

## PROJETO, REFORMA E RAMP UP DO ALTO-FORNO 2 DA APERAM SOUTH AMERICA\*

*André Mendes Carneiro Lyrio<sup>1</sup>*

*Filipe Soares Pontes<sup>2</sup>*

*Guilherme Ribeiro do Espírito Santo<sup>3</sup>*

*José Geraldo da Silveira<sup>4</sup>*

*Luiz José Gonçalves<sup>5</sup>*

*Péricles Guimarães Oliveira Aguiar<sup>6</sup>*

*Raylander Rocha Pessoa<sup>7</sup>*

*Sebastião Moraes Miranda<sup>8</sup>*

### Resumo

Este trabalho tem como objetivo apresentar a origem do projeto inovador do cadinho do Alto-forno 2 além do planejamento, a implantação e os resultados obtidos no Alto-forno 2 da Aperam South America após a reforma. O trabalho de pesquisa e desenvolvimento teve início em 2012 após a primeira marcha fria com conseqüente redução das temperaturas da soleira. Foram realizadas diversas reuniões, discussões e seminário sobre alto-forno com especialistas de diversas empresas. A mudança de reductor carvão vegetal para coque por seis meses serviu para comprovar parte da teoria construída pelo time da redução. Para, por fim, culminar no conceito por trás do problema do AF2 e então o novo design do cadinho que foi proposto e implantado na reforma iniciada em dezembro de 2017. Após sua implantação, conforme teorizado pelo time, uma nova gama de resultados e patamar de operação foram atingidos, comprovando diversas das teorias formuladas.

**Palavras-chave:** Alto-forno 2; Cadinho; Projeto; Redução; Reforma; Refratário;

### PROJECT, REPAIR AND RAMP UP OF BLAST FURNACE #2 OF APERAM SOUTH AMERICA

#### Abstract

This work aims to present the origin of the hearth project of blast furnace 2 in addition to the planning, implementation and results obtained in the Blast Furnace 2 of Aperam South America after the reform. The research and development work started in 2012 after the first chilling hearth with consequent reduction of bottom hearth temperatures. Several meetings, discussions and seminar on blast furnace were carried out with specialists from various companies. The change of reductor from charcoal to coke for six months served to prove part of the theory built by the reduction team. To finally culminate in the concept behind the BF2 problem and then the new design of the hearth that was proposed and implemented in the reform initiated in December 2017. After its implementation, as theorized by the team, a new range of results and threshold were reached.

**Keywords:** Blast furnace2; Ironmaking; Hearth; Project; Reline; Refractory; Revamp.

<sup>1</sup> *Engenheiro Metalurgista, Gerente de Operação, Redução, Aperam South America, Timóteo.*

<sup>2</sup> *Engenheiro Metalurgista, Engenheiro de Processo, Redução, Aperam South America, Timóteo.*

<sup>3</sup> *Engenheiro Metalurgista, Gerente Executivo, Engenharia, Aperam South America, Timóteo.*

<sup>4</sup> *Engenheiro Mecânico Gerente Executivo, Engenharia, Aperam South America, Timóteo.*

<sup>5</sup> *Engenheiro Metalurgista, Consultor, Engenharia, Aperam South America, Timóteo.*

<sup>6</sup> *MSc Eng. Metalurgista, Engenheiro de Processo, Redução, Aperam South America, Timóteo.*

<sup>7</sup> *MSc Eng. Metalurgista, Engenheiro de Processo, Redução, Aperam South America, Timóteo.*

<sup>8</sup> *Engenheiro Eletricista, Gerente Executivo, Redução, Aperam South America, Timóteo.*

## 1 INTRODUÇÃO

O Alto-forno 2 da Aperam veio apresentando problemas operacionais após sua mudança de combustível coque para carvão vegetal. Estes problemas são caracterizados por grandes distúrbios que têm como principal efeito a queda da produtividade do reator e conseqüentemente a oferta de gusa à Aciaria, com impacto negativo na entrega de aço aos clientes da Aperam.

O primeiro evento ocorreu no mês de novembro de 2011, levando a uma marcha fria.

Em maio/12 os distúrbios voltaram a ocorrer, mas, em função da mudança da prática operacional do Alto-forno 2, não houve paradas. Entretanto após este segundo evento, o reator passou a apresentar períodos com marcha bastante instável, queda da produtividade e aumento do consumo de combustível, principalmente durante o retorno em marcha após paradas.

O fenômeno foi continuamente analisado, não só pela Aperam, mas também com a participação de profissionais de outras empresas, dentre elas a ArcelorMittal Monlevade, Vallourec e Danieli Corus, com várias ações levantadas.

Nas análises efetuadas chegou-se à conclusão que a principal causa do fenômeno é a queda da permeabilidade do cadinho. O presente trabalho tem como objetivo apresentar as análises, as ações e os resultados obtidos nos trabalhos visando a solução do problema.

## 2 DESENVOLVIMENTO

### 2.1 Ocorrências e características do distúrbio operacional

As ocorrências mais críticas que acarretaram distúrbios operacionais no Alto-forno 2 ocorreram em seis eventos entre os anos de 2011 a 2017.

