

# UMA VISÃO DO DESEMPENHO DO ALTO-FORNO “A” DA USINA DE MONLEVADE EM SEUS DEZ PRIMEIROS ANOS DE OPERAÇÃO<sup>1</sup>

*Wander de Oliveira Borges<sup>2</sup>  
Rodrigo Junqueira dos Santos<sup>2</sup>  
Maurício Bittencourt Marques<sup>2</sup>  
Fabiano Cristeli de Andrade<sup>2</sup>  
Thales Ornelas Iglesias<sup>2</sup>  
Haroldo Lacerda de Brito<sup>2</sup>*

## Resumo

A Usina de Monlevade entrou em operação em 1937, com um pequeno alto-forno a carvão vegetal. Ao longo dos anos outros quatro altos-fornos a carvão vegetal entraram em operação. O uso do carvão vegetal como principal agente redutor foi mantido até 1999, quando entrou em operação o alto-forno “A” (AF-A), operado com coque e com injeção de carvão mineral pulverizado. O presente trabalho faz uma breve revisão histórica, apresentando a seguir o projeto e a entrada em operação do AF-A, descrevendo os principais eventos e os principais resultados operacionais obtidos ao longo de seus dez primeiros anos de operação.

**Palavras-chave:** Alto-forno; Histórico; Desempenho; Campanha.

## AN OVERVIEW OF MONLEVADE BLAST FURNACE “A” PERFORMANCE IN ITS FIRST 10 YEARS OF OPERATION

## Abstract

Monlevade Works was started up in 1937, with a small charcoal operated blast furnace. Along the years four others charcoal blast furnaces were commissioned. The use of charcoal as the main reducing agent was kept until 1999, when the blast furnace “A” (BF-A), operated with coke and pulverized coal injection, was started up. This paper briefly shows an historical review of the blast furnaces at Monlevade, and shows the main information on BF-A, describing the major events and key operating results obtained during its first 10 years of operation.

**Key words:** Blast furnace; History, Performance; Campaign.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 41º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas e 12º Seminário Brasileiro de Minério de Ferro, 12 a 26 de setembro de 2011, Vila Velha, ES.

<sup>2</sup> Gerência de Redução da ArcelorMittal Monlevade.

## 1 INTRODUÇÃO

Até o final dos anos 1990 a Usina de Monlevade operava cinco pequenos altos-fornos, produzindo cerca de 800.000 t de gusa por ano. O principal agente redutor utilizado era o carvão vegetal, sendo que em 1992 o alto-forno 5, então o maior dos fornos, foi “convertido” para o uso de coque.

Em 1997 foi tomada a decisão de se construir um novo alto-forno, operado a coque e com injeção de carvão mineral, para substituir os pequenos altos-fornos a carvão vegetal. Este novo alto-forno, chamado de alto-forno A, entrou em operação em 19 de dezembro de 1999, tendo uma capacidade nominal de 1.040.000 t/ano (correspondente a um aumento de 30% na produção).

Este artigo mostra o histórico da área de altos-fornos em Monlevade, as principais características do novo alto-forno, a matriz esperada e a realizada para as matérias-primas, os principais problemas e as principais soluções encontradas para transformar uma área de redução com cultura de operação baseada em carvão vegetal em uma das referências em termos de resultados com uso de coque.

## 2 BREVE HISTÓRICO DA ÁREA DE ALTOS-FORNOS NA USINA DE MONLEVADÉ

A área de redução da Usina de Monlevade é a mais antiga em operação no Brasil, dentre as usinas integradas. Desde 1937, com a inauguração do primeiro alto-forno, a usina já teve seis altos-fornos, sendo cinco projetados para operar com carvão vegetal, e o sexto para operar com coque. A Tabela 1 mostra a data de início e final de operação de cada um dos altos-fornos da Usina, bem como a produção dos mesmos.

