

## GRANULAÇÃO DE FERRONÍQUEL COM TUNDISH ROTATIVO\*

Jose Antonio Miguel Rodrigues Junior <sup>1</sup>  
Manuel Enrique Rodriguez <sup>2</sup>  
Rogério Junji Arita<sup>3</sup>  
Bruno Cesar de Souza<sup>4</sup>  
Kristina Beskow<sup>6</sup>  
Andreas Persson<sup>6</sup>

### Resumo

A planta industrial de produção de ferroníquel da Anglo American Barro Alto (AABA), localizada no Estado de Goiás, recebeu notificação de clientes como Aperam (Bélgica) e Acerinox (Espanha), em relação ao formato esférico apresentado pelo ferroníquel produzido em AABA. Para solucionar o problema, foi realizado teste na planta piloto da empresa de engenharia UHT para desenvolvimento de novos projetos e de nova tecnologia com objetivo de aperfeiçoar o formato do produto final. A utilização de disco de 4 canais solucionou o problema do formato esférico, no entanto, forma-se muito “bodes” ocasionando explosões. O sistema de granulação utilizando um tundish rotativo, mantém as mesmas características físicas do metal granulado com disco de 4 canais além de aumentar a segurança da operação, reduzindo os riscos de segurança do trabalho.

**Palavras-chave:** Solidificação; Granulação de Metal; ferroníquel; FeNi.

### Metal Granulation with Rotating Tundish

#### Abstract

Anglo American Barro Alto (AABA), ferronickel production facilities in the state of Goiás received reclaim from clients such as Aperam (Belgium) and Acerinox (Spain), about the spherical shape presented by AABA ferronickel. To solve the problem, tests in the pilot plant was carried out at UHT engineering company, in order to develop new projects and new technology to optimize the final product format. 4-channel refractory piece were designed and solved the problem of the spherical shape. However, a lot of metal build up were formed during the operation, causing explosions. The granulation systems using a rotating tundish technology were developing to keep the same physical characteristics of the granules with 4-channel refractory piece as well as increasing the safety of the operation.

**Keywords:** Casting; Metal Granulation; ferronickel; FeNi.

<sup>1</sup> Engenheiro Metalurgista, Engenheiro, Gerente de Processo, Gerencia de Desenvolvimento e Controle de Processo, Anglo American, Barro Alto, Goiás e Brasil.

<sup>2</sup> Engenheiro Metalurgista, Engenheiro, Coordenador de Processo, Gerencia de Desenvolvimento e Controle de Processo, Anglo American, Barro Alto, Goiás e Brasil.

<sup>3</sup> Engenheiro Metalurgista, Engenheiro, Engenheiro de Processo, Gerencia de Desenvolvimento e Controle de Processo, Anglo American, Barro Alto, Goiás e Brasil.

<sup>4</sup> Técnico Metalurgista, Técnico, Técnico de Processo, Gerencia de Desenvolvimento e Controle de Processo, Anglo American, Barro Alto, Goiás e Brasil.

<sup>5</sup> PhD., UHT Uvån Hagfors Teknologi AB, Sweden.

<sup>6</sup> Mechanical Engineer, UHT Uvån Hagfors Teknologi AB, Sweden

<sup>7</sup>

## 1 INTRODUÇÃO

A solidificação de ferroligas e tipos de produtos similares podem ser feita de muitas maneiras diferentes. A demanda especial deste tipo de materiais tem de ser cuidadosamente considerada quando um método de solidificação é selecionado ou desenvolvido, tendo como principais parâmetros a serem observados a tendência de segregação, a segurança operacional, a produtividade, o formato final e o custo do produto. Os métodos desenvolvidos para a solidificação e formato final do produto, são baseados nas propriedades mecânicas dos diferentes tipos de materiais, que no caso do ferroníquel apresenta a característica de ser dúctil. Importantes reduções de custos de operação podem ser realizadas através da introdução da granulação do metal, a fim de substituir os métodos tradicionais de fundição e moagem.

Os principais métodos de granulação industrial para ferro, aço, ou ferroligas, que se baseiam em resfriamento em água são:

- Water Jet granulation: o fluxo de metal líquido é dividido com jatos de água em alta pressão;
- Direct granulation: o fluxo de metal líquido é despejado diretamente sobre a água;
- Granshot®: dispersão do fluxo de metal contra um elemento de impacto, antes do contato com a água.

