RUBENS JOSÉ FACO

**LEVANTAMENTO DAS INCLUSÕES NOS PRINCIPAIS GRUPOS DE
AÇOS PRODUZIDOS EM ACIARIA DO TIPO LD**

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

São Paulo

2005

RUBENS JOSÉ FACO

**LEVANTAMENTO DAS INCLUSÕES NOS PRINCIPAIS GRUPOS DE
AÇOS PRODUZIDOS EM ACIARIA DO TIPO LD**

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

Área de concentração:
Engenharia Metalúrgica

Orientador:
Prof. Dr. José Deodoro Trani Capocchi.

São Paulo
2005

FICHA CATALOGRÁFICA

Faco, Rubens José

Levantamento das inclusões nos principais grupos de aços produzidos em aciaria do tipo LD, São Paulo, 108 p.

Dissertação de Mestrado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

1.Aciaria. 2. Lingotamento Contínuo. 3. Inclusões Não metálicas. 4.Caracterização

I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica.
Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais.II.t

DEDICATÓRIA

À minha esposa Reliane e aos meus filhos Igor e Thaís, que ao longo do período de realização deste trabalho, suportaram em momentos importantes, a ausência do marido e do pai, demonstrando total apoio, carinho e compreensão.

AGRADECIMENTOS

Pelo apoio sempre demonstrado durante todo o transcorrer do meu mestrado, agradeço ao Superintendente da aciaria da Cosipa *Eng° Antonio Márcio de Carvalho Junqueira* e ao gerente de suporte técnico da aciaria Cosipa, *Eng° Danilo Di Napoli Guzela*.

Ao meu orientador, *Prof. Dr. José Deodoro Trani Capocchi*, agradeço o empenho, dedicação e a paciência; com sua experiência buscou nos momentos truncados da elaboração do trabalho, caminhos que levassem à sua conclusão.

Ao *Prof. Dr. Marcelo Breda Mourão*, pelas palavras de apoio nos momentos difíceis.

Aos *Profesores Dr. Cyro Takano e Dr^a. Neusa Alonso Falleiros* pela atenção e presteza com que transmitiram seus conhecimentos.

Ao *Prof. Klaus Schwerdtfeger*, pelas aulas sempre ricas de informações, colhidas ao longo de uma vida dedicada à Siderurgia, em especial a aciaria.

Ao *Prof. Pós-doutor Márcio Hupalo*, que de maneira alegre e descontraída transmitiu orientações importantes a respeito da metalografia e suas particularidades.

Ao colega e aluno do curso de graduação da escola politécnica, *José Adriano de Barros Oliveira*, pelo companherismo demonstrado.

Aos colegas do laboratório de metalografia da Cosipa, *Vanessa Pala Vieira Branco, M.Sc., Paulo Leandro Silva Marinho, Marlon Tait dos Santos e Carlos Augusto Saraiva* pelo empenho e pronto atendimento no período em que as amostras foram analisadas.

Ao *Cláudio Roberto dos Santos*, analista do laboratório de metalografia do departamento de engenharia metalúrgica e de materiais da EPUSP, pela atenção e assistência.

Ao colega da Cosipa, *Prof. Dr. Kenji Camey*, pelas informações sempre oportunas.

À bibliotecária da EPUSP *Clélia de Lourdes Lara Meguerditchian* e também ao *Gilberto Martins* pelo sempre pronto atendimento e orientação nos momentos de consulta.

À bibliotecária Raquel Sturlini (CIM – Biblioteca ABM) pela ajuda na localização de algumas referências bibliográficas.

À também bibliotecária da Cosipa, *Vanessa Pereira* pelo rápido atendimento, atenção,dedicação e presteza.

À secretária do departamento da EPUSP *Maria Cristina Biazoli*, pelas informações e esclarecimentos, nos momentos que se fizeram necessário.

Em especial aos meus pais, *Laurito e Anordina* que em sua árdua trajetória de vida empenharam-se para que seus filhos trilhassem sempre o caminho na busca pelo conhecimento.

A Deus, por me conceder saúde e disposição de vencer mais um desafio em minha vida.

RESUMO

Foram tomadas amostras de aço líquido referentes a três grupos de aço, a saber: (I) aços baixo-carbono ($0,02 \leq \%C \leq 0,08$), acalmados ao alumínio; (II) aços peritéticos ($0,09 \leq \%C \leq 0,15$), acalmados ao alumínio e silício; (III) aços ultrabaixo carbono ($C < 35$ ppm), acalmados ao alumínio. Os aços foram produzidos em aciaria do tipo LD e foram, a seguir, tratados em equipamentos de refino secundário, adequados a cada um dos casos. As amostras foram colhidas no distribuidor de uma máquina de lingotamento contínuo de placas, segundo critério que minimiza a possibilidade da ocorrência de interferências que pudessem mascarar o resultado do tratamento de refino secundário tais como re-oxidação do aço e coleta simultânea de escória. As amostras foram submetidas à análise de inclusões utilizando-se técnicas de microscopia óptica, microscopia eletrônica e micro-análise. Foi possível caracterizar as inclusões presentes em cada tipo de aço segundo a morfologia, o tamanho, a quantidade e a composição química.

ABSTRACT

Non-metallic inclusions in liquid samples of (I) low-carbon aluminium killed steel ($0,02\text{wpct} \leq C \leq 0,08\text{wpct}$), (II) peritectic aluminium and silicon killed steel ($0,09\text{wpct} \leq C \leq 0,15\text{wpct}$); (III) extra-low-carbon, aluminium killed steel ($C < 35 \text{ ppm}$) were taken from the tundish distributor of a continuous casting caster for steel plates according to a procedure that minimizes re-oxidation of steel and/or pick up of liquid slag. The samples were inspected through the following microstructural techniques: optical microscopy, electronic microscopy, and electron microprobe. Were possible to feature present inclusion in each kind of steel according to morphology, size, amount and chemical composition.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

1. OBJETIVOS	1
2. INTRODUÇÃO	2
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
3.1 O fluxo de produção	4
3.2 Inclusões	8
3.3 Tipos de inclusões quanto à composição	10
3.4 Inclusões e os problemas de lingotabilidade	20
3.5 Influência das inclusões nas propriedades do aço	22
3.6 Métodos para analisar e controlar as inclusões	23
4. MATERIAIS E MÉTODOS	28
4.1 Processo de Refino Primário – Conversores LD	28
4.2 Refino Secundário – Desgaseificação a Vácuo ou R.H.	28
4.3 Processo de forno panela	29
4.4 Tratamento com injeção de gás argônio	29
4.5 Lingotamento Contínuo	30
4.6 Aços estudados	30
4.7 Retirada das amostras	32
4.8 Preparação da amostra	34
4.9 Metalografia e preparação das amostras	35
4.10 Observação ao microscópio	39
4.11 Análise qualitativa em microsonda	40

4.12	Análise de oxigênio, nitrogênio e elementos químicos presentes no aço	40
4.13	Norma utilizada	42
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	44
5.1	Resultados apresentados pelo grupo I – B.C	44
5.2	Resultados apresentados pelo grupo II – P	64
5.3	Resultados apresentados pelo grupo III – Aço U.B.C	85
5.4	Comparação dos resultados obtidos entre os 3 grupos de aço	102
6.	CONCLUSÕES	104
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	105

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Fluxo de produção parcial de uma usina integrada	5
Figura 2	– Perfis obtidos a partir do processo de lingotamento contínuo	8
Figura 3	– Apresentação de uma inclusão de alumina em aço baixo carbono acalmado ao alumínio, na forma dendrítica	11
Figura 4	– Representação de distribuidor utilizado em máquinas de lingotamento contínuo. Destaque para o sistema de conexão de válvula longa e tubo submerso	12
Figura 5	– Representação do sistema ternário $MnO-SiO_2-Al_2O_3$, destacando a composição estequiométrica da alumina	12
Figura 6	– Indicação do defeito na superfície da chapa causado por alumina	13
Figura 7	– Diagrama fase sistema $CaO-SiO_2-Al_2O_3$, apresentando os principais compostos integrantes deste sistema	14
Figura 8	– Parte do diagrama binário $CaO-Al_2O_3$, mostrando eutético formado com a adição cálcio no aço	15
Figura 9	– Superfície de uma chapa laminada a quente, apresentando defeito de aluminato de cálcio	16
Figura 10	– Diagrama ternário sistema $MgO-SiO_2-Al_2O_3$, mostrando área de localização do espinélio	17
Figura 11	– Sulfeto de manganês apresentando (a) Tipo I, (b) Tipo II e (c) Tipo III	19
Figura 12	– Aspecto da obstrução causada pela deposição de inclusões em tubo submerso utilizado em lingotamento contínuo	20
Figura 13	– Em [I] indicação de rompimento de veio por colamento, em [II] variação da viscosidade devido à adsorção de alumina pela escória	21
Figura 14	– Representação esquemática da forma das inclusões antes e após a deformação	22
Figura 15	– Imagem de uma impressão de Baumann, indicando, na parte superior, inclusões de alumina	24
Figura 16	– Amostra de aço atacada com ácido nítrico (aumento 225x), apresentando Inclusões de sulfeto de Manganês	24
Figura 17	– Relação entre oxigênio total e a ocorrência de macro inclusão e esfoliamento da superfície da chapa	26