**Tabela 1.** Altos-fornos na ArcelorMittal Monlevade. Produção do AF-A: até 31/12/2010

<b>AF</b>	<b>Start-up</b>	<b>Blown-down</b>	<b>Volume útil, m<sup>3</sup></b>	<b>Produção acumulada, Mt</b>
<b>1</b>	1937	28/02/2000	214	5.884
<b>2</b>	1938	31/12/1999	214	5.939
<b>3</b>	1942	01/10/1999	214	5.491
<b>4</b>	1944	22/07/1996	164	3.038
<b>5</b>	1980	11/11/1999	406	4.947
<b>A</b>	19/12/1999		1186	11.717
<b>Total</b>				37.016

Em 1992, após várias experiências, foi iniciada a utilização de 100% de coque no alto-forno 5, o que exigiu um novo aprendizado. Como este alto-forno fora projetado para utilizar carvão vegetal, sua operação não podia ser como a de um forno a coque comum, mas também não podia ser a de um forno a carvão vegetal. Foi necessário desenvolver uma forma própria de operação.

Quando a decisão de construir o AF-A foi tomada, em maio de 1997, selou-se o final da era do carvão vegetal como principal redutor na Usina, uma transformação significativa para a empresa e mesmo para a região.

A ArcelorMittal BioFlorestas (antiga CAF), responsável pelo plantio de eucalipto e produção do carvão vegetal teve de ser redirecionada, e passou a fornecer eucalipto para a indústria, e carvão vegetal para produtores independentes de gusa, em acordos de compra de gusa sólido para as demais usinas da ArcelorMittal Brasil, baseadas em fornos elétricos. Posteriormente, com a construção de dois altos-fornos a carvão vegetal na Usina de Juiz de Fora, a ArcelorMittal BioFlorestas voltou a fornecer o redutor diretamente para uma usina do grupo.

A decisão de se efetuar a substituição dos cinco altos-fornos de menor porte pelo AF-A foi tomada, entre outros motivos, para garantir o atendimento completo às exigências ambientais, reduzir o custo do gusa garantindo a competitividade da usina, balancear a produção da usina dispensando a compra de tarugos de terceiros e promover a atualização tecnológica dos equipamentos, permitindo melhor controle dos processos de produção.

### 3 PROJETO E PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS

O AF-A foi projetado pela Paul Wurth, em cooperação com a ArcelorMittal Gent (ex-Sidmar, Bélgica). As principais características do alto-forno estão mostradas na Tabela 2.

**Tabela 2.** Principais características do alto-forno A

Diâmetro do cadinho	8,0 m
Diâmetro da goela	6,4 m
Volume interno	1.357 m <sup>3</sup>
Volume útil	1.186 m <sup>3</sup>
Nº de ventaneiras	22
Nº de furos de gusa	1 (canal removível)
Capacidade nominal	1.040.000 t/ano
Sistema de carregamento	Correia transportadora e topo-sem-cone
Sistema de refrigeração	<i>Staves</i> de ferro fundido no cadinho, cuba média e cuba superior
	<i>Staves</i> de cobre na rampa, ventre e cuba inferior Quatro circuitos fechados com água desmineralizada: cadinho, <i>staves</i> superiores, corpo de ventaneiras, nariz de ventaneiras
Regeneradores	Três (câmara de combustão interna)
	Pré-aquecimento de ar e gás de combustão, em setembro de 2005
Limpeza de gás	Coletor de pó, lavador <i>Bischoff, demister</i>
Taxa de injeção de carvão	160 kg/t, max.

Os regeneradores do antigo alto-forno 5 foram reformados nos anos de 1998 e 1999, tendo sua altura aumentada e seus refratários substituídos, para atender ao AF-A. Como a usina não possui coqueria, um sistema de enriquecimento do GAF (Gás de Alto-Forno) com GLP (Gás Liquefeito de Petróleo) e outro de

enriquecimento do ar de combustão com oxigênio foram instalados, para permitir maiores temperaturas de sopro.

Também o sistema de limpeza de gases do AF-5 foi reformado, após o seu *blow-down*, tendo sido aumentado o coletor de pó (na altura), revestida a parte interior do lavador e trocada a “pêra” do mesmo. Também foi montado o *demister* externo. A avaliação da capacidade do sistema atender ao alto-forno A e as modificações necessárias foram feitas pela equipe do próprio fornecedor do equipamento, durante a fase de projeto.