Durante o processo de granulação com água, o metal líquido solidificado tende a ficar com o formato de grânulos, que são adequados para o fácil manuseio, processamento adicional ou dosagem exata em outros processos.

Este trabalho tem como objetivo apresentar o desenvolvimento e a implantação da nova configuração do sistema de granulação de ferroníquel da planta industrial da Anglo American, em Barro Alto - GO, que foi baseado nas análises dos estudos e testes realizados em escala piloto no laboratório da empresa de engenharia sueca UHT, detentora de *know-how* e atuação no desenvolvimento de novas tecnologias, principalmente em processos de granulação de metal

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Realizado testes na planta piloto do novo protótipo de granulação de metal, sendo o novo mecanismo formado por uma mesa rotativa de sustentação do tundish, granulando direto na água.

Os testes devem validar a segurança do novo sistema, assim como garantir o formato do FeNi .



Figura 1. Novo sistema tundish rotacional

## 2.1 Procedimento de execução dos testes

A configuração utilizada no ensaio segue descrita abaixo:

- Carregamento do ferroníquel sólido no forno de indução.
- Fusão da carga / ajustes de temperatura / adição de FeSi.
- Ajuste da rotação (baixa, média e alta)
- Iniciar circulação de água no tanque de granulação e sistema de transporte.
- Vazar metal para o distribuidor com temperatura de 1.640 °C.
- Iniciar a granulação.
- Medição da temperatura do metal no distribuidor.
- Finalizar a granulação.
- Remoção do granulado
- Secagem
- Peneiramento de todo material granulado produzido.

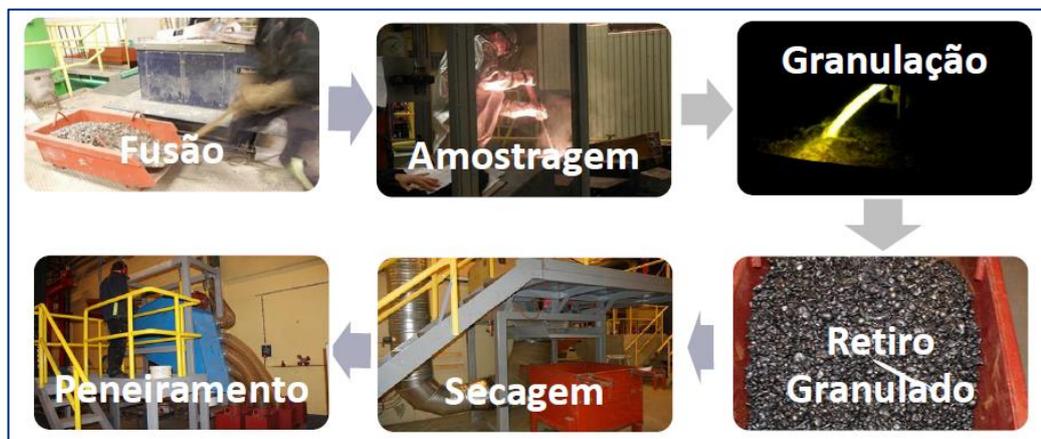


Figura 2. Sequência base adotada nos ensaios realizados na planta piloto da UHT

## 2.2 Bateria de Testes

O intuito deste método foi realizar a granulação com teor de silício baixo e alto para observar o comportamento durante a solidificação. Foi também alterado a rotação para avaliação do efeito no granulado.



Figura 3. Configuração com disco refratário 2 canais

Tabela 1. Configuração dos testes

| Teste N° | %Si  | Rotação (rpm) |    |
|----------|------|---------------|----|
| 1        | C242 | 0,050         | 3  |
| 2        | C244 | 0,110         | 12 |
| 3        | C246 | 0,010         | 24 |
| 4        | C248 | 0,100         | 36 |
| 5        | C243 | 0,190         | 3  |
| 6        | C245 | 0,285         | 12 |
| 7        | C247 | 0,290         | 14 |
| 8        | C249 | 0,210         | 36 |
| 9        | C251 | 0,005         | 11 |
| 10       | C252 | 0,280         | 11 |
| 11       | C253 | 0,320         | 11 |
| 12       | C254 | 0,210         | 11 |
| 13       | C255 | 0,120         | 3  |
| 14       | C256 | 0,220         | 3  |

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O método de granulação com tundish rotativo atingiu na escala piloto o mesmo resultado granulométrico (formato irregular do granulado) dos discos refratários de canais e sistema rotacional.

