

INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE ALUMÍNIO NA PRODUÇÃO DE TUBOS CENTRIFUGADOS DE FERRO FUNDIDO NODULAR FERRÍTICO*

Ângelo Siqueira da Silva¹
Lucas Martins Coura²
Andersan dos Santos Paula³
Saulo Brinco Diniz⁴

Resumo

Este trabalho teve por objetivo avaliar o potencial gratificante de adições de alumínio, em conjunto com inoculante a base de silício, diretamente no fundo do basquete antes do basculamento da panela de metal líquido no basquete da máquina centrífuga, a fim de produzir tubos centrifugados de ferro fundido nodular de matriz majoritariamente ferrítica. Amostras extraídas da ponta e cabeça dos tubos, sem e com distintas adições de alumínio, foram submetidas a tratamentos de recozimento (1050, 1000 e 900°C), a fim de serem analisadas por meio de análise microestrutural e dureza Brinell. De acordo com os resultados obtidos a incorporação de alumínio ao ferro fundido foi mais efetiva para a incorporação de 1,7% de Al no ferro fundido, permitindo obter um ferro fundido nodular de composição ligeiramente hipereutética, com adequada grafitação e matriz 100% ferrítica, mesmo nas condições testadas com menor temperatura de encharque (900°C) no recozimento, e com dureza dentro das especificações para a aplicação.

Palavras-chave: Ferro fundido nodular; Adição de alumínio; Grafitação; Ferrítico; Tubo centrifugado.

ALUMINUM ADDED INFLUENCE IN FERRITIC DUCTILE CAST IRON CENTRIFUGED TUBES PRODUCTION

Abstract

This study aimed to evaluate the aluminum additions potential graphitized, in conjunction with silicon-based inoculant, straightly on basket bottom before transference of the molten metal pan to centrifugal machine basket in order to produce ferritic ductile cast iron centrifuged tubes. Samples taken from the tip and head of tubes, without and with different aluminum additions, were subjected to annealing treatments (1050, 1000 and 900°C), in order to be scanned structural modifications through microstructural analysis and Brinell hardness. The aluminum incorporation in the cast iron was more effective to results associated to 1.7% of Al in cast iron. Allowing obtain a hypereutetic slightly nodular cast iron composition, with appropriate graphitization and 100% ferritic matrix, even under the conditions tested with lowest soaking temperature (900°C) during annealing treatments, and with hardness within specifications for the application.

Keywords: Ductile-cast iron; Aluminum addition; Microstructure, Centrifuged Pipe.

¹ Eng. Metalurgista pela UFF, Volta Redonda, RJ, Brasil.

² Eng. Metalurgista pela EMM/UFOP, Gerente de Usina, Saint-Gobain Canalização, Itaúna, MG, Brasil.

³ D.Sc. em Ciências dos Materiais, Eng. Metalurgista, Professora Adjunta, IME, Rio de Janeiro - RJ; e orientadora credenciada do PPGEM/UFF, Volta Redonda, RJ, Brasil.

⁴ M.Sc. em Eng. Metalúrgica, Eng. Metalurgista, Doutorando em Ciências dos Materiais, IME, Rio de Janeiro, RJ, Brasil; e Técnico de Educação - Soldagem, CTS-Solda, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. Contato: saulo_brinco@hotmail.com.

1 INTRODUÇÃO

Os ferros fundidos são produtos da redução/fusão de minério de ferro juntamente com fundentes e outros, produzidos em altos-fornos e quando se requer um maior controle da composição química recorre-se a fornos elétricos. Por convenção os ferros fundidos são definidos como ligas constituídas basicamente de ferro, silício e carbono, com um teor de carbono acima de 2,1% em peso, sendo o silício o principal elemento de liga da sua composição [1,2]. Uma das características mais importantes dos ferros fundidos é a de apresentar reação eutética (4,3%C) durante a sua solidificação, desta forma podem ser classificados como ferro fundido hipoeutético (ligas com teores abaixo de 4,3%C), ferro fundido eutético (4,3%C) e ferro fundido hipereutético (ligas com teores abaixo de 4,3%C). Outra forma de classificar os ferros fundidos é de acordo com sua grafita. Neste caso o ferro fundido pode ser classificado como cinzento, branco, mesclado, maleável e nodular [1,3].

O ferro fundido nodular é caracterizado por apresentar grafitas de formas esféricas / nodulares, e para isso a adição de elementos tais como, o magnésio, terras raras e o cálcio, que favorecem a nucleação de grafitas com este formato se torna imprescindível para a obtenção do ferro fundido nodular [2].