Figura 18 – Influência do “ <i>pickup</i> ” de nitrogênio na qualidade do aço	27
Figura 19 – Gráfico da participação dos grupos de aço estudado, no total de grupos de aços produzidos pela COSIPA. O grupo I refere-se aos aços Baixo carbono, o grupo II aos aços peritéticos e o grupo III aos aços Ultra-Baixo carbono	30
Figura 20 – Indicação do local e o momento da retirada da amostra	32
Figura 21 – Imagem à esquerda indica o dispositivo utilizado para a retirada da amostra no distribuidor, e a imagem à direita, um exemplo da amostra colhida	33
Figura 22 – Representação da disposição da coquilha no interior do cartucho	33
Figura 23 – Representação da forma como foi estudada a amostra	34
Figura 24 – Fotografia da máquina de corte utilizada para seccionar as amostras	35
Figura 25 – Mesa com esmeril e lixadeira de cinta, utilizada na preparação da amostra	36
Figura 26 – Máquina utilizada para embutimento das amostras seccionadas	36
Figura 27 – Indicação da lixadeira rotativa utilizada para preparação da superfície da amostra para observação das inclusões	38
Figura 28 – Indicação da máquina utilizada no polimento das amostras.	38
Figura 29 – Microscópio óptico utilizado para análise das inclusões nas amostras de aço	39
Figura 30 – Microsonda utilizada para análise qualitativa das inclusões observadas em microscópio	40
Figura 31 – Representação esquemática das posições onde foram retirados as amostras para análise de oxigênio e de nitrogênio, na amostra colhida	41
Figura 32 – Leco TC 600 - analisador de oxigênio e nitrogênio	41
Figura 33 – Espectrômetro de emissão óptica, para análise da composição química dos elementos presentes no aço	42
Figura 34 – Gráfico apresentando o tamanho das inclusões (μm) dos aços do grupo I – Baixo carbono – Acalmado ao alumínio	47
Figura 35 – Gráfico apresentando a quantidade de inclusão apresentada pelo grupo I (Baixo carbono)	47
Figura 36 – Gráfico (a), apresenta a quantidade de inclusão com a posição da sequência de lingotamento gráfico (b), o tamanho da inclusão com a posição na sequência	48
Figura 37 – Influência da quantidade de alumínio adicionada na corrida relacionado ao número de inclusão na corrida	49

Figura 38 – Relação entre tamanho e quantidade de inclusão	50
Figura 39 – Teor de oxigênio (a) e nitrogênio (b) nos aços do grupo I, associados ao tamanho e quantidade de inclusão	52
Figura 40 – Resultado da amostra 1 do grupo I, aço baixo carbono acalmado ao alumínio	54
Figura 41 – Resultado da amostra 2 do grupo I, aço baixo carbono, acalmado ao alumínio	55
Figura 42 – Resultado da amostra 3 do grupo I, aço baixo carbono, acalmado ao alumínio	56
Figura 43 – Resultado da amostra 4 do grupo I, aço baixo carbono, acalmado ao alumínio	57
Figura 44 – Resultado da amostra 5 do grupo I, aço baixo carbono, acalmado ao alumínio	58
Figura 45 – Resultado da amostra 6 do grupo I, aço baixo carbono, acalmado ao alumínio	59
Figura 46 – Resultado da amostra 7 do grupo I, aço baixo carbono, acalmado ao alumínio	60
Figura 47 – Resultado da amostra 8 do grupo I, aço baixo carbono, acalmado ao alumínio	61
Figura 48 – Resultado da amostra 9 do grupo I, aço baixo carbono, acalmado ao alumínio	62
Figura 49 – Resultado da amostra 10 do grupo I, aço baixo carbono, acalmado ao alumínio	63
Figura 50 – Gráfico apresentando a quantidade de inclusões nas amostras do grupo II (Aços peritéticos acalmado ao alumínio e silício)	66
Figura 51 – Gráfico apresentando o tamanho das inclusões das amostras do grupo II (Aços peritéticos acalmado ao alumínio e silício)	66
Figura 52 – Relação teor de oxigênio x tamanho das inclusões	67
Figura 53 – Gráfico apresentando a relação do teor de oxigênio encontrado com a quantidade de inclusões observada	68
Figura 54 – Relação número de inclusões e posição da corrida na sequência de lingotamento	68
Figura 55 – Relação tamanho de inclusão e posição na série	69

Figura 56 – Frequência dos tipos de inclusões observadas nas amostras do grupo II	69
Figura 57 – Resultado da análise WDS da inclusão (a) amostra 3, grupo II aços peritéticos	73
Figura 58 – Resultado da amostra 1 do grupo II, aço peritético, acalmado ao alumínio e silício	75
Figura 59 – Resultado da amostra 2 do grupo II, aço peritético, acalmado ao alumínio e silício	76
Figura 60 – Resultado da amostra 3 do grupo II, aço peritético, acalmado ao alumínio e silício	77
Figura 61 – Resultado da amostra 4 do grupo II, aço peritético, acalmado ao alumínio e silício	78
Figura 62 – Resultado da amostra 5 do grupo II, aço peritético, acalmado ao alumínio e silício	79
Figura 63 – Resultado da amostra 6 do grupo II, aço peritético, acalmado ao alumínio e silício	80
Figura 64 – Resultado da amostra 7 do grupo II, aço peritético, acalmado ao alumínio e silício	81
Figura 65 – Resultado da amostra 8 do grupo II, aço peritético, acalmado ao alumínio e silício	82
Figura 66 – Resultado da amostra 9 do grupo II, aço peritético, acalmado ao alumínio e silício	83
Figura 67 – Resultado da amostra 10 do grupo II, aço peritético, acalmado ao alumínio e silício	84
Figura 68 – Gráfico apresentando o tamanho das inclusões obtidas no grupo III Ultra baixo carbono	87
Figura 69 – Gráfico da quantidade de inclusões por amostra do grupo III Ultra baixo carbono	87
Figura 70 – Posição da corrida na sequência de lingotamento com relação à quantidade de inclusões produzidas	88
Figura 71 – Posição da corrida na sequência de lingotamento com relação ao tamanho das inclusões produzidas	89
Figura 72 – Tempo de aquecimento em função da quantidade de inclusões	89
Figura 73 – Tamanho vs. quantidade de inclusões	90

Figura 74 – Resultado da amostra 1 do grupo III, aço ultra baixo carbono, acalmados ao alumínio	92
Figura 75 – Resultado da amostra 2 do grupo III, aço ultra baixo carbono, acalmados ao alumínio	93
Figura 76 – Resultado da amostra 3 do grupo III, aço ultra baixo carbono, acalmados ao alumínio	94
Figura 77 – Resultado da amostra 4 do grupo III, aço ultra baixo carbono, acalmados ao alumínio	95
Figura 78 – Resultado da amostra 5 do grupo III, aço ultra baixo carbono, acalmados ao alumínio	96
Figura 79 – Resultado da amostra 6 do grupo III, aço ultra baixo carbono, acalmados ao alumínio	97
Figura 80 – Resultado da amostra 7 do grupo III, aço ultra baixo carbono, acalmados ao alumínio	98
Figura 81 – Resultado da amostra 8 do grupo III, aço ultra baixo carbono, acalmados ao alumínio	99
Figura 82 – Resultado da amostra 9 do grupo III, aço ultra baixo carbono, acalmados ao alumínio	100
Figura 83 – Resultado da amostra 10 do grupo III, aço ultra baixo carbono, acalmados ao alumínio	101