No sistema de carregamento, os silos utilizados pelo alto-forno 5 tiveram seu sistema de extração modernizado para atender ao AF-A.

O cadinho foi construído com blocos de carbono micro-poroso e super-microporoso, e uma camada cerâmica sobre o fundo. A refrigeração do fundo é feita por 32 tubos na soleira, e as paredes contam com *stave coolers* de ferro fundido.

A instalação de injeção de carvão pulverizado foi projetada pela Paul Wurth, e começou a operar alguns meses antes do forno, para atender ao alto-forno 5. Ela conta com um silo de carvão bruto para 490 t, moinho Polysius de 20 t/h, um silo de carvão pulverizado de 200 t, dois vasos de injeção e linha de injeção e distribuidor projetados para injetar até 25 t/h.

#### 4 MATÉRIAS-PRIMAS: PROJETO INICIAL E EVOLUÇÕES

De acordo com o balanço de massa da usina em 1996, a previsão de disponibilidade de sinter para o AF-A era de apenas 60%. Com isto os estudos de viabilidade foram feitos considerando 60% de sinter, 20% de pelotas e 20% de minério granulado na carga.

Em função do alto custo da pelota, um projeto de elevação da produção da sinterização foi iniciado, e o resultado foi uma disponibilidade de sinter para 80% da carga, já no início da operação do forno. Para isto, além de melhorias nos equipamentos, um processo de *benchmarking* com a ArcelorMittal Gent foi iniciado em 1998. Um dos resultados do intercâmbio foi uma seleção de matérias-primas que reduziu a participação do *sinter feed* Andrade (SFAN), de mina própria, na carga da sinterização. Foi aumentado o percentual de minérios corretivos fornecidos por terceiros e mudanças foram feitas também nos fornecedores de fundentes.

Em razão do baixo custo de produção e transporte do minério (a mina fica a 11 km da usina), estudou-se posteriormente o processo HPS (*Hybrid Pelletized Sinter*), desenvolvido pela JFE (ex-NKK, Japão). O processo permite a utilização de minérios mais finos, como é o caso do SFAN. O objetivo era reduzir o custo do sinter, via utilização de 100% de SFAN na sinterização, além de aumentar a produtividade da instalação visando maximizar o uso de sinter no AF-A.

Em 2002 (dezembro), ano em que o processo HPS foi implantado na sinterização, a participação de sinter na carga foi de 80%. A partir de 2003 a participação subiu continuamente, atingindo um máximo de 88,5% em 2009.

Para o fornecimento de coque foram firmados dois contratos de longo prazo, um com fornecedor japonês (~70%), outro com fornecedor espanhol (~30%). Estes dois diferentes coques foram utilizados até meados de 2007, quando entrou em operação a Sol Coqueria, *joint-venture* entre a ArcelorMittal Tubarão e ArcelorMittal Monlevade, localizada em Vitória, ES. A partir de então, o AF-A passou a consumir 100% de coque Sol.

## **5 CRONOLOGIA OPERACIONAL**

### **5.1 Equipe**

Em função da grande mudança na operação, foi necessária uma adaptação de toda a equipe para a nova realidade, que contou com treinamentos tanto na própria usina como em outras usinas no Brasil (ArcelorMittal Tubarão, ex-CST) e na Europa (ArcelorMittal Gent). O *start-up* foi com suporte técnico da equipe de Gent, que manteve um acompanhamento por 12 meses, na usina. O alto-forno iniciou a operação no dia 19/12/1999, e trabalhou sem injeção de carvão até o dia 16/01/2000.

