

## RESFRIAMENTO INVERTIDO NUM FORNO DE PELOTIZAÇÃO GRELHA RETA-AVALIAÇÃO EM ESCALA PILOTO\*

Rossano Augusto Pilon Nunes<sup>1</sup>

Maycon Athayde<sup>2</sup>

Luis Henrique Torres Dantas<sup>3</sup>

### Resumo

O trabalho tem o objetivo de avaliar em escala piloto a qualidade física alcançada nas pelotas de minério de ferro e o perfil de temperatura no leito aplicando uma inversão no fluxo de gases durante o resfriamento das mesmas. A queima de pelotas requer um tempo mínimo de permanência nas temperaturas de sinterização dos grãos de hematita [1]. O conceito aplicado visa elevar esse tempo para as pelotas localizadas no fundo do leito o que proporcionaria uma melhora na qualidade física do produto. Os ensaios foram realizados num forno do tipo pot-grate e as amostras de pelotas queimadas foram divididas em três alíquotas de acordo com a posição de carregamento do forno denominadas topo meio e fundo, as pelotas foram peneiradas e submetidas a ensaios físicos e os resultados comparados a uma queima convencional com mesmos minérios e insumos. Foi possível evidenciar uma elevação de 7 a 8% na resistência à compressão do meio e fundo, mantendo os resultados do topo. Os objetivos da pesquisa foram atingidos e os testes serão estendidos para avaliar os impactos no balanço de massa e energia do forno e componentes da máquina de grelha.

**Palavras-chave:** Pelotização; Resfriamento.

### INVERTED COOLING TRAVELLING GRATE PROCESS - PILOT SCALE EVALUATION

#### Abstract

The objective of this work is to evaluate the physical quality achieved in the iron ore pellets and the temperature profile in the pellet bed by applying an inversion in the flow during the cooling. The firing of pellets requires a minimum residence time in the sintering temperatures of the hematite grains [1]. The applied concept aims at raising this time to pellets located at the bottom of the bed which would provide an improvement in the physical quality of the product. The tests were carried out in a pot-grate type oven and the samples of fired pellets were divided into three aliquots according to the loading position of the pot termed top, middle and bottom, the pellets were sieved and subjected to physical tests and the compared to conventional indurating flow with the same ores and inputs. It was possible to show an increase of 7 to 8% in the compressive strength of the medium and bottom layers, maintaining the top layer results. The objectives of the research were achieved and the tests will be extended to assess the impacts on the mass and energy balance of the indurating machine and its components.

**Keywords:** Inverted cooling, Travelling grate.

<sup>1</sup> Engenheiro Metalurgista, Engenheiro de processos Sênior, Engenharia de processos e sustentabilidade/diretoria de pelotização e Manganês, Vale, Vitória, Espírito Santo, Brasil.

<sup>2</sup> Engenheiro Metalurgista, Dsc, Engenheiro de processos, Engenharia de processos e sustentabilidade/diretoria de pelotização e Manganês, Vale, Vitória, Espírito Santo, Brasil.

<sup>3</sup> Engenheiro Metalurgista, Supervisor de engenharia de processos, Engenharia de processos e sustentabilidade/diretoria de pelotização e Manganês, Vale, Vitória, Espírito Santo, Brasil.

# 1 INTRODUÇÃO

A Introdução deve conter uma breve apresentação do trabalho, contendo os objetivos e a revisão da literatura.

Com objetivo de alavancar o processo de modernização de suas plantas de pelletização a Vale S/A lançou o programa “usina do futuro”, onde definiu desafios para os indicadores chave como produtividade, opex e redução das emissões de poluentes [2].

A figura 1 apresenta os desafios definidos para a pesquisa.

