UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E MATERIAIS

RONALDO ADRIANO ALVARENGA BORGES

**Análise multivariada dos principais fatores que afetam o desgaste
(vida) do revestimento refratário das placas de transporte de aço
na Aciaria da Usina de Cubatão-Usiminas**

São Paulo
2016

RONALDO ADRIANO ALVARENGA BORGES

**Análise multivariada dos principais fatores que afetam o desgaste
(vida) do revestimento refratário das placas de transporte de aço
na Aciaria da Usina de Cubatão-Usiminas**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de
Mestre em Ciências.

São Paulo

2016

RONALDO ADRIANO ALVARENGA BORGES

**Análise multivariada dos principais fatores que afetam o desgaste
(vida) do revestimento refratário das placas de transporte de aço
na Aciaria da Usina de Cubatão-Usiminas**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de
Mestre em Ciências.

Área de concentração: Engenharia
Metalúrgica e de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Guilherme
Frederico Bernardo Lenz e Silva

São Paulo

2016

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, _____ de _____ de _____

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catálogo-na-publicação

Borges, Ronaldo Adriano Alvarenga

Análise multivariada dos principais fatores que afetam o desgaste (vda) do revestimento refratário das placas de transporte de aço na Aciaria da Usina de Cubatão-Usiminas / R. A. A. Borges -- versão corr. -- São Paulo, 2016. 192 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

1.Refratários 2.Panela 3.Desgaste 4.Variáveis operacionais
I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais II.t.

Nome: BORGES, Ronaldo Adriano Alvarenga.

Título: ANÁLISE MULTIVARIADA DOS PRINCIPAIS FATORES QUE AFETAM O
DESGASTE (VIDA) DO REVESTIMENTO REFRATÁRIO DAS PANELAS DE
TRANSPORTE DE AÇO NA ACIARIA DA USINA DE CUBATÃO-USIMINAS

Dissertação de Mestrado apresentada
à Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo para Obtenção do título
de Mestre em Ciências.

Aprovado em:

Banca Examinadora

Prof. Dr..... Instituição:.....
Julgamento:..... Assinatura:.....

Prof. Dr..... Instituição:.....
Julgamento:..... Assinatura:.....

Prof. Dr..... Instituição:.....
Julgamento:..... Assinatura:.....

Prof. Dr..... Instituição:.....
Julgamento:..... Assinatura:.....

AGRADECIMENTOS

Agradeço inicialmente ao orientador deste trabalho, Prof. Dr. Guilherme Frederico Bernado Lenz e Silva, pela grande atenção dedicada durante esta trajetória.

Aos professores que participaram da banca examinadora de qualificação, Prof. Dr. Cyro Takano, Prof. Dr. Flávio Beneduce Neto, pelos importantes comentários para melhoria da Dissertação.

À minha esposa Marcia, com amor, admiração e gratidão por sua compreensão, carinho, presença e incansável apoio ao longo do período de elaboração deste trabalho.

Aos amigos e companheiros de trabalho Carlos Roberto Vidal Moura, Vitor Polezi e Angelo Varandas pelo apoio e grande ajuda dada na construção dos bancos de dados, análises laboratoriais e redação da Dissertação.

Ao Prof. Dr. Antônio Malynowskyj, que nos anos de convivência, muito me ensinou, contribuindo para meu crescimento científico e intelectual.

A Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, pela oportunidade de cursar o Mestrado nesta respeitada instituição.

A empresa USIMINAS, por permitir e incentivar a realização desta jornada acadêmica.

Aos Gerentes Danilo Di Napoli Guzela e Márcio Antônio da Silva pelo apoio e paciência durante o curso.

À minha Família e a Deus por sempre estarem presentes em meus pensamentos.

RESUMO

O aumento da demanda por aços cada vez mais exigentes, em termos de composição química e limpidez interna, faz com que as condições de refino nas aciarias sejam cada vez mais severas. Ao mesmo tempo, o aumento dos tempos de tratamento do aço, aliado às outras variáveis operacionais como quantidades e tipos de adições químicas, etc. fazem com que haja um aumento no tempo de contato entre o revestimento refratário das placas de transporte de aço e escórias com conseqüente redução do desempenho (vida) de tais revestimentos refratários. Apesar dos esforços no intuito de redução de custos com redução de consumos de refratários, é cada vez maior a pressão sobre os custos de produção e de segurança operacional. Neste sentido, a construção de modelos de previsão de vida em função de tais variáveis é de extrema importância para a gestão de processos e contratos, estabilidade operacional e segurança. Além disso, os estudos de *post-mortem* podem contribuir no sentido de compreensão física e química de tais fenômenos e mecanismos de desgaste, contribuindo assim para a validação de tais modelos determinísticos. Neste estudo, buscou-se verificar quais variáveis operacionais influem no desempenho (vida) das placas através de correlações estatísticas. O modelamento levou em consideração os dados de 6 meses de operação da aciaria de uma usina integrada com capacidade de 4,5 Mt/ano. O estudo *post-mortem* realizado em uma das placas, após o final de sua campanha, mostrou-se eficiente na validação de tais correlações e no entendimento físico e químico dos possíveis fenômenos e mecanismos de desgaste. As análises mostraram que as variáveis que impactam a vida das placas de aço são a temperatura de vazamento do aço, temperatura do aço na placa pós vazamento, quantidade de aço chapas grossas (CG) produzido, rota de tratamento dessulfurado, tempo de placa cheia, participação do forno placa no refino secundário, condições da placa, carga de aço na placa, adições de nefelina, escória sintética, fios de cálcio silício (CaSi) e ferro alumínio cálcio (FeAlCa), ligas de manganês e tempos de tratamento no refino secundário. O estudo de *post-mortem* de amostras de refratário da linha de escória extraída de uma das placas revelou que o principal mecanismo de desgaste desta região é a corrosão química pela escória que é facilitada pelas adições de nefelina.

Palavras Chaves: Refratários. Placa. Desgaste. Variáveis operacionais.

ABSTRACT

The increased demand for increasingly demanding steels, in terms of chemical composition and internal sanity, makes the conditions of refining in steelmaking plants are increasingly stringent and select. At the same time, increasing metallurgical treatment times, combined with the various other operating variables such as the quantities and types of chemical additions, etc. makes that there is an increase in contact time between the refractory coating of steel transport ladles and slag with a consequent reduction in performance (life) of such refractory linings. Despite efforts in order to reduce costs with a reduction of refractory consumption, it is increasing the pressure on the costs of production and operational safety. In this sense, the construction of life prediction models according to such variables is extremely important for cost reduction, process management and procurement, operational stability and safety. Moreover, post-mortem studies can contribute towards chemical and physical understanding of such phenomena and wear mechanisms, thus contributing to the validation of such deterministic models. In this study, we sought to determine which operating variables really influence the performance (life) of the ladles through statistics correlations. The modeling took into account data from 6 months of operation of an integrated steelmaking plant with capacity of 4.5 Mt / year. The study post-mortem conducted on some ladles, after the end of their campaigns, was effective in the validation of such correlations and in the physical and chemical understanding of possible phenomena and wear mechanisms. The analysis showed that the variables that impact in the life of steel's ladles are the steel tapping temperature, the steel tapping temperature in the ladle after tapping, amount of produced plate mill (CG) steel, desulfurized treatment route, ladle full time, participation of the ladle furnace in the secondary refining, ladle conditions, steel load in the ladle, nepheline additions, synthetic slag, calcium silicon (CaSi) and iron aluminium calcium (FeAlCa) wires, manganese alloys and treatment times in the secondary refining. The post-mortem study of slagline's refractory samples extracted from ladles in operation revealed that the main wear mechanism in this region is the chemical corrosion by slag and is facilitated by additions of nepheline.

Keywords: Ladle Refractories. Steelmaking Ladles. Refractories Wear. Operational variables.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Distribuição do mercado de aplicação dos produtos refratários; fonte: referência (LENZ E SILVA, 2007).	18
Figura 2 – Evolução do consumo específico de refratários; fonte: referência (LENZ E SILVA, 2007).	26
Figura 3 – Inter-relação entre as diversas áreas de desenvolvimento de produtos refratário; fonte: referência (LENZ E SILVA, 2007).	29
Figura 4 – Relação entre os principais fatores determinantes no desgaste dos refratários em geral; fonte: referência (LENZ E SILVA, 2007).	31
Figura 5 – Representação esquemática das diferentes zonas do revestimento refratário para painéis de aço; fonte: referência (QUINTELA, 2003).	34
Figura 6 – Representação esquemática das diferentes zonas do revestimento refratário das painéis de aço da aciaria de Cubatão; fonte: referência (USIMINAS, 2015).	35
Figura 7 – Representação simplificada do fluxo de produção do aço na aciaria 2 da usina de Cubatão da Usiminas evidenciando os diferentes equipamentos de fabricação do aço; fonte: referência (USIMINAS, 2015).	36
Figura 8 – Representação simplificada do fluxo de produção do aço na aciaria 2 da usina de Cubatão da Usiminas evidenciando o ciclo operacional e o ciclo operacional de painéis; fonte: referência (USIMINAS, 2015).	39
Figura 9 – Representação simplificada do ciclo operacional das painéis da usina de Cubatão da Usiminas evidenciando as diversas etapas e processos nos quais as painéis são submetidas; fonte: referência (USIMINAS, 2015).	39
Figura 10 – Influência da basicidade (CaO/SiO_2) da escória na resistência à corrosão de diferentes refratários. Tijolos de MgO-C (a) e tijolos dos sistemas $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgO-C}$, $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-C}$ e Al_2O_3 (b); fonte: referência (QUINTELA, 2003).	46
Figura 11 – Influência do teor de Al_2O_3 da escória na resistência à corrosão de diferentes refratários. Tijolos de MgO-C (a) e tijolos dos sistemas $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgO-C}$, $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-C}$ e Al_2O_3 (b); fonte: referência (QUINTELA, 2003).	47
Figura 12 – Influência do teor de CaF_2 da escória na resistência à corrosão de diferentes refratários. Tijolos de MgO-C (a) e tijolos dos sistemas $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgO-C}$, $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-C}$ e Al_2O_3 (b); fonte: referência (QUINTELA, 2003).	48
Figura 13 – Influência do teor de MnO da escória na resistência à corrosão de diferentes refratários. Tijolos de MgO-C (a) e tijolos dos sistemas $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgO-C}$, $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-C}$ e Al_2O_3 (b); fonte: referência (QUINTELA, 2003).	48
Figura 14 – Comportamento da resistência mecânica a quente, MRQ, em função da temperatura de diferentes sistemas; fonte: referência (QUINTELA, 2003).	53
Figura 15 – Efeitos do teor e tamanho da grafita na resistência à corrosão de tijolos de $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-C}$; fonte: referência (HIRAI et al., 1998).	54
Figura 16 – Influência da composição química do sinter de MgO na sua resistência à corrosão; fonte: referência (QUINTELA, 2003).	56
Figura 17 – Influência do tamanho de grão do sinter de MgO na resistência à corrosão de tijolo de MgO-C ; fonte: referência (QUINTELA, 2003).	56
Figura 18 – Perda de peso do compacto de MgO-C , com 4% em peso de C, em função da temperatura em fluxo de N_2 ; fonte: referência (YAMAGUCHI, 1984).	58
Figura 19 – Fluxograma das informações e análises estatísticas realizadas.	72
Figura 20 – Fluxograma das informações e análises realizadas nos tijolos refratários das painéis de aço.	74

Figura 21 – Imagem da coleta das amostras de refratário da panela após o final da sua campanha.	75
Figura 22 – Imagem da panela e das áreas refratárias desgastadas em função das diversas operações metalúrgicas as quais foi submetida no decorrer de sua campanha.	75
Figura 23 – Imagem das amostras de refratário da fiada n°15 da linha de escória da panela.	75
Figura 24 – Imagens das amostras de refratário da panela com os aspectos reais antes da preparação (corte).	76
Figura 25 – Armazenagem, identificação e lixamento das amostras durante o processo de preparação.	77
Figura 26 – Imagem da identificação da microestrutura da amostra da linha de escória da panela na lupa eletrônica.	77
Figura 27 – Correlação entre vida da panela de aço (campanha) e quantidade de corridas processadas no conversor LD5.	80
Figura 28 – Correlação entre vida da panela de aço (campanha) e quantidade de corridas processadas no conversor LD6.	81
Figura 29 – Correlação entre vida da panela de aço (campanha) e quantidade de corridas processadas no conversor LD7.	81
Figura 30 – Distribuição % (participação) das corridas vazadas por conversor na vida (campanha) das panelas.	83
Figura 31 – Temperaturas de final de sopro do aço no LD5 ($\mu=1668^{\circ}\text{C}$ e $\sigma=24,59^{\circ}\text{C}$).	83
Figura 32 – Temperaturas de final de sopro do aço no LD6 ($\mu=1671^{\circ}\text{C}$ e $\sigma=23,30^{\circ}\text{C}$).	84
Figura 33 – Temperaturas de final de sopro do aço no LD7 ($\mu=1672^{\circ}\text{C}$ e $\sigma=24,14^{\circ}\text{C}$).	84
Figura 34 – Temperaturas do aço na panela após vazamento do LD5 ($\mu=1620^{\circ}\text{C}$ e $\sigma=19,10^{\circ}\text{C}$).	84
Figura 35 – Temperaturas do aço na panela após vazamento do LD6 ($\mu=1624^{\circ}\text{C}$ e $\sigma=19,98^{\circ}\text{C}$).	85
Figura 36 – Temperaturas do aço na panela após vazamento do LD7 ($\mu=1624^{\circ}\text{C}$ e $\sigma=20,45^{\circ}\text{C}$).	85
Figura 37 – Correlação entre vida da panela de aço e os 3 conversores (real vs estimada).	87
Figura 38 – Correlação entre vida da panela de aço e temperatura de vazamento do aço na panela.	88
Figura 39 – Diferenças entre o comportamento dos dois grupos de panelas na correlação entre vida da panela de aço e temperatura de vazamento do aço.	89
Figura 40 – Análise individualizada por panela (P25,...,P7) da influência da temperatura de vazamento do aço na vida das panelas.	89
Figura 41 – Correlação entre vida da panela de aço e temperatura do aço após vazamento na panela.	90
Figura 42 – Análise individualizada por panela (P25,...,P7) da influência da temperatura do aço na panela após vazamento na vida das panelas.	91
Figura 43 – Correlação entre vida da panela de aço e a classe de aço CG.	92
Figura 44 – Correlação entre vida da panela de aço e a classe de aço PV.	93
Figura 45 – Correlação entre vida da panela de aço e a classe de aço TQ.	93
Figura 46 – Correlação entre vida da panela de aço e as classes de aço (real vs estimada).	94
Figura 47 – Correlação entre vida da panela de aço e a máquina de lingotamento n°2 (MLC2).	96
Figura 48 – Correlação entre vida da panela de aço e a máquina de lingotamento n°3 (MLC3).	96
Figura 49 – Correlação entre vida da panela de aço e a máquina de lingotamento n°4 (MLC4).	97

Figura 50 – Correlação entre vida da panela de aço e a máquina de lingotamento (real vs estimada).....	98
Figura 51 – Correlação entre vida da panela de aço e a participação % da rota/tratamento metalúrgico AJ CQ (FE AL CA) – MLC3 e 4.	100
Figura 52 – Correlação entre vida da panela de aço e a participação % da rota/tratamento metalúrgico AJ CQ – Alto C (RH).	101
Figura 53 – Correlação entre vida da panela de aço e a participação % da rota/tratamento metalúrgico AJ CQ (AHF – MLC3).....	102
Figura 54 – Correlação entre vida da panela de aço e a participação % da rota/tratamento metalúrgico AJ CQ (FP – MLC3).	103
Figura 55 – Correlação entre vida da panela de aço e a participação % da rota/tratamento metalúrgico AJ CQ + CASI (FOPA – MLC3).	104
Figura 56 – Correlação entre vida da panela de aço e a participação % da rota/tratamento metalúrgico AJ CQ + SEMCASI (AHF).	105
Figura 57 – Correlação entre vida da panela de aço e a participação % da rota/tratamento metalúrgico AJ CQ + SEMCASI (AHF).	106
Figura 58 – Correlação entre vida da panela de aço e a participação % da rota/tratamento metalúrgico DES S<6 (FOPA FECAAL) MLC3 e 4.	107
Figura 59 – Correlação entre vida da panela de aço e a participação % da rota/tratamento metalúrgico DES S=2 (FP) +MLC3.	108
Figura 60 – Correlação entre vida da panela de aço e a participação % da rota/tratamento metalúrgico DES S<6 (FP) +MLC3 e 4.	109
Figura 61 – Correlação entre vida da panela de aço e a participação % do grupo rota/tratamento metalúrgico Ajuste de composição química sem cálcio silício.....	111
Figura 62 – Correlação entre vida da panela de aço e a participação % do grupo rota/tratamento metalúrgico Ajuste de composição química com cálcio silício.	111
Figura 63 – Correlação entre vida da panela de aço e a participação % do grupo rota/tratamento metalúrgico Borbulhamento de argônio sem cálcio silício.	112
Figura 64 – Correlação entre vida da panela de aço e a participação % do grupo rota/tratamento metalúrgico Borbulhamento de argônio com cálcio silício.....	112
Figura 65 – Correlação entre vida da panela de aço e a participação % do grupo rota/tratamento metalúrgico Dessulfurado.	113
Figura 66 – Correlação entre vida da panela de aço e a participação % do grupo rota/tratamento metalúrgico Descarburado.	113
Figura 67 – Correlação entre vida da panela de aço e a participação % do grupo rota/tratamento metalúrgico Desidrogenizado + Globulização.	114
Figura 68 – Correlação entre vida da panela de aço e a participação % do grupo rota/tratamento metalúrgico Globulização (CASI).....	114
Figura 69 – Correlação entre vida da panela de aço e a participação % do grupo rota/tratamento metalúrgico Injeção de Fio.....	115
Figura 70 – Correlação entre vida da panela de aço e a participação % do grupo rota/tratamento metalúrgico Cálcio Sílicio.....	115
Figura 72 – Correlação entre vida da panela de aço e a as médias dos tempos de vazamento de aço.....	120
Figura 73 – Correlação entre vida da panela de aço e os desvios padrões dos tempos de vazamento de aço.....	120
Figura 74 – Correlação entre vida da panela de aço e os tempos médios de panela cheia.....	122
Figura 75 – Análise individualizada por panela (P25.....P7) da influência do tempo de panela cheia na vida das panelas.....	122

Figura 76 – Correlação entre vida (campanha) da panela de aço número 1 e o tempo médio de tratamento no refino secundário, onde n representa o número de corridas (dados) de cada campanha.	124
Figura 77 – Correlação entre vida (campanha) da panela de aço número 3 e o tempo médio de tratamento no refino secundário, onde n representa o número de corridas (dados) de cada campanha.	124
Figura 78 – Correlação entre vida (campanha) da panela de aço número 4 e o tempo médio de tratamento no refino secundário, onde n representa o número de corridas (dados) de cada campanha.	125
Figura 79 – Correlação entre vida (campanha) da panela de aço número 6 e o tempo médio de tratamento no refino secundário, onde n representa o número de corridas (dados) de cada campanha.	125
Figura 80 – Correlação entre vida (campanha) da panela de aço número 11 e o tempo médio de tratamento no refino secundário, onde n representa o número de corridas (dados) de cada campanha.	126
Figura 81 – Correlação entre vida (campanha) da panela de aço número 14 e o tempo médio de tratamento no refino secundário, onde n representa o número de corridas (dados) de cada campanha.	126
Figura 82 – Correlação entre vida (campanha) da panela de aço número 18 e o tempo médio de tratamento no refino secundário, onde n representa o número de corridas (dados) de cada campanha.	127
Figura 83 – Correlação entre vida (campanha) da panela de aço número 19 e o tempo médio de tratamento no refino secundário, onde n representa o número de corridas (dados) de cada campanha.	127
Figura 84 – Correlação entre vida (campanha) da panela de aço número 20 e o tempo médio de tratamento no refino secundário, onde n representa o número de corridas (dados) de cada campanha.	128
Figura 85 – Correlação entre vida (campanha) da panela de aço número 22 e o tempo médio de tratamento no refino secundário, onde n representa o número de corridas (dados) de cada campanha.	128
Figura 86 – Correlação entre vida (campanha) da panela de aço número 24 e o tempo médio de tratamento no refino secundário, onde n representa o número de corridas (dados) de cada campanha.	129
Figura 87 – Correlação entre vida (campanha) da panela de aço número 25 e o tempo médio de tratamento no refino secundário, onde n representa o número de corridas (dados) de cada campanha.	129
Figura 88 – Impacto da utilização do forno panela na vida das panelas.	131
Figura 89 – Impacto da utilização do AHF na vida das panelas.	131
Figura 90 – Impacto da utilização do RH na vida das panelas.	132
Figura 91 – Impacto da utilização da EBA na vida das panelas.	132
Figura 92 – Correlação múltipla entre vida das panelas e tempo de tratamento nos refinis.	134
Figura 93 – Correlação entre vida da panela de aço e oxigênio do aço no final de sopro.	135
Figura 94 – Correlação entre vida da panela de aço e oxigênio soprado no LD.	136
Figura 95 – Correlação entre vida da panela de aço e o número de corridas com panela de aquecedor.	137
Figura 96 – Correlação entre vida da panela de aço e o número de corridas com panela de ciclo.	138
Figura 97 – Correlação entre vida da panela de aço e o número de corridas com panela de ciclo vencido.	139

Figura 98 – Correlação entre vida da panela de aço e condições das panelas (real vs estimada).	140
Figura 99 – Correlação entre vida da panela de aço e a quantidade de aço vazada nas panelas.	141
Figura 100 – Análise individualizada por panela (P25.....P7) da influência da carga média de aço vazada na panela e a vida das panelas.	142
Figura 101 – Influência (correlação) do aço 360 na vida das panelas de aço.	143
Figura 102 – Influência (correlação) do aço 473 na vida das panelas de aço.	144
Figura 103 – Influência (correlação) do aço 487 na vida das panelas de aço.	144
Figura 104 – Influência (correlação) do aço 499 na vida das panelas de aço.	145
Figura 105 – Influência (correlação) do aço 534 na vida das panelas de aço.	145
Figura 106 – Influência (correlação) do aço 572 na vida das panelas de aço.	146
Figura 107 – Influência (correlação) do aço 692 na vida das panelas de aço.	146
Figura 108 – Influência (correlação) do aço 820 na vida das panelas de aço.	147
Figura 109 – Influência (correlação) do aço 824 na vida das panelas de aço.	147
Figura 110 – Influência (correlação) do aço 833 na vida das panelas de aço.	148
Figura 111 – Imagem do refratário da linha de escória de uma das panelas de aço obtida na lupa óptica.	163
Figura 112 – Imagem da região de escória (escória + refratário + aço) da Figura 111 obtida por MEV.	164
Figura 113 – Imagem obtida via MEV da região das partículas de aço (pontos claros) infiltradas na escória aderida à face quente do refratário da linha de escória da panela de aço.	165
Figura 114 – Imagem obtida via MEV da região de interface (refratário/escória) mostrada na Figura 111. Grãos eletrofundidos de MgO (refratário) sendo corroídos pela escória infiltrada na matriz refratária.	166
Figura 115 – Imagem do refratário da linha de escória de uma das panelas de aço obtida na lupa óptica. Em destaque as 3 regiões distintas escória, interface escória/refratário e refratário de MgO-C.	167
Figura 116 – Imagem do grão de sinter de MgO e da escória infiltrada na matriz refratária obtida no MEV.	168
Figura 117 – Correlação entre vida real e vida estimada (modelo1) da panela dada pela eq.(15).	170
Figura 118 – Correlação entre vida real e vida estimada (modelo2) da panela dada pela eq.(16).	170
Figura 119 – Correlação entre vida real e vida estimada (modelo3) da panela dada pela eq.(17).	171
Figura 120 – Correlação entre vida real e vida estimada (modelo4) da panela dada pela eq.(18).	171
Figura 121 – Correlação entre vida real e vida estimada (modelo global) da panela dada pela eq.(20).	172

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificações usuais dos produtos refratários; fonte: referência (LENZ E SILVA, 2007).	20
Tabela 2 – Classificação dos refratários ácidos à base de sílica; fonte: referência (LENZ E SILVA, 2007).	21
Tabela 3 – Principais grupos de concretos à base de aluminato de cálcio; fonte: referência (LENZ E SILVA, 2007).	21
Tabela 4 – Principais sistemas refratários de óxido + carbono utilizados em siderurgia; fonte: referência (LENZ E SILVA, 2007).	25
Tabela 5 – Desdobramentos das principais áreas de atuação da engenharia de refratários (LENZ E SILVA, 2007).	29
Tabela 6 – Principais etapas de um estudo “post-mortem” de produtos refratários (LENZ E SILVA, 2007).	32
Tabela 7 – Estrutura refratária das placas de aço de acordo com as especificações técnicas; fonte: referência (USIMINAS, 2015).	36
Tabela 8 – Propriedades típicas de tijolos de MgO-C; fonte: referência (THE TECHNICAL ASSOCIATION OF REFRACTORIES, 1998).	41
Tabela 9 – Propriedades típicas de tijolos de Al ₂ O ₃ -MgO-C; fonte: referência (THE TECHNICAL ASSOCIATION OF REFRACTORIES, 1998).	43
Tabela 10 – Características gerais de tijolos para placas de aço; fonte: referência (QUINTELA, 2003).	45
Tabela 11 – Grupos de rotas/tratamentos metalúrgicos analisados.	110
Tabela 12 – Análise de variância (ANOVA) para as comparações da vida média das placas.	118
Tabela 13 – Análise de variância (ANOVA) para as comparações do % de rota Dessulfurado (%DS).	118
Tabela 14 – Correlação do tipo de aço e vida das placas dos aços que influem na vida refratária.	149
Tabela 15 – Consumo específico de nefelina por famílias de aço.	154
Tabela 16 – Consumo específico de CASI e FECAAL por famílias de aço.	155
Tabela 17 – Consumo específico de ligas de manganês por famílias de aço.	156
Tabela 18 – Consumo específico de alumínio por famílias de aço.	157
Tabela 19 – Consumo específico de escória sintética e CaF ₂ por famílias de aço.	159
Tabela 20 – Estimativa da composição das escórias por famílias de aço.	161
Tabela 21 – Composição química (obtida por MEV) das regiões de escória, aço, refratário e auréola de Mg-Al identificadas nas Figura 111 e 112. Análise semi-quantitativa (EDS).	164
Tabela 22 – Composição química (obtida por MEV) das regiões dos grãos de MgO e escória identificadas na Figura 114. Escória rica em sódio. Análise semi-quantitativa (EDS).	166
Tabela 23 – Composição química (obtida no MEV) do grão de sinter de MgO e da escória identificadas na Figura 116. Análise semi-quantitativa (EDS).	168
Tabela 24 – Principais variáveis de desgaste refratário envolvidas no desempenho do refratário das placas.	176

LISTA DE ABREVIATURAS E DE SIGLAS

ABM	Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AHF	<i>Aluminium Heat Facility or Chemical (Aluminium) Heating Station</i>
CAC's	Concretos à base de Aluminatos de Cálcio
CASI	Composto químico Cálcio Silício
CG	Aços do tipo Chapas Grossas
EBA	Estação de Borbulhamento de Argônio
FEALCA	Composto químico Ferro Alumínio Cálcio
FP	Forno Panela
JIS	<i>Japanese Industrial Standard</i>
LD	<i>Linz Donawitz Converter or Basic Oxygen Furnace</i>
MRQ	Resistencia Mecanica a Quente
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
PV	Placas de Vendas
RH	<i>Ruhrstahl Heraeus Degasser or Vacuum Circulation Process</i>
TAR	<i>Technical Association of Refractories</i>
TCTO	Temperatura do aço na Panela (após vazamento)
TFS	Temperatura do aço no Final de Sopros (conversores)
TQ	Aços do tipo Tiras à Quente

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO.....	ii
ABSTRACT	iii
LISTA DE FIGURAS.....	iv
LISTA DE TABELAS	ix
LISTA DE ABREVIATURAS E DE SIGLAS.....	x
SUMÁRIO	xi
1 INTRODUÇÃO	14
1.1 Relevância, delimitação e justificativas do estudo	14
1.2 Objetivos do trabalho	15
1.3 Estrutura do trabalho de pesquisa	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1 Introdução e definições	17
2.2 Classificações e emprego	19
2.2.1 Refratários ácidos e básicos	21
2.3 Consumo e desgaste de refratários na siderurgia	25
2.3.1 Evolução histórica.....	25
2.3.2 Principais propriedades e mecanismos de desgaste de materiais refratários usados na siderurgia	27
2.4 Engenharia e aplicação dos materiais refratários	28
2.5 Desempenho e estudo <i>post-mortem</i> de materiais refratários	30
2.6 Refratários utilizados em painéis de transporte de aço nas aciarias.....	32
2.6.1 Importância	32
2.6.2 Tipos de refratários utilizados em painéis de aço da aciaria.....	33
2.6.2.1 Tijolos de MgO-C	40
2.6.2.2 Tijolos de Al ₂ O ₃ -MgO-C	42
2.6.3 Desgaste de refratários em painéis de aço da aciaria	43
2.6.3.1 Introdução	43
2.6.3.2 Influência da basicidade e do teor de Al ₂ O ₃ da escória no processo de desgaste dos refratários das painéis.....	45
2.6.3.3 Influência de fluidificantes (CaF ₂ , MnO e Na ₂ O) da escória no processo de desgaste do refratário das painéis	47
2.6.3.4 Influência do carbono no processo de desgaste do refratário das painéis	49
2.6.3.5 Desgaste de refratário do tipo Al ₂ O ₃ -C.....	53
2.6.3.6 Desgaste de refratário do tipo Al ₂ O ₃ -MgO-C.....	54
2.6.3.7 Desgaste de refratário do tipo MgO-C	55
2.6.3.8 Desgaste de refratário da linha de escória das painéis	59
2.7 Principais testes, ensaios, análises e propriedades dos refratários.....	61
2.7.1 Teste de refratariedade.....	62
2.7.2 Teste de densidade e gravidade específica	62

2.7.3	Teste de gravidade específica, porosidade aparente e percentagem de absorção de água	63
2.7.4	Análise química em materiais refratários	64
2.7.5	Resistência à hidratação	64
2.7.6	Resistência à compressão	65
2.7.7	Módulo de ruptura	65
2.7.8	Resistência à tensão	65
2.7.9	Módulo de elasticidade	65
2.7.10	Energia de fratura (tenacidade a fratura)	65
2.7.11	Deformação em elevadas temperaturas (Fluência)	66
2.7.12	Resistência à abrasão	66
2.7.13	Expansão térmica	67
2.7.14	Condutividade térmica	67
2.7.15	Resistência ao choque térmico	67
2.7.16	Análise microestrutural via microscopia óptica	67
2.7.17	Análise microestrutural via microscopia eletrônica	68
3	MÉTODOS E MATERIAIS	69
3.1	Introdução	69
3.2	Coleta, preparação e análises dos dados operacionais (vida versus variáveis de operação)	70
3.3	Análises experimentais através de estudo de post-mortem	72
3.3.1	Coletas das amostras	74
3.3.2	Preparação das amostras	76
3.3.3	Estudo <i>post-mortem</i> via microscopia óptica e eletrônica	77
3.4	Construção do modelo final de previsão da vida da panela em função das variáveis operacionais	78
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	79
4.1	Análise da influência dos principais fatores (variáveis operacionais) na vida das panelas de aço	79
4.1.1	Análise da influência dos conversores na vida das panelas	80
4.1.2	Influência das temperaturas de processo	88
4.1.3	Influência das classes dos aços	92
4.1.4	Influência das máquinas de lingotamento	95
4.1.5	Influência das rotas/tratamentos metalúrgicos	99
4.1.5.1	Análise individual das rotas/tratamentos metalúrgicos	100
4.1.5.2	Análise por grupos de rotas/tratamentos metalúrgicos	109
4.1.6	Influência dos tempos operacionais	119
4.1.6.1	Influência do tempo de vazamento do aço dos conversores na panela	119
4.1.6.2	Influência do tempo de panela cheia	121
4.1.6.2.1	Influência dos tempos de tratamento no refino secundário	123
4.1.7	Influência da oxidação	135
4.1.8	Influência das condições da panela	136
4.1.9	Influência da tonelagem das panelas	141
4.1.10	Influência do uso de plug e lança de injeção de gases	142
4.1.11	Influência do tipo de aço	143
4.1.12	Influência das adições e das escórias	152
4.1.12.1	Influência das adições de nefelina	153

4.1.12.2	Influência das adições de CASI e FECAAL.....	155
4.1.12.3	Influência das adições de ligas de manganês	156
4.1.12.4	Influência das adições de alumínio.....	157
4.1.12.5	Influência das adições de escória sintética	158
4.1.12.6	Influência da escória de panela.....	159
4.2	Análise dos principais mecanismos de desgaste identificados no estudo <i>post-mortem</i>	162
4.3	Determinação da equação geral multivariada de previsão da vida das placas de aço.	169
5	CONCLUSÕES.....	177
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	179
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	180
	APÊNDICE I – RESULTADOS DAS ANÁLISES ANOVA DA COMPARAÇÃO ENTRE AS MÉDIAS DAS TEMPERATURAS DE FINAL DE SOPRO ENTRE OS CONVERSORES LD’S 5, 6 E 7.	185
	APÊNDICE II – RESULTADOS DAS ANÁLISES ANOVA DA COMPARAÇÃO ENTRE AS MÉDIAS DAS TEMPERATURAS DO AÇO NA PANELA VAZADOS DOS CONVERSORES LD’S 5, 6 E 7.	186
	APÊNDICE III – RESULTADOS DAS ANÁLISES ANOVA DA COMPARAÇÃO ENTRE AS MÉDIAS DAS VIDAS DAS PANELAS.	187
	APÊNDICE IV – RESULTADOS DAS ANÁLISES ANOVA DA COMPARAÇÃO ENTRE AS MÉDIAS DOS % DE ROTA DESSULFURADO (%DS) DAS PANELAS.....	190

1 INTRODUÇÃO

1.1 Relevância, delimitação e justificativas do estudo

Dentre os diversos tipos de materiais utilizados na indústria siderúrgica podemos destacar os materiais refratários, sendo estes muito utilizados como revestimento de equipamentos e vasos de transporte de gusa e aço nas aciarias de todo mundo. O uso intensivo de refratários nas usinas siderúrgicas é devido às propriedades que estes compostos apresentam como: elevada temperatura de início de fusão, resistência estrutural elevada em altas temperaturas e em ambientes altamente corrosivos, estabilidade diante de variações térmicas intensivas, etc.

A *The Technical Association of Refractories* (TAR), em seu livro *Refractories Handbook* define materiais refratários como “materiais não metálicos que são difíceis de serem fundidos em temperaturas elevadas” (THE TECHNICAL ASSOCIATION OF REFRACTORIES, 1998, p.2). Segundo Routschka (2004, p.1) “refratários são materiais cerâmicos não metálicos”. Os compostos refratários são basicamente óxidos ou misturas de óxidos com elevado ponto de início de fusão e estabilidade físico-química, podendo apresentar outros constituintes como: carbono, carbetos, nitretos e boretos (LENZ E SILVA, 2007).

A indústria siderúrgica é a maior consumidora de materiais refratários (cerca de 70 % do mercado mundial), o que representa, em especial para as aciarias, um expressivo dispêndio e tem levado os representantes desse setor a reflexões a respeito de sua utilização (QUINTELA, 2003). Além disso, os custos envolvidos indiretamente com eventuais paradas dos equipamentos devido ao desgaste acentuado dos refratários podem trazer prejuízos com relação à queda de produção. Fator relevante também é com relação à segurança operacional, na qual o desgaste refratário acentuado dos equipamentos pode causar acidentes irreparáveis com relação à vida humana.

Devido ao exposto acima e a outros motivos, as várias áreas científicas e tecnológicas, como pesquisa e desenvolvimento, engenharia de manufatura, engenharia de aplicação vêm buscando desenvolver diversos tipos de materiais refratários, assim como, buscando soluções para produzir e reduzir o consumo destes materiais nas diversas áreas operacionais, principalmente nas aciarias a LD.

Portanto, busca-se com este trabalho compreender quais as variáveis operacionais que impactam a vida do refratário das placas de transporte\tratamento de aço da Aciaria da Usina Siderúrgica de Cubatão-Usiminas e, posteriormente desenvolver e aplicar um modelo de gestão que melhore o desempenho (vida) de suas placas de transporte\tratamento de aço, assim como, a segurança operacional dos equipamentos e pessoas.

1.2 Objetivos do trabalho

Construir e avaliar modelos determinísticos estáticos capazes de correlacionar as variáveis operacionais (tipo de aço, temperatura de vazamento, rota metalúrgica, tipo de tratamento, tipo de escória, nível de oxidação, etc.) com o desgaste (vida) dos refratários das placas de aço da Aciaria da Usiminas na Usina de Cubatão ao longo de sua campanha. Desta forma, buscar-se-a determinação das principais variáveis operacionais que impactam a vida das placas de aço e a otimização do desempenho das placas (vida) e segurança operacional (residual final) destes reatores metalúrgicos e da própria Aciaria.