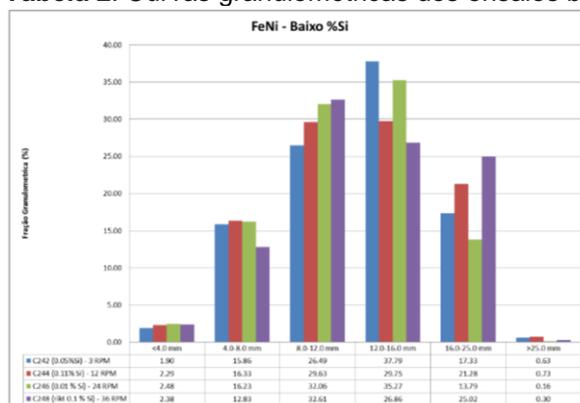
Na escala piloto os testes com o sistema sugerido foram de forma segura, mantendo estável a temperatura da água (chegou ao máximo ate 39 °C.) durante a granulação (sem explosões).

Outros importantes aspectos foram:

- Eliminação da barra interna e disco refratário; eliminando os riscos de explosão por formação de bode na barra e por quebra do disco.
- Facilidade no manuseio, tundish menor otimizando as manobras dos operadores e diminuição do consumo refratário.
- Garantia do giro contínuo já que o mesmo é gerado na mesa, dissipação de calor do metal no perímetro do tanque.

#### 3.1 Resultados - Baixo %Si:

Tabela 2. Curvas granulométricas dos ensaios baixo %Si



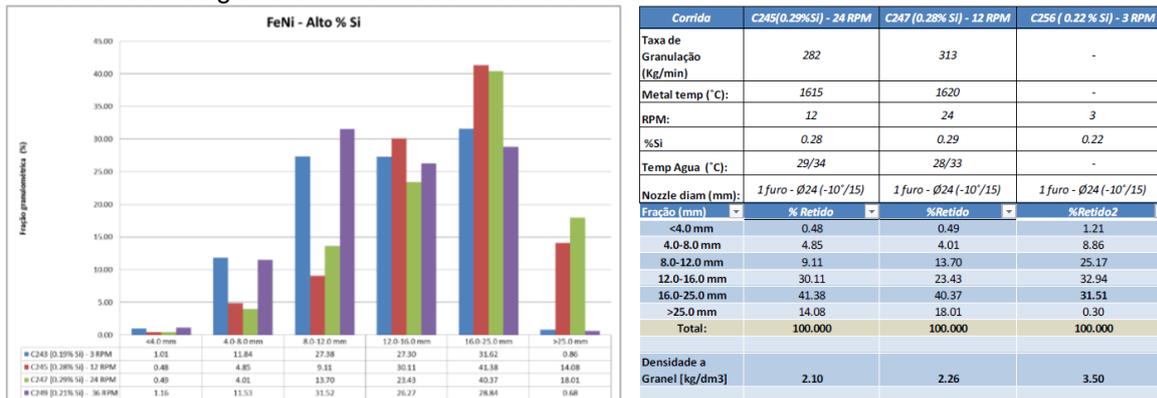
| Corrida                     | C242 (0,05% Si) - 3 RPM | C244 (0,11% Si) - 12 RPM | C248 (0,1% Si) - 36 RPM |
|-----------------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|
| Taxa de Granulação (Kg/min) | 262                     | 294                      | 222                     |
| Metal temp (°C):            | 1650                    | 1624                     | 1620                    |
| RPM:                        | 3,3                     | 12                       | 36                      |
| %Si                         | 0,05                    | 0,11                     | 0,1                     |
| Temp Agua (°C):             | 14/21                   | 23/29                    | 33/39                   |
| Nozzle diam (mm):           | 1 furo - Ø24 (-10'/15)  |                          |                         |
| Fração (mm)                 | % Retido                | % Retido                 | % Retido 2              |
| <4,0 mm                     | 1,90                    | 2,20                     | 2,38                    |
| 4,0-8,0 mm                  | 15,86                   | 16,33                    | 12,83                   |
| 8,0-12,0 mm                 | 26,49                   | 29,63                    | 32,61                   |
| 12,0-16,0 mm                | 37,79                   | 29,75                    | 26,86                   |
| 16,0-25,0 mm                | 17,33                   | 21,28                    | 25,02                   |
| >25,0 mm                    | 0,63                    | 0,73                     | 0,30                    |
| Total:                      | 100,000                 | 100,000                  | 100,000                 |
| Densidade a Granel [kg/dm³] | 4,25                    | 4,24                     | 4,24                    |

Nas corridas com baixo %Si o melhor resultado corresponde a corrida C248 com maior porcentual na fração grossa 25% entre 16-25 mm e 13% entre 4-8 mm.

