



Tema: Aciaria Elétrica

REDUÇÃO DE OCORRÊNCIAS DE MACROINCLUSÃO E MÁ LINGOTABILIDADE PARA AÇOS DE CONSTRUÇÃO MECÂNICA*

Thiago Augusto Ávila¹

Rui Loureiro Badaraco¹

Ivan Luiz de Matos Scripinic²

Paulo Carvalho Fernandes²

Luiz Augusto de Oliveira Rodrigues³

Resumo

A limpeza de aços e a diminuição de problemas de lingotabilidade em aciarias tem sido alvo constante de esforços de engenheiros na siderúrgica. O bom entendimento dos efeitos do processo e as suas respectivas particularidades garantem a redução de ocorrências de inclusões e má lingotabilidade. Dentre os principais aços de construção mecânica com maior ocorrência de problemas de inclusões e lingotabilidade estão os aços “Baixo Si” e aços com faixa de S e acalmados ao Al e Si/Mn. Entre os parâmetros de análise, a ordem de adição de ligas, definição de temperatura de lingotamento e a estabilidade térmica e química, são os de maior influência na quantidade de inclusões e problemas de lingotabilidade. Para aços baixo Si, a pré-desoxidação com Al, auxiliada por maiores temperaturas de lingotamento, confere inclusões líquidas no início do processo promovendo a maior remoção destas. Da mesma forma, aços com S e Al são beneficiados pelo aumento da temperatura de lingotamento, mas fortemente afetados pela estratificação térmica do aço na panela, quando é elevado o teor de S e Al nestes. Sendo assim, o tempo de espera e o estado térmico da panela e distribuidor passam a ser um fator importante para redução da estratificação térmica bem como a redução de problemas com macroinclusão e má lingotabilidade.

Palavras-chave: Macroinclusão; Lingotabilidade; 6-sigma.

REDUCTION OF MACROINCLUSIONS OCCURRENCES AND CASTABILITY PROBLEMS TO SBQ STEELS

Abstract

The cleanliness of steels and reducing problems of castability in steel mills have been subject to constant efforts of steelmakers. Good understanding of the process effects and their respective peculiarities ensures reduction in the occurrence of inclusions and castability problems. The most critical SBQ steels with higher incidence of inclusions and castability problems are steels with low Si and Al killed steels with S content. Among the analysis parameters, the order of alloys addition, casting temperature setting and thermal and chemical stability are the most influential in the amount of inclusions and castability problems. For low Si steels, pre - deoxidation with Al, aided by higher temperatures, confer liquid inclusions early in the process promoting greater removal of these. Likewise, steels with Al and S are benefited by the higher temperature but remarkably sensitive to problems of thermal stratification, and this sensibility increase with the S and Al contents. Thus, the waiting time and the thermal state of the ladle and tundish become an important factor in reducing thermal stratification and problems with inclusions and castability.

Keywords: Inclusions; Castability; 6-sigma.

¹ *Mestre em Engenharia Metalúrgica, Gerdau Aços Especiais, Pindamonhangaba, SP, Brasil.*

² *Doutor em Engenharia Metalúrgica, Gerdau Aços Especiais, Pindamonhangaba, SP, Brasil.*

³ *Graduando em Engenharia de Materiais, Gerdau Aços Especiais, Pindamonhangaba, SP, Brasil.*

* *Contribuição técnica ao 45º Seminário de Aciaria – Internacional, 25 a 28 de maio de 2014, Porto Alegre, RS, Brasil.*



1 INTRODUÇÃO

Com os avanços na economia causados pela cadeia automotiva, uma forte concorrência é estabelecida entre as montadoras na tentativa de se estabelecerem no mercado via avanço da qualidade e tecnologia de seus produtos [1]. Considerando que um veículo pode ter até 55,7% do seu peso em aço, a pressão por melhoria do produto é superior para as siderúrgicas a fim de atender a demanda de qualidade por parte das montadoras. A exigência por desempenho e resistência é controlada atualmente por rigorosas normas e especificações em diferentes regiões e montadoras, que visam desde aumento de segurança, resistência à fadiga e impacto das peças e partes de um veículo. Com isso, as siderúrgicas buscam a melhoria de seus processos para reduzir a rejeição e aumento de qualidade dos seus produtos. Neste sentido, o objetivo deste trabalho é identificar os parâmetros de processo da aciaria que influenciam na geração de macroinclusão no aço pela metodologia seis sigma.

Inclusões são elementos não metálicos que podem ter origem devido ao processamento do aço, como na desoxidação, por exemplo, sendo nestes casos denominadas inclusões endógenas, ou por fatores externos de origem em insumos utilizados para produção do aço como refratários ou pó-fluxantes sendo neste caso classificadas como exógenas [2]. As inclusões ainda podem ser classificadas pela sua morfologia e composição química, produzindo diferentes efeitos no aço dependendo de sua natureza. Macroinclusões de Alumina, CA (cálcio aluminatos) $MO.X2Y3$ (espinélios) são macroinclusões rígidas e quebradiças reduzindo a resistência à fadiga do aço [3]. Já macroinclusões do tipo silicatos, e sulfetos são macroinclusões macias de baixo ponto de fusão, menos danosas para resistência a fadiga, mas podem ainda gerar outros defeitos como estrias no caso de sulfetos [3]. Um dos principais campos de estudo em desenvolvimento de aços *clean steel* está no controle do número e morfologia das inclusões. Sendo assim, entender o tipo de inclusão presente e as variáveis do processo que a geram a fim de estabelecer um controle e parâmetros dos mesmos para atingir a qualidade desejada é o principal desafio para um metalurgista.