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição média do gusa produzido pela COSIPA	4
Tabela 2 – Composição média do aço líquido no final de sopro na COSIPA	6
Tabela 3 – Algumas das propriedades da alumina e aluminatos	13
Tabela 4 – Principais tipos de inclusão de aluminato de cálcio e suas propriedades	15
Tabela 5 – Algumas inclusões de espinélio e suas propriedades	17
Tabela 6 – Composição química dos aços do grupo I (Baixo carbono)	31
Tabela 7 – Composição química dos aços do grupo II (Aço peritético)	31
Tabela 8 – Composição química do aço do grupo III (Aço ultra baixo carbono)	32
Tabela 9 – Componentes presentes nas resinas utilizadas no embutimento	37
Tabela 10 – Procedimentos adotados diferentes da norma ASTM E 45 – 97	43
Tabela 11 – Dados sobre o tratamento das corridas na estação de borbulhamento com argônio	44
Tabela 12 – Balanço das inclusões apresentadas no grupo I, decorrente das figuras 39 a 48	53
Tabela 13 – Informações sobre o tratamento das corridas do grupo II (aços peritéticos) no forno panela	64
Tabela 14 – Especificação da nefelina	71
Tabela 15 – Resumo das inclusões observadas no grupo II – Aços peritéticos	74
Tabela 16 – Dados sobre o tratamento das corridas no R.H	85
Tabela 17 – Resumo das inclusões observadas no grupo III – Aços ultra baixo carbono	91
Tabela 18 – Balanço dos resultados de inclusões apresentadas pelos grupos de aço	103

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

COSIPA	Companhia Siderúrgica Paulista
DWI	<i>“Drawn and wall ironed”</i>
EDS	Espectrometria por dispersão de energia
EPMA	<i>“Electron Probe Micro Analyzer”</i>
LD	Linz e Donavitz, iniciais das cidades Austríacas onde o processo foi desenvolvido
MEV	Microscópio eletrônico de varredura
OES-PDA	<i>“Optical emission spectrometry with pulse discrimination Analysis”</i>
p_i	Tamanho da inclusão (μm)
R.H	Ruhrstahl e Hattingem, usinas siderúrgicas Austríacas onde o processo foi desenvolvido
SEM	<i>“Scanning Electron Microscopy - Microscopia eletrônica de varredura”</i>
TPC	<i>“Three-Phase contact”</i>
U.B.C	Ultra Baixo Carbono
X_p	Média ponderada
x_i	Número de inclusões encontradas para um determinado tamanho de inclusão
WDS	<i>“Wavelength dispersive spectroscopy”</i>
Wpct	<i>“Weight per cent” (%)</i>

1 OBJETIVOS

Os objetivos deste trabalho são:

1 – Identificar os tipos de inclusões geradas pelo processo de refino em três grupos de aço de destacada produção em aciaria, quais sejam:

- o Aços Baixo carbono acalmados ao alumínio
- o Aços peritéticos acalmados ao alumínio e silício
- o Aços ultrabaixo carbono

2 – Mensurar tamanho e quantidade das inclusões presentes em amostras dos grupos citados.

2. INTRODUÇÃO

À medida que se desenvolve, o homem busca aprimorar-se em tudo aquilo que faz, seja no campo pessoal ou no campo profissional. Neste último, em particular, impelidos pela população mais informada e mais questionadora, os especialistas procuram desenvolver seus projetos com grande elegância e, ao mesmo tempo, com grande margem de segurança para que possam sobreviver frente a um mercado cada vez mais competitivo.

Na siderurgia não é diferente: projetos importantes, desenvolvidos por consumidores de aço caminham na busca de estreitar faixas de propriedades a fim de garantir um produto mais homogêneo. Para atender à esta demanda, os fabricantes de aço trabalham cada vez mais a produção do chamado “aço limpo”, com nível de impureza mais baixo, que possibilite atender aos anseios desse perfil de consumidor.

As propriedades mecânicas do aço, são controlada pela composição química e pelo tratamento térmico ou mecânico à que é submetido. Contudo, defeitos estruturais, alguns como inclusões não metálicas, são também responsáveis pela performance deste material quando submetido a esforço mecânico.⁽¹⁾

O conceito de aço limpo leva em conta a composição química, tamanho, morfologia, tipo e distribuição das inclusões, além de considerar também a baixa quantidade de impurezas nocivas ao aço, tais como oxigênio, enxofre, fósforo, hidrogênio e nitrogênio.⁽¹⁾

Neste trabalho, buscou-se conhecer as inclusões produzidas em uma aciaria do tipo L.D. (Iniciais das cidades austriacas de Linz e Donavitz), nos principais grupos de aços produzidos por ela. Amostras colhidas em um distribuidor utilizado por uma máquina de lingotamento contínuo foram analisadas, utilizando os recursos metalográficos disponíveis para a observação das mesmas. A microscopia eletrônica foi utilizada para auxiliar na caracterização dos mais variados tipos de inclusões, para se ter com precisão o tipo de inclusão produzida.

O interesse em conhecer os tipos de inclusões produzidas nas principais estações de refino existentes em uma aciaria do tipo LD, segue uma tendência mercadológica, na busca por prejetos de liga de aço, cada vez mais homogênea onde as dispersões nas propriedades mecânicas devam ser menores, possibilitando ao mercado consumidor maior segurança na aplicação e utilização do seu produto.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O passo inicial para o desenvolvimento do tema proposto para o mestrado é exatamente conhecer o processo de fabricação de aço em aciaria, que é onde o trabalho irá se desenvolver. Esse processo vem desde seus primórdios, aprimorando-se cada vez mais, pressionado pelas exigências impostas pelo mercado, seja na questão de melhorar a qualidade dos produtos gerados, seja pela redução dos custos com a produção. Nesse sentido, o processo busca introduzir tecnologia capaz de elevar a sua competitividade, aprimorar a qualidade do seu produto, reduzindo, assim, perdas metálicas por defeitos ou re-trabalhos e desvios nas linhas de produto acabado, decorrentes de defeitos que surgem em seu interior e/ou superfície.

Vários são, portanto, os caminhos a serem trilhados na busca desses objetivos; um deles, certamente, passa por melhorar a limpidez do aço na aciaria durante as várias etapas que compreende o seu processo de fabricação. Reduzir impurezas sinaliza que o produto torna-se mais homogêneo em termos de propriedades mecânicas, o que o conduzirá a um produto final sujeito a um menor índice de falhas.

No desenvolvimento do tema proposto, é interessante compreender, mesmo que parcialmente, o caminho desenvolvido pelas matérias primas até sua etapa final que é o aço em um estado denominado de semi acabado, ou em um estágio primário de fabricação. Utilizando-se de um fluxograma de produção cada etapa é apresentada com uma breve descrição do processo, suas principais reações químicas e temperaturas além da composição química de cada produto no final de cada etapa.

Em seguida é apresentada uma abordagem sobre as inclusões onde, são descritas as características dos principais tipos de inclusão, sua composição química e localização no diagrama de fase.

São apresentados também os ensaios utilizados atualmente para detectar inclusões, e seu emprego na indústria e centros de pesquisa. Uma breve abordagem é feita sobre a influência das inclusões nas propriedades do aço.

3.1 – O fluxo de produção

Uma apresentação parcial do fluxo de produção de uma usina siderúrgica integrada pode ser vista na figura 1.^(2,3) Nela podem-se observar as principais etapas no processo de obtenção do produto final aço, ainda distante da sua forma como produto acabado. Cada etapa é distinguida com o número em algarismo romano.

De maneira geral, o processo inicia-se em (I) com a preparação das matérias-primas que serão levadas até (II), destacando-se, entre elas, o coque, o calcário e o minério de ferro. Em (II) essas matérias-primas são introduzidas pelo topo e descem em contra-corrente à passagem de ar quente, desencadeando uma série de reações até obtenção do ferro gusa líquido; as principais reações são apresentadas a seguir.⁽⁴⁾ A tabela 1 apresenta a composição média do ferro gusa líquido produzido na Companhia Siderúrgica Paulista (COSIPA).

Tabela 1: Composição média do gusa produzido pela COSIPA.

