



# Comparativo entre processos de fundição em areia e por centrifugação de componente de válvula esfera API 6D

## *Comparing processes in sand cast mould and centrifugal casting in components for ball valve API 6D*

André Rasador<sup>a,\*</sup>, Eduardo Luis Schneider<sup>a</sup>, Célia Malfatti<sup>b</sup>

<sup>a</sup> FEEVALE, ERS 239 Bairro Vila Nova, Novo Hamburgo - 93352000, Brasil

<sup>b</sup> UFRGS, Avenida Bento Gonçalves, 1500, Novo Porto Alegre - 91501970, Brasil

### Resumo

Este artigo apresenta o projeto de desenvolvimento de um componente fundido por centrifugação, para aplicação de uma válvula industrial esférica padrão construtivo API6D. Realizou-se uma comparação entre o processo de fundição convencional com molde em areia e o processo de fundição por centrifugação vertical. Para este estudo, foi escolhida uma liga de aço, conforme a norma ASTM A 216 Grau WCB. Baseado nesta especificação, realizou-se uma comparação entre os dois processos de fabricação, para demonstrar se existem variações nas características e propriedades, bem como sanidade das amostras analisadas. Para análise de performance da peça fundida, foram realizados ensaios mecânicos de tração, dureza e análises da microestrutura dos materiais. Para a verificação da qualidade superficial, foi feito um ensaio de líquido penetrante após o processo de usinagem do material, empregado para assegurar conformidade com condições projetadas. A sanidade interna foi avaliada por ensaios de ultrassom e radiografia.

© 2014 Sociedade Portuguesa de Materiais (SPM). Publicado por Elsevier España, S.L.U. Todos os direitos reservados.

*Palavras chave:* fundição com molde em areia; fundição centrífuga; seleção de processos.

### Abstract

This paper presents a project's development of a component casted by centrifugation for application in an industrial ball valve constructive standard API6D. A comparison between conventional sand casting process and vertical centrifuge casting was done. For this study a steel alloy was chosen according to ASTM A 216 Grade WCB. Based on this specification a comparison was performed between the two manufacturing processes to demonstrate the possible existence of variation in the characteristics and properties as well as the sanity of the analyzed samples. To the performance analysis of the casted part, tensile, hardness tests were performed and the analysis of the microstructure of the materials. To check the superficial sanity a penetrating liquid test was conducted after the machining process of the material, applied to assure the conformity with the projected conditions. The internal sanity was evaluated by ultrasound and radiography tests.

© 2014 Portuguese Society of Materials (SPM). Published by Elsevier España, S.L. All rights reserved.

*Keywords:* type sand casting; centrifugal casting; selection processes.

## 1. Introdução

Diversas tecnologias e processos têm sido

desenvolvidos para aperfeiçoar a fabricação atual. Nesse contexto, há uma constante busca por novas alternativas que resultem em produtos finais de melhor qualidade. A indústria tem investido cada vez mais em alternativas para minimizar os problemas inerentes aos processos de fabricação, com emprego de materiais

\* Corresponding author.

E-mail address: [andre@micromazza.ind.br](mailto:andre@micromazza.ind.br) (A. Rasador)

que representem menor risco de falha no processo de operação de seus produtos. As válvulas esfera são aplicadas tanto na atividade de exploração quanto de produção de petróleo, sendo um item fundamental, não podendo apresentar falhas em seus componentes fundidos e que possam gerar riscos operacionais e ambientais [1]. Grandes empresas que operam no Brasil, em conjunto com a principal empresa de exploração de petróleo, estão envolvidas no aperfeiçoamento de válvulas, definindo testes de validação de vida útil do produto válvula industrial, com simulação da realidade operacional e ciclo de vida útil, de acordo com a norma NBR15827-2011.

Cada condição de criticidade do produto, aliada a preocupação de uma vida útil projetada de 20 anos para a válvula *esfera*, faz com que seja necessário o desenvolvimento de componentes e processos alternativos capazes de serem menos suscetíveis à falhas. O processo de fundição vem sendo constantemente estudado e novos métodos alternativos para determinados componentes fundidos estão sendo desenvolvidos. Os aços podem ser fundidos por diversos processos, seja fundição em areia, por cera perdida, por fundição centrífuga, entre outros. Cada um desses possui suas particularidades, com características resultantes projetadas de acordo com as necessidades de cada produto. O presente estudo está focado na obtenção do componente de válvula esfera com padrão de construção, de acordo com normas API6D e NBR15827-2011, empregando-se, para isso, o processo de fundição por centrifugação como alternativa ao processo fundição em areia.

Determinadas ligas fundidas por centrifugação, tais quais para a liga Al-Si, são capazes de gerar maior propriedade de dureza superficial, com maior resistência ao desgaste [2]. Estudos comparativos demonstram a aplicação em pistões de motor, onde se verifica o aumento da força de ruptura, da tensão de ruptura, do alongamento do material e da resistência à fadiga, podendo ser obtidas variações para determinadas características do produto [3]. Defeitos presentes no processo de fundição em areia são minimizados pelo processo de fundição centrífuga. Estudos têm mostrado que é possível obter melhores propriedades mecânicas para componentes fabricados pelo processo de fundição por centrifugação, comparativamente ao processo de fundição em areia [4].

Foi realizado um estudo sobre o comportamento de um componente fabricado de material ASTM A 216 Gr WCB (tampa de 6'600 lbs aplicável à válvula tipo esfera industrial de uso nas indústrias de óleo e gás)

pelo processo de fundição por centrifugação, no qual foram comparadas as características resultantes deste processo com relação ao mesmo componente obtido pelo processo de fundição em areia.

