

# REDUÇÃO DE CUSTO DO PROCESSO DA ACIARIA ELÉTRICA DA APERAM TIMOTEO ATRAVÉS DA OTIMIZAÇÃO DA CARGA METÁLICA DOS AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS\*

*Bruno Costa Cordeiro<sup>1</sup>  
Carlos Alberto Mourão<sup>2</sup>  
Hélio Brás Loss<sup>3</sup>  
Maurício Coelho<sup>4</sup>  
Pedro Montsserrat Lopes<sup>5</sup>  
Evandro Geraldo Marques<sup>6</sup>  
Hugleslei Wagner Mendonça Silva<sup>7</sup>  
Cristiano Ribeiro Lima<sup>8</sup>*

## Resumo

O processo de produção dos aços inoxidáveis da planta da Aperam Timóteo tem como fluxo típico: Fornos Elétricos a Arco (FEAs), Convertedor AOD, Forno Panela ou Estação de Tratamento e Lingotamento Contínuo. O custo do processo dos FEAs é baseado nos principais insumos (eletrodo, energia e refratário) e na carga metálica utilizada. Para os aços inoxidáveis austeníticos, a seleção adequada da carga por fonte de níquel e cromo é fator primordial para a competitividade do produto. Este trabalho tem como objetivo apresentar as etapas de desenvolvimento que permitiram a otimização do custo da carga dos aços inoxidáveis austeníticos através de análises, desenvolvimentos e implantação de modelo adequado para o estabelecimento da melhor carga que atendessem aos critérios técnicos com menor custo. O trabalho, realizado entre 2015 e 2019, permitiu a redução significativa do custo da carga utilizada através de soluções elaboradas internamente pela equipe técnica. O projeto atendeu à necessidade do aumento de competitividade dos aços inox austeníticos.

**Palavras-chave:** Fornos Elétricos a Arco; Aços inox; Otimização de carga; níquel.

## COST REDUCTION OF THE ELECTRIC ARC FURNACE PROCESS OF THE APERAM TIMOTEO PLANT DUE TO THE OPTIMIZATION OF THE METALLIC CHARGE OF AUSTENITIC STAINLESS STEELS

### Abstract

The production process of the stainless steels of the Aperam Timóteo plant has a typical flow: Electric Arc Furnaces (EAFs), AOD Converter, Ladle Furnace or Trimming Station and Continuous Casting. The cost of the EAF process is based on the main inputs (electrode, energy and refractory) and the metallic charge used for every specific product. For austenitic stainless steels, proper selection of the metallic charge per source of nickel and chrome is a key factor for the competitiveness of the product. This work aims to present the development stages for optimization of austenitic stainless steel charge cost through analysis, development and implementation of a suitable model to establish the best metallic charge that meets the process and equipment technical criteria with the lowest cost. The project performed reached a significant reduction of the cost of the charge used with only solutions elaborated internally by the Melt Shop technical team. The project met the goal to increase the competitiveness of austenitic stainless steels.

**Keywords:** Electric Arc Furnaces; Stainless steel; charge optimization; nickel.

- <sup>1</sup> *Engenheiro de Produção, Pós Graduado em Metalurgia, Engenheiro de Processo, Gerência de Operação dos Fornos Elétricos a Arco, Aperam South America, Timóteo, MG, Brasil.*
- <sup>2</sup> *Técnico de Metalurgia, Bacharel, Analista técnico, Controle de processo de aciaria, Aperam South America, Timóteo, MG, Brasil.*
- <sup>3</sup> *Engenheiro mecânico, Mestre em engenharia metalúrgica, Gerente, Controle de processo da aciaria, Aperam South America, Timóteo, MG, Brasil.*
- <sup>4</sup> *Técnico de Metalurgia, Engenheiro de Produção, Pós Graduado em Metalurgia, Engenheiro de Processo, Gerência de Controle de Processo, Aperam South America, Timóteo, MG, Brasil.*
- <sup>5</sup> *Engenheiro metalurgista, Gerente de Operação, Gerência de Operação dos Fornos Elétricos a Arco, Aperam South America, Timóteo, MG, Brasil.*
- <sup>6</sup> *Engenheiro Mecânico, Assistente Técnico, Gerência Executiva da Aciaria, Aperam South America, Timóteo, MG, Brasil.*
- <sup>7</sup> *Gestão da Produção Industrial, Pós Engenharia de suprimentos de Materiais, Supervisor TNU, Gerencia de Matérias Primas Aciaria Aperam South America, Timóteo, MG, Brasil.*
- <sup>8</sup> *Engenheiro Eletricista, Assistente Técnico, Controladoria, Aperam South America, Timóteo, MG, Brasil..*