Sendo que as principais características destes distúrbios, na sua fase mais aguda são:

- Queda repentina e acentuada da temperatura do gusa;
- Aumento acentuado da temperatura do topo;
- Fluxo gasoso preferencial, principalmente junto à parede;
- Queda súbita do rendimento gasoso;
- Grande quantidade de carvão no pó do coletor,
- Aumento da perda de carga com grandes oscilações da mesma e descida errática da carga;
- Dificuldade de drenagem do cadinho com atraso na saída de escória e forte sopro;
- Durante as recuperações do nível térmico grande dificuldade em se elevar a temperatura do gusa mesmo com elevado carbono total.

### 2.2 Conseqüências do distúrbio Operacional

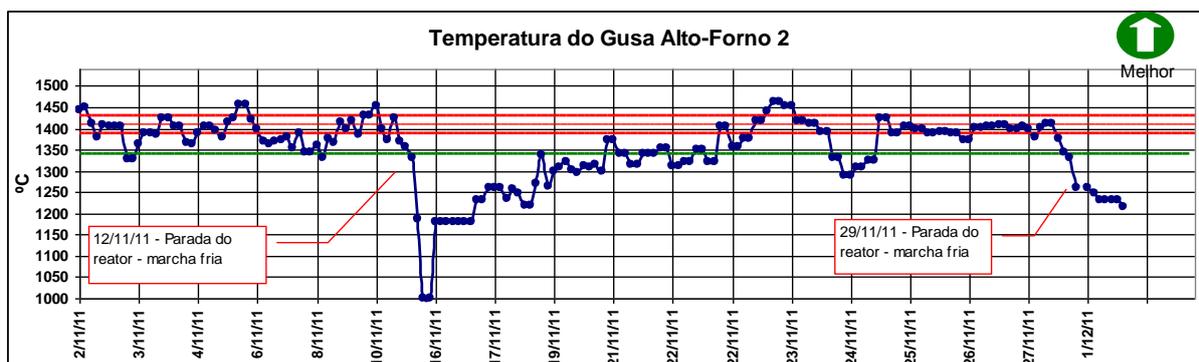
As principais conseqüências desses distúrbios são:

- Retenção de uma grande quantidade de gusa e escória no interior do reator;
- Obstrução das ventaneiras;
- Ocorrência de marcha fria;
- Dificuldade do aumento de vazão e baixa produtividade em um período longo após o retorno em marcha;
- Necessidade de se trabalhar com baixas taxas de injeção levando ao aumento do consumo de carvão bruto.

Outras características do fenômeno foram observadas ao longo do tempo:

- Ocorrência preferencialmente no período chuvoso e após períodos longos de trabalho com baixas temperaturas de topo, menor que 80°C;
- Formação intensa de grafite no interior do alto-forno;
- Aumento acentuado da temperatura logo abaixo das ventaneiras principalmente próximo ao furo de gusa;
- Também tendência a entupimentos destas ventaneiras e queima freqüente dos bicos das mesmas;
- Dificuldade de recuperação da temperatura do gusa durante os retornos em marcha após paradas.

O primeiro problema ocorreu em 2011 após um longo período de baixa produtividade, neste caso houve um aumento acentuado da perda de carga seguido de dificuldades de drenagem. O segundo evento foi observado grandes variações térmicas com acúmulo de escória no interior do alto-forno. Foram então observadas fortes passagens preferenciais de gás, principalmente pela parede, culminando com as ocorrências de fluidização da carga. A temperatura do gusa, sofreu uma forte queda com entupimento de ventaneiras culminando com uma marcha fria. Na figura 1 pode-se observar em dois momentos distintos a queda brusca da temperatura do gusa.



**Figura 1.** Curva de temperatura do gusa em Novembro/2011. Problemas em 11/11 e 28/11.

Entre setembro de 2012 e fevereiro de 2013 ocorreram vários problemas operacionais que levaram a paradas não planejadas associadas a longas paradas planejadas. Após este longo período de paradas observou-se uma maior dificuldade em se atingir as produções programadas, principalmente nos períodos próximos ao retorno em operação após paradas. Observou-se também a queda contínua da temperatura do termopar central da soleira do Alto-forno 2.

Nas figuras abaixo mostram o posicionamento do termopar central da soleira do cadinho (TE207-1) e a curva de temperatura termopar central ao longo do tempo.

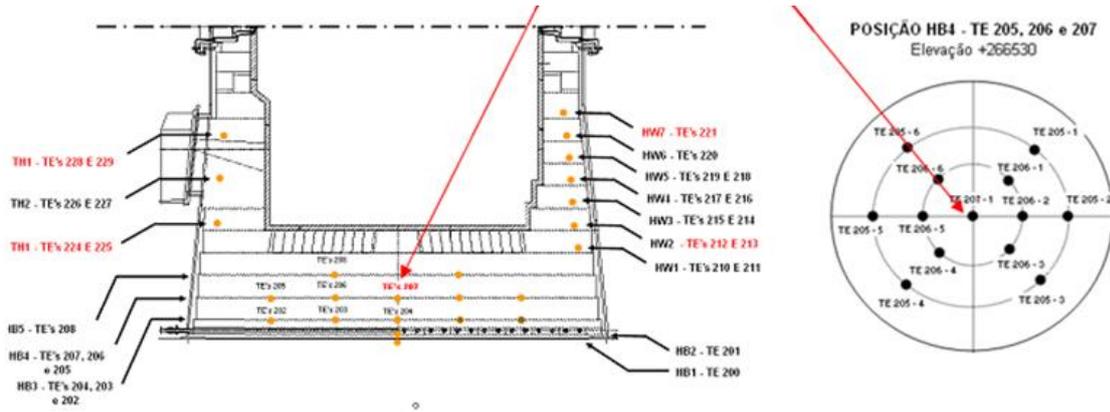


Figura 2. Posição do termopar 207-1.