Após o tratamento de nodularização segue-se a inoculação do banho metálico com a finalidade de aumentar a nucleação de grafita no ferro fundido líquido, através da adição de inoculantes ao metal líquido. Dentre os inoculantes mais utilizados se encontram o silício, o alumínio, boro (até 15%) e o níquel [4]. Estes inoculantes favorecem a obtenção de uma grande fração volumétrica de núcleos de grafita dispersos na matriz metálica, seja durante a solidificação e/ou reação eutetóide, em função das características químicas do inoculante. Como por exemplo o alumínio, que é um forte grafitizante durante a solidificação, e que favorece a formação de ferrita e de grafita durante a reação eutetóide.

A solidificação das peças de ferro fundido nodular, em particular de tubos, de modo a garantir uma maior sanidade interna é procedida por muitos métodos já consagrados industrialmente que é a fabricação de tubos por centrifugação. O qual consiste em fazer vazar o metal líquido sobre um canal de vazamento, que conduz esse metal até um molde de aço chamado coquilha, a qual se encontra a uma elevada rotação [5]. A rotação deste molde faz, por meio de fenômenos físicos, surgir uma força centrífuga que se encarrega de pressionar esse metal na parede do molde, e pela extração de calor feita pelo molde refrigerado, faz com que o metal líquido vá se solidificando e assumindo a forma de tubo. São necessárias operações de martelamento no molde para garantir uma melhor distribuição do metal e maior aderência durante o vazamento, o que afeta substancialmente a qualidade superficial do tubo, evitando defeitos de fabricação. O metal líquido, ferro fundido, deve estar entre 1375 +/- 10°C para que seja vazado na coquilha, a qual se encontra em uma temperatura em torno de 150 a 190°C.

O presente trabalho (desenvolvido no âmbito do Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação de Silva [6]) teve por finalidade, analisar de forma comparativa o efeito da adição do alumínio, em conjunto com inoculante a base de silício, diretamente no fundo do basquete antes do basculamento da panela de metal líquido no basquete da máquina centrífuga, a fim de produzir tubos centrifugados de ferro fundido nodular de matriz majoritariamente ferrítica. Para que com isto possa-se minimizar ou até mesmo solucionar os problemas causados devido a grande fração volumétrica de perlita e/ou cementita na matriz do ferro fundido objeto de estudo. Para avaliar os resultados foi usada a técnica de microscopia óptica e o ensaio

mecânico de dureza Brinell para caracterizar amostras extraídas de tubos sem e com adição de alumínio, submetidas a tratamentos térmicos de recozimentos.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O material em estudo trata-se de um ferro fundido nodular fabricado pela Saint Gobain Canalização (Barra Mansa, RJ, Brasil), o qual obedece às especificações de composição química, características microestruturais e propriedades mecânicas segundo a norma NBR 7675 [7]. A Tabela 1 apresenta a faixa de composição química dos tubos no presente trabalho conforme a norma NBR 7675, objetivando microestrutura com grafita (esferoidal $\geq 95\%$, compacta $< 5\%$, e nenhuma lamelar) e matriz com ferrita ($\geq 75\%$), perlita ($\leq 25\%$) e cementita ($\leq 5\%$), resultando no comportamento em tração com limite de escoamento mínimo de 270 MPa, limite de resistência de 420 MPa, e alongamento mínimo de 10%, e dureza máxima de 230 HB. Por questões de sigilo industrial não serão detalhados a composição química do inoculante a base de silício, pormenores do processo de fabricação e geometria dos tubos centrifugados.

Tabela 1. Composição Química segundo a norma NBR 7675 [7], objetivando uma composição próxima a eutética ligeiramente hipereutética.

Elemento químico	Faixa
%C	3,65 - 3,85
%Si	2,1 - 2,3
%Mn	até 0,4
%P	até 0,08
%S	até 0,01
%Mg	0,035 - 0,06

Para este estudo foram utilizadas 4 variações de massas de alumínio (sem adição de alumínio; 3,6 kg; 2,3 kg; e 1,235 kg) adicionados antes da etapa de fabricação dos tubos (centrifugação). Não houve variação do processamento de fabricação usual da Saint Gobain, onde realiza-se o processo de nodularização de imersão por sino com magnésio após o processo de acerto da composição química na metalurgia de panela, seguida da inoculação durante o basculamento da panela de metal líquido no basquete da máquina centrifugadora. Assim a adição do alumínio metálico (comercialmente puro) foi feita diretamente no fundo do basquete antes do basculamento da panela de metal líquido no basquete da máquina centrífuga. Foram retiradas amostras da região de bolsa e da ponta do tubo (indicado na Figura 1), após a completa centrifugação do tubo e posterior resfriamento, seja daquele que foi extraído da linha para estudo sem tratamento térmico em escala industrial, e daquele direcionado para o forno de recozimento industrial. As amostras extraídas do tubo sem tratamento térmico em escala industrial foram destinadas ao tratamento térmico em escala laboratorial.