Estudou-se o comportamento com relação às características de propriedades mecânicas, metalográficas e os defeitos internos. Aplicaram-se ensaios de tração, dureza e análise metalográfica, de acordo com a norma ASTM A370 (2011). As análises de sanidade foram realizadas para a verificação da presença de defeitos na superfície e no interior dos materiais no processo de fundição, tanto com molde em areia quanto por centrifugação, com os critérios estabelecidos para a válvula esférica, de acordo com a norma ASME 16.34 (2009).

Visando à eliminação no risco de falhas, o aperfeiçoamento contínuo dos processos alternativos de fundição, considerando, ainda, o aspecto crítico da aplicação de componentes fundidos no produto válvula *esfera*, este estudo se faz necessário. As propriedades de sanidade interna, adquiridas pelo fundido por centrifugação, e as exigências do mercado nacional de óleo e gás quanto à origem nacional dos componentes definidos pela ANP 36 (2007), aliadas à diferença de custo de materiais com microestrutura e propriedades adequadas, como os obtidos pelo processo de forjamento, também motivaram e contribuíram para a realização desta pesquisa.

### 1.1. Fundição de aços

A fundição é um processo que permite a fabricação de peças de diversificadas geometrias, com alguma limitação de dimensões, forma e complexidade. Resulta em formas permanentes, com propriedades mecânicas e que podem suportar as mais variadas condições de serviço. Essa é dividida em uma série de processos, sendo os mais comumente utilizados os por gravidade, sob pressão, por centrifugação e precisão. Os critérios considerados para a escolha do processo são as quantidades de peças a serem produzidas, a geometria das peças, característica dimensional, tolerâncias requeridas, grau de complexidade, especificação do metal, ferramental e o acabamento final da superfície. Tais critérios são estabelecidos considerando-se as propriedades mais importantes para a peça final [5,7].

### 1.2. Processo de fundição em areia

A modelagem em areia verde é considerado o processo mais tradicional nas fundições, consistindo

em assentar o modelo na areia, a fim de se obter a forma da peça a ser fundida no molde, que deve possuir condições de resistência para suportar o metal líquido no momento do vazamento. Geralmente, é constituído de uma estrutura metálica com rigidez suficiente para suportar o socamento da areia e a pressão do metal líquido durante a fundição. A confecção do molde é uma etapa importante do processo, pois é o que permite a distinção entre os diversos processos de fundição [5].

O processo de fundição em areia passa por etapas, desde a confecção do modelo da peça, a confecção do molde, a confecção do macho, massalotes, respiros e canais de vazamento, fechamento do molde, fusão, vazamento, corte de canais e massalotes, rebarbação e limpeza e, finalmente, inspeção final e recuperação.

A figura 1 ilustra como são dispostas as luvas, os resfriadores, as bases, a peça, o filtro e o canal, que definem as condições adequadas para a obtenção do componente final, fundido de acordo com o projetado. [5].

A fundição em areia utiliza de simulação para verificar as condições de vazamento do metal e seu comportamento com relação ao dimensionamento dos componentes para evitar defeitos presentes nas peças a serem fundidas, sendo os mesmos transferidos para canais e luvas. Utiliza-se software MAGMA para cálculos de distorções que possam ocorrer no processo de solidificação [8].

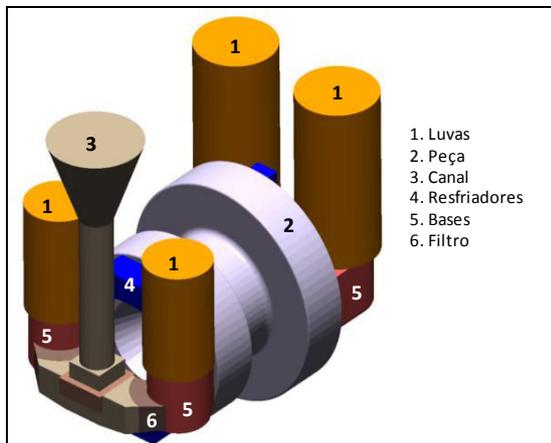


Fig. 1. Peça fundida com molde em areia.

O processo de fundição em areia consiste em compactar uma mistura refratária plástica, denominada *areia de fundição*, que é depositada no modelo ou sobre a caixa de moldar (vide figura 2). Realiza-se a compactação da areia ao encontro do modelo da peça que se pretende obter [6].

A figura 2 apresenta o molde de areia já compactado, com suas partes a serem consideradas para se chegar ao processo adequado de fundição. Após o resfriamento, desmonta-se o molde de areia, retirando-se a peça solidificada, para serem executados os cortes e o esmerilhamento de canais. A peça fundida, após acabamento, encontra-se pronta.

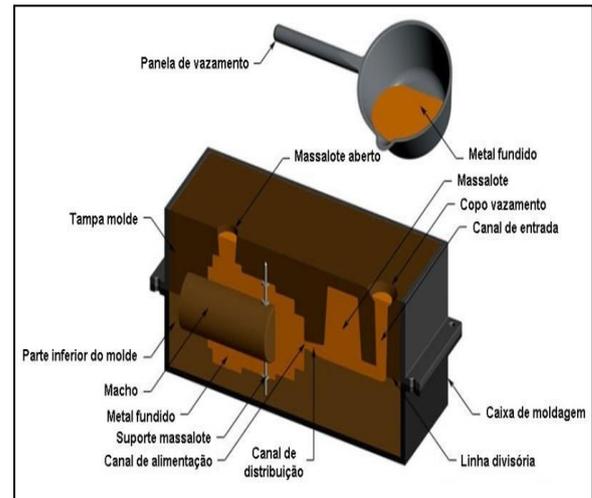


Fig. 2. Processo de fundição em areia [9].