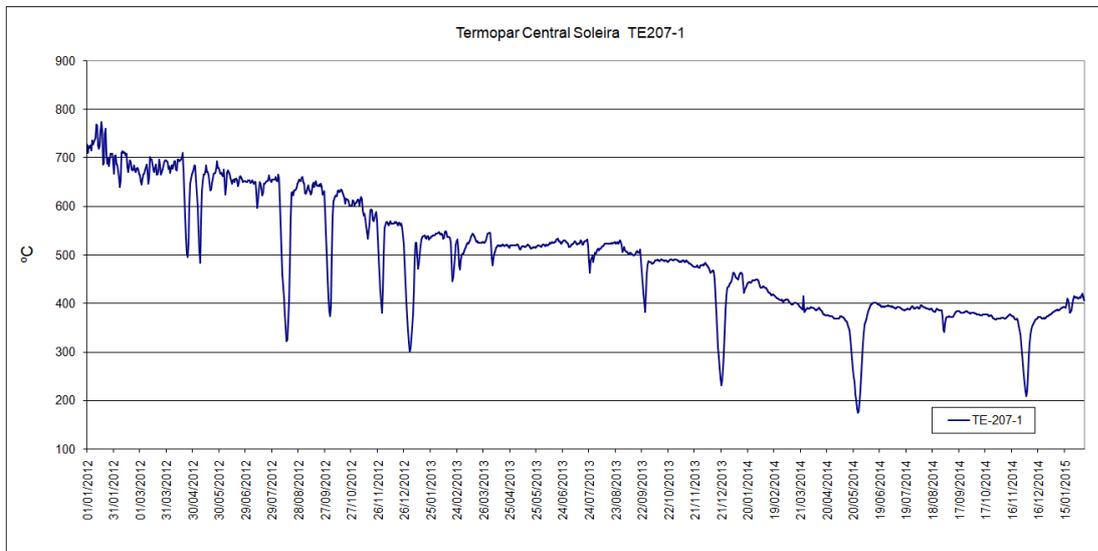


Figura 3. Curva de temperatura termopar central da soleira ao longo do tempo.

E apesar de diversas ações terem sido implantadas até o ano de 2015, o problema de instabilidade persistiu, revelando que ainda não havia sido completamente sanado, como pode observar-se a instabilidade da produção no gráfico a seguir.

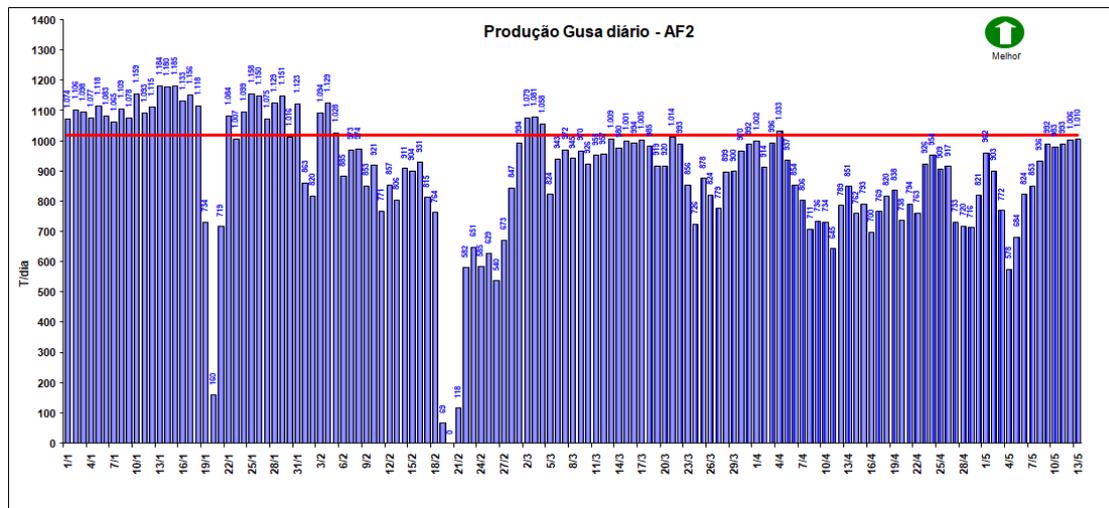


Figura 4. Curva de produção do Alto-forno 2 no primeiro semestre de 2015.

## 2.3 Causas da perda de permeabilidade do cadinho

1. Propriedades do redutor: quanto mais frágil e reativo for o redutor, maior será sua degradação no interior de um alto-forno e conseqüentemente maior será sua capacidade de selar os caminhos no interior do cadinho;
2. Problemas de queima do carvão injetado - formação do fenômeno: "Ninho de pássaro";
3. Qualidade da carga: carga mal preparada atingindo as regiões inferiores do alto-forno causando instabilidade operacional e a permeabilidade do cadinho;
4. Entrada de água no interior do forno devido à peças refrigeradas com vazamento;
5. Quantidade e duração de paradas, não permitindo tempo hábil para recuperação das isothermas do refratário do cadinho
6. Operar com baixa produtividade, reduzindo o input de energia no cadinho advindo do gusa que é produzido
7. Projeto do cadinho.