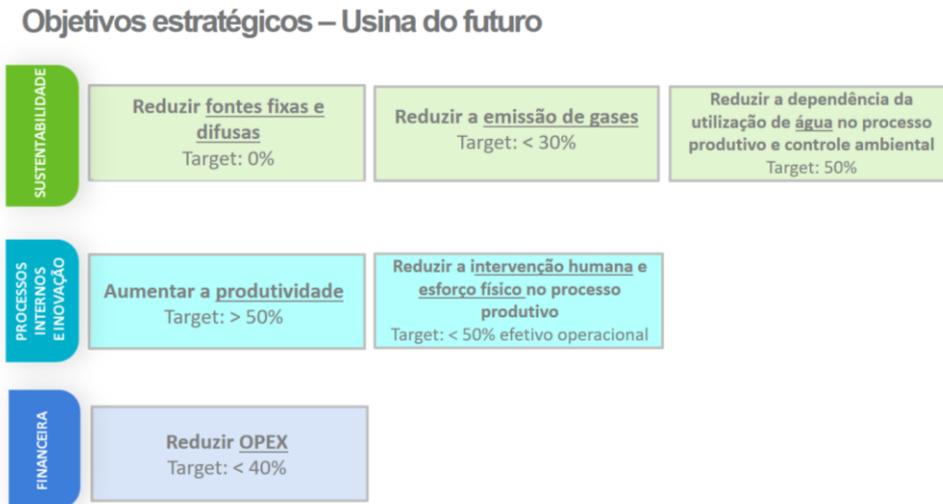


Figura 1. Desafios para a pelletização do futuro.

Tomando como base o que foi proposto a pesquisa e inovação da pelletização direciona seus esforços de forma a agrupar três áreas [2], cominuição, aglomeração e endurecimento conforme figura 2.

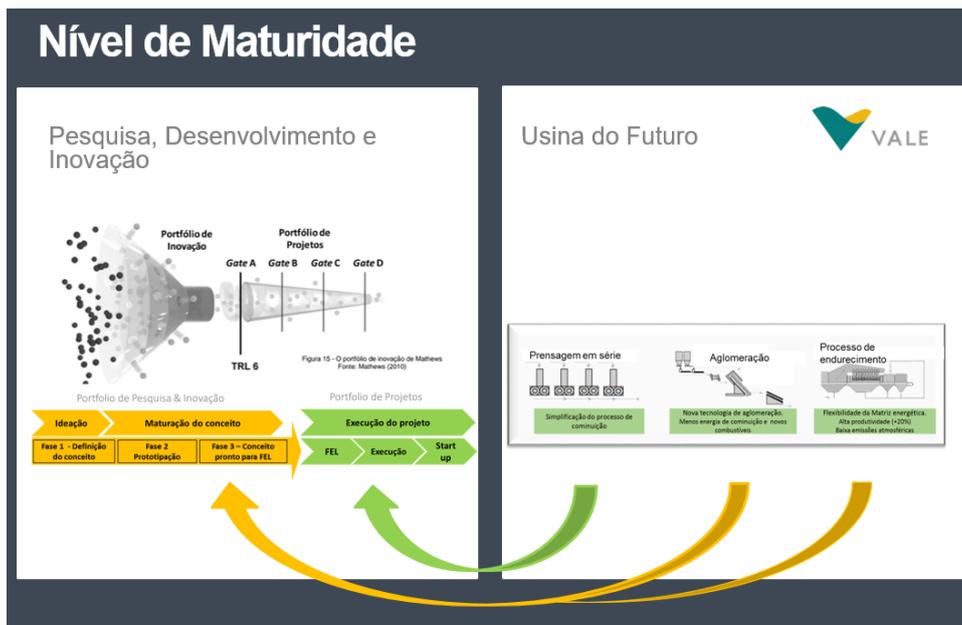


Figura 2. Divisão dos processos na pesquisa e inovação da pelletização.

O conceito desenvolvido e aplicado ao forno de pelotização possui grau de maturidade 4 de acordo com a adaptação da metodologia TLR's (technology readiness level) [4], nesta etapa da pesquisa o objetivo principal da ideia que é elevar a qualidade das pelotas do fundo do leito será comprovado através de ensaios em escala piloto.

No processo de pelotização as pelotas verdes são endurecidas através de um tratamento térmico realizado em forno tipo grelha reta no caso em questão. Abaixo segue um diagrama detalhado da máquina de endurecimento objeto do estudo, planta nº6 da Vale.