## 1 INTRODUÇÃO

A planta da Aperam, situada em Timóteo, é uma unidade de produção de aços especiais que possui uma Aciaria que pode processar simultaneamente aços inoxidáveis, elétricos e carbono especiais. Há dois convertedores na Aciaria, o MRP (*Metal Refining Process* – Processo de refino de metal) e o AOD-L (*Argon Oxygen Decarburization* – Descarburação com argônio e oxigênio), que são carregados com ferro gusa, aço pré-elaborado provenientes dos FEAs, sucata e ferro ligas. Há duas fontes de pré-metal na planta de Timóteo, os dois Altos Fornos e os dois Fornos Elétricos a Arco. Para atender a produção de aços inoxidáveis, os FEAs são estratégicos, por utilizarem como matéria-prima sucatas ligadas com elementos químicos nobres (como Cr, Ni, Mo) para a elaboração desta linha de produtos. Nesse contexto, o custo do processo dos fornos elétricos se torna fator crítico para a competitividade dos aços inoxidáveis na Aciaria. Como se pode observar na figura 1, o fluxo de produção de aços inox austeníticos, tem como uma das principais rotas: FEAs, AOD, FP ou TS, Lingotamento Contínuo. Destaca-se a rota dos aços austeníticos por se tratar do produto da Aperam o qual este projeto teve foco.

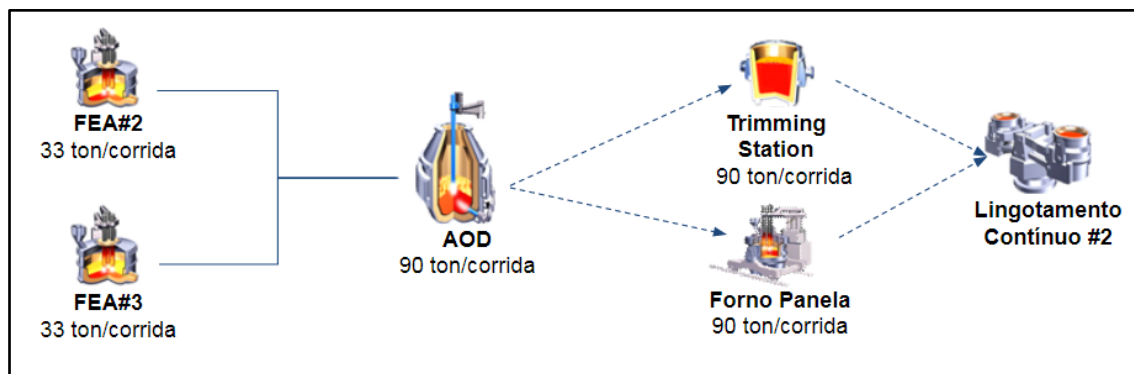


Figura 1 – Fluxo de produção dos aços inoxidáveis austeníticos na Aciaria

Os fornos elétricos a arco da Aperam - Timóteo são equipamentos dedicados predominantemente a produção dos aços inoxidáveis. São produzidos aços inoxidáveis austeníticos, ferríticos, martensíticos e duplex. O metal fundido vazado pelos fornos elétricos é o aço pré-elaborado com composição química adequada para o posterior refino primário nos convertedores. Conforme tabela 1, pode-se observar que trata-se de fornos elétricos de baixa capacidade se comparado com fornos utilizados para produção de aços carbono.

Tabela 1 – Características dos fornos elétricos a arco

Forno	FEA2	FEA3
Start-up / Revamp	2002	1959/2002
Fabricante	Danielli	Demag
Peso Corrida	33 t/aço líquido	33 t/aço líquido
Transformadores	30/33 MVA	20/24 MVA
Eletrodos: Diâmetro	16"	16"
Refratário: Abóbada	Painel Refrigerado	Painel Refrigerado
Parede Superior	Painel Refrigerado	Painel Refrigerado
Parede Inferior/Fundo	Tijolo MgO Mix	Tijolo MgO Mix

Este trabalho tem como foco os aços inox austeníticos. Os aços inoxidáveis austeníticos da família 304 se destacam pela elevada resistência à corrosão e mecânica. A composição Ferro-Cromo-Níquel proporciona o desempenho excepcional desses aços em ambientes externos, de alta agressividade, e resulta em diferentes produtos sob medida para as mais variadas aplicações e finalidades. Enquanto a adição de níquel melhora as propriedades de conformação mecânica desses aços inoxidáveis, o cromo aumenta sua resistência à corrosão em ambientes agressivos. Na tabela abaixo se pode observar a composição química típica dos aços AISI 304 produzidos pela Aperam Timóteo. Como mencionado, as fontes de níquel e cromo, selecionadas no padrão da carga utilizado no processo, tem alto impacto no custo do produto.