A Gerdau Aços Especiais Pindamonhangaba é a maior empresa de aços especiais da América latina, com uma capacidade de 600.000 toneladas ano, produzindo desde produtos laminados, trefilados, forjados e cilindros de laminação. Conta atualmente com uma Aciaria, com duas rotas de produção, uma de lingotamento contínuo e outra de lingotamento convencional. Uma estação de refino primário contemplando dois Fornos Elétricos a Arco (FEA) de 100 tons e uma de refino secundário com dois Fornos Painéis; um VD para produção de SBQ e outro para produção de lingotes de 150 tons a vácuo para produtos forjados.

2 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é reduzir a rejeição de aço causada por motivos de inclusão no aço, conferindo menor custo de produção, redução de retrabalho e movimentação na área.

3 METODOLOGIA

A metodologia adotada neste trabalho foi o seis sigma. A escolha desta metodologia visa mostrar o tamanho do problema auxiliando no estabelecimento de prioridades

* Contribuição técnica ao 45º Seminário de Aciaria – Internacional, 25 a 28 de maio de 2014, Porto Alegre, RS, Brasil.



de forma a assegurar o atendimento da meta estabelecida. A utilização das ferramentas de qualidade como análises de capacidade, cartas de controle, regressão dentre outras foram extensivamente aplicadas no intuito de garantir maior confiabilidade do estudo. Sendo assim, na primeira etapa de planejamento do ciclo PDCA, os dados foram levantados para desdobramento do problema onde os mesmos foram estratificados em quatro vertentes: Rota de fabricação; Motivo de sucateamento; Família de aço; Liga de aço. Na sequência um extenso plano de ação foi elaborado e sistematicamente acompanhado com validação e check dos resultados posteriores.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Figura 1 pode-se observar que a rota do lingotamento contínuo (LC) é a maior responsável pelo sucateamento, em comparação à rota de lingotamento convencional (LCV).

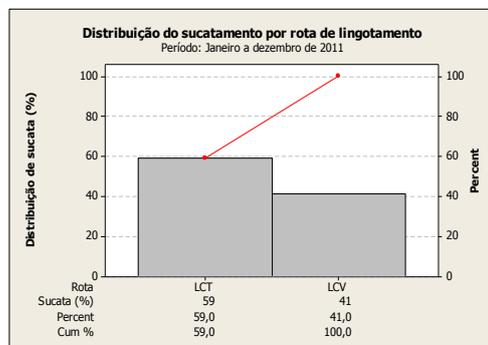


Figura 1. Comparação da quantidade sucata por rota.

O motivo de sucateamento apresentou praticamente a mesma proporção durante o ano, no entanto o sucateamento médio na rota LC é maior em má lingotabilidade do que em macroinclusão. Este comportamento é apresentado na Figura 2. Notam-se também pontos discrepantes com sucateamento elevado com cerca de até 90% da corrida, característicos de causas especiais na rota LC. Estas causas têm tratamento à parte e não serão avaliadas neste trabalho. Contudo na avaliação das estatísticas apresentadas neste trabalho, estas causas especiais são descartadas.

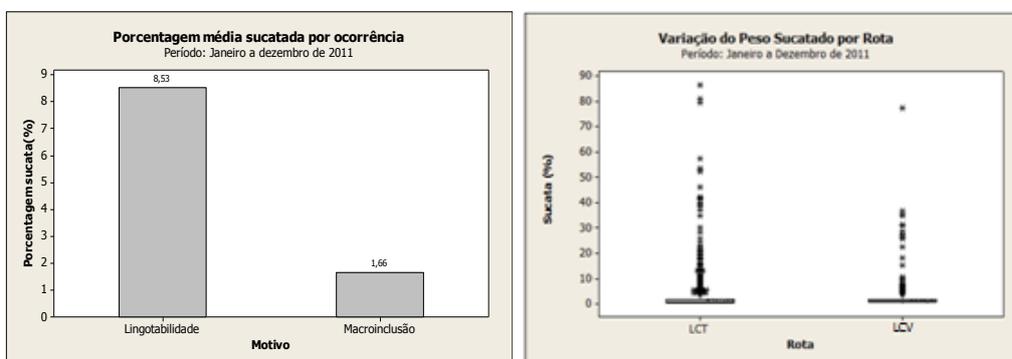


Figura 2. Comparação do motivo de sucateamento e comparação de sucateamento por rota.