Sendo esta fração elevada se observa a necessidade de aumentar o % Si para diminuir % entre 4-8 mm, já que os resultados permanecem incluso baixando as rpm no mínimo.

### 3.1 Resultados - Alto %Si:

Tabela 3. Curvas granulométricas dos ensaios alto%Si



Nas corridas com maior %Si foram encontrados os melhores resultados nas corridas C245-C247 porem formato tipo chapa com pontas com densidade baixa o qual vai gerar problemas no tanque e no manuseio para o cliente; o melhor resultado foi atingido na corrida C256 com 8.86% entre 4 e 8 mm com baixa rotação 3 rpm e %Si: 0.22 intermediario. O FeNi se encontra irregular.

Todos os testes em termos de segurança ocorreram sem nenhuma reação no tanque , a temperatura da agua chegou no máximo ate 39 °C. O formato irregular do granulado foi atingido conforme já alcançado com o disco de 04 canais. O novo sistema possui de aspetos positivos:

- Eliminação da barra interna e disco refratário; eliminando os riscos de explosão por formação de bode na barra e por quebra do disco.
- Facilidade no manuseio, tundish menor otimizando as manobras dos operadores e diminuição do consumo refratário.
- Eliminação da tampa de aquecimento.
- Garantia do giro continuo já que o mesmo e gerado na mesa, dissipação de calor do metal no perímetro do tanque.

### 4 Implementação

A implantação do sistema tundish rotativo para granulação em Barro Alto, foi adotado em virtude dos bons resultados alcançados na escala piloto, diminuição da exposição aos riscos de segurança dos operadores durante a granulação e redução significativa dos “bodes” formados durante a granulação.

Tabela 4. Cronograma de implementação

| ID | DESCRIÇÃO DAS ATIVIDADES                                     | %  | DURAÇÃO | INÍCIO             | FINAL              |
|----|--|----|---------|--------------------|--------------------|
| 1  | GRANULATION SYSTEM - ROTARY TUNDISH UHT                      | 0% | 49 days | Tue 25/08/15 07:00 | Tue 13/10/15 07:00 |
| 2  | Erection Schedule  | 0% | 49 days | Tue 25/08/15 07:00 | Tue 13/10/15 07:00 |
| 3  | Activities Independent of Complete Shutdown of the 621-TQ-00 | 0% | 14 days | Tue 25/08/15 07:00 | Tue 08/09/15 07:00 |
| 4  | Mechanical Fit of the Emergency Launder                      | 0% | 14 days | Tue 25/08/15 07:00 | Tue 08/09/15 07:00 |
| 5  | Adequação Mecânica das Platforms                             | 0% | 14 days | Tue 25/08/15 07:00 | Tue 08/09/15 07:00 |
| 6  | Activities Dependents of Complete Shutdown of the 621-TQ-00: | 0% | 22 days | Tue 08/09/15 07:00 | Wed 30/09/15 07:00 |
| 7  | Disassembly and Removal of the Cleaning Car                  | 0% | 7 days  | Tue 08/09/15 07:00 | Tue 15/09/15 07:00 |
| 8  | Disassembly and Removal of the Existing Granulation Set      | 0% | 3 days  | Tue 08/09/15 07:00 | Fri 11/09/15 07:00 |
| 9  | Mechanical Fit of the Granulation Tank                       | 0% | 7 days  | Fri 11/09/15 07:00 | Fri 18/09/15 07:00 |
| 10 | Erection of the Supporting Bases on the Granulation Tank     | 0% | 5 days  | Fri 18/09/15 07:00 | Wed 23/09/15 07:00 |
| 11 | Erection of Beam Structures on the Granulation Tank          | 0% | 7 days  | Wed 23/09/15 07:00 | Wed 30/09/15 07:00 |
| 12 | Hydraulic Preparations and Fit                               | 0% | 20 days | Tue 08/09/15 07:00 | Mon 28/09/15 07:00 |
| 13 | Electrical Preparations and Fit                              | 0% | 20 days | Tue 08/09/15 07:00 | Mon 28/09/15 07:00 |
| 14 | Arrival of the New Rotary Tundish at Barro Alto              | 0% | 0 days  | Wed 30/09/15 07:00 | Wed 30/09/15 07:00 |
| 15 | Activities After the Arrival of the UHT Equipment            | 0% | 13 days | Wed 30/09/15 07:00 | Tue 13/10/15 07:00 |
| 16 | Mechanical Erection of the Rotary Tundish                    | 0% | 7 days  | Wed 30/09/15 07:00 | Wed 07/10/15 07:00 |
| 17 | Hydraulic Erection of the Rotary Tundish                     | 0% | 7 days  | Wed 30/09/15 07:00 | Wed 07/10/15 07:00 |
| 18 | Electrical Erection of the Rotary Tundish                    | 0% | 7 days  | Wed 30/09/15 07:00 | Wed 07/10/15 07:00 |
| 19 | Cold Commissioning of the System                             | 0% | 3 days  | Wed 07/10/15 07:00 | Sat 10/10/15 07:00 |
| 20 | Hot Commissioning and Startup of the System                  | 0% | 3 days  | Sat 10/10/15 07:00 | Tue 13/10/15 07:00 |