Amostras das regiões da Bolsa e Ponta (Figura 1) foram retiradas com auxílio de uma máquina de corte em serra, e logo a pós a extração, foram realizados cortes (máquina de corte abrasivo) a fim de se obter amostras menores para análise de composição química, análise microestrutural, ensaio de tração e dureza Brinell.



Figura 1. Regiões de Bolsa e Ponta do tubo para retirada de amostras para o presente estudo.

Resumindo as amostras do tubo com tratamento térmico nas condições em escala industrial e em escala laboratorial, foram submetidas a análise de composição química, análise microestrutural e dureza Brinell.

Foram realizados tratamentos térmico de recozimento em 3 temperaturas distintas 900, 1000 e 1050°C, no qual a última temperatura, foi realizada em escala industrial (com um posterior resfriamento ao ar parado), mantendo todos os parâmetros do processo sem modificações. Nos tratamentos térmicos realizados nas temperaturas de 900 e 1000°C, em escala laboratorial (forno tipo mufla), adotou-se um tempo de encharque de 19 minutos, seguido de um resfriamento ao ar parado, sendo todo o perfil de aquecimento, encharque e resfriamento monitorados com termopar. Tal tempo de encharque em escala laboratorial foi baseado no tempo utilizado para o tratamento térmico em escala industrial.

Para a análise de composição química foram utilizados dois equipamentos distintos, seguindo os procedimentos e normas internas da Saint Gobain: (i) para a análise dos elementos carbono e enxofre foi utilizado um equipamento LECO do tipo A série CS-200, no qual se fez uso de uma pequena quantidade em massa (2 g); e (ii) os demais elementos foi utilizado um espectrômetro da marca Shimadzu da série CES 550. Após obter o resultado da composição química final do material, foi procedido o cálculo da taxa de incorporação do alumínio (Ti), mediante a Equação (1):

$$Ti = [A * (Bf - Bi)] / C * D * 100 \quad (1)$$

onde A é a quantidade (kg) de metal líquido no basquete, Bf é o percentual do alumínio final após a solidificação do tubo, Bi é o percentual do alumínio inicial antes da adição do alumínio, C é a quantidade em quilograma de alumínio adicionado durante o processo de produção, e D é o percentual de rendimento do alumínio.

De acordo com a temperatura de tratamento térmico e o percentual de alumínio incorporado (Ti), as amostras em estudo foram nomeadas segundo a Tabela 2.

Tabela 2. Nomenclaturas das amostras em estudo em função da temperatura do tratamento térmico, percentual de alumínio incorporado e local de realização

Temperaturas		% de Alumínio		Local de Execução do Tratamento Térmico
900	900°C	R	0,005%Al	UFF = U niversidade F ederal F luminense
1000	1000°C	X	0,238%Al	
1050	1050°C	Y	0,171%Al	SG = S aint Gobain C analização
		Z	0,135%Al	

Para a análise metalográfica e de dureza Brinell (HB) as amostras foram lixadas com lixas de carbeto de silício de 120 a 1200 mesh, polidas com uma solução aquosa de alumina de 1; 0,5 e 0,3 µm. Para a análise metalográfica as amostras foram avaliadas sem ataque (para verificar a presença de grafita quanto a sua forma,

tamanho e distribuição) e com ataque de Nital 3% (para revelar a microestrutura resultante na matriz metálica).

Para a análise microestrutural foi utilizado um microscópio óptico Leica, conectado a uma câmera controlada pelo *software Image-Pro Plus*. Foram observados 3 campos por amostra, tanto na condição sem ataque (grafita presente) e com ataque (microestrutura da matriz metálica).

Devido a quantidade limitada de material, com o intuito de tão somente observar uma tendência na evolução do comportamento mecânico, foram medidos os valores de dureza associados a cada uma das condições em estudo. Os ensaios de dureza Brinell foram realizados em um macrodurômetro (marca Wolpert), com um indentador esférico de aço, e com um tempo de aplicação de carga de 20 segundos. Tal ensaio de dureza Brinell foi realizado segundo a norma NBR187-1 [7] da ABNT, e para tal análise foram realizadas 3 medições de dureza utilizando uma carga de 187,5 kgf.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 3 são apresentados os resultados obtidos das análises de composição química (segundo cálculo realizado com a Equação (1)) para as amostras em estudo, sendo a amostra "... R.." aquela na qual não foi adicionado alumínio, somente presente o alumínio residual da corrida. Tal análise foi realizada para inferir a quantidade de alumínio que foi incorporada nas amostras.