A estratificação de sucateamento por grupo de aço mostrou que as famílias que mais sucata são as mais produzidas indicando, portanto um problema generalizado. Contudo, a estratificação por liga de aço por rota mostrou que existem

* Contribuição técnica ao 45º Seminário de Aciaria – Internacional, 25 a 28 de maio de 2014, Porto Alegre, RS, Brasil.



ligas que apresentam índice elevado de rejeição apesar de terem produção reduzida. Os dados são apresentados na figura 3, onde na Figura (a), o termo “produção (%)” representa a quantidade produzida por família em relação à produção total de aço no ano de 2011, e “Cum” representa a porcentagem acumulada de produção por família. Na Figura (b), o termo “sucata (%)” representa a quantidade sucata por tipo de aço em relação à produção total de aços no ano de 2011 e o termo “Cum” representa a porcentagem acumulada de sucateamento por tipo de aço.

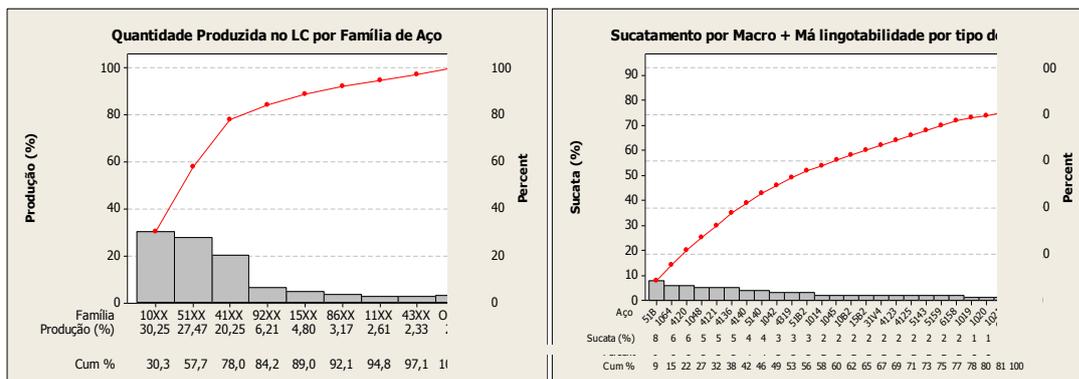


Figura 3. (a) Comparação do sucateamento por família de aço; (b) Comparação do sucateamento por tipo de aço.

A árvore de sucateamento foi montada para facilitar o entendimento e identificar a priorização. Porém quando se encontra o nível de estratificação mais baixo, liga de aço, observa-se uma pulverização do sucateamento no grande número de ligas produzidas, mostrando que o problema é generalizado, porém, atenção especial deve ser dada ao LC devido à sensibilidade maior a esta rota e a presença de causas especiais que resultam, em alguns casos, na perda de corridas inteiras, como visto anteriormente. Sendo assim a identificação de grupos de aço nesta rota é essencial para analisar se existem causas de mesma natureza para estes grupos de aço.

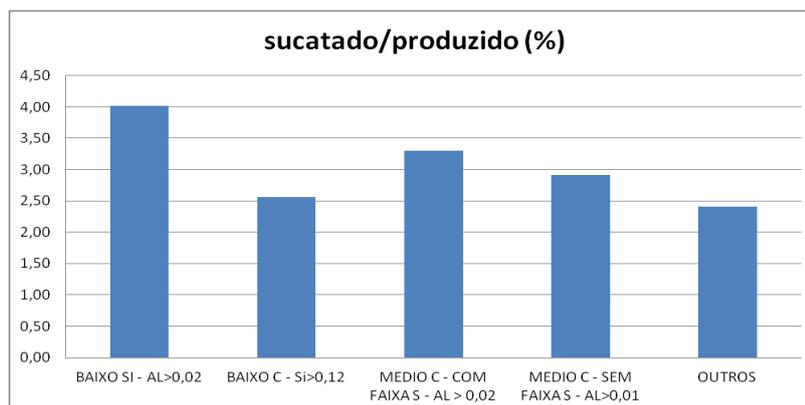


Figura 4. Comparação do sucateamento por grupo de aço dividido pela produção.

Nota-se que os aços baixo silício são os maiores responsáveis pelo sucateamento, seguido pelos aços com faixa de S e Al. A maior parte das ocorrências de grandes sucateamentos estão ligados a estes aços devendo, portanto ser dedicada aos mesmos uma atenção especial. Os aços da família “baixo Si e Al>0,02” apresentam em média os maiores sucateamentos sendo uma liga em especial com 51% de sucateamento em relação a sua produção. Para estes aços, alterou-se a ordem de

* Contribuição técnica ao 45º Seminário de Aciaria – Internacional, 25 a 28 de maio de 2014, Porto Alegre, RS, Brasil.



desoxidação. O alumínio, anteriormente adicionado apenas no final da corrida, teve parte adicionada no início. Esta ação visa à geração de grandes *clusters*, que têm maior facilidade de flotação, devido ao seu maior empuxo, além de também gerar um maior tempo para a flotação de macroinclusões, visto que estes *clusters* são formados já no início do processo [4]. A adição de parte de alumínio visa um teor de 10 a 20% de Al nas inclusões com Mn e Si [4]. Adicionalmente objetivou-se Si próximo ao máximo permitido da faixa (0,009%). Após estas ações, o sucateamento foi reduzido para 1%.