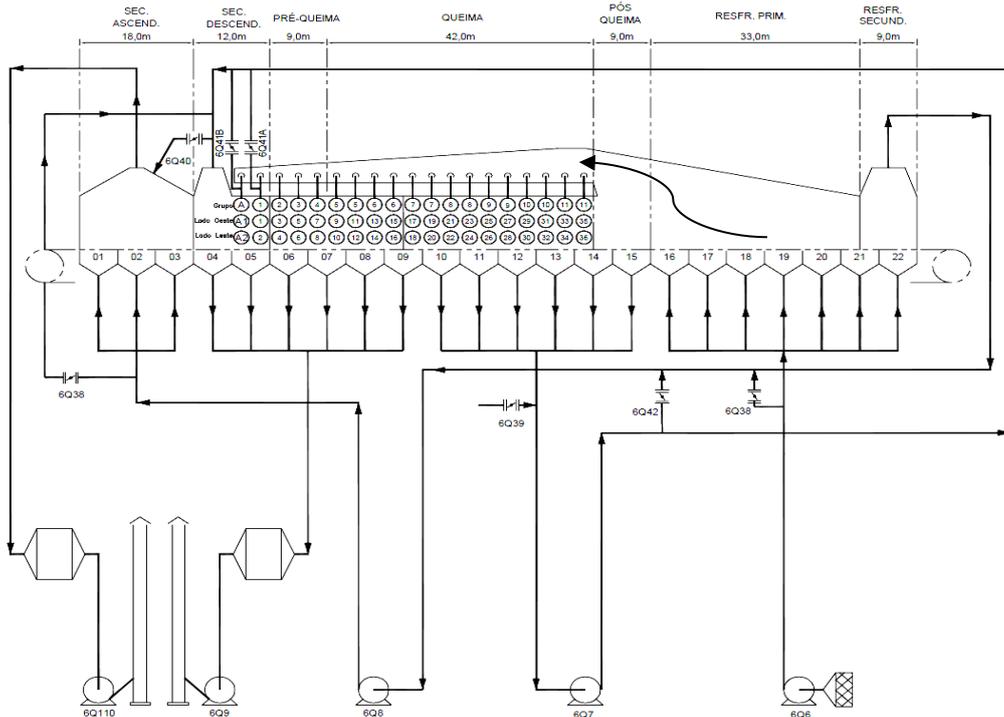


Figura 3. Fluxograma detalhado da usina nº6 - Vale Vitória.

A qualidade física das pelotas é um fator muito sensível à produtividade neste tipo de forno, visto que o perfil térmico característico mantém as pelotas pouco tempo nas altas temperaturas comparado a outros processos como Grate-Kiln, figura 4.

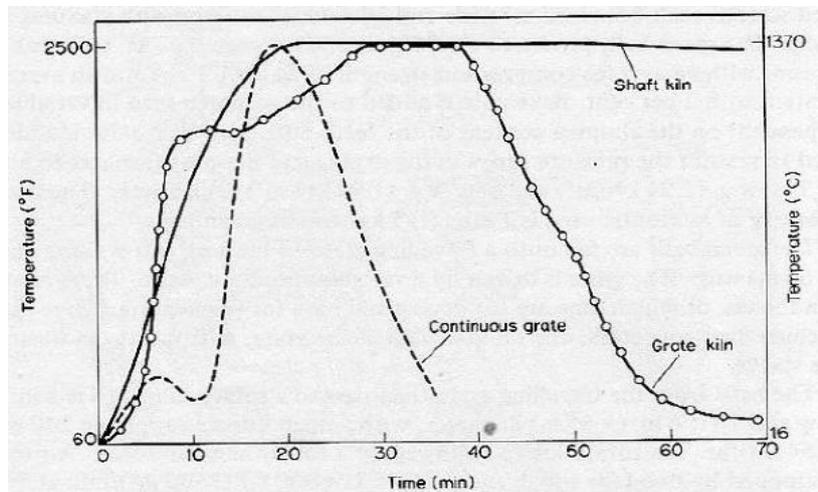


Figura 4. Curvas de temperatura características por processo, adaptado de [3].