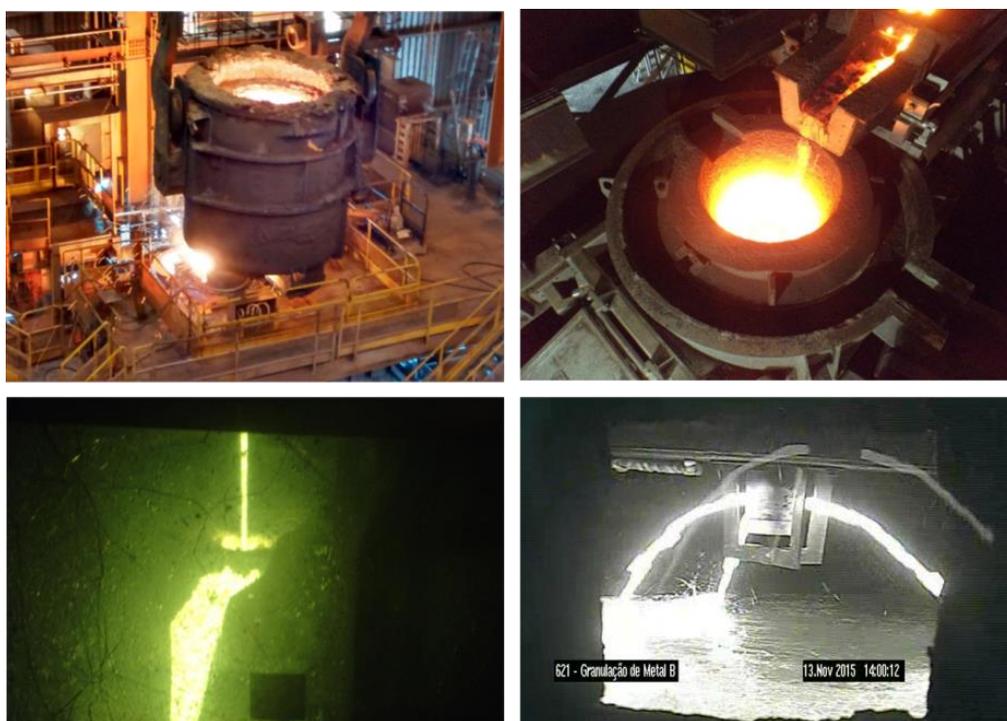


Figura 4. Comissionamento a quente

A partir dos primeiro testes, foi observado que ocorriam trincas entre os furos do nozzle, originais, fornecidos pela UHT.



Figura 5. Trinca no material refratário

Desta forma, iniciaram-se baterias de testes em escala industrial para seleção do material refratário adequado para operação. Os materiais refratários utilizados foram:

- Bloco refratário pré-moldado, curado, de concreto aluminoso.
- Concreto refratário aluminoso, de baixo teor de cimento, tixotrópico, de pega hidráulica.
- Concreto refratário aluminoso, de baixo teor de cimento, tixotrópico, de pega hidráulica, adicionadas fibras metálicas de aço inoxidável.
- Concreto refratário aluminoso, de baixo teor de cimento, tixotrópico, de pega hidráulica, adicionadas fibras metálicas de aço inoxidável e encapsulada com chapa metálica de aço inoxidável AISI 304.
- Fabricação dos nozzle em prensa isostática, blend de alumina-grafita usado no enchimento de moldes ( $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-C}$ ).