Esse processo deve considerar importantes variáveis além das já citadas, tais quais a solidificação no interior do molde, as espessuras de parede da peça e o planejamento das seções das peças [6,7].

### 1.3. Processo de fundição por centrifugação

A fundição por centrifugação é geralmente utilizada para formas cilíndricas ou simétricas, sendo que a distribuição do metal líquido no molde utiliza a força centrífuga axial, resultante do seu movimento giratório, em uma velocidade entre 300 a 3000 RPM (em plano horizontal ou vertical) sob uma rotação contínua. O vazamento do metal, nesse processo, é realizado diretamente na coquilha, com o auxílio de uma panela com metal líquido, normalmente vazado junto ao centro de rotação da peça, onde o metal, sob a força centrífuga, preenche as seções. Esse processo possui características de elevados fluxos de calor que escoam e proporcionam uma redução no tempo de solidificação, resultando em melhores propriedades mecânicas. Os moldes utilizados nesse processo devem ser projetados de maneira que resultem em pequena ou nenhuma turbulência [10,4].

Defeitos inerentes ao processo de fundição com molde em areia são minimizados na centrifugação, tais quais porosidades internas, pois bolhas de ar que geram tais

defeitos são mais leves que o metal, tendo, sob o efeito da rotação e da força axial, condições para serem transportadas para a superfície externa do material. Por não serem utilizados canais, a solidificação é realizada de forma completa na peça, proporcionando rendimentos próximos a 100%, com relação aos fatores produtivos. Os defeitos podem ser gerados para a área externa do material, na direção da circunferência interior, onde podem aparecer inclusões, depressões e chapelines (descontinuidade proveniente da fusão incompleta dos suportes de resfriadores ou machos) [4].

A seguir, é descrita a forma de fundição por centrifugação vertical e detalhados os equipamentos e funcionalidade do processo [10].

#### 1.4. Fundição por centrifugação vertical

Há o processo de fundição semi-centrifugada, que é utilizado para produzir peças fundidas com configurações determinadas inteiramente pela forma do molde em todos os lados, dentro e fora, girando o molde de fundição sobre seu próprio eixo. Um eixo vertical de fiação normalmente é utilizado para esse método, bem como núcleos, que podem ser necessários se a fundição possuir seções ocas. Assim, como a fundição de molde em areia, obtém-se uma solidificação direcional, com direcionamento adequado.

Peças fundidas difíceis de se produzir estaticamente podem, muitas vezes, serem economicamente produzidas por esse método, devido à força centrífuga empregada no metal fundido sob pressão, geralmente maior do que na fundição estática. Há melhora no rendimento do processo de fundição de forma significativa (85 a 95%), onde o metal preenche completamente as cavidades do molde, resultando em uma fundição de alta qualidade, livre de vazios e porosidade. Seções mais finas podem ser produzidas com esse método, sem as variações a que estão sujeitos os componentes obtidos por fundição de molde em areia [10].

Outro processo é o fundição sob pressão, no qual as cavidades de fundição são dispostas em torno do eixo central de rotação, como os raios de uma roda, permitindo, assim, a produção de peças fundidas múltiplas. A força centrífuga fornece a pressão necessária no metal fundido da mesma maneira como na fundição semi-centrífuga. Esse método é normalmente usado para produzir corpos de válvulas, plugues, suportes e uma grande variedade de componentes industriais [11].

Há, por fim, a fundição centrifugada propriamente dita, que será levada em consideração no estudo e utilizada para produzir peças fundidas em sua forma cilíndrica ou tubular, por fiação do molde, em torno do seu próprio eixo. O fundido produzido por esse processo possui um orifício no interior, de forma cilíndrica, por onde irá ser inserido o metal líquido, de forma linear ou cônica, podendo ser horizontal ou com eixo vertical de fiação. Ao se realizar o vazamento do metal, para que haja o seu agarramento às paredes do molde, a velocidade deve ser bem controlada, sob pena de ocorrer, por excesso, o escorrimento do metal na seção [10,11]. Pode-se utilizar nesse processo moldes de metal com arrefecimento direcionado ou solidificação a partir do exterior da peça, no sentido da direção do eixo de rotação, resultando numa solidificação com melhores parâmetros de qualidade estrutural do fundido, onde fica inibida a presença de efeitos negativos como, por exemplo, rechupes [12].

Esse tipo de fundição vertical é utilizada para a produção de peças com diâmetros relativamente grandes e comprimento máximo igual a duas vezes o diâmetro exterior. A força centrífuga tende a aumentar de acordo com o comprimento do raio a partir do eixo de rotação. A figura 3 ilustra o vazamento do metal e o seu processo de solidificação junto à coquilha, conferindo-lhe a forma pré-definida [10].