### **5.2 Sistema de Limpeza de Gases e Regeneradores**

Logo nos primeiros meses foi verificada uma limitação na eficiência do lavador de gás, o que levou a uma alteração no seu projeto no mês de abril de 2000. Foi necessária uma parada de 72 h do forno. Mesmo após as modificações a eficiência não chegou a ser elevada ao nível necessário para garantir a baixa umidade do GAF, nem o teor de particulados adequado para os usuários do GAF no restante da usina. A elevada umidade do GAF, aliada às vibrações que ocorreram nos regeneradores nos primeiros meses de operação, resultado da dificuldade de acerto dos parâmetros de operação com GLP, levaram a danos nas câmaras de combustão dos regeneradores. Houve queda de tijolos da parede de partição, danificando os queimadores cerâmicos e abrindo passagens preferenciais de fumaça para o empilhamento. Como resultado houve queda da eficiência dos mesmos, e reformas foram necessárias nos três, durando em média 40 dias cada. As reformas trouxeram um grande prejuízo à usina, tanto em função da perda de produção, como também em função da elevação do consumo de combustíveis, notadamente coque, necessária para manter a operação durante as intervenções. A solução parcial do problema da umidade veio com um projeto Seis Sigma, que tornou a qualidade do GAF suficientemente adequada para o consumo sem danificar os regeneradores. A solução definitiva viria com um novo sistema de limpeza de gases, que foi implantado em junho de 2007. Na descarga de pó no ciclone foi instalado uma tromba telescópica que desce até a caçamba fechada do caminhão, eliminando o vazamento de particulados na área.

### **5.3 Matérias-Primas**

Foram feitos alguns testes na carga tanto de coque como de minério, visando otimizar consumos e reduzir custos. Os principais foram o uso de coque chinês, que chegou a 50% da carga, trouxe bons resultados, mas não foi mantido devido a razões comerciais, e o uso de minério granulado da mina do Andrade, que não trouxe bons resultados (crepitação excessiva e baixa redutibilidade, para o porte do alto-forno).

### **5.4 Distribuição de Cargas**

A filosofia de distribuição de carga do forno foi desenvolvida nos primeiros dois anos de operação, com várias atuações visando o controle das perdas térmicas. O uso de coque central foi iniciado já no início de marcha, mas o ajuste da quantidade de

coque na parede, assim como da intensidade do coque central, demandou mais tempo. Até meados de 2001 buscava-se trabalhar com o mínimo de coque na parede (a relação entre coque e minério na parede chegou a ser de 20% de coque apenas), visando reduzir as perdas de calor para a parede e os picos de temperatura nos *staves*.

Porém a consequência desta prática era a instabilidade da descida de carga e o elevado índice de empeno de ventaneiras. Em abril de 2001 foi testada a elevação da quantidade relativa de coque na parede (acima de 40% de coque), o que levou a uma melhor descida de carga e à eliminação da ocorrência de empenos em ventaneiras.

### **5.5 Sistema de Refrigeração**

Em 2001 também foi identificada uma perda de água no circuito de refrigeração dos *staves* superiores. A perda se dava na cuba média, na primeira fila de *staves* de ferro fundido. A investigação do fenômeno levou à identificação de pequenas trincas na parte superior dos tubos de refrigeração dos *staves*, imperceptíveis a olho nu, no “joelho” dentro do *stave*. A conclusão foi que na montagem do forno, as juntas de vedação de silicone usadas para evitar o vazamento do refratário vertido entre os *staves* e a carcaça falharam. Com a imobilização das juntas de expansão, os *staves* sofreram diretamente o *stress* térmico, o que levou às trincas no ponto mais fraco. Para solucionar o problema, foram instalados dispositivos para evitar que a água passasse diretamente nos tubos (*by pass* interno aos tubos), e todas as caixas de vedação foram ou estão sendo trocadas em paradas programadas, sendo feita a remoção do refratário vazado e liberada a movimentação dos *staves*.

### **5.6 Sistema de Injeção de Finos**

Em 2002 foram instaladas lanças duplas de injeção de carvão pulverizado, que levaram a uma melhor queima do combustível e conseqüente redução do *fuel rate*, além do ganho na permeabilidade do homem morto. A implantação das lanças foi parte de um dos projetos Seis Sigma de redução do *fuel rate*.