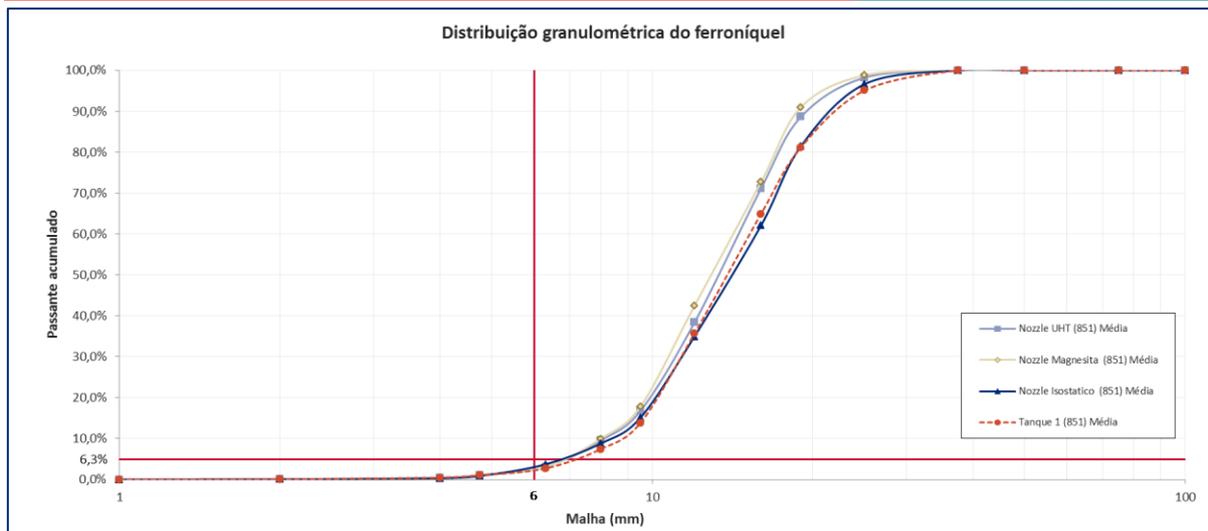
Foram testados todos os materiais propostos. A única peça que não apresentou trincas/infiltrações foi à peça fabricada em prensagem isostática em  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-C}$ .

Seguindo a linha dos testes realizados em escala piloto, os resultados apresentados durante a implantação em escala industrial se apresentaram muito semelhante em relação à qualidade final do produto.



**Figura 6.** Formato final do ferroníquel granulado

A geração do formato esférico é muito semelhante em relação a granulação utilizando disco de 4 canais. A análise granulométrica abaixo demonstra os resultados obtidos utilizando Nozzle UHT, Nozzle Magnesita, Nozzle Isostático e Tanque de Granulação 1.



**Figura 7.** Curvas granulométricas do ferroníquel granulado em Barro Alto com disco refratário de 04 canais e tundish rotativo

A tabela abaixo ilustra as médias dos resultados granulométricos.

**Tabela 5.** Resultados granulométricos

| Resultados Granulométricos FeNi Granulado |                                 |                                       |  |                                |
|---|---------------------------------|---------------------------------------|--|--------------------------------|
| Mesh (mm)                                 | % Passing Nozle UHT (851) Média | % Passing Nozle Magnesita (851) Média | % Passing Nozle Isostático (851) Média | % Passing Tanque#1 (851) Média |
| 1,0                                       | 0,00%                           | 0,00%                                 | 0,00%                                  | 0,00%                          |
| 2,0                                       | 0,04%                           | 0,01%                                 | 0,06%                                  | 0,08%                          |
| 4,0                                       | 0,48%                           | 0,41%                                 | 0,30%                                  | 0,45%                          |
| 4,8                                       | 1,13%                           | 1,05%                                 | 0,88%                                  | 1,03%                          |
| 6,3                                       | 3,04%                           | 2,97%                                 | 3,71%                                  | 2,72%                          |
| 8,0                                       | 9,55%                           | 9,96%                                 | 8,81%                                  | 7,42%                          |
| 9,5                                       | 16,78%                          | 17,82%                                | 15,12%                                 | 13,85%                         |
| 12,0                                      | 38,37%                          | 42,45%                                | 34,95%                                 | 35,65%                         |
| 16,0                                      | 71,14%                          | 72,69%                                | 62,10%                                 | 64,92%                         |
| 19,0                                      | 88,62%                          | 90,97%                                | 81,42%                                 | 81,14%                         |
| 25,0                                      | 98,21%                          | 98,78%                                | 96,60%                                 | 95,06%                         |
| 37,5                                      | 100,00%                         | 100,00%                               | 100,00%                                | 100,00%                        |
| 50,0                                      | 100,00%                         | 100,00%                               | 100,00%                                | 100,00%                        |
| 75,0                                      | 100,00%                         | 100,00%                               | 100,00%                                | 100,00%                        |
| 100,0                                     | 100,00%                         | 100,00%                               | 100,00%                                | 100,00%                        |