1.3 Estrutura do trabalho de pesquisa

O presente trabalho está estruturado em seis capítulos, incluindo este introdutório no qual é feita a contextualização, delimitação e a definição dos objetivos, e quatro apêndices que apresentam resultados adicionais das análises estatísticas dos testes de hipóteses feitos durante as análises de resultados. No Capítulo 2, é apresentada a “Revisão Bibliográfica”, para compreender os principais tipos e mecanismos de desgaste de refratários de placa. No Capítulo 3, “Materiais e Métodos”, são relatados os procedimentos adotados para construção e análise do banco de dados das diversas variáveis de processo e vida refratária, assim como dos procedimentos de análise no estudo de *post-mortem* nos refratários da placa. No Capítulo 4, “Resultados e Discussões”, são apresentados os resultados encontrados na análise dos dados operacionais e do ensaio de *post-mortem* e a discussão sobre a construção dos modelos determinísticos e do mecanismo de desgaste refratário atuante nas placas. No Capítulo 5, “Conclusões”, é apresentado um resumo conclusivo deste trabalho abordando os fatos relevantes do processo de degradação

refratária das painéis de transporte de aço. No Capítulo 6, “Sugestões para Trabalhos Futuros”, são sugeridos temas relevantes para dar continuidade e aprofundamento em tópicos relevantes desta dissertação.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Introdução e definições

Os materiais refratários devidos à suas excelentes propriedades, principalmente em temperaturas elevadas, possuem uma grande variedade de aplicações em setores diversos da indústria. Logo, uma primeira definição do que é um material refratário seria o de materiais que podem suportar, sem se deformar ou fundir, temperaturas elevadas em condições específicas de emprego (PORTAL SABER LIVRE, 2015).

Uma definição mais técnica e acadêmica do que é um material refratário é feita pela Associação Técnica de Refratários do Japão da seguinte maneira:

Refratários são materiais não metálicos de difícil fusão em temperaturas elevadas, como materiais conformados que suportam temperaturas elevadas ($>1500^{\circ}\text{C}$), materiais não conformados (geralmente massas refratárias) e massas de injeção cujas temperaturas de trabalho estão ao redor de 800°C . (TECHNICAL ASSOCIATION OF REFRACTORIES, 1998, p.1)

Na definição acima o termo suportar está relacionado à manutenção das propriedades destes materiais mesmo em condições severas de temperatura. Além disso, os refratários apresentam maior resistência a ataques químicos por compostos como metais/ligas metálicas líquidas e escórias.

Os refratários possuem resistência mecânica e resistência ao aquecimento suficiente para suportar rápidas elevações e variações de temperatura, assim como alta resistência a corrosão e erosão química oriundas de metal e escórias líquidas. (TECHNICAL ASSOCIATION OF REFRACTORIES, 1998, p.1)

Essas características fazem com que exista uma imensa variedade de aplicações e mercados para os produtos cerâmicos refratários. Segundo Nakagawa (2001), os materiais refratários são utilizados em grande quantidade nos diferentes setores da indústria de base como componentes de diversas partes dos equipamentos fabris.

Devido à sua boa estabilidade térmica os materiais refratários são utilizados em fornos, incineradores, reatores químicos e outras aplicações em indústrias como as de metais ferrosos e não ferrosos, cerâmicas, vidros, química, etc. (THE TECHNICAL ASSOCIATION OF REFRACTORIES, 1998).

A Figura 1 ilustra o mercado dos produtos refratários.

Figura 1 – Distribuição do mercado de aplicação dos produtos refratários; fonte: referência (LENZ E SILVA, 2007).

Como pode ser visto na da Figura 1, os maiores percentuais de aplicação e consequentemente do mercado dos materiais refratários estão na siderurgia. Portanto, espera-se um consumo expressivo deste tipo de material com conseqüente desembolso e custo para as operações das usinas siderúrgicas.

A indústria siderúrgica é o principal consumidor de materiais refratários, correspondendo a cerca de 70 % do mercado mundial. Isso representa um expressivo dispêndio e tem preocupado esse setor desde o início de suas atividades. Além disso, as freqüentes paradas para manutenção de refratários, sobretudo aquelas não programadas, interrompem as atividades operacionais concorrendo indiretamente para elevar os custos de produção do aço. (QUINTELA, 2003, p.5)

Além disso, o desenvolvimento dos produtos refratários vem sendo guiado principalmente pelas necessidades da indústria siderúrgica (SEMLER, 2000).

Praticamente todas as grandes indústrias produtoras de materiais como ferro e aço, cimento, vidro, química e petroquímica utilizam algum tipo de material cerâmico refratário no revestimento de seus reatores para sua proteção e desgaste, já que as temperaturas de trabalho (algumas acima de 1000°C) são elevadas (EUROPEAN REFRACTORIES PRODUCERS' FEDERATION, 2009).

Os refratários são responsáveis por limitar o desgaste por corrosão e reduzir as perdas de calor dos reatores (EUROPEAN REFRACTORIES PRODUCERS' FEDERATION, 2009; RAAD, 2008) e, de modo geral, seria praticamente impossível a fabricação de materiais como aço, cimento, cobre, vidro, etc., indispensáveis para

a sociedade atual, sem a utilização de algum tipo de material cerâmico refratário que suporte as condições extremas as quais os reatores estarão submetidos em termos de temperaturas, pressões e reações químicas (EUROPEAN REFRACTORIES PRODUCERS' FEDERATION, 2009).

Estima-se que o consumo médio de refratários nos últimos anos no Brasil tem sido algo ao redor de 13,6 kg/t de aço, sendo que as aciarias consomem algo entre 5 e 15 kg/t, na sua maior parte nas panelas de transporte de aço (BRAGANÇA, 2012; BRASIL, 2016; FERREIRA, 2010; WORLD STEEL ASSOCIATION, 2011).

Entretanto o tipo de material refratário a ser utilizado dependerá da aplicação e das condições a que este material será submetido. O projeto de revestimento refratário consiste na concepção, especificação e quantificação através do uso dos diversos tipos e classes de materiais refratários envolvidos em um equipamento que venham a refletir numa adequação técnica e econômica às condições específicas de cada equipamento (COUTINHO, 2000; FERREIRA, 2010).

2.2 Classificações e emprego

Os produtos refratários podem ter uma gama imensa de aplicações. Estas aplicações estão relacionadas com as propriedades que estes possuem que por sua vez estão relacionadas com sua microestrutura e composição química. Para uma melhor compreensão e aplicação destes materiais faz-se necessário classificá-los e, posteriormente, empregá-los nas diversas condições de operação.

Segundo Freitas (1993), podemos classificar os materiais refratários em dois grupos principais: o grupo dos materiais conformados, que podem ser definidos como materiais refratários moldados antes de sua aplicação final, como, por exemplo, tijolos, placas, válvulas, etc., e o grupo dos materiais não-moldados, ou monolíticos, identificados por serem moldados no momento da aplicação, como, por exemplo, os concretos, as argamassas, as massas de projeção e moldagem.

Na Tabela 1 estão resumidas possíveis classificações adotadas em refratários, com 12 critérios de classificação abrangendo os principais tipos de características que podem ser medidas ou mensuradas.

Tabela 1 – Classificações usuais dos produtos refratários; fonte: referência (LENZ E SILVA, 2007).

Critério	Características	
Quanto à presença de argila	Argilosos	Sílico-aluminosos, etc.
	Não Argilosos	Magnésia-carbono, cromo-magnesianos, sílica, etc
Quanto ao tipo de matéria-prima	Naturais	Bauxita, grafita, cianita, andalusita, silimanita, dolomita, magnesita, etc.
	Sintéticos	Magnésia eletrofundida, mulita fundida, sílica, carbeto de silício, etc.
Quanto à composição química majoritária	Aluminosos	Alumina, Alta-Alumina
	Sílico-Aluminosos	Mulita, alumina-mulita, etc.
	Cromo-Magnesianos	Magnésia-crômica
	Alumina-Carbono	Alumina-carbono
	Magnésia-Carbono	Magnésia-carbono
	Dolomíticos	Dolomita (cálcio+magnésia)
Quanto à acidez/basicidade	Zircônia	Zircônia (total ou parcialmente estabilizada por cálcio ou ítria)
	Ácidos	Sílica
	Básicos	Magnesia-carbono, dolomita queimados, magnésia
	Neutros	Crômica
Quanto ao tipo de processamento/aplicação	Conformados	Tijolos, tijolos isolantes, válvulas, luvas
	Não-Conformados	Concretos, argamassas, massas de projeção, massas de socagem
	Pré-Moldados	"Snorkels", lanças de injeção de gases/particulados,
Quanto à densidade	Densos	Tijolos, luvas, válvulas, etc.
	Não Densos	Tijolos isolantes, fibra-cerâmicas
Quanto ao tipo de reação química em serviço	"In Situ"	Tijolos e concretos contendo antioxidantes, espinelizáveis, etc.
	"Ex Situ"	Tijolos Queimados
Quanto ao tipo de ligação química	Liga Direta	MgO-Cr ₂ O ₃
	Religados	MgO-Cr ₂ O ₃
	Ligação via ácido fosfórico	Concretos
	Ligação via cromato	Arganassas
	Ligação via argila	Diversos
Quanto ao tipo de fonte de carbono	Ligados a piche	Dolomíticos, magnésia-carbono
	Ligados a Resina	Magnésia-carbono, alumina-magnésia-carbono, alumina-carbeto de silício-carbono, etc.
Quanto ao tipo de piche	Piche Líquido	Dolomíticos, magnésia-carbono, etc.
	Piche Sólido	Magnésia-carbono, alumina-magnésia-carbono, alumina-SiC-carbono, etc
Quanto ao tipo de impregnação	Impregnados com piche	Magnésia-carbono, placas de alumina-carbono
	Não impregnados	Magnésia-carbono, alumina-carbono, alumina-carbeto de silício-carbono, etc.
Quanto ao tipo de aplicação em serviço	Projetado	Diversos
	Vibrado	Diversos
	Vertido	Diversos
	Pré-Moldados	Diversos, incluído concreto, tijolos e isolantes

Um tipo clássico de classificação dos materiais refratários é com relação ao seu comportamento ácido-básico, expresso pela capacidade de recepção e doação do íon (O^{2-}). Esta característica também pode ser simplificada descrita pela % de CaO/SiO_2 (basicidade binária). De acordo com esta relação podemos ter 2 grandes grupos, a saber: refratários ácidos e básicos. Esta classificação é de extrema utilidade já que facilita o entendimento das transformações, reações e estabilidade dos principais sistemas refratários (LENZ E SILVA, 2007). Contudo:

[...] quando se utiliza este tipo de classificação alguns tipos de refratários acabam não tendo enquadramento em nenhum destes 2 grupos, como por exemplo, os boretos, carbetos, nitretos, etc., sendo estes enquadrados em um grupo chamado de refratários especiais. (LENZ E SILVA, 2007, p.275)

2.2.1 Refratários ácidos e básicos

A Tabela 2 traz o resumo dos principais grupos de refratários ácidos a base de sílica com seus limites de composição química em termos de alumina. Já a Tabela 3 mostra os principais grupos de concretos à base de aluminato de cálcio (CAC's).

Tabela 2 – Classificação dos refratários ácidos à base de sílica; fonte: referência (LENZ E SILVA, 2007).

Refratários	Sub Grupo	Teor de Al_2O_3 (% em massa)
Sílica		<7%
Sílico Aluminosos	Sílicosos	7 a 22%
	Sílico-Aluminosos	22 a 38%
	Aluminosos	38 a 50%
Alta Alumina	Silimanita	50 a 65%
	Mulita	65 a 75%
	Coridon e Bauxito	75 a 98%

Tabela 3 – Principais grupos de concretos à base de aluminato de cálcio; fonte: referência (LENZ E SILVA, 2007).

Classificação	Teor de CaO (% em massa)
Concretos Convencionais (CC)	>2,5%
Concretos de Baixo Teor de Cimento (CBC)	1% a 2,5%
Concretos de Ultra Baixo Teor de Cimento (CUBC)	0,2% a 1%
Concretos sem Cimento	<0,2%

Com o advento dos fornos básicos a oxigênio houve uma gradual mudança na demanda por refratários, na qual os refratários ácidos foram sendo substituídos pelos refratários básicos (CHESTERS, 1993).

Com relação aos refratários básicos, podemos destacar os refratários magnesianos que, segundo Lenz e Silva (2007, p.282), “possuem a magnésia (MgO) como principal óxido e na maioria das vezes como componente majoritário”. Este autor afirma ainda que:

As variações existentes destes sistemas de óxidos englobam o MgO, MgO-CaO, MgO-Cr₂O₃, MgO-Al₂O₃, MgO-C, Al₂O₃-MgO-C fazendo com que o campo de utilização deste grupo se estenda de revestimentos de fornos de cimento e calcinação, revestimentos de painéis de aço, passando por reatores e desgaseificadores (RH, VOD, AOD), convertedores LD e fornos elétricos a arco. (LENZ E SILVA, 2007, p.282)

Em contrapartida aos refratários à base de sílica, os à base de magnésia tiveram sua demanda elevada com o desenvolvimento dos fornos básicos a oxigênio. Devido ao seu elevado ponto de início de fusão (acima de 2800 °C), resistência ao ataque por óxidos de ferro, álcalis, etc. a magnésia e seus refratários se tornaram uma excelente opção para os diversos tipos de fornos (CHESTERS, 1993).

A magnésia pode ser obtida por decomposição do carbonato de magnésio (MgCO₃) ou por precipitação do hidróxido de magnésio utilizando a água do mar.

Outro tipo especial de material refratário são os dolomíticos. Este grupo foi desenvolvido na Inglaterra durante a segunda guerra mundial como resultado de estudos de grupos diversos que foram publicados no Instituto de Ferro e Aço em 1946 (CHESTERS, 1993).

Este grupo possui a dolomita, carbonato de cálcio e magnésio (CaMg(CO₃)₂), como a principal fonte de matéria prima para sua fabricação. A decomposição deste carbonato gera a Cálcia (CaO) e a Magnésia (MgO) que são compostos básicos dos tijolos dolomíticos. (LENZ E SILVA, 2007, p.285)

É possível dividir este grupo de refratários em duas categorias, os dolomitos queimados e os dolomitos ligados a piche. Segundo Lenz e Silva (2007, p.286):

A primeira classe é utilizada em zonas de queima de fornos de cimento, já a segunda classe pode ser considerada como a precursora dos modernos tijolos de magnésia-carbono, tendo acompanhado todo o desenvolvimento dos processos de refino primários nos conversores a oxigênio.

Atualmente “os tijolos dolomíticos são empregados em fornos elétricos a arco, em convertedores a oxigênio e em revestimento refratário de painéis de aço” (LENZ E SILVA, 2007, p.286).

Dentro desta classificação destacam-se ainda os refratários cromíticos, os magnesianos - cromíticos, cromíticos - magnesianos e os espinélio, sendo esse último os compostos do tipo $MO \cdot M_2O_3$. Destaca-se o espinélio $MgO-Al_2O_3$, pois é um composto largamente encontrado em revestimentos refratários de painéis de transporte de aço na forma de $Al_2O_3-MgO-C$ (LENZ E SILVA, 2007).

Podemos citar como grupo de refratários de particular importância, os refratários que contém carbono, sendo estes amplamente utilizados no setor siderúrgico, em especial, os refratários de $Al_2O_3-SiO_2-C$, $Al_2O_3-SiO_2-SiC-C$, $MgO-C$ (BROWN; WHITE, 1986; SAKANO; TAKAHASHI, 1988; COOPER, 1980). De acordo com Lenz e Silva (2007, p.290) “a utilização de carbono em refratários não é nova, seu emprego foi, e ainda é, importante nos refratários à base de dolomita resinados ou ligados a piche”.

Porém, a partir da década de 1970, com a utilização de grafita e resina no sistema $MgO-C$ e a expansão do seu uso para outros sistemas refratários como: Al_2O_3-C ; $Al_2O_3-MgO-C$; $Al_2O_3-SiC-C$; $Al_2O_3-MgO-SiC-C$; $Al_2O_3-ZrO_2-C$, etc. transformaram os materiais: óxido refratário + carbono (grafita + ligante orgânico) + antioxidantes, nos principais materiais compósitos de alta tecnologia e de elevado desempenho, capazes de suportar condições operacionais cada vez mais agressivas e complexas. (LENZ E SILVA, 2007, p.290)

Os sistemas refratários formados pelo conjunto (óxidos + grafita) podem ter composições tão variáveis quanto as suas aplicações, porém são basicamente misturas de um ou mais óxidos, contendo carbono de 1 a 35 % para aplicações desde altos-fornos até as painéis para transporte e refino secundário do aço líquido, passando por desgaseificadores, convertedores a oxigênio, fornos elétricos, painéis de transporte e tratamento do gusa líquido e carro-torpedos (LENZ E SILVA, 2007).

Uma observação importante de ser feita é que o composto (carbono/grafita + óxido/antioxidante) é capaz de modificar o comportamento termo-mecânico e termoquímico do material refratário de modo que as propriedades do conjunto sejam superiores a dos componentes separadamente (LENZ E SILVA, 2007).

Em termos gerais, o carbono/grafita muda a tensão superficial do refratário diminuindo a molhabilidade por metais e escórias líquidas. Outro ponto importante são as reações entre os óxidos + antioxidantes com o carbono em elevadas temperaturas (especialmente $\text{MgO}+\text{C}$) capazes de diminuir a porosidade da face quente do refratário em virtude de processos de redução/oxidação do óxido de magnésio e mudanças do potencial de oxigênio do sistema: refratário-escória-metal. (LENZ E SILVA, 2007, p.291)

Além disso, podemos destacar para este tipo de refratário os diversos tipos de carbono que podem ser encontrados como, por exemplo, carbono grafita, carbono livre derivado de resinas e carbono formado pelas reações entre antioxidantes e $\text{CO}_{(g)}$ (YAMAGUCHI; ZHANG, 1996).

O emprego correto (tipo e quantidade adicionada) de antioxidantes são as variáveis mais importantes para a especificação de um refratário do tipo óxido+carbono, pois a maioria das transformações químicas “in situ” está relacionada com modificações estruturais, termomecânicas e físico-químicas durante a campanha do refratário.

Os refratários contendo carbono possuem excelentes características, entretanto a facilidade com que o carbono reage com o oxigênio faz com que este tipo de refratário seja facilmente oxidável em ambientes ricos em oxigênio, logo o uso de antioxidantes em refratários contendo carbono é de suma importância para evitar o processo corrosivo (por oxidação). Além disso, a reação de antioxidantes como Al e Si com o carbono da estrutura refratária forma compostos como carbetos de silício e alumínio que posteriormente formam uma superfície protetora no próprio refratário reduzindo a porosidade e aumentando a resistência à corrosão (YAMAGUCHI, 2006).

A Tabela 4 apresenta os principais sistemas refratários do tipo: óxido + carbono + antioxidante, utilizados em siderurgia. Além disso, esta tabela traz os diversos equipamentos utilizados nas usinas siderúrgicas nos quais este tipo de refratário é empregado. Vale destacar na Tabela 4 que este tipo de sistema refratário é amplamente utilizado em painéis de transporte de aço, objeto de estudo deste trabalho.

Tabela 4 – Principais sistemas refratários de óxido + carbono utilizados em siderurgia; fonte: referência (LENZ E SILVA, 2007).

Sistema	Equipamento
MgO-C	Panelas de aço para transporte e refino (linha de metal e/ou escória) Convertedores a oxigênio (LD/BOF) Forno Elétrico a Arco (FEA)
MgO-CaO-C	Panelas de aço de aciarias elétricas (aços acalmados ao silício)
MgO-Al ₂ O ₃ -C	Panelas de aço (linha de metal e região de impacto), placas de mecanismo de válvula gaveta, panelas de transporte de gusa
Al ₂ O ₃ -C	Válvulas longas e submersas, carros torpedos impregnados
Al ₂ O ₃ -ZrO ₂ -C	Placas de mecanismos de válvulas gavetas
Al ₂ O ₃ -SiC-C	Carros torpedos, panelas de gusa com dessulfuração na panela
Al ₂ O ₃ -MgO-SiC-C	

BOF - Forno básico a oxigênio; LD – Linz Donawitz; FEA – Forno elétrico a arco.

Finalizando, temos ainda os refratários especiais que incluem poucos tipos de sistemas, entre eles os refratários de zircônia (parcial ou completamente estabilizadas), ZrO₂-Al₂O₃-SiO₂, além de algumas classes de refratários de alta alumina ligados à SIALON (SiO₂-Al₂O₃-N), carbetos, boretos, silicetos, nitretos (LENZ E SILVA, 2007).

Entretanto, o seu emprego é restrito e bastante específico. Duas aplicações clássicas dos refratários de zircônia em lingotamento contínuo são em válvulas de sistemas de controle de vazamento de aço líquido (válvula superior e/ou em insertos) ou como adições em refratários de placas deslizantes. (LENZ E SILVA, 2007, p.294)

Em relação aos refratários contendo zircônia ou zircônio, em especial, os refratários de MgO-C, estes podem ter suas propriedades modificadas à medida que a zircônia é adicionada sendo que, a adição deste composto, aumenta a resistência ao choque térmico e reduz o desgaste por corrosão de escórias (BENJUN et al., 1996; KRAUSE et al., 1985).

2.3 Consumo e desgaste de refratários na siderurgia

2.3.1 Evolução histórica

Ao longo dos anos com as diversas inovações tecnológicas e muita pesquisa e desenvolvimento houve intenso progresso com relação a novos materiais refratários. Vale lembrar que a própria evolução, com relação às aciarias, fez com que os

refratários ácidos fossem substituídos pelos refratários básicos com melhores atributos de resistência e qualidade.

Através da redução do consumo de refratário por tonelada de aço produzida (kg/t. de aço) ao longo dos anos é possível observar indiretamente a evolução tecnológica deste tipo de material (LENZ E SILVA, 2007). Estima-se que nos últimos 50 anos houve uma redução do consumo de refratários no mundo da ordem entre 40 a 80%, sendo que esta redução se deve principalmente ao aumento de P&D, melhorias nas matérias-primas, produção e instalação dos equipamentos (ESCHNER, 2002). No Brasil a redução no consumo de refratários nos últimos anos segue a mesma tendência mundial baseada nos mesmos fundamentos apresentados acima. Entretanto esta redução se contrapõe ao aumento e produção dos principais segmentos industriais consumidores de refratários (TORRES et. al, 1999). A Figura 2 ilustra a argumentação acima.

Figura 2 – Evolução do consumo específico de refratários; fonte: referência (LENZ E SILVA, 2007).

Além da evolução tecnológica, outro fator impactante na redução do consumo de refratários foi a redução da demanda por aço e consequentemente por refratários a partir da década de 70 onde o excesso de capacidade causou um descompasso com a falta de demanda (SEMLER, 2003).

Embora o desgaste de tijolos refratários seja inerente ao processo de produção de aço, procura-se sempre reduzir ao máximo este desgaste a fim de prolongar a vida útil dos refratários e assim minimizar custos (TROMMER, 2007).

Ainda, segundo Quintela (2003, p.1):

Embora o consumo específico de refratários tenha sido reduzido consideravelmente nas últimas décadas, os elevados custos com a sua manutenção e o potencial para ampliar a disponibilidade das panelas para operação de refino secundário dos aços têm se destacado como relevantes e prioritários, despertando grande interesse no setor siderúrgico.

Alguns exemplos de consumos específicos médios de refratários utilizados em diversos tipos de indústrias (10 kg/t.aço, 4 kg/t.vidro, 1 kg/t.cimento) como a do aço, vidro e cimento, respectivamente, são listadas em European Refractories Producers' Federation (2009).

2.3.2 Principais propriedades e mecanismos de desgaste de materiais refratários usados na siderurgia

Os diferentes ambientes de trabalho e solicitações as quais os materiais refratários são impostos requerem destes, propriedades especiais. Abaixo são listadas as principais propriedades que vão diferir os refratários quanto a sua aplicação e desempenho de acordo com (LENZ E SILVA, 2007).

- Densidade
- Porosidade
- Módulo de Elasticidade
- Refratariedade
- Resistência à Abrasão e Erosão
- Resistência Mecânica (compressão e flexão)
- Resistência Mecânica sob carga em elevada temperatura
- Resistência à Oxidação
- Resistência por Ataque de Fundentes e Escórias
- Expansão Térmica e Dilatação Reversível
- Condutividade Térmica

Além disso, segundo Bilgiç (2005), os principais mecanismos de desgaste de refratários podem ser listados da seguinte maneira:

- Corrosão química
- Hidratação
- Infiltração por aço e escória

- Oxidação
- Erosão mecânica
- Desgaste e impacto mecânico
- Tensões termomecânicas
- Fadiga Termomecânica

Já os principais fatores que podem propiciar os mecanismos acima podem ser listados da seguinte maneira (BILGIÇ, 2005):

- Procedimento de pré-aquecimento
- Condições de injeção de gases
- Radiação de arco elétrico
- Práticas de manutenção de refratários
- Tempos de operação
- Temperatura de operação
- Design dos vasos
- Injeção de cálcio silício (CaSi).
- Processos de dessulfuração

Ainda, segundo Oliveira (2005), no caso de panelas de aço as solicitações ao refratário variam em função das diferentes regiões da panela sendo que para cada região haverá um ou mais tipos de refratários adequados de acordo com o tipo de solicitação.

2.4 Engenharia e aplicação dos materiais refratários

Quando se fala em tecnologia e desenvolvimento de materiais refratários, três áreas de conhecimentos cobrem praticamente todo o ciclo de desenvolvimento, fabricação e aplicação desses materiais, a saber: Pesquisa e Desenvolvimento, Engenharia de Manufatura e Processo, Engenharia de Aplicação e Assistência Técnica (LENZ E SILVA, 2007). A Figura 3 traz as inter-relações entre as diversas áreas de desenvolvimento dos produtos refratários.

Já a Tabela 5 mostra os principais nichos de aplicações das ferramentas utilizadas nas três áreas de desenvolvimento da engenharia de materiais refratários.

Figura 3 – Inter-relação entre as diversas áreas de desenvolvimento de produtos refratário; fonte: referência (LENZ E SILVA, 2007).

Tabela 5 – Desdobramentos das principais áreas de atuação da engenharia de refratários (LENZ E SILVA, 2007).

Áreas	Principais Níveis de Atuação
Pesquisa e Desenvolvimento	Engenharia de microestrutura e estudos "post-mortem"; Inovação tecnológica (sistemas cerâmicos e ligantes); Simulações computacionais (FEM, CFD- Fluidodinâmica Computacional); Testes e caracterizações laboratoriais (físico-químicos, termomecânicos, microestruturais, etc.); Modelamento estatístico, análise multivariada e de regressão; Planejamento e otimizações estatística; Meio ambiente e reciclagem de materiais.
Engenharia de Manufatura e de Produção	Automação e robotização de processos; Controle estatístico e otimização dos processos fabril; Gerenciamento da rotina e dos custos; Controle e garantia de qualidade; Gestão e controle da produção (simulação de estoques e gestão de suprimentos);
Engenharia de Aplicação e Assistência Técnica	Engenharia de projeto, de concepção de produtos e de aplicação assistidas por computadores (CAD); Simulações computacionais (FEM e CFD- Fluidodinâmica Computacional); Modelamento de processos e evolução de desempenho; Técnicas de reparos, de manutenção e de aplicação refratária.

De acordo com a Tabela 5 é possível, através de modelamento estatístico (análises uni e multivariada, regressão estatística, etc.) identificar os principais fatores que influem em determinados parâmetros como desgaste de refratários (em termos de desempenho de vida), o que será o objeto de estudo deste trabalho. Além disso, a análise *post-mortem* indicada na Tabela 5 será utilizada neste estudo como forma de identificar ou supor sobre os mecanismos de desgaste predominantes no refratário da panela de transporte de aço.

A análise de regressão visa à determinação na forma funcional ($y=y_0 + y_1x_1+ y_2x_2 + y_2 x_1x_2+...+y_nx_1x_2...x_m + \varepsilon$) do relacionamento entre as variáveis de interesse, possibilita fazer inferências sobre os parâmetros da equação de regressão e estimar ou prever a resposta média para um dado valor de entrada (LENZ E SILVA, 2007). A análise *post-mortem* visa avaliar os mecanismos e causas das falhas dos materiais refratários.

2.5 Desempenho e estudo *post-mortem* de materiais refratários

Quando se fala em desempenho dos materiais refratários, este, “depende de uma série de fatores que vão desde a escolha adequada da especificação técnica do projeto de engenharia até as variações operacionais dos processos metalúrgicos” (LENZ E SILVA, 2007, p.296).

A Figura 4 apresenta o diagrama das relações usuais que determinam o desempenho de um refratário. Nela estão descritas as principais variáveis de projeto e processo que determinam o desempenho operacional dos refratários dos diversos equipamentos utilizados na indústria.

Basicamente, o desempenho (vida) refratário, está ligado à três grandes fatores (variáveis):

- Processos e Operação
- Manutenção
- Engenharia Refratária

Figura 4 – Relação entre os principais fatores determinantes no desgaste dos refratários em geral; fonte: referência (LENZ E SILVA, 2007).

É neste contexto que o estudo de *post-mortem* se torna fundamental, já que:

Uma das ferramentas mais úteis para a determinação das causas fundamentais das falhas dos revestimentos e entendimentos dos mecanismos de desgaste é a realização de caracterizações sistemáticas do produto refratário após o término de sua campanha. Este tipo de estudo recebe o nome de análise “post-mortem”. (LENZ E SILVA, 2007, p.296)

Através do estudo de *post-mortem* efetuado no refratário das painéis de transporte de aço no final de sua campanha é possível identificar os diversos tipos de solicitações da estrutura refratária. A Tabela 6 apresenta a sequência de etapas de um estudo *post-mortem*.

Tabela 6 – Principais etapas de um estudo “post-mortem” de produtos refratários (LENZ E SILVA, 2007).

Etapa	Tarefa	Observações e variáveis
Definição de um estudo “post-mortem”	Levantamento das condições operacionais as quais o material refratário esteve sujeito	Tempo de operação; Tratamentos metalúrgicos; Power on – off, volume e vazão de gases; Carga média transportada; Temperaturas (médias, máximas e mínimas); Paradas operacionais e intervenções mecânicas; Tipos de tratamentos metalúrgicos e escórias.
Coleta da amostra	Coleta e identificação correta do posicionamento da amostra e do reator metalúrgico	Tipo de dispositivos mecânicos para a coleta da amostra (uso de dispositivos pneumáticos, hidráulicos, água, etc.) e tempo de espera (saída de operação – coleta da amostra).
Envio da amostra	Embalagem, identificação e envio das amostras	Tempo e acondicionamento e meio de transporte das amostras.
Recebimento das amostras	Análise inicial e definição dos testes a serem realizados	Levantamento fotográfico das condições das amostras recebidas, visualização de condições iniciais: formatos, presença de trincas, cheiro, áreas oxidadas, área reagida, presença de metais e escória, etc.
Definição dos testes	Mecânicos, químicos, físicos, microscopia e microanálise, etc.	Porosidade, densidade, composição química, determinação de fases mineralógicas, seção polida, etc.
Realizações de análises e conclusões sobre os mecanismos de desgaste.	Análise, modelamento e diagnóstico da falha.	Finalização do estudo e avaliação conjunta de melhoria do produto ou processo.

2.6 Refratários utilizados em painéis de transporte de aço nas aciarias

2.6.1 Importância

Para uma operação estável e segura dos diversos processos de fabricação de aço nas aciarias de todo o mundo é indispensável a utilização de materiais refratários de boa qualidade nos revestimentos dos diversos equipamentos e vasos de transporte, como os das painéis de aço utilizadas para transportar aço líquido dos conversores às máquinas de lingotamento contínuo passando pelas diversas etapas e equipamentos de refino secundário.

Os materiais refratários têm se destacado como um insumo absolutamente indispensável à produção de aço, sendo importantes não apenas na segurança dos processos industriais, mas, também, para garantir a qualidade dos produtos siderúrgicos. São tipicamente utilizados como revestimento em vasos metalúrgicos para reação e transporte de cargas metálicas líquidas, onde experimentam os mais diversificados e severos modos de solicitações. (QUINTELA, 2003, p.5)

Face às exigências de aumento de produção e qualidade dos aços produzidos pelas aciarias se torna cada vez mais necessárias etapas e processos mais rigorosos em termos de redução de elementos químicos deletérios e incorporação de outros elementos que possam conferir aos aços as propriedades mecânicas exigidas pelos mercados consumidores. Diante disso, o refino secundário dos aços se torna indispensável e, neste caso, o desempenho do revestimento refratário das panelas de transporte de aço é cada vez mais exigido pelas condições mais severas de tratamentos metalúrgicos.

Face às limitações no controle da composição do aço no convertedor, as práticas de refino secundário nas panelas, que correspondem às diferentes operações complementares após o refino primário, abrangendo a desoxidação, injeção de gases, degaseificação a vácuo, adição de ferroligas, etc., têm assumido grande importância com a crescente demanda por produtos de alta qualidade e baixos teores de C, P, S, N e H. O contínuo aprimoramento de tais processos tem sido responsável pelo contato do revestimento refratário com escórias mais agressivas, além de temperaturas e tempos de residências do aço consideravelmente maiores, o que, por outro lado, deu um grande impulso na tecnologia dos refratários para panelas. (QUINTELA, 2003, p.8)

2.6.2 Tipos de refratários utilizados em panelas de aço da aciaria

Quando se trata de revestimentos refratários, neste caso de panelas de aço das aciarias, podemos constatar diversos tipos de compostos refratários que podem ser utilizados de acordo com as condições operacionais e exigências de tratamentos metalúrgicos empregados. De acordo com (QUINTELA, 2003, p.6), “Em síntese, o revestimento para panelas de aço pode ser composto por várias categorias de refratários, dependendo das condições metalúrgicas, tais como temperatura, tipo de aço, basicidade da escória, etc.” Além disso:

De uma forma simplificada, as panelas são vasos metalúrgicos constituídos de elementos estruturais e carcaça metálica que não se comportam como se fossem rígidos, revestida internamente com diferentes camadas de materiais refratários. (QUINTELA, 2003, p.8)

A Figura 5 ilustra alguns constituintes refratários de uma panela de aço.

Figura 5 – Representação esquemática das diferentes zonas do revestimento refratário para panelas de aço; fonte: referência (QUINTELA, 2003).

A aciaria da usina de Cubatão da Usiminas opera, em condições normais, com uma média de 25 panelas de aço com capacidade de 170 t cada. Entretanto, dispõe de uma média de 18 panelas (12 operando, 5 em aquecimento e 1 reserva) para atendimento do denominado ciclo operacional, que corresponde às operações de vazamento do aço do conversor nas panelas, transporte das panelas até as áreas de refino secundário, refino secundário, transporte das panelas até as máquinas de lingotamento, basculamento da escória e transporte até a área de pesagem e preparação de panelas e finalmente retorno a posição de vazamento de aço. As 7 demais são afastadas de operação para eventual manutenção mecânica e manutenção de refratários, que inclui a substituição total ou parcial dos refratários.

Os termos operando, em aquecimento e reservas significam, respectivamente:

- Panelas nas quais estão sendo realizadas, naquele momento, todas as etapas de recebimento, transporte e tratamento dos aços;
- Panelas que estão em aquecedores e a espera de suas entradas nas operações citadas acima; e

- Panela que não está em operação e não está em aquecimento, porém possui condições de entrar no processo desde que devidamente aquecida.

O revestimento é composto por uma camada de tijolos de trabalho (linha de escória e metal) e duas de segurança, sem isolante térmico (Figura 6). O perfil de revestimento pode ser dividido em três zonas típicas, a saber:

- Linha de escória ($\text{MgO} - \text{C}$)
- Linha de metal ($\text{MgO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{C}$)
- Sola (compreendendo a zona de impacto de aço líquido ($\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{MgO} - \text{C}$) e a sola propriamente dita ($\text{MgO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{C}$)).

Figura 6 – Representação esquemática das diferentes zonas do revestimento refratário das painéis de aço da aciaria de Cubatão; fonte: referência (USIMINAS, 2015).

A Tabela 7 mostra as faixas da composição química das diferentes regiões da estrutura refratária das painéis de transporte de aço da aciaria da usina de Cubatão da Usiminas.

Tabela 7 – Estrutura refratária das placas de aço de acordo com as especificações técnicas; fonte: referência (USIMINAS, 2015).

Linha de Escória		Linha de Metal		Fundo		Fundo (região de impacto do jato)	
Composto	(%)	Composto	(%)	Composto	(%)	Composto	(%)
MgO	85 a 90	MgO	75 a 80	Al ₂ O ₃	~ 79	Al ₂ O ₃	~ 88
C	11 a 13	Al ₂ O ₃	20 a 25	MgO	~ 6	C	~ 6
		C	5 a 8	C+ Outros	~ 15	MgO	~ 6

Após a manutenção refratária, o revestimento é submetido ao processo de secagem e pré-aquecimento até a temperatura de aproximadamente 1100°C e, subseqüentemente, a placa retorna ao ciclo operacional. Essa rota, envolvendo o ciclo operacional e a manutenção, é denominada ciclo de placas. As Figuras 7 e 8 ilustram o fluxo de produção com os diversos equipamentos da aciaria de Cubatão e o fluxo de movimentação de placas (ciclo de placas) respectivamente.