Para etapa de levantamento de causas foi construído um mapa de processo, a fim de identificar os itens de controle e de verificação dos possíveis parâmetros que influenciam na geração de inclusão. Este levantamento está indicado na figura 5. De posse do mapa foram eleitos os itens de verificação e controle mais críticos para avaliação de seu efeito na geração de inclusão 1.

g1 - Quantidade de escória remanescente g2 - Temperatura de chegada FP g3 - Composição química aço chegada FP	g1 - Delta T de liberação FP g2 - Ajuste de Si e C g3 - Quantidade de escória g4 - Viscosidade da escória g5 - Composição Química da escória g6 - recidivação do aço	g1 - Temperatura do aço g2 - Teor de oxigênio ativo do aço g3 - Teor de N2	g1 - Delta T de lingotamento g2 - Teor de C, Al, Ca e S g3 - Recidivação do aço	g1 - lingotabilidade e formação de clogging g2 - Delta T lingotamento g3 - Teor de oxigênio total g4 - Tarugo com baixo índice de inclusão
Remover escória passante do FEA	Refinar e acertar composição química e temperatura do aço	Desgasificar o aço	Injetar fios e flotar inclusões	Lingotar aço na rota LC
XT (C) - Remoção e controle visual da quantidade de escória X2 (R) - Temperatura de vazamento FEA X2_2 (R) - Tempo de processo remoção X3 (C) - Vazão de gás na rinsagem e homogeneização	X1(C) - Tempo de tratamento X'L2' (R) - Tap e tempo de forno ligado (Power on) X'L3' (C) - Vazão gás na rinsagem X 2 (C) - Quantidade de Si e C X3 (R) - Pick up de C dos eletrodos, quebra de eletrodo X3' (C) - Adição de fundentes X4' (C) - Receita de escória (quant. tipos de escória) X5 (C) - Teor de MgO X5' (R) - Basicidade, Teor de FeO e MnO X5_2 (R) - Precisão do Laboratório na análise X6 (R) - Reprocessamento/reaquecimento da corrida	X1(R) - Tempo de processo VD X1' _2 (C) - Vazão de Rinsagem X2' (C) - Pressão de vácuo X2'_1(C) - Tempo de vacuo abaixo de 1 tor X2_2(C) - Exposição do aço/agitação X3 (C) - Tipo de gás X3_2(C) - Volume de gás	X1' (C) - Tempo de injeção X1' (R) - Transferencia panela X2' (C) - Quantidade injetada X2_3' (C) - Velocidade de injeção X2_4' (C) - Penetração do fio no banho líquido X2_5' (C) - Tempo entre injeções de fios X3' (C) - Abertura de olho e exposição do aço X3_2(C) - Quantidade de pó de cobertura panela X3'_3(C) - Tempo de flotação X3'_4(C) - Vazão de rinsagem	X1' (C) - Tempo de panela na torre sem vaziar X1'_2(C) - Vazão de argonio e contrapessão no tubo longo X2' (C) - Velocidade de lingotamento X2_1(C) - N° de veios operantes X2'_2(C) - Tempo de aquecimento distribuidor X3 (C) - Volume de aço no distribuidor X3'_2(C) - Centralização do tubo longo X3'_3(C) - Tempo secagem do distribuidor X3_4(C) - Mobiliário do distribuidor X3'_5(C) - Cobertura do distribuidor e molde X3'_6(C) - Quantidade de pó fluxante X3'_7(R) - Erosão do refratário X1' (C) - Tipo de revestimento do distribuidor X4' (C) - Modo de adição pó fluxante X4'_2(C) - Viscosidade do pó fluxante

Figura 5. Mapa de processo parcial.

Nenhuma das variáveis da etapa de carregamento e fusão foi identificada como causa no momento atual. A análise mostrou que o processo ainda não é sensível a estes parâmetros no período analisado, portanto atentaremos ao compromisso de mostrar as mais relevantes. Para a etapa de análise de causas, utilizou-se de ferramentas, como análise de capacidade, carta de controle, gráficos de Pareto, testes de hipótese, análise de regressão dentre outros, vide exemplo da análise de temperatura da panela, na Figura 6.

* Contribuição técnica ao 45º Seminário de Aciaria – Internacional, 25 a 28 de maio de 2014, Porto Alegre, RS, Brasil.

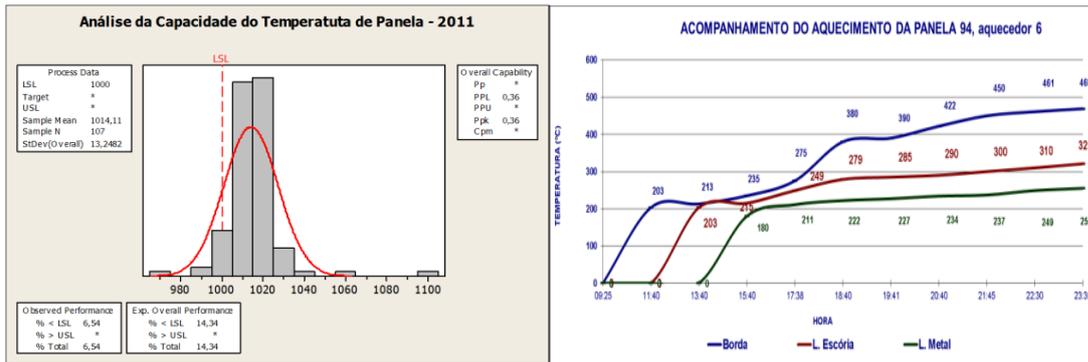


Figura 6. Análise de temperatura da panela no processo.