COMPOSIÇÃO QUÍMICA (%)				
C	Mn	Si	P	S
4,3	0,61	0,43	0,100	0,0096

A aproximadamente 1300°C, o gusa líquido produzido em (II) segue para (IV), onde, juntamente com uma parcela (15% do valor capacidade do forno) de sucata (III), formará a chamada corrida de aço, através da injeção de oxigênio por uma lança refrigerada (denominada de sopro) e com adição de ferro liga e escorificante. As principais reações que ocorrem nessa etapa do processo são divididas em:^(4,5,6)

Figura 1: Fluxo de produção parcial de uma usina siderúrgica integrada. ^(2,3)

○ Reações de oxidação:

○ Reações de descarburização:

○ Reações de desfosforação:

○ Reações de dessulfuração:

Os tempos e temperaturas obtidos na fabricação do aço através do processo LD, são apresentados por MILLER et al. ⁽⁵⁾ Na tabela 2, é apresentada a composição média do aço líquido no final de sopro, produzido pela COSIPA. Durante o processo de vazamento são realizadas adições de ferro-liga e desoxidante a fim de aproximar o então aço líquido da sua composição final. De (IV), a corrida pode tomar caminhos diferentes conforme a aplicação o exija. As opções descritas aqui seguem a condição de uma planta específica e uma linha de trabalho escolhida para estudo.

Tabela 2: Composição média do aço líquido no final de sopro na COSIPA.

COMPOSIÇÃO QUÍMICA (%)				
C	Mn	Si	P	S
0,054	0,156	0,003	0,0156	0,0084

Uma das opções está em (V), conforme figura 1, onde a corrida é homogeneizada em termos de composição química e temperatura, através da injeção de um gás inerte (argônio) ao banho metálico. Os ajustes desses dois parâmetros são importantes para o processo seguinte, pois vão interferir no seu desempenho e na qualidade do produto gerado. ⁽⁷⁾ Nessa etapa do refino, a corrida pode receber algum ajuste fino através da adição de elementos como alumínio ou carbono.

Em (VI), observa-se o forno panela. Nessa etapa do processo é possível se realizar ajustes estreitos de temperatura para o lingotamento contínuo, desoxidação do aço, dessulfuração, controle das inclusões e homogeneização da composição química. As principais reações que ocorrem nesse processo são: ⁽⁸⁾

- De desoxidação

- De dessulfuração

O controle da morfologia das inclusões é conseguido através da injeção de Ca-Si em fios que fazem parte da planta do forno panela instalado. ⁽⁸⁾

Dando seqüência ao fluxo de produção, em (VII), tem-se o tratamento do aço sob vácuo, que se baseia em reações dependentes da pressão. Isto inclui a eliminação do hidrogênio, a redução do carbono associada à desoxidação, bem como a redução do nitrogênio. ⁽⁶⁾ As principais reações nesse estágio são as seguintes: ⁽⁹⁾

As correções exigidas pela composição química do aço que chega até (VII), são possíveis, pois esses sistemas são dotados de silos para armazenamento de ferro-liga e escorificante.

Após alcançados os objetivos definidos em (V), (VI) e (VII), a corrida está pronta, ou seja, com sua composição química e temperatura homogêneas e dentro dos limites

especificados para cada tipo de aço. O aço líquido é então enviado para (VIII), onde cumprirá o estágio final do processo de fabricação, que é solidificação.

O processo de lingotamento se desenvolve a partir da abertura da panela, por onde escoar o aço líquido. Utilizando-se de sistemas de proteção contra a re-oxidação, ele chega até o molde, onde acontecerá a solidificação do metal, depois de passar pelo distribuidor.

Forma-se um longo corpo, denominado de veio, que possui em seu interior uma porção ainda não solidificada de aço, que completará sua solidificação à medida que avança pelo interior da máquina. ^(2,10) No final, o veio é seccionado em pequenas partes que podem ser denominadas de placas, tarugos e “blooms” (ver figura 2) conforme projeto da máquina. Tem-se, então, um produto semi-acabado, pronto para seguir para uma outra etapa de produção do processo siderúrgico, o de conformação.

Figura 2: Perfis obtidos a partir do processo de lingotamento contínuo. ⁽¹¹⁾

3.2 Inclusões

A definição de aço limpo é função da aplicação do produto final. Inclusões não metálicas, tornam-se importantes quando elas são responsáveis por produzir defeitos durante o processamento dos produtos em sua aplicação final. Problemas tendem a ocorrer nos produtos quando significantes quantidades de grandes inclusões (entre 20 e 150 μm) surgem no produto fundido. ⁽¹²⁾

A composição, a quantidade e o tamanho das inclusões não metálicas são importantes, pois influenciam as propriedades mecânicas do aço, algumas como fadiga, usinabilidade e resistência à corrosão. ^(13,14)

As impurezas no interior dos metais podem existir de quatro maneiras: ⁽¹⁵⁾

- Um grupo que inclui elementos voláteis. Exemplo: H_2 .
- Um grupo que inclui elementos reativos. Podem ser removidos de fundidos pela adição de oxigênio, de óxidos, de boro, entre outras substâncias.
- Um grupo que inclui as inclusões, que podem estar na forma líquida ou sólida.

Aço limpo é o aço em que composição e inclusões são juntamente controladas para melhorar as propriedades e caracteriza-se por apresentar: ⁽¹⁶⁾

- baixo oxigênio ou óxidos;
- controle e forma dos óxidos;
- baixo enxofre;
- controle e forma de sulfetos;
- baixo hidrogênio;
- baixo nitrogênio;
- baixo carbono;
- baixo fósforo;
- controle estreito de elementos de liga, alguns como Al, Mn, Si etc.

As inclusões são classicamente divididas quanto à origem, conforme segue:

3.2.1 Inclusões endógenas

São aquelas que formam precipitados como resultado de reação química que ocorre no aço. Elas são compostas principalmente de óxidos e sulfetos e as reações que lhes dão origem podem ser induzidas através de adições feitas ao aço durante as operações de refino, ou simplesmente por mudanças de solubilidade durante o resfriamento, na etapa de solidificação. ⁽¹⁷⁾

3.2.2 Inclusões exógenas

Ocorrem como resultado de incorporações mecânicas de escória, refratário ou outros materiais que têm contato com o aço. Aspectos característicos de uma inclusão exógena são geralmente, grande tamanho, ocorrência esporádica, preferência de localização numa placa ou lingote. Não se pode discutir sistematicamente o tamanho e quantidade deste tipo de inclusão, pois isso dependerá da prática individual de cada aciaria.⁽¹⁷⁾

As inclusões exógenas, via de regra, deverão ser sempre evitadas. Contudo, no caso das inclusões endógenas, o problema é mais complicado, pois essas inclusões são como que componentes do próprio aço. São formadas pelo oxigênio e enxofre sempre presentes em sua composição. A quantidade, o tamanho, a forma e a distribuição das inclusões endógenas podem ser modificadas, mas a presença delas não poderá ser nunca inteiramente evitada.⁽¹⁷⁾

3.3 – Tipos de inclusões quanto à composição

Serão discutidos os tipos mais importantes de inclusões verificados na produção dos aços que serão objeto de estudo deste trabalho.

3.3.1 Óxidos

Aços produzidos no lingotamento contínuo são acalmados com alumínio ou com alumínio-silício;⁽¹⁸⁾ são, por exemplo, os aços de baixo teor de carbono ($C < 0,08\%$), que são empregados na construção de carros, eletrodomésticos, produtos revestidos para aplicações diversas. O maior problema encontrado durante a produção desse tipo de aço na máquina de lingotamento é a presença de alumina (Al_2O_3), que forma as inclusões mais comuns e podem originar-se através de fontes como:⁽¹⁹⁾

[a] - Na etapa de desoxidação, durante o vazamento da corrida e da transferência do aço líquido do conversor para a panela. Utilizam-se desoxidantes como alumínio, FeSiMn ou, ainda, FeMn, em que se destacam reações como:⁽¹²⁾

[b] - Na reação de re-oxidação do aço, que ocorre devido à exposição do aço líquido à atmosfera, depois de já estar acalmado. A exposição causa aumento de oxigênio no banho, seja através de intensa agitação de aço na panela, ou através do não uso do sistema de proteção de válvula longa no vazamento da panela para o distribuidor, ou ainda, devido ao arraste de ar por entre as conexões do sistema válvula longa / tubo submerso.^(11,12) A figura 3 apresenta uma forma de óxido de alumínio encontrada em placa de aço produzida via lingotamento contínuo. A figura 4 por sua vez indica os pontos de conexões existente no processo de lingotamento contínuo com uso da válvula longa e tubo submerso.