Figura 7 – Representação simplificada do fluxo de produção do aço na aciaria 2 da usina de Cubatão da Usiminas evidenciando os diferentes equipamentos de fabricação do aço; fonte: referência (USIMINAS, 2015).

Neste fluxo de processo inicialmente ocorre a preparação da carga metálica (gusa e sucata), sendo que o gusa vindo dos altos-fornos é inicialmente dessulfurado no carro torpedo e na panela de gusa para posterior carregamento nos convertedores, em paralelo a sucata é pesada e colocada nas calhas de sucata por onde ela será carregada nos convertedores. Após estas etapas de preparação da carga metálica a sucata é carregada nos convertedores e na sequência há o carregamento de gusa. Em seguida ao carregamento é iniciado o processo de transformação desta carga metálica em aço através do sopro de oxigênio com uma lança de alta vazão de $O_{2(g)}$. Além disso, são adicionados no reator fundentes, escorificante e refrigerantes para controle de processo. No final deste processo (refino primário) tem-se aço rico em oxigênio dissolvido no banho, escória, gases e fumos.

Após a etapa de refino primário, o aço é vazado em panelas de transporte de aço revestidas por refratários (objeto de estudo deste trabalho), sendo que, é a partir deste início de vazamento de aço que efetivamente a panela de transporte de aço começa o seu ciclo operacional. Durante o vazamento são adicionados alguns desoxidantes e escorificante como alumínio e Cal (fonte de CaO). Outros desoxidantes como as ligas de ferro-silício podem ser adicionados a depender do tipo de aço que está sendo fabricado. Além disso, é comum a adição de ligas de ferro-manganês e em alguns casos de coque para aços com altos teores de carbono. É neste momento que também podem ser adicionados os fluidificantes de escória como a nefelina ($NaAlSiO_4$) em casos onde o aço a ser fabricado exige baixos teores de enxofre.

Após este processo de vazamento a panela com o aço é transportada até os equipamentos do refino secundário (o tipo de equipamento depende do tipo de aço e da rota de tratamento metalúrgico) onde serão feitos os ajustes químicos e de temperatura para o posterior processo de lingotamento. Durante a etapa de refino secundário serão adicionados diversos tipos de ligas, escorificantes e fluidificantes. Caso a corrida siga para as estações do AHF ou do RH, o aquecimento será via processo de aluminotermia, caso a corrida siga para a estação do forno panela o aquecimento será via eletricidade através de eletrodos. Somente se a corrida for para a estação EBA é que não haverá aquecimento, pois, esta instalação não possui dispositivos para tal e somente é feita pequenas adições de ligas, alumínio e refrigerantes.

Outro tipo de adição que é feita, geralmente no final do processo, no refino secundário, são as adições de fios de cálcio silício (CaSi) e ferro alumínio cálcio (FeAlCA), que como será visto posteriormente são deletérios para o processo de desgaste refratário assim como as adições de nefelina.

Após todas as etapas de refino secundário a panela seguirá para uma das máquinas de lingotamento contínuo onde a mesma permanecerá durante todo tempo de processo (tempo de permanência na torre + tempo de lingotamento do aço pela máquina). Durante este período, à medida que o aço é lingotado o nível de metal líquido na panela abaixa deixando o refratário exposto a atmosfera.

A etapa seguinte é a retirada da panela da torre de lingotamento com consequente basculamento da escória remanescente desta corrida em potes apropriados. Em seguida, a panela já vazia, novamente segue para a estação de pesagem e remoção de “cascões de aço e escória”. Feitas a pesagem e limpeza a panela retorna para a estação de preparação de painéis onde serão verificadas as condições da mesma e feitos os padrões de troca e ajustes necessários para retorno da panela para os conversores onde elas receberão a próxima corrida (vazamento) de aço e iniciado todo o ciclo novamente. Este ciclo é denominado de ciclo operacional das painéis e está representado na Figura 9. A contabilização da vida da panela é feita através do número de vezes que ela faz este ciclo, ou melhor, do número de vezes ou corridas recebidas dos conversores.

Caso durante a preparação das painéis seja encontrado alguma evidência de que a panela não possa retornar ao processo ou se é constatada final da vida refratária a mesma é afastada para manutenção. Outra situação possível é que se ocorrer algum evento com os equipamentos da aciaria, impedindo o total funcionamento da produção de modo que não seja necessário o retorno imediato das painéis, elas ficarão em aquecedores a espera da próxima demanda de produção. Neste caso elas não são afastadas, mas estão disponíveis a novas demandas.

Em termos de desempenho, até 2007, a campanha média do revestimento, em termos de vida da panela estava ao redor de 130 corridas, entretanto atualmente verifica-se que os valores médios de vida da panela estão ao redor de 160 corridas.

Diante dos desafios em busca de revestimentos refratários de panelas de aço que suportam condições cada vez mais severas de trabalhos, tem sido dirigidos esforços na busca de melhorias nos tijolos de MgO-C, aluminosos e silico-aluminosos (QUINTELA, 2003). Além disso, “os tradicionais tijolos aluminosos e sílico-aluminosos, destinados à parede e sola, têm sido gradualmente substituídos por refratários contendo carbono, tais como os de $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-C}$ e $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgO-C}$ ” (QUINTELA, 2003, p.11).

Um breve histórico do desenvolvimento dos tijolos refratários contendo carbono pode ser descrito da seguinte maneira:

Uma das grandes evoluções nas últimas décadas foi o desenvolvimento e a introdução dos refratários contendo carbono nos processos siderúrgicos. Esses materiais surgiram por volta dos anos 60 com o advento dos tijolos de MgO queimados e impregnados com alcatrão e, posteriormente, os impregnados com piche. No início dos anos 70, surgiram os tijolos de MgO-C, os quais eram ligados por resina e continham grafita. No final dos anos 70, os refratários de MgO-C, com aditivos antioxidantes, passaram a ser usados no revestimento de convertedor. Posteriormente, os tijolos de MgO-C foram desenvolvidos para o revestimento de panelas, cujas principais vantagens são a alta resistência ao ataque por escória e ao dano por choque térmico. Por outro lado, o emprego desse tipo de revestimento pode implicar na maior perda térmica e no pick up de carbono no aço, restringindo seu uso em muitos processos metalúrgicos. (QUINTELA, 2003, p.12)

Diante do exposto acima e devido aos vários tipos de tijolos refratários, descreveremos aqui somente os tipos mais comuns e os utilizados nas panelas de aço da Usina de Cubatão com suas respectivas características.

2.6.2.1 Tijolos de MgO-C

Os tijolos de MgO-C foram desenvolvidos e utilizados inicialmente na siderurgia por volta de 1970, sendo estes empregados em fornos elétricos (THE TECHNICAL ASSOCIATION OF REFRACTORIES, 1998). Basicamente estes tijolos são compostos ou misturas de MgO, carbono, resinas e antioxidantes. As principais características que diferenciam este material dos demais é a sua baixa molhabilidade por escórias devido ao carbono, alta resistência ao choque térmico

(alta condutividade térmica e baixa expansão térmica), boa resistência a penetração por escórias líquidas e considerável resistência a corrosão química (ANAN, 2001; REITERER; DOSINGER, 1993; THE TECHNICAL ASSOCIATION OF REFRACTORIES, 1998; YAMAGUCHI; ZHANG, 1996). Outra propriedade importante deste tipo de refratário é a sua boa resistência a processos erosivos e, como o aço contido nas placas está sempre sujeito a algum tipo de movimentação, é importante que o projeto refratário leve em conta este tipo de solicitação (TAKEDA et al., 2001).

As principais características para que se tenha um bom desempenho deste tipo de tijolo refratário é que eles possuam alta densidade e baixa porosidade (THE TECHNICAL ASSOCIATION OF REFRACTORIES, 1998). Sua fabricação é realizada através de uma série de etapas que podem ser descritas da seguinte forma e sequência: 1-Preparação da matéria prima magnésia (cominuição e peneiramento), 2-Adição de grafite e aditivos, 3-Mistura e adição de ligantes, 4-Moldagem, 5-Secagem, 6-Inspeção, 7-Embarque ou estocagem dos produtos. A Tabela 8 mostra as propriedades típicas de tijolos (A, B, C, D, E, F e G) de MgO-C.

Tabela 8 – Propriedades típicas de tijolos de MgO-C; fonte: referência (THE TECHNICAL ASSOCIATION OF REFRACTORIES, 1998).

Propriedade	A	B	C	D	E	F	G
Porosidade Aparente (%)	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0
Gravidade Específica Aparente	3,08	3,00	2,96	2,90	2,82	2,96	2,99
Gravidade Específica	2,96	2,88	2,84	2,78	2,71	2,84	2,87
Resistência a Compressão (MPa)	61,7	45,1	32,3	30,4	24,8	33,3	30,4
Módulo de Ruptura a Quente (MPa)	18,1	13,7	10,3	9,8	9,3	10,8	12,3
Carbono (%)	7	13	18	22	30	18	18
Tipo de Magnésia	Sinterizada	Sinterizada	Sinterizada	Sinterizada	Sinterizada	50% Sinterizada e 50% Fundida	Fundida

Em termos de utilização, os tijolos de MgO-C vêm sendo amplamente utilizados nos diversos tipos de instalações das usinas siderúrgicas e podem ser facilmente encontrados em fornos elétricos (linha de escória, fundo e nas regiões quentes “hot spots”), conversores (praticamente em todas as regiões do forno) e painéis de transporte de aço nas aciarias (BOER; BEELEN, 1984; THE TECHNICAL ASSOCIATION OF REFRACTORIES, 1998). Nesta última, em especial, este tipo de tijolo é encontrado na linha de escória, podendo estar também na linha de metal e fundo com menor frequência. Entretanto, a utilização clássica deste tipo de refratário nas painéis é na linha de escória devido às propriedades de baixa molhabilidade por escórias, alta resistência a infiltração, oxidação e corrosão química.

2.6.2.2 Tijolos de Al_2O_3 -MgO-C

Os tijolos de Al_2O_3 -MgO-C surgiram com o intuito de substituir os tijolos de Al_2O_3 -C, pois um dos problemas encontrados no segundo tipo citado era sua alta expansão térmica linear, o que provocava muitas trincas no material. Entretanto, com o desenvolvimento dos tijolos de Al_2O_3 -MgO-C, através da adição de MgO, chegou-se a um material que possuía inferior expansão residual com consequente redução de trincas (THE TECHNICAL ASSOCIATION OF REFRACTORIES, 1998). Atualmente estes tijolos são usados juntamente com os tijolos de MgO-C em painéis de aço.

Como citado anteriormente, a grande vantagem deste tipo de tijolo é sua baixa expansão térmica e menor expansão residual quando comparados com os tijolos de Al_2O_3 . Em ambos os casos o tamanho de grão e a quantidade de magnésia são os fatores de controle para atingir tais propriedades (THE TECHNICAL ASSOCIATION OF REFRACTORIES, 1998).

A Tabela 9 ilustra as propriedades típicas de tijolos (A, B, C e D) de Al_2O_3 -MgO-C com suas respectivas composições químicas típicas. Estes tijolos são utilizados nas regiões da linha de metal e fundo da panela. No caso do fundo da panela, na região específica de impacto do aço, por ser uma região em que se necessita uma resistência maior, os teores de Al_2O_3 são bem maiores do que os respectivos teores deste composto quando empregados na linha de metal.

Tabela 9 – Propriedades típicas de tijolos de $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgO-C}$; fonte: referência (THE TECHNICAL ASSOCIATION OF REFRACTORIES, 1998).

Propriedades		A	B	C	D
Composição Química (%wt)	SiO_2	5,8	6,2	4,6	4,1
	Al_2O_3	83,3	86,3	66,2	63,7
	MgO	4,8	2,1	18,7	18,9
	C	2,8	4,8	6,7	9,5
Porosidade Aparente (%)		8,0	8,4	7,0	8,3
Gravidade Específica		3,19	3,22	3,04	2,97
Resistência a Frio (MPa)		106,4	92,7	63,3	51,5
Resistência a Quente (MPa)1500°C		4,1	7,6	10,5	9,7
Expansão Térmica (%) 1400°C		1,40	1,20	1,68	1,40
Variação Linear Permanente (%)1500°C		+0,50	+0,27	+1,44	+0,74

2.6.3 Desgaste de refratários em painéis de aço da aciaria

2.6.3.1 Introdução

Em função das condições de operação as quais as painéis de aço estarão submetidas (tipo de aço, temperaturas de tratamento, adição de compostos, injeção de gases, rota de tratamento metalúrgico, etc.) e considerando o perfil de revestimento, a linha de escória e a sola, principalmente a zona de impacto do aço, são as regiões mais críticas da panela em termos de desgaste. Além disso, como o desgaste da linha de escória é o que, na grande maioria das vezes, determina a vida da panela, esta região é o grande foco de estudo e análise para o controle e gerenciamento da vida das painéis.

Segundo Quintela (2003), de forma geral o desgaste do revestimento das painéis é causado por diferentes fatores, os quais podem atuar de uma forma isolada ou combinada, tais como: 1-Corrosão por metal e escória líquidos, 2-Infiltração de metal e/ou escória no refratário, 3-Mudanças bruscas de temperatura (choque térmico), 4-Compressão excessiva da estrutura (dilatação), 5-Oxidação do carbono do refratário, 6-Erosão da sola e parede provocada pelo impacto de aço líquido, 7-Remoção de cascão.

De acordo com Nicolae; Vilciu e Stoica (2011), os principais mecanismos de desgaste da linha de escória de placas de transporte de aço seriam a corrosão química e a erosão mecânica causados principalmente pelas reações químicas da escória de placa e o refratário, juntamente com a injeção de gases provocando a erosão mecânica.

Alguns autores citam os diversos problemas de desgaste sofridos pelos tradicionais tijolos aluminosos e sílico-aluminosos que revestiam as placas de transporte de aço no passado.

Por diferentes motivos, as placas de aço foram, durante décadas, revestidas com os tradicionais tijolos sílico-aluminosos, aluminosos e de alta alumina. Tais refratários apresentam, relativamente, baixa resistência ao dano por choque térmico, baixa resistência à corrosão e considerável expansão térmica reversível. Entretanto, em corridas subsequentes, não há variação linear dimensional positiva do refratário, implicando em abertura de juntas no revestimento tanto na direção horizontal como na vertical. Isso propicia a infiltração de metal e escória via junta, concorrendo para o desgaste prematuro do refratário (QUINTELA, 2003, p.11).

Para contornar os problemas citados acima, o uso de carbono nos tijolos refratários, em especial, de MgO-C foi uma saída adotada, ao mesmo tempo o elevado teor de carbono nos tijolos refratários (acima de 10%), apesar de promover melhorias quanto resistência ao dano por choque térmico, traz danos ao aumentar a perda térmica e propiciar maior tendência ao processo de oxidação dos tijolos da placa.

[...]O teor de carbono nos tijolos de MgO-C é, em geral, elevado - acima de 10 % em peso - para proporcionar excelente resistência ao dano por choque térmico. Contudo, o alto teor de carbono não apenas resulta em maior perda térmica, mas, também, representa um problema potencial quanto à sua prevenção contra a oxidação, principalmente quando se trata de vasos abertos, tais como as placas de aço. Ao contrário, os refratários do sistema Al_2O_3 -C, cujo agregado principal apresenta maior resistência ao dano por choque térmico, podem ser manufaturados com teor de carbono abaixo de 10 % sem causar prejuízos em termos de dano provocado por variação súbita de temperatura. Entretanto, o sistema Al_2O_3 -C apresenta desgaste de junta, provocado pela baixa variação linear dimensional e resultante abertura de juntas durante operação. Uma alternativa para equacionar tais problemas surgiu com o advento dos tijolos do sistema Al_2O_3 -MgO-C, os quais foram projetados para desenvolver expansão residual a partir da formação de $MgAl_2O_4(s)$ em elevadas temperaturas. A variação dimensional positiva controlada minimiza a abertura de juntas no revestimento. (QUINTELA, 2003, p.12)

De acordo com Camelli (2006) e Fredrikson (2004) os refratários de MgO-C, principais constituintes da linha de escória das panelas são fortemente desgastados por escórias de panela com altos teores de FeO, pois este composto reage com o carbono da matriz refratária fazendo com que a estrutura fique totalmente porosa abrindo passagem para uma infiltração e posteriormente corrosão da escória fluida da panela nos grãos refratários.

Resumindo, um revestimento para panelas de aço pode ser composto por vários tipos de materiais refratários e estar propício a diversos tipos de mecanismos de desgaste, o que será influenciado pelas diversas condições metalúrgicas e operacionais, tais como temperatura, tipo de aço, basicidade da escória, etc. A Tabela 10 resume bem os diferentes tipos de refratários utilizados nas diferentes regiões de uma panela de aço de aciaria.

Tabela 10 – Características gerais de tijolos para panelas de aço; fonte: referência (QUINTELA, 2003).

DENOMINAÇÃO	A	B	C	D	E	F	G	H
	MgO-C				Al ₂ O ₃ -MgO-C	Al ₂ O ₃ -C	Al ₂ O ₃	
p.a (%)	3,5	3,7	3,3	4,6	8,9	9,3	14,8	14,3
d.m.a. (g/cm3)	2,99	2,98	2,89	2,88	3,01	2,95	3,05	3,01
SiO2 (%)	1	1	1	1	5	11	7	13
Al2O3 (%)	-	-	-	1	65	76	87	81
MgO (%)	78	79	74	74	17	-	-	-
C (%)	16	15	20	15	7	7	-	-
Obs.:	(*)	(**)					(***)	
(*) Alto teor de MgO eletrofundido								
(**) Alto teor de MgO sinterizado								
(***) Tijolo não queimado								

2.6.3.2 Influência da basicidade e do teor de Al₂O₃ da escória no processo de desgaste dos refratários das panelas

A basicidade e os teores de Al₂O₃ da escória de panela formada durante o processo de refino secundário exercem forte influência no processo de desgaste do refratário das panelas de transporte de aço nas aciarias. De forma geral estas duas variáveis impactam na linha (região) de escória das panelas e, sendo atualmente, está região formada por tijolos basicos como MgO-C, altos valores de basicidade e baixos teores de Al₂O₃ da escória tendem a reduzir o processo de desgaste. Já o

contrário, ou seja, escória ácida (altos teores de Al_2O_3 e baixa basicidade) podem promover excessivo desgaste e baixa vida das placas.

Em termos de linha de escória, o tijolo do sistema MgO-C (Tabela 10) tem mostrado melhor resultado. A relação CaO/SiO_2 (Figura 10) e o teor de Al_2O_3 (Figura 11) da escória exercem considerável influência no índice de desgaste do revestimento refratário para placas, ou seja, o aumento da basicidade da escória reduz o desgaste dos tijolos de MgO-C (A, B, C e D da Tabela 10), embora não apresente efeitos substanciais nos refratários contendo Al_2O_3 (E, F, G e H da Tabela 10). (QUINTELA, 2003, p.13)

Considerando ainda (QUINTELA, 2003, p.13):

Com o aumento do teor de Al_2O_3 da escória, a corrosão dos refratários de MgO-C (A, B, C e D da Tabela 10) aumenta consideravelmente e a dos tijolos contendo Al_2O_3 apresenta comportamento inverso, principalmente a dos refratários de alta alumina (G e H da Tabela 10). Isso ocorre porque o aumento da quantidade de Al_2O_3 eleva a viscosidade da escória do sistema $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$, reduzindo o desgaste dos tijolos de alta alumina. Ao contrário, o ponto de fusão da escória de elevada basicidade do sistema $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ é reduzido com o aumento do teor de Al_2O_3 . Por essa razão, a solubilidade do MgO em escória de alta basicidade aumenta com o teor de Al_2O_3 da escória, elevando o desgaste do refratário de MgO-C .

Figura 10 – Influência da basicidade (CaO/SiO_2) da escória na resistência à corrosão de diferentes refratários. Tijolos de MgO-C (a) e tijolos dos sistemas $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgO-C}$, $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-C}$ e Al_2O_3 (b); fonte: referência (QUINTELA, 2003).

Figura 11 – Influência do teor de Al_2O_3 da escória na resistência à corrosão de diferentes refratários. Tijolos de MgO-C (a) e tijolos dos sistemas Al_2O_3 -MgO-C, Al_2O_3 -C e Al_2O_3 (b); fonte: referência (QUINTELA, 2003).

De acordo com Yamaguchi e Zhang (1996), altos teores de Al_2O_3 na escória ou, na própria estrutura refratária podem favorecer o processo de oxidação do carbono do refratário, em especial, dos refratários MgO-C. Este fenômeno é mais pronunciado durante o aquecimento das placas, período no qual a estrutura refratária ainda não está totalmente estabilizada.

2.6.3.3 Influência de fluidificantes (CaF_2 , MnO e Na_2O) da escória no processo de desgaste do refratário das placas

De acordo com Quintela (2003, p.15) “Outras substâncias que tem influência no desgaste do refratário das placas de aço são o CaF_2 (fluorita) e MnO da escória. Tais constituintes causam a redução da viscosidade e do ponto de fusão da escória, que se torna mais corrosiva”.

O Abaixamento do ponto de fusão da escória, ou melhor, aumento da fluidez da escória pelos compostos citados acima, é extremamente prejudicial para a estrutura refratária da linha de escória, pois promoverá a corrosão química do refratário com conseqüente infiltração da estrutura pela escória, o que, como será visto na análise dos resultados do estudo de *post-mortem*, traz grandes danos à estrutura interna

dos tijolos refratários das panelas. As Figuras 12 e 13, relativas aos tijolos da Tabela 10 ilustram o exposto anteriormente.

Figura 12 – Influência do teor de CaF_2 da escória na resistência à corrosão de diferentes refratários. Tijolos de MgO-C (a) e tijolos dos sistemas Al_2O_3 -MgO-C, Al_2O_3 -C e Al_2O_3 (b); fonte: referência (QUINTELA, 2003).

Figura 13 – Influência do teor de MnO da escória na resistência à corrosão de diferentes refratários. Tijolos de MgO-C (a) e tijolos dos sistemas Al_2O_3 -MgO-C, Al_2O_3 -C e Al_2O_3 (b); fonte: referência (QUINTELA, 2003).

2.6.3.4 Influência do carbono no processo de desgaste do refratário das painéis

O carbono é um elemento químico que vem sendo largamente empregado nos constituintes refratários, em especial em painéis de aço de aciaria. Segundo Quintela (2003, p.16), o emprego deste constituinte pode ser explicado por suas propriedades conferidas aos refratários de painéis de aço “Os refratários contendo carbono (grafita/ligante) têm sido amplamente utilizados na indústria siderúrgica, face à sua alta resistência ao dano por choque térmico e à corrosão por escória”.

O carbono confere aos refratários baixa molhabilidade por metais líquidos e escória. Além disso, o carbono exibe certa estabilidade química, reagindo lentamente com os óxidos refratários e escória; exceto com o MgO , Cr_2O_3 , SiO_2 , FeO e Fe_2O_3 , com os quais promove a redução em temperatura de uso. Face à elevada condutividade térmica e à baixa expansão térmica, o carbono também promove alta resistência ao dano por choque térmico. (QUINTELA, 2003, p.16)

Entretanto o carbono pode facilitar o processo de oxidação dos refratários e aumentar sua molhabilidade por escórias e metal líquido podendo promover aumento do processo corrosivo e vulnerabilidade ao choque térmico a depender dos percentuais de carbono, tamanho de grão do refratário e da composição química da escória (QUINTELA, 2003; WANG; YAMAGUCHI, 2001). De acordo com Nicolae; Vilciu e Stoica (2011), refratários contendo carbono podem ser atacados por escórias ricas em FeO , pois este composto reage com o carbono promovendo aberturas na matriz de MgO facilitando a infiltração da mesma na estrutura refratária. Este fato fica mais pronunciado em ambientes oxidantes e, caso as condições operacionais sejam de temperatura elevada e exposição a fluxo de oxigênio haverá uma maior tendência ao desgaste.

Os mecanismos de oxidação do carbono em refratários são, em geral, classificados em três categorias: oxidação por fases gasosas, líquidas e sólidas. Embora todos sejam de grande importância, o mecanismo de oxidação por fases gasosas é o mais usual para avaliação da perda de carbono em refratários. (QUINTELA, 2003, p.17)

Além disso, acredita-se que o processo de oxidação do carbono da matriz refratária dependerá do grau de reatividade deste elemento com o meio ao qual o refratário estará submetido e pela capacidade de infiltração de oxigênio na matriz do

refratário, o que se dá pela quantidade de poros na estrutura e pelo grau de compactação da estrutura (densidade).

A resistência à oxidação de refratários contendo carbono é função da temperatura, pressão parcial de oxigênio, disponibilidade de oxigênio e reatividade do carbono. Dentre os parâmetros que controlam a disponibilidade de oxigênio, a porosidade conectada é o mais importante. Para um dado par de valores de temperatura e pressão parcial de oxigênio, a medida mais efetiva para melhorar a resistência à oxidação é bloquear os poros. (QUINTELA, 2003, p.17)

Por outro lado, como maneiras de controlar e reduzir o desgaste por oxidação do carbono destaca-se a formação de uma camada densa de $\text{MgO}_{(s)}$, paralela a face quente nos sistemas refratários MgO-C e cobertura da superfície do revestimento durante operação com camada de escória (QUINTELA, 2003).

De acordo com Siegl (1992), existem algumas situações nas quais a oxidação do carbono de refratários de MgO-C faz com que seja formada uma camada fluída de MgO sobre a superfície refratária atuando de forma a proteger o revestimento, porém são necessárias condições específicas de temperatura para que a camada formada esteja fluída, do contrario o que se observa é a formação de uma camada porosa de MgO o que é extremamente danoso ao refratário, pois irá facilitar o processo de infiltração de escórias.

Fatores relevantes no processo de oxidação do carbono seriam o grau de pureza da grafite e o tamanho dos “grãos”. Segundo Rigaud; Li e Lagacé (1996) quanto mais pura for a fonte de grafite e maior o tamanho de “grão” menores são as taxas de oxidação sofridas pela estrutura refratária.

Neste contexto de desgaste dos refratários por oxidação do carbono destaca-se o uso dos chamados antioxidantes que reduzem ou minimizam o impacto da oxidação e consequentemente do desgaste (WANG; YAMAGUCHI, 2001). Destaca-se ainda que os chamados agentes antioxidantes (Al, Si, Mg, ligas de Al-Si e Al-Mg, $\text{Al}_8\text{B}_4\text{C}_7$) atuam para suprimir a oxidação do carbono do refratário através de diferentes mecanismos (QUINTELA, 2003; WANG; YAMAGUCHI, 2001).

A alta reatividade dos agentes antioxidantes com o oxigênio faz com que o oxigênio reaja preferencialmente com estes elementos ao invés do carbono do refratário. Além disso, existem vantagens que podem ser obtidas com o uso destes elementos ou compostos na composição da matriz refratária.

Os antioxidantes metálicos são fortes agentes redutores e sua elevada reatividade com o oxigênio gasoso, óxidos e carbono gera várias reações, conduzindo às seguintes vantagens: 1 - desenvolvimento de microestruturas de elevada resistência mecânica, 2 - aumento da formação de sólido in situ, 2 - redução de CO(g) a C(s), 3 - redução do MgO a vapor metálico (Mg(g)) na presença de carbono, 4 - formação de camada densa (MgO(s) ou MgAl₂O₄(s)) ou óxidos estáveis em temperaturas acima de 1200°C. (QUINTELA, 2003, p.18)

Outro fato relevante com relação aos antioxidantes (Al e Si) é que o Al pode reagir com o C e Mg formando compostos como Al₄C_{3(s)} e MgAl₂O_{4(s)} que por sua vez promovem uma maior proteção do refratário ao se depositar nos poros e formar uma camada protetora que atuaria contra a oxidação do C. De forma geral:

As transformações associadas à presença de Al têm efeito direto na resistência mecânica do refratário de MgO-C. Na temperatura de aproximadamente 1100°C, o aumento da resistência é atribuído à formação de Al₄C_{3(s)} e a 1500°C ao desenvolvimento de cristais de MgAl₂O_{4(s)}. Em relação ao Al₄C_{3(s)}, o MgAl₂O_{4(s)} é mais compacto e a ligação entre os cristais é mais resistente. Já no sistema MgO-C-Al em alta temperatura, o Al reage com a grafita e/ou N₂ para formar Al₄C_{3(s)} e/ou AlN(s), embora possa ser, também, ocasionalmente oxidado diretamente pelo CO(g) para formar Al₂O_{3(s)}. O Al₄C_{3(s)} formado reage com o N₂ para gerar whiskers de AlN(s) e/ou com o CO(g) para formar Al₂O_{3(s)} que, por sua vez, combina com o MgO(s) para formar MgAl₂O_{4(s)}. (QUINTELA, 2003, p.21)

Um problema em potencial de tijolos refratários contendo alumínio seria a possível hidratação que poderia ocorrer em determinadas condições termodinâmicas (WANG; YAMAGUCHI, 2001). Neste caso a presença de silício poderia minimizar este efeito que, segundo Quintela (2003, p.23) “um dos maiores problemas decorrentes da formação do Al₄C_{3(s)} é a sua susceptibilidade à hidratação”.

Em refratários contendo carbono nos quais é adicionado o elemento alumínio como antioxidante pode ocorrer a formação de Al₄C₃ a partir da reação do carbono com o alumínio e uma conseqüente hidratação do Al₄C₃ com H₂O (WANG; YAMAGUCHI, 2001). Este processo de hidratação forma compostos que podem sofrer um processo expansivo em determinadas temperaturas provocando a formação de trincas na estrutura refratária (YANG; YU; FAN, 2003).

Em sistemas do tipo MgO-C-Metal, o Al₄C_{3(s)}, eventualmente formado, pode combinar com a umidade do meio formando produtos de reação expansivos, os quais podem provocar a destruição do tijolo (QUINTELA, 2003; WANG; YAMAGUCHI, 2001).

Em sistemas refratários contendo $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-C}$, a presença do elemento silício pode influenciar na questão do desgaste. Segundo Quintela (2003, p.24), “O Si também apresenta efeitos importantes na microestrutura dos refratários de $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-C}$ ”.

Este autor afirma que a partir de 1100°C , ocorre a oxidação da superfície das partículas de Si e simultaneamente pode ser verificado a formação de $\text{SiC}_{(s)}$. Em temperaturas ao redor de 1300°C já se pode notar o desaparecimento das partículas de Si e a formação somente de $\text{SiC}_{(s)}$.

Ainda, de acordo com Quintela (2003, p.24) “O processo de volatilização múltipla leva à condensação de fases gasosas na forma de $\text{SiO}_{2(s)}$ vítreo. Na temperatura de 1500°C , foi observada a formação de cristais de $\text{SiC}_{(s)}$ nos poros, que crescem no interior de uma camada de $\text{SiO}_{2(s)}$ ”.

Em seus estudos (TAFFIN; POIRIER, 1994) cita os possíveis benefícios que a formação de $\text{SiO}_{2(s)}$ e SiC podem trazer ao refratário e, segundo estes autores, a formação de $\text{SiO}_{2(s)}$ vítreo pode levar à redução do tamanho de poros e paralelamente a formação de $\text{SiC}_{(s)}$ pode trazer melhorias nas propriedades mecânicas dos refratários de $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-C}$ em elevadas temperaturas.

Para sistemas refratários MgO-C-Si é possível verificar os mesmos resultados encontrados em tijolos de $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-C}$ com adições de Si, porém, além do SiC é formado o $\text{Mg}_2\text{SiO}_{4(s)}$ conhecida como forsterita (POIRIER, 1994; QUINTELA, 2003; TAFFIN, 1994).

Segundo Quintela (2003), The Technical Association Of Refractories (1998), a formação de $\text{SiO}_{2(s)}$ juntamente com a precipitação de $\text{C}_{(s)}$ durante o processo de oxidação do $\text{SiC}_{(s)}$ são um dos principais mecanismos de proteção do carbono em refratários MgO-C-Si , pois estes processo podem implicar em redistribuição do tamanho de poros e aumentar a resistência a oxidação.

Outro fator importante no processo de desgaste é a temperatura.

A resistência mecânica em função da temperatura reflete nitidamente a variação da densidade de massa aparente (Figura 14). O comportamento da resistência mecânica em alta temperatura é, também, influenciado pela oxidação do Si, que resulta em grandes vazios na microestrutura. O crescimento de cristais de mulita em elevadas temperaturas pode ter contribuído na queda da resistência mecânica a 1500°C , devido às tensões geradas na microestrutura. As fases secundárias formadas durante tratamento térmico influenciam fortemente as propriedades dos compósitos. (QUINTELA, 2003, p.28)

Figura 14 – Comportamento da resistência mecânica a quente, MRQ, em função da temperatura de diferentes sistemas; fonte: referência (QUINTELA, 2003).

2.6.3.5 Desgaste de refratário do tipo $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-C}$

De maneira geral os refratários do tipo $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-C}$ são encontrados na região da panela conhecida como região de metal líquido e no fundo da panela na região conhecida como sola. Estas regiões, em termos de desgaste, são afetadas principalmente pelos processos de erosão (parede), impacto (sola) e infiltração de metal líquido (nas juntas).

Em estudo desenvolvido por (MINATO; NISHIHARA; TANAKA, 1990), e também citado por (QUINTELA, 2003), verifica-se que o desgaste em refratários do tipo $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-C}$ de placas de aço na região de metal líquido pode ser decorrente de processos erosivos gerados principalmente por trincas verticais (choque térmico) e a possíveis danos nas juntas o que pode ter sido originado por infiltração de metal líquido e escória. Já na região de sola verificou-se que o desgaste foi devido principalmente a impacto localizado e danos nas juntas.

Outro fator importante do processo de desgaste deste tipo de refratário é o tamanho de grão da grafita e a sua quantidade. Segundo Hirai et al. (1998), seus estudos mostraram que acima de 15% de grafita, se a mesma tiver elevado tamanho de grão, a matriz será menos densa e mais aberta o que contribuiu de maneira significativa ao processo de desgaste por corrosão como mostrado na Figura 15.

Figura 15 – Efeitos do teor e tamanho da grafita na resistência à corrosão de tijolos de $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-C}$; fonte: referência (HIRAI et al., 1998).

2.6.3.6 Desgaste de refratário do tipo $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgO-C}$

Os refratários do tipo $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgO-C}$ são encontrados na região da panela conhecida como região de metal líquido e no fundo da panela na região conhecida como região de impacto. Geralmente quando se fala de região de metal líquido este refratário é conhecido como $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-C}$, pois ele possui um teor de Al_2O_3 menor que o citado anteriormente. Esta mudança se deve ao fato de que as solicitações em termos de resistência mecânica na região de impacto do jato de aço são maiores que na região de metal líquido e, neste caso, o maior teor em alumina garante maior resistência. Estas regiões, em termos de desgaste, são afetadas principalmente pelos processos de erosão (parede), impacto (sola) e infiltração de metal líquido (nas juntas).

Os tijolos de $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgO-C}$ possuem, em relação aos de $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-C}$, uma menor quantidade de Al_2O_3 o que pode em alguns casos minimizar a reação da Al_2O_3 do tijolo com o CaO da escória. Além disso, a presença de C reduz a cinética de reação com a escória fazendo com que estes materiais refratários apresentem melhor desempenho que os de $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-C}$ (QUINTELA, 2003).

Em estudo realizado por (KOLEY et al., 2001) é citado as principais vantagens dos tijolos de $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgO-C}$, quando comparados aos de $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-C}$, segundo ele a elevada expansão térmica devido a formação de espinélio, superior resistência ao dano por choque térmico, ausência de abertura de juntas no revestimento, menor

condutividade térmica e maior resistência ao impacto são os principais fatores que levam a escolha deste tipo de refratário em detrimento ao outro.

Já os principais mecanismos de desgaste identificados por (KOLEY et al., 2001) neste tipo de refratário, são dano por choque térmico devido a problemas de variação dimensional e oxidação do carbono do tijolo.

As principais variáveis que afetam as propriedades deste tipo de refratários foram listadas por (KOLEY et al., 2001), a saber: 1- tipo, tamanho de partículas e pureza do MgO, 2 - tipo, tamanho e pureza da grafita, 3 - tipo e pureza do Al_2O_3 , 4 - quantidade e carbono fixo do ligante, 5 - densidade da estrutura, 5 - tipo, tamanho e quantidade de aditivos metálicos e carbetos.

De certa forma esta mudança tecnológica (introdução do MgO na estrutura refratária do Al_2O_3 -C) torna este refratário mais básico e, apesar de não estar na região de escória das panelas (escórias de refino secundário são básicas) tornam este refratário mais resistente desde que os teores de Al_2O_3 se mantenham em níveis aceitáveis para a resistência a erosão e impacto beneficiadas pela presença da Al_2O_3 .

Outro fator importante no processo de desgaste deste tipo de refratário está na mudança ou formação de espinélios durante os diferentes processos e etapas metalúrgicas sendo importante para o controle dos processos erosivos e de infiltração por escória (KAMIIDE et al., 2001).

2.6.3.7 Desgaste de refratário do tipo MgO-C

Por ser muito utilizado em panelas de aço, principalmente na linha de escória, este tipo de refratário (MgO-C) é talvez o mais importante nos estudos de refratários para panelas de aço de aciaria a oxigênio.