Observa-se que 6,64% dos dados estão abaixo da especificação de temperatura de face quente da panela, sugerindo uma das causas do problema, já que uma grande proporção das corridas sucateadas apresentou queda de temperatura. Contudo, esta percentagem não justifica o total de sucateamento, indicando a existência de mais causas associadas. Desta forma uma extensa investigação foi feita em todos os parâmetros que afetam esta variável. Sabe-se que a temperatura medida não indica necessariamente o encharque da panela, podendo, mesmo sob temperaturas mais altas, a panela retirar calor do aço, já que a face fria ainda não está aquecida e tomará calor para elevar sua temperatura até a condição de encharque. Sendo assim foi monitorada a temperatura da carcaça em três regiões da panela e também no interior da panela para identificar o momento que a temperatura se estabiliza destacada pelo surgimento de patamar no gráfico e indicando a condição de encharque térmico, conforme mostra a Figura 6.

Adicionalmente, na investigação de causas das ocorrências de grandes sucateamentos foi identificado que 76% das ocorrências estavam ligadas a tempos de espera da panela para lingotar superiores a 15 minutos e que estas ocorrências de sucateamento aumentaram com o aumento das ocorrências de tempo de espera maiores que 15 minutos. Esta afirmação se comprova estatisticamente com o teste de variância, “ANOVA”, provando haver diferença significativa entre o sucateamento quando o tempo de espera é maior que 15 minutos. Os resultados se encontram na Figura 7.

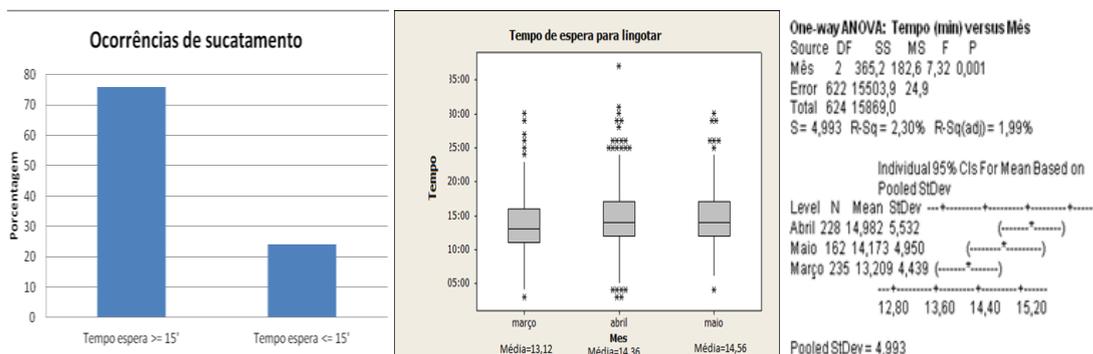
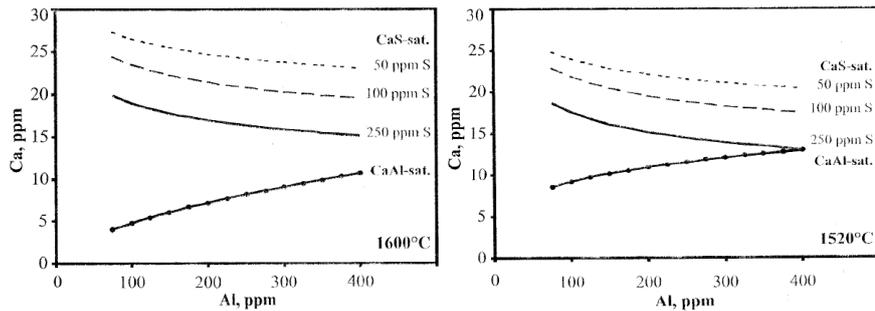


Figura 7. Comparação do tempo de espera para lingotar com o número de sucateamentos e teste “ANOVA” comprovando a significância estatística da análise.

A análise de processo mostrou um processo não capaz de $CP=0,36$ com evidências estatisticamente significantes em meses diferentes atribuindo a esta variável uma das causas do problema. Isto ocorre devido à medida de temperatura do aço na panela não representar a temperatura do banho como um todo, pois após um tempo

* Contribuição técnica ao 45º Seminário de Aciaria – Internacional, 25 a 28 de maio de 2014, Porto Alegre, RS, Brasil.



Fonte: Hollapa [6]

Figura 9. Janela de lingotabilidade para diferentes temperaturas [6].

Dessa forma, foram investigadas as temperaturas de liberação dos aços “Baixo Si” e aços com faixa de Al e S. A verificação dos padrões mostrou que não existia diferença de temperatura de liberação entre estes aços e os demais, bem como uma grande variabilidade no sobreaquecimento do distribuidor. Este comportamento é evidenciado na Figura 10.