Figura 3: Apresentação de uma inclusão de alumina em aço baixo carbono acalmado ao alumínio, na forma dendrítica.⁽¹⁹⁾

Figura 4: Representação de distribuidor utilizado em máquina de lingotamento contínuo. Destaque para o sistema de conexão de válvula longa e tubo submerso.

A inclusão da figura 3 é o “coríndon” ($100\% \text{Al}_2\text{O}_3$). São indicados, também, outros compostos formados pela alumina, conforme no diagrama da figura 5. A tabela 3 apresenta algumas das propriedades da alumina e desses compostos.

Figura 5: Representação do sistema ternário $\text{MnO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$, destacando a composição estequiométrica da alumina. ⁽²⁰⁾

Tabela 3: Algumas das propriedades da alumina e aluminatos.⁽²⁰⁾

NOME	FÓRMULA	PONTO DE	DENSIDADE	DUREZA
	.....	°C	g/cm ³	Kp/mm ²
Alumina	Al ₂ O ₃	2050	3,96	3000-4500
Mulita	3 Al ₂ O ₃ .2 SiO ₂	1850	3,156	1500
Galaxita	MnO. Al ₂ O ₃	1560	4,23	1500-1700

A figura 6 destaca o dano causado por inclusões de alumina na produção de chapas de aço. Obviamente, nesta situação, não se pode destinar o produto para nenhum tipo de aplicação que não seja o sucateamento da parte afetada. São defeitos somente observados após a laminação do produto semi-acabado.

Figura 6: Indicação do defeito na superfície da chapa causado por alumina.⁽²¹⁾

3.3.2 Aluminato de Cálcio

Cálcio foi descoberto em 1808, quando Sir Davy isolou com sucesso esse elemento na forma pura; contudo, a sua utilização em escala industrial teve que esperar o desenvolvimento de Ca-Si, o que aconteceu em 1896.⁽²²⁾ Ca-Si é usado em aciaria com as seguintes finalidades distintas:⁽²³⁾

- Agir como elemento desoxidante e dessulfurante no processo de refino;
- Controle da morfologia das inclusões de alumina geradas pelo processo de desoxidação do aço;

- Formação do eutético com baixo ponto de fusão, a fim de evitar deposição de alumina nas válvulas por onde escoo o aço (ver figura 8), permitindo, assim, o escoamento do mesmo.

As reações que se desenvolvem devido à adição de Ca-Si no processo de refino são as seguintes: ⁽²⁴⁾

A partir da reação (25), outras reações surgem dando origem a inclusões de cálcio aluminato; porém, com diferentes concentrações dos compostos, como pode ser observado na figura 7. Observa-se cinco composições diferentes de inclusões tendo duas principais origens que serão descritas conforme segue. ⁽¹⁹⁾ A tabela 4 apresenta as principais propriedades dos cinco tipos de composição observada.

Figura 7: Diagrama de fase do sistema $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$, apresentando as cinco principais composições de cálcio aluminato. ⁽²³⁾

Tabela 4: Principais tipos de inclusão de aluminato de cálcio e suas propriedades. ⁽²⁵⁾

NOME INCLUSÃO	FÓRMULA	PONTO FUSÃO (°C)	DENSIDADE g/cm ³	DUREZA (kp.mm ⁻²)
Aluminato de Cálcio	3CaO. Al ₂ O ₃	1535	3,04	-----
	12CaO. 7Al ₂ O ₃	1455	2,83	-----
	CaO. Al ₂ O ₃	1605	2,98	930
	CaO. 2Al ₂ O ₃	1750	2,91	1100
	CaO. 6Al ₂ O ₃	1850	3,38	2200

Figura 8: Parte do diagrama binário CaO-Al₂O₃, mostrando eutético formado com a adição cálcio no aço. ⁽²⁶⁾

A primeira origem é a interação de alumina presente no aço líquido com escória da panela e/ou distribuidor presente nas etapas de fabricação do aço. A segunda origem está relacionada ao tratamento do aço com cálcio, onde a alumina é convertida para aluminato de cálcio. O aspecto do defeito provocado por inclusões deste tipo é apresentado na figura 9.

Figura 9: Superfície de uma chapa laminada a quente, apresentando defeito de aluminato de cálcio. ⁽¹⁹⁾

3.3.3 Espinélio

São as inclusões do sistema $\text{MgO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$. Destacam-se por representar as inclusões que se formam a partir dos refratários, que são utilizados em aciaria no processo de produção, que se estende desde o refino primário até o lingotamento contínuo. Tijolos (sejam de conversor ou panela) e massas utilizadas em reparos, contêm em sua composição alguma quantidade de MgO , mesmo em refratários considerados neutros. ⁽²⁵⁾ São inclusões complexas que usualmente envolvem o MgO e Al_2O_3 , são sólidas e causam obstrução durante o lingotamento do aço. Tratamento com cálcio não modifica inclusões do tipo espinélios. ⁽²⁷⁾

A figura 10 apresenta o diagrama de fases com as principais composições apresentadas por este tipo de inclusão. A tabela 5 por sua vez, as principais propriedades das inclusões observadas neste grupo.

Figura 10: Diagrama ternário do sistema $\text{MgO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$, mostrando área de localização do Espinélio. ⁽²⁵⁾

Tabela 5: Algumas inclusões de espinélio e suas propriedades. ⁽²⁵⁾

NOME	FÓRMULA	PONTO FUSÃO (°C)	DENSIDADE g/cm^3	DUREZA (kp.mm^{-2})
Periclásio	MgO	2800	3,581	1000
Espinélio	$\text{MgO}.\text{Al}_2\text{O}_3$	2135	3,58	2300
Enstatita	$\text{MgO}.\text{SiO}_2$	1557	3,19	1000
Forsterita	$2\text{MgO}.\text{SiO}_2$	1890	3,22	1200
Cordierita	$2\text{MgO}.2\text{Al}_2\text{O}_3.5\text{SiO}_2$	1460	2,55	.....
“Pyrope”	$3\text{MgO}.\text{Al}_2\text{O}_3.3\text{SiO}_2$	.....	.....	.....
Safirina	$4\text{MgO}.5\text{Al}_2\text{O}_3.2\text{SiO}_2$	1482	3,45	.....

As inclusões contendo MgO são caracterizadas como de origem exógena, tendo como principal fonte refratários de forno ou de panela e, no caso de lingotamento contínuo, de distribuidores e válvulas utilizadas (válvula longa e tubo submerso) para proteção e transporte do aço. ⁽²⁵⁾

3.3.4 Sulfetos

São, em sua maioria, solúveis nos aços; porém, a solubilidade no aço sólido é muito baixa. Isso faz com que os precipitados tenham forma de sulfetos metálicos durante a solidificação e o modelo de precipitação é influenciado por forte tendência à segregação. ⁽²⁵⁾ O mais importante sulfeto encontrado nos aços lingotados continuamente é o sulfeto de manganês (MnS), além deste são encontrados também o sulfeto de ferro, o sulfeto de cálcio e o sulfeto de titânio. O sulfeto de manganês pode apresentar-se sob três formas na composição dos aços, conforme segue: ⁽¹⁹⁾

[a] Sulfeto de manganês tipo I:

Sulfeto de Manganês esférico, ocorre em aço com alto teor de oxigênio e é o menos deformável dos três.

[b] Sulfeto de manganês tipo II:

É encontrado em aços completamente acalmados; ao contrário do primeiro tipo, não possui uma forma definida, aparecendo, inclusive, com formato alongado na área mais central da placa. Este sulfeto é de baixa dureza quando comparado ao do tipo I, conforme pode ser observado do resultado micrográfico apresentado na figura 11.

[c] Sulfeto de manganês tipo III:

Sulfeto de manganês na forma facetada, interdendrítica, sólida em aço acalmado ao alumínio. Esta é considerada ser a mais plástica das inclusões de sulfetos de manganês.