Os tijolos de MgO-C têm sido amplamente utilizados na linha de escória de panelas de aço, em virtude de sua elevada resistência ao ataque por escória básica e resistência ao dano por choque térmico. Nesse sistema, o teor de grafita entre 13 e 20% tem proporcionado um melhor balanço entre a resistência à corrosão, resistência ao dano por choque térmico e resistência à oxidação. (QUINTELA, 2003, p.41)

Os principais mecanismos de desgaste encontrados neste tipo de sistema refratário são a oxidação do carbono, oxidação por óxidos de ferro que estão na

escória e por O_2/CO_2 dos gases gerados no processo, abrasão por movimentação do aço líquido, degradação estrutural devido a reações de oxi-redução entre $MgO(s)$ e o $C(s)$, degradação térmica devido as flutuações de temperatura e, principalmente pela dissolução dos compostos de MgO pela escória. (HOSHIYAMA, 2001; MISHRA et al., 2004; QUINTELA, 2003; SURUGA, 1998; TAKEDA, 2001).

De acordo com Bartha e Weibel (1996), Ferro et al. (1997), Harmuth (1989), Nakamura et al. (2006), Quintela (2003), Rigaud et al. (1993), o desgaste deste tipo de tijolo é impactado pelo tamanho de grão do MgO , pelo percentual de MgO , pela relação CaO/SiO_2 e se os grãos são sinterizados ou eletrofundidos. Segundo estes autores o maior percentual de $MgO-C$, o maior tamanho de grão e percentual de grãos eletrofundidos reduzem o desgaste refratário por corrosão de escórias. As Figuras 16 e 17 ilustram estas influências.

Figura 16 – Influência da composição química do sinter de MgO na sua resistência à corrosão; fonte: referência (QUINTELA, 2003).

Figura 17 – Influência do tamanho de grão do sinter de MgO na resistência à corrosão de tijolo de $MgO-C$; fonte: referência (QUINTELA, 2003).

Com relação ao tipo de grão de MgO, eletrofundido ou sinterizado, (YOSHINO et al., 1983) afirma que os grãos de MgO eletrofundido proporcionam aos tijolos de MgO-C maior resistência à corrosão em virtude dos cristais de grande diâmetro de periclásio e da menor área relativa de contorno de grão em relação a grão sinterizados, de modo que a resistência ao desgaste refratário é maior em refratários de MgO eletrofundido. Além disso, é possível reduzir a geração de trincas aumentando o tamanho de grão dos tijolos e o teor de carbono (THE TECHNICAL ASSOCIATION OF REFRACTORIES, 1998).

A dissolução do MgO do refratário pela escória é um dos principais fatores do processo de desgaste sendo que, esta dissolução ocorre pela decomposição e dissolução do agregado de MgO pela SiO_2 (da escória) e posteriormente pela penetração do CaO nos contornos de grãos do refratário. Além disso, a dissolução da fase periclásio pelo FeO é fator de relevância neste processo (THE TECHNICAL ASSOCIATION OF REFRACTORIES, 1998).

Outro fator relevante no desgaste de refratários a base de MgO-C está relacionado a reação do MgO com o carbono do refratário.

No sistema MgO-C em elevadas temperaturas, o $\text{MgO}_{(s)}$ reage com o $\text{C}_{(s)}$ para formar $\text{Mg}_{(g)}$ e $\text{CO}_{(g)}$. A contínua formação e liberação de $\text{Mg}_{(g)}$ e $\text{CO}_{(g)}$ leva à deterioração microestrutural do refratário, concorrendo para acelerar outros modos de desgaste. (QUINTELA, 2003, p.46)

Entretanto, este mecanismo de corrosão possui uma espécie de dualidade desgaste/proteção, pois quando o vapor de Mg é oxidado próximo à face quente do refratário, há o desenvolvimento de uma camada densa de MgO que atua como uma espécie de barreira de proteção.

Face ao bloqueio promovido por essa camada, P_{Mg} e P_{CO} entram em equilíbrio, parando a reação. Dessa forma, a camada densa atua como uma proteção contra a corrosão provocada pela escória e oxidação do carbono, contribuindo para aumentar a durabilidade do tijolo (QUINTELA, 2003).

De acordo com Yamaguchi (1984), para reduzir a velocidade da reação entre o $\text{MgO}_{(s)}$ e o $\text{C}_{(s)}$ em temperaturas ao redor de 1400°C , é necessário maximizar P_{CO} ou P_{Mg} ou ambos no refratário.

Uma alternativa para aumentar P_{Mg} é a adição Mg, desde que P_{CO} seja mantida em torno de 1 atm pela coexistência de C. Outra maneira de elevar P_{Mg} e P_{CO} no refratário é promover o desenvolvimento da camada densa de MgO na superfície, ou seja, junto à face quente. A camada densa de MgO é formada a partir do $Mg_{(g)}$, que se difunde para a superfície e é exposto à atmosfera com alto valor de P_{O_2} . Na porção incluída por essa camada, P_{CO} e P_{Mg} atingem a pressão parcial de equilíbrio, tornando a reação em equilíbrio dinâmico. (QUINTELA, 2003, p.46)

Em seus estudos, Yamaguchi (1984) mostrou o impacto da temperatura na velocidade da reação do MgO com o C, assim como a partir de qual temperatura a reação é otimizada. A Figura 18 retrata o fenômeno.

Figura 18 – Perda de peso do compacto de MgO-C, com 4% em peso de C, em função da temperatura em fluxo de N_2 ; fonte: referência (YAMAGUCHI, 1984).

Outro fator importante a ser considerado é o teor de Fe na escória, este elemento aumenta a solubilidade do MgO do refratário na escória, além disso, ele na forma de óxido de ferro, age como agente oxidante do carbono da matriz refratária “A elevação do teor de Fe na escória causa o desgaste pronunciado do refratário do sistema MgO-C, devido ao aumento da solubilidade do MgO e à oxidação do carbono pelo FeO e Fe_2O_3 ” (QUINTELA, 2003, p.49).

Com a oxidação do carbono, a escória penetra mais facilmente na microestrutura e reage com o agregado de MgO, provocando a sua dissolução e dissociação. A redução da quantidade de FeO e Fe_2O_3 na escória causa um aumento de sua viscosidade, a qual pode atuar como uma camada de proteção na superfície do refratário. (QUINTELA, 2003, p.50)

Ainda, destaca-se a oxidação pela fase líquida (FeO na escória), oxidação pelos gases gerados no processo (O_2 e CO:CO_2) e oxidação pelo MgO como as principais variáveis a serem controladas para a redução prematura dos refratários de MgO-C (HASHEMI; NEMALI; SADRNEZHAAD, 2004; TECHNICAL ASSOCIATION OF REFRACTORIES, 1998).

Outra variável importante a ser considerada e que contribui no processo de desgaste deste tipo de tijolo refratário é a pureza da grafite (fonte de carbono) encontrada. Segundo a The Technical Association of Refractories (1998) quanto maior o teor de cinza presente na grafite menor é a resistência a corrosão deste tipo de tijolo refratário. Além disso, o tipo de resina utilizada na fabricação dos tijolos de MgO-C podem gerar uma porosidade elevada se as concentrações de carbono fixo não forem elevadas na resina o que poderia afetar o desempenho durante os processos de metalurgia secundária proporcionando infiltração de escória, corrosão e abrasão do material.

Em relação ao processo de abrasão citado anteriormente, em reatores onde existe grande movimentação de aço líquido e escória, o mecanismo de abrasão tem grande impacto no desgaste refratário sendo que, a redução do desgaste por abrasão pode ser reduzida trabalhando com tijolos de alta densidade e maiores teores de carbono (THE TECHNICAL ASSOCIATION OF REFRACTORIES, 1998).

Finalizando, o tipo e a quantidade de antioxidantes utilizados, são de suma importância na redução da oxidação do carbono do tijolo pelo oxigênio do ar, dos óxidos de ferro presentes nas escórias e gases como o monóxido de carbono gerado no processo (THE TECHNICAL ASSOCIATION OF REFRACTORIES, 1998). Entretanto, vale lembrar que para refratários de MgO-C que contém zircônia a adição de Al e Si como antioxidantes pode provocar expansão na estrutura refratária devido a determinadas reações e mudanças na microestrutura que ocorrem após a queima do material refratário (SHOUXIN; SHANLIN; MENGQIN, 2002).

2.6.3.8 Desgaste de refratário da linha de escória das painéis

Quando falamos dos mecanismos e regiões de desgaste de refratários das painéis de transporte de aço nas aciarias destaca-se em primeiro plano a chamada linha de escória das painéis. Esta linha (região) é a região superior da panela que está em contato direto com as escórias dos processos de refino das aciarias. Foi

dado ênfase nesta região, pois a campanha (vida) da panela basicamente é determinada em função do desgaste desta região.

O desgaste dos refratários da linha de escória é proveniente de eventos químicos, térmicos e mecânicos sendo que geralmente o processo de degradação inicia-se com o evento químico devido à diferença de potencial químico entre os compostos do refratário e da escória e finaliza-se com os eventos termomecânicos a depender das condições as quais os refratários estarão expostos e do tipo de projeto refratário do reator (MATTILA, VATANEN, HARKKI; 2002).

Segundo Camelli (2006) e Oliveira (1997) os principais mecanismos de desgaste de refratários da linha de escória das painéis de transporte de aço das aciarias são a corrosão química e a erosão mecânica ocasionadas, em sua maior parte, pela movimentação do banho de escória e metal líquido da panela.

De acordo com Camelli (2006, p.34), “A corrosão química é influenciada por fatores como temperatura, composição refratária, viscosidade da escória, composição da escória e agitação do banho”. Já a erosão está relacionada principalmente com a movimentação (OLIVEIRA, 1997).

A análise *post-mortem* feita no refratário de MgO-C da linha de escória das painéis de aço do estudo realizado por Camelli (2006), revelou que houve penetração de escória na região intergranular dos grão de MgO e notou-se também nesta região a corrosão dos grãos devido a interação com óxido de ferro e magnésio (ambos componentes da escória de panela).

Além disso, as análises realizadas na microestrutura permitiu observar que houve uma descaburação da matriz dos tijolos de MgO-C em contato com a escória, isso mostra que houve oxidação do carbono pelos óxidos da escória. Foram identificadas as fases espinélio e cristais de silicato de cálcio Camelli (2006) o que evidencia a penetração e reação da escória com a matriz refratária.

Neste mesmo estudo foram observadas duas camadas de escória fixadas no refratário onde pode ser observado que a primeira camada seria correspondente a uma escória não saturada em MgO e que de acordo com as fases presentes elas estariam líquidas na temperatura de tratamento, o que de acordo com Camelli (2006); Lee (1988) e Rigaud (1996) é a principal condição que favorece o mecanismo de desgaste por corrosão nesta região em estudo.

Já a segunda camada de escória observada estava saturada em periclásio e com altos teores de óxido de ferro, o que de acordo com Camelli (2006), faria com que a

escória tivesse alta fluidez quebrando as redes de silicatos favorecendo assim a descarburização da matriz. Além disso, a descarburização promoveu a formação de poros contribuindo assim para a penetração da escória na matriz refratária como citada em parágrafos anteriores.

Outra possível contribuição seria a difusão do óxido de ferro da escória pelos poros da matriz refratária promovendo a reação deste óxido com o MgO do refratário. Esta nova fase formada (magnésia - wustita) abaixaria a refratariedade do MgO do refratário facilitando a seu desgaste (CAMELLI, 2006).

Considerando o trabalho desenvolvido por Pretorius (1981) em refratários dolomíticos, fator essencial para a redução do desgaste seria a saturação da escória com CaO, pois segundo este autor escórias insaturadas deste composto poderia promover maior dissolução dos componentes refratários pela escória já que a mesma necessitaria deste componente para atingir seu equilíbrio.

Da mesma forma, para tijolos refratários magnesianos, o componente essencial cuja escória deve estar saturada seria o MgO (PRETORIUS, 1981). Assim, de acordo com o exposto acima é de suma importância para o controle de desgaste refratário da linha de escória das placas de aço manter sempre a saturação em CaO e MgO quando trabalhamos com tijolos refratários dolomíticos e magnesianos respectivamente. Além disso, as quantidades de CaO e MgO para saturação da escória poderão sofrer grande impacto se forem adicionadas quantidades relevantes de CaF_2 , pois este composto aumenta consideravelmente a fluidez da escória aumentando consequentemente a potencialidade de desgaste dos tijolos refratários em ambos os casos.

Considerando as análises acima, manter a saturação da escória em componentes que fazem parte da estrutura refratária (CaO, MgO), em outras palavras, manter o controle da basicidade da escória de placa é fator essencial para controlar o desgaste refratário. Além disso, compostos como CaF_2 e óxidos de ferro e manganês, agentes fluidificantes, abaixam o ponto de fusão da escória e reduzem a sua viscosidade tornando o processo de desgaste refratário mais intenso.

2.7 Principais testes, ensaios, análises e propriedades dos refratários

Quando se fala a respeito dos testes, ensaios e análises para a determinação das características, ou melhor, das propriedades dos materiais refratários, podemos

enumerar uma série de testes normatizados para tais fins. Entretanto, nesta subseção, a título de complemento e fechamento deste capítulo, serão mencionados de forma resumida apenas alguns deles, ou seja, aqueles ensaios que de forma geral são os mais usuais para determinação das propriedades relacionadas aos processos de desgaste refratário e, também, as análises que estão relacionadas ao estudo de “post-mortem”.

2.7.1 Teste de refratariedade

Segundo a The Technical Association of Refractories (1998), o conceito de refratariedade está relacionado à capacidade dos materiais refratários em sofrer um processo de amolecimento à medida que o material é submetido a aumentos de temperatura, ou seja, refratariedade seria a propriedade que os materiais refratários possuem de manter sua estrutura sem se deformar em condições térmicas agressivas.

Ainda, de acordo com The Technical Association of Refractories (1998), o que determina a quantidade de material fundido e o amolecimento seria as variáveis taxa de aquecimento, tempo e tamanho de grão. Em se tratando de processos de aciaria, o refratário das panelas de aço está a todo o momento submetido a temperaturas acima de 1600°C, o que mostra a importância deste tipo de teste.

As normas que regulam os procedimentos para estes ensaios são: JIS R 2204, JIS R 2573, JIS R 8512, JIS R 8101, ABNT NBR 6222 de 1995, NBR 6223 (LENZ E SILVA, 2007; CAMELLI, 2006; THE TECHNICAL ASSOCIATION OF REFRACTORIES, 1998).

2.7.2 Teste de densidade e gravidade específica

Densidade é uma propriedade que pode ser definida de varias maneiras. De acordo com The Technical Association of Refractories (1998), de maneira geral densidade de uma substancia é a relação da massa por volume de substância. Outra definição de densidade é aquela que considerara os poros da substância em questão sendo definida considerando o volume de vazios existentes. Materiais refratários de alta densidade costumam possuir melhores propriedades do que os de baixa densidade.

As normas técnicas que regulamentam os ensaios de determinação de densidade são: JIS R 1620, NBR 11221, NBR 12173, NBR 6115, NBR 6220, NBR 6221, NBR 8592, C0020-00R05 e C0134-95R05 (CAMELLI, 2006; THE TECHNICAL ASSOCIATION OF REFRACTORIES, 1998).

Já a gravidade específica de uma substância é a razão entre a densidade da substância pela densidade da água a 4°C.

2.7.3 Teste de gravidade específica, porosidade aparente e percentagem de absorção de água

Em se tratando de materiais refratários podemos distinguir 3 partes basicamente, a saber (THE TECHNICAL ASSOCIATION OF REFRACTORIES, 1998):

- Parte sólida
- Poros abertos
- Poros fechados

Assim se define os três tipos de gravidade específica: 1-gravidade específica, 2-gravidade específica aparente e 3-gravidade específica verdadeira, sendo calculadas pelas seguintes expressões (THE TECHNICAL ASSOCIATION OF REFRACTORIES, 1998):

$$\text{Gravidade Específica} = (\text{massa}) / (\text{massa de água que ocupa o volume total}) \quad (1)$$

$$\text{Gravidade Específica Aparente} = (\text{massa}) / (\text{massa de água que ocupa o volume aparente}) \quad (2)$$

$$\text{Gravidade Específica Verdadeira} = (\text{massa}) / (\text{massa de água que ocupa o volume verdadeiro}) \quad (3)$$

Sendo que:

$$\text{Volume total} = \text{Volume do sólido} + \text{Volume dos poros abertos} + \text{Volume dos poros fechados} \quad (4)$$

$$\text{Volume aparente} = \text{Volume do sólido} + \text{Volume dos poros fechados} \quad (5)$$

$$\text{Volume verdadeiro} = \text{Volume do sólido} \quad (6)$$

Já, em se tratando de porosidade, podemos defini-la como “volume total de poros dentro do volume total” (THE TECHNICAL ASSOCIATION OF REFRACTORIES, 1998). Nos refratários tratamos principalmente da porosidade aparente definida como:

$$\text{Porosidade Aparente} = (\text{volume dos poros abertos}) / (\text{volume total}) \quad (7)$$

$$\text{Porosidade Total} = (\text{volume dos poros abertos} + \text{fechados}) / (\text{volume total}) \quad (8)$$

Outra métrica importante é a percentagem de absorção de água pelos refratários que, de acordo com (THE TECHNICAL ASSOCIATION OF REFRACTORIES, 1998):

$$\% \text{ de absorção de água} = \{(\text{massa de água acupada nos poros abertos}) / (\text{massa})\} * 100 \quad (9)$$

As normas que regem os ensaios descritos acima são definidas nas JIS R 2205, JIS R 2614, JIS R 2655, C0020-00R05.

2.7.4 Análise química em materiais refratários

Com relação à determinação dos constituintes, ou melhor, dos elementos ou substâncias químicas as quais constituem e formam as estruturas dos materiais refratários temos, segundo a The Technical Association of Refractories (1998), dois métodos analíticos de análise normatizados pelas normas JIS R 2212 e JIS R 2216 que são respectivamente análise química em tijolos e massas refratárias e análise química por fluorescência de raios X (espectrometria) também para tijolos e massas refratárias. A partir do conhecimento dos constituintes químicos é possível determinar para determinadas condições de temperatura e pressão as fases presentes e estimar as propriedades decorrentes obtendo assim materiais mais adequados às condições de trabalho.

2.7.5 Resistência à hidratação

Agregados de magnésia, dolomita e refratários básicos contém constituintes que possuem a capacidade de reagir com água ou umidade e formar hidróxidos. Esta reação pode causar expansão e danificar o refratário (THE TECHNICAL ASSOCIATION OF REFRACTORIES, 1998). Por isso, determinar a resistência à hidratação é importante e é uma forma de controle de projeto refratário para suportar condições de umidade elevada. A norma que regula o ensaio de hidratação é a JIS R 2212.

2.7.6 Resistência à compressão

Resistência à compressão pode ser entendida como a capacidade que os refratários possuem de suportar esforços de compressão sem se romper. Geralmente ela é maior que a resistência a tensão e está relacionada com o quanto sintetizado o material está (THE TECHNICAL ASSOCIATION OF REFRACTORIES, 1998). A norma que regulamenta o teste é a JIS R 2206.

2.7.7 Módulo de ruptura

Módulo de ruptura pode ser entendido como a capacidade que os refratários possuem de suportar esforços de tensão sem se romper. A norma que regulamenta o teste é a JIS R 2213.

2.7.8 Resistência à tensão

Resistência à tensão pode ser entendida como a capacidade que os refratários possuem de suportar esforços de tensão sem se romper. Geralmente ela é menor que a resistência a compressão e está relacionada com o quanto sintetizado o material está (THE TECHNICAL ASSOCIATION OF REFRACTORIES, 1998). A relação entre resistência a tensão, módulo de ruptura e resistência a compressão é 1:2:4. A norma que regulamenta o teste é a JIS R 1606.

2.7.9 Módulo de elasticidade

Existe varias formas de definir módulo de elasticidade, sendo que, uma definição pertinente seria “módulo de elasticidade expressa a resistência a deformação” (THE TECHNICAL ASSOCIATION OF REFRACTORIES, 1998). Entretanto este mesmo autor diz que esta constante representa a relação, no regime elástico, entre tensão e deformação. As normas a partir das quais este parâmetro pode ser determinado são a JIS R 1602 e JIS R 1605.

2.7.10 Energia de fratura (tenacidade a fratura)

Basicamente, podemos definir energia de fratura como a energia para romper o material testado ou solicitado. Esta energia está associada à energia para iniciar uma trinca e também a energia para que a mesma se propague. Ou seja, qual é o trabalho mínimo necessário para criar uma trinca e propagá-la no material. A norma para teste é a JCRS 201.

Verifica-se que os refratários das placas de aço da Aciaria estão a todo o momento sofrendo impacto durante o carregamento das placas com aço, assim como, esforços cíclicos de içamento e movimentação.

2.7.11 Deformação em elevadas temperaturas (Fluência)

À medida que o ambiente de trabalho se encontra em temperaturas cada vez mais elevadas o comportamento dos materiais refratários também se torna diferente. Em elevadas temperaturas sob um determinado carregamento a resistência do refratário é cada vez menor, ou seja, estes materiais se tornam mais facilmente deformáveis à medida que a temperatura de trabalho aumenta (THE TECHNICAL ASSOCIATION OF REFRACTORIES, 1998).

É possível quantificar esta deformação, ou melhor, fluência como é conhecida pelos ensaios de fluência regulamentados pelas normas JIS R 2658 e JIS R 2209.

É claramente visível a importância deste teste em refratários de placas de aciaria devido às altas temperaturas que o aço líquido está em contato com este refratário (aproximadamente 1650°C).

2.7.12 Resistência à abrasão

De acordo com a The Technical Association of Refractories (1998), Resistência à abrasão é uma das propriedades mecânicas dos refratários, mas ela depende da dureza intrínseca dos grãos e contornos de grãos dos materiais, assim como do tamanho e porosidade.

A movimentação dos fluidos (aço líquido) nas placas de transporte de aço promove alta abrasão nos refratários da mesma fazendo com que haja um desgaste por este tipo de mecanismo.

Os ensaios para determinação da resistência à abrasão destes materiais são regidos pelas normas JIS R 1613 e ASTM C 704-88.

2.7.13 Expansão térmica

A determinação do coeficiente de expansão térmica é um importante fator para a determinação do projeto refratário e para a verificação da resistência ao choque térmico. Este coeficiente está de acordo com (THE TECHNICAL ASSOCIATION OF REFRACTORIES, 1998), relacionado com a força de ligação entre os átomos dos materiais. Nos processos metalúrgicos em altas temperaturas a variação de volume pode incorrer em vários problemas como formação de trincas e conseqüentemente falha por desgaste. A norma JIS R 2207 fundamenta o teste.

2.7.14 Condutividade térmica

Assim como a determinação do coeficiente de expansão térmica, a determinação da capacidade de transmissão de energia na forma de calor conhecida como condutividade térmica dos materiais é um importante fator e variável de controle dos materiais refratários (THE TECHNICAL ASSOCIATION OF REFRACTORIES, 1998). Através dele é possível estabelecer quais materiais poderão estar mais susceptíveis a gradientes térmicos que conseqüentemente provocarão trincas devido às tensões térmicas. As normas que regulamentam o teste são JIS 2616 e JIS 2618.

2.7.15 Resistência ao choque térmico

De acordo com (THE TECHNICAL ASSOCIATION OF REFRACTORIES, 1998), choque térmico nada mais é que uma rápida variação de temperatura (aquecimento ou resfriamento) imposta a um determinado corpo sólido. Segundo este autor estas variações de temperaturas podem ocasionar trincas devido às tensões térmicas provocadas no corpo. Medir a capacidade do corpo em resistir a essas variações de temperatura é o objetivo deste teste. A norma que fundamenta o ensaio é a JIS R 2657.

2.7.16 Análise microestrutural via microscopia óptica

A análise da microestrutura via microscopia óptica é uma forma de identificar as fases e interfaces presentes, assim como, verificar os grãos e contornos de grãos presentes nos materiais.

2.7.17 Análise microestrutural via microscopia eletrônica

Da mesma forma que a citada no item anterior, é possível realizar a análise microestrutural via microscopia eletrônica. Está por sua vez permite análises bem mais profundas que a anterior. A capacidade de ampliação de imagens é infinitamente superior e com os recursos de análise computacional de imagens é possível determinar os constituintes e fases presentes, grãos, contornos, orientação, etc. na microestrutura dos refratários (THE TECHNICAL ASSOCIATION OF REFRACTORIES, 1998).

3 MÉTODOS E MATERIAIS

Segundo Gil (1999) a abordagem metodológica da pesquisa é necessária para que as etapas de realização do trabalho sejam conduzidas com maior rigor e objetividade, com foco e limitações bem definidos, chegando-se a resultados finais confiáveis e válidos, e permitindo que a pesquisa realizada tenha repetibilidade em outro ambiente. Nesse sentido, este capítulo descreve os aspectos metodológicos, as etapas de desenvolvimento e as justificativas das escolhas dos métodos e técnicas adotados para elaboração da proposta desse trabalho.

3.1 Introdução

Neste capítulo são apresentados os materiais e métodos utilizados para a construção dos modelos determinísticos através dos quais foi possível verificar quais as variáveis operacionais possuem algum tipo de correlação com a vida das panelas, assim como as técnicas e ensaios de caracterização dos tijolos refratários de uma das panelas no final de sua campanha (*post-mortem*). O propósito foi de verificar se as variáveis encontradas nas análises estatísticas, que influenciaram o desgaste (vida) das panelas, são realmente, sob os aspectos físicos e químicos (a serem vistas nos ensaios e testes de *post-mortem*) as que realmente determinam a vida útil do refratário das panelas de transporte de aço na aciaria.

Além disso, pretende-se ter no final das análises, um modelo global que correlacione todas as variáveis operacionais que foram realmente significantes com relação à vida refratária, e a própria vida das panelas. Tal modelo servirá de base para uma gestão das panelas, onde será possível analisar os motivos de baixo desempenho passado do refratário e fazer previsões futuras de vida em função de condições prévias da programação dos aços a serem fabricados nas panelas.

Com a finalidade de facilitar a análise deste trabalho já que se trata de dois grandes estudos (a análise e construção de modelos determinísticos e estudo via método experimental de *post-mortem*), foi feita uma divisão da metodologia em três tópicos, a saber:

- Tópico relativo à coleta, preparação e análise dos dados operacionais, incluindo a construção de pequenos modelos (equações) de previsão da vida da panela em função das variáveis operacionais relevantes;

- Tópico relativo às análises *post-mortem* de refratários coletados em uma das panelas no final de vida (campanha); e
- Tópico relativo à construção de um modelo único multivariado, que contém todas as variáveis relevantes (analisadas nos dois tópicos acima), de previsão da vida das panelas em função das condições operacionais a que elas foram ou serão submetidas.

3.2 Coleta, preparação e análises dos dados operacionais (vida versus variáveis de operação)

Para a realização da análise da influência (correlação) das diversas variáveis operacionais com a vida das panelas de aço foram levantados, dos bancos de dados dos sistemas de informação de produção da Aciaria da Usina de Cubatão (via programa de gerenciamento de banco de dados *Acess*), os dados relativos à vida e variáveis de processo que julgou-se importantes no processo de desempenho (vida) dos refratários das panelas de aço da Aciaria (as variáveis operacionais consideradas para a realização das análises e estudos foram selecionadas de acordo com as referências e experiência dos analistas e especialistas da área operacional).

O banco de dados foi relativo a seis meses de processo, compreendendo o período de 01/01/2014 a 30/06/2014. Este banco foi construído levando em consideração os dados de cada corrida processada nas panelas com o seu respectivo histórico das variáveis operacionais como, temperatura de vazamento de aço, tempos de tratamento, tipo de aço, rota de tratamento metalúrgico, etc.

Este período foi escolhido visando contemplar uma grande quantidade de dados (foram aproximadamente 6.700 corridas analisadas contemplando praticamente os dados de todas as panelas em operação atualmente na Aciaria o que na prática representa bem a realidade operacional).

Outro fator importante considerado na escolha deste período foi a dificuldade de extração de dados de maneira correlacional corrida a corrida dentro do tempo aceitável deste tipo de estudo e que seja possível de ser tratado posteriormente em software estatísticos apropriados (quanto maior o número de variáveis independentes colocadas nos programas de gerenciamento de banco de dados maior a dificuldade de modelagem e maior o tempo de extração dos dados).

Outra consideração em relação à escolha do período citado anteriormente foi a garantia de que a aciaria estivesse em um ritmo de produção dentro de certos parâmetros de estabilidade, ou seja, sem grandes eventos anormais de paradas e restrições que não estão no dia a dia da fábrica. Caso esta consideração não fosse satisfeita poderíamos estar analisando um período específico que não representaria a rotina diária da fábrica.

Estes dados foram tratados posteriormente via programas de planilhas eletrônicas (*Excel*) para remover erros como dados duplicados ou corridas com informações incompletas durante as campanhas. Isto se deve, pois quedas de energia, quebras de equipamentos e erros de leitura nos equipamentos de registro podem acontecer com certa frequência.

Foi feito também um resumo (tabulação) destes dados por panela (corrida a corrida) de maneira que estes pudessem ser tratados individualmente, ou em conjunto, posteriormente em programas estatísticos apropriados como *Minitab* (análise multivariada).

Os dados foram analisados e foram construídas as equações (modelos) de previsão e correlação entre vida da panela e variáveis de operação via regressão simples, múltipla e outras ferramentas estatísticas de análise para o modelamento e análise estatística. A Figura 19 ilustra o fluxo e sequência do levantamento das informações e análises feitas nos bancos de dados da usina.

Figura 19 – Fluxograma das informações e análises estatísticas realizadas.

3.3 Análises experimentais através de estudo de post-mortem

Com relação à parte experimental foram coletadas amostras de refratário de uma das placas de aço em operação após o final de sua campanha (referência do tipo de refratário encontra-se nas páginas 35 e 36 na Figura 6 e Tabela 7 respectivamente).

Foram coletadas amostras de três regiões da placa, a saber:

1. Linha de escória;
2. Linha de metal; e

3. Fundo da panela.

Entretanto, como a vida da panela é determinada basicamente pelo desempenho da linha de escória, somente nesta região foi feita a caracterização e análise.

Após a coleta as amostras foram preparadas e analisadas empregando microscopia óptica (LUPA ZEISS STEMI 2000-C) e eletrônica (back-scattered via EDS) para realização da análise de *post-mortem*.

A partir das observações físicas e análises químicas (semi-quantitativa via EDS) feitas via microscopia óptica e eletrônica foi possível identificar e inferir sobre os fenômenos e possíveis mecanismos de desgaste que contribuem de maneira significativa no desempenho em termos de vida do refratário das panelas. Além da determinação dos fenômenos físicos e químicos, relativos ao desgaste e vida refratária, foi possível realizar uma comparação indireta entre as respostas obtidas das análises estatísticas em termos de variáveis significativas no processo de degradação da vida refratária com as conclusões extraídas das análises do *post-mortem*.

A Figura 20 ilustra o fluxo e sequência das coletas e análises refratárias realizadas. Além disso, é mostrado, ou melhor, comparado o como estas análises ocorrem em paralelo com a parte de levantamento e análise estatística dos dados operacionais.

Figura 20 – Fluxograma das informações e análises realizadas nos tijolos refratários das placas de aço.

3.3.1 Coletas das amostras

Para a realização do estudo de *post-mortem* foram coletadas na área operacional da Aciaria da Usina de Cubatão amostras de refratário das regiões da linha de escória, metal e fundo de uma das placas de transporte de aço.

A coleta foi feita utilizando uma máquina de remoção conhecida como removedor hidráulico. As Figuras 21, 22 e 23 ilustram a coleta das amostras.

Figura 21 – Imagem da coleta das amostras de refratário da panela após o final da sua campanha.

Figura 22 – Imagem da panela e das áreas refratárias desgastadas em função das diversas operações metalúrgicas as quais foi submetida no decorrer de sua campanha.

Figura 23 – Imagem das amostras de refratário da fiada nº15 da linha de escória da panela.

3.3.2 Preparação das amostras

Após coleta, as amostras foram levadas aos laboratórios de preparação da USP (laboratórios do Departamento de Metalurgia e Materiais) onde as mesmas foram preparadas para as análises de microscopia. A preparação basicamente foi relativa à adequação de tamanho das amostras (corte com serra elétrica) nas áreas de interesse de análise como, por exemplo, nas regiões de interface metal escória.

A Figura 24 apresenta uma ilustração de alguns tijolos com os aspectos reais após serem retirados das panelas e iniciado o processo de corte no laboratório da USP.

Figura 24 – Imagens das amostras de refratário da panela com os aspectos reais antes da preparação (corte).

Após o corte as amostras foram devidamente armazenadas e identificadas (Figura 25) e conduzidas para o processo de embutimento com resina epóxi.

A etapa seguinte foi a realização do embutimento das amostras com resina epóxi para posterior adequação superficial nas lixas (Figura 25). Estas duas etapas (embutimento e lixamento) são de extrema importância, pois as análises seguintes de microscopia óptica e eletrônica dependem, para uma boa visualização da superfície, do grau de planicidade das amostras.

Figura 25 – Armazenagem, identificação e lixamento das amostras durante o processo de preparação.

3.3.3 Estudo *post-mortem* via microscopia óptica e eletrônica

Após a preparação das amostras foi realizada a análise da microestrutura e química da amostra da linha de escória da panela. Foi utilizada uma lupa eletrônica (LUPA ZEISS STEMI 2000-C) para identificação das estruturas de interesse (Figura 26) a serem analisadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV).

Figura 26 – Imagem da identificação da microestrutura da amostra da linha de escória da panela na lupa eletrônica.

Após identificação das microestruturas de interesse a amostra foi analisada por microscopia eletrônica de varredura (MEV) onde foram identificados os possíveis compostos químicos com suas participações percentuais (análise semi-quantitativa via EDS) e as microestruturas de interesse realizando assim a análise *post-mortem* da amostra.

A partir destas análises puderam ser inferidos os possíveis fenômenos e mecanismos de desgaste dos refratários aos quais as painéis de transporte de aço desta aciaria estão sendo submetidos.

3.4 Construção do modelo final de previsão da vida da painél em função das variáveis operacionais

A partir das análises realizadas das variáveis operacionais e do estudo de *post-mortem* foi possível inferir quais delas são realmente relevantes para a construção de um modelo único global. Tal modelo deve ser capaz de prever o desempenho em termos de vida da painél em função das diversas características de processo nos quais estas painéis de transporte de aço da aciaria estarão sujeitas. Logo, foi elaborado via regressão múltipla através do software estatístico *Minitab*, tal modelo.

Para construção do modelo foram levadas em consideração as variáveis importantes nas análises descritas nos tópicos anteriores desta seção. Portanto para cada variável analisada e considerada relevante no processo de degradação da vida refrataria foi feita uma correlação múltipla (com todas as variáveis relevantes) contra a vida das painéis. Como citado na revisão bibliográfica a resposta final é uma equação de regressão múltipla onde é possível prever a vida das painéis em função de todos os parâmetros de relevância para o processo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, são apresentados os resultados encontrados nas análises dos bancos de dados e ensaios realizados nos refratários das panelas, assim como suas discussões. Primeiramente serão apresentadas e discutidas as correlações individuais das variáveis operacionais que, a princípio, poderia estar afetando o desgaste do refratário das panelas de aço (vida). Logo a seguir serão apresentadas as análises dos ensaios realizados nos tijolos refratários e posteriormente verificado se existe correlação física entre os ensaios e o banco de dados. Finalmente será mostrada a correlação final (equação) entre vida e todas as variáveis que efetivamente impactam no desgaste (vida) das panelas.

4.1 Análise da influência dos principais fatores (variáveis operacionais) na vida das panelas de aço

Para a análise e identificação dos principais fatores, ou melhor, das variáveis operacionais que impactam de maneira incisiva o desgaste refratário (vida das panelas) foram feitas diversas correlações e análises estatísticas onde, para cada variável, identificou-se o comportamento da vida das panelas. Estas variáveis estudadas foram estabelecidas a partir da revisão bibliográfica e da experiência dos diversos profissionais envolvidos no dia a dia da Usina. As variáveis selecionadas para análise foram:

1. Conversor na qual a corrida foi processada
2. Influência das temperaturas de processo
3. Classe do aço fabricado
4. Máquina de lingotamento na qual a corrida foi processada
5. Tipo de rota/tratamento metalúrgico da corrida
6. Influência dos tempos operacionais
7. Influência da oxidação da corrida no final de sopro
8. Influência das condições da panela
9. Influência da tonelagem (carga) das panelas
10. Influência do uso de plug e lança de injeção de gases
11. Influência do tipo de aço fabricado
12. Influência da composição da escória e das adições na panela

4.1.1 Análise da influência dos conversores na vida das panelas

A análise da possível influência do conversor (LD) no qual a corrida é vazada tem por objetivo identificar principalmente diferenças nas práticas e padrões operacionais durante o vazamento do aço destes equipamentos já que os LD's 5 e 6 são idênticos entre si (em termos de processo, equipamento e equipes) e diferindo quanto ao posicionamento e equipe de trabalho do LD 7. Além disso, influências indiretas como o tipo de aço vazado nestes equipamentos, temperaturas de final de sopro no LD e vazamento do aço, etc. podem ser fatores que contribuem para um melhor ou pior desempenho destas panelas.