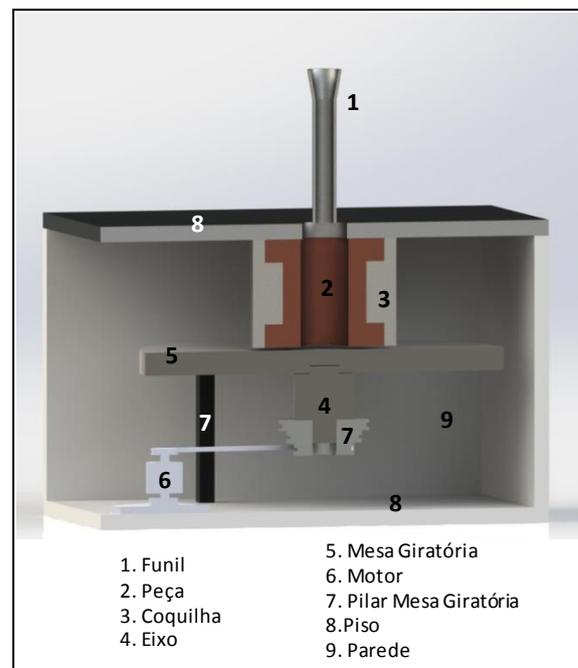


Fig. 3. Máquina centrifugação vertical.

O molde deve ser centrado no eixo de rotação, de forma a evitar vibrações, sendo-lhes fixadas tampas

móveis na parte superior e inferior, de forma a conter o fluido durante a rotação. Os moldes devem ser presos à mesa por meio de travas de segurança, prevista a condição de súbitas elevações de temperatura nas regiões externas do equipamento de centrifugação e, ainda, as condições dos materiais utilizados na fabricação do equipamento [13,4]. Simulações de vazamento do metal em determinadas ligas demonstram uma evolução diferenciada na solidificação no processo de fundição por centrifugação vertical. A difusidade do calor no molde muda de acordo com a força centrífuga empregada. Estudos obtidos por meio de modelos matemáticos comprovam que as variáveis presentes no processo de fundição centrífuga são capazes de influenciar na redução de defeitos [14].

Determinadas componentes em ligas de fundição que são aplicadas na cadeia de óleo e gás em ambientes onshore ou offshore possuem resistência mecânica, resistência à corrosão e soldabilidade equivalentes às obtidas por processo de forjamento [15,16].

A fundição em areia tem o comportamento diferente no processo de solidificação do metal, conforme estudos realizados para a liga ASTM A 216 Gr WCB. Esse comportamento do processo de fundição centrífuga pode resultar em diferenças de propriedades microestruturais e mecânicas [17].

## 2. Procedimento experimental

Para verificar o comportamento em relação aos processos de fundição em areia e fundição por centrifugação, foram retiradas amostras de material e fundida uma peça em areia (a 1670°C) em molde e modelo de madeira, com condição simulada em Magma software 5.2. Para a peça fundida por centrifugação vertical, utilizou-se eixo único de vazamento, como a coquilha metálica, à temperatura de 200°C a 250°C, revestida com material refratário, temperatura de vazamento 1670°C, e rotação de 700RPM. Partes das duas tampas de 6" 600# foram retiradas após o tratamento térmico dos respectivos processos, sendo cortadas as amostras em seções longitudinais. Os ensaios foram empregados na condição da liga após tratamento térmico de normalização a 900°C, com exceção dos ensaios metalográficos e microdureza, estudados antes do tratamento térmico. Foram feitas, também, algumas análises qualitativas antes do tratamento térmico, somente para parâmetro de comparação para estudos futuros [18,19].

### 2.1 Caracterização química

O material estudado foi caracterizado como aço ASTM A216 Grau WCB, sendo estabelecidas as propriedades aqui descritas no item 3.1 deste artigo. O equipamento utilizado para analisar a composição química do material é um espectômetro modelo, Spectrolab, serie 114392/02, fabricado pela empresa Spectro Sul América, com relatório de calibração 24032010.

### 2.2. Ensaios metalográficos

Neste estudo, foi realizada uma análise metalográfica após um ataque com nital solução de 2% de acordo com ASTM E112 (2010). Empregou-se, para isso, um microscópio metalográfico trinocular, marca Pantec, modelo MMI 2000. Outro ataque com reativos metalográficos em ligas ferrosas foi feito e, após, realizada uma análise da estrutura em microscópio em 100µm a 200µm[20,21,22].

### 2.3. Ensaios de tração

Os corpos de prova foram retirados da extensão longitudinal da peça, onde foram seguidos os parâmetros definidos na norma de ensaio ASTM A370.

Os ensaios de tração, realizados em corpos de prova usinados, com as dimensões descritas na ASTM A703, foram submetidos a uma carga suficiente para causar a ruptura do material.

Para a realização de ensaio de tração retirou-se 31 corpos de prova. A figura 4 mostra a localização, na peça, de onde foram extraídos esses corpos para análise das peças fundidas por centrifugação e com molde em areia [23].

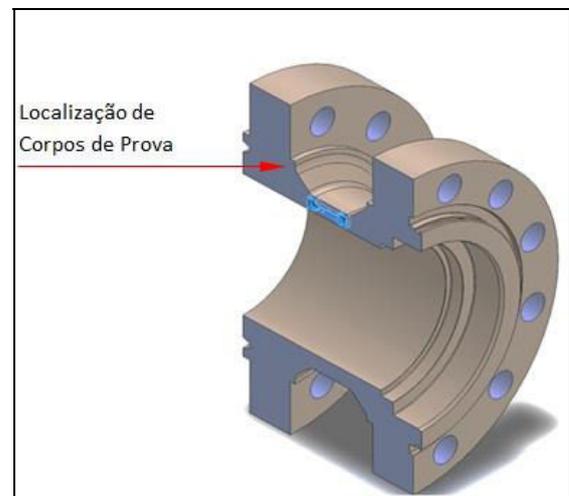


Fig. 4. Local de retirada dos corpos de prova.