### **5.7 Linha de Ar Quente**

Um ponto problemático para a campanha do forno foi a condição dos refratários da linha de ar quente: toda a linha de ar quente foi revestida com material projetado, em lugar do tradicional uso de tijolos. Este tipo de solução já tinha sido testado e aprovado em alguns fornos, incluindo os de Gent, porém no caso do AF-A, pouco tempo após o *start-up* apareceram trincas em toda a extensão da linha de ar quente, desde a saída dos regeneradores até o conduto circular. Com as trincas apareceram os pontos quentes, que exigiram monitoração através de termografia. Alguns pontos passaram por injeções de argamassa e foram refrigerados externamente com água, para manter a temperatura nos limites desejados. Em duas regiões mais críticas do conduto circular foram realizados reparos maiores, com a abertura de janelas e reconstituição do revestimento. Os trechos retos nas saídas de ar quente dos três regeneradores foram completamente substituídos por novas tubulações revestidas com tijolos refratários.

## 5.8 Aquecimento do Ar Soprado

Também na área de regeneradores, duas grandes melhorias foram introduzidas. Em 2005 foi implantado um sistema de pré-aquecimento do ar e do gás de combustão, permitindo reduzir o consumo de GLP e oxigênio. Posteriormente, em 2010, um novo ventilador de ar de combustão foi adicionado ao sistema, uma vez que os dois ventiladores originais se mostraram subdimensionados.

## 5.9 Cadinho

O desgaste do cadinho vem sendo acompanhado através da evolução das temperaturas do revestimento, e posteriormente um modelo matemático foi implantado para avaliar a progressão do mesmo. Até o momento o desgaste na parede, região do furo de gusa, é pequeno, enquanto no fundo a cobertura cerâmica sobre os blocos de carbono já foi desgastada.

## 6 GRÁFICOS DE DESEMPENHO DOS PRINCIPAIS INDICADORES E COMENTÁRIOS

As Figuras de 1 a 10 mostram os principais indicadores operacionais e de processo, com sua evolução desde o primeiro ano de operação.

Na Figura 1 pode-se ver a evolução da produtividade do alto-forno A, mostrando uma tendência crescente. A reversão desta tendência a partir de 2008 é explicada pela crise mundial iniciada no 2º semestre de 2008, que trouxe uma retração do mercado e a conseqüente redução de produção (realizada através de reduções de marcha e de paradas prolongadas do alto-forno).

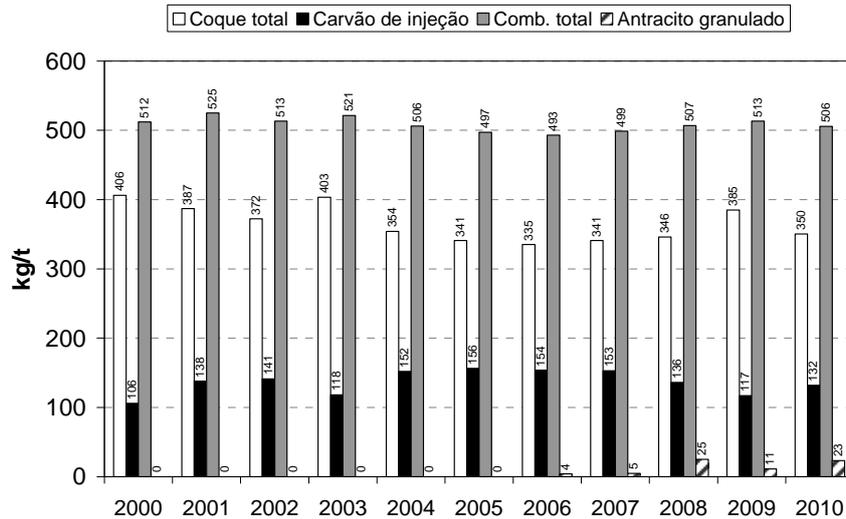
**Erro! Vínculo não válido.**

**Figura 1.** Evolução da produtividade (volume útil).

Com relação ao consumo de redutores (Figuras 2 e 3), verifica-se nos últimos anos que o *fuel rate* vem se mantendo em torno de 500 kg/t, com um *coke rate* abaixo de 350 kg/t e taxa de injeção de carvão da ordem de 150 kg/t. Vale destacar o elevado consumo de *small coke* (~100 kg/t), *benchmarking* nacional.