Tabela 2 – Composição química típica do aço AISI 304 fabricado pela Aperam 1 [4]

Especificação do aço	Cr	Ni	Mn	C	S
AISI 304/1.4301	17,4% min	8% min.	2% max.	0,07 máx.	0,015% máx.

Para a produção dos aços inox da serie 304 na Aciaria da Aperam Timóteo, utiliza-se predominantemente a rota de FEAs e AOD, como mencionado anteriormente. E como fonte de carga metálica utiliza-se coque, ferro ligas e sucata. A definição do padrão de sucata normalmente é realizada considerando o estoque disponível dos diversos grupos e o custo de cada grupo. Normalmente todas as plantas têm seu próprio programa de otimização de carga. A otimização de carga tem como objetivo a melhor distribuição de carga nos cestos com o menor custo atendendo aos requisitos técnicos do processo e equipamentos, como evitar quebra de eletrodos e evitar danos aos refratários e painéis refrigerados durante carregamento.

O custo de produção do AISI 304 na Aciaria tem grande participação no custo global do produto na Aperam Timoteo. Conforme se pode observar na figura 02, é imprescindível a redução do custo na Aciaria para o aumento da competitividade do produto no negócio da Aperam.

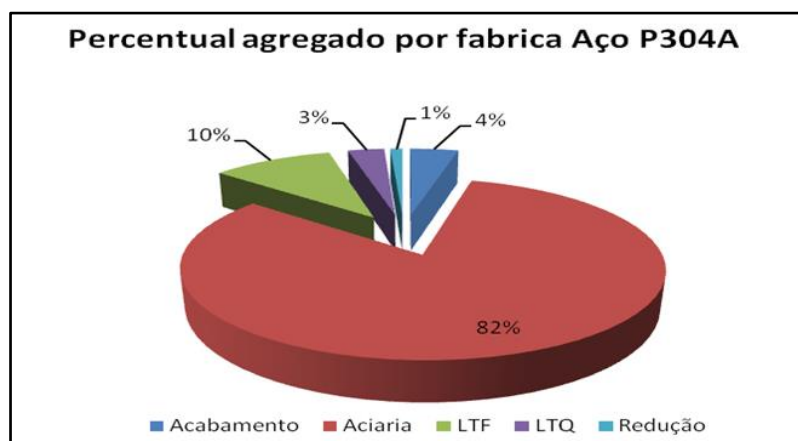


Figura 02 – Participação das fábricas no custo global do P304A

O propósito do presente trabalho é mostrar a metodologia adotada para reduzir o custo da carga do aço AISI 304 produzido na Aciaria da Aperam Timoteo, reduzindo o custo e minimizando os distúrbios na produção da Aciaria. Os distúrbios tratados

foram as perdas de performance na linha produtiva devido a ocorrências por corridas fora da faixa de composição química estabelecida no processo.

A filosofia adotada para o projeto foi: otimizar a carga metálica na Aciaria com foco no menor custo de acordo com o mix de matéria prima disponível em estoque através de um modelo matemático do balanço de carga.

## 2 DESENVOLVIMENTO

Para atingir o objetivo do projeto, foram tomadas diversas ações que permitiram evoluir até a elaboração do modelo de carga. Cada ação tomada contribuiu para a simplificação e padronização dos processos. As principais ações estão descritas com maiores detalhes abaixo.

### 2.1 Adequação dos procedimentos de confecção de carga

Na Aciaria da Aperam é utilizado carregamento três cestos por corrida devido à baixa densidade da sucata ligada. Por isso foi padronizado a confecção de carga, buscando manter o mesmo perfil da sucata durante todo mês e não impactar na produtividade dos FEA's, evitando assim "engaiolamento" ou necessidade de fazer um quarto carregamento. Com a padronização conseguimos substituir parte da sucata baixa liga de alta densidade por sucata ligada (ao Cromo e Níquel) de baixa densidade sem impactar no número de cestos carregados. Na Tabela 3 está descrito como foi estabelecido o padrão de distribuição de carga após padronização. A sucata baixa liga adicionada no forno elétrico para diluir os contaminantes e para aumentar a densidade média das cargas. Mas com o projeto foi possível reduzir a massa de sucata baixa liga utilizada mantendo o padrão de produtividade e reduzindo os distúrbios por ocorrências de corridas com composição química fora do padrão. Pode-se observar na figura 03, que a perda de tempo por "engaiolamento" foi reduzida em aproximadamente 48%.

