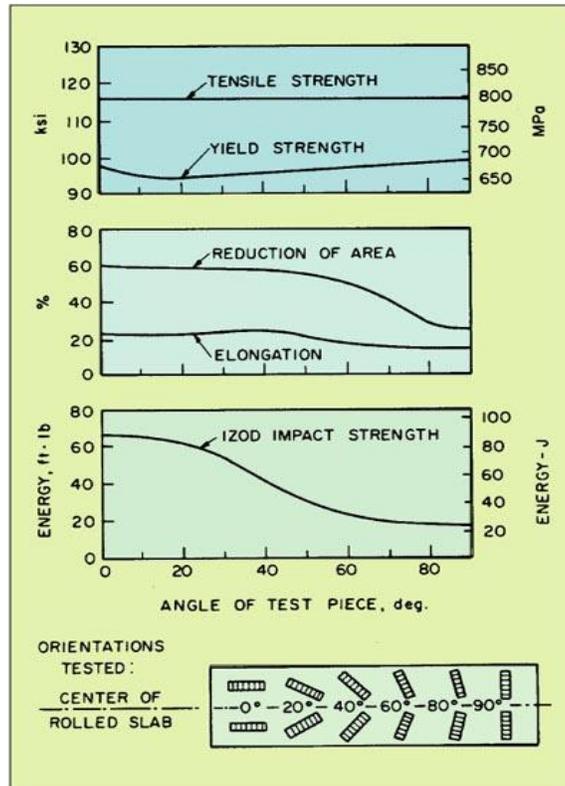


Fig 1

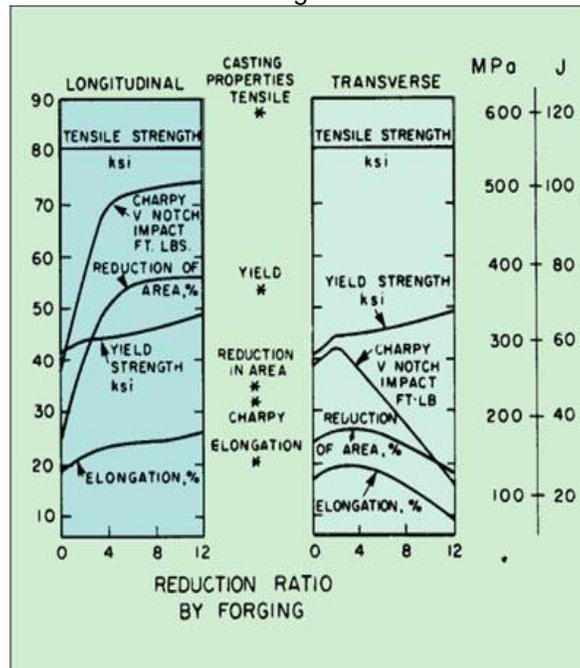


Fig 2

É importante salientar que as condições de serviço dos componentes devem ser cuidadosamente avaliadas. Se o carregamento for uni axial ao longo da seção longitudinal o forjado apresenta boa vantagem, mas

se o carregamento cresce em outra direção neste caso o forjado passa a ser um problema. Os vasos de pressão são um bom exemplo de aplicação onde o estado de tensão é tri axial. O código de projeto utilizado pela maioria dos fabricantes de equipamentos de controle de fluxo (ANSI B16. 34) não indica nenhuma vantagem em termos de propriedades mecânicas dos forjados sobre os fundidos. Tab 2 a seguir.

Tab. 2 Tabelas 1.1 e 1.9 ANSI B 16.34

Grupo 1.1	Grupo 1.9
A 105 – Forjado	A 217 – Fundido
A 182 – Forjado	A 387 – Laminado
A 216 – Fundido	
A 350 - Forjado	

Em termos de temperaturas extremas, resistência à corrosão e resistência ao desgaste, fundidos e forjados geralmente tem performance equivalente. No caso específico de corrosão, os aços inoxidáveis fundidos com quantidades controladas de ferrita serão superiores aos seus correspondentes forjados, pois a ferrita aumenta a resistência à corrosão. No caso de aços resistentes ao desgaste, endurecíveis por encruamento, para aplicações industriais, somente são obtidos por fundição.