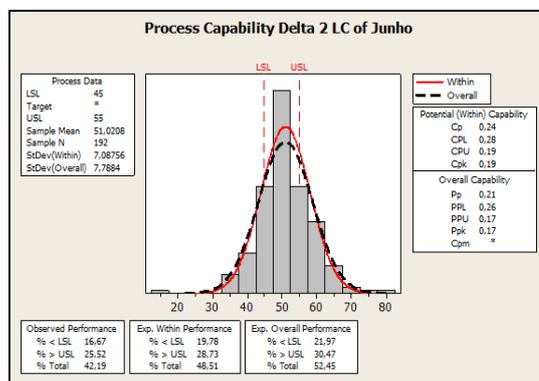


Figura 10. Análise de capacidade do sobreaquecimento no distribuidor.

Adicionalmente, ruídos como tempo de processos de vácuo, injeção de fios e volume de gás injetado, não são contemplados para o cálculo de liberação. Observa-se que cerca de 30% dos dados encontram-se abaixo da especificação, o que é, sobretudo nocivo para os aços de Al e S.

A investigação das inclusões que ocorrem sob estas circunstâncias mostrou que 63% eram inclusões em forma de *cluster* e complexa, basicamente cálcio aluminatos (CA) com presença de sulfetos, conforme mostra Figura 11.

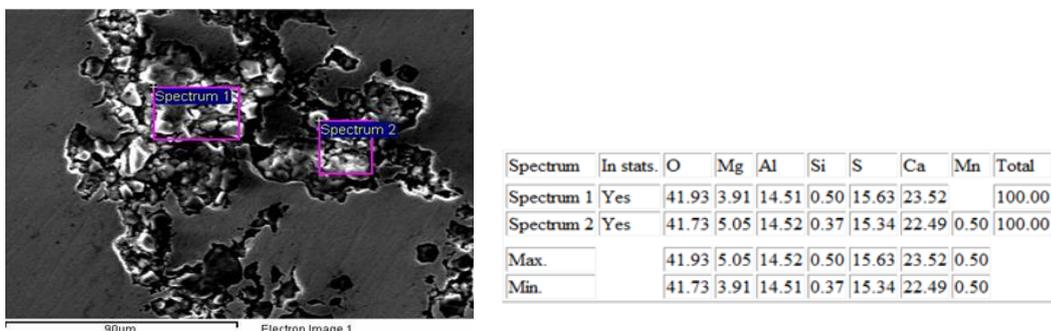


Figura 11. Caracterização de macroinclusão.

Adicionalmente foram identificadas as ligas em que a faixa interna de composição química apresentava teores elevados de Al e S. Em seguida, foi feita a correção da

* Contribuição técnica ao 45º Seminário de Aciaria – Internacional, 25 a 28 de maio de 2014, Porto Alegre, RS, Brasil.



quantidade adicionada destes elementos, a fim de garantir próximo ao mínimo da faixa. Foram identificados mais de 300 aços com Al e S superior a 230ppm. As ligas de maior produção e sucateamento foram priorizadas para processo de revisão e rebalanceamento da composição química.

Outras inclusões oriundas de reoxidação também foram encontradas recorrentes durante as investigações. No mapa de processo foi identificado o processo de VD, variáveis de temperatura e pressão. A Figura 12 mostra que apenas 4% não atenderam as especificações.

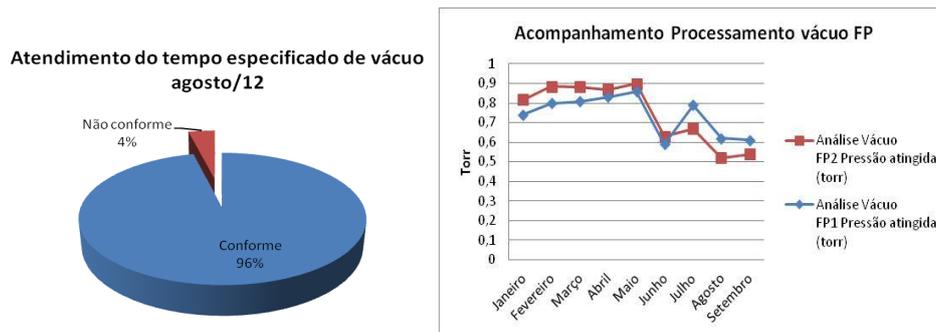


Figura 12. Acompanhamento do processo de vácuo no FP.

Da mesma forma foram investigadas as escórias que mostram boa estabilidade e baixa variação. Isto se deve ao longo tempo de processo que permite alcançar o equilíbrio e também a etapa de retirada de escória com um skimmer. Para análise das ocorrências de inclusões de cálcio aluminato foram investigados: a adição de fios, tempo entre fios, velocidade de injeção e rendimento. As Figuras 13 e 14 mostram que rendimentos de S inferiores a 50% bem como de Al inferiores a 80% aumenta a probabilidade de sucateamento.