Realizou-se uma avaliação das propriedades resultantes do Limite de Escoamento (LE), Limite de Resistência (LR), Redução de Área(RA) e Alongamento(AL). Os ensaios foram feitos com um equipamento de marca Pantec, modelo Versat 10.000, série 049LX-03, fabricada no ano de 2003, com capacidade para 100 kN, resolução de 0,001 kN e com leitura digital.

#### 2.4. Ensaio de microdureza

Para a realização dos ensaios de microdureza a temperatura ambiente foi utilizada a norma ASTM E92-82 (reaprovada 2003). O equipamento usado foi um microdurômetro digital, marca Metallic Vickers Hardness Tester HVS-10, com certificado de calibração número 143/2011. Realizaram-se cinco medições por ponto, sendo considerado o valor médio encontrado. Os ensaios realizados no material bruto de fusão foram para comparar se existe diferencial de dureza obtido em função do processo de fundição centrifuga, mesmo na condição frágil do material antes do processo de normalização.

#### 2.5. Ensaios não destrutivos e critérios de aceitação para vaso pressão válvula

Os defeitos inerentes são atribuídos ao próprio processo de fundição onde, segundo a norma de construção de produto API6D, são efetuados ensaios não destrutivos para verificação de cada tipo de defeito para os materiais dos componentes fundidos. Foram realizados ensaios para cada tipo de defeito, pensando-se na aplicação do produto em área crítica. Os não destrutivos, escolhidos para a verificação da sanidade dos fundidos, foram: Líquido Penetrante, Ultrassom e RX.

A seguir, são descritas as características dos ensaios e seus respectivos critérios de aceitação [24,25].

O ensaio de líquido penetrante é considerado efetivo para detecção de descontinuidades abertas na superfície de diferentes materiais, sendo capaz de identificar defeitos em Metais Ferrosos e não ferrosos. Pode ser utilizado para a detecção de defeitos passantes e para a identificação de vazamentos em vasos de pressão, soldas e componentes. Os critérios de aceitação de defeitos estão estabelecidos na tabela 1[26,27].

Para fins de estudo, utiliza-se a norma ASTM A165, com critérios de aceitação estabelecidos pela norma

ASME B16. 34 e critérios de aceitação para as indicações de defeitos, descritos na tabela 1.

No ensaio de ultrassom, foram adotadas técnicas de acordo com as exigências da ASTM A609, método: “A”, realizando-se varredura, sendo contínua ao longo da superfície analisada na totalidade das peças ensaiadas [28].

Os critérios de aceitação para esse ensaio são definidos em linha reta e angulares. Para indicações em linha reta, que são iguais ou excedem aquelas obtidas do furo de fundo plano, com um diâmetro de 6,4mm no bloco padrão e uma espessura igual à profundidade do defeito, são inaceitáveis. Para indicações em ângulo, as quais são iguais ou excedem as obtidas do V-Noctch de 60°, com um comprimento de 25 mm e uma profundidade não superior a 5% da espessura de parede nominal do corpo de prova padrão, são inaceitáveis [29].

Tabela 1. Critérios de aceitação líquido penetrante

Indicações	Critérios de Aceitação
<b>Indicações Lineares</b>	Indicações cuja largura é igual ou maior que 3 vezes o comprimento de sua largura. As indicações lineares devem estar separadas entre si por uma distância igual ou maior que a largura de sua indicação aceitável, sendo máximas indicações aceitáveis: 8 mm de comprimento para materiais com espessura de até 13mm; 13mm de comprimento para materiais com espessura entre 13mm e 25mm; 18mm de comprimento para materiais com espessura maior de 25mm. Não é aceito qualquer tipo de trinca presente no material.
<b>Indicações Arredondadas</b>	Indicações que não se enquadram nas indicações lineares, aquelas que sua largura é menor que 3 vezes seu comprimento. São máximas indicações aceitáveis: 8mm de diâmetro para materiais com espessura de 13mm; 13mm de diâmetro para materiais com espessuras maiores que 13mm. Não são aceitas indicações arredondadas alinhadas, separadas com menos de 1,5mm de borda a borda.

Fonte: Critérios retirados de ASME 16.34(2009)

Para complementar a investigação de defeitos internos, utilizou-se, também, a Radiografia, que, assim como o Ultrassom, é um método bastante eficaz para detectar descontinuidades com poucos milímetros de extensão. A radiologia industrial técnica, que utiliza imagem projetada do filme radiográfico, representa uma fotografia interna, com capacidade de detecção da maior parte dos defeitos em fundidos [30].

A radiografia é um método baseado na diferença de radiação penetrante pela peça que está sendo inspecionada. Devido às diferenças de densidade, variações de espessura do material e características de absorção, causadas por variações na composição de material, diferentes regiões da peça absorverão quantidades distintas de radiação penetrante. Essa absorção diferenciada é detectada por um filme, ou seja, pela variação da quantidade de radiação absorvida, sendo então indicados defeitos do material. A radiografia é o método capaz de detectar com boa sensibilidade defeitos volumétricos, seja de pequenas ou grandes espessuras, em planos perpendiculares ao feixe, dependendo da técnica de ensaio a ser utilizada. Defeitos tais quais vazios e inclusões que apresentam uma espessura variável em todas as direções são facilmente detectados, tendo, porém, limitantes de localização e espessura da peça relacionada [28,30]. A tabela 2 apresenta os critérios estabelecidos para os defeitos previstos em peças fundidas, onde podem ser identificados defeitos de bolhas de gás, inclusão de areia, chupagem, trincas de contração, resfriadores e chapelins [33].