A Compra na Prática

Projeto/Modificações de Projeto

Tantos os fundidos quanto os forjados têm muitos critérios de projeto em comum (raios de concordância são exemplos disto), e cada um tem seus procedimentos específicos. Quando se muda de um processo para outro, o projeto deverá ser reconsiderado e novos desenhos deverão ser feitos, caso contrário, problemas aparecerão.

Defeitos de Forjados e Fundidos

O Defeito é uma falha no componente típica de processo, mas não inevitável. Como podemos ver na tabela abaixo tanto forjados como fundidos são vulneráveis a tipos particulares de defeitos. A correta fabricação de fundidos ou forjados pode eliminar a maioria deles.

Defeitos freqüentes em Forjados e Fundidos		
Defeito	Descrição	Problema
Segregação	Distribuição não uniforme de elementos no metal	Dureza heterogênea
Absorção de H ₂	Aparecimento de trincas	Fragilização
Inclusões	Partículas não-metálicas no metal	Atuam como concentradores de tensão, dificultam a usinagem.
Defeitos de Forjados		
Defeito	Descrição	Problema
Brusts	Trincas internas decorrentes de operação de forjamento inadequada	Quebra
Granulação Grosseira	Superaquecimento, dimensão inadequada do lingote, projeto de ferramental inadequado	Suscetibilidade à fadiga, perda de propriedades dependendo da direção do esforço
Dobras	Caldeamento deficiente das superfícies gerando descontinuidade	Aparecimento de concentradores de tensões podendo ocasionar trincas
Trincas	Descontinuidade interna/externa com diversas possibilidades de origem	Quebra
Defeitos de Fundidos		
Defeito	Descrição	Problema
Descontinuidade superficial	Abertura superficial decorrente de projeto ou moldes inadequados	Iniciação de trincas
Inclusão de Areia	Preparação inadequada do molde	Usinagem dificultada, iniciação de trincas
Porosidade	Inadequação de moldagem de macharia ou de fusão	Aparência inadequada, perda de resistência
Trinca a Quente	Projeto inadequado, molde e/ou macho muito rígidos	Iniciação de trincas
Rechupes	Projeto inadequado de fundição	Quebra
Junta Fria	Metal com Fluidez deficiente	Perda de Resistência

A modificação do projeto é um problema específico. Frequentemente é necessário alterar o projeto para adicionar olhais, remover projeções, etc. Neste caso, o fundido apresenta uma vantagem bastante distinta, uma vez que, modificações no modelo ou em caixas de macho são relativamente fáceis e de menor custo, entretanto uma modificação de uma matriz para forjamento, mesmo para pequenas alterações, é

geralmente muito difícil, de custo elevado e novas matrizes poderão ser necessárias.

O processo de fabricação algumas vezes impõe limitações na forma a ser produzida. Frequentemente o fundidor precisa explicar aos clientes que para induzir uma solidificação ou para retirar o modelo da areia é necessário a colocação de um ângulo de saída em torno de $1,5^\circ$. De acordo com os manuais de forjamento a magnitude deste ângulo seria, tipicamente, 5 a 10 vezes maior para os produtos forjados.

Fabricação

Se dois componentes devem ser unidos por solda é vantajoso ter um ou ambos em aço fundido. Os fundidos são geralmente mais soldáveis do que o seu equivalente forjado. Isto é verdadeiro não somente para os aços austeníticos com teores controlados de ferrita, mas também para os aços ao carbono e os aços de baixa liga.

A melhor soldabilidade dos aços fundidos foi demonstrada em uma pesquisa realizada pela Universidade do Tennessee. Cinco amostras equivalentes de fundidos e forjados, em aços de baixa liga, foram comparadas em termos de soldabilidade, ou resistência à trinca a frio. A trinca a frio ocorre após a junta soldada ter se resfriado. E é extremamente perigosa, porque permanece escondida debaixo do cordão de solda e não se revela a uma inspeção superficial. Nos testes da Universidade do Tennessee fundidos e forjados dos graus 8630 e MnSi foram testados para determinar a temperatura de preaquecimento necessário para eliminar tais trincas.