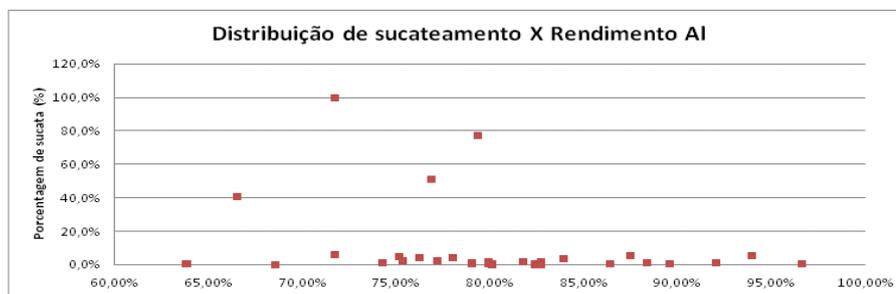


Figura 13. Efeito do rendimento do Al no sucateamento.

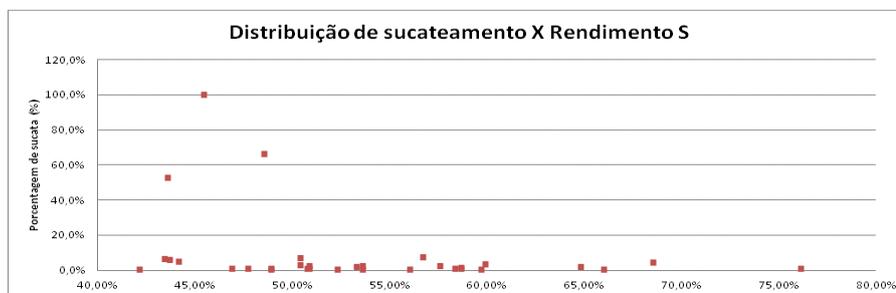


Figura 14. Efeito do rendimento do S no sucateamento.

Os aços mais sensíveis ao baixo rendimento de Al são os aços das famílias 1020 e 1015, devido ao alto teor de oxigênio. Nestas famílias, no entanto as corridas que mais sucata apresentam um rendimento mais baixo, indicando alguma oxidação

* Contribuição técnica ao 45º Seminário de Aciaria – Internacional, 25 a 28 de maio de 2014, Porto Alegre, RS, Brasil.



posterior no processo. Desta forma foram identificados todos os pontos capazes de gerar esta oxidação. Após investigação, o acoplamento entre o tubo longo e a válvula da panela foi apontado como uma das causas. Observa-se que quando se tem o desgaste do cone devido à oxidação da carcaça metálica, o aumento no sucateamento juntamente com a redução do rendimento do alumínio é evidenciado. A Figura 15 a mostra com pouca vida, corroída devido à oxidação. Isto se deve ao ar que é sugado pelo *gap* existente e reação com o metal da carcaça sob alta temperatura.



Figura 15. Verificação da influência da carcaça na oxidação do aço.

O acoplamento do tubo é feito sob pressão de um braço manipulador, onde a pressão é estabelecida por um contrapeso na outra extremidade do braço. Verificou-se pela metodologia de cálculo que o peso utilizado era de 40kg contra os 92 kg exigidos no cálculo para correta vedação. Apesar da injeção de argônio existente no tubo longo, esta não era suficiente para neutralizar o oxigênio do ar conforme pode ser visto pela oxidação no cone.

Com relação aos aços “baixo Si”, o aço com maior sucateamento em má lingotabilidade, foi tomada uma ação de reformular a desoxidação do mesmo através da adição de parte de Al durante o vazamento e manter os níveis de Si mais próximos do máximo da faixa permitida. Adicionalmente o padrão de liberação de temperatura do final do processo de refino para o lingotamento para este aço foi aumentado em 10°C o que reduziu drasticamente o seu sucateamento permitindo a produção de aços com teores de Si ainda mais baixos.

Por fim dentre as diversas causas investigadas no LC, a velocidade foi uma delas, que mostrou ter efeito, sobretudo nas inclusões de menor diâmetro. A Figura 16 mostra que com a velocidade maior a rejeição no produto final também foi maior devido à presença de inclusões da ordem de 20µm. O aumento da velocidade diminui o tempo de residência das inclusões reduzindo as chances destas flatarem além de aumentar o arraste das mesmas para os veios.

* Contribuição técnica ao 45º Seminário de Aciaria – Internacional, 25 a 28 de maio de 2014, Porto Alegre, RS, Brasil.

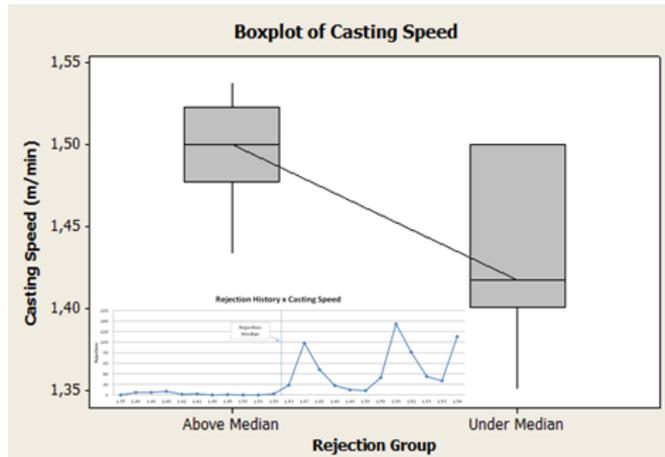


Figura 16. Análise do efeito da velocidade de lingotamento no número de rejeições.