Tabela 2. Critérios de aceitação exame de radiografia

Tipo	Descrição	Critério
A	Bolhas de Gás	$\geq 2$
B	Inclusão de Areia	$\geq 3$
C	Chupagem ou Rechupagem (todos os tipos CA, CB, CC e CD)	$\geq 3$
D	Trincas de Contração	Nenhuma
E	Trincas	Nenhuma
F	Resfriadores Internos	Nenhuma
F	Chapelins	Nenhuma

Fonte: Critérios Retirados de ASTM 446-2010

O ensaio a ser executado neste estudo segue parâmetros definidos pela norma ASTM E94, tendo como prática recomendada para teste a norma ASTM E142, como controle radiográfico. É assegurada uma sensibilidade de 2% sobre qualquer parte de forma que contenha área em exame, em todas as áreas tecnicamente possíveis de serem avaliadas. O critério de aceitação para radiografia segue a tabela 1, conforme ASME B16.34 e ASTM E446, para espessuras de até 51 mm [25,31,33].

### 2.6. Produção de fundido por centrifugação

A máquina de centrifugação descrita na figura 1 é do tipo poço. Este processo foi escolhido devido à capacidade de produção de fundidos de grandes diâmetros. A máquina é projetada para produzir peças

de grandes geometrias, somente variando para cada peça a coquilha e os parâmetros de processo estabelecidos. A capacidade de fundição de peças para válvulas industriais é de até 16”600 lbs. Há um funil com canal de alimentação fixo ao centro da coquilha. O vazamento do metal é por meio de uma panela, que é conduzida de forma manual, sendo o metal apanhado em um forno de indução elétrica que fica a uma distância de 2 metros do local de vazamento (Fig. 5). A figura 5 mostra o vazamento do metal com seu prato localizado abaixo da superfície. Centrifuga Vertical utilizada para fabricação de componetes de válvulas esfera.



Fig. 5. Vazamento na centrifuga vertical.

A figura 6 mostra a retirada da peça fundida por centrifugação, em coquilha bipartida. A peça é extraída na condição aquecida, para facilitar a sua remoção sem causar danos à coquilha.



Fig. 6. Retirada da peça fundida por centrifugação.

## 3. Resultados e discussão

### 3.1. Análise química

A tabela 3 mostra os resultados de composição química, com atendimento à especificação e valores muito próximos ao limite somente para cromo.

Tabela 3. Composição química

Descrição	Especificado	Encontrado
C	0,30 (A)	0,21
Si	0,60	0,37
Mn	1,00 (A)	0,71
P	0,04	0,02
S	0,045	0,01
Ni	0,50(a)	0,05
Cr	0,50(a)	0,49
Mo	0,20(a)	0,01
Cu	0,20(a)	0,01
V	0,03(a)	0,02

Nota Geral: Valores referenciados são mínimos.

Nota 1: Para cada redução de 0,01% abaixo do valor máximo especificado para o C, um incremento de 0,04% no Mn acima do máximo de 1,00% é permitido até o máximo de 1,28%.

### 3.2. Ensaios metalográficos

Foram retiradas amostras das extremidades dos corpos de prova para os materiais sem tratamento térmico, sendo, após, embutidas à frio, com uma amostra para fundido em areia, e outra para fundido por centrifugação. Realizou-se embutimento, linchamento e polimento e, em seguida, atacadas com reagente nital. As amostras foram analisadas em microscópio óptico e as imagens fotografadas, conforme pode-se verificar nas figuras 7, referente aos materiais não tratados termicamente. A figura 7A mostra uma microestrutura de um fundido em areia, com uma estrutura típica de aço bruto de fusão, composta por uma matriz perlítica com a presença de ferrita acicular e ferrita proeutetóide. A figura 7B apresenta a mesma condição, com exceção do comportamento acicular [36].

Realizado o tratamento térmico de normalização à 900°C, pelo período de 1h, por polegada de espessura de parede, à taxa de aquecimento de 100°C/hora. Após, realizou-se a micrografia nas mesmas condições de preparação da figura 7, cujos resultados são demonstrados na figura 8.

A amostra “08A”, de processo de fundição em areia, mostra a microestrutura típica de um aço normalizado, composta por uma matriz ferrítica com presença de perlita. O tamanho médio do grão ferrítico é de número 7,0. Para a amostra “08B”, fundida por centrifugação, confirma-se a mesma condição da figura 8A, com diferença no tamanho do grão ferrítico, sendo esse de número 8,5 [36].

Analisou-se a amostra da figura 7 sem tratamento térmico, a fim de verificar se poderia apresentar diferenciação entre os dois processos. Observou-se que o tamanho de grão é grosseiro e com característica frágil para os dois processos estudados.