Os gráficos apresentados nas Figuras 27, 28 e 29 foram construídos correlacionando a vida das panelas (campanha) e o número de corridas vazadas em cada conversor. Através destes gráficos é possível verificar que existe correlação entre vida da panela de aço e o conversor na qual as corridas são vazadas. Para os LD's 5 e 6 observa-se correlação positiva entre a quantidade de corridas vazadas nestes equipamentos e desempenho das panelas (vida). Porém esta correlação não foi observada para o LD7.

Figura 27 – Correlação entre vida da panela de aço (campanha) e quantidade de corridas processadas no conversor LD5.

Figura 28 – Correlação entre vida da panela de aço (campanha) e quantidade de corridas processadas no conversor LD6.

Figura 29 – Correlação entre vida da panela de aço (campanha) e quantidade de corridas processadas no conversor LD7.

Estas diferenças podem ser explicadas por diversos fatores como:

- Possíveis diferenças em práticas operacionais como, por exemplo, posição de vazamento do jato de aço do conversor para a panela (a literatura cita que o jato de aço deve ser lançado na região de impacto da panela, pois esta região do refratário está preparada para tal finalidade) e nível de maturidade das equipes de trabalho já que os equipamentos são similares, porém as equipes dos LD's 5 e 6 trabalham juntas entre si e separadas do 7.
- Diferenças entre as temperaturas de final de sopro e vazamento do aço entre os conversores.
- Tipo de aço, rota metalúrgica, etc. (estes fatores são indiretos e serão estudados individualmente nos próximos itens).

Buscando entender e confirmar os resultados mostrados acima, de que realmente existem diferenças na vida das panelas dependendo do conversor no qual a corrida foi vazada, foi feita uma distribuição percentual das corridas vazadas por conversor (participação percentual de cada conversor na campanha das panelas) e a vida das panelas (Figura 30). O gráfico da Figura 30 não deixa dúvidas com relação ao exposto acima de que vazar corridas no conversor LD7 é pior para o desempenho da vida das panelas quando comparado com os conversores LD5 e 6. Portanto esta variável (nº do conversor), a princípio, deve entrar no modelo final multivariado de previsão da vida das panelas.

A análise do gráfico da Figura 30 mostra que para desempenho maior das panelas (maior vida) a participação das corridas do conversor LD7 é menor do que para campanhas menores das panelas.

Figura 30 – Distribuição % (participação) das corridas vazadas por conversor na vida (campanha) das panelas.

Para uma melhor compreensão desta variável na vida das panelas foram analisadas as temperaturas de final de sopro (TFS) do aço (Figuras 31, 32 e 33) registradas nos conversores e do aço na panela após o vazamento (TCTO) destes equipamentos (Figuras 34, 35 e 36). Estas variáveis de processo, a princípio, são as que deveriam ter os maiores impactos no desgaste e consequentemente na vida da panela e que são controladas basicamente nos processos que ocorrem dentro dos conversores.

Figura 31 – Temperaturas de final de sopro do aço no LD5 ($\mu=1668^{\circ}\text{C}$ e $\sigma=24,59^{\circ}\text{C}$).

Figura 32 – Temperaturas de final de sopro do aço no LD6 ($\mu=1671^{\circ}\text{C}$ e $\sigma=23,30^{\circ}\text{C}$).

Figura 33 – Temperaturas de final de sopro do aço no LD7 ($\mu=1672^{\circ}\text{C}$ e $\sigma=24,14^{\circ}\text{C}$).

Figura 34 – Temperaturas do aço na panela após vazamento do LD5 ($\mu=1620^{\circ}\text{C}$ e $\sigma=19,10^{\circ}\text{C}$).

Figura 35 – Temperaturas do aço na panela após vazamento do LD6 ($\mu=1624^{\circ}\text{C}$ e $\sigma=19,98^{\circ}\text{C}$).

Figura 36 – Temperaturas do aço na panela após vazamento do LD7 ($\mu=1624^{\circ}\text{C}$ e $\sigma=20,45^{\circ}\text{C}$).

Com relação às temperaturas de final de sopro nos conversores, identificadas nos gráficos das Figuras 31, 32 e 33, a análise estatística feita através de teste de hipótese (teste F, sendo que para rejeição da hipótese nula de que as médias são iguais o F observado deve ser maior que F crítico ou a razão F observado / F crítico maior que 1) utilizando a ferramenta estatística ANOVA revelou que existe uma diferença entre as médias de temperatura entre o LD5 e LD6 e entre LD5 e LD7. Porém entre os LD's 6 e 7 estatisticamente as médias das temperaturas de final de sopro do aço são iguais. Isso mostra que o LD 7 quando comparado ao LD 5 está operando com uma temperatura média do aço no final do sopro de aproximadamente 4°C superior, o que pode estar contribuindo para uma piora no

desempenho da vida das placas na qual o aço ser vazado. J em relao ao LD6 no foi verificada nenhuma diferena em termos trmicos comparativamente ao LD7 (detalhes dos valores do F observado e do F crtico encontram-se no apndice I deste trabalho).

A anlise acima vai ao encontro do que foi mostrado na Figura 30 onde a participao das corridas vazadas reduzia no LD7 (maior temperatura), aumentava no LD5 (menor temperatura) com conseqente aumento da vida das placas. O fato da varivel temperatura do aço no final de sopro ser maior pode estar ocasionando um maior desgaste do refratrio das placas durante ou aps o vazamento.

A mesma anlise foi repetida, s que agora para as temperaturas do aço na placa aps vazamento (Figuras 34, 35 e 36). Da mesma forma, os resultados dos testes de hipteses utilizando a ferramenta ANOVA revelaram que as mdias das temperaturas so iguais quando comparadas as temperaturas do aço na placa oriundas dos LD's 6 e 7, e diferentes quando comparadas LD5 e LD6, e LD5 e LD7. Alm disso, a anlise idntica ao exposto para as temperaturas de final de sopro, ou seja, o aço oriundo do LD7 que acabou de ser vazado possui temperatura ao redor de 4C maior quando comparado ao LD5. Os resultados da anlise ANOVA podem ser visualizados no apndice II.

A princpio, das anlises acima, pode-se concluir que a varivel conversor na qual a corrida est sendo vazada influi no desempenho das placas, ora por conta de fatores (variveis) metalrgicos (temperaturas de final de sopro e de vazamento) que podem ser analisados pelas informaes dos bancos de dados ora, possivelmente, por fatores ligados s prticas operacionais de vazamento do aço na placa (posio do jato) que no podem ser analisadas diretamente do banco de dados. Outras variveis como tipo de aço, rota metalrgica, etc. tm tambm podem impactar indiretamente as anlises acima sendo que estas variveis so analisadas nas sees seguintes por no estarem diretamente ligadas aos conversores.

Em adio a anlise individual por conversor, foi realizada uma correlao estatstica mltipla entre vida das placas e os 3 conversores (eq.(10)). O grfico da Figura 37 evidencia a alta aderncia da equao proposta pelo modelo de regresso mltipla (eq.(10)). Uma concluso extrada da eq.(10) que em termos de efeito de desempenho vazar corridas nos LD's 5 e 6 aumenta a expectativa de vida da placa de aço quando comparada ao vazamento no LD7. Estas concluses podem ser

visualizadas pela análise dos coeficientes da eq.(10) de previsão de vida da panela em função do número de corridas vazadas por conversor (para os LD's 5 e 6 os coeficientes são positivos e maiores que 1, já para o LD7 o mesmo é menor que 1). Logo, o modelamento estatístico multivariado confirma o exposto nas análises acima realizadas e confirma o pior desempenho do refratário das panelas quando o aço vem do LD7.

Figura 37 – Correlação entre vida da panela de aço e os 3 conversores (real vs estimada).

Mais uma vez é evidenciado que o desempenho da vida das panelas de aço está sendo prejudicado quando as corridas são provenientes do LD7. Isso como comentado acima pode ser pelos motivos já citados anteriormente ou por possíveis práticas de vazamento diferentes entre os conversores o que corrobora com as afirmações feitas das análises dos gráficos das Figuras 27, 28 e 29.

$$Vida = 3,49 + 1,04 * ConversorLD5 + 1,02 * ConversorLD6 + 0,942 * ConversorLD7 \quad (10)$$

Onde:

- ConversorLD5 é o número de corridas vazadas no LD5
- ConversorLD6 é o número de corridas vazadas no LD6
- ConversorLD7 é o número de corridas vazadas no LD7

A eq.(10) nos dá uma boa previsão de vida das placas em função do número do conversor no qual a corrida será vazada (coeficiente de correlação de 97,88%).

4.1.2 Influência das temperaturas de processo

A variável temperatura, apesar de já ter sido inicialmente considerada no tópico anterior, é de extrema importância por isso procuramos aprofundar sua análise sob outros aspectos e não somente aqueles ligados a primeira variável (conversor no qual a corrida foi vazada). Apesar de ter sido encontrada diferenças entre os fornos em termos de temperatura e que a princípio esta seria a variável mais relevante ligada aos conversores (no que se refere ao processo de desgaste refratário da placa) juntamente com práticas operacionais de vazamento de aço, é preciso investigar mais a fundo estas temperaturas e de maneira direta com a vida das placas.

Para a análise das variáveis de processo, temperatura de vazamento do aço dos conversores e temperatura do aço na placa após vazamento, foi feita uma correlação direta entre estas variáveis e a vida das placas. Esta análise inicial mostrou pouca correlação com o desempenho em termos de vida das placas de aço quando analisada sem nenhum tipo de separação individual das placas. No caso das temperaturas de vazamento de aço não foi observada nenhuma correlação com a vida das placas de aço (Figura 38).

Figura 38 – Correlação entre vida da placa de aço e temperatura de vazamento do aço na placa.

Entretanto, através de uma observação mais cuidadosa dos dados do gráfico da Figura 38, é possível notar que existem dois grupos de painéis (dados) que possui comportamentos e correlações totalmente diferentes (Figura 39).

Figura 39 – Diferenças entre o comportamento dos dois grupos de painéis na correlação entre vida da placa de aço e temperatura de vazamento do aço.

Sendo assim foi feita uma análise individualizada por painéis, na qual para cada placa (Pn) foi calculada a média da vida com suas respectivas médias de temperatura de vazamento do aço durante suas campanhas (Figura 40).

Figura 40 – Análise individualizada por placa (P25,...,P7) da influência da temperatura de vazamento do aço na vida das placas.

A partir do gráfico da Figura 40 verifica-se que entre o pior desempenho (panela 25 – P25) com uma campanha média de aproximadamente 120 corridas até o melhor desempenho (panela 7 – P7) com uma campanha média de 168 corridas houve uma variação de temperatura de vazamento (queda) entre elas de aproximadamente 3°C. Esta mesma ordem de grandeza também já havia sido identificada no estudo da variável conversor na qual a corrida foi vazada e, como dito anteriormente o conversor 7 apresentava (impactava) a vida das panelas negativamente porque as temperaturas de final de sopro estavam ao redor de 4°C maiores que do conversor 5. Isto nos leva a concluir que pequenas variações a maior na temperatura do aço durante vazamento estão impactando negativamente a vida refratária das panelas.

Quando se analisa a temperatura do aço após o vazamento (conhecida como temperatura na panela – CTO) esta mostrou uma pequena influência, ou melhor, correlação com a vida das panelas. Neste caso observa-se que quanto maior a temperatura do aço após o vazamento na panela menor é a vida destas panelas (Figura 41).

Figura 41 – Correlação entre vida da panela de aço e temperatura do aço após vazamento na panela.

Estas evidências mostram que realmente o aumento da variável temperatura contribui negativamente com a vida das panelas.

Uma análise visual do gráfico da Figura 41 mostra que a média (vida das placas) nas temperaturas abaixo de 1620°C é maior do que daquelas situadas acima de 1620°C. Esta verificação de certa forma confirma o exposto acima de que operar com temperaturas mais altas impactam negativamente no desgaste e consequentemente na vida dos refratários das placas.

Da mesma forma que foi feita a análise individualizada por placa para a temperatura de vazamento do aço também foi feita para a temperatura do aço na placa após vazamento (Figura 42). Da mesma forma o comportamento é semelhante, ou seja, a vida da placa de certa forma aumenta quando trabalhamos com temperaturas inferiores. Neste caso a diferença do pior desempenho P25 (vida = 120 e temperatura = 1625°C) para o melhor desempenho (vida = 168 e temperatura = 1619°C) foi de 6°C.

Portanto, as variáveis operacionais, conversor na qual a corrida é vazada e temperaturas de vazamento e do aço na placa, são relevantes na construção do modelo multivariado de previsão da vida das placas.

Figura 42 – Análise individualizada por placa (P25,...,P7) da influência da temperatura do aço na placa após vazamento na vida das placas.

4.1.3 Influência das classes dos aços

A análise da possível influência das classes de aço no desempenho da vida dos refratários das placas de aço tem por objetivo identificar quais classes entre CG (Aços do tipo chapas grossas), PV (Placas para venda) e TQ (Laminados a quente ou posteriormente a frio) possuem maior impacto no processo de desgaste do refratário de tais placas, caso exista alguma correlação entre classe de material (aço) processado e desempenho do refratário.

Os gráficos das Figuras 43, 44 e 45 mostram que existe correlação entre vida da placa de aço e classe de aço vazado nestas placas para apenas duas destas classes, no caso CG e TQ. Com relação à classe PV não foi observado qualquer correlação.

Para ambas as classes, CG e TQ, observou-se uma correlação positiva, porém a correlação é maior para aços TQ do que CG. No entanto a contribuição em termos de maior desempenho parece estar vinculada a fabricar maiores quantidades de TQ em detrimento a CG (coeficiente da eq.(11) de regressão múltipla é maior para classe TQ). As diferenças podem ser explicadas por possíveis diferenças em termos de exigências durante o tratamento destas corridas no refino secundário, já que materiais da classe TQ sofrem processos mais brandos em termos de ajustes de composição química, temperatura e tempos de processamento impondo a estrutura refratária das placas menores exigências térmicas e químicas (análises a serem feitas nos itens posteriores).

Figura 43 – Correlação entre vida da placa de aço e a classe de aço CG.

Figura 44 – Correlação entre vida da panela de aço e a classe de aço PV.

Figura 45 – Correlação entre vida da panela de aço e a classe de aço TQ.

Em adição a análise individual por classe de aço, foi realizada uma correlação múltipla entre vida e as 3 classes de aços fabricadas na aciaria. Uma conclusão extraída da eq.(11), obtida na regressão múltipla, é que em termos de efeito de desempenho vazar aços da classe TQ melhora o desempenho refratário aumentando a vida das placas de aço quando comparada ao vazamento de aços CG e PV. Estas conclusões podem ser visualizadas pela análise dos coeficientes da eq.(11) de previsão de vida da placa em função do número de corridas vazadas por

classe de aço (para aços TQ's o coeficiente é positivo e maior que 1, já para as demais classes os coeficientes são menores que 1).

Figura 46 – Correlação entre vida da panela de aço e as classes de aço (real vs estimada).

O gráfico da Figura 46 mostra que a vida prevista pela eq.(11), em função do número de corridas estimadas por classe de aço está de acordo com os dados de vida real. A eq.(11) obtida por regressão múltipla é descrita abaixo:

$$\text{Vida} = 1,95 + 0,997 \cdot \text{CG} + 0,977 \cdot \text{PV} + 1,02 \cdot \text{TQ} \quad (11)$$

Onde:

- CG é o número de corridas vazadas de aço da classe chapas grossas
- PV é o número de corridas vazadas de aço da classe placas de venda
- TQ é o número de corridas vazadas de aço da classe tiras a quente

A eq.(11) nos dá uma boa previsão de vida das panelas em função do número de corridas vazadas em função da classe de aço (coeficiente de correlação de 97,6%).

Como analisado e explicado acima, o efeito benéfico (em relação à vida refratária das panelas) da fabricação de aços da classe TQ em detrimento ao PV e CG, que pode ser advindo de fatores como exigências de tratamento no refino secundário destes aços (TQ são aços mais simples de serem fabricados e exigem condições

mais suaves de temperatura, adições químicas, etc.) será feita e confirmada nas próximas seções, em especial, na parte relativa as rotas de tratamento metalúrgico e adições, onde será visto o forte impacto que tratamento da rota dessulfurado proporciona ao desempenho refratário (material CG é composto principalmente de aços com altas exigências de enxofre baixo, tratamento no forno panela e adições de fluidificantes de escória).

4.1.4 Influência das máquinas de lingotamento

A análise da possível influência da máquina de lingotamento na qual a corrida está sendo lingotada tem por objetivo identificar principalmente diferenças diretas nos tempos de panela cheia (tempo correspondente ao início de vazamento do aço na panela até o final de esgotamento do aço da panela nas máquinas de lingotamento), já que as 3 máquinas possuem diferentes tempos de processo (MLC4 de 25 a 35 min., MLC3 de 30 a 40 min, MLC2 de 40 a 60 min), e diferenças indiretas que estão relacionadas aos tipos de aços que estas máquinas podem fabricar. No caso dos tempos de processo o normal é que estes tempos de esgotamento sejam maiores na seguinte sequência: $MLC2 \geq MLC3 \geq MLC4$, uma vez que as velocidades de esgotamento das panelas durante o lingotamento são maiores para a máquina nº4 (MLC4) em relação à máquina nº3 (MLC3) do que na máquina nº2 (MLC2), pois a MLC4 opera com 2 veios, a MLC3 opera com 1 veio assim como a MLC2).

Além disso, a MLC3 fabrica aços mais nobres (com exigências de tratamento no refino mais elaborado e aplicações mais específicas) do que a MLC2 e MLC4, em especial a classe CG. Isso indiretamente pode mostrar um desempenho em termos de vida refratária da panela pior para os aços lingotados na MLC3.

A partir das análises visualizadas nos gráficos das Figuras 47, 48 e 49 notou-se que existe correlação forte e positiva para os aços lingotados na MLC4 e vida da panela de aço. Entretanto para as MLC3 (correlação baixa) e MLC2 (nenhuma correlação) o mesmo não foi verificado.

Figura 47 – Correlação entre vida da panela de aço e a máquina de lingotamento nº2 (MLC2).

Figura 48 – Correlação entre vida da panela de aço e a máquina de lingotamento nº3 (MLC3).

Figura 49 – Correlação entre vida da panela de aço e a máquina de lingotamento n°4 (MLC4).

O exposto acima vai de encontro ao que foi dito e esperado anteriormente, ou seja, como o esgotamento da panela na MLC4 é mais rápido (2 veios) e, além disso, os aços fabricados nesta máquina (TQ) são menos agressivos ao refratário da panela (este último somente quando comparado a MLC3) espera-se que a expectativa de desempenho em termos de vida do refratário da panela seja melhor quando estes aços são lingotados na MLC4, pois na prática estamos falando de menores tempos de ciclo das panelas e aços que exigem tratamentos mais simples (TQ).

A questão da maior velocidade de esgotamento está relacionada a possíveis menores tempos de ciclo das panelas, e neste caso são esperadas menores variações térmicas sofridas pelos refratários de tais panelas o que provavelmente induziria a formação de menores quantidades de trincas.

Além da análise individual por máquina, foi realizada uma correlação múltipla entre vida das panelas de aço e os aços fabricadas nas máquinas de lingotamento 2, 3 e 4 conjuntamente. Uma conclusão extraída da eq.(12) obtida pela regressão múltipla e que confirma o que já foi comentado nos itens acima é que o desempenho do refratário das panelas nas quais os aços são lingotados na MLC4 é melhor do que nas outras duas máquinas. Os coeficientes da eq.(12) mostram isso (para aços lingotados na MLC4 o coeficiente é positivo e maior que 1, já para a MLC3 o

coeficiente é menor que 1). O fato de que para a MLC2 o coeficiente de ajuste da equação também ser maior que 1 e positivo está correlacionado ao tipo de aço que é produzido nesta máquina (aços bem simples em termos de necessidades químicas e térmicas).

Figura 50 – Correlação entre vida da panela de aço e a máquina de lingotamento (real vs estimada).

O gráfico da Figura 50 ilustra a forte aderência da eq.(12) de previsão de vida em função das máquinas de lingotamento com a vida real destas panelas. A análise mostrada nesta figura foi construída mostrando a previsão da vida contra a vida real sendo que a previsão é dada pela eq.(12).

$$Vida = 2,49 + 1,05 \cdot MLC2 + 0,992 \cdot MLC3 + 1,01 \cdot MLC4 \quad (12)$$

Onde:

- MLC2 é o número de corridas lingotadas na máquina de lingotamento nº2
- MLC3 é o número de corridas lingotadas na máquina de lingotamento nº3
- MLC4 é o número de corridas lingotadas na máquina de lingotamento nº4

A eq.(12) mostra uma boa previsão de vida das panelas em função do número de corridas lingotadas em cada máquina (coeficiente de correlação de 97,7%).

Conclui-se que a variável máquina de lingotamento traz, indiretamente, através das variáveis tempos de ciclo e classe do aço, correlação com a vida das placas, sendo que a MLC3 impacta negativamente na vida das placas (maiores tempo de esgotamento e aços CG).

4.1.5 Influência das rotas/tratamentos metalúrgicos

Para a realização da análise da influência, ou melhor, da correlação entre a vida das placas e as diversas rotas/tratamentos metalúrgicos foram analisados 61 tipos de rota/tratamentos metalúrgicos ocorridos durante o período no qual os dados foram levantados. Entenda como rota/tratamento metalúrgico a sequência de etapas, processos e equipamentos nos quais cada corrida foi ou será submetida. Como exemplo, podemos citar a sequência: Conversor – Forno Placa – Máquina de Lingotamento 3 (Ajuste de composição química com adição de cálcio silício). Isto é, a corrida é inicialmente processada no conversor (refino primário), em seguida segue para o tratamento no forno placa (refino secundário) onde é feito o ajuste fino de composição química e são realizadas as adições incluindo o cálcio silício e, finalmente, sendo lingotada na máquina número 3.

O principal objetivo deste tipo de análise é verificar se determinados tipos de tratamentos metalúrgicos ou equipamentos desgastam em maior ou em menor intensidade os tijolos refratários das placas (o que indiretamente será visto em termos de vida da placa).

Diante da enorme quantidade (61 tipos de tratamentos identificados e analisados) de tratamentos/rotas metalúrgicas e da grande quantidade de correlações identificadas, para que a exposição destas análises não ficasse entediante e sem objetividade foi exposta nesta seção somente as rotas/tratamentos que realmente apresentaram algum tipo de correlação e que tiveram representatividade (%) do total de corridas analisadas. Além disso, primeiramente as análises foram feitas de maneira individual, ou seja, analisou-se individualmente cada uma das rotas e tratamentos com seus respectivos desempenhos em termos de vida da placa e, em seguida, por agrupamentos de rota/tratamento que de alguma maneira não possuem grandes diferenças entre si em termos de condições operacionais e metalúrgicas. O agrupamento tem por objetivo agrupar um maior número de dados e espera-se que

posuam similaridade dentro destes grupos com relação ao desempenho das painéis.

4.1.5.1 Análise individual das rotas/tratamentos metalúrgicos

Com relação à análise individual foram identificadas 10 do total das 61 rotas/tratamentos metalúrgicos (16%) que apresentaram, mesmo que baixo, algum tipo de correlação com o desempenho das painéis.

A primeira delas (gráfico da Figura 51) foi a rota (AJ CQ (FE AL CA) FP – MLC3 E 4), que compreende o processamento da corrida no conversor seguida do tratamento secundário no forno painel podendo ser lingotada ou na máquina de lingotamento 3 ou 4, sendo um tratamento metalúrgico de ajuste de composição química/temperatura e adição de fios de cálcio ferro – alumínio.

Figura 51 – Correlação entre vida da panela de aço e a participação % da rota/tratamento metalúrgico AJ CQ (FE AL CA) – MLC3 e 4.

Através do gráfico da Figura 51 verifica-se que o aumento da participação % de corridas (dentro da campanha como um todo) que sofreram o processamento dentro da rota/tratamento metalúrgico citada acima impacta negativamente o desempenho

em termos de vida da panela. O que diferencia este tipo de tratamento dos demais, basicamente, é a adição de fios de ferro-alumínio-cálcio (FEALCA). Como, tanto o elemento ferro quanto o alumínio, sempre estão presentes na grande maioria das corridas, a menos que tenha havido grandes diferenças em termos de aquecimento ou tempo de tratamento excessivos (estas 2 variáveis serão estudadas nas próximas seções) a adição de cálcio pode estar afetando ou induzindo o desgaste prematura do refratário.

A segunda delas (gráfico da Figura 52) foi a rota (AJ CQ – ALTO C (RH)), que compreende o processamento da corrida do aço no conversor seguida do tratamento secundário no desgaseificador a vácuo (RH) podendo ser lingotada em qualquer uma das máquinas de lingotamento, sendo um tratamento metalúrgico de ajuste de composição química/temperatura e adição de carbono.

Figura 52 – Correlação entre vida da panela de aço e a participação % da rota/tratamento metalúrgico AJ CQ – Alto C (RH).

O gráfico da Figura 52 ilustra como o aumento da participação % de corridas que sofreram o processamento dentro da rota/tratamento metalúrgico citada acima impactam positivamente o desempenho em termos de vida da panela. Este tipo de tratamento quando comparado com o primeiro é bem mais simples, já que, apenas é

feito o ajuste de composição química e temperatura além de adição de coque (fonte de carbono) o que na prática não traz nenhum tipo de impacto negativo no refratário. Outro fato é que provavelmente o tempo de tratamento nesta rota é menor que na anterior (esta variável será estudada nas próximas seções).

A terceira delas (gráfico da Figura 53) foi a rota (AJ CQ (AHF – MLC3)), que compreende o processamento da corrida no conversor seguida do tratamento secundário na estação AHF (equipamento onde o aquecimento é feito via aluminotermia) sendo posteriormente lingotada na máquina de lingotamento 3, sendo somente um tratamento metalúrgico de ajuste de composição química/ temperatura.

Figura 53 – Correlação entre vida da panela de aço e a participação % da rota/tratamento metalúrgico AJ CQ (AHF – MLC3).

É possível, através dos dados do gráfico da Figura 53, verificar que o aumento da participação % de corridas que sofreram o processamento dentro da rota/tratamento metalúrgico citada acima impactam positivamente o desempenho em termos de vida da panela. Este tipo de tratamento quando comparado com os dois anteriores apresenta-se mais simples, já que, apenas é feito o ajuste de composição química e temperatura e nenhuma adição de outros tipos de materiais. Neste caso,

provavelmente o tempo de tratamento nesta rota é menor que nas anteriores (será estudado nas próximas seções) com consequente menor necessidade de aquecimentos, o que na prática, seria uma condição menos agressiva ao refratário das panelas.

A quarta rota/tratamento (gráfico da Figura 54) foi a rota (AJ CQ (FP – MLC3)), que compreende o processamento da corrida no conversor seguida do tratamento secundário na estação Forno Panela sendo posteriormente lingotada na máquina de lingotamento 3, sendo somente um tratamento metalúrgico de ajuste de composição química/ temperatura e muito parecido ao anterior.

Figura 54 – Correlação entre vida da panela de aço e a participação % da rota/tratamento metalúrgico AJ CQ (FP – MLC3).

De maneira similar ao tratamento anterior, é possível identificar a correlação positiva (gráfico da Figura 54) entre o aumento da participação % de corridas que sofreram o processamento dentro da rota/tratamento metalúrgico citada acima e o desempenho em termos de vida da panela. Este tipo de tratamento quando comparado com os anteriores (exceto ao terceiro) apresenta-se mais simples, já que, apenas é feito o ajuste de composição química e temperatura e nenhuma adição de outros tipos de materiais. Neste caso, provavelmente o tempo de

tratamento é menor que nas rotas anteriores (será estudado nas próximas seções) com consequente menor necessidade de aquecimentos, o que na prática, seria uma condição menos agressiva ao refratário das panelas.

O que poderia talvez diferenciar esta rota da anterior seria o aquecimento via arco elétrico (forno panela) em detrimento ao aquecimento químico (AHF) da rota anterior. Porém, também como nos casos anteriores é preciso analisar os tempos de processamentos em cada uma destas rotas.

A quinta rota/tratamento (gráfico da Figura 55) foi a rota (AJ CQ + CaSi (FP – MLC3)), que compreende o processamento da corrida no conversor seguida do tratamento secundário na estação Forno Panela sendo posteriormente lingotada na máquina de lingotamento 3, sendo um tratamento metalúrgico de ajuste de composição química/ temperatura e adição de cálcio silício.

Figura 55 – Correlação entre vida da panela de aço e a participação % da rota/tratamento metalúrgico AJ CQ + CASI (FOPA – MLC3).

Através do gráfico da Figura 55 é possível identificar a correlação negativa entre o aumento da participação % de corridas que sofreram o processamento dentro da rota/tratamento metalúrgico citada acima e o desempenho em termos de vida da panela. Este tipo de tratamento quando comparado com os demais, em especial ao

caso anterior, diferencia-se apenas pela adição de cálcio silício (CASI). Este fato nos faz compreender que a adição deste composto provoca um comportamento totalmente oposto (deteriorização) da vida refratária já que no caso anterior (única diferença foi a não adição de cálcio silício) o comportamento foi totalmente contrário.

Além disso, este último caso quando comparado ao primeiro (também houve adição de cálcio na forma Ferro – alumínio - cálcio) mostrou-se grande similaridade em termos de deteriorização da vida refratária, porém de forma mais branda. Isto nos leva a conclusões preliminares de que a adição do elemento cálcio (na forma de CASI ou FEALCA) impacta negativamente o desgaste dos tijolos refratários e consequentemente na vida da panela de aço.

A sexta rota/tratamento (gráfico da Figura 56) foi a rota (AJ CQ SEMCASI (AHF)), que compreende o processamento da corrida no conversor seguida do tratamento secundário na estação AHF, sendo posteriormente lingotada em qualquer uma das máquinas de lingotamento e, como as demais, sendo um tratamento metalúrgico de ajuste de composição química/ temperatura sem nenhum tipo de adição especial (CASI ou FEALCA).

Figura 56 – Correlação entre vida da panela de aço e a participação % da rota/tratamento metalúrgico AJ CQ + SEMCASI (AHF).

Como em outras análises a correlação é pequena, porém existe. Na verdade o que é notado é a tendência positiva de aumento da vida da panela com o aumento da participação % da rota citada no gráfico da Figura 56. Esta também é uma rota teoricamente simples (rápidos tratamentos no refino secundário com pouco aquecimento e quase nenhum tipo de adição especial). Além disso, como não existe obrigatoriedade de lingotamento em uma máquina específica significa que os aços processados nestas rotas são os de menores exigências quanto ao tipo de tratamento metalúrgico.

A sétima (gráfico da Figura 57) rota/tratamento na qual foi verificada correlação com a vida das panelas foi a rota (AJ CQ SEMCASI (FP)), que compreende o processamento da corrida no conversor seguida do tratamento secundário na estação Forno Panela, sendo posteriormente lingotada em qualquer uma das máquinas de lingotamento e, como as demais, sendo um tratamento metalúrgico de ajuste de composição química/ temperatura sem nenhum tipo de adição especial (CASI ou FEALCA).

Figura 57 – Correlação entre vida da panela de aço e a participação % da rota/tratamento metalúrgico AJ CQ + SEMCASI (AHF).

Como descrito na análise anterior a correlação é pequena, porém existe. A tendência positiva de aumento da vida da panela com o aumento da participação %

da rota citada no gráfico da Figura 57 é claramente notada. Esta, como a anterior, também é uma rota teoricamente simples (rápidos tratamentos no refino secundário com pouco aquecimento e quase nenhum tipo de adição especial podendo ser lingotada em qualquer máquina). A única diferença é que nesta rota os aços nelas contida são tratados no forno panela com aquecimento elétrico ao invés de químico como no AHF.

Com relação a oitava (gráfico da Figura 58) rota/tratamento (DES S<6 (FOPA FECAAL) MLC 3 e 4) na qual foi verificada correlação com a vida das placas, esta rota compreende o processamento da corrida no conversor seguida do tratamento secundário na estação Forno Panela, sendo posteriormente lingotada ou na máquina 3 ou 4 de lingotamento, com ajuste de composição química/temperatura. Além disso, esta rota contempla, além da adição do composto já comentado anteriormente (FEALCA), o processo de dessulfuração do aço para teores baixos de enxofre (S<6). Este tipo de tratamento secundário de dessulfuração requer altos tempos de processo e aquecimento com possíveis adições de nefelina, composto este que, como analisado em seções posteriores, é extremamente danoso a estrutura refratária da panela.

Figura 58 – Correlação entre vida da placa de aço e a participação % da rota/tratamento metalúrgico DES S<6 (FOPA FECAAL) MLC3 e 4.

Como pode ser visto no gráfico da Figura 58, esta rota/tratamento é prejudicial para o desempenho da vida da panela. O aumento da participação deste tipo de tratamento em detrimento dos demais faz com que a expectativa de vida da panela reduza. As explicações seriam os altos tempos de processamento e aquecimento no forno panela devido à necessidade de reduzir o enxofre do aço a níveis muito baixo, adição de FECAAL, uso de lança e plug poroso (necessidade de alta agitação com gases inertes para remoção do enxofre pela escória) e possíveis adições de nefelina (necessidade de escória fluída para dissolução de enxofre na escória). Logo, até o momento, esta parece ser a rota/tratamento mais agressiva para o refratário dos tijolos das panelas.

Com relação a nona (gráfico da Figura 59) rota/tratamento (DES S=2 (FOPA) + MLC 3) na qual foi verificada correlação com a vida das panelas, está rota compreende o processamento da corrida no conversor seguida do tratamento secundário na estação Forno Panela, sendo posteriormente lingotada na máquina 3 de lingotamento, com ajuste de composição química/temperatura. Este processo, como o anterior, compreende a etapa de dessulfuração do aço para teores baixíssimos de enxofre (S=2 ou S=0,002%). Este tipo de tratamento secundário de dessulfuração requer altos tempos de processo e aquecimento com possíveis adições de nefelina, composto este que como analisado em seções posteriores e extremamente danoso a estrutura refratária da panela.

Figura 59 – Correlação entre vida da panela de aço e a participação % da rota/tratamento metalúrgico DES S=2 (FP) +MLC3.

Apesar dos poucos dados disponíveis verifica-se claramente a tendência de queda da vida da panela com o aumento da participação desta rota de tratamento. As explicações são as mesmas da rota anterior com a observância de que o nível de dessulfuração é muito maior (este é o mais baixo nível de enxofre de todos os aços produzidos na aciaria da Usina de Cubatão). Isto reforça as conclusões acima de que estas rotas com dessulfuração no forno panela são as que mais danificam a estrutura refratária das panelas.

Com relação à décima (gráfico da Figura 60) rota/tratamento (DES S<6 (FOPA) MLC 3 e 4) o comportamento é idêntico ao do gráfico da Figura 58, com a observação de que não existe adição de FEALCA. Os resultados e conclusões são similares ao exposto relativo à Figura 58.

Figura 60 – Correlação entre vida da panela de aço e a participação % da rota/tratamento metalúrgico DES S<6 (FP) +MLC3 e 4.

4.1.5.2 Análise por grupos de rotas/tratamentos metalúrgicos

Para uma melhor compreensão e análise dos dados foi feito um agrupamento das 61 rotas/tratamentos metalúrgicos, encontradas dentro do período de análise,

em grupos com características semelhantes, ou seja, grupos nos quais se espera que tenham comportamento semelhante dentro deles e diferentes entre eles.

As 61 rotas/tratamentos metalúrgicos foram divididas em 10 grandes grupos, a Tabela 11 ilustra estes grupos, assim como, suas respectivas participações percentuais em relação ao total de corridas analisadas e tipos de correlação com a vida da panela.

Tabela 11 – Grupos de rotas/tratamentos metalúrgicos analisados.

Grupo	Descrição da Rota	Siglas	Corridas	%	Tipo de Correlação
1	Ajuste de composição química sem cálcio silício	AJ CQ Sem CaSi	1680	26,3	Positiva
2	Ajuste de composição química com cálcio silício	AJ CQ Com CaSi	217	3,4	Negativa
3	Borbulhamento de argônio sem cálcio silício	Borb Arg Sem CaSi	3013	47,1	Positiva
4	Borbulhamento de argônio com cálcio silício	Borb Arg Com CaSi	65	1,0	Negativa
5	Dessulfurado	Dessulfurado	368	5,8	Negativa
6	Descarburado	Descarburado	126	2,0	Negativa
7	Desidrogenizado + Globulização	Desidrogenizado + Globulização	792	12,4	Positiva
8	Globulização com cálcio silício	Globulização (CaSi)	4	0,1	Positiva
9	Injeção de fio	Injeção de fio	43	0,7	Positiva
10	Rota cálcio silício	CaSi	90	1,4	Negativa
Total			6398	100	

Na análise dos dados dos grupos 1 e 2 (gráficos das Figuras 61 e 62) podemos observar e confirmar o que foi descrito nas análises anteriores a respeito da adição de cálcio silício nos tratamentos. Apesar das correlações serem baixas, se observarmos a tendência das retas de regressão linear fica claro que a adição é extremamente danosa e reduz a vida do refratário das panelas. Praticamente a única diferença entre os grupos 1 e 2 é a adição de cálcio silício nas corridas, já que as demais operações realizadas durante o refino secundário de forma geral são semelhantes.