A principal reação que segue é a que dá origem ao sulfeto de manganês no aço: ⁽²⁵⁾

Figura 11: Sulfeto de manganês apresentando (a) Tipo I, (b) Tipo II e (c) Tipo III. ⁽²⁸⁾

3.3.5 Nitretos

É o último grupo mais importantes de inclusões que se encontram em aços lingotados continuamente. Estes compostos irão formar precipitados no contorno de grão que vão fragilizar o aço obtido. Dentre os compostos, destacam-se: ⁽¹⁹⁾

[a] Nitreto de titânio

Atualmente a adição de titânio é feita em aços ultrabaixo carbono com a finalidade de permitir a esmaltagem vítrea.

A formação de nitreto de titânio ($\text{Ti} \geq 0,20\%$) pode causar problemas operacionais no lingotamento. Situações de baixa temperatura causam o aparecimento de crostas dentro do distribuidor ou dentro do molde, dificultando a condição de lingotamento da corrida. Essas crostas também podem vir a ser difundidas na escória de fluxante do molde, alterando, com isso, a sua principal propriedade, que é a lubrificação, causando acidente como o rompimento de veio. ⁽¹⁹⁾

Observa-se que a formação desses compostos é mais nociva para certa aplicação de aço. Por exemplo, para aços para fabricação de mancais, a formação de nitreto de titânio é indesejável, pois causa alta dureza no material e sua morfologia angular aumenta a concentração de tensões e afeta as propriedades de fadiga. ⁽¹⁹⁾

[b] Nitreto de alumínio

A formação de nitreto de alumínio contribui para redução da propriedade ductilidade a quente do aço lingotado. Com isso, durante a passagem do veio na máquina de lingotamento, com os ciclos térmicos impostos pelo processo de resfriamento, o aço torna-se susceptível à formação de trincas transversais nas faces largas da placa, próximo às bordas. Portanto, o seu controle passa a ser de fundamental importância no processo de obtenção de placas com baixo nível de trincas transversais. ⁽¹⁹⁾

3.4 – Inclusões e os problemas de lingotabilidade

O termo “lingotabilidade” pode ser definido como a capacidade do aço líquido de fluir livremente através da válvula da panela e do distribuidor. A ocorrência de obstrução está associada a depósitos de inclusões sólidas, sendo frequentes os depósitos de alumina como o apresentado na figura 12. ⁽²⁹⁾ Uma revisão sobre esta questão é feita por Frank, ⁽³⁰⁾ que sugere, entre outras coisas, a utilização de cálcio (injetado em fio de Ca-Si) como forma de abrandar esse problema.

Figura 12: Aspecto da obstrução causada pela deposição de inclusões em tubo submerso utilizado em lingotamento contínuo. ⁽³¹⁾

Um outro aspecto da influência das inclusões sobre a lingotabilidade é a ocorrência de rompimento de veio. Esse rompimento faz com que haja vazamento do aço líquido para o interior da máquina, interrompendo, assim, o processo produtivo. MILLS et al. ⁽³²⁾ propuseram que a alumina participa na formação de aglomerados (devido ao aumento da viscosidade da escória - figura 13 [II]), que são forçados para as faces estreitas do molde, bloqueando o fluxo de escória e, conseqüentemente, a lubrificação, fazendo com que haja o colamento da pele do veio nas paredes do molde, conforme mostrado na figura 13 [I]. Em (A) observam-se marcas de oscilação típicas de lingotamento contínuo e em (B) as marcas na posição vertical devido ao esforço de tração imposta à pele do veio. ⁽³³⁾

Figura 13: Em [I], indicação de rompimento de veio por colamento. ⁽³³⁾ Em [II], variação da viscosidade devido à adsorção de alumina pela escória. ⁽³⁴⁾

3.5 Influência das inclusões nas propriedades do aço

Desde muito cedo, observaram-se os efeitos prejudiciais das inclusões no aço, em particular sobre a ductilidade, a tenacidade, a fadiga e na usinabilidade do metal. As inclusões que afetam as propriedades são principalmente óxidos e sulfetos, cujos tamanhos podem variar de $0,2\mu\text{m}$ a $50\mu\text{m}$. A forma das inclusões em produtos trabalhados é largamente controlada pela dureza relativa das inclusões em relação ao aço. O comportamento de diferentes tipos de inclusões é representado na figura 14; em cada caso, a matriz tende a deformar-se em torno da inclusão durante o processo de deformação, criando cavidades. ⁽¹⁵⁾

Figura 14: Representação esquemática da forma das inclusões antes e após a deformação. ⁽¹⁵⁾

A forma apresentada em (a) na figura 14, é característica de inclusões do tipo silicato globular vítreo. Aglomerados cristalinos de aluminato de cálcio são exemplos de inclusões do tipo (b) e “clusters” de alumina do tipo (c). Em cada caso, a matriz tende a se deformar em torno da inclusão durante o esforço da deformação, criando cavidades. As inclusões de maior efeito prejudicial ao aço são as que deformam com a matriz, causando perda na ductilidade e tenacidade. São as que mudam a forma com a matriz e, nesse caso, as propriedades na direção transversal, tornam-se bastante pobres. Mistura de sulfeto de manganês e óxidos pertence ao tipo (d), enquanto puro sulfeto de manganês são do tipo (c).⁽¹⁵⁾

Algumas propriedades mecânicas dos aços, notadamente a ductilidade,⁽³⁵⁾ são afetadas negativamente pela presença de inclusões não-metálicas. A fratura dúctil nos aços se deve a inclusões, pois formam-se vazios ao redor das mesmas que, eventualmente, coalescem provocando fratura no material.⁽¹⁵⁾

A tenacidade⁽³⁵⁾ também é afetada negativamente, pois as inclusões comportam-se como pequenas trincas no interior do material.⁽¹⁵⁾

Inclusões de alumina, espinélio e cálcio-aluminatos maiores do que 10µm nucleiam trincas devido à concentração de tensões localizadas, propiciando, assim a diminuição da resistência à fadiga dos aços.⁽¹⁷⁾

As inclusões de MnS, ao contrário, melhoram a usinabilidade dos aços, particularmente elas contribuem para o aumento da vida útil das ferramentas de corte, em virtude de provocarem a fragilização dos cavacos de aços. Contudo, o mesmo não acontece no caso da presença de inclusões de óxidos.⁽¹⁷⁾

A soldabilidade dos aços⁽¹⁷⁾ e a resistência dos mesmos à corrosão⁽³⁶⁾ também são prejudicadas pela presença das inclusões.

3.6 Métodos para analisar e controlar as inclusões

3.6.1 Métodos Diretos

[a] - Impressão de Baumann

No processo de lingotamento contínuo, uma das técnicas empregadas para detectar inclusões nas placas lingotadas é a análise de Baumann. É um método que utiliza papel fotográfico umedecido em solução ácida H_2SO_4 diluída em 2% do total do volume de água utilizada. A amostra, depois de atacada, deixa no papel fotográfico uma imagem como a da figura 15, onde é possível observar a presença de alguns tipos de inclusões.⁽¹⁸⁾

e = Espessura da placa

Figura 15: Imagem de uma impressão de Baumann, indicando na parte superior, inclusões de alumina.

[b] - Microscópio óptico – Observação metalográfica.

A Microscopia ótica é utilizada para caracterizar dois tipos principais de inclusão. O primeiro tipo é o das crostas de pequenas partículas, principalmente de alumina. O segundo é o de grandes óxidos ($> 50 \mu\text{m}$), que podem ter várias origens. ⁽³⁷⁾ A figura 16 apresenta exemplo de uma amostra onde as inclusões são observadas por este método.