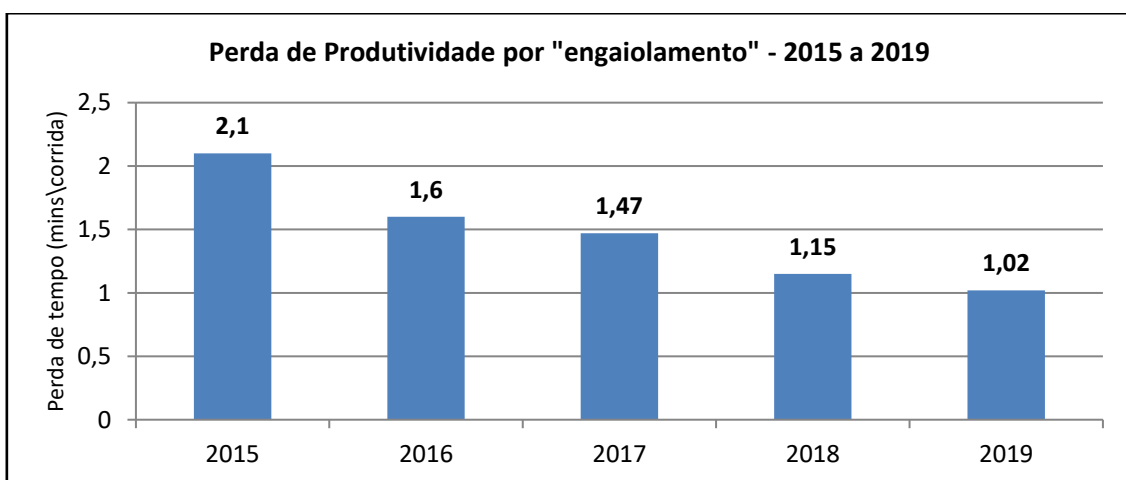


Figura 3 – Esquema da composição da sucata no cesto



Tabela 3 – Padrão de confecção do 1º cesto nos aços 304

1º CESTO:		
Posição	Perfil	Premissas - Peso(Kg)
1	Carburante	Peso de carburante será solicitado pela equipes dos FEAs's, quando solicitado.
2	Sucata Leve ou Sucata Recuperada <= 6mm	Para a sucata Leve peso máximo será de 1.000kg.
3	Sucata ou Liga Pesada	Peso máximo será de 10.000kg, sendo no máximo 3.000Kg de sucata perfil bode.
4	Sucata Intermediária	Peso máximo será de 2000kg.
5	Sucata Leve	Completar o cestão não ultrapassando a borda do mesmo.

## 2.2 Alterações no programa de fusão

Com a padronização da carga houve a necessidade de adequar o programa de potência para 3 cestos carregados por corrida. Também foi alterado o programa de fusão dos FEAs, utilizando como referência a energia específica pelo peso carregado de sucata carregada em cada cesta. Esta alteração melhorou a assertividade do consumo de energia e também manteve os fornos em condição operacional mais favorável para evitar o “engaiolamento” (sucata acima da borda do forno que precisa ser amassada antes de carregar o forno). A melhora do processo permitiu que a energia consumida mantivesse o forno mais limpo (menor sobra de sucata e escória aderida nas paredes) e com isso menor interferência no carregamento reduzindo o impacto na produtividade.