#### 4.1 Plano de contingencia

Com a implementação do sistema tundish rotativo no tanque de granulação 2, que trata-se de um sistema elétrico/mecânico para granulação de metal além da necessidade de materiais refratários especiais (blend de alumina-grafita usado no enchimento de moldes de prensa isostática) pode-se por algum momento ocorrer danos no sistema elétrico/mecânico impossibilitando a operação ou indisponibilidade de fornecimento de materiais refratários.

Esta plano B, trata-se da instalação de barras de fácil instalação no tanque de granulação 2 para utilização de disco refratário cônico de 3 furos ou disco de 4 canais.

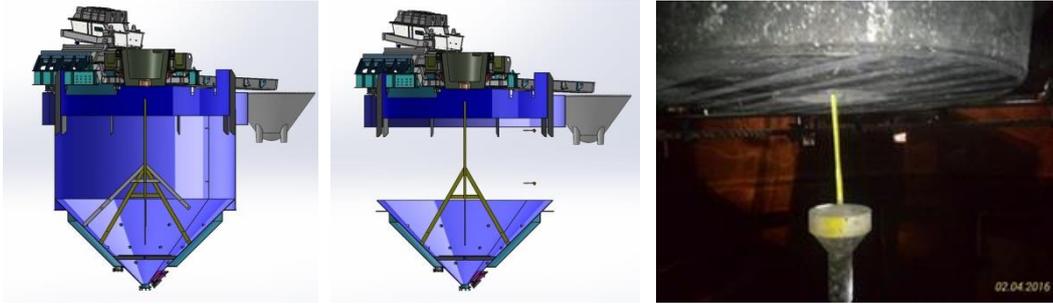


Figura 8. Configuração do plano B elaborado implementado

#### 4.2 Ganhos com a segurança do trabalho

Durante o período de comissionamento do novo sistema de granulação de ferroníquel foi possível evidenciar a mitigação dos riscos de segurança do trabalho eliminado no projeto implantado.

Tabela 6. Levantamento dos riscos

| Main Risks                         | Mitigation Actions  |
|------------------------------------|---|
| Tundish without rotation           | Engineering design rotation sensor in the HMI. When the tundish didn't rotation during the metal granulation, the ladle's slide gate close immediately and automatically.   |
| Metal overflow                     | Engineering design load cells in order to keep track of the amount of metal in the tundish and stationary emergency launder.  |
| Nozzle clogging/<br>Nozzle crack   | There are three aerial cameras to view the process and one camera to view the nozzle. Through these cameras it is possible to monitor the process and realize the clogging of the nozzle                          |
| Water high temperature             | When the upper temperature in granulation tank > 55°, automatically open cooling water valve fully and the operator is trained to start closing the metal flow through the control of ladle's slide gate opening. |
| Bottlenecking of Nickel production | The metal granulation facilities 1 will be ready if some failure happen in the metal granulation facilities 2.  |

Tabela 7. Matrix de riscos

|  |  | Risk 01: Actual Design Tundish   | Controls                                    | Risk Rating |
|--|--|--|---|-------------|
|  |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Description:</b> Power concentration exceeds a critical value locally in the water.</li> <li>• <b>Cause:</b> Metal build up formation in the nozzle surface.</li> <li>• <b>Consequence:</b> The metal will be surrounded by steam and the cooling is insufficient increasing the probability of explosions during metal granulations.</li> </ul> | Removing metal build up using oxygen lance. | 21          |
|  | Risk 02: New Design Tundish  | Controls   | Risk Rating                                 |             |
|  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Description:</b> The metal is spread sufficiently the system is far from critical power concentration.</li> <li>• <b>Cause:</b> The rotation of the tundish allows better distribution of the metal on the water surface.</li> <li>• <b>Consequence:</b> Heat balance between water input and metal flow is in balance avoiding critical power concentration locally.</li> </ul> | Rotation of the tundish.   | 8   |             |

#### 4.2.1 Redução do volume do tundish

Conforme a figura abaixo, a redução do volume do tundish proporciona segurança da operação, uma vez que detectado alguma anormalidade no processo, a quantidade de metal no interior do tundish é menor.