No caso do Alto-forno 2 da Aperam, as hipóteses mais trabalhadas nas ações foram a 1,5,6 e finalmente a 7.

Inicialmente todos os problemas do Alto-forno 2 foram tratados como problemas operacionais e assim sendo todas as ações de solução também focavam em processo e na operação do forno.

No gráfico a seguir segue a ilustração da cronologia das ações, que podem ser identificadas em dois momentos distintos, até 2014 onde as ações eram operacionais e a partir de 2015 quando se percebeu que estas ações não seriam suficientes para sanar o problema de instabilidade e perda de produção do Alto-forno 2.

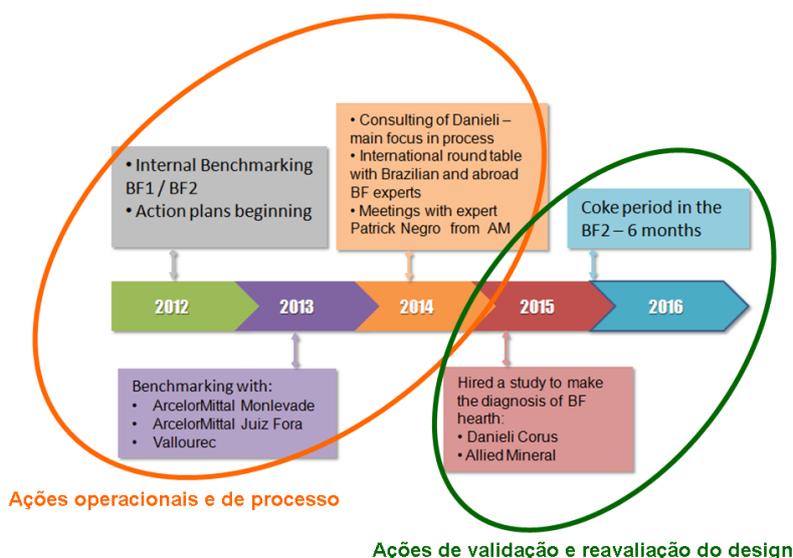


Figura 5. Fluxograma com os grande marcos das ações.

Foram diversas ações tomadas, neste documento serão apresentadas sem prazo de execução detalhado, pois o objetivo é documentar tudo que foi realizado ou cogitado em se realizar. Com foco no primeiro período na tentativa de solução do problema, seguem as ações com foco em processo e operação:

- Desenvolvimento da distribuição de carga para aumento de produtividade;
- Trabalhar com gusa mais quente na operação a carvão vegetal (1440°C);
- Desenvolvimento de insumos para área de corrida, brocas com diversos diâmetros e massa de tamponamento;
- Reduzir ao máximo a refrigeração da soleira;
- Substituir de água por ar a refrigeração dos 8 tubos centrais da soleira, total 28 tubos;
- Reparar a capela para sanar as trincas que podem estar causando sopro durante corridas;
- Reduzir a frequência e duração de paradas do Alto-forno 2;
- Realizar melhoria no controle de massa do canhão para reduzir sopro durante corridas;
- Substituição das peneiras do *stock house* de 15mm para 19mm para melhorar a qualidade do carvão do cadinho e aumento de produtividade;
- Ajustar a composição da escória para maior fluidez;
- Realização de *benchmarking* interno e externo;
- Nova metodologia de controle de nível térmico do AF2;
- Aumento da frequência de amostragem da umidade do carvão;
- Consultoria técnica de processo com a empresa Danieli Corus;
- Criação de novas práticas de área de corrida, com procedimentos de interrupção de fluxo da corrida com foco em melhorar o esgotamento de escória;
- Alteração no ângulo da perfuratriz de 16 para 11 graus com o objetivo de sair da zona morta do cadinho, *sump depth*;
- Redução da taxa de injeção de finos para aumentar a permeabilidade de carga;
- Realização de mesa redonda com especialistas de diversas empresas, dentre elas: Aperam, ArcelorMittal, Vesuvius, Danieli Corus e consultores externos, em novembro 2014.

Durante o ano de 2014 foi consultado o especialista da ArcelorMittal que fez sugestões, todas elas já haviam sido realizadas em maior ou menor intensidade. Com isso partiu-se para ações mais radicais, já que se constatou que nenhuma ação mais de processo ou operacional poderia ser tomada que alterasse significativamente a situação do Alto-forno 2.

Principais ações de 2015 até a reforma:

- Fechamento total da refrigeração da soleira por uma semana;
- Avaliação e contratação de empresas de consultoria para ajudar no mapeamento do cadinho e propostas de solução técnica;
- Utilização de COQUE durante 6 meses que foi realizado entre novembro 2015 a maio 2016);
- Contratação de empresa especializada para elaboração da Engenharia conceitual de novo projeto do cadinho;

O uso do coque foi crucial para a confirmação de que o problema de baixa permeabilidade no cadinho do Alto-forno 2 era causado não por problema operacional ou qualidade de matéria-prima, mas sim pela grande diferença entre o input e o output de calor pelo cadinho.

Essa diferença não seria possível ser sanada aumentando a produtividade e a temperatura do gusa, pois com o cadinho já *embodado*, não era mais possível subir a produtividade, sendo assim a limpeza do mesmo somente poderia ser feita através de parada ou com grande aumento de permeabilidade, que foi obtida com o uso de coque.