Figura 16: Amostra de aço atacada com ácido nítrico (aumento 225x), apresentando inclusões de sulfeto de Manganês. ⁽³⁸⁾

[c] - Radiografia

A radiografia é uma técnica que tem sido usada para detectar óxido abaixo de 50µm de diâmetro em aços baixo carbono acalmado ao alumínio, na produção de “*drawn and wall ironed*” (DWI). Após ser laminada a frio, a tira é radiografada, onde se procuram detectar áreas contendo inclusões de cálcio aluminatos. ⁽¹⁹⁾

[d] - Ultrassom

É um método não destrutivo de detecção de inclusão, para inclusões maiores que 20µm em amostras de aço solidificado. Outro método também decorrente de ensaio de ultrassom é utilizado pela Mannesmann, denominado de MIDAS, onde as amostras são laminadas para eliminação ou redução dos vazios de contração, para em seguida serem escaneadas pelo ultrassom. ^(19,37)

[e] - “*Scanning Electron Microscopy*” - SEM

Este método, revela a morfologia tridimensional e a composição de cada inclusão. A composição é medida com “*Electron Probe Micro Analyzer*” (EPMA). ⁽³⁷⁾

[f] - “*Optical Emission Spectrometry with Pulse Discrimination Analysis*” - OES-PDA

O método OES-PDA analisa elementos dissolvidos em aço líquido. Ovako Steel melhorou essa técnica para medir o oxigênio total, micro-inclusão, tamanho, composição em 10min, depois de coletada a amostra. ⁽³⁷⁾

3.6.2 Métodos indiretos

Outras maneiras de se avaliar o nível de inclusão nos aços são os chamados métodos indiretos, ou seja, utilizando-se a medida de teores de elementos presentes na composição química do aço, é possível inferir que o nível de inclusões existente na matriz do aço está elevado ou não. Isso é feito para que se possa reduzir o tempo de resposta no processo produtivo, para atender aos requisitos de produção dos materiais. Custo e dificuldade na

amostragem são também considerados. Destacam-se as medidas de oxigênio total e o “*pick up*” de nitrogênio.⁽³⁷⁾

[a] - Medida do oxigênio total

O oxigênio total é a soma do oxigênio livre (oxigênio dissolvido) e do oxigênio combinado com inclusões não metálicas. O oxigênio livre, ou ativo, pode ser medido utilizando sensores. É controlado, principalmente, pelo equilíbrio termodinâmico com elementos desoxidantes, tais como o alumínio. As relações do teor de oxigênio total com a ocorrência de inclusões de aço são mostradas na figura 17.⁽³⁷⁾

[b] - “*Pick up*” de Nitrogênio

As diferenças entre o nitrogênio presente no aço líquido na panela e no distribuidor são um indicador da formação de inclusões no aço durante o seu processo de fabricação. Após total desoxidação sofrida pelo aço, é baixo o teor de oxigênio presente, o que habilita o aço à rápida absorção de ar. Portanto, o nitrogênio passa a ser um indicador da limpidez do aço. A figura 18 apresenta uma relação do nível de qualidade do aço com o aumento do “*pick up*” de nitrogênio.⁽³⁷⁾

Figura 17: Relação entre oxigênio total e a ocorrência de macro inclusão e esfoliamento da superfície da chapa.⁽³⁷⁾

Figura 18: Influência do “*pick up*” de nitrogênio na qualidade do aço. ⁽³⁷⁾

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Para alcançar os objetivos propostos, foram colhidas amostras de aço líquido produzido pela COSIPA, que utiliza aciaria do tipo LD, em distribuidor de uma máquina de lingotamento contínuo de placas. As rotas de fabricação estudadas seguem o fluxo da figura 1, apresentada anteriormente.

O estudo seguiu uma linha de trabalho conforme será apresentado adiante, iniciada pela coleta de amostras de três grupos de aço produzidos pela COSIPA. As amostras foram colhidas em distribuidor utilizado em lingotamento contínuo, sempre numa mesma posição, no caso, próximo à região do tampão (sistema que controla o fluxo de aço do distribuidor para o molde). Para que não houvesse interferência nos resultados obtidos no refino foram tomados alguns cuidados básicos que poderão ser observados adiante.

Uma vez coletada a amostra, uma questão estratégica para a condução do trabalho foi definir uma região da amostra para estudo das inclusões. A região escolhida representa o centro da amostra colhida, cuja a seção é de 160mm^2 .⁽³⁹⁾ Estas amostras foram adequadamente preparadas no laboratório central da COSIPA, nos setores de preparação de amostras e metalografia e de microscopia eletrônica.

4.1 Processo de Refino Primário – Conversores LD

As corridas foram obtidas a partir de ferro gusa (85%) mais carga sólida (15%) em aciaria do tipo LD. As características gerais desse equipamento são descritas abaixo.

- Capacidade: 170 t
- Vazão de oxigênio: $28.000\text{ Nm}^3/\text{h}$
- Tipo de revestimento refratário: Magnésia - Carbono
- Sistema de retenção escória: Empregado

4.2 Refino Secundário – Desgaseificação a Vácuo ou R.H.

Um certo número de corridas vazadas teve como rota de tratamento a desgaseificação. O processo definido para elas foi a descarburização, pois se trata, na verdade, de aços ultrabaixo carbono (U.B.C.). Algumas características do equipamento R.H. são listadas abaixo.

- Capacidade: 170 t
- Diâmetro do “*snorquel*”: 600 mm
- Diâmetro interno do vaso: 1900 mm
- Taxa de circulação: 140 t/min.
- Capacidade de sucção: 600 kg para 0,67 mbar
3000 kg para 67 mbar
- Taxa de injeção de O₂: 2000 Nm³/h

4.3 Processo de forno panela

A instalação onde as corridas foram produzidas tem as características básicas conforme o descrito abaixo:

- Número de eletrodos: 3
- Taxa de aquecimento: 10°C/min.
- Tempo de tratamento: 40 min.
- Dessulfuração: S<5ppm

4.4 Tratamento com injeção de gás argônio

No fluxo do processo produtivo dispõe-se das chamadas estações para borbulhamento de argônio, onde os aços mais comuns são preparados para a etapa seguinte da linha de produção. A instalação de tratamento de aço líquido aqui utilizada para a injeção de gás argônio tem as seguintes características:

- Vazão de argônio: 22 Nm³/ h.
- Sistema de injeção de argônio: Lança com poros na extremidade e “*Plug*” poroso no fundo da panela.
- Ajuste de algumas ligas: Ca-Si ; C; Al; B.

4.5 Lingotamento contínuo

Todas as corridas avaliadas foram lingotadas em uma máquina de lingotamento contínuo de placas do tipo vertical-curva (Voest Alpine – Áustria), com características de projeto, conforme descrito abaixo.

- Torre de panela: Giratória
- Número de veios: 2
- Distribuidor: 60 t
- Velocidade de lingotamento: 1,8 m/min.(máx)
0,8 m/min. (min.)
- Dimensões de placas: 210 x 750 a 1900 (mm)
260 x 1200 a 1900 (mm)

4.6 Aços estudados

Foram analisados 3 grupos de aços representativos de cada processo de refino atualmente instalado na planta. Na figura 19 é apresentada a participação relativa dos grupos de aço estudados, em relação aos demais aços produzidos pela COSIPA. Na sequência são apresentados, a composição química e o tratamento a que são submetidos os aços na linha de refino secundário, etapa final de preparação do aço líquido.

Participação dos grupos de aços estudados no total de aços produzidos pela COSIPA.

Figura 19: Gráfico da participação dos grupos de aço estudado, em relação aos vários grupos de aços produzidos pela COSIPA. O grupo I refere-se aos aços Baixo carbono, o grupo II aos aços peritéticos e o grupo III aos aços Ultra-Baixo carbono.

4.6.1 Aços baixo carbono acalmados ao alumínio (B.C) – Grupo I

São os aços cujo carbono situa-se no intervalo $0,02 \leq \%C \leq 0,08$. A rota de refino usualmente aplicada para esse grupo é a injeção de argônio na panela para homogeneização de composição química e temperatura. Normalmente, é feito algum ajuste fino na composição química, como, por exemplo, a correção de alumínio. Usualmente estes aços são aplicados em estampagem profunda, estrutura em geral, além de eletrodomésticos e embalagens.

No total foram avaliadas 10 amostras, o que corresponde a 10 corridas tratadas através desse processo. A tabela 6 apresenta a composição química do aço pertencente a esse grupo.

Tabela 6: Composição química dos aços do grupo I (Baixo carbono).

TIPO DE AÇO	COMPOSIÇÃO QUÍMICA TÍPICA DO AÇO (%)						
	C	Mn	P _{máx.}	Si	S _{máx.}	Al	N
B.C.	0,045	0,27	0,018	0,01	0,012	0,055	0,0005

4.6.2 Aços peritéticos acalmados ao alumínio e silício (P) – Grupo II

São os aços cujo carbono situa-se no intervalo $0,09 \leq \%C \leq 0,15$. Uma parcela desse grupo de aço é tratada via forno panela, onde é dessulfurada e recebe a injeção de Ca-Si (cálcio silício). Usualmente são aços aplicados em estrutura em geral, estampagem média, botijões e tambores.