APERAM											
PARÂMETROS PARA PROGRAMA DE POTÊNCIA - FEAs											
Data Referência: ___/___/___ TAP30 Equipamento:FEA-3 Processo: F.F 2 carregamentos NºAND: ___/___											
Teste											
Perfil de fusão 1º Carregamento											
FASES	FASE1	FASE2	FASE3	FASE4	FASE5	FASE6	FASE7	FASE8	FASE9	FASE10	Total
Posição TAP	25	30	23	28	27	-	-	-	-	-	-
Corra Corrente	6	4	4	4	4	-	-	-	-	-	-
Tempo esgodo	120	450	450	240	300	0	0	0	0	0	1620
Tempo (min)	2	3	3	4	5	0	0	0	0	0	27
MW por TAP	13,27	16,92	16,26	15,53	14,88	-	-	-	-	-	-
Consumo MW/Hora	0,44	2,26	2,17	1,04	1,24	0	0	0	0	0	7,14
Perfil de fusão 2º Carregamento											
FASES	FASE1	FASE2	FASE3	FASE4	FASE5	FASE6	FASE7	FASE8	FASE9	FASE10	Total
Posição TAP	25	30	23	28	27	27	-	-	-	-	-
Corra Corrente	6	4	5	5	4	5	-	-	-	-	-
Tempo esgodo	120	150	150	150	300	240	0	0	0	0	1800
Tempo (min)	2	3	3	3	5	4	0	0	0	0	20
MW por TAP	13,27	16,92	16,16	15,43	14,88	14,79	-	-	-	-	-
Consumo MW/Hora	0,44	0,85	0,81	0,77	1,24	0,99	0	0	0	0	5,09
Perfil de fusão 3º Carregamento											
FASES	FASE1	FASE2	FASE3	FASE4	FASE5	FASE6	FASE7	FASE8	FASE9	FASE10	Total
Posição TAP	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Corra Corrente	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Tempo esgodo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tempo (min)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MW por TAP	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Consumo MW/Hora	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
Perfil de fusão Oxidação/Refino											
FASES	FASE1	FASE2	FASE3	FASE4	FASE5	FASE6	FASE7	FASE8	FASE9	FASE10	Total
Posição TAP	27	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Corra Corrente	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Tempo esgodo	840	0	0	0	0	0	0	0	0	0	840
Tempo (min)	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	14
MW por TAP	13,27	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Consumo MW/Hora	3,10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3,10
Consumo:											
										TFL	61
										Consumo de energia MW	15,33

Figura 4 – Modelo de programa de potência FEAs

## 2.3 Melhorias da qualidade da sucata e ligas

Foi padronizado e separadas as pilhas/baias de sucata por perfil para facilitar confecção de carga. Por consequência foi reduzida a mistura entre sucata que

provocava contaminações de alguns residuais indesejados durante o processo. Com a redução do nível de residual de alguns elementos químicos conseguimos substituir parte da sucata baixa liga (aços carbono e elétricos) com baixo índice de residuais indesejados por sucata de inox, mesmo esta tendo mais residuais indesejados na sua composição. Na Figura 5 está evidenciada a distribuição de sucata realizada no Pátio para melhorar a segregação dos diversos grupos de sucata utilizados nos FEAs.



Figura 5 – Foto esquemática do pátio de metálicos com separação das pilhas

## 2.4 Estudo da capacidade do processo em relação aos contaminantes dos aços 304

Foi realizado o estudo estatístico para verificar os elementos residuais que mais impactam o processo, utilizado a carta de controle para verificar as ocorrências de desvio médio e de amplitude. Realizado também o estudo de capacidade de processo de cada elemento residual para saber se o processo está na condição normal. Adicionalmente foi elaborada uma equação através de regressão para verificar a correlação das ferro-ligas com os elementos residuais.