Figura 61 – Correlação entre vida da panela de aço e a participação % do grupo rota/tratamento metalúrgico Ajuste de composição química sem cálcio silício.

Figura 62 – Correlação entre vida da panela de aço e a participação % do grupo rota/tratamento metalúrgico Ajuste de composição química com cálcio silício.

As baixas correlações podem ser devido ao fato de que, durante o agrupamento, apesar de se procurar agrupar os aços com características semelhantes ainda existe dispersões dentro dos grupos e, portanto estas rotas ainda abrangeriam outras rotas com comportamentos diferentes, porém a reta de regressão muda completamente de inclinação à medida que tenha ou não a adição de cálcio silício, confirmando o efeito deletério na vida das panelas.

Com relação aos grupos 3 e 4, as mesmas análises feitas para os grupos 1 e 2 podem ser verificadas (gráficos das Figuras 63 e 64).

Figura 63 – Correlação entre vida da panela de aço e a participação % do grupo rota/tratamento metalúrgico Borbulhamento de argônio sem cálcio silício.

Figura 64 – Correlação entre vida da panela de aço e a participação % do grupo rota/tratamento metalúrgico Borbulhamento de argônio com cálcio silício.

Já o quinto grupo (dessulfurado) inclui os tratamentos com graus de dessulfuração do aço no forno panela para enxofre muito baixo, enxofre $< 0,006\%$, (gráfico da Figura 65), ou seja, aqueles nos quais os tempos de tratamento e aquecimento são maiores e com possíveis adições de nefelina.

Figura 65 – Correlação entre vida da panela de aço e a participação % do grupo rota/tratamento metalúrgico Dessulfurado.

Observa-se no gráfico da Figura 65 uma correlação direta e negativa entre a vida das panelas e este grupo, sendo que, isto já tinha sido observado nas análises individuais das rotas/tratamentos metalúrgicos feitas anteriormente. Isto mostra e confirma que para este tipo de tratamento as condições as quais os refratários ficam expostas são as mais agressivas e as que mais impactam a vida da panela.

A análise dos demais tratamentos não mostrou fatos novos, ao contrario, não foi verificada correlações ou tendências relevantes (gráficos das Figuras 66, 67, 68, 69 70). Somente a rota descarburado mostra uma leve correlação negativa.

Figura 66 – Correlação entre vida da panela de aço e a participação % do grupo rota/tratamento metalúrgico Descarburado.

Figura 67 – Correlação entre vida da panela de aço e a participação % do grupo rota/tratamento metalúrgico Desidrogenizado + Globulização.

Figura 68 – Correlação entre vida da panela de aço e a participação % do grupo rota/tratamento metalúrgico Globulização (CaSi).

Figura 69 – Correlação entre vida da panela de aço e a participação % do grupo rota/tratamento metalúrgico Injeção de Fio.

Figura 70 – Correlação entre vida da panela de aço e a participação % do grupo rota/tratamento metalúrgico Cálcio Silício.

Uma observação interessante pode ser feita nas análises das Figuras 69 e 70, onde existe uma grande dispersão dos dados. Para estas rotas o que se esperava, em particular, a da Figura 70, era uma correlação muito negativa (rota com cálcio silício), porém a correlação foi levemente negativa. A dispersão dos dados e a

pequena participação % da produção destes grupos podem estar dificultando a observação das correlações. Além disso, existe a possibilidade de existir dentro destes grupos aços com comportamentos distintos entre eles.

A partir da análise das duas últimas seções relativas à influência (Individual e por agrupamentos) da variável rota/tratamento metalúrgico na vida das placas verificou-se que a maior e mais relevante correlação está relacionada à fabricação de aços que exigem baixos teores de enxofre cuja rota metalúrgica de fabricação é conhecida como rota Dessulfurado.

Procurando aprofundar a análise do impacto na vida das placas desta rota de tratamento, já que a mesma se mostrou extremamente relevante, foi feito um modelamento estatístico mais aprofundado da influência da rota Dessulfurado na vida das placas. A Figura 71 ilustra a influência da participação percentual da rota Dessulfurado na vida (campanha) das placas. Esta rota engloba a sequência metalúrgica onde o aço é fabricado no conversor passando em seguida por refino no forno placa sendo posteriormente lingotado na máquina de lingotamento contínuo. O que distingue esta rota das demais é a necessidade de dessulfuração do aço no forno placa (para níveis extremamente baixos de enxofre menores que 0,006%) onde o revestimento refratário fica mais exposto ao arco elétrico, a tempos de processo de refino elevados e a adições de fluxantes de escória como a nefelina (composto altamente corrosivo e de alta capacidade de degradação refratária das placas).

Os resultados mostram que o aumento da participação % de corridas cuja rota seja a de dessulfuração (rota Dessulfurado) em relação ao total de corridas durante a campanha da placa reduz a vida das placas. Além disso, quando se faz a análise dos dados do bloco 1 (Figura 71) com os dados do bloco 2 (onde a referência é a mediana dos dados) verifica-se que houve um aumento de 16% na vida média das placas com uma respectiva queda de 32% de participação média da rota de dessulfuração na campanha das placas. Já a comparação do melhor desempenho (175 corridas com 5% de participação da rota dessulfurada) com o pior (92 corridas com participação de 11% da rota dessulfurada) revela uma diferença ainda maior (redução de 47% na vida média da placa).

Figura 71 – Influência da participação % da rota Dessulfurado na vida (campanha) das panelas.

Quando se considera a vida média das panelas (154 corridas) verifica-se que existe um aumento de 21,5% na expectativa de vida das panelas quando é comparado a vida média das panelas do bloco 3 (135 corridas) em relação ao bloco 4 (164 corridas) para uma redução de 31,9% no percentual de redução da participação da rota dessulfurada do bloco 3 (7,5%) em relação ao bloco 4 (5,1%).

A análise por quartis (Figura 71) revela, a princípio, uma redução da vida com aumento da porcentagem de rota dessulfurada entre todos os quartis. Porém, realizando uma análise de variância entre os quartis (teste F, sendo que para rejeição da hipótese nula de que as médias são iguais o F observado deve ser maior que F crítico ou a razão F observado / F crítico maior que 1) existe somente uma real queda da vida entre os quartis 3 em relação a 1 e, entre o quartil 4 em relação ao 1. As demais análises de variâncias (ANOVA) são indicadas nas Tabelas 12 e 13. Os detalhes dos valores da estatística de teste F das análises estão nos apêndices III e IV deste trabalho.

Tabela 12 – Análise de variância (ANOVA) para as comparações da vida média das painelas.

Razão: (F_observado / F_crítico)	Vida_1° Quartil	Vida_2° Quartil	Vida_3° Quartil	Vida_4° Quartil	Vida_ Bloco 2	Vida_ Bloco 4
Vida_1°Quartil	1	4,419	6,699	8,635	NR	NR
Vida_2°Quartil	-	1	7,497	28,497	NR	NR
Vida_3°Quartil	-	-	1	9,585	NR	NR
Vida_4°Quartil	-	-	-	1	NR	NR
Vida_Bloco 1	NR	NR	NR	NR	6,699	NR
Vida_Bloco 3	NR	NR	NR	NR	NR	9,111

Símbolo (-) mesmo valor quando $a_{ij} = a_{ji}$, sendo a_{ij} o elemento da linha i e coluna j . Símbolo (NR) Não Realizado.

Tabela 13 – Análise de variância (ANOVA) para as comparações do % de rota Dessulfurado (%DS).

Razão: (F_observado / F_crítico)	% DS_ 1°Quartil	% DS_ 2°Quartil	% DS_ 3°Quartil	% DS_ 4°Quartil	% DS_ Bloco 2	% DS_ Bloco 4
% DS_1°Quartil	1	0,498	1,471	1,691	NR	NR
% DS_2°Quartil	-	1	0,265	0,355	NR	NR
% DS_3°Quartil	-	-	1	0,004	NR	NR
% DS_4°Quartil	-	-	-	1	NR	NR
% DS_Bloco 1	NR	NR	NR	NR	1,239	NR
% DS_Bloco 3	NR	NR	NR	NR	NR	1,353

Símbolo (-) mesmo valor quando $a_{ij} = a_{ji}$, sendo a_{ij} o elemento da linha i e coluna j . Símbolo (NR) Não Realizado.

Verifica-se que o aumento da participação, na campanha das painelas, de corridas que sofreram processo de dessulfuração impacta negativamente na vida refratária das painelas. Além das etapas básicas de ajuste de composição química e de temperatura, os processos que envolvem uma dessulfuração do aço para teores muito baixo de enxofre requerem altos tempos de processamento no refino secundário (no caso desta usina o forno painelas é o único equipamento do refino secundário capaz de realizar a dessulfuração do aço), adições de fluxantes de escória como a nefelina e possíveis adições de fios de cálcio silício. Em média, o tempo de tratamento no refino secundário para este tipo de rota é 50 % maior que uma rota comum. Outro fato relevante é que o uso do forno painela em processo de dessulfuração expõe mais acentuadamente o revestimento refratário das painelas ao

arco elétrico dos eletrodos, o que na prática, degrada a estrutura refratária das placas. Logo, para uma compreensão total do impacto, ou melhor, influência do tempo de contato do aço e escórias com o refratário das placas, foi analisado o tempo de tratamento do aço nas estações de refino secundário (*Power-On*). Esta análise foi feita considerando, para cada placa, a vida em função dos tempos médios de tratamento (*Power-On*) para cada campanha (esta análise foi feita na seção seguinte por fazer parte da próxima variável de estudo, tempos operacionais).

A análise ratificou as análises anteriores e, mostrou o grande impacto, que aumento nos tempos de tratamento no refino secundário reduz a vida da placa consideravelmente. Nos casos analisados (19 placas) 12 delas (63,2%), apresentaram forte correlação negativa entre vida (campanha) e tempo de tratamento no refino secundário. Os gráficos das Figuras 76 a 87 ilustram as correlações negativas. Vale lembrar que o pequeno número de pontos nos gráficos nos dá uma falsa impressão de pequena amostragem, porém cada ponto representa uma campanha da placa, ou seja, cada ponto é na verdade uma média de 154 corridas com suas respectivas médias de tempo de tratamento no refino secundário.

4.1.6 Influência dos tempos operacionais

Com relação aos tempos operacionais foram estudados a possível influência dos tempos de vazamento de aço dos conversores nas placas e os tempos de placa cheia (tempo entre início de vazamento de aço na placa ao final de esgotamento do aço da placa na máquina de lingotamento). Após esta análise verificou-se, dentro dos tempos de placa cheia, os respectivos tempos de tratamento no refino secundário (*Power-On*) citados no final da seção anterior.

4.1.6.1 Influência do tempo de vazamento do aço dos conversores na placa

No primeiro caso, tempos de vazamento de aço do conversor na placa, não foi observado qualquer tipo de relação entre esta variável de processo e a vida das placas de aço. Os gráficos das Figuras 72 e 73 abaixo foram construídos baseados nos tempos médios de vazamento de aço e nos desvios padrões dos tempos médios respectivamente.

Figura 72 – Correlação entre vida da panela de aço e a as médias dos tempos de vazamento de aço.

Figura 73 – Correlação entre vida da panela de aço e os desvios padrões dos tempos de vazamento de aço.

4.1.6.2 Influência do tempo de panela cheia

No segundo caso (com relação à variável operacional tempo de panela cheia) notou-se uma correlação média entre esta variável e a vida das panelas de aço. A princípio, conclui-se que para tempos muito grande de panela cheia existe uma tendência de queda da vida das panelas. Isto pode ser explicado baseando no fato de que tempos muito grande de panela cheia, ou estão correlacionados a excessivos tempos de tratamento do aço no refino secundário, ou a elevados tempos de espera da panela com aço a ser processados ou a elevados tempos de lingotamento e espera na torre das máquinas de lingotamento.

Nos casos de tempos elevados de refino secundário (tratamento do aço), o aço e consequentemente os refratários das panelas estarão submetidos a elevados e múltiplos aquecimentos e adições químicas, além de possíveis injeções de gases como argônio, o que na prática impõe à panela (refratário) condições severas em termos térmicos, químicos e de fluxo de fluídos. Como comentando na revisão bibliográfica, quase todos os mecanismos de desgaste refratário, em especial, corrosão química, formação de trincas e erosão, estão fortemente ligados a estes fatores.

Já no caso de tempos elevados de espera e lingotamentos, os mesmos na prática significam maior tempo de contato e consequentemente maiores probabilidades de reações entre escória e refratário, aço líquido e refratário. No estudo *post-mortem* realizado e citado nas próximas páginas deste trabalho, com uma destas panelas, foi claramente observado o ataque (corrosão química) da escória nos refratários da linha de escória. O gráfico da Figura 74 ilustra estes comentários.

Além disso, a partir de tempos de panela cheia maiores que 155 min (Figura 74), ocorre uma dispersão grande dos tempos e quedas bruscas da vida das panelas. Este valor de 155 min parece ser uma espécie de máximo permissível em tempos de panela cheia.

Figura 74 – Correlação entre vida da panela de aço e os tempos médios de panela cheia.

Para uma melhor compreensão e confirmação de que a vida das panelas pode ser influenciada pelos tempos de panela cheia foi realizada, como nos casos anteriores, uma análise individualizada na qual para cada panela (Pn) foi calculada a média da vida com suas respectivas médias de tempo de panela cheia durante as suas campanhas (gráfico da Figura 75).

Figura 75 – Análise individualizada por panela (P25.....P7) da influência do tempo de panela cheia na vida das panelas.

A partir do gráfico da Figura 75 verifica-se que entre o pior desempenho (panela 25 – P25) com uma campanha média de aproximadamente 120 corridas e tempo de panela cheia média de 173 min até o melhor desempenho (panela 7 – P7) com campanha de 168 corridas e tempo de panela cheia de 160 min houve uma variação de tempo de panela cheia (queda) entre elas de aproximadamente 13 min. Considerando que um tempo médio de tratamento em uma estação de refino secundário está ao redor de 30 a 40 min isto implicaria, caso esta diferença de 13 min estivesse relacionada a um maior tempo de refino secundário, em quase 40% a mais de tempo de exposição a aquecimentos, adições ou borbulhamento de gases nestas estações de refino.

4.1.6.2.1 Influência dos tempos de tratamento no refino secundário

Para uma compreensão total do impacto, ou melhor, influência do tempo de contato do aço e escórias com o refratário das panelas, foi analisado o tempo de tratamento do aço nas estações de refino secundário (*Power-On*). Este tempo corresponde a uma parcela do tempo de panela cheia analisado na seção anterior e, neste caso, supõe-se que são os tempos de maior relevância, pois é neste momento que o refratário estará sujeito as mais severas condições de ataque (exposição ao arco elétrico, adições de compostos químicos como fluidificantes, escorificantes e ligas, aquecimento químico, borbulhamento de argônio, adição de cálcio silício, etc.). Esta análise foi feita considerando, para cada panela, a vida em função dos tempos médios de tratamento para cada campanha.

A análise confirmou o que vem sendo dito nas análises anteriores e mostrou que o aumento nos tempos de tratamento no refino secundário reduz a vida das panelas. Nos casos analisados, das 19 panelas, 12 delas (63,2%), apresentaram forte correlação negativa entre vida (campanha) e tempo de tratamento no refino secundário. Os gráficos das Figuras 76 a 87 ilustram as correlações negativas. Vale ressaltar que o pequeno número de pontos nos gráficos nos dá uma falsa impressão de pequena amostragem, porém cada ponto representa uma campanha da panela, ou seja, cada ponto é na verdade uma média de 154 corridas com suas respectivas médias de tempo de tratamento no refino secundário.

Figura 76 – Correlação entre vida (campanha) da panela de aço número 1 e o tempo médio de tratamento no refino secundário, onde n representa o número de corridas (dados) de cada campanha.

Figura 77 – Correlação entre vida (campanha) da panela de aço número 3 e o tempo médio de tratamento no refino secundário, onde n representa o número de corridas (dados) de cada campanha.

Figura 78 – Correlação entre vida (campanha) da panela de aço número 4 e o tempo médio de tratamento no refino secundário, onde n representa o número de corridas (dados) de cada campanha.

Figura 79 – Correlação entre vida (campanha) da panela de aço número 6 e o tempo médio de tratamento no refino secundário, onde n representa o número de corridas (dados) de cada campanha.

Figura 80 – Correlação entre vida (campanha) da panela de aço número 11 e o tempo médio de tratamento no refino secundário, onde n representa o número de corridas (dados) de cada campanha.

Figura 81 – Correlação entre vida (campanha) da panela de aço número 14 e o tempo médio de tratamento no refino secundário, onde n representa o número de corridas (dados) de cada campanha.

Figura 82 – Correlação entre vida (campanha) da panela de aço número 18 e o tempo médio de tratamento no refino secundário, onde n representa o número de corridas (dados) de cada campanha.

Figura 83 – Correlação entre vida (campanha) da panela de aço número 19 e o tempo médio de tratamento no refino secundário, onde n representa o número de corridas (dados) de cada campanha.

Figura 84 – Correlação entre vida (campanha) da panela de aço número 20 e o tempo médio de tratamento no refino secundário, onde n representa o número de corridas (dados) de cada campanha.

Figura 85 – Correlação entre vida (campanha) da panela de aço número 22 e o tempo médio de tratamento no refino secundário, onde n representa o número de corridas (dados) de cada campanha.

Figura 86 – Correlação entre vida (campanha) da panela de aço número 24 e o tempo médio de tratamento no refino secundário, onde n representa o número de corridas (dados) de cada campanha.

Figura 87 – Correlação entre vida (campanha) da panela de aço número 25 e o tempo médio de tratamento no refino secundário, onde n representa o número de corridas (dados) de cada campanha.

Considerando a queda na vida das painelas com o aumento do tempo de tratamento no refino secundário, nos casos acima, esta queda média foi de 4 corridas por minuto a mais de tempo de tratamento, isto é, para cada minuto a mais

de tratamento do aço no refino secundário em relação ao tempo médio estima-se que a previsão da vida do refratário das placas seja reduzida em 4 corridas. Esta queda representa, se considerarmos uma vida média das placas de 154 corridas, redução de 2,6% na vida refratária por minuto a mais de tratamento no refino secundário em relação ao tempo médio de tratamento.

A análise das Figuras 76 a 87 revela que as inclinações das curvas (coeficiente angular) são diferentes para cada placa, ou seja, a vida pode ser mais ou menos impactada dependendo de algum fator intrínseco (estrutura refratária) ou extrínseco (tipo de equipamento de refino secundário utilizado para tratamento do aço, por exemplo). Partindo da hipótese de que o revestimento refratário é semelhante entre as placas (hipótese confirmada junto ao pessoal de manutenção refratária e fornecedores) e que o fator tipo de equipamento de refino secundário ao qual a placa será submetida ao longo de sua campanha é sempre citado na literatura e na área operacional como fator de grande relevância no desempenho das placas, foi realizada uma análise para verificar a correlação entre o coeficiente angular (inclinação das curvas) e a participação percentual do tempo de tratamento de cada ajuste no refino secundário e o tempo total de tratamento metalúrgico. As análises confirmam as expectativas e mostram o impacto que o forno placa tem na degradação do refratário e consequentemente na vida das placas. As Figuras 88, 89, 90 e 91 ilustram o impacto negativo na vida das placas quando a participação do forno placa é aumentada em detrimento do aumento do uso dos demais equipamentos de refino (AHF, RH e EBA). Como pode ser visto nestas figuras, o forno placa é o único que resulta em uma inclinação negativa, ou seja, o aumento da participação do tempo total de tratamento deste refino diminui a expectativa de vida das placas.

Figura 88 – Impacto da utilização do forno panela na vida das painelas.

Figura 89 – Impacto da utilização do AHF na vida das painelas.

Figura 90 – Impacto da utilização do RH na vida das painelas.

Figura 91 – Impacto da utilização da EBA na vida das painelas.

Cada ponto do gráfico é a correlação de cada curva (coeficiente angular) com a participação % do tempo de cada tipo de equipamento de refino secundário (forno panela, AHF, RH e EBA). Nota-se nas figuras 88 a 91 que o forno panela impacta negativamente (quanto maior participação % no tempo de tratamento total mais

negativo é o coeficiente angular) em detrimento aos demais equipamentos que possui suas correlações totalmente opostas.

Outra maneira de enxergar as conclusões anteriores seria a de que cada curva (Figuras 76 a 87) é girada no sentido horário (mais inclinada negativamente) à medida que a participação do forno panela aumenta na campanha de cada panela.

Com relação às demais panelas (36,7%) que não apresentaram correlação ou correlação levemente positiva, a princípio, não se pode tirar conclusões, pois provavelmente outras variáveis, além do tempo de tratamento e equipamento de refino, estão influenciando de maneira mais relevante de tal modo que os efeitos se anulem.

Buscando elucidar ainda mais os resultados encontrados, foi feita uma correlação múltipla entre a vida média das panelas com os respectivos tempos médios de tratamento em cada tipo de equipamento do refino secundário. Entretanto, por se tratar de correlação múltipla e objetivando buscar um modelo multivariado, utilizou-se na regressão múltipla todos os dados das campanhas das panelas, ou seja, a correlação múltipla é relativa aos dados de correlação negativa entre tempo de tratamento no refino secundário e vida das panelas (63,2%), correlação levemente positiva e não correlação (36,7%).

O gráfico da Figura 92 e a eq.(13) confirmam a quase totalidade das análises acima. Porém, um fato novo surge quando se observa a eq.(13). Quando são analisados os coeficientes da equação para os refinamentos AHF, FOPA e RH estes coeficientes comprovam as contribuições relativas em termos de vida das panelas, no caso, AHF e RH contribuem positivamente na vida em relação ao forno panela que contribui negativamente (todas as análises feitas anteriormente mostraram isso). Já a surpresa fica por conta do coeficiente da EBA, que no caso está totalmente negativo. As análises feitas anteriormente mostravam que este equipamento não impactava negativamente na vida das panelas, porém isso é uma verdade quando analisados somente as correlações negativas entre vida da panela e tempo de tratamento (63,2%) das amostras. As demais 36,7% (amostras sem correlação ou levemente positiva) que anteriormente ficaram sem solução (possibilidade de análise) agora começam a revelar (através da correlação múltipla) o verdadeiro impacto da EBA.

Em termos de processo (condições de temperatura, pressão, adições, tempos, etc.) o que ocorre na EBA são situações bem mais brandas do que nos outros

equipamentos, porém é neste equipamento que é feita a grande maioria das adições de fios de CASI ou FeALCA e neste caso seria a única explicação para este impacto negativo na vida das placas indiretamente revelado pelo coeficiente negativo da eq.(13) e mostrado nas análises anteriores.

Infelizmente não foi possível buscar com certo grau de confiança quais corridas feitas na EBA foram adicionados CASI ou FeALCA juntamente com suas respectivas vidas médias das placas para que pudessemos comparar tais diferenças.

Figura 92 – Correlação múltipla entre vida das placas e tempo de tratamento nos refinis.

$$\text{Vida} = 185 + 0,38 \cdot \text{TMT_AHF} - 1,9 \cdot \text{TMT_FOPA} + 0,091 \cdot \text{TMT_RH} - 2,45 \cdot \text{TMT_EBA} \quad (13)$$

Onde:

- TMT_AHF é o tempo médio de tratamento no refino AHF
- TMT_FOPA é o tempo médio de tratamento no refino forno placa
- TMT_RH é o tempo médio de tratamento no refino RH
- TMT_EBA é o tempo médio de tratamento no refino EBA

O fator que mais difere o forno placa dos demais equipamentos (AHF e RH) é a forma de aquecimento que no forno placa é via arco elétrico e nos demais é via aquecimento aluminotérmico. A EBA é um equipamento que simplesmente faz algumas adições, homogeneização e sem aquecimentos. As análises até aqui

mostram que a utilização do forno panela, em especial na rota de tratamento metalúrgico de dessulfuração para aços com baixos teores de enxofre, onde os altos tempos de tratamento se mostraram impactantes no desempenho da vida das panelas, está impactando de forma intensa a degradação e conseqüentemente vida das panelas. Outro fator relevante na análise desta rota de tratamento metalúrgico, além da utilização do forno panela e dos altos tempos de tratamento seria a utilização de fluxantes de escória como a nefelina, prática comum em algumas aciarias, com o intuito de otimização do processo de dessulfuração para níveis baixos de enxofre no aço. A análise do consumo de nefelina (próximas seções) para os diferentes grupos de aço comprovará as suposições acima e mostrará, em termos de consumo específico por grupo de aço, os altos consumos para os grupos de aço onde se praticam altas taxas de dessulfuração.

4.1.7 Influência da oxidação

A análise dos níveis de oxidação do banho metálico (Figuras 93 e 94) antes da corrida ser vazada para a panela de aço também foi analisada. Entretanto não foi observado qualquer tipo de correlação entre esta variável operacional e o desempenho em termos de vida da panela de aço.

Figura 93 – Correlação entre vida da panela de aço e oxigênio do aço no final de sopro.

Figura 94 – Correlação entre vida da panela de aço e oxigênio soprado no LD.

Os níveis de oxidação do aço antes do vazamento dos conversores não parecem influenciar no desgaste (vida) da panela, apesar de que, a princípio, esta variável seria importante devido a presença de carbono no refratário da linha de escória que poderia estar sendo oxidado por níveis elevados de oxigênio dissolvido no aço. Isto pode ser devido ao fato de que a prática operacional vigente é de realizar o vazamento de aço e juntamente adicionar alumínio ou silício para desoxidação. Como a adição é no mesmo momento do vazamento do aço na panela, não há tempo suficiente para que o carbono seja oxidado.

4.1.8 Influência das condições da panela

Com relação à análise da influência das condições das panelas de aço no desempenho em termos de vida do refratário foram consideradas 3 estados da panela de aço, a saber: 1-Panelas de aquecedor (panelas que antes de receber uma corrida estavam em processo de aquecimento e não provinham do ciclo operacional), 2-Panelas de ciclo (panelas que estavam recebendo corridas e tinham tempo de ciclo menor que 70 min.), 3-Panelas de ciclo vencido (panelas que estão recebendo corridas, porém o tempo de ciclo é maior que 70 min.).

A análise dos dados revelou que existe correlação entre o estado inicial da panela de aço e seu desempenho em termos de vida da panela. Entretanto uma análise simples do número de corridas para cada estado e a vida destas panelas mostrou-se insuficiente para um diagnóstico preciso. Para a primeira variável, ou melhor, primeiro estado da panela (panelas de aquecedor) os dados revelaram uma correlação positiva, ou seja, de acordo com a análise inicial estas panelas, de alguma forma contribuem com aumento do desempenho do refratário (aumento da vida). O gráfico da Figura 95 mostra o exposto acima.

Figura 95 – Correlação entre vida da panela de aço e o número de corridas com panela de aquecedor.

Isto em parte poderia ser explicado devido ao fato de que estas panelas, apesar de ter passado tempo considerável nos aquecedores, receberam corridas cujo processo de refino secundário deve ter sido mais simples, ou seja, os aços tratados nelas foram aços com menores exigências em termos químicos, térmicos e de circulação de fluídos. Entretanto, no final desta seção veremos através de regressão múltipla que panelas oriundas dos aquecedores impactam, quando comparadas com as panelas de ciclo, de maneira a reduzir a vida do refratário.

Já com relação ao segundo estado (panelas de ciclo) da variável condição da panela de aço foi constatada uma correlação considerável e positiva. O gráfico da

Figura 96 ilustra a correlação feita entre números de corridas processadas com painelas provenientes de ciclo operacional e a vida destas painelas.

Figura 96 – Correlação entre vida da panela de aço e o número de corridas com panela de ciclo.

A análise do gráfico acima mostra que quanto maior o número de corridas que se possa fazer com painelas que estão dentro do ciclo, ou seja, painelas cujo tempo de ciclo operacional seja menor que 70 min tendem a aumentar a vida do refratário. Isto parece plausível, já que trabalhando com este intervalo de tempo diminuem-se grandes variações térmicas do refratário e consequentemente possíveis gerações de trincas térmicas. Além disso, nestes casos os processos de refino secundário provavelmente estiveram dentro dos tempos padrões. No final desta seção será mostrado, através da análise múltipla, que entre os três estados citados acima este é o que tem impacto positivo (aumento de vida refratária da panela) quando comparado aos demais.

Com relação ao terceiro estado (painelas com ciclo operacional vencido) da variável operacional condição da panela verificou-se algo inesperado. Foi constatada também uma correlação positiva e o que se esperava seria exatamente o oposto tanto pelos tempos elevados de refino secundário quanto pelos possíveis tempos elevados de espera entre processos o que levaria a uma degradação do refratário maior e consequente redução da vida da panela (gráfico da Figura 97).

Figura 97 – Correlação entre vida da panela de aço e o número de corridas com panela de ciclo vencido.

Entretanto mais uma vez com a análise múltipla foi possível verificar o impacto negativo na vida das painelas, quando comparado aos outros dois estados desta variável, devido à condição da panela ser de ciclo vencido.

Em complemento a análise individual, foi realizada uma correlação múltipla entre vida das painelas de aço e as três condições (estados) das painelas antes de receber as corridas. Uma conclusão extraída da regressão múltipla eq.(14) e que confirma o que já era esperado e que em algumas análises acima não foi claramente entendida é que o desempenho do refratário das painelas nas quais os aços são fabricados é superior em termos de vida quando estas painelas são provenientes do ciclo operacional. Os coeficientes da eq.(14) mostram que para corridas tratadas em painelas de ciclo o coeficiente é positivo e maior que 1, já para corridas tratadas em painelas de aquecedor ou de ciclo vencido o coeficiente é menor que 1.

Esta confirmação é o que se espera, pois acredita-se, como citado varias vezes na revisão bibliográfica, variações térmicas e elevados tempos de tratamento e espera levam ao colapso qualquer estrutura refratária que é o caso exatamente de painelas de ciclo vencido ou que estão muito tempo nos aquecedores sem receber corrida.

Figura 98 – Correlação entre vida da panela de aço e condições das painelas (real vs estimada).

O gráfico acima mostra a previsão de vida dada pela eq.(14) obtida via regressão múltipla e a vida real destas painelas para as condições reais. A eq.(14) é dada abaixo com seus respectivos parâmetros.

$$\text{Vida} = 3,19 + 0,978 \cdot \text{Painéis de Aquecedor} + 1,11 \cdot \text{Painéis de Ciclo} + 0,950 \cdot \text{Painéis de Ciclo Vencido} \quad (14)$$

Onde:

- Painéis de Aquecedor é o número de corridas vazadas em painelas oriundas de aquecedor
- Painéis de Ciclo é o número de corridas vazadas em painelas oriundas do ciclo operacional
- Painéis de Ciclo Vencido é o número de corridas vazadas em painelas oriundas do ciclo operacional vencido

A eq.(14) nos dá uma boa previsão de vida das painelas em função das condições das painelas que receberam as corridas (coeficiente de correlação de 97,9%). Obs. (Painéis de Aquecedor + Painéis de Ciclo + Painéis de Ciclo Vencido = Vida Média das Painelas).

4.1.9 Influência da tonelagem das painelas

Com relação à influência da tonelagem de aço vazada nas painelas (carga média de aço vazado dos conversores na painela) na vida das painelas, foi analisada se flutuações de carga de aço vazada impactam no desgaste refratário das painelas. Na prática isso representa variações do nível de trabalho nas painelas e por consequência escória em contato com a linha de metal ou aço em contato com a linha de escória.

A análise dos dados revelou que existe uma correlação, aparentemente não tão forte, mas que na medida em que se trabalha com cargas maiores (nível de aço elevado nas painelas) a vida da painela tende a diminuir (gráfico da Figura 99).

Figura 99 – Correlação entre vida da painela de aço e a quantidade de aço vazada nas painelas.

A questão pode ser explicada pelo fato de que trabalhar com níveis mais elevados de aço na painela está ocasionando contato entre linha de escória e aço. Caso os tijolos da linha de escória não sejam compatíveis (preparados) para este tipo de contato com os aços fabricados pode haver algum tipo de interação provocando desgaste dos refratários da linha de escória.

Assim como nas análises anteriores foi feita a análise individualizada por painela na tentativa de confirmação das observações acima. O gráfico abaixo ilustra a influência do aumento da carga de aço vazada na painela e a redução das campanhas médias destas painelas.

Figura 100 – Análise individualizada por panela (P25.....P7) da influência da carga média de aço vazada na panela e a vida das panelas.

4.1.10 Influência do uso de plug e lança de injeção de gases

Infelizmente os dados relativos a injeções de gases inertes como argônio pelo plug ou por lanças de injeção nos equipamentos de refino secundário e nas panelas de aço são totalmente escassos e não confiáveis, pois o nível de automação e armazenamento de dados é totalmente precário e sem nenhum controle. Por isso, não foi possível, de maneira razoável, fazer qualquer tipo de análise destas variáveis. Apenas colocamos este pequeno tópico para alertar sobre importância de análise desta variável, já que os processos erosivos nos quais a movimentação de fluídos são os maiores responsáveis podem estar ocorrendo nas panelas, em especial, nos processos que necessitam de grande agitação do aço e da escória (dessulfuração de aço, por exemplo). Foi observado nas análises anteriores, da variável rota de tratamento metalúrgico, que a rota/tratamento de dessulfuração do aço para níveis baixos de enxofre é a que tem maior correlação com a degradação refratária da vida das panelas. A dessulfuração do aço no refino secundário, dentre outras coisas, necessita de muito contato entre o aço e a escória para que se tenha grandes níveis de dessulfuração e, isso, é feito através de agitação do banho com gases inertes injetados pelo plug poroso e/ou por lanças de injeção de gases.

4.1.11 Influência do tipo de aço

A análise da influência dos diferentes tipos de aço na vida das placas foi feita através da tentativa de correlacionar a participação percentual destes aços contra a vida (campanha) das placas. No período em que os dados foram levantados foram identificados 212 tipos de aços diferentes, sendo que cada tipo é referenciado por um número como, por exemplo, o aço 150. Esta identificação é a utilizada pela empresa durante os processos de fabricação.

A partir dos dados analisados verifica-se que somente uma pequena parcela destes aços (5%) apresentou alguma correlação entre vida da placa e tipo de aço. Uma explicação plausível para isso seria o fato de que quando se faz uma análise individualizada (somente a variável tipo de aço) pode haver a interferência simultânea de tantas outras variáveis que a correlação direta se torna de difícil visualização. De fato a análise por rota/tratamento metalúrgico feita anteriormente revela de forma mais clara a correlação, pois a variável rota/tratamento na verdade reúne de maneira indireta outras características que não estão explicitadas de maneira direta.

Apesar disto é possível notar que existem aços que tendem a reduzir a vida das placas, assim como aços que tendem a aumentar ou, até mesmo, são indiferentes. Abaixo estão aqueles aços que apresentaram, mesmo que de forma branda, algum tipo de correlação.

Figura 101 – Influência (correlação) do aço 360 na vida das placas de aço.

Vale lembrar que a participação das corridas a qual os gráficos se referem é o percentual de corridas de cada campanha da panela relativo a este tipo de aço, ou seja, quantos % em termos de corridas foi produzido de cada aço na campanha como um todo.

Figura 102 – Influência (correlação) do aço 473 na vida das panelas de aço.

Figura 103 – Influência (correlação) do aço 487 na vida das panelas de aço.

Figura 104 – Influência (correlação) do aço 499 na vida das painéis de aço.

Figura 105 – Influência (correlação) do aço 534 na vida das painéis de aço.

Figura 106 – Influência (correlação) do aço 572 na vida das placas de aço.

Figura 107 – Influência (correlação) do aço 692 na vida das placas de aço.

Figura 108 – Influência (correlação) do aço 820 na vida das painéis de aço.

Figura 109 – Influência (correlação) do aço 824 na vida das painéis de aço.

Figura 110 – Influência (correlação) do aço 833 na vida das painéis de aço.

Durante as investigações acima, ou seja, da análise aço a aço, notou-se que existem pontos para quase todos os tipos de aço que estão situados em cima do eixo da ordenadas e que conseqüentemente estariam indicando que existiria para uma produção de nenhuma corrida para aquele tipo de aço uma vida prevista. Porém esta interpretação, ou melhor, esta correlação na verdade não existe e, ainda, poderia estar dando a falsa impressão de não correlação para os demais aços que poderiam ter correlação direta. Sendo assim, para uma melhor análise, foi retirado do banco de dados os pontos que estão sobre o eixo das ordenadas (vida para participação de 0% de cada tipo de aço) e feita nova correlação. As novas análises revelaram o que já era esperado, ou seja, parte das correlações estavam sendo mascaradas por pontos que não representam a realidade e a retirada destes pontos revelam todos os aços que de alguma forma tem impacto significativo na vida das painéis.

Do total dos 212 aços observou-se que 50 deles (23,6%) apresentaram correlação com a vida das painéis. A análise, juntamente com os 50 gráficos seria totalmente estressante e entediante, por isso optou-se, neste caso, em construir uma tabela (Tabela 14) agrupando estes aços com suas características principais.

Tabela 14 – Correlação do tipo de aço e vida das placas dos aços que influem na vida refratária.