A partir destas análises um grupo de ações foram elaboradas e acompanhadas para avaliar a efetividade das mesmas. Com relação à temperatura e encharque das panelas foram tomadas as seguintes ações adicionais:

- Redução do número de panelas em ciclo;
- Reformulação do padrão e da curva de aquecimento das panelas;
- Criação de padrão de liberação de temperatura maior para aços críticos (faixa S e Al, baixo Si).

Para atacar a estratificação térmica foram implantados:

- Controle do tempo de espera da panela para lingotar sem rinsagem;
- Instalação de rinsagem de argônio na panela sob a torre.

Reoxidação e CQ:

- Redimensionamento do manipulador do tubo longo com contrapeso remodelado;
- Controle do sistema de vácuo;
- Reacerto na adição de ligas com alto teor de S e Al;
- Controle das adições de Al e do sistema de injeção de fios.

O acompanhamento mostrou que 26% das ações tiveram que ser replanejadas devido a atrasos, principalmente naquelas em que aquisições de equipamentos se faziam necessários. Sendo todas elas cumpridas e administradas para garantirem o ganho esperado.

A Figura 17 mostra o comportamento do número de defeitos durante decorrer do ano verificado.

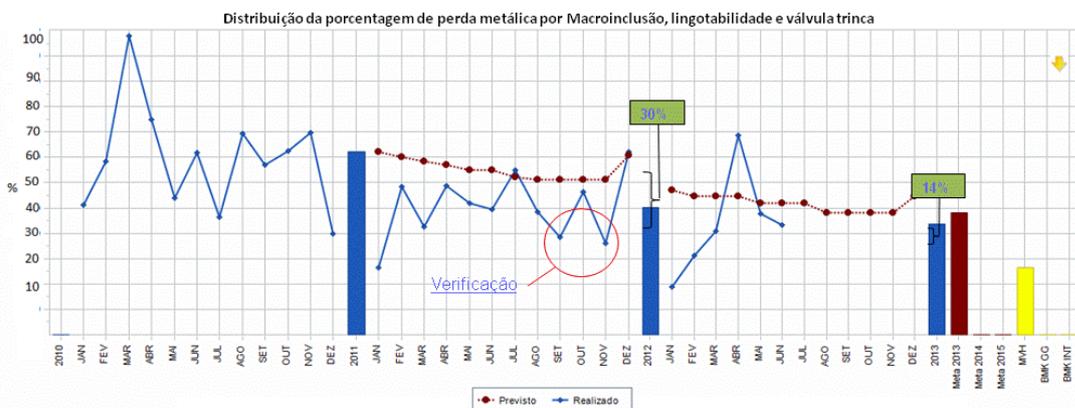


Figura 17. Acompanhamento periódico dos índices de defeitos.



Nos meses de verificação do projeto foi estabelecido um novo recorde histórico, desconsiderando o mês de janeiro que é atípico devido à baixa produção. O valor atípico apresentado no ciclo seguinte foi devido a problemas com equipamento de aquecimento de painéis, que foi sanado no mesmo mês retornando a meta para os patamares anteriores.



Figura 18. Acompanhamento periódico dos índices de defeitos.

5 CONCLUSÕES

Os resultados permaneceram vários meses abaixo da meta estipulada mostrando a eficácia do plano de ação e uma melhoria de 30% em relação ao ano anterior. A geração de retrabalho de duas inspeções para corridas com desconfiança reduziu 39%, aumentando a qualidade e entrega da planta para o seu cliente.

REFERÊNCIAS

- 1 Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores. Estatísticas. 2014 [acesso em 20 fev. 2014]. Disponível em: <http://www.anfavea.com.br/tabelas.html>.
- 2 Magalhaes HLG. Melhoria da limpidez do aço SAE 1045 desoxidado ao alumínio com aplicação na indústria automobilística, utilizando termodinâmica computacional. Ouro Preto: UFOP, CETEC, UEMG; 2010.
- 3 Han ZJ, Liu L, Lind M, Holappa L. Mechanism and kinetics of transformation of alumina inclusions by calcium treatment. *Acta Metall. Sin. Engl. Lett.* 2006;19(1):1-8.
- 4 Simões J. Inclusion Training promoted by Vesuvius [não publicado]. Mogi das Cruzes; 2012.
- 5 Susaki K, Viana J, Barbosa W. Controle de temperatura nos processos de refino primário, refino secundário e lingotamento contínuo dos aços: Uma abordagem prática. Belo Horizonte: ABM; 2012.
- 6 Holappa L. Thermodynamic examination of inclusion modification and precipitation from calcium treatment from solidified steel. Otaniemi: Helsinki University of Technology; 2003.

* Contribuição técnica ao 45º Seminário de Aciaria – Internacional, 25 a 28 de maio de 2014, Porto Alegre, RS, Brasil.