Como no processo travelling grate o leito é estático, a queima se dá do topo para o fundo e após esta fase há a pós queima, onde não há aporte de calor proveniente dos queimadores apenas fluxo de ar recuperado através leito com o intuito de homogeneizar as temperaturas na carga de pelotas.

Com a produtividade praticada atualmente e o ciclo térmico sendo reduzido com relação ao projeto, há uma elevação da diferença de temperatura do fundo em relação ao meio e topo do leito, o que pode reduzir a qualidade e limitar a produtividade do forno.

No fluxo atual o calor das pelotas queimadas é recuperado para a região de queima e pré-queima, o ar atmosférico é insuflado em sentido ascendente recuperando calor dos carros de grelha e pelotas e sendo conduzido para as câmaras de combustão onde a temperatura é ajustada para 1300 a 1350°C promovendo a queima da carga. Esse ar é chamado de ar de recuperação direta. A proposta de inverter parcialmente o resfriamento visa realizar adequações físicas que estendam o teto do forno após a região de pós queima, recirculando gases do resfriamento ou chaminé de exaustão em um fluxo descendente.

Desta forma o topo das pelotas sofre resfriamento, enquanto que o fundo e forramento são aquecidos pelo ar que troca calor com a região superior do leito, elevando o tempo de permanência das pelotas nas temperaturas de sinterização, o que confere melhores propriedades físicas nas mesmas [1], este rearranjo contribui com a redução dos finos gerados nas pelotas do fundo, contudo não é objetivo deste trabalho.

A inversão proposta remove a parte mais aquecida do ar que seria recuperado para região de queima e conduz para a recuperação das caixas de vento vide figura 5, este gás recuperado é reaproveitado sendo conduzido para a secagem descendente e início da pré-queima.