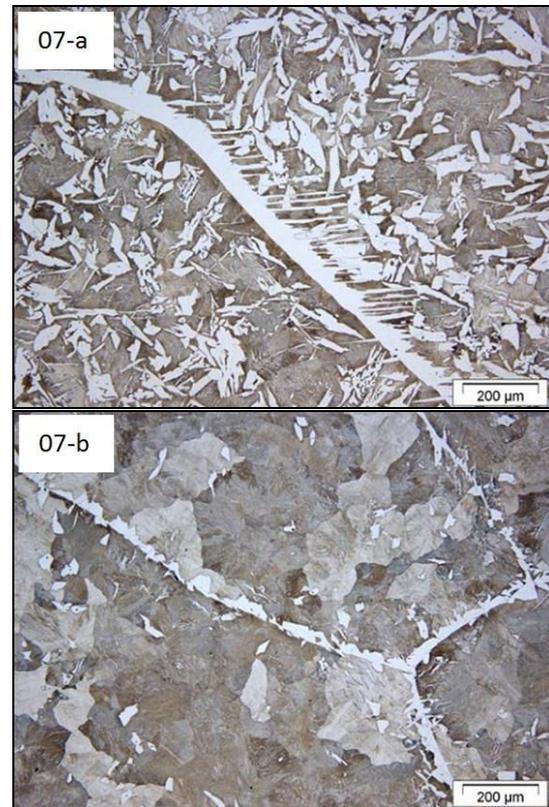


Fig. 7. Fundidos sem tratamento térmico.

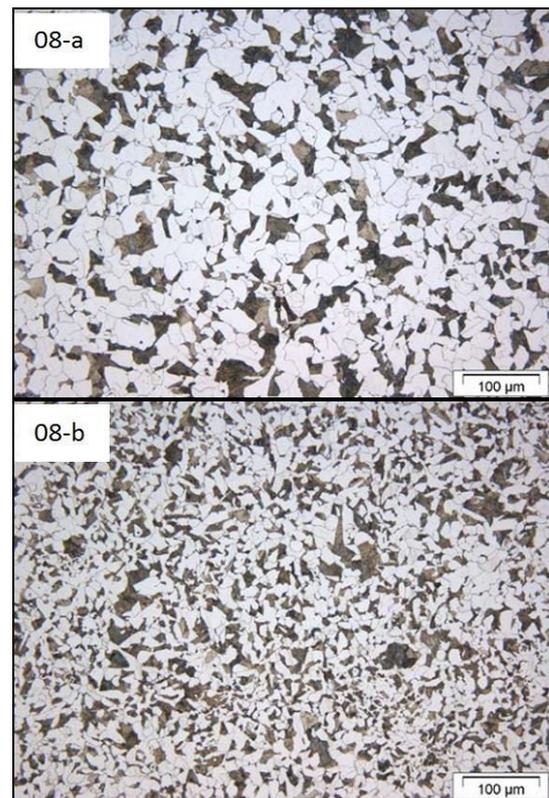


Fig. 8. Fundidos com tratamento térmico.



processo de solidificação planejada na simulação do processo [38].

Para o processo de fundição por centrifugação, o defeito na superfície se caracteriza como inclusão, o qual é ocasionado pelo deslocamento de material não metálico desprendido da panela de fundição durante o vazamento do metal e que foi depositado no canal interno da coquilha, na superfície interna da peça, junto ao canal de vazamento.

As peças foram usinadas novamente com a dimensão final do projeto do produto *válvula esfera*, onde os defeitos foram eliminados e seguidos após os ensaios de Ultrason e Radiografia, não apresentando qualquer defeito nas peças.

#### 4. Conclusões

Os materiais submetidos a ensaio de microdureza, antes de serem tratados termicamente, apresentam menor diferencial para fundidos em areia. Porém, pode se verificar que esse comportamento é devido à quantidade menor de ferrita. Os tamanhos de grão da austenita anterior são grosseiros, relativamente iguais entre as referidas amostras. Verifica-se que, mesmo com valor de microdureza maior para o fundido por centrifugação, os materiais adquirem grãos grosseiros que tendem a gerar condição frágil. O estudo se concentrou na peça fundida de condição normativa. Após o processo de normalização das amostras, os resultados dos estudos morfológicos demonstraram pequena variação do tamanho do grão (com o grão menor para os fundidos por centrifugação), sendo que não houve a manutenção diferença de microdureza.

Observou-se, por meio de ensaios mecânicos, que existem diferenças significativas em relação ao menor coeficiente de variação para o processo de fundição por centrifugação.

Esta condição foi estabelecida para todas as propriedades mecânicas, gerando-se uma probabilidade de menos defeitos presentes na microestrutura do material fundido por este processo.

Nos ensaios ENDS foram verificados defeitos para ambos os processos, localizados na superfície interna da peça e identificados por ensaio de líquido penetrante, o que é considerado normal para aços tanto fundidos em areia quanto por centrifugação. Os ensaios de ultrassom e radiografia revelam que os materiais não possuem defeito interno, ou seja, os dois processos são considerados efetivos.

Foi feito um estudo entre os dois processos, a fim de verificar se haveria viabilidade para a realização de testes mais aprofundados e que pudessem gerar diferenciais entre eles. Esta variável de estudo se tornou viável a partir dos resultados apresentados, com condições para estudos de vida útil do metal sob

condições de fadiga. O processo de fundição por centrifugação demonstrou baixa variabilidade de resultados mecânicos mesmo após o tratamento térmico, o que pode indicar minimização no risco de falhas. Sugere-se, como próxima etapa deste trabalho, estudos de fadiga.