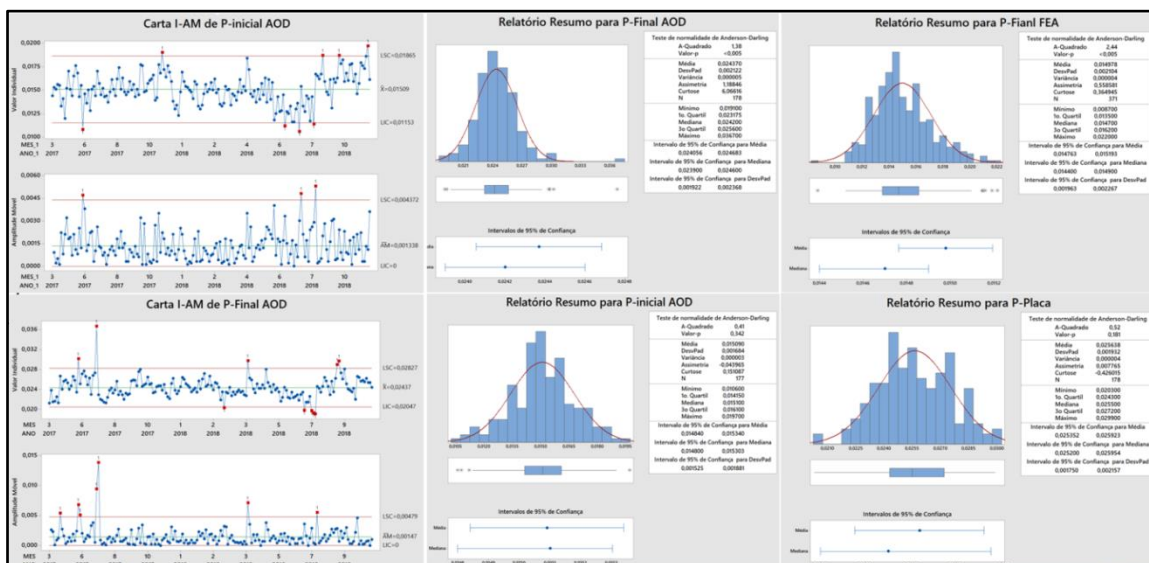


Figura 6 – Estudo de capacidade do processo

Regressão dos Melhores Subconjuntos: P\_1 versus FeNi; ... ZAD\_CORRI

Resposta é P\_1

Vars	R2	R2 (aj)	R2 (pred)	Cp de Mallows	S	F e N i	C a i	C a i	F e M o	F e M n	F e S i	F i o r i t a	N i e	C u	F e c r	P	P E S C O R R I	P E S C O R R I
1	12,9	11,2	7,5	12,9	0,0015734							X						
1	9,8	8,0	3,3	15,1	0,0016011											X		
2	20,2	17,0	13,6	9,7	0,0015207							X				X		
2	17,7	14,4	5,9	11,5	0,0015444		X											
3	24,1	19,5	11,2	8,9	0,0014977	X						X				X		
3	23,1	18,4	11,0	9,7	0,0015083		X					X				X		
4	28,4	22,4	11,1	7,9	0,0014701	X	X					X				X		
4	27,1	21,1	2,8	8,8	0,0014832	X		X				X				X		
5	33,5	26,4	16,5	6,3	0,0014317	X	X	X				X				X		
5	31,8	24,6	5,0	7,4	0,0014496	X		X	X			X				X		
6	35,8	27,4	9,4	6,6	0,0014222	X	X	X				X				X		
6	35,6	27,1	16,1	6,8	0,0014247	X	X	X				X		X		X		
7	38,5	28,9	17,6	6,7	0,0014076	X	X	X	X			X				X		
7	37,9	28,3	9,8	7,1	0,0014137	X	X	X	X			X		X		X		
8	41,1	30,4	11,9	6,8	0,0013924	X	X	X	X	X				X		X		
8	40,9	30,2	12,3	7,0	0,0013946	X	X	X	X	X	X					X		
9	44,3	32,7	8,3	6,6	0,0013695	X	X	X	X	X	X	X				X		
9	44,0	32,3	7,0	6,8	0,0013756	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X		
10	46,3	33,6	1,3	7,1	0,0013605	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X		
10	44,9	31,8	4,6	8,2	0,0013786	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X		X
11	46,4	32,1	0,0	9,1	0,0013758	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X
11	46,4	32,0	0,0	9,1	0,0013764	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X
12	46,5	30,5	0,0	11,0	0,0013921	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X
12	46,5	30,4	*	11,0	0,0013925	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
13	46,5	28,7	*	13,0	0,0014094	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
13	46,5	28,7	0,0	13,0	0,0014098	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
14	46,5	26,8	*	15,0	0,0014278	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

Figura 7 – Estudo de regressão múltipla dos dados

## 2.5 Desenvolver modelo matemático do balanço da carga com foco em custo

Devido a grande variedade de sucatas e ligas utilizadas na Aperam foi desenvolvido modelo matemático considerando o balanço de massa e de custo das cargas metálicas disponíveis em estoque na Aciaria. Foram inseridos os residuais indesejados de cada elemento químico para evitar corridas fora de faixa, analisada a capacidade de produção de cada equipamento para fechar o balanço de massa, e verificada a composição química completa de cada sucata e liga considerando o custo, rendimento metálico e rendimento do processo. A partir da análise de todos os parâmetros citados o modelo nos entrega a melhor carga capaz de produzir na Aciaria com o estoque disponível. Outro ponto importante para o modelamento foi considerar os perfis de sucata e os limites técnicos do processo e equipamentos envolvidos.

A princípio o modelo foi estabelecido, utilizando plataforma em Excel, para os aços 304 nas duas rotas possíveis na planta da Aperam – Timóteo. Há um trabalho em andamento para a inclusão do modelo no nível 2 como a segunda etapa. E está em avaliação a inclusão de cálculo dinâmico integrando a carga disponível (através de leitura do estoque em SAP), preço dinâmico conforme custo real dos materiais (interno e externo) e também com análise dinâmica de capacidade de processo conforme entradas de materiais, parâmetros de processo e composição química final.