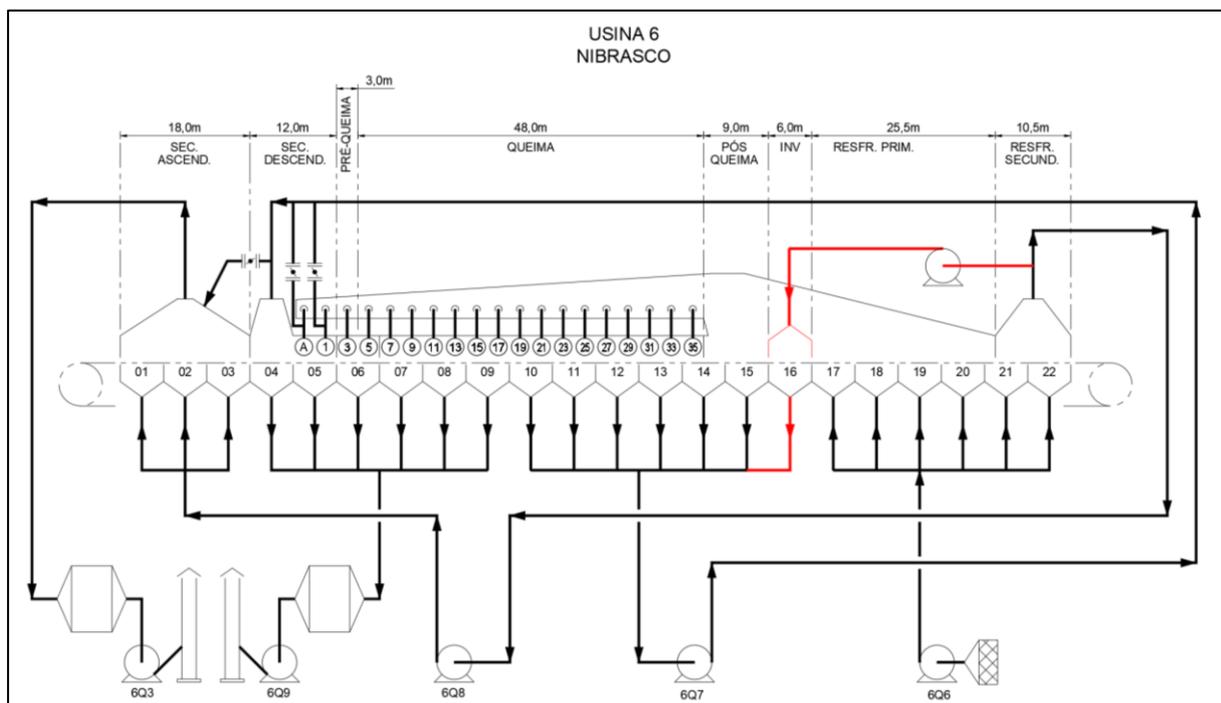


Figura 5. Fluxograma detalhado da proposta de inversão no resfriamento.

## 2 DESENVOLVIMENTO

## 2.1 Materiais e Métodos.

Para avaliar o impacto das mudanças no perfil térmico ao qual as pelotas foram submetidas foram realizados ensaios de queima em pot-grate, um forno estático, cilíndrico de 290mm de diâmetro útil, onde os gases são forçados através do leito de pelotas por um compressor e a vazão é controlada através da pressão diferencial exercida pela carga. Abaixo esquema do forno piloto fig 6.

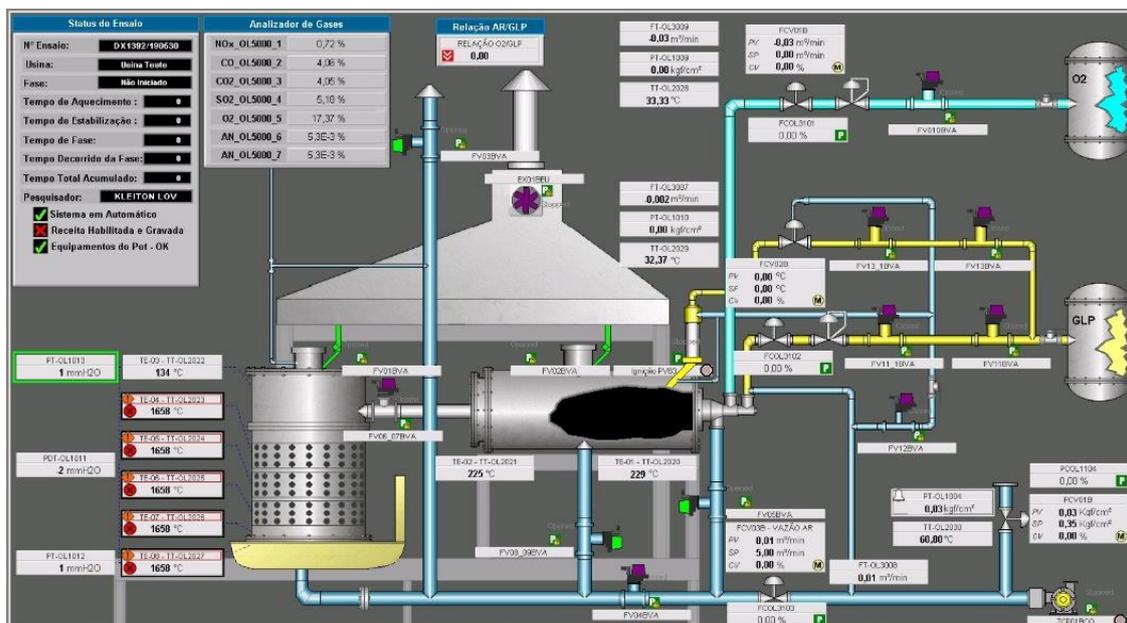


Figura 6. Forno Pot Grate.