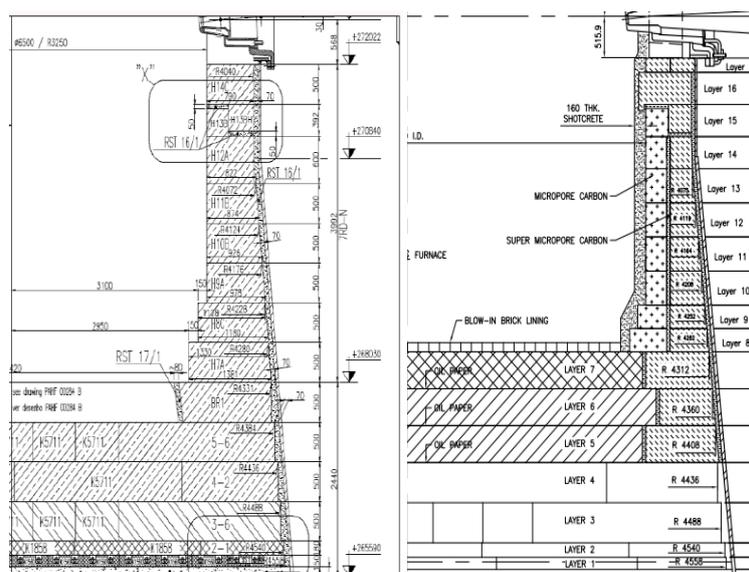
Depois do uso de coque percebeu-se que não faria sentido parar o Alto-forno 2 e realizar uma limpeza mecanizada, pois com a manutenção da situação do fluxo de calor o forno retornaria rapidamente às condições que se encontrava antes. Como a campanha do equipamento já havia terminado em fevereiro de 2016, o melhor caminho seria a realização de uma reforma com alteração de projeto. Sendo um projeto pensado e planejado para ser adequado à produção de gusa com carvão vegetal no Alto-forno 2.

## 2.4 Detalhamentos da Solução

Após verificar que apenas ações operacionais não seriam suficientes e que alguma ação em termos de projeto seria necessária, o time da Aperam construiu a solução juntamente com o time da Allied Mineral.

O ponto crucial do projeto seria reduzir a capacidade de retirada de calor do cadinho. Existem alternativas que retirariam ainda menos calor do que a objetivada pelo time da Aperam, porém foram associados à solução alguns fatores de capacidade produtiva de até 1200t/d, duração da campanha, mínimo 10 anos e capacidade de realização de reparo rápido, taça cerâmica.

Assim sendo optou-se por uma solução que, com o final de campanha os fluxos de calor retornassem aos valores atuais, para tal a manutenção do uso de blocos de carbono se fazia necessária. Uma vez definido isso, e após algumas reiteraões e simulações atingiu-se a solução final para o cadinho, conforme observado na figura a seguir.



**Figura 6.** Projeto anterior à reforma de 2017 (Esquerda) e solução final para o cadinho construído Aperam - Allied Mineral (Direita)

As mudanças foram no volume interno do cadinho com adição de mais uma camada refratária a soleira do cadinho, mudança no tipo de refratário da soleira e também mudança na configuração da parede do cadinho com duas camadas refratárias de bloco de carbono com uma junta entre elas.

## 2.5 Resultados e Discussão

O abaixamento de carga do alto-forno 2 foi realizado conforme procedimento obtido da Danieli Corus em 2002, porém já adaptado pelo time da Aperam. O sucesso de um abaixamento de carga é medido pela distância da carga residual às ventaneiras. É considerado sucesso se a carga terminar menos de 1m acima das ventaneiras.

Uma das grandes diferenças do procedimento da Aperam é que o soprador não é desligado até o fim do vazamento da salamandra e com isso consegue-se queimar muito mais carga e manter-se aquecido o residual de carga no cadinho por mais tempo.

Com isso se obtém não só um nível de carga mais baixo, como também aumenta-se muito a chance de sucesso da corrida da salamandra.



**Figura 7.** Posicionamento da carga após o blow down, carga abaixo das ventaneiras

Como pode-se observar na figura acima, o abaixamento de carga do Alto-forno 2 da Aperam foi um sucesso total, ficando a carga mais de 1m abaixo do nível das ventaneiras. Fator que possibilitou uma redução grande no tempo de limpeza e conseqüentemente redução no tempo da reforma.

A corrida da salamandra também foi um sucesso. O time da Aperam calculou a posição exata de onde o furo deveria ser realizado utilizando como base as informações de previsão de desgaste e *embodamento* do relatório da consultoria da Allied Mineral, conforme figura a seguir.

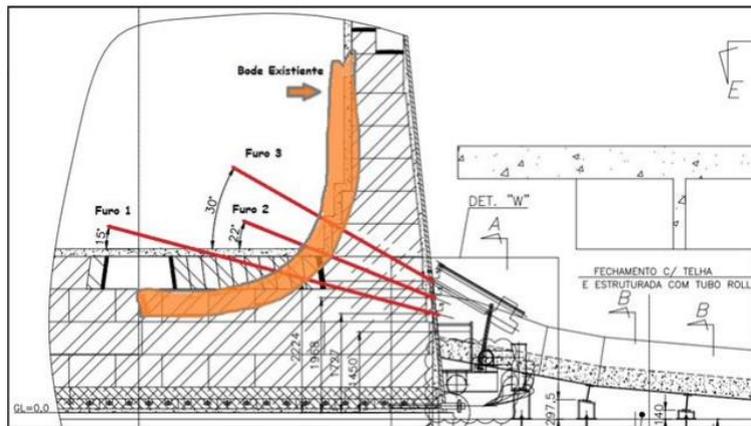


Figura 9. Previsão do posicionamento do furo da salamandra [7]