#### 5. Referências

- [1] E.E.R. Russo, A.B. Raposo, T. Fernando, M. Gattass. *A Realidade Virtual na Indústria de Exploração e Produção de Petróleo*. São Paulo - SP : Mania de Livro, 2004.
- [2] G. Chirita, D. Soares, F.S. Silva, *Materials & Des.* 29, 20 (2006).
- [3] T.P.D. Rajan, R.M. Pillai, B.C. Pai. *Materials Characteriz.* 61, 923 (2010).
- [4] Metals Handbook Royer, Alain e Vasseur, Stella. *Horizontal Centrifugal Casting*. 9. ed., 1998, Vol. 15.
- [5] V. Chiaverini, *Tecnologia Mecânica*: São Paulo : Makron Books, 1986.
- [6] S.A. Schutze. *Fundição: Mercado, Processos e Metalurgia*. Rio de Janeiro : UFRJ, 2000.
- [7] W.Jr. Callister, *Ciência e Engenharia dos Materiais: uma introdução*. Rio de Janeiro : LTC, 2011.
- [8] K.D. Carlson, Beckermann, C. Sensitivity of Steel Casting Simulation Results to Alloy Property Datasets, in Proceedings of the 66<sup>th</sup> SFSA Technical and Operating Conference. Paper No. 5.3, Steel Founders' Society of America, Chicago, IL, 2012.
- [9] <http://www.custompartnet.com/wu/SandCasting>. [Online] 15-08-2012.
- [10] Metals Handbook Royer, R.L. Dobson. *Vertical Centrifugal Casting*. 9. ed., 1998, Vol. 15.
- [11] R. Asthana, A. Kumar, N.B. Dahotre. *Material Processing and Manufacturing Science*. s.l.: Elsevier Science & Technology Books, May 2005.
- [12] P. Beeley., *Foundry Technology*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2001.
- [13] J.M.G.C. Ferreira. *Tecnologia da Fundição*. Lisboa: s.n., 1999.
- [14] W.S. Ping, L.D. Rong, G. J. Jie, L.C. Yun et al., *Materials Science and Engineer.* 426, 240 (2006).
- [15] E. Kaschnitz, *International Conference on Modeling of Casting Welding and advanced solidification processes*, 13, 17 (2012).
- [16] G.L. Swales, *Application of Centrifugally-Cast Alloy Piping and Pipe Fittings in Onshore and Offshore oil and Gas Production*. NiDi, Proceedings of the 28<sup>th</sup> Annual Conference of Metallurgists (1989).
- [17] N. Jain, K.D. Carlson, C. Beckermann, *Round Robin Study to Assess Variations in Casting Simulation Niyama Criterion Predictions, in Proceedings of the 61st SFSA Technical and Operating Conference*, Paper No. 5.5, Steel Founders' Society of America, Chicago, IL, 2007.
- [18] ASTM A 751. *Standard Test Methods, Practices, and Terminology for Chemical Analysis of Steel Products*. EUA: ASTM, 2011.
- [19] ASTM A 216/216M. *Standard Specification for Steel Castings, Carbon, Suitable for Fusion Welding, for High-temperature service*. Washington: ASTM, 2008.

- [20] A.F. Padilha, *Materiais de Engenharia: Microestruturas e Propriedades*. São Paulo: HEMUS, 1997.
- [21] Metals - ASM Handbook. Metallography and Microstructures. *ASM HANDBOOK*, Vol. 9, EUA, ASM, 2004.
- [22] H. Colpaert, *Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns*. São Paulo: Edgard Blücher, 2008.
- [23] ASTM A370/370M. *Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products*. EUA: ASTM, 2011.
- [24] API6D. *Specification for Pipeline Valves*. Washington API - American Petroleum Institute, 2008.
- [25] ASME 16.34. *Valves Flanged, and Welding*. New York: ASME, 2009.
- [26] R. Andreucci, Abendi. *Líquidos Penetrantes*. São Paulo: Abendi, Ed. De dezembro, 2011.
- [27] ASTM E165. *Standard Practice for Liquid Penetrant Examination for General Industry*. EUA: ASTM, 2009.
- [28] P.G. P. Leite, *Curso de Ensaio Não Destrutivos*. 8. ed., 1966.
- [29] ASTM A609. *Standard Practice for Castings, Carbon, Low-Alloy, and Martensitic Stainless Steel, Ultrasonic Examination Thereof*. EUA: ASTM, 91, 2007.
- [30] R. Andreucci, Abendi. *Radiologia Industrial*. São Paulo: Abendi, Ed. Março, 2010.
- [31] ASTM E 142. *Method for Controlling Quality of Radiographic Testing*. EUA: ASTM, 1992.
- [32] ASTM E94 - 04. *Standard Guide for Radiographic Examination*. EUA: ASTM, 2010.
- [33] ASTM E 446. *Standard Reference Radiographs for Steel Castings Up to 2 in. (50.8 mm) in Thickness*. EUA: ASTM, 2010.
- [34] R.E. Smallman, R. J. Bishop, *Modern Physical Metallurgy and Materials Engineering*. Linacre House: BH, 1999.
- [35] ANP - Agência Nacional do Petróleo Gás e Biocombustíveis. *Resolução ANP Número 36*. Rio de Janeiro: ANP, 2007.
- [36] ASTM E112. *Standard Test Methods for Determining Average Grain Size*. EUA: ASTM, 2010.
- [37] ASTM A 703. *Standard Specification for Steel Castings, General Requirements, for Pressure - Containing Parts*. EUA: ASTM, 2011.
- [38] MSS SP 55. *Quality for Steel Castings for Valves, Flanges, Fittings, and Other Piping Components – Visual Method for Evaluation of Surface Irregularities*. EUA: MSSP, 2006.