Tabela 3. Resultado da análise de composição química para os tubos centrifugados fabricados para o presente estudo

Amostra	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Mg	%Al	CE
...R..	3,74	1,80	0,22	0,08	0,01	0,05	0,01	4,37
...X..	3,66	1,84	0,22	0,08	0,01	0,05	0,24	4,30
...Y..	3,72	1,81	0,21	0,08	0,01	0,04	0,17	4,35
...Z..	3,70	1,83	0,22	0,08	0,01	0,04	0,14	4,34

De acordo com a Tabela 3, pode-se observar que os principais elementos químicos analisados (C, Si, Mn, P, S e Mg), não sofreram alterações significativas devido a adição de diferentes massas de alumínio durante a fabricação dos tubos. Obtendo assim com carbono equivalente (CE) entre 4,30 e 4,37 (conforme Tabela 3), que atenderam a expectativa de uma composição eutética a ligeiramente hipereutética.

A partir dos resultados apresentados na Tabela 4 para a dureza Brinell, os valores obtidos apresentaram-se dentro do exigido pela norma NBR 7675 [7], ou seja, inferior a 230 HB.

Tabela 4. Valores médios da dureza obtidos com ensaios de dureza Brinell nas amostras em estudo em função do percentual de alumínio incorporado e temperatura de recozimento

Amostras	900RUFF	900XUFF	900YUFF	900ZUFF	1000RUFF	1000XUFF	1000YUFF	1000ZUFF	A1050RSG	B1050XSG	C1050YSG	D1050ZSG
Dureza	130	143	140	143	135	149	132	143	138	135	131	143
Norma NBR 7675 [5] = (Max 230HB)												

Nas Figuras 2 a 7 são apresentadas as microestruturas das amostras em estudo, sem ataque (Figuras 2, 4 e 6) e com ataque (Figuras 3, 5 e 7).

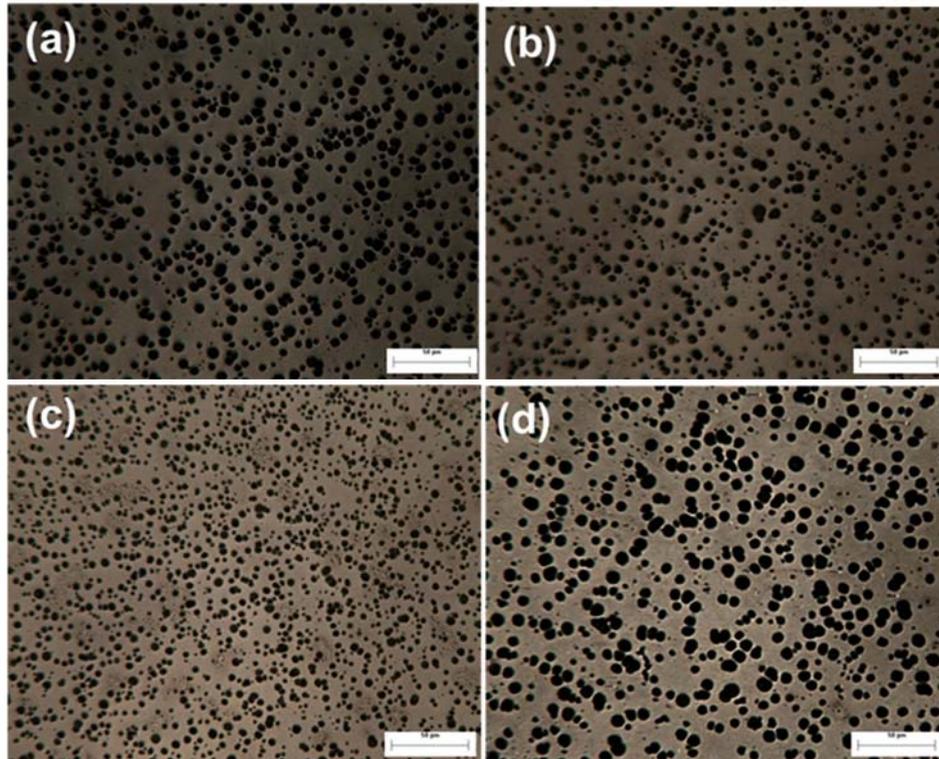


Figura 2. Aspecto microestrutural sem ataque das amostras (a) 1050RSG, (b) 1050XSG, (c) C1050YSG e (d) D1050ZSG – análises com 100x.