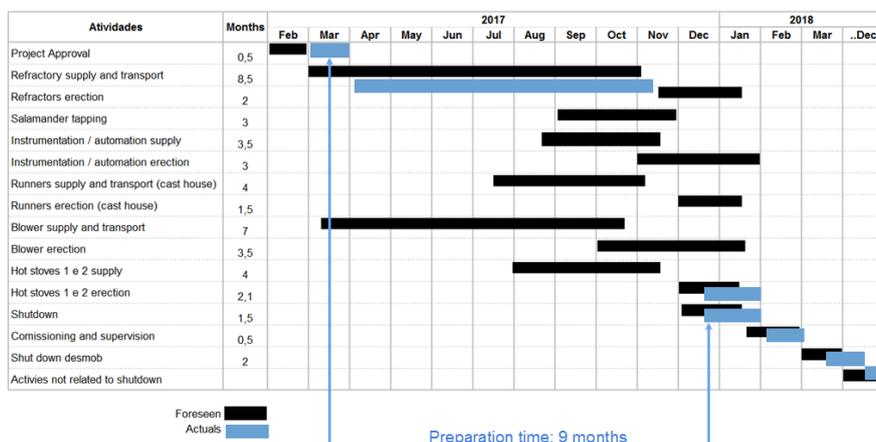
A furação foi realizada por empresa de contrato interno, e coordenada pelo time da Aperam. O vazamento com oxigênio foi realizado pelo time de forneiros dos altos-fornos 1 e 2.



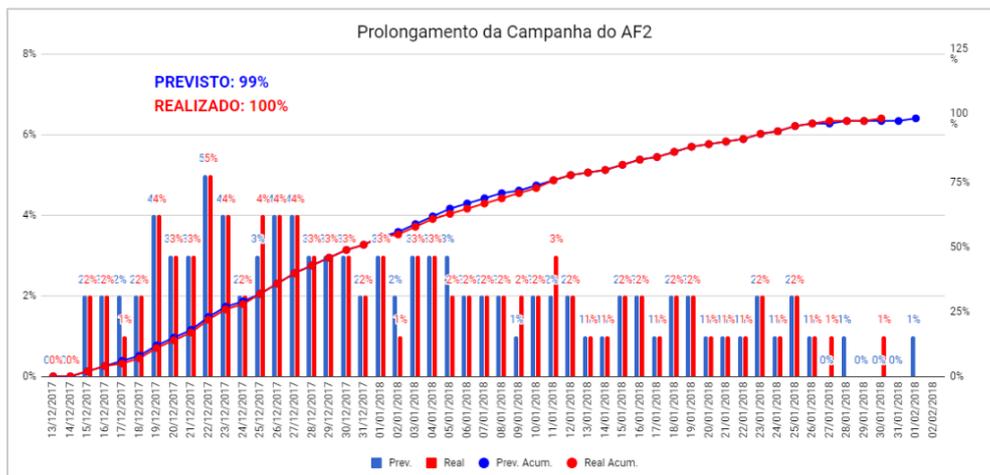
Figura 9. Corrida da salamandra Dez/2017 Alto-forno 2.

Com isso o tempo normal de preparação e vazamento que seria de 24h foi reduzido para 3h20m. E da previsão inicial de 138t de material, atingiu-se 136,2t. Um sucesso total. Essa atividade também foi fator predominante para o sucesso da reforma e redução do tempo de parada.

Com esse início de sucesso e uma gestão rigorosa, a parada foi um sucesso conforme pode-se constatar pelos gráficos a seguir, nos quais pode-se observar o cronograma de planejamento e a curva “S” de implantação do projeto, no qual o desafio foi realizar todo o planejamento e compra em 9 meses.