Foi realizado um ensaio padrão com réplica e forno na configuração original para gerar o baseline da condição atual da planta, e comparar com a condição de teste. Para perceber as alterações de qualidade ao longo da altura do leito de pelotas as amostras foram divididas em pelotas do topo, meio e fundo em alturas equidistantes. Para inverter o fluxo de gases no resfriamento para descendente a operação se deu em manual e o controle desta etapa permaneceu como no modo automático pela perda de carga no leito, foi utilizado um valor de 300mmca. Para tornar o fluxo do resfriamento descendente invariavelmente o ar do compressor passa pela câmara de combustão de acordo com a figura 6, o que gera um ar mais aquecido do que o do resfriamento convencional, esse fato contribui para aproximar a simulação piloto da condição industrial, pois no conceito proposto, parte do ar do resfriamento vêm de recirculação de gases provenientes do forno, vide figura 5.

O perfil de temperaturas e pressões do ensaio é apresentado na figura 7 abaixo:

Zona	Tempo (s)	Acumulado (s)	Temp. (°C)	Δp (mmca)
Secagem Ascendente	277	277	380	-350
Secagem Descendente	185	462	330	350
Pré Queima 1	46	231	600	350
Pré Queima 2	46	92	700	350
Pré Queima 3	46	92	800	350
Pré Queima 4	92	138	950	350
Pré Queima 5	92	185	1080	350
Queima 1	92	185	1120	350
Queima 2	92	185	1130	350
Queima 3	92	185	1140	350
Queima 4	92	185	1120	350
Queima 5	92	185	1080	350
Pós Queima	138	231	1080	350
Resfriamento	646	785	180	-350
TOTAL	2031	2677		

Figura 7. Pedido de temperaturas e pressões.

Os ensaios físicos realizados nas pelotas queimadas foram a resistência a compressão e abrasão ISO 3271, já para as pelotas verdes foram realizadas umidade, resistência a seco, resistência a verde e número de quedas.

## 2.2 Resultados e discussão.

As queimas transcorreram de maneira similar e os ensaios são avaliados pelas curvas de temperatura para cada altura do leito e nas pelotas do forramento, as figuras de 8 a 11 mostram o perfil térmico dos ensaios.

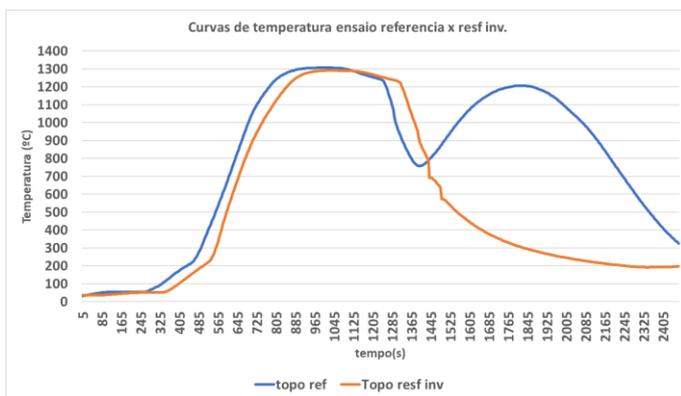


Figura 8. Gráfico de temperaturas topo do leito.