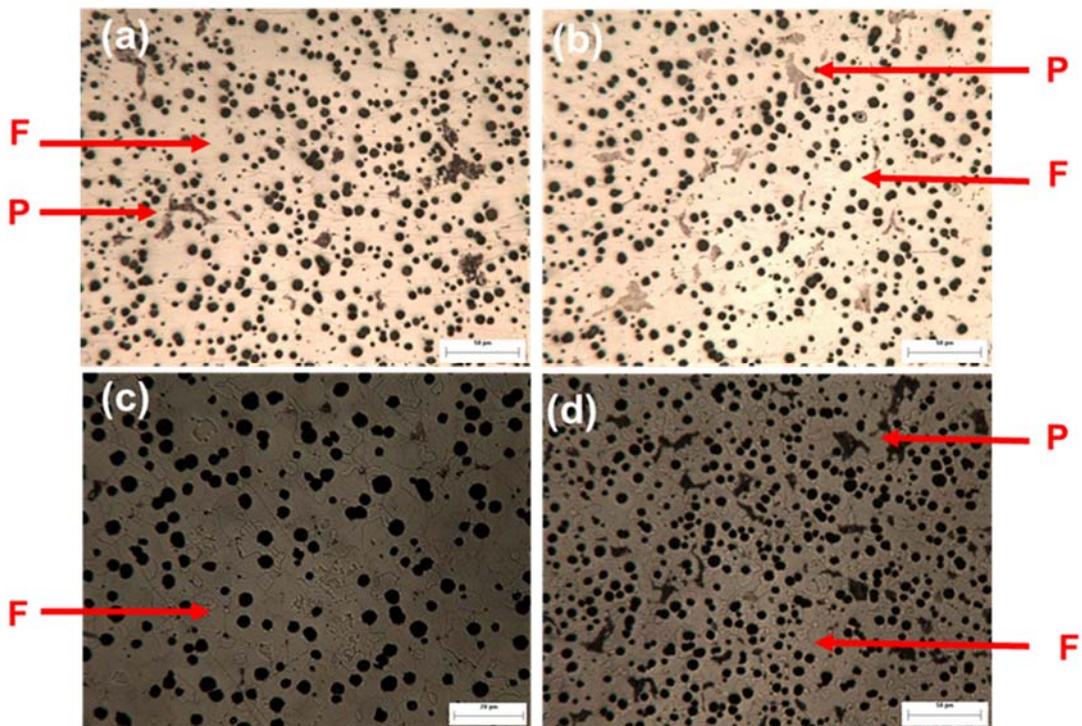


Figura 3. Aspecto microestrutural com ataque (Nital 3%) das amostras (a) 1050RSG (100x), (b) 1050XSG (100x), (c) 1050YSG (200x) e (d) 1050ZSG (100x), com ataque. (F = ferrita, coloração clara e P = perlita, coloração acinzentada / escura).

5

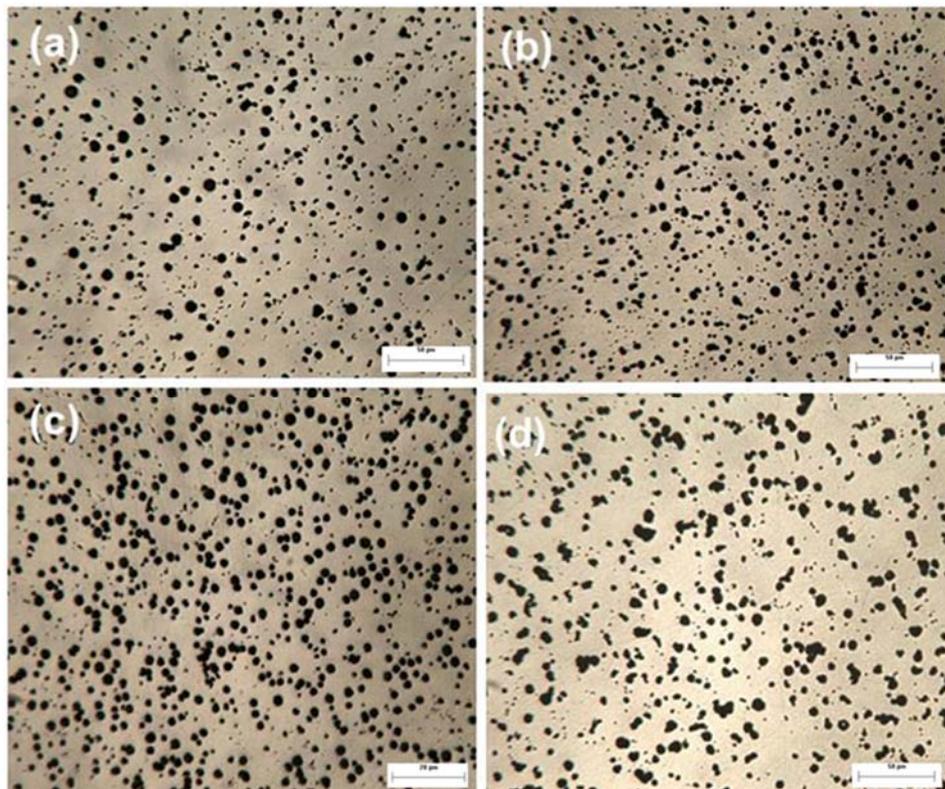


Figura 4. Aspecto microestrutural sem ataque das amostras (a) 1000RUFF (100x), (b) 1000XUFF (100x), (c) 1000YUFF (200x) e (d) 1000ZUFF (100x) – análises com 100x.