**Figura 10.** Gráfico do cronograma geral da reforma do Alto-forno 2.

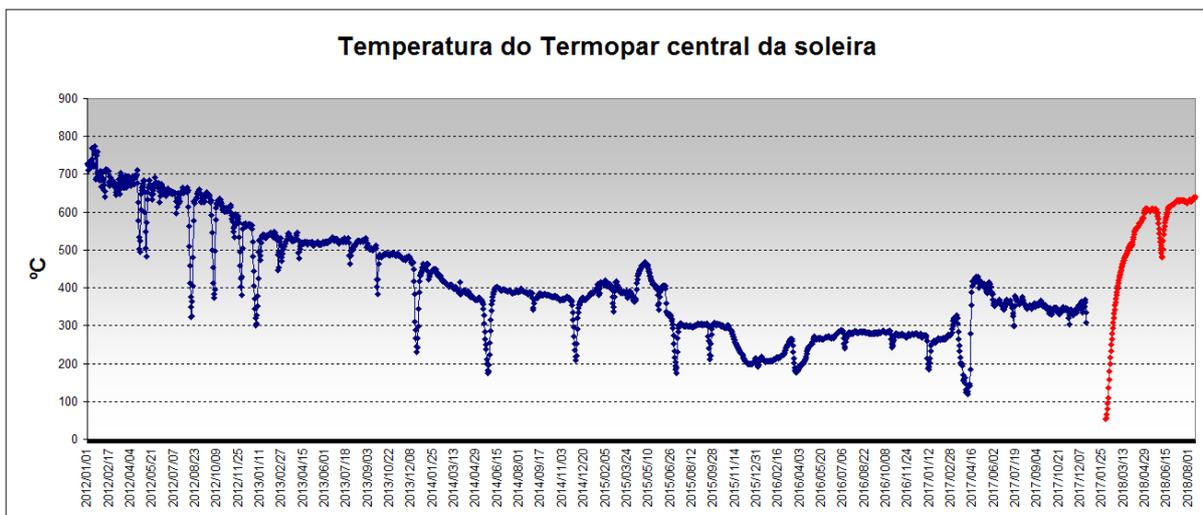


**Figura 11.** Gráfico da evolução da implantação, redução de 02 dias com relação ao planejado com todo o escopo implantado.

O ponto crucial de qualquer projeto é a garantia da implantação de seu escopo previsto com a qualidade prevista, uma vez garantido isso, os demais desafios são redução de custo e prazo. O prazo foi obtido através da gestão e da competência técnica do time da Aperam, tanto da Redução quanto da Engenharia. Já no quesito custo, o grande ganho foi obtido através da sinergia destas duas equipes com a equipe de suprimentos, que obteve ganhos expressivos de negociação graças às conciliações técnicas e comerciais.

### 2.5.1 Resultados do Ramp up (3 meses de ramp up e resultados até Agosto/2018)

O comportamento do termopar central da soleira pôde ser percebido completamente diferente após a reforma, conforme gráfico abaixo.



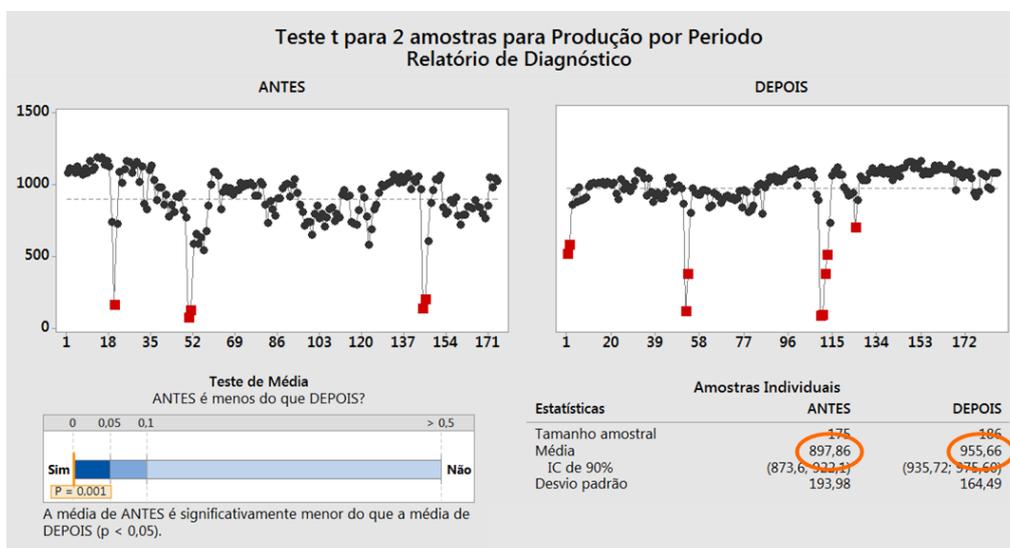
**Figura 12.** Gráfico de temperatura do termopar central da soleira (Azul – Antes da reforma, Vermelho – Após a Reforma)

A curva vermelha indica o comportamento após a reforma, durante o período de avaliação de Fevereiro a Agosto de 2018 houve uma parada de 8 dias, devido à

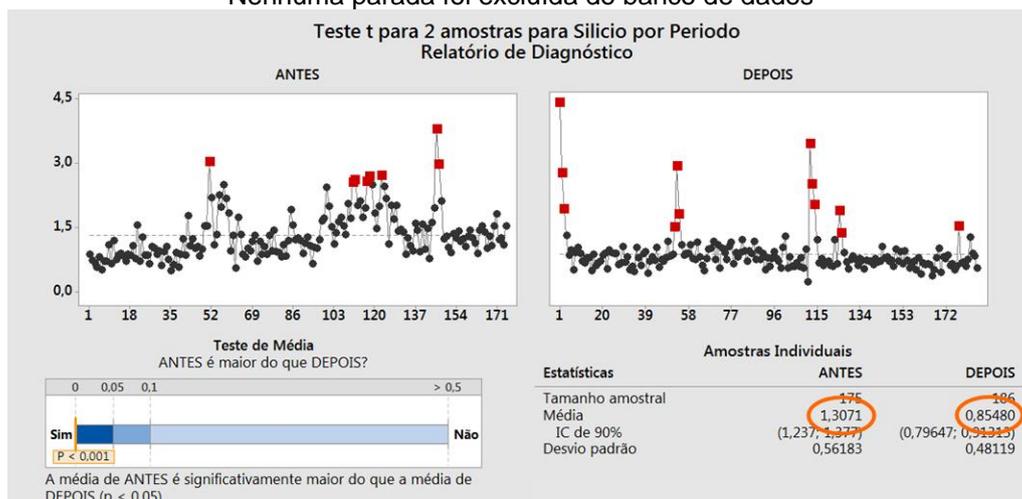
greve dos caminhoneiros. Mesmo com uma parada dessa ordem o termopar retornou ao patamar antes da parada e até ultrapassou, essa é uma das grandes indicações de que o problema de *INPUT* versus *OUTPUT* de calor do cadinho foi resolvido, pois não há caracterização de embodamento.