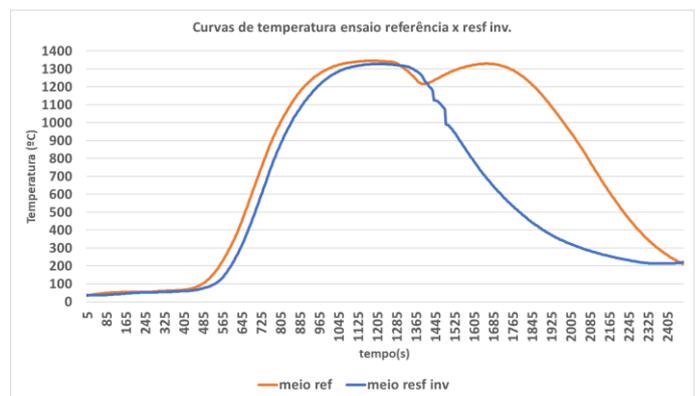
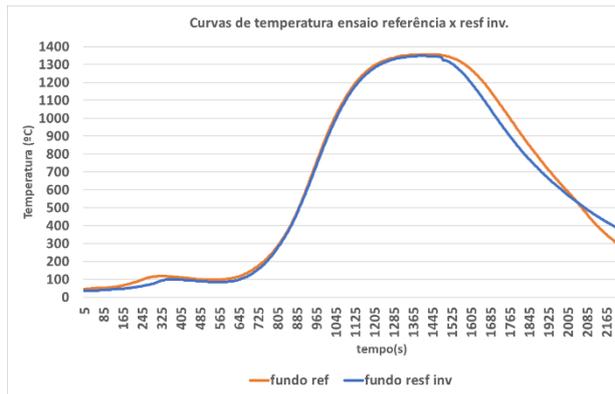
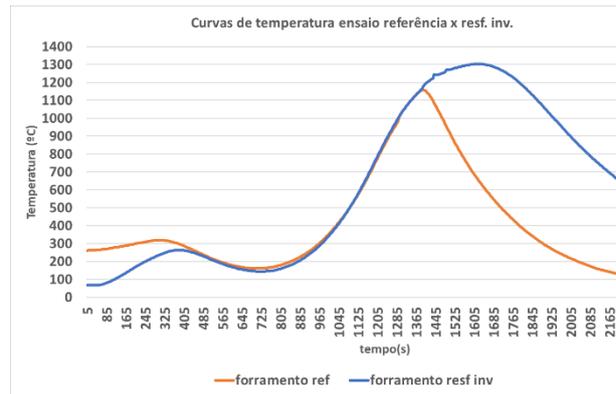


Figura 9. Gráfico de temperaturas meio do leito.



**Figura 10.** Gráfico de temperaturas fundo do leito.



**Figura 11.** Gráfico de temperaturas pelotas de forramento.

Os resultados de qualidade das pelotas estão dispostos na tabela 1 e 2 abaixo:

**Tabela 1.** Qualidade relativa pelotas queimadas resfriamento invertido.

Ensaio	Resistência a compressão	a	Abrasão %
Resfriamento invertido topo	100		91
Resfriamento invertido meio	108		91
Resfriamento invertido fundo	107		94

**Tabela 2.** Qualidade pelotas verdes resfriamento invertido.

Ensaio	Umidade%	RPC daN/pel	RPS daN/pel	NQ
Resfriamento invertido	8,9	1,7	4,9	2,9

Os resultados apontam para uma maior transferência de calor para as camadas inferiores do leito e um resfriamento rápido do topo e meio, a qualidade do topo e meio não foi prejudicada, como era esperado, pois o tempo nas temperaturas de sinterização atingido pelas pelotas até a etapa de pós queima é o mesmo e consolida a estrutura das pelotas e o reaquecimento não provoca alterações significativas na estrutura da mesma.

Não foi possível evidenciar diferenças significativas nas temperaturas do fundo do leito apenas nas pelotas de forramento, um aumento do número de termopares do forno piloto se faz necessário visto que tanto a resistência a compressão quanto a abrasão do fundo melhoraram no resfriamento invertido.

Ao estender a sucção dos gases através do leito os componentes do carro de grelha que anteriormente eram os primeiros a serem resfriados experimentam uma elevação de temperatura para depois sofrerem resfriamento e uma porção do ar aquecido resultante da passagem pelos carros de grelha é retirada do ar de recuperação direta reduzindo sua temperatura, para avaliar esses efeitos foi realizado um balanço de massa e energia da região do resfriamento, tomando como dados de entrada o final da pós-queima e adotando pressão na caixa de vento de 750mmca para o caso com inversão.

As figuras 12 e 13 apresentam as temperaturas nas pelotas e componentes dos carros para o caso base no conceito atual da planta e para uma caixa de vento com sentido invertido recirculando gases do resfriamento secundário conforme figura 5.