Nos últimos anos desenvolveu-se o uso de redutores alternativos no AF-A, com o foco em redução de custos e/ou de impactos ambientais. O início de utilização de cada um deles é mostrado abaixo:

- antracito granulado (via topo) - Março/2006;
- carvão vegetal (injeção) - Julho/2008;
- óleos usados (injeção) - Dezembro/2009;
- gás natural (injeção) - Janeiro/2011; e
- coque de petróleo (injeção) - Fevereiro/2011.



**Figura 2.** Evolução do consumo de redutores.

**Erro! Vínculo não válido.**

**Figura 1.** Consumo de *small coke* e coque metalúrgico.

A Tabela 3 mostra os melhores resultados mensais obtidos no consumo de cada um dos redutores.

**Tabela 3.** Recordes mensais de consumo de redutores no AF-A

Item	Valor (kg/t)	Mês
Fuel rate	470	Março/2006
Coke rate (total)	314	Janeiro/2008
Small coke rate	114	Fevereiro/2009
Taxa de injeção	169	Mai/2007
Antracito granulado rate	45	Outubro/2008
Carvão vegetal (injeção)	30	Julho/2010

Quanto à qualidade, a Figura 4 mostra o teor médio e o desvio padrão do teor de silício no gusa. O desvio está em um patamar relativamente bom, e vem caindo com a maior estabilidade operacional, mas ainda está acima do praticado em outras usinas brasileiras. A ocorrência de uma marcha fria no forno em maio de 2010 afetou o desvio-padrão no ano.

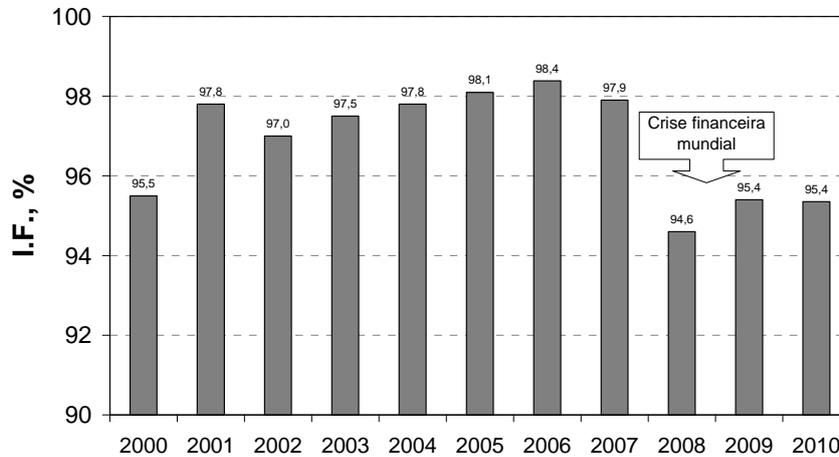
A disponibilidade do forno vem aumentando ano a ano (Figura 5), impactando diretamente na produtividade. Os valores menores em 2008 e 2009 se devem ao elevado número e duração de paradas para controle da produção (crise mundial).

Um indicador da estabilidade operacional de um alto-forno é a frequência de engaiolamentos de carga (Figura 6). Em 2007 as ocorrências aumentaram devido a problemas de qualidade do coque Sol, no período inicial de sua utilização. Já em 2008 e 2009 os engaiolamentos estão associados a perturbações operacionais nos

períodos pós-paradas longas (controle de produção). Em 2010 as ocorrências se concentraram no mês de maio, quando da ocorrência da marcha fria.