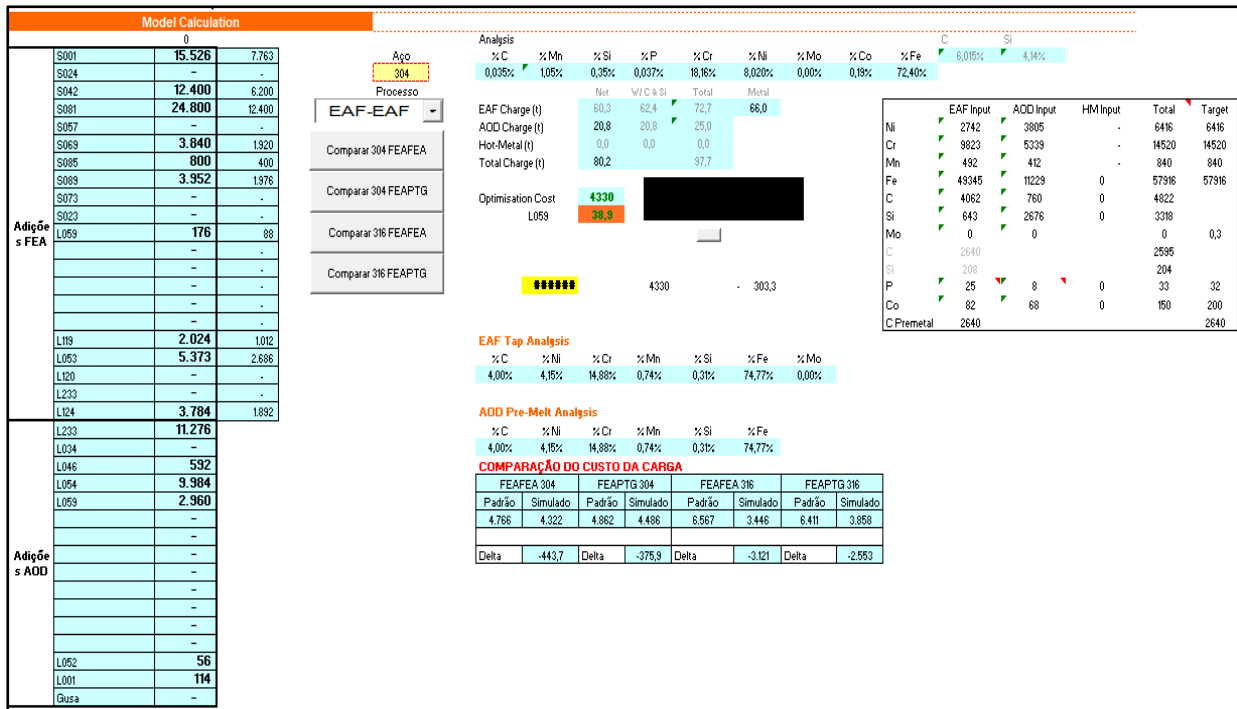


Figura 8 – Cálculo da carga otimizada pelo modelo

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O projeto, conforme foi descrito neste trabalho, teve como objetivo o aumento do consumo de sucata ligada (com Cr e Ni) na produção do aço inox austeníticos. A figura 12 evidencia o resultado expressivo atingido com a implantação das etapas descritas neste artigo. O modelamento da carga metálica, através dos métodos descritos anteriormente, gerou uma economia de R\$ 70,0 por tonelada de aço inox austenítico produzida na Aciaria. Houve um aumento de 20% no consumo de sucata ligada, comparando o resultado de 2019 com 2014 (que foi o ano anterior ao início do projeto).