Aço	R ²	Tipo	Equação	Rota/Tratamento Metalúrgico	CaSi	FeCa	Família
105	0,7708	(-)	$y = -19961x + 286,07$	BORB. ARGONIO/ MLC3	N	N	-
121	0,9963	(-)	$y = -14888x + 255,07$	BORB. ARGONIO/ MLC3 OU MLC4	N	N	Peritético
150	0,8022	(-)	$y = -19466x + 285,19$	AJCQ (C ALTO) + CASI(FP) + MLC3 ou MLC4	S	N	-
151	0,9948	(-)	$y = -17176x + 271,31$	AJ CQ FEALCA + MLC 3	N	S	Peritético
152	0,9948	(-)	$y = -17176x + 271,31$	AJ CQ FEALCA + MLC 3	N	S	Peritético
198	0,9769	(-)	$y = -15721x + 260,27$	AJUSTE CQ (Fe Al Ca) + MLC3 ou MLC 4	N	S	Peritético
214	0,9765	(-)	$y = -15363x + 259,28$	AJ CQ + CASI + MLC3 ou MLC4	S	N	Peritético
218	0,9548	(-)	$y = -17872x + 273,02$	GLOBULIZAÇÃO (FEALCA-FIO) + MLC3 ou 4	N	S	Peritético
238	0,9864	(+)	$y = 2812,1x + 105,79$	DESCARBURAÇÃO + MLC 3 OU 4	N	N	UBC-Geral
313	0,9718	(-)	$y = -28712x + 344,15$	BORB. ARGONIO + MLC3	N	N	Peritético
323	0,6755	(+)	$y = 260,82x + 158,19$	AHF- AJUSTE DE COMPOSIÇÃO QUÍMICA + MLC 3 ou MLC4	N	N	Comum
329	0,9304	(-)	$y = -28147x + 343,19$	DESSULF ACO S< 6 (FP) + MLC 3 ou MLC 4	N	N	Baixo Enxofre
331	0,4907	(-)	$y = -1160,7x + 169,7$	BORB. ARGONIO	N	N	Peritético
353	0,9852	(-)	$y = -18476x + 279,73$	BORB. ARGONIO + MLC3 OU MLC4	N	N	Peritético
362	0,9724	(-)	$y = -16209x + 263,4$	DESCARBURAÇÃO + MLC 3 OU 4	N	N	UBC-Geral
367	0,9953	(-)	$y = -17427x + 271,38$	AJUSTE COMP. QUIMICA	N	N	Comum

Tabela 14 – Correlação do tipo de aço e vida das placas dos aços que influem na vida refratária.
(continuação)

Aço	R ²	Tipo	Equação	Rota/Tratamento Metalúrgico	CaSi	FeCa	Família
412	0,9827	(-)	$y = -17302x + 270,68$	DESSULF ACO S< 6 (FP) + MLC 3 ou MLC 4	N	N	Baixo Enxofre
432	0,7441	(-)	$y = -26340x + 328,5$	DESIDROGENACAO + MLC3 OU MLC4	N	N	Desgaseificado
446	0,9689	(-)	$y = -21694x + 298,09$	DESSULF ACO <= 3 + MLC3	N	N	Baixo Enxofre
473	0,7725	(-)	$y = -2323,5x + 174,43$	DESSULF ACO S< 6 (FP) + MLC 3 ou MLC 4	N	N	Baixo Enxofre
483	0,6811	(+)	$y = 1506,4x + 156,27$	DESSULF ACO S<= 3 (FP) + MLC 3 ou MLC 4	N	N	DR-Geral
484	0,9345	(-)	$y = -21581x + 299,58$	BORB. ARGONIO	N	N	Desgaseificado
499	0,9707	(-)	$y = -14718x + 250,99$	DESSULF ACO S <= 4 (FP) + MLC 3 ou MLC 4	N	N	Baixo Enxofre
522	0,9996	(-)	$y = -16651x + 266,2$	DESIDROGENACAO	N	N	DR-Geral
534	0,5054	(-)	$y = -4030,2x + 184,52$	DESSULF ACO S< 6 (FP) + MLC 3 ou MLC 4	N	N	Baixo Enxofre
538	0,9441	(-)	$y = -18627x + 277,77$	AJ CQ + CASI + MLC3 ou MLC4	S	N	Comum
552	0,9972	(-)	$y = -17561x + 272,54$	AJ CQ + CASI + MLC3 ou MLC4	S	N	Peritético
566	0,9963	(-)	$y = -20293x + 289,44$	BORB. ARGONIO + MLC3 OU MLC4	N	N	Peritético
616	0,9865	(-)	$y = -14623x + 255,18$	DESSU ACO S<=3 (CASI)	S	N	Baixo Enxofre
619	0,9818	(-)	$y = -18295x + 276,07$	DESSULF ACO S< 6 (FP) + MLC 3 ou MLC 4	N	N	Baixo Enxofre
640	0,9717	(-)	$y = -22458x + 303,73$	BORB. ARGONIO	N	N	Peritético
641	0,9618	(-)	$y = -21731x + 298,59$	DESSULF ACO S <= 5 (FP) + MLC 3 ou MLC 4	N	N	Baixo Enxofre
681	0,9685	(-)	$y = -24774x + 319,21$	DESIDROGENACAO + MLC3 OU MLC4	N	N	Desgaseificado
686	0,9012	(-)	$y = -18001x + 275,9$	DESIDROGENACAO + MLC3 OU MLC4	N	N	Desgaseificado

Tabela 14 – Correlação do tipo de aço e vida das placas dos aços que influem na vida refratária.
(conclusão)

Aço	R ²	Tipo	Equação	Rota/Tratamento Metalúrgico	Ca Si	FeCa	Família
692	0,9814	(-)	$y = -17549x + 270,27$	DESSULF ACO S< 6 (FP) + MLC 3 ou MLC 4	N	N	Baixo Enxofre
710	0,9768	(-)	$y = -22001x + 300,71$	DESSULF ACO S< 6 (FP) + MLC 3 ou MLC 4	N	N	Baixo Enxofre
774	0,7210	(-)	$y = -1045,5x + 178,25$	BORB. ARGONIO	N	N	Desgaseificado
815	0,9919	(-)	$y = -17058x + 269,95$	DESID + GLOB(FP+RH+CA) + MLC3	S	N	DR-Geral
820	0,9908	(-)	$y = -15398x + 258,01$	DESSULF ACO S< 6 (FP + FEALCA) + MLC 3 ou MLC 4	N	S	Baixo Enxofre
822	0,9384	(-)	$y = -16609x + 265,41$	GLOBULIZAÇÃO (FEALCA- FIO) + MLC3 ou 4	N	S	Peritético
824	0,9658	(-)	$y = -15809x + 259,68$	GLOBULIZAÇÃO (FEALCA- FIO) + MLC3 ou 4	N	S	Peritético
831	0,9947	(-)	$y = -22766x + 306,57$	AJUSTE CQ (Fe Al Ca) + MLC3 ou MLC 4	N	S	Peritético
832	0,9603	(-)	$y = -18249x + 278,08$	AJUSTE CQ (Fe Al Ca) + MLC3 ou MLC 4	N	S	Peritético
835	0,7651	(-)	$y = -26903x + 333,93$	GLOBULIZAÇÃO (FEALCA- FIO) + MLC3 ou 4	N	S	Comum
839	0,8403	(-)	$y = -25650x + 323,05$	Ajuste de CQ (Al alto) + RH + MLC 3 ou 4	N	S	Peritético
845	0,9923	(-)	$y = -22973x + 308,89$	AHF- AJUSTE DE COMPOSIÇÃO QUÍMICA + MLC 3 ou MLC4	N	N	Peritético
847	0,9711	(-)	$y = -15698x + 260,6$	AHF- AJUSTE DE COMPOSIÇÃO QUÍMICA + MLC 3 ou MLC4	N	N	Peritético
916	0,9961	(-)	$y = -22612x + 304,56$	DESSULF ACO <= 3 + MLC3	N	N	Baixo Enxofre
950	0,9928	(-)	$y = -18349x + 280,4$	CaSi + MLC 3 ou 4	S	N	Comum
956	0,876	(-)	$y = -20286x + 289,74$	BORB. ARGONIO + MLC3 OU MLC4	N	N	Peritético

Símbolo (-) característica não encontrada nos registros dos bancos de dados. Símbolo (N) item não adicionado. Símbolo (S) item adicionado.

De acordo com a Tabela 14 é possível observar que dos 50 tipos de aços encontrados que possuem alta correlação com a vida das panelas, ou melhor, que a fabricação destes aços impacta de forma direta o desempenho refratário, 48 deles (96%) apresentaram correlação negativa, ou seja, o aumento da participação destes aços no mix de produção reduz a estimativa de vida das panelas. Os outros 2 tipos (4%) apresentaram correlação positiva, ou seja, em relação aos demais contribuem positivamente para a expectativa de vida das panelas.

Dos 48 tipos de aços que impactam negativamente verificou-se que 18 deles (37,5%) apresentaram adição de CASI ou FEALCA, o que, como visto nas análises das rotas/tratamentos metalúrgicos afeta negativamente o desgaste refratário das panelas pelos motivos citados anteriormente. Desta forma, confirma-se a influência de corridas nas quais são adicionados estes tipos de materiais.

Além disso, destes 48 tipos, 16 (33,3%) do mix foi de aços com baixos teores de enxofre exigidos, o que se enquadrariam na rota/tratamento metalúrgico “dessulfurado” que também como visto anteriormente e confirmado pelas análises acima impactam negativamente na vida das panelas. Este impacto está relacionado aos altos tempos de tratamento no forno panela e adições de nefelina como fluidificante de escória.

Resumindo a análise acima e confirmando as análises da influência da rota/tratamento metalúrgico já estudadas em seções anteriores, em praticamente 71% (Tabela 14) dos casos de baixo desempenho da vida refratária das panelas de aço estão relacionados à produção de aços com teores baixos de enxofre (relacionados a altos tempos de tratamento e exposição ao arco elétrico no forno panela e adições de fluxantes como nefelina) e com previsões de adição de CASI ou FEALCA.

4.1.12 Influência das adições e das escórias

Com relação às adições dos diversos tipos de materiais (desoxidantes, ligas, refrigerantes, fluidificantes, escorificantes, globulizantes, etc.) realizados durante o vazamento do aço na panela e/ou durante o posterior tratamento nos diversos equipamentos do refino secundário foram analisadas, para cada uma das famílias de aço, as diferenças em termos de consumo específico. Como existe uma grande quantidade de tipos diferentes de adições, foi realizada a análise dos itens que, de acordo com a literatura, poderiam estar impactando o desgaste refratário das

panelas. Os itens (adições) analisados foram: 1-Nefelina, 2- CASI, 3-FeCAAL, 4-Ligas de Manganês, 5-Alumínio, 6-Escória Sintética.

A análise foi feita por famílias de aço, pois a análise aço a aço seria extremamente trabalhosa e de difícil aplicação. Além disso, as famílias estão indiretamente correlacionadas com as rotas/tratamentos metalúrgicos o que, como analisado anteriormente, mostrou-se relevante em termos de análise de vida refratária. Entenda por famílias de aço a grupos de aço que possuem características e comportamentos semelhantes. Os critérios para determinação de cada família são baseados nos percentuais dos elementos carbono e enxofre estabelecido para cada tipo de aço e, se para a fabricação do aço é necessário fazer o refino secundário em mais de um equipamento (duplo refino, por exemplo). Como exemplo, podemos citar a família chamada de “baixo enxofre”, na qual se enquadram todos os aços que possuem exigência de enxofre final no aço abaixo de 0,006% e que passam por um equipamento (forno panela) somente do refino secundário.

4.1.12.1 Influência das adições de nefelina

Quando se analisa as adições feitas durante o vazamento de aço na panela ou durante o tratamento do aço nos equipamentos de refino secundário o primeiro composto que está diretamente correlacionado e que tem grande impacto no desgaste refratário é a nefelina. Este composto é basicamente um silicato de alumínio com altos teores de sódio (NaAlSiO_4) e que possui alto poder fluidificante abaixando o ponto de fusão de escórias e outros constituintes. A nefelina é utilizada para otimizar o processo de dessulfuração dos aços nos quais os níveis de enxofre final exigido são extremamente baixo, prática comum em algumas aciarias. Entretanto, quando se utiliza este tipo de composto, cujo poder de dissolução e corrosão refratária é elevado corre-se o risco de reduzir drasticamente a vida refratária das panelas.

A Tabela 15 contém os consumos específicos de nefelina por grupos (famílias) de aço. Além dos consumos específicos, a Tabela 15 mostra, para cada família, os desvios (a maior ou a menor) dos consumos em relação à média geral. Destacam-se os consumos das famílias baixo enxofre e duplo refino.

Tabela 15 – Consumo específico de nefelina por famílias de aço.

Família	Consumo médio	Desvio em relação à média geral
Alto Carbono	0,49 kg/t.	18,8%
Baixo Enxofre	1,14 kg/t.	177,6%
Comum	0,15 kg/t.	-63,6%
Desgaseificado	0,06 kg/t.	-85,5%
Duplo Refino	1,06 kg/t.	158,4%
Peritético	0,53 kg/t.	28,6%
UBC-Geral	0,02 kg/t.	-94,7%
Média Geral	0,41 kg/t.	-

De acordo com o histórico de dados levantados durante seis meses (mesmo período dos dados analisados da vida das panelas) observou-se um grande consumo de nefelina para as famílias de aço baixo enxofre (1,14 kg/t.) e duplo refino (1,06 kg/t.) correspondendo a um consumo percentual acima da média geral de 177,6% e de 158,4%, ou seja, mais do dobro (Tabela 15). Estas duas famílias são as quais se praticam altas taxas de dessulfuração, característica principal que as distingue das demais famílias. Isto vai ao encontro de todas as análises feitas anteriormente de que a vida das panelas vem sofrendo forte impacto quando estas passam pelos processos de dessulfuração para teores muito baixos de enxofre final e que possuem alto consumo de nefelina. Além disso, a família com duplo refino, na sua maior parte, além de contemplar um segundo refino (forno panela e RH), o que na prática significa maiores tempos de tratamento, é realizada para corridas com teores de enxofre baixo equivalentes a família baixo enxofre.

Para estes casos a nefelina é adicionada para que se tenha uma escória mais fluída o que favorece o processo de dessulfuração (alta basicidade, fluidez elevada e alto volume de escória). Outra análise onde foi verificado o impacto da nefelina no desgaste refratário foram as análises do *post-mortem* (próximas seções). Lá é visto claramente o processo de dissolução dos grãos do refratário por um composto contendo sódio, que no caso é a nefelina.

No caso da família de duplo refino além da nefelina existe um agravante que é o maior tempo de tratamento no refino secundário, pois na verdade esta é uma rota de duplo refino (forno panela e RH) o que na prática expõe o refratário das panelas a tempos maiores de processo por corrida. Além disso, como analisados nas seções

anteriores, o uso intensivo do forno panela está diretamente ligado a degradação da vida refratária e, neste caso, estas duas famílias (baixo enxofre e duplo refino) passam obrigatoriamente pelo refino no forno panela.

4.1.12.2 Influência das adições de CASI e FECAAL

Quando se analisa as adições de fios de cálcio silício (CASI) e de ferro cálcio alumínio (FeCAAL) feitas após o término de tratamento do aço nos equipamentos de refino secundário para globulização de inclusões observa-se, para as mesmas famílias da seção anterior (baixo enxofre e duplo refino) altos valores de consumo de CASI e, como este composto está ligado ao desgaste prematuro dos refratários das painéis devido ao poder corrosivo e ao abaixamento do ponto de fusão das fases refratárias (correlação negativa da vida em função da adição de CASI estudado em seções anteriores), incorre-se em uma contribuição direta para estas famílias no desgaste refratário (Tabela 16).

Tabela 16 – Consumo específico de CASI e FECAAL por famílias de aço.

Família	Consumo Médio de CASI	Desvio em relação à média geral (CASI)	Consumo Médio de FECAAL	Desvio em relação à média geral (FECAAL)
Alto Carbono	1,92 kg/t.	293,8%	0,12 kg/t.	-55,5%
Baixo Enxofre	2,91 kg/t.	496,4%	0,75 kg/t.	190,9%
Comum	0,39 kg/t.	-19,4%	0,04 kg/t.	-85,2%
Desgaseificado	0,23 kg/t.	-53,1%	0,00 kg/t.	-100,0%
Duplo Refino	2,04 kg/t.	319,4%	0,00 kg/t.	-100,0%
Peritético	0,30 kg/t.	-39,0%	0,37 kg/t.	45,0%
Média Geral	0,49 kg/t.	-	0,26 kg/t.	-

Além disso, para a família baixo enxofre, observa-se alto consumo de FeCAAL o que, como mencionado para o CASI e verificado na seção correspondente ao impacto do tipo de tratamento/rota metalúrgica vem prejudicando a vida refratária (correlação negativa entre vida e corridas com adição de FeCAAL).

Nota-se também na Tabela 16 um alto consumo de FeCAAL para a família peritético e, como mostrado na Tabela 14 de correlação dos tipos de aço com a vida

das panelas, a família de aços peritéticos representou em torno de 40% das correlações, sendo todas elas correlações negativas. Isto comprova indiretamente o efeito maléfico que estes dois compostos ocasionam na vida refratária das panelas.

4.1.12.3 Influência das adições de ligas de manganês

Em relação às ligas de manganês, estas ao serem adicionadas ao aço nas etapas de vazamento e refino secundário, apresentam um determinado rendimento em liga e a diferença será transformada em alguma forma de óxido de manganês do tipo Mn_xO_y . Estes óxidos irão ser absorvidos pela escória que ficará rica neste tipo de óxido. O principal tipo é o MnO , que é um excelente fluidificante e torna a escória mais fluída contribuindo para o desgaste refratário das panelas. Logo aços ou famílias de aço que apresentam teores elevados de manganês como ligas necessitam de grandes adições deste tipo de material o que pode trazer um desgaste acelerado do refratário das panelas com conseqüente redução da vida.

Da mesma forma que para as outras adições foram levantados os consumos específicos para este tipo de liga para as diversas famílias e verifica-se a partir destes consumos que as famílias baixo enxofre, duplo refino e desgaseificado com altos consumos (Tabela 17).

Tabela 17 – Consumo específico de ligas de manganês por famílias de aço.

Família	Consumo médio	Desvio em relação à média geral
Alto Carbono	8,88 kg/t.	-1,7%
Baixo Enxofre	14,01 kg/t.	55,0%
Comum	2,68 kg/t.	-70,4%
Desgaseificado	18,18 kg/t.	101,1%
Duplo Refino	17,45 kg/t.	93,0%
Peritético	9,59 kg/t.	6,1%
UBC-Geral	1,04 kg/t.	-88,5%
UBC-Usicore	5,03 kg/t.	-44,3%
Média Geral	9,04 kg/t.	-

Mais uma vez as famílias baixo enxofre e duplo refino se destacam negativamente já que, como dito acima, a probabilidade das escórias destes grupos de aços estarem extremamente fluidas e com baixo ponto de fusão podem estar favorecendo o processo de desgaste.

4.1.12.4 Influência das adições de alumínio

Com relação ao alumínio, este é adicionado tanto, durante o vazamento de aço dos convertedores, quanto no refino secundário. No primeiro caso o alumínio é utilizado para desoxidação do aço e praticamente todo o alumínio transforma-se em Al_2O_3 na forma de escória. Já o alumínio adicionado no refino secundário será para aquecimento, no caso de tratamento via aluminotermia, e o restante será para liga. No caso de alumínio de aquecimento, este, como na desoxidação transforma-se em Al_2O_3 (escória), já o alumínio de liga será incorporado ao aço na forma de Al dissolvido. Considerando que o alumínio para liga não sofre grandes variações dentro e entre famílias, com exceção da família UBC-Usicore (aços para fins elétricos com alta liga de alumínio), grandes consumos de alumínio na prática representa muito alumínio utilizado para desoxidação e aquecimento, o que em termos metalúrgicos, significa muita Al_2O_3 na escória de panela.

Como o refratário da linha de escória das panelas é básico (MgO-C), altas % de Al_2O_3 , em teoria poderia ocasionar em maiores desgastes dos refratários. A Tabela 18 traz o consumo de alumínio por família.

Tabela 18 – Consumo específico de alumínio por famílias de aço.

Família	Consumo Médio	Desvio em relação à média geral
Alto Carbono	2,04 kg/t.	-32,3%
Baixo Enxofre	2,43 kg/t.	-19,2%
Comum	3,56 kg/t.	18,0%
Desgaseificado	2,33 kg/t.	-22,6%
Duplo Refino	3,17 kg/t.	5,3%
Peritético	1,90 kg/t.	-37,1%
UBC-Geral	2,72 kg/t.	--9,6%
UBC-Usicore	4,93 kg/t.	63,7%
Média Geral	3,01 kg/t.	-

Observando os dados de consumo da Tabela 18 destaca-se, excluído a família de aço UBC-Usicore (altamente ligado com alumínio), as famílias comum e duplo refino. No caso da família duplo refino este seria mais um fator que pode estar contribuindo para o baixo desempenho da vida refratária das placas de aço. Pois estas famílias de aços ao passarem em dois refinamentos estão submetidas tanto ao aquecimento elétrico (forno placa) quanto ao aquecimento químico (AHF). Ou seja, muita Al_2O_3 escorificada aumentando a acidez da escória. Já com relação à família comum, uma melhor avaliação deve ser feita, pois esta família não apresentou, em relação às outras famílias, baixo desempenho em termos de vida refratária.

Uma justificativa poderia ser o fato de que este fator (Al_2O_3 na escória) deve estar sendo contrabalanceado por outro fator mais relevante, como por exemplo, exposição ao arco elétrico das corridas que são processadas no forno placa. Como a maior parte das corridas da família comum não passa pelo forno placa e sim pelo AHF o efeito % de Al_2O_3 na escória é menos relevante do que a exposição ao arco elétrico e aos altos tempos de tratamento (família comum possui tempo de tratamento bem inferior a família duplo refino).

Maiores detalhes da estimativa da distribuição % dos componentes da escória serão apresentados em seções posteriores.

4.1.12.5 Influência das adições de escória sintética

Com relação à adição de escória sintética nas corridas, composto este que tem por objetivo melhorar a eficiência de dessulfuração e retenção de enxofre pela escória, a princípio não haveria maiores problemas com o desgaste refratário das placas já que este composto sintético é uma mistura de CaO (54 a 62%), Al_2O_3 (12 a 18%) e Al (6 a 10%). Porém, além destes constituintes, o composto apresenta CaF_2 (em torno de 15%), um fluidificante poderoso em termos de abaixamento do ponto de fusão de escórias e consequentemente um agente em potencial para a corrosão e dissolução refratária principalmente da linha de escória das placas de aço. A Tabela 19 revela os valores de consumo de escória sintética e os consumos de CaF_2 obtidos considerando que o mesmo corresponde a 15% do consumo da escória sintética.

Tabela 19 – Consumo específico de escória sintética e CaF_2 por famílias de aço.

Família	Consumo médio de Escória Sintética	Desvio em relação à média geral (Escória Sintética)	Consumo médio de CaF_2	Desvio em relação à média geral (CaF_2)
Alto Carbono	1,34 kg/t.	56,4%	0,20 kg/t.	56,4%
Baixo Enxofre	3,82 kg/t.	345,6%	0,57 kg/t.	345,6%
Comum	0,30 kg/t.	-65,45	0,04 kg/t.	-65,4%
Desgaseificado	3,01 kg/t.	251,0%	0,45 kg/t.	251,0%
Duplo Refino	3,89 kg/t.	353,3%	0,58 kg/t.	353,3%
Peritético	0,34 kg/t.	-59,9%	0,05 kg/t.	-59,9%
UBC-Geral	0,17 kg/t.	-79,9%	0,03 kg/t.	-79,9%
Média Geral	0,86 kg/t.	-	0,13 kg/t.	-

Como podemos verificar na tabela de consumos acima, mais uma vez destaca-se por seus altos consumos de CaF_2 , as famílias de baixo enxofre e duplo refino. Logo, esta é mais uma das muitas variáveis que evidenciam o alto desgaste refratário das panelas cujo os aços processados se enquadram dentro destas duas famílias. Assim como a nefelina (encontrada nas análises de *post-mortem*), o CaF_2 deve estar favorecendo o alto desgaste e consequentemente a baixa vida do refratário destas panelas. A surpresa aqui fica para a classe dos aços desgaseificados que apresentaram altos consumos de escória sintética, porém não impactadas diretamente na vida refratária das panelas. Estes aços têm um tempo de refino relativamente baixo no RH, baixos consumos de nefelina e alumínio, somente possuindo um elevado consumo de ligas de manganês, porém são aços que possuem especificação em termos de ligas de manganês elevado fazendo com que as quantidades de Mn que estariam indo para a escória na forma de MnO seriam baixas relativamente as outras famílias.

4.1.12.6 Influência da escória de panela

A análise da influência das características da escória de panela, formada durante todas as etapas do vazamento do aço até o final do refino secundário, é importante, pois as características desta (basicidade, acidez, viscosidade, atividade, etc.) influem de maneira significativa no desgaste refratário da linha de escória das panelas.

Entretanto, devido ao fato de que a aciaria não faz nenhum tipo de análise de suas escórias de panela (esta análise só é feita quando existe uma demanda específica) fica difícil ou praticamente impossível qualquer tipo de levantamento de dados a respeito do período analisado. Para tentar contornar este problema de análise, tentou-se prever como estaria esta escória em termos de composição química a partir das adições feitas entre o período de vazamento do aço até o final do refino secundário.

Levantou-se os dados de todos os consumos (adições) feitas para cada família de aço e, a partir daí, procurou-se estimar a composição destas escórias considerando-se que:

- Todo desoxidante adicionado, com exceção do alumínio liga e ferro silício liga, irá para a escória
- Todo escorificante e fluidificante de escória serão incorporados a mesma
- As ligas adicionadas terão em média 90% de rendimento, a diferença será escorificada

A partir dos consumos específicos em kg/t.aço de cada adição feita nas corridas foi feito uma estimativa da distribuição dos compostos (CaO , MgO , Al_2O_3 , MnO , SiO_2 , CaF_2 , Na_2O e “Outros”) na escória. O item “Outros” é calculado pela diferença percentual ($100 - \% \text{CaO} - \% \text{MgO} - \% \text{Al}_2\text{O}_3 - \% \text{MnO} - \% \text{SiO}_2 - \% \text{CaF}_2 - \% \text{Na}_2\text{O}$). Esta análise foi feita por famílias de aço e está resumidamente mostrada na Tabela 20.

Com base nos dados da Tabela 20 verifica-se, em termos de basicidade/acidez, que as escórias das famílias baixo enxofre e duplo refino possuem basicidade elevada (B.B e B.T), o que já era esperado, pois como os aços destas famílias precisam ser dessulfurados para teores baixíssimos de enxofre as quantidades de cal (CaO) adicionadas durante o vazamento e no refino são elevadas. Como haverá um aumento do volume de escória e como o ponto de fusão do CaO é elevado também é necessário adicionar algum tipo de fluidificante, no caso nefelina, para adequar a fluidez desta escória. Entretanto a adição de nefelina, como comentado anteriormente, é um composto de alto poder de corrosão e dissolução refratária.

Tabela 20 – Estimativa da composição das escórias por famílias de aço.

Famílias de Aço	CaO (%)	MgO (%)	Al ₂ O ₃ (%)	MnO (%)	SiO ₂ (%)	CaF ₂ (%)	Na ₂ O (%)	Outros (%)	B.B	B.T	B.Q
Alto Carbono	43,1	0,8	29,1	8,0	7,9	2,0	1,0	8,0	5,5	5,6	1,2
Baixo Enxofre	58,6	1,2	18,9	6,1	4,8	2,5	1,1	6,8	12,1	12,3	2,5
Comum	24,2	1,2	62,7	3,6	3,6	0,6	0,5	3,7	6,7	7,1	0,4
Desgaseificado	23,1	0,3	31,9	16,2	11,2	4,3	0,1	12,8	2,1	2,1	0,5
Duplo Refino	62,9	1,5	19,9	6,7	4,5	2,2	0,9	1,4	13,9	14,2	2,6
Peritético	40,9	1,7	39,4	8,7	5,5	0,5	1,1	2,2	7,4	7,7	1,0
UBC-Geral	2,8	0,0	94,8	0,3	0,5	0,7	0,1	0,8	5,7	5,7	0,0
UBC-Usicore	0,1	0,0	74,0	0,1	25,6	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0
Média Geral	14,4	1,2	58,4	12,2	8,4	1,8	0,6	2,3	1,7	1,8	0,2

*B.B: Basicidade Binária; B.T: Basicidade Ternária; B.Q: Basicidade Quaternária

Por isso, apesar de serem esperadas menores taxas de desgaste no refratário da linha de escória das panelas (refratário é básico) com elevada basicidade da escória, o que se verifica na prática é o contrário, pois maiores adições de CaO para melhoria da dessulfuração incorre-se em maiores adições de nefelina ou outro fluidizante. Isto foi verificado durante todo tempo, em que se observaram grandes adições de nefelina para estas duas famílias.

Já para as famílias alto carbono, comum, peritético e UBC-geral nota-se uma basicidade alta, porém intermediária em relação aos outros grupos. Porém o interessante é que para as famílias desgaseificado e UBS-USICORE tem-se uma escória ácida e mesmo assim não se verifica baixo desempenho do refratário. Uma explicação para este fato seria que a influência de um fluidificante como a nefelina teria um impacto muito maior do que mudanças na acidez da escória. Ou seja, o fenômeno preponderante ou a etapa controladora do processo de corrosão dos grãos refratários (verificar análise *post-mortem*) é determinado pelas concentrações de nefelina ou de outro fluidificante na escória.

Quando se analisa a basicidade quaternária (B.Q) nota-se ainda mais as características ácidas destas escórias, com exceção da família baixo enxofre e duplo refino. Isto evidencia as altas concentrações de Al₂O₃ na escória. Isto se deve a duas possíveis causas. Ou temos altas taxas de oxidação do aço após o sopro nos

LD's ou altos tempos de refino no AHF e RH (aquecimento aluminotérmico). Em ambos os casos aumentamos o tempo de exposição do refratário a reações químicas diversas e a condições extremas de temperatura.

A Tabela 20 também evidencia as distribuições de compostos que atuam no sentido de aumentar o desgaste refratário (fluidificantes ou agentes corrosivos) como o MnO (fonte ligas de manganês), CaF_2 (fonte escória sintética) e Na_2O (fonte nefelina). Neste sentido destacam-se novamente as famílias baixo enxofre e duplo refino em termos de quantidade e percentuais, seguidas pelas famílias alto carbono e peritético (a família peritético possui correlações altamente negativas com a vida refratária).

Vale reforçar que os dados da Tabela 20 foram estimados a partir das adições feitas nas corridas e, portanto, pode conter valores ou conclusões imprecisas. Entretanto serve como uma referência relativa de distribuição de compostos na escória, já que se espera que os possíveis erros de cálculos na construção da tabela estejam distribuídos de maneira igualitária entre as famílias.

4.2 Análise dos principais mecanismos de desgaste identificados no estudo *post-mortem*.

Buscando identificar fisicamente os fenômenos envolvidos e os mecanismos de desgaste do refratário das placas de aço, assim como correlacionar tais fenômenos com as variáveis operacionais de maior relevância analisadas nas seções anteriores, foi feita a análise *post-mortem* em amostras de refratário de uma das placas em operação no final de sua campanha. Estas amostras foram retiradas das regiões da linha de escória, linha de metal e fundo da placa. Entretanto como a vida da placa é determinada pela linha de escória, pois é a região de maior desgaste da placa e a que determina o final de campanha (salvo casos especiais), foi esta a região (amostra) analisada.

A Figura 111 apresenta a imagem da amostra de refratário da linha de escória obtida na lupa óptica. Nela podemos identificar três regiões distintas, a saber: Região refratária (refratário de MgO-C), região de interface (interface refratário/escória) e região de escória (escória + partículas de refratário + partículas de aço). As conclusões a respeito das três regiões citadas acima foram obtidas pelas análises descritas na sequência deste trabalho.

Figura 111 – Imagem do refratário da linha de escória de uma das placas de aço obtida na lupa óptica.

Procurando caracterizar as três regiões observadas acima e os possíveis fenômenos e mecanismos de desgaste envolvidos, foi realizado via microscopia eletrônica, a caracterização química das três regiões.

Na região de escória (escória + partícula de refratário + partículas de aço) da Figura 111, foi observado que parece existir uma região multifásica, ou seja, a escória aderida na face quente do refratário apresenta-se em várias fases e compostos, além disso, observou-se partículas de aço infiltradas nesta região e de refratário que, a princípio, estaria sendo dissolvido pela escória (Figura 112).

As suposições de que as regiões identificadas na Figura 112 são as citadas acima podem ser confirmadas pela análise química, obtida por espectroscopia de energia dispersiva (EDS) acoplada ao MEV, de tais regiões (Tabela 21 e Figura 112). Os pequenos pontos claros na Figura 112 são melhores identificados na Figura 113.

Figura 112 – Imagem da região de escória (escória + refratário + aço) da Figura 111 obtida por MEV.

Tabela 21 – Composição química (obtida por MEV) das regiões de escória, aço, refratário e auréola de Mg-Al identificadas nas Figura 111 e 112. Análise semi-quantitativa (EDS).

Escória		Aço		Refratário		Auréola	
Composto	(%)	Composto	(%)	Composto	(%)	Composto	(%)
MgO	1,68	Total	100	MgO	15,99	MgO	22,02
Al ₂ O ₃	28,44			Al ₂ O ₃	17,72	Al ₂ O ₃	66,49
SiO ₂	29,45			Cr ₂ O ₃	49,84	SiO ₂	2,01
CaO	33,59			FeO	16,45	MnO	9,48
MnO	6,84			Total	100	Total	100
Total	100

Figura 113 – Imagem obtida via MEV da região das partículas de aço (pontos claros) infiltradas na escória aderida à face quente do refratário da linha de escória da panela de aço.

Na segunda região, região de interface (refratário/escória) observada na Figura 111, foram observados grãos de refratário (MgO), provavelmente eletrofundidos, que estão sendo corroídos por uma escória infiltrada na matriz refratária (Figura 114). A Tabela 22 mostra a composição química dos grãos de MgO e da escória que está entre os grãos refratários. A identificação de escória entre os grãos eletrofundidos de MgO comprova o exposto acima referente ao ataque pela escória nos grãos de material refratário. Este mecanismo de desgaste do refratário da linha de escória parece ser o fenômeno predominante nesta região do refratário das panelas de aço.

Outras análises na região de escória, não entre os grãos de MgO e sim nos contornos dos grãos de MgO eletrofundidos, foram feitas para comprovação das afirmações feitas acima com relação a região de escória e composição da mesma (Tabela 22).

Figura 114 – Imagem obtida via MEV da região de interface (refratário/escória) mostrada na Figura 111. Grãos eletrofundidos de MgO (refratário) sendo corroídos pela escória infiltrada na matriz refratária.

Tabela 22 – Composição química (obtida por MEV) das regiões dos grãos de MgO e escória identificadas na Figura 114. Escória rica em sódio. Análise semi-quantitativa (EDS).

Grão Eletrofundido de MgO		Escória entre os Grãos Eletrofundidos de MgO		Escória abaixo dos Grãos Eletrofundidos de MgO	
Composto	(%)	Composto	(%)	Composto	(%)
MgO	95,04	Na ₂ O	14,32	Na ₂ O	6,57
SiO ₂	1,70	MgO	12,27	MgO	12,57
FeO	3,26	Al ₂ O ₃	13,99	Al ₂ O ₃	26,50
Total	100	SiO ₂	31,21	SiO ₂	28,21
		CaO	28,16	CaO	26,15
		Total	100	Total	100

Outro fato relevante a ser comentado a partir das análises acima (Tabela 22) é a presença de sódio nestas escórias. Como os aços fabricados praticamente não possuem este elemento químico supõe-se que ele deve ser advindo da adição ou de nefelina ou sodalita, ambos compostos fluidizantes devido ao baixo ponto de fusão,

adicionados para fluidificar escória. A adição destes materiais contribui, de maneira relevante, no desgaste refratário por corrosão pela escória, já que como citado nas seções anteriores, faz com que a escória seja extremamente agressiva em relação ao refratário. Como o único composto contendo sódio adicionado nas corridas durante o período de análise foi a nefelina conclui-se que o sódio identificado acima é proveniente deste composto. Ou seja, confirmam-se aqui todas as suposições feitas anteriormente a respeito do fenômeno de desgaste (corrosão química) por uma escória rica em sódio proveniente da adição de nefelina. Os registros dos bancos de dados, para esta panela, apontaram um consumo de 11.211kg de nefelina durante toda a campanha (153 corridas), ou seja, um consumo específico de 0,46 kg/t.aço. Se considerarmos os dados de consumo médio de nefelina (0,41 kg/t.aço) da Tabela 15 e uma vida média das panelas de 154 corridas (Figura 71), esta panela deveria apresentar um desempenho médio de vida refratária e é exatamente o que foi observado (campanha de 153 corridas). Vale lembrar que esta análise só é perfeitamente válida se “as demais variáveis de desgaste tenham sido mantidas constantes e dentro dos limites de estabilidade”.

Já na terceira região analisada na Figura 111 (refratário de MgO-C) foi observado uma espécie de matriz contendo grãos de MgO sinterizados praticamente intactos. A Figura 115 obtida no MEV mostra esta região com os grãos de MgO intactos e mostra também a região de interface (refratário/escória) com grãos em processo de dissolução pelo ataque de escória.