Para cada grau, os fundidos necessitaram menor temperatura de preaquecimento do que seu correspondente forjado, teste básicos para estabelecer a soldabilidade destes materiais sem preaquecimento mostraram os mesmos resultados. Cada fundido foi superior ao seu equivalente forjado. O problema dos aços forjados foi identificado como sendo o comprimento e forma agulhada das inclusões não metálicas que funcionam como concentradores de tensão favorecendo ao início das trincas, no caso do fundido isto não acontece devido à forma arredondada das inclusões.

Aonde a soldagem for requerida as considerações previamente mencionadas devem ser aplicadas. Para uma dada temperatura de preaquecimento, a solda em um aço fundido tende a ser menos susceptível a trinca a frio do que em um aço forjado.

Custo Final

O custo final de uma peça inclui seu custo de compra mais o custo de realização de todas as operações adicionais necessárias. Antes de operações de montagens, por exemplo, é quase sempre necessário usinar a peça. Este custo pode ser considerável. Quando se trata de peças simples tanto o fundido quanto o forjado, requerem a mesma quantidade de usinagem, mas quando as peças são mais complexas os fundidos tendem a requerer menos usinagem que os forjados.

Acabamento Superficial

O processo de forjamento tende a reduzir a porosidade e as descontinuidades superficiais, podendo também eliminar cavidades internas. A porosidade superficial e as descontinuidades que venham a aparecer os fundidos, quando for aplicável, podem ser reparadas por soldagem. O custo desta operação é usualmente menor que o custo adicional de usinagem tipicamente requerido para um forjado.

Tamanho e Peso

Os aços fundidos são quase sempre mais leves que seus correspondentes forjados, a mudança de projeto de forjado para fundido usualmente resulta em uma substancial redução do peso final, em determinados casos pode ser superior a 30%.

Início de fabricação e Custo de Produção

A chave para o processo de fundição é o modelo. A chave para o forjamento é a matriz. O custo de um modelo é substancialmente menor que o de uma matriz e pode ser amortizado rapidamente em pequenos lotes. Para grandes lotes e configurações simples os componentes forjados podem ser economicamente convertidos em seus equivalentes fundidos.

Os fundidos tendem a ter uma vantagem definitiva sobre os forjados quando uma das três condições a seguir for encontrada:

- Quando uma composição química única for requerida.
- Quando a peça for grande ou complexa
- Quando os esforços aplicados forem multiaxiais.

A Concorrência

O que significa peça grande? O que seria complexo? Quando um lote se torna grande?

Nestas situações há uma grande dificuldade de definição tanto pelos fundidos quanto pelos forjados. A solução seria a determinação prévia pelo projetista do método de fabricação a ser utilizado, antes de fazer o projeto definitivo. Este projeto preliminar permitiria ao comprador tirar vantagem desta situação de competição, enviando cotações às fundições e forjarias e definindo-se caso a caso qual é a opção mais interessante. Os resultados podem ser vários em diferentes casos, mas a concorrência sempre beneficiará o cliente, usuário ou comprador.

Pergunte aos Fabricantes

Os Aços Fundidos são, e continuarão sendo, uma importante solução para a fabricação em geral. Sua resistência e habilidade de ser produzido na forma requerida pelos projetistas são a garantia de competitividade.

Projetistas e compradores de fundidos só poderão ter uma visão real tanto de processo quanto de performance através de um diálogo franco e aberto com seus fornecedores. Ambas as partes devem ter o mesmo interesse no projeto, na qualidade e no custo do produto. Este diálogo garantirá que os reais problemas sejam identificados e soluções adequadas sejam encontradas.

Este artigo foi apresentado na edição de 2000 do “Engineered Castings Solution”.

“Direitos autorais reservados para Steel Founders’ Society Of America”

O Prof. Dr. Guilherme Marconi Silva, que traduziu este artigo, é engenheiro Mecânico especialista em Aços e Ferros Fundidos com mais de 30 de experiência industrial em Fundição de materiais ferrosos. Professor do Departamento de Engenharia Mecânica do CEFET-MG, disciplinas: Materiais de Construção Mecânica I e II. Consultor de diversas empresas Nacionais e Estrangeiras nas áreas de Materiais para Construção Mecânica; Falhas de Componentes Mecânicos; Tratamentos Térmicos e Controle da Qualidade Metalúrgica e Mecânica. Atuou por mais de 10 anos como Gerente Geral da Fundição Altivo SA. Email guilherme.marconi@terra.com.br guilherme@cefetmg.br