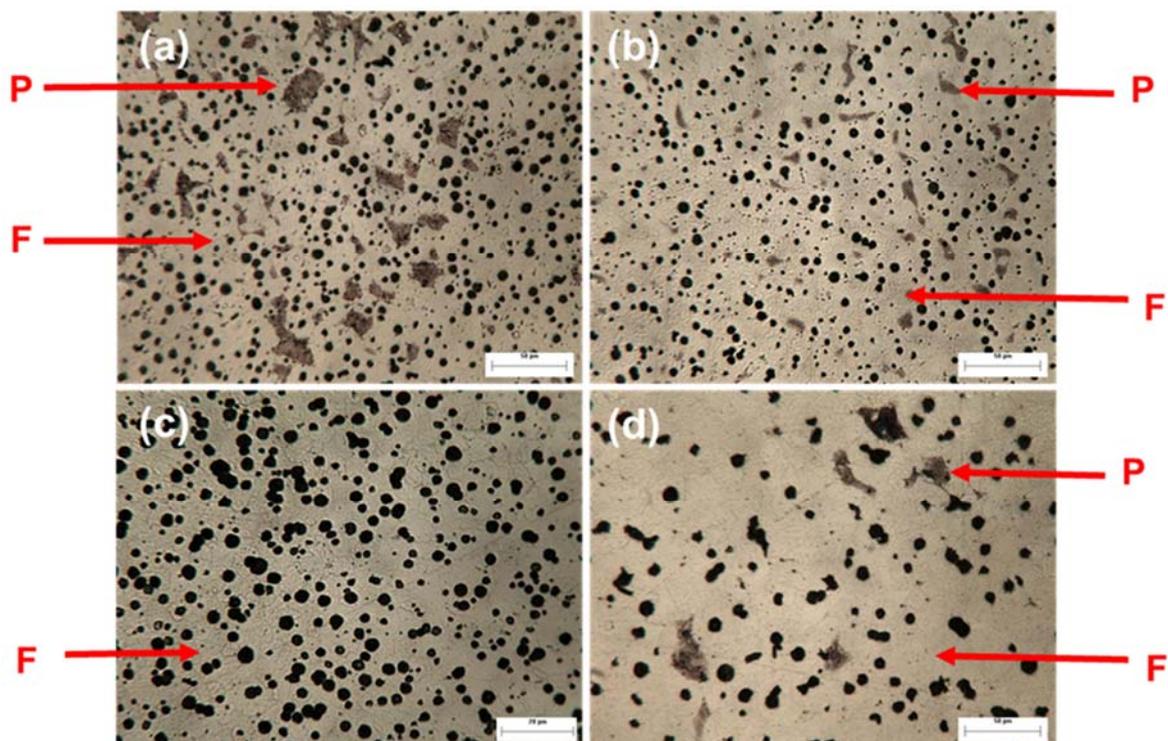


Figura 5. Aspecto microestrutural com ataque (Nital 3%) das amostras (a) 1000RUFF (100x), (b) 1000XUFF (100x), (c) 1000YUFF (200x) e (d) 1000ZUFF (200x), com ataque. (F = ferrita, coloração clara e P = perlita, coloração acinzentada / escura).