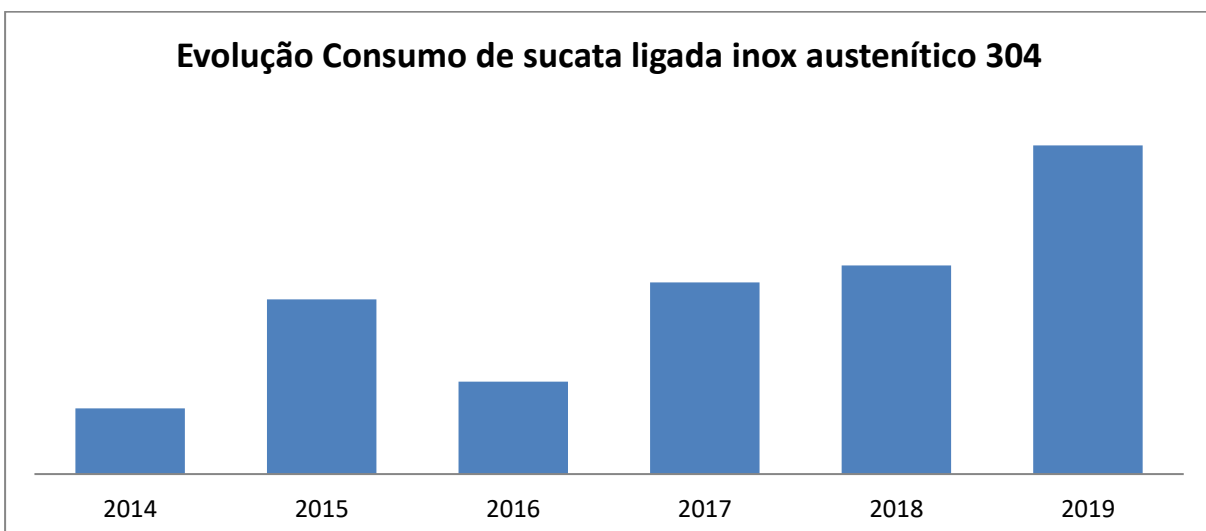


Figura 9 – Gráfico da evolução do consumo de sucata ligada ao Cr e Ni utilizada na carga dos aços inox austeníticos da Aperam Timóteo

Além dos aços austeníticos, todas as etapas do desenvolvimento também foram aplicadas no estudo dos aços inox duplex. Inicialmente não foi o foco deste trabalho, mas foram aplicadas as mesmas tratativas obtendo uma redução de custo de aproximadamente R\$269 reais por tonelada considerando somente o incremento de sucata ligada (do próprio aço) na carga do mesmo. Anteriormente havia restrições relativas à qualidade do produto que foram detalhadamente analisadas e modeladas, permitindo a redução do custo no processo do aço inox duplex na Aperam Timoteo.

#### 4 CONCLUSÃO

A filosofia adotada “Otimizar a carga metálica Aciaria com menor custo de acordo com o volume disponível de matéria prima em estoque através de um modelo matemático do balanço de carga” foi eficiente e os objetivos do projeto foram alcançados.

As análises realizadas, através de acompanhamentos em campo e estudos técnicos permitiram uma melhor compreensão dos limites técnicos do processo e equipamentos envolvidos. A partir do entendimento das principais causas que limitavam o aumento do consumo de sucata ligada ao cromo e níquel, foi possível obter resultado expressivo da melhora de performance aplicando medidas perenes e padronizando práticas operacionais.

Na Aciaria da Aperam, planta de Timóteo, é utilizado carregamento de três cestos por corrida devido a baixa densidade da sucata ligada, em função disso foi padronizado a confecção de carga, buscando manter o mesmo perfil da sucata durante todo mês e não impactar na produtividade dos FEAs. Com a padronização conseguimos substituir parte da sucata baixa liga de alta densidade por sucata ligada de baixa densidade sem impactar no número de cestos carregados por corrida. A sucata baixa liga é utilizada para diluir os contaminantes e para aumentar a densidade média das cargas. Além de o projeto ter reduzido o custo da carga, ele ainda permitiu manter a mesma produtividade utilizando sucata com densidade inferior através da análise detalhada de parâmetros e implantação de ações que permitiram a formação do mix adequado de carga metálica no carregamento dos fornos.

E o principal objetivo do projeto foi atingido, foi aumentado significativamente o consumo de sucata ligada nos fornos elétricos, reduzindo o custo da carga (dos aços austeníticos e duplex), sem impactar a qualidade dos produtos.

#### REFERÊNCIAS

- 1 M. Kirschen, H. Pfeifer, F.-J. Wahlers. Mass and energy balances of stainless steel EAF. 7th European Electric Steelmaking Conference. Veneza. 2002. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/276409173\\_Mass\\_and\\_energy\\_balances\\_of\\_stainless\\_steel\\_EAF](https://www.researchgate.net/publication/276409173_Mass_and_energy_balances_of_stainless_steel_EAF)
- 2 Sandberg, Erik. Energy and Scrap Optimisation of Electric Arc Furnaces by Statistical Analysis of Process. Tese de Mestrado. Luleå University of Technology. 2005.

- 3 Yasser Emad Moustafa Ghobara. Modeling, Optimization and Estimation in Electric Arc Furnace (EAF) Operation. Tese de Mestrado. McMaster University. 2013.
- 4 Caderno de Produtos da Aperam. Disponível em : <http://brasil.aperam.com/wp-content/uploads/biblioteca/A%C3%A7os%20inoxid%C3%A1veis%20Aperam%20-%20resist%C3%Aancia%20garantida,%20testada%20e%20comprovada.pdf>.