Resumo de temperaturas (C)	Entrada	Saída						
	CV16	CV16	CV17	CV18	CV19	CV20	CV21	CV22
Estrutura do carro	400	366	334	303	273	244	217	192
Grelha	840	641	488	370	281	214	165	129
Pelota de forramento - fundo	1055	601	404	284	204	151	116	94
Pelota de produção - camada inferior	1175	972	676	475	331	226	155	112
Pelota de produção - camada intermediária	1268	1178	1016	746	536	373	248	161
Pelota de produção - camada superior	1238	1240	1173	999	765	559	389	255
Pelota de forramento lateral - inferior	600	689	561	425	310	220	155	114
Pelota de forramento lateral - intermediária	700	665	637	543	425	313	218	150
Pelota de forramento lateral - superior	800	738	691	638	550	439	326	226
Lateral do carro - inferior	450	449	447	442	435	427	419	411
Lateral do carro - intermediária	500	503	505	505	503	499	493	488
Lateral do carro - superior	550	556	560	561	561	558	553	548

**Figura 12.** Temperatura de pelotas e componentes dos carros - caso base.

Resumo de temperaturas (C)	Entrada	Saída						
	CV16	CV16	CV17	CV18	CV19	CV20	CV21	CV22
Estrutura do carro	400	469	425	383	342	303	266	232
Grelha	840	922	676	493	357	260	191	143
Pelota de forramento - fundo	1055	1123	562	362	246	173	128	100
Pelota de produção - camada inferior	1175	1233	897	586	388	254	167	117
Pelota de produção - camada intermediária	1268	1239	1136	855	595	399	255	159
Pelota de produção - camada superior	1238	781	1064	1024	801	570	382	239
Pelota de forramento lateral - inferior	600	649	706	521	365	248	168	119
Pelota de forramento lateral - intermediária	700	745	701	626	483	343	229	151
Pelota de forramento lateral - superior	800	599	672	667	592	465	332	219
Lateral do carro - inferior	450	448	448	446	440	433	424	417
Lateral do carro - intermediária	500	505	509	511	510	506	501	495
Lateral do carro - superior	550	553	554	556	556	554	550	544

**Figura 13.** Temperatura de pelotas e componentes dos carros – 1 caixa de vento invertida.

Para o caso base temos que a vazão direcionada para o duto de recuperação é de 292 kg/s, com temperatura de 911°C e a vazão direcionada para a coifa do resfriamento secundário é de 110 kg/s, com temperatura de 354°C.

Na simulação de 1 caixa de vento obtivemos os seguintes resultados:

A vazão inserida na região invertida é de 33,8 kg/s. A grelha atingiu 922°C na saída da CV16 contra os 641°C do caso base. A vazão direcionada para o duto de recuperação é de 302 kg/s, com temperatura de 799°C. A vazão direcionada para a coifa do resfriamento secundário é de 136 kg/s e 340°C.

### 3 CONCLUSÃO

A discreta melhora nos resultados de qualidade física das pelotas comprovou o conceito da ideia. As simulações mostraram que é possível suprir o desbalanço gerado pelo redirecionamento do fluxo de gases da caixa 16 através da elevação da pressão nas caixas de vento do resfriamento e que a temperatura do ar de recuperação é reduzida de 911°C para 799°C o que gera um aumento no consumo de combustível.

### Agradecimentos

A toda equipe da planta piloto da pelletização.

### REFERÊNCIAS

- 1 MEYER, K. Pelletizing of Iron Ores. Heidelberg: Springer-Verlag Berlin, Dusseldorf: Verlag Stahleisen mbH, 1980
- 2 ATHAYDE M., Peres M.E., Mayerhofer F., Vale challenges for pelletizing technology future. In:4ºSymposium on iron ore pelletizing, Quebec, Canada, 29 September-2 october,2018.
- 3 BALL, D.F, Dartnell J., Davidson J., Grieve A., Wild, R. Agglomeration of iron ores.1º edição. Nova York: American Elsevier Publishing Company ;1973
- 4 John C. Mankins, Technology Readiness Level- A white paper.1995 [acesso em 30 mai. 2019]. Disponível em:  
[http://www.artemisinnovation.com/images/TRL\\_White\\_Paper\\_2004-Edited.pdf](http://www.artemisinnovation.com/images/TRL_White_Paper_2004-Edited.pdf)