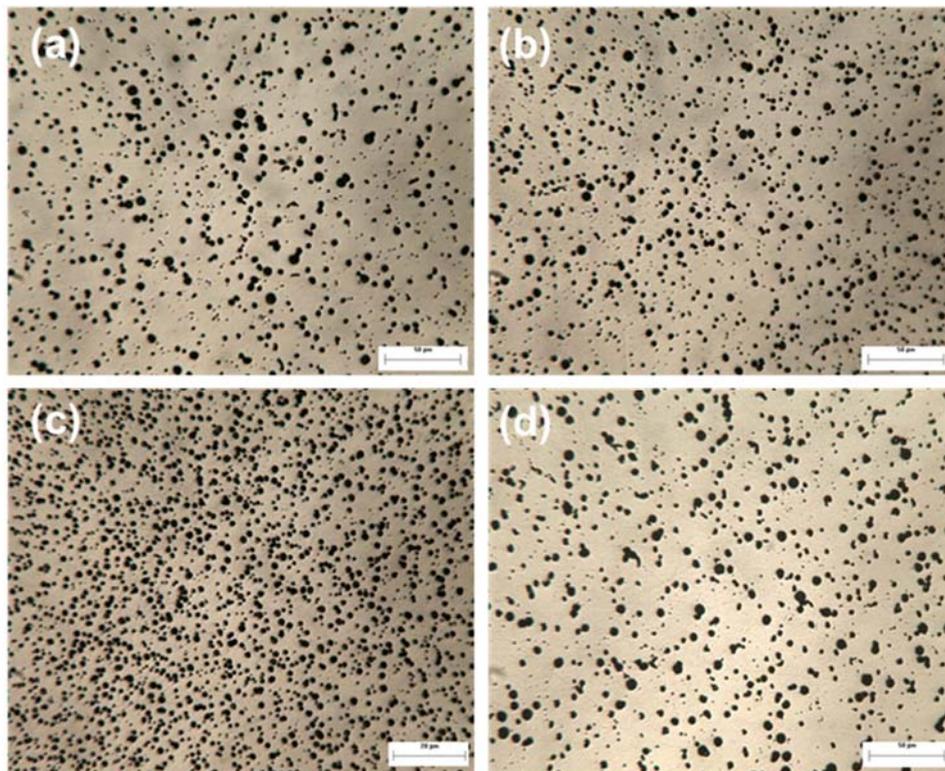


Figura 6. Aspecto microestrutural sem ataque das amostras (a) 900RUFF (100x), (b) 900XUFF (100x), (c) 900YUFF (200x) e (d) 900ZUFF (100x) – análises com 100x.

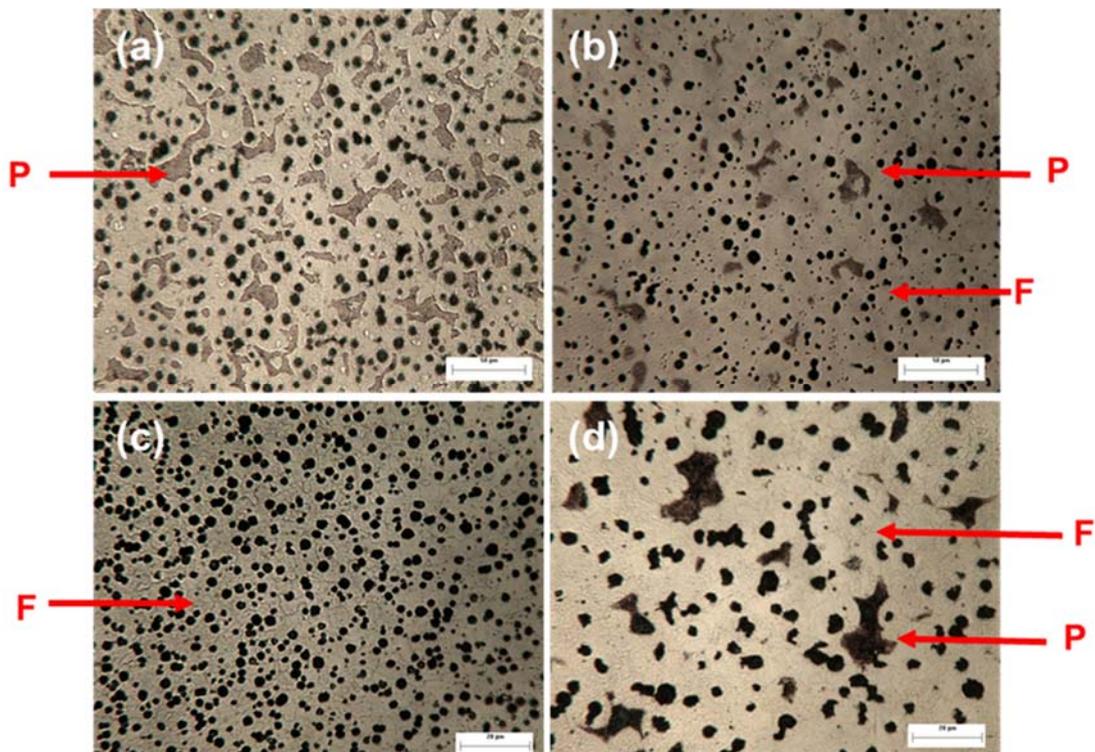


Figura 7. Aspecto microestrutural com ataque (Nital 3%) das amostras (a) 900RUFF (100x), (b) 900XUFF (100x), (c) 900YUFF (200x) e (d) 900ZUFF (200x), com ataque. (F = ferrita, coloração clara e P = perlita, coloração acinzentada / escura).

De acordo com as micrografias observadas sem ataque para as distintas amostras (Figuras 2, 4 e 6) foi-se possível definir o grau de nodularidade. Na Tabela 5 são apresentados os valores do grau de nodularidade avaliados para as amostras em estudo.