Figura 115 – Imagem do refratário da linha de escória de uma das panelas de aço obtida na lupa óptica. Em destaque as 3 regiões distintas escória, interface escória/refratário e refratário de MgO-C.

A análise desta região (refratário de MgO-C) revelou a composição química dos grãos de MgO sinterizados, assim como a composição da escória atacando os grãos (Figura 116 e Tabela 23).

Figura 116 – Imagem do grão de sinter de MgO e da escória infiltrada na matriz refratária obtida no MEV.

Tabela 23 – Composição química (obtida no MEV) do grão de sinter de MgO e da escória identificadas na Figura 116. Análise semi-quantitativa (EDS).

Grão de Sinter de MgO (Sinterizado)		Escória	
Composto	(%)	Composto	(%)
Na ₂ O	1,44	Na ₂ O	10,71
MgO	96,58	MgO	13,81
SiO ₂	1,15	Al ₂ O ₃	15,42
CaO	0,83	SiO ₂	24,90
		CaO	35,16
Total	100	Total	100

Mais uma vez observa-se a presença do elemento químico sódio na escória (Tabela 23). Isso mostra como o processo de corrosão por escória deve estar sendo favorecido com adições de neflina no processo.

4.3 Determinação da equação geral multivariada de previsão da vida das painéis de aço.

Para a construção de um modelo multivariado (equação geral de previsão) que contemple as principais variáveis que impactam, ou melhor, determinam a vida das painéis e que dê uma boa estimativa da vida refratária fazendo com que os principais envolvidos no processo tenham uma ferramenta de gestão das painéis, foi feita via regressão múltipla, baseada nas análises das seções anteriores, a eq.(19). Esta equação contemplou as variáveis analisadas anteriormente de forma que se obtivesse uma equação que pudesse ser manuseada (com menor número possível de variáveis, que estivessem disponíveis nos sistemas de informação e que fossem realmente relevantes em termos de impacto na vida das painéis).

Entretanto, a eq.(19) foi construída não de forma única pela regressão múltipla de todas as variáveis de uma única vez, mas pela ponderação de 4 equações, ou melhor, 4 modelos (eq.(15), eq.(16), eq.(17), eq.(18)). Esta escolha (ponderação) foi devido ao fato de que o modelo global de previsão deve, não somente, ter coerência matemática, mas também metalúrgica. Esta coerência vem do fato de que durante as tentativas de obter o modelo global pela regressão múltipla com todas as variáveis juntas e de uma única vez obtiveram-se modelos matemáticos que tinham coerência matemática, ou seja, os coeficientes e sinais das variáveis independentes faziam com que a equação global resultasse em uma boa previsão da vida das painéis, porém para algumas variáveis os coeficientes e sinais não faziam sentido metalúrgico e não estavam de acordo com as análises feitas nas seções anteriores (não tinham fundamentação técnica suportada pelas análises deste trabalho). Este fenômeno é típico de regressões múltiplas com muitas variáveis realizadas por softwares estatísticos no qual o software procura ajustar os parâmetros independentes da equação a uma realidade prevista.

Logo, para contornar este problema foram construídos os 4 modelos menores (menos variáveis), porém com coerência matemática (ajuste de variáveis pelo software) e metalúrgica (lógica metalúrgica e fundamentada nos resultados das seções anteriores) e, posteriormente, feito um modelo global que nada mais é do que a ponderação dos 4 modelos com o mesmo peso.

Abaixo estão os 4 modelos representados pelas equações (eq.(15), eq.(16), eq.(17), eq.(18)) e o modelo global (eq.(19)). Além disso, os gráficos das Figuras

117, 118, 119, 120 e 121 mostram a boa aderência das correlações com a vida real das painelas.

$$\text{Vida da Painela} = 659 - 0,389 * \text{Temp_VAZ} - 0,213 * \text{Rota_Tratamento_Dessulfurado} + 1,00 * \text{PA} + 1,04 * \text{PC} + 0,916 * \text{PCV} \quad (15)$$

Figura 117 – Correlação entre vida real e vida estimada (modelo1) da painela dada pela eq.(15).

$$\text{Vida da Painela} = 10,3 - 0,0227 * \text{TPC} - 0,131 * \text{Rota_Tratamento_Dessulfurado} + 0,964 * \text{PA} + 1,09 * \text{PC} + 0,932 * \text{PCV} \quad (16)$$

Figura 118 – Correlação entre vida real e vida estimada (modelo2) da painela dada pela eq.(16).

$$\text{Vida da Panela} = 113 - 0,000648 * \text{CPC} - 0,164 * \text{Rota_Tratamento_Dessulfurado} + 0,965 * \text{PA} + 1,08 * \text{PC} + 0,916 * \text{PCV} \quad (17)$$

Figura 119 – Correlação entre vida real e vida estimada (modelo3) da panela dada pela eq.(17).

$$\text{Vida da Panela} = 6,40 - 0,0190 * \text{CG} - 0,165 * \text{Rota_Tratamento_Dessulfurado} + 0,980 * \text{PA} + 1,10 * \text{PC} + 0,939 * \text{PCV} \quad (18)$$

Figura 120 – Correlação entre vida real e vida estimada (modelo4) da panela dada pela eq.(18).

Abaixo o modelo final global multivariado eq.(20) de previsão da vida das panelas em função de todas as variáveis relevantes que impactam a vida do refratário das panelas.

$$\text{Vida da Panela} = [\text{eq.}(15) + \text{eq.}(16) + \text{eq.}(17) + \text{eq.}(18)]/4 \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \text{Vida da Panela} = & [(659 - 0,389 * \text{Temp_VAZ} - 0,213 * \text{Rota_Tratamento_Dessulfurado} + 1,00 * \text{PA} + \\ & 1,04 * \text{PC} + 0,916 * \text{PCV}) + (10,3 - 0,0227 * \text{TPC} - 0,131 * \text{Rota_Tratamento_Dessulfurado} + 0,964 * \\ & \text{PA} + 1,09 * \text{PC} + 0,932 * \text{PCV}) + (113 - 0,000648 * \text{CPC} - 0,164 * \text{Rota_Tratamento_Dessulfurado} + \\ & 0,965 * \text{PA} + 1,08 * \text{PC} + 0,916 * \text{PCV}) + (6,40 - 0,0190 * \text{CG} - 0,165 * \\ & \text{Rota_Tratamento_Dessulfurado} + 0,980 * \text{PA} + 1,10 * \text{PC} + 0,939 * \text{PCV})]/4 \end{aligned} \quad (20)$$

Figura 121 – Correlação entre vida real e vida estimada (modelo global) da panela dada pela eq.(20).

Onde:

- Temp_VAZ representa a média das temperaturas (°C) do aço esperada durante o vazamento do conversor na panela
- Rota_Tratamento_Dessulfurado representa a participação % deste tipo de tratamento metalúrgico esperado para ser feito no aço na respectiva panela

- PA representa a quantidade de vezes (nº) esperada que a panela (durante sua campanha) virá dos aquecedores de panela para receber o aço dos conversores
- PC representa a quantidade de vezes (nº) esperada que a panela (durante sua campanha) virá do ciclo operacional para receber o aço dos conversores
- PCV representa a quantidade de vezes (nº) esperada que a panela (durante sua campanha) mesmo com seu ciclo operacional vencido receberá aço dos conversores. Obs. ($PA + PC + PCV = \text{Vida Média das Painelas}$)
- TPC representa o tempo médio (min.) de panela cheia esperado
- CPC representa a carga média das painelas (quantidade de aço média, em kg, que é colocado nas painelas durante o vazamento do aço dos conversores)
- CG representa o número de corridas de aço do tipo chapas grossas esperadas para serem produzidas durante a campanha da panela

A eq.(20) apresenta uma boa previsão de vida (coeficiente de correlação de 98,11%) das painelas em função das diversas variáveis operacionais, histórico das condições das painelas que receberam as corridas ou previsão futura. Com este modelo é possível estudar e identificar quais foram as condições das painelas que levaram ao desvio em termos de desempenho (vida) ou fazer uma gestão futura baseada nas previsões de produção de aço para cada panela.

A equação de previsão da vida das painelas eq.(20) revela e confirma, através de seus coeficientes e variáveis, as análises feitas nas seções anteriores. A primeira variável (Temp_VAZ) e seu coeficiente negativo (-0,389) diz que a temperatura na qual o aço é vazado dos conversores impacta negativamente a vida das painelas a medida que esta temperatura é elevada. Isto condiz com o que foi analisado e explicado nos tópicos 4.1.1 e 4.1.2 e, ainda, está de acordo com a revisão bibliográfica, na qual é citado por vários autores que elevadas temperaturas do aço durante o vazamento dos conversores nas painelas podem trazer impactos negativos na degradação do refratário.

Com relação à segunda variável, Rota_Tratamento_Dessulfurado e seus coeficientes negativos (-0,213, -0,131, -0,164, -0,165), talvez seja a variável mais

importante deste estudo. Pois, como analisado nas seções anteriores ela possui grande correlação com a vida das panelas e nela estão imbutidas outras variáveis que também se mostraram altamente correlacionadas com a vida das panelas. Esta rota está vinculada ao tratamento de aços com exigências de enxofre baixíssimo que, para tal, exige tratamento no forno panela (exposição ao arco elétrico), com adição de nefelina e escória sintética (fluidificantes de escória), alto tempo de tratamento e, em alguns casos, duplo refino (forno panela seguido de RH). Tudo isso leva a conclusões (análises nas seções anteriores) que a vida refratária é altamente impactada negativamente quando o aço passa por esta rota de tratamento, o que está expresso pelos coeficientes negativos desta equação.

As três próximas variáveis (PA, PC e PCV) e seus respectivos coeficientes (+1, +0,964, +0,965, +0,980 para PA), (+1,04, +1,09, +1,09, +1,08 para PC) e (+0,916, +0,932, +0,916, +0,932 para PCV) devem ser analisadas em conjunto, já que o aumento do número de corridas de um tipo na prática diminui os outros dois tipos para uma determinada campanha média. Quando olhado sob a luz da metalurgia estes coeficientes retratam exatamente o esperado, pois panelas do ciclo operacional (PC) são panelas que teoricamente estão nas condições ideais de temperatura (não estão sofrendo variações térmicas bruscas devido ao fato de estarem recebendo corridas em intervalos menores ou iguais a 70 min), já as de aquecedor (PA) são oriundas dos aquecedores e estão suceptivas a falhas de aquecimento o que na prática pode causar choque térmico durante o recebimento do aço dos conversores, já as panelas de ciclo vencido (PCV) são aquelas que estariam na pior condição (frias), pois não estão vindo do ciclo (tempo sem receber aço maior que 70 min. e não estavam nos aquecedores. Logo estas últimas estariam com maior risco de possíveis choques térmicos. Como pode ser visto os coeficientes refletem exatamente o exposto acima (coeficientes de PC > coeficientes de PA > coeficientes de PCV).

Na sexta variável da eq.(20) (TPC) e seu coeficiente negativo (-0,0227) está expresso o impacto que elevados tempos de panela cheia, o que na prática significa elevados tempos de transferência da panela entre as diversas etapas do processo, elevados tempos de tratamento ou lingotamento do aço significam em termos de vida refratária. Este coeficiente está de acordo com as análises anteriores onde foi verificado que tempos elevados no refino secundário reduzem a vida da panela, pois

eles representam maior exposição a aquecimentos e adições de diversos compostos.

A sétima variável (CPC) e seu coeficiente (-0,000648) revelam que quanto maior a carga na panela (quantidade de aço dentro da panela) e conseqüente maior nível de aço (menor borda livre) pior o desempenho das panelas. Isto na prática é estar com o aço líquido acima da linha de escória. (O contato do aço com a linha de escória pode estar degradando o refratário desta região). Entretanto uma análise mais precisa deste fenômeno é de difícil realização, pois ao longo da campanha com o desgaste refratário, teoricamente o volume da panela aumentaria e conseqüentemente o nível de aço não se alteraria caso a carga média fosse maior. Do contrário, o aumento da carga média manteria, mesmo com o desgaste refratário, a escória da panela na região refratária (linha de escória) não causando maiores degradações.

A oitava e última variável considerada (CG) e seu coeficiente (-0,019) também estão de acordo com as análises dos tópicos 4.1.3, 4.1.4, 4.1.5, 4.1.11 e 4.1.12. Esta classe ou grupo de aço está vinculado a grandes adições de ligas de manganês (fluidificante de escória), refino secundário utilizando o forno panela e em alguns casos o RH (duplo refino com tempos elevados de tratamento), uma parcela de CG é de aços com baixos níveis de enxofre (adição de nefelina e escória sintética). Tudo isto faz com que aumentos do número de corridas deste grupo em detrimento dos outros reduzem a expectativa de vida das panelas.

Em outras palavras, a eq.(20) está condizente com todas as análises (banco de dados das variáveis e análise físico-química do *post-mortem*) feitas anteriormente. Vale lembrar que algumas variáveis como, consumo específico de nefelina e escória sintética, deveriam estar presentes na eq.(20). Porém, os bancos de dados da empresa somente possibilitaram a extração destes consumos por família de aço e não por corrida ou panela, o que impossibilitou o modelamento da equação global diretamente com estas variáveis. Mas, o modelo proposto pela eq.(20), contemplou indiretamente estas variáveis através da variável *rota_tratamento_dessulfurado* já que a adição e consumo destes itens estão atrelados a fabricação de aços que passam por esta rota de tratamento metalúrgico.

Finalizando, a Tabela 24 traz um resumo das variáveis de desgaste analisadas (nesta seção e nas anteriores) e da relevância delas relativas ao processo de desempenho da vida das panelas na aciaria da usina de Cubatão. Além disso,

através da Tabela 24, tentou-se inferir sobre os principais fenômenos de desgaste refratário que podem estar atuando na estrutura refratária das painéis de transporte de aço desta aciaria.

Tabela 24 – Principais variáveis de desgaste refratário envolvidas no desempenho do refratário das painéis.

Relevância da Variável	Variável	Fenômenos de Desgaste
Primária (direta)	Rota/Tratamento/Dessulfurado	Corrosão química, erosão e oxidação
	Uso do Forno Painel (dessulfuração do aço)	Corrosão química, erosão e oxidação
	Adição de Nefelina	Corrosão química
	Adição de Escória Sintética	Corrosão química
	Adição de CaSi	Corrosão química
	Adição de FeAlCa	Corrosão química
Secundária (indireta)	Temperatura de Vazamento do Aço	Tensões termomecânicas
	Temperatura de Aço após Vazamento	Tensões termomecânicas
	Quantidade de Aço CG Produzido	Corrosão química, erosão e oxidação
	Tempo de Painel Cheia	Tensões termomecânicas
	Condições da Painel (PA, PC e PCV)	Tensões termomecânicas
	Carga de Aço na Painel (CPC)	Tensões termomecânicas e corrosão química
	Adições de Ligas de Manganês	Corrosão química

5 CONCLUSÕES

De acordo com as análises e resultados encontrados nas seções anteriores (extraídos e analisados dos bancos de dados operacionais da usina e tratados em softwares estatísticos apropriados, análise *post-mortem* e regressão múltipla da equação geral) verificou-se que as variáveis que mais influenciam ou, que pelo menos, tiveram algum impacto na vida das panelas de aço foram:

- a temperatura de vazamento do aço dos conversores,
- quantidade de aço CG produzido,
- rota de tratamento dessulfurado,
- tempo de panela cheia,
- condições da panela (PA, PC e PCV),
- carga de aço na panela,
- adições: de nefelina, escória sintética, fios de CaSi e FeAlCa, ligas de manganês,
- tempos de tratamento no refino secundário e;
- utilização do forno panela em excesso.

Porém algumas variáveis possuem maior influência do que outras, sendo elas as que impactam diretamente no desgaste refratário e na conseqüente vida das panelas. Já as variáveis de menor influência, ou melhor, de influência secundária, também são relevantes, porém apenas parecem contribuir com o desgaste. Sendo assim conclui-se que a sequência, ou conjunto, de variáveis (rota de tratamento de aços dessulfurado – maior uso do forno panela – adições de nefelina, escória sintética, CaSi e FeCaAl) são as variáveis principais (primárias) que desgastam a estrutura refratária das panelas. Já as demais variáveis seriam as indiretas (secundárias) no ataque refratário e conseqüente vida das panelas.

O estudo de *post-mortem* mostrou que a principal causa do desgaste refratário é o uso de nefelina com conseqüente corrosão química e, pelas análises e observações feitas neste trabalho, este uso está totalmente relacionado ao processo de fabricação de aços com baixos teores de enxofre que são produzidos utilizando o forno panela como principal equipamento. Além disso, todas as análises mostraram que a adição de fios de CaSi e FeCaAl impactam negativamente a vida das panelas. Estas variáveis de forma geral estão associadas ao mecanismo de desgaste

conhecido como corrosão química e, como o processo de dessulfuração é realizado no forno panela, subentende-se que o processo erosivo (por movimentação de fluidos) acompanhado por alta exposição ao arco elétrico deve estar contribuindo com o fenômeno de corrosão química.

Logo, para que haja uma melhora no desempenho da vida das panelas é necessário controlar, em especial, as variáveis ditas primárias tais como:

- rota de tratamento dessulfurado;
- uso do forno panela;
- adições: de nefelina, escória sintética, CaSi e FeCaAl.

Além de acompanhar de maneira aceitável (sistemática) as flutuações das variáveis secundárias (temperatura de vazamento dos aços dos conversores, temperatura do aço após o vazamento dos conversores, quantidade de aço do tipo CG fabricado, tempo de panela cheia, condições das panelas, carga de aço nas panelas, adições de ligas de manganês) de forma que os desvios e variabilidades inerentes do processo produtivo possam ser controlados, avaliados e correlacionados com os efeitos sobre o desempenho e segurança operacional.

Foi contruido um modelo multivarido com as principais variáveis que determinam a vida das panelas. Com este modelo é possível prever a vida das panelas e, durante suas campanhas, realizar uma gestão de forma a maximizar a vida refratária, reduzir os custos operacionais, manter a estabilidade operacional e prever possíveis acidentes operacionais, pois sabendo-se com antecedência das condições da panela pode-se selecionar condições metalúrgicas mais brandas para tais panelas.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho abordou todas as variáveis que de alguma forma (revisão bibliográfica ou sugestão dos profissionais de fábrica) podem impactar na vida refratária das placas, porém seria impossível estudar cada uma delas e identificar todos os mecanismos de desgaste em um único trabalho. Logo, seria muito importante avaliar de maneira bem detalhada cada uma destas variáveis e a relação delas com os mecanismos de desgaste refratário.

Aplicação do modelo multivariado desenvolvido neste trabalho em outras aciarias, porém ajustado com os dados históricos das variáveis relativas a cada usina.

Utilização do modelo multivariado baseado em placas cujos refratários possuem composição química diferente da apresentada neste estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS¹

- ANAN, K. Wear of refractories in basic oxygen furnaces (BOF), **Journal of the Technical Association of Refractories**, Japan, v.21, n.4, p. 241-246, 2001.
- BARTHA, P.; WEIBEL, G. **The outlook for synthetic resin-bonded magnesia-graphite bricks**. In: International Symposium on Advances in Refractories for the Metallurgical Industries II, Quebec, Canada, p. 45-57, 1996.
- BENJUN, C. et al. **Study on the properties and microstructure of MgO-ZrO₂-C materials**. In: International Symposium of Refractories, Haikou, China, P.508-513, Nov.12-15, 1996.
- BILGIÇ, M. **Parameters effecting life time of refractory in steelmaking**. Sweden: Department of Material Science and Engineering, 2005. 21 p.
- BOER, J.; BEELEN, M. Characterization of magnesia carbon bricks. **Radex-Rundschau**, 1984, v.2, p.401-413.
- BRAGANÇA, S. R. Corrosão de refratários utilizados na siderurgia. **Cerâmica** 58, 2012, p.280-285.
- BRASIL, Ministério de Minas e Energia – SGM, Relatório Técnico 71, **Cadeia de refratários**, projeto ESTAL, agosto de 2009. Disponível em: http://www.mme.gov.br/documents/1138775/1256652/P45_RT71_Perfil_dos_Refratxrios.pdf/ac0e01f1-cc6d-4071-b3d4-c157240fa132, acesso em: abril de 2016.
- BROWN, A. J.; WHITE, J. New generation refractory materials: Ceramic-Carbon Composites, **Met. Mater. (Inst. Met.)**, v.2, n.10, p. 632-639, 1986.
- CAMELLI, S.; LABADIE, M. **Analysis of the wear mechanism of MgO-C Slag Line Bricks for steel ladles**. Instituto Argentino de Siderurgia, San Nicolás, Argentina, Internationales Feuerfest-Kolloquium, p. 30-34, 2006.
- CHESTERS, J. H. **Refractories Production and Properties**. London: The Institute of Materials 1993. 553 p.
- COOPER, C. F. Graphite containing refractories, **Refract. J.**, v.55, n.6, p.11-21, 1980.
- COUTINHO, E. S. **Projetos de revestimento refratário – fundamentos**. Seminário ABM Refratários para siderurgia, Belo Horizonte, p. 97-120, mar. 2000.
- ESCHNER, A. **Management of refractories by the European refractory industry (production, consumption, recycling, waste removal)**. International Colloquium on Refractories, 45th, p.16-19, October 2002, Aachen.

¹ De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6023.

EUROPEAN REFRACTORIES PRODUCERS' FEDERATION, **Refractory Ceramics and Industrial Minerals are Critical for European Industry**. Bruxelles, May. 2009.

FERREIRA, J. P. **Estudo dos desgastes de refratários dolomíticos aplicados em painéis de aço na produção de aços ao carbono**, Diss. Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, RS. 2010.

FERRO, L. A. et al. **Evolucion de La performance de los revestimientos refractarios de convertidores em Siderar**, planta San Nicolas. 11º Seminário de Aceria IAS, Buenos Aires, p. 141-159, Nov. 1997.

FREDRIKSSON, P. S. **Thermodynamic studies of FeO containing slags and their impacto on ladle refining process**. VII International Conference on Molten Slags Fluxes and Salts, The South African Institute of Mining and Metallurgy, 2004, p. 285-292.

FREITAS, C. M. M.; **Caracterização e Desenvolvimento de Microestrutura de Matrizes de Concretos Refratários de Baixo Teor de Cimento**. Dissertação de Mestrado Apresentada ao Curso de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 1993.

GIL, A.C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. São Paulo: Atlas, 1999.

HARMUTH, H. Measurement and characterization of the periclase crystal size in products of the magnesite industry and in sintered magnesia. **Radex-Rundschau**, 1989, v.4, p.172-182.

HASHEMI, B.; MEMALI, Z. A.; SADRNEZHAAD, S. K. Oxidation mechanisms in MgO-C refractories. **China's Refractories**, v.13, n.2, p.13-20, 2004.

HIRAI, N.; KAYAMA, T.; NAKAMURA, Y.; OJIMA, A.; TAKEUCHI, K. Microstructure and characteristics of Al₂O₃-C bricks. **Taikabutsu Overseas**, v. 18, n. 4, 42-47, 1998.

HOSHIYAMA, Y.; ISHIHARA, Y. Refractory use and wear in electric arc furnace, **Journal of the Technical Association of Refractories**, Japan, 2001, 21 [4] 247-251.

Japão. The Technical Association of Refractories, **Refractories Handbook**. 10th ed.:1998. (ISBN 4-925133-01-2).

KAMIIDE, M.; YAMAMOTO, S.; YAMAMOTO, K.; NAKAHARA, K.; KIDO, N. Damage of Al₂O₃-MgO-C brick for ladle furnace, **Journal of the Technical Association of Refractories**, Japan, 2001, 21 [4] 252-257.

KOLEY, R. K.; RAO, A. V.; ASKAR, S.; SRIVASTAVA, S. K. **Development and application of Al₂O₃-MgO-C refractories for secondary refining ladle**. In.: UNIFIED INTERNATIONAL TECHNICAL CONFERENCE ON REFRACTORIES, 2001, BIENNIAL WORLDWIDE CONGRESS, 7, 2001, UNITECR'01, 2001, Cancún. Proceedings of Mexico: Alafar, 2001. 1 CD-ROM.

KRAUSE et al. Properties and behavior of isostatically pressed refractories for the continuous casting process on alumina-grafite and MgO-grafite basis. **Radex-Rundschau**, 1985, v.3, p.611-623.

Lee M, Strezov L, Goldsworthy D, Simpson I, Murgas I, Jahanshahi S. **Implementation of a Thermodynamic Model for Slag – Refractory Interaction in ladle and tundish and for inclusion Engineering**. Scaninject VII. Part I. 7th International Conference on Refining Processes; 1988, p. 123–48.

LENZ e SILVA, Guilherme F B, Introdução à Siderurgia, cap. 9 – Refratários para Siderurgia. ABM Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, 2007. 428 p. Org. por Marcelo B. Mourão.

MATTILA, R. A.; VATANEN, J. P.; HARKKI, J. J. Chemical wearing mechanism of refractory materials in a steel ladle slag line. **Scandinavian Journal of Metallurgy**, 2002, 31: 241-245.

MINATO, K.; NISHIHARA, K.; TANAKA, Y. Development of Al_2O_3 -MgO-C bricks. **Shinagawa Technical Report**, v. 33, p. 163-170, 1990.

MISHRA, R. et al. **Design aspect of MgO-C bricks - An attempt to optimize the critical properties**. AISTech Proceedings, v.1, p. 1199-1203, 2004.

NAKAGAWA, Z. Technical development of refractories:-Present and Future-, **Journal of the Technical Association of Refractories**, Japan, 2001, 21 [4] 233-235.

NAKAMURA, M. et al. Tap hole sleeve for BOF. **Shinagawa Technical Report**, V.49, p.41-44, 2006.

NICOLAE, M.; VILCIU, I.; STOICA, E. D. Research on the mechanism of damage line bricks in the slag LF. **International journal of engineering**, v.9, p. 117-120, 2011.

OLIVEIRA, S. **Escórias e mecanismos de desgaste de refratários para forno panela**; Curso de ALAFAR. “Fundamentos, operación y refractarios para hornos cuchara”; 1997; As., Argentina.

OLIVEIRA, S. P., BRANT, P.O.C.R. **Refratários para os processos de refino secundário**. Seminário ABM Refino secundário dos aços, Belo Horizonte, p.451-490, out.2005.

PORTAL SABER LIVRE. **Tecnologia de produtos refratários**. Disponível em: <http://www.portalsaberlivre.com.br/manager/uploads/educacional/1361217708.pdf>. Acesso em: 17 fev. 2015.

Pretorius, E.; Marr, R. **Computer Modeling of Refractory/Slag/Metal interactions**. Baker Refractories York, PA 17405-1189

QUINTELA, M. A.; **CARACTERIZAÇÃO DE CERÂMICAS REFRAATÓRIAS PARA PANEIA DE AÇO**. Brasil, Universidade Federal de São Carlos, Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, 2003.

RAAD, H. J.; **Influência das Condições de Mistura e Moldagem na Permeabilidade de Concretos Refratários Aluminosos**. Brasil, Universidade Federal de Minas Gerais, Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Construção Civil, 2008.

REITERER, F., DOSINGER, K. Nontoxic magnesita carbon bricks for steel casting ladles. **Radex-Rundschau**, 1993, v.3/4, p.455-463.

RIGAUD, M.; LANDY, R. **Pneumatic Steelmaking**. V.3, Refractories, Warrendale, Ed. Iron & Steel Society; 1996.

RIGAUD, M. et al. **Phase evolution in various carbon-bonded basic refractories**. In: Unified International Technical Conference on Refractories Congress, 1993, São Paulo, Brasil, p. 360 – 371.

RIGAUD, M.; LI, X.; LAGACÉ, M. **Characterization of flake graphite for carbon-bonded refractories**. In: International Symposium on Advances in Refractories for the Metallurgical Industries II, Quebec, Canada, p. 73 - 84, 1996.

ROUTSCHKA, G. (Ed.). **Pocket Manual Refractory Materials**. 2nd Ed. Germany, 2004. 512 p.

SAKANO, Y.; TAKAHASHI, H. Outlook for the refractories industry in Japan, **Bull. Am. Ceram. Soc.**, v.67, n.7, p. 1164-1175, 1988.

SEMLER, C. E. Review of United States refractories industry. **China's Refractories**, v.12, n.1, p.3-5, 2003.

SEMLER, C. E. The ongoing evolution of refractories technology. **Ceramic News**, V.7, n.2, 2000.

SHOUXIN, T.; SHANLIN, L.; MENGQIN, X. Effect of additives on properties of MgO-ZrO₂-C material. **China's Refractories**, v.11, n.1, p.21-25, 2002.

SIEGL, W. M. Electrochemical reaction at magnesita carbon bricks in the conductive bottom of DC-ARC-Furnaces. **Radex-Rundschau**, 1992, v.4, p. 208-216.

Steel Statistics Yearbook 2011 - World Steel Association, disponível em www.worldsteel.org.

SURUGA, T. Effect of high temperature on MgO-C reaction. **Taikabutsu Overseas**, v. 18, n. 4, p. 5-10, 1998.

TAFFIN, C.; POIRIER, J. The behavior of metal additives in MgO-C and Al₂O₃-C refractories. **Interceram**, v. 43, n. 6, p. 458-463, 1994.

TAKEDA, K.; NONOBE, K.; TAKANAGA, S.; TAKAHASHI, H. Corrosion mechanism of magnesia-carbon brick by CaO-SiO₂-Fe₂O₃ slag. **Journal of the Technical Association of Refractories**, v.21, n.1, p. 51-56, 2001.

TAKEDA, T. et al. Application of MgO-C bricks for the RH degasser lower vessel. **La Revue de Métallurgie-CIT**, p. 347-352, 2001.

TORRES, A. A.; DUARTE, A. K.; BITTENCOURT, P. R. H. M.; SILVA, R. T. M. **O panorama do setor de refratários no Brasil**. In: CONGRESSO 28, 1999, Aruba. P.287-295.

TROMMER, R.M. et al. **Caracterização e avaliação do desgaste de tijolos refratários magnesianos empregados em diferentes regiões de uma panela de aciaria**. In: CONGRESSO SAN/CONAMET, 6., 2007, SAN NICOLÁS. P.1057-1062.

WANG, T.; YAMAGUCHI, A. Oxidation protection of MgO-C refractories by means of Al₈B₄C₇. **Journal of the American Ceramic Society**, v.84, n.3, p. 577-582, 2001.

YAMAGUCHI, A. Control of oxidation-reduction in MgO-C refractories. **Taikabutsu Overseas**, v. 4, n. 1, p. 32-37, 1984.

YAMAGUCHI, A. Studies of new refractory components. **Shinagawa Technical Report**, v. 49, p. 1-12, 2006.

YAMAGUCHI, A.; ZANG, S. **Behaviours of various kinds of carbon in carbon-containing refractories**. In: International Symposium on Advances in Refractories for the Metallurgical Industries II, Quebec, Canada, p. 59-71, 1996.

YANG, D. A.; YU, Z.; FAN, L. Al₄C₃ Hydration thermochemical analysis for burned carbon-containing refractories with Al. **China's Refractories**, v.12, n.1, p.19-22, 2003.

YOSHINO, S.; KYODEM, H.; NISHIO, H.; MATSUMOTO, T.; WATANABE, J. Wear of high-graphite MgO-C bricks. **Taikabutsu Overseas**, v. 3, n. 4, p. 21-23, 1983.

Comparação entre a vida média das painelas do 2° e 3° Quartil.

Anova: fator único

RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
Vida_2°Quartil	11	1723	156,6363636	8,254545455
Vida_3°Quartil	11	1793	163	5,4

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	222,7272727	1	222,7272727	32,62316911	1,37068E-05	4,351243478
Dentro dos grupos	136,5454545	20	6,827272727			
Total	359,2727273	21				

Comparação entre a vida média das painelas do 2° e 4° Quartil.

Anova: fator único

RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
Vida_2°Quartil	11	1723	156,6363636	8,254545455
Vida_4°Quartil	10	1698	169,8	6,177777778

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	907,6640693	1	907,6640693	124,8366613	8,56871E-10	4,380749673
Dentro dos grupos	138,1454545	19	7,270813397			
Total	1045,809524	20				

Comparação entre a vida média das painelas do 3° e 4° Quartil.

Anova: fator único

RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
Vida_3°Quartil	11	1793	163	5,4
Vida_4°Quartil	10	1698	169,8	6,177777778

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	242,2095238	1	242,2095238	41,9888773	3,29038E-06	4,380749673
Dentro dos grupos	109,6	19	5,768421053			
Total	351,8095238	20				

Comparação entre a vida média das painelas do 1° e 2° Bloco.

Anova: fator único

RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
Vida_Bloco1	11	1415	128,6363636	440,2545455
Vida_Bloco2	11	1793	163	5,4

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	6494,727273	1	6494,727273	29,14691363	2,77E-05	4,351243
Dentro dos grupos	4456,545455	20	222,8272727			
Total	10951,27273	21				

Comparação entre a vida média das painelas do 3° e 4° Bloco.

Anova: fator único

RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
Vida_Bloco3	15	2029	135,2666667	444,0666667
Vida_Bloco4	23	3742	162,6956522	15,67588933

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	6830,539207	1	6830,539207	37,47436722	4,78171E-07	4,113165219
Dentro dos grupos	6561,802899	36	182,2723027			
Total	13392,34211	37				

APÊNDICE IV – RESULTADOS DAS ANÁLISES ANOVA DA COMPARAÇÃO ENTRE AS MÉDIAS DOS % DE ROTA DESSULFURADO (%DS) DAS PANEAS.

Comparação entre %médio de rota dessulfurado das paineis do 1º e 2º Quartil.

Anova: fator único

RESUMO

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
% Dessulfurado_1ºQuartil	11	0,917576284	0,083416026	0,001442615
% Dessulfurado_2ºQuartil	11	0,673370964	0,061215542	0,001060903

ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,002710738	1	0,002710738	2,165542757	0,15669571	4,351243478
Dentro dos grupos	0,025035184	20	0,001251759			
Total	0,027745922	21				

Comparação entre %médio de rota dessulfurado das paineis do 1º e 3º Quartil.

Anova: fator único

RESUMO

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
% Dessulfurado_1ºQuartil	11	0,917576284	0,083416026	0,001442615
% Dessulfurado_3ºQuartil	11	0,51951962	0,047229056	0,00080742

ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,007202232	1	0,007202232	6,401883695	0,019905164	4,351243478
Dentro dos grupos	0,022500353	20	0,001125018			
Total	0,029702585	21				

Comparação entre %médio de rota dessulfurado das paineis do 1º e 4º Quartil.

Anova: fator único

RESUMO

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
% Dessulfurado_1ºQuartil	11	0,917576284	0,083416026	0,001442615
% Dessulfurado_4ºQuartil	10	0,458070045	0,045807004	0,000508294

ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,007408963	1	0,007408963	7,40865006	0,013534283	4,380749673
Dentro dos grupos	0,019000804	19	0,001000042			
Total	0,026409767	20				

Comparação entre %médio de rota dessulfurado das painelas do 2° e 3° Quartil.

Anova: fator único

RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
% Dessulfurado_2°Quartil	11	0,673370964	0,061215542	0,001060903
% Dessulfurado_3°Quartil	11	0,51951962	0,047229056	0,00080742

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	0,00107592	1	0,00107592	1,151749366	0,295962059	4,351243478
Dentro dos grupos	0,018683228	20	0,000934161			
Total	0,019759148	21				

Comparação entre %médio de rota dessulfurado das painelas do 2° e 4° Quartil.

Anova: fator único

RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
% Dessulfurado_2°Quartil	11	0,673370964	0,061215542	0,001060903
% Dessulfurado_4°Quartil	10	0,458070045	0,045807004	0,000508294

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	0,001243644	1	0,001243644	1,556226565	0,227376195	4,380749673
Dentro dos grupos	0,015183679	19	0,000799141			
Total	0,016427324	20				

Comparação entre %médio de rota dessulfurado das painelas do 3° e 4° Quartil.

Anova: fator único

RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
% Dessulfurado_3°Quartil	11	0,51951962	0,047229056	0,00080742
% Dessulfurado_4°Quartil	10	0,458070045	0,045807004	0,000508294

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	1,05926E-05	1	1,05926E-05	0,015911345	0,900946214	4,380749673
Dentro dos grupos	0,012648848	19	0,000665729			
Total	0,012659441	20				

Comparação entre %médio de rota dessulfurado das painelas do 1° e 2° Bloco.

Anova: fator único

RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
% Dessulfurado_Bloco1	23	1,610055528	0,070002414	0,001384267
% Dessulfurado_Bloco2	20	0,958481385	0,047924069	0,000624665

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	0,005214617	1	0,005214617	5,051669336	0,030045368	4,078545642
Dentro dos grupos	0,042322504	41	0,001032256			
Total	0,04753712	42				

Comparação entre %médio de rota dessulfurado das painelas do 3° e 4° Bloco.

Anova: fator único

RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
% Dessulfurado_Bloco3	15	1,130710168	0,075380678	0,001238416
% Dessulfurado_Bloco4	28	1,437826745	0,051350955	0,000909604

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	0,00563999	1	0,00563999	5,519222883	0,02370698	4,078545642
Dentro dos grupos	0,04189713	41	0,001021881			
Total	0,04753712	42				