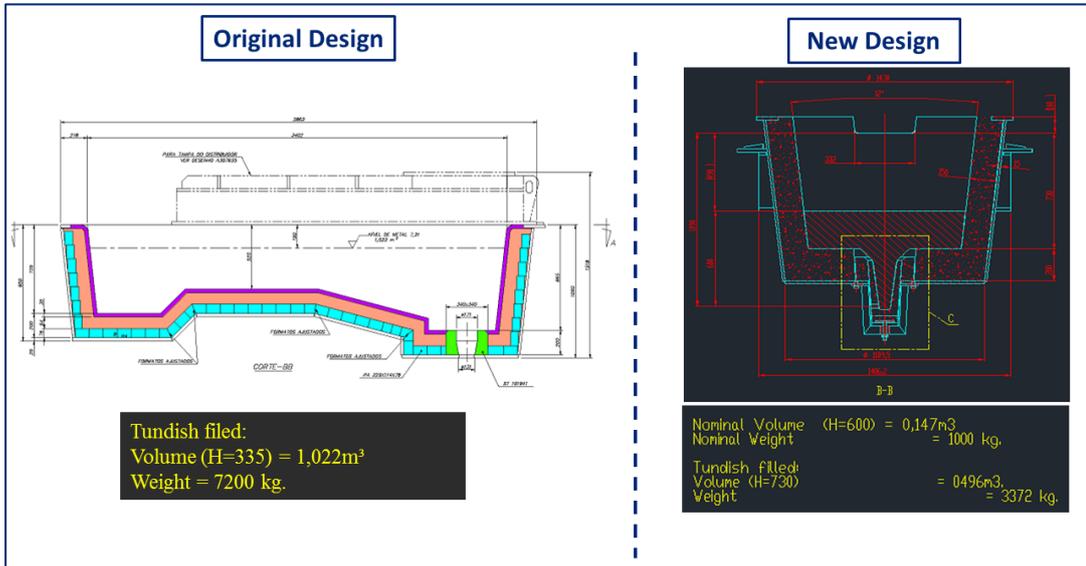


Figura 9. Configuração do plano B elaborado implementado

#### 4.2.2 Procedimentos Operacionais Eliminados

Conforme a figura abaixo, com a implementação do sistema de tundish rotativo, procedimentos operacionais foram eliminados, aumentando a segurança do trabalho.



Figura 10. Procedimentos operacionais eliminados

### 5 CONCLUSÃO

A realização deste trabalho é produto da efetiva integração das equipes envolvidas (Processo, Produção e Engenharia) em parceria com a empresa de engenharia sueca UHT, em busca de um sistema produtivo de alta performance, que permitiram à AABA a perpetuação das melhores práticas, via o engajamento das pessoas.

Com base nos resultados alcançados com a implantação do novo sistema de granulação com tundish rotativo, a geração de granulado fino (abaixo de 6 mm) se manteve conforme previamente esperado (teste piloto)

Durante o comissionamento à quente foi possível observar que a exposição dos operadores durante a granulação de metal é zero e o manuseio de peças apresenta uma melhoria significativa na troca de peças.

Além disso, elimina o risco de explosões devido formação de bode no disco/barra já que a distribuição de metal ocorre diretamente na água.

O feedback dos operadores foram muito positivos ao longo da implantação e comissionamento do novo sistema, devido à facilidade de operação e eliminação de procedimentos operacionais, eliminando vários riscos de segurança.

## REFERÊNCIAS

- 1 P-Å Lundström and Åke West. Granulation of FerroAlloys na Si-Metal. Electric Furnance Conference Proceedings. Ano 1994. Página 309 a 315
- 2 Lundström, Per-Åke. Granulation of molten material. EUROPEAN PATENT APPLICATION (EP 2 845 671 A1). Ano 2015