Tabela 5. Grau de nodularidade das amostras tratadas termicamente no forno de recozimento II (1050°C) da Saint-Gobain Canalização e em escala laboratorial (1000 e 900°C)

Amostras	1050RSG	1050XSG	1050YSG	1050ZSG	1000RUFF	1000XUFF	1000YUFF	1000ZUFF	900RUFF	900XUFF	900YUFF	900ZUFF
Nódulos perfeitos (%)	24	22	19	24	12	14	16	10	12	13	16	8
Densidade de Nódulos perfeitos	764	623	783	699	377	445	518	319	388	410	533	271

De acordo com os dados apresentados na Tabela 4, no que diz respeito a “nódulos perfeitos” e sua “densidade”, pode-se observar que para as amostras tratadas as temperaturas de 1050°C, 1000°C e 900°C, as amostras que tiveram um maior grau de nodularidade foram às amostras 1050YSG (Figura 2c), 1000YUFF (Figura 4c) e 900YUFF (Figura 6c), respectivamente. Desta forma, a adição de 1,7 kg de Al por tonelada de ferro fundido durante fabricação do tubo, independente da temperatura de tratamento térmico, proporciona um maior grau de nodularidade no ferro fundido do que as demais condições.

Com base nas Figuras 3, 5 e 7, calculou-se as frações volumétricas dos microconstituintes presentes na matriz metálica, ou seja, de Ferrita e Perlita (Tabela 5) para as amostras tratadas termicamente as temperaturas de 1050°C, 1000°C e 900°C. Tendo em vista que não foi evidenciada a presença de cementita livre na matriz metálica.

Tabela 6. Fração volumétrica dos microconstituintes presentes na matriz metálica das amostras tratadas termicamente.

Amostra	Ferrita	Perlita	Total	Amostra	Ferrita	Perlita	Total	Amostra	Ferrita	Perlita	Total
1050RSG	89%	11%	100%	1000RUFF	90%	10%	100%	900RUFF	75%	25%	100%
1050XSG	88%	12%	100%	1000XUFF	95%	5%	100%	900XUFF	95%	5%	100%
1050YSG	100%	0%	100%	1000YUFF	100%	0%	100%	900YUFF	100%	0%	100%
1050ZSG	90%	10%	100%	1000ZUFF	96%	4%	100%	900ZUFF	84%	16%	100%

De acordo com a Tabela 6, pode-se observar que para as amostras “..Y..”, ou seja, amostras que tiveram uma incorporação de 1,7% de Al no ferro fundido durante a produção, atingiram um maior grau de ferritização da matriz (100% em todos os casos), independente da temperatura de tratamento.

Confrontando os mesmos com os resultados pertinentes a fração volumétrica dos microconstituintes na matriz metálica (Tabela 6), constata-se que quanto maior a fração de ferrita menor a dureza resultante (Tabela 4). Os quais estão vinculados ao percentual de 1,7% de Al presente no ferro fundido (Tabela 3).

De uma maneira geral, com base nos valores apresentados anteriormente, é possível observar que mesmo utilizando tratamentos térmicos com temperaturas inferiores (900 e 1000°C) àquela praticada industrialmente (1050°C) e distintas adições em massas de alumínio durante o processo de fabricação, obteve-se valores de propriedades dentro da faixa estipulada pela norma NBR 7675 [7].

4 CONCLUSÃO

De acordo com os resultados apresentados, pode-se concluir que:

(i) a presença de 1,7 % de Al no ferro fundido mostrou-se mais eficiente no processo de decomposição da Fe_3C para formação de grafita, associado às evidências de obtenção de uma matriz 100% ferrítica, com significativa nodularização da grafita e valores adequados de dureza para qualquer das temperaturas de recozimento testadas no presente estudo;

(ii) a adição de alumínio durante o processo de fabricação mostra indícios de não ter promovido efeitos deletérios as propriedades mecânicas do tubo para aplicação que se destina. No entanto incorpora esta adição gastos aos processos que podem vir a ser minimizados com modificações nas práticas de tratamento térmico pelo uso de temperaturas de encharque mais baixa, o que reduziria os gastos com insumos/energia para o forno de recozimento.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Universidade Federal Fluminense pela infraestrutura oferecida; a Saint Gobain pelo suporte e fornecimento do material de estudo.

REFERÊNCIAS

- 1 Chiaverine V. Aços e Ferros Fundidos. 6ª Edição. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 1992.
- 2 Santos ABS, Branco CHC. Metalurgia dos Ferros Fundidos Cinzentos e Nodulares. São Paulo: IPT, 1991.
- 3 Siege M. Fundição. 8ª Edição. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 1977.
- 4 Norma NBR 7675. Tubos e conexões de ferro dúctil e acessórios para sistema de adução e distribuição de água. 2ª Edição. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2005.
- 5 Chiaverine V. Tecnologia Mecânica, Processos de Fabricação e Tratamento. 2ª Edição. São Paulo: McGraw – Hill, 1986
- 6 Silva AS, Influência da Adição de Alumínio como Inoculante e na Formação de Microestrutura Ferrítica em um Ferro Fundido Nodular Utilizado para Produção de Tubos Centrifugados, Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação, UFF, Volta Redonda/RJ, Brasil, 2011.
- 7 Norma NBR187-1. Materiais metálicos - Dureza Brinell. Parte 1: Medição da dureza Brinell. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1999.