**Erro! Vínculo não válido.**

**Figura 4.** Teor médio de silício e desvio padrão.



**Figura 2.** Índice de funcionamento (tempo de funcionamento/tempo calendário).

**Erro! Vínculo não válido.**

**Figura 3 -** Frequência de engaiolamentos

A filosofia de trabalho com relação à carga metálica foi alterada em 2002, passando-se a visar um mínimo de 90% de material preparado (sinter + pelota) no forno. Após a entrada em operação do HPS na sinterização, a participação média de sinter tem ficado em torno de 85%, e a relação entre pelotas e minério granulado tem variado conforme a disponibilidade e custo dos mesmos, mantendo a limitação de um máximo de 10% a 12% de minério granulado na carga. A carga metálica ao longo dos anos é mostrada na Figura 7.

**Erro! Vínculo não válido.**

**Figura 4.** Composição da carga metálica.

As temperaturas do cadinho (Figuras 8, 9 e 10) não indicam desgaste acentuado em nenhum dos pontos acompanhados, e a tendência também é a esperada. Ao longo dos anos vem ocorrendo um equilíbrio entre os lados do furo de gusa, na parede, e a soleira apresenta um desgaste aceitável. Em 2008 o termopar do centro do cadinho logo abaixo ao prato cerâmico rompeu mostrando que esse refratário durou cerca de oito anos.

Em 2007 foi feita uma modificação no sistema de refrigeração do cadinho, dividindo o mesmo em dois circuitos independentes: um para os tubos da soleira e outro para os *staves* da parede. Esta alteração permitiu um melhor controle das temperaturas, através de atuações diferenciadas em função da situação.

Em 2008, foi implantado um modelo numérico de simulação da transferência de calor, desenvolvido pela ArcelorMittal Research, para monitoramento do desgaste do cadinho. Com os cálculos realizados é possível ter uma estimativa sobre o desgaste dos blocos do cadinho ao longo do tempo. É possível perceber que a evolução do desgaste está seguindo uma tendência esperada e controlada. O perfil de desgaste não é localizado e a estimativa é que, em seu ponto mais desgastado, a espessura

dos blocos de carbono seja em torno de 800 mm para uma espessura inicial de 950 mm.

**Erro! Vínculo não válido.**

**Figura 8.** Temperaturas máximas do cadinho – soleira.

**Erro! Vínculo não válido.**

**Figura 9.** Temperaturas máximas do cadinho – parede abaixo do furo de gusa.

**Erro! Vínculo não válido.**

**Figura 10.** Temperaturas máximas do cadinho - parede acima do furo de gusa.

A vida útil do canal principal, fator determinante da frequência de paradas do alto-forno, teve uma evolução significativa, saindo de menos de 100.000 toneladas/campanha para valores da ordem de 160.000 t/campanha. No entanto, os últimos canais têm apresentado uma sensível piora de desempenho, voltando aos níveis iniciais. Visando restabelecer os valores já atingidos, trabalhos têm sido feitos junto ao fornecedor do refratário, e o estudo de um novo projeto de canal está em andamento.

Os resultados de segurança também são bons (desde o *start-up* temos três turmas sem acidentes CPT e somente um acidente CPT no quadro próprio), mas todos os esforços ainda são no sentido de aumentar a segurança da área e evitar incidentes e quase acidentes de forma a reduzir ao mínimo a possibilidade de ocorrência de acidentes mais sérios.

## 7 CONCLUSÃO

Os dez primeiros anos de operação do AF-A foram um período de grande aprendizado e muitos desafios. Os cenários externos de matérias-primas levaram a adaptações diversas de carga metálica e redutora, diferentes modos de operação foram usados e vários paradigmas foram quebrados.

De modo geral os equipamentos e o cadinho apresentam boas condições projetando ainda boa longevidade ao AF-A.

Com a expansão da usina, ora em andamento, teremos a entrada em operação de um novo alto-forno de mesma configuração do existente e de uma nova sinterização com maior capacidade em relação à atual. Isto permitirá um aumento no uso de sinter na carga com seus benefícios e desafios, como o aumento do volume de escória. Além disso, a expectativa de contínuas mudanças de ambiente externo nos faz crer que a flexibilidade e o controle de processos continuarão sendo fatores de suma importância para o sucesso deste alto-forno nos próximos anos de sua campanha.