Com a mudança do conceito e fluxo de calor do refratário do Alto-forno 2 esperava-se uma melhora nos resultados de permeabilidade do cadinho, conseqüentemente taxa de injeção de finos e como o volume morto do cadinho (*sump deph*) também foi reduzido, também esperava-se uma performance melhor na recuperação após paradas.

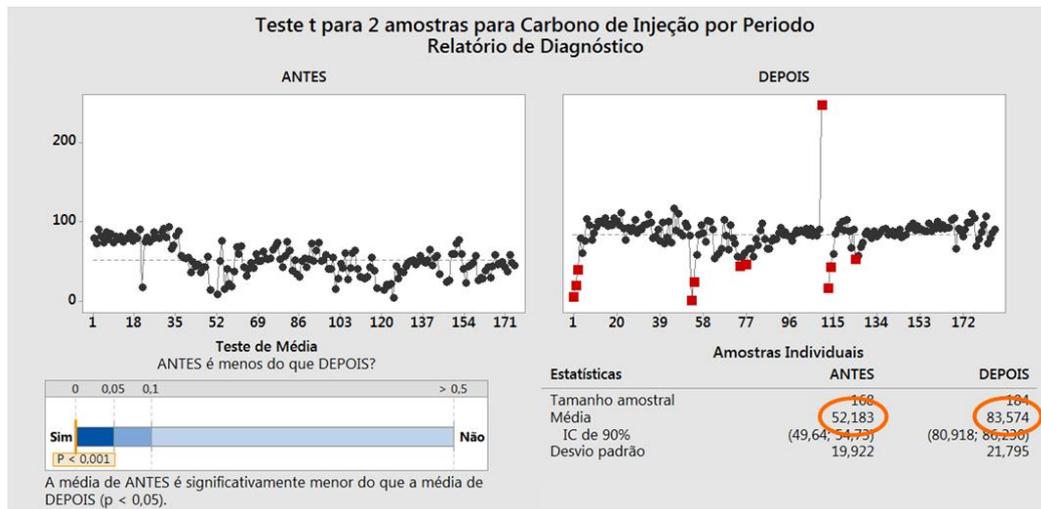
Todas essas previsões foram inseridas no orçamento 2018 da Aperam, porém os resultados obtidos foram muito superiores aos previstos, como pode se observar nos gráficos a seguir.



**Figura 13.** Resultados de produção, comparação 2015 antes do uso de coque, 2018 Fev-Ago. Nenhuma parada foi excluída do banco de dados



**Figura 14.** Resultados de qualidade, %Si no gusa, comparação 2015 antes do uso de coque, 2018 Fev-Ago. Nenhuma parada foi excluída do banco de dados



**Figura 15.** Resultados de Carbono de de Injeção no Alto-forno 2 comparação 2015 antes do uso de coque, 2018 Fev-Ago. Nenhuma parada foi excluída do banco de dados

Com estes resultados os ganhos do projeto, previstos para longo prazo, tornam-se informações com alto grau de confiança, uma vez que o risco do projeto seria a dificuldade para se atingir justamente estes indicadores: produção, qualidade e taxa de injeção.

### 3 CONCLUSÃO

A partir de muitos estudos e discussões técnicas o projeto de reforma do Alto-forno 2, contemplou um novo design para o cadinho, proporcionando estabilidade e melhora nos indicadores técnicos. O planejamento, execução e entrega foi realizada com zero acidente, atingindo o prazo programado e o custo real do projeto abaixo do planejado. A realização do *blow down*, vazamento de salamandra e *blow in*, foram realizados com sucesso pela equipe, garantindo um bom resultados para o complexo projeto de reforma do Alto-forno 2.

### REFERÊNCIAS

1. BABICH, A; SENK, D. and GUDENAU, H. W. Effect of coke reactivity an nut coke on blast furnace operation. Ironmaking and Steelmaking, vol. 36 (2009), No 3, p. 222 – 229.
2. WATAKABE, S; TAKEDA, K; NISHIMURA, H; GOTO, S; NISHIMURA, N; UCHIDA, T; KIGUCHI. Development of high ratio coke mixed charging technique to the blast furnace. ISIJ International , Vol. 46 (2006), No 4, p. 513 – 522.
3. OKUDA, K., AMANO, S., ISHIOKA, N., ONO, H., FURUKAWA, T. and INOUE, T. Use of small size coke (7 ~ 20 mm) mixed with ore in blast the furnace. Transactions ISIJ, Vol. 24 (1984), p. B37.
4. GONÇALVES, LUIZ J. ET AL. Substituição de Coque por Carvão Vegetal no Alto-forno 2 da Aperam South America. Timóteo, 14 p. RT11-0015/2011.
5. BISWAS, A. K. Principles of Blast Furnace Ironmaking. 1ª Edição. 1984.
6. MAARTEN, G; CHAIGNEAU, R; KURUNOV, I ; LINGIARD, O; RICKETTS, J. Modern Blast Furnace Ironmaking. 3ª Edição. 2015.
7. PESSOA, R. R. Planejamento e Resultados do Vazamento da Salamandra do Alto-forno 2 – 2017. RT11-028/2017.