No total foram avaliadas 10 amostras, o que corresponde a 10 corridas tratadas através desse processo. A tabela 7 apresenta a composição química do aço pertencente a esse grupo.

Tabela 7: Composição química dos aços do grupo II (Aço peritético).

TIPO DE AÇO	COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO AÇO (%)									
	C	Mn	P _{máx.}	Si	S	Al	Ti	Nb	Ca _{máx.}	N
P	0,14	1,3	0,02	0,27	< 0,008	0,026	0,014	0,025	0,006	0,005

4.6.3 - Aços ultra-baixo carbono acalmado ao alumínio (U.B.C.) – Grupo III

São os aços cujo carbono é menor que 35ppm. A rota para atender à essa especificação de carbono é a estação de degaseificação ou R.H. Usualmente são aços aplicados em estampagem extra-profunda, embalagens e eletrodomésticos em geral.

No total foram avaliadas 10 amostras, o que corresponde a 10 corridas tratadas através desse processo. A tabela 8 apresenta a composição química do aço pertencente a esse grupo

Tabela 8: Composição química dos aços do grupo III (Aço ultra baixo carbono).

TIPO AÇO	COMPOSIÇÃO QUÍMICA TÍPICA DO AÇO (%)							
	C	Mn	P	Si	S _{máx.}	Al	Ti	N
U.B.C	0,0035	0,15	0,013	0,01	0,013	0,050	0,075	0,0035

4.7 Retirada das amostras

As amostras para análise e verificação das inclusões foram retiradas do distribuidor (figura 20), junto à região do tampão, considerada mais próxima da saída do aço líquido para o molde antes de iniciar o processo de solidificação, e que permitiu fácil acesso e manuseio do dispositivo de amostragem.

Figura 20: Indicação do local e o momento da retirada da amostra.

A amostra foi retirada submergindo o cartucho (figura 21) no aço líquido existente dentro do distribuidor. Por meio da ação da pressão ferrostática, o aço líquido preencheu a coquilha (figura 22) dando o formato de um “pirulito”. Foi utilizado um tubo metálico para fixar o cartucho, o que permitiu sua penetração no aço líquido. Vale destacar também que os amostradores não contém nenhuma espécie de desoxidante, afim de tornar as inclusões analisadas representativas do processo de refino.

Figura 21: Imagem à esquerda indica o dispositivo utilizado para a retirada da amostra no distribuidor, e a imagem à direita, um exemplo da amostra colhida.

Figura 22: Representação da disposição da coquilha no interior do cartucho. ⁽⁴⁰⁾

4.7.1 Regras para retirada das amostras

Alguns cuidados na coleta das amostras foram tomados, a fim de que não houvesse interferência nos resultados que conduzissem a um erro no mapeamento das inclusões. São eles:

- [a] – Não foram amostradas corridas em que fossem notados problemas no sistema de barragens e diques do distribuidor. Em determinadas situações, pode ocorrer quebra desse componente, comprometendo, assim, a limpidez do aço.
- [b] – Não foram amostradas corridas em que, em algum momento do lingotamento, não tivesse sido utilizada válvula longa.
- [c] – A amostra retirada representava sempre o meio da corrida, ou seja, a amostra somente era retirada quando metade do aço líquido da panela havia sido vazado para o interior do distribuidor.
- [d] – A amostra sempre foi retirada próximo ao tampão (dispositivo que controla o fluxo de aço líquido do distribuidor para o molde).
- [e] – Quando a máquina, por alguma razão, lingotava com um veio, a amostra era retirada no veio que se estava lingotando.

4.8 Preparação da amostra

A superfície a ser estudada foi definida conforme figura 23. Inicialmente, uma seção de 12x10x16mm, foi retirada do centro do prirulito. Em seguida a espessura da amostra (12mm), foi dividida ao meio, obtendo uma amostra de 6x10x16mm. À superfície corresponde ao centro da espessura da amostra foi estudada.

Figura 23: Representação da posição de retirada da amostra.

4.9 Metalografia e preparação das amostras

A metalografia é parte importante na elaboração deste trabalho. A experiência vivida mostrou que cuidados durante toda essa etapa devem ser tomados para que não ocorram imprecisões no trabalho de análise. Lixamento mal feito e pano de polimento sujo ou contaminado podem levar a imprecisões na avaliação.

4.9.1 Corte e desbaste das amostras

Nessa etapa, uma preocupação inicial foi seguir as normas de segurança para corte de amostra, uma vez que qualquer partícula que se desprendesse da máquina durante a operação poderia causar ferimentos. As amostras foram cortadas utilizando disco de corte de carbeto de silício refrigerado com água, conforme figura 24. O cabo da amostra foi seccionado para análise de oxigênio e nitrogênio.

A máquina utilizada para corte é fabricado pela AROTEC. Alguns dados a respeito desse equipamento são listados abaixo a fim de caracterizá-lo.

- Rotação de corte: 3400 rpm máx
- Rotação usada: 3200 rpm
- Disco corte: carbeto de silício
- Refrigeração de corte: água

Figura 24: Fotografia da máquina de corte utilizada para seccionar as amostras.

Para a etapa seguinte do processo de preparação da amostra foram utilizados esmeril e lixadeira de cinta para que, mantidas bordas chanfradas e aparadas, não houvesse perda de lixa e pano de polimento. A figura 25 apresenta o equipamento utilizado.

Figura 25: Mesa com esmeril e lixadeira de cinta, utilizada na preparação da amostra.

4.9.2 Embutimento

Foi necessário trabalhar com amostra embutida, por se tratar de amostra de pequeno tamanho (10 x 16mm). Essa condição facilita o trabalho de observação ao microscópio, pois se consegue imagem com foco mais estável. A máquina utilizada para embutimento pode ser observada abaixo, na figura 26.

O embutimento das amostras foi realizado a quente, utilizando dois tipos de resina, uma vez que, além da análise via microscópio óptico, as amostras também passariam pela microscopia eletrônica. As resinas empregadas foram o baquelite e condufast (Condutor elétrico), cujas especificações são conforme tabela 9. A máquina utilizada para embutimento, bem como suas características, são apresentadas na figura 26.

- Temperatura embutimento: 150°C
- Pressão embutimento: 20 MPa
- Tempo: 10 min
- Refrigeração amostra: água
- Tempo de refrigeração: 4 min.

Figura 26: Máquina utilizada para embutimento das amostras seccionadas.

Tabela 9: Componentes presentes nas resinas utilizadas no embutimento.

TIPO DE RESINA	COMPONENTES BÁSICOS
Baquelite	Resina fenólica, hexamina, seragem de Madeira, estearato de zinco, carbonato de Cálcio, negro de fumo
Condufast	À base de pó de ferro

4.9.3 Lixamento

Após embutimento, as amostras estão em condições de serem lixadas. Passam inicialmente por uma lixa de 80 “*mesh*”, onde sofrem um desbaste inicial com o objetivo de normalizar toda a sua superfície. O material da lixa é de carbetto de silício e, nas etapas que se seguem ao final desse processo, o tamanho dos grânulos da lixa vai diminuindo na seguinte seqüência: 120, 220, 400, 600, 800 e 1200 “*mesh*”, em lixadeiras rotativas, conforme indicadas abaixo na figura 27. Essa seqüência, mais a inversão da posição da amostra na lixa, faz com que os riscos deixados pela lixa anterior sejam removidos.

Durante o lixamento, deve-se fazer uma irrigação abundante de água para que os restos de lixamento (partículas abrasivas que se soltam do papel e partículas do material lixado) sejam levados pela água, impedindo impregnações e permitindo um lixamento com o máximo de rendimento.

Cada vez que se muda para uma lixa de menor granulação, deve-se dar um giro de 90° na amostra em relação aos riscos deixados pela lixa anterior; deve-se, também, lavar a amostra com água abundante para impedir impregnações de abrasivos maiores do que o normal da lixa posterior. Após a seqüência de lixamento, é importante lavar a amostra com detergente neutro e álcool, secando posteriormente, para começar o polimento.

- Marca: Supermet
- Rotação de trabalho: 150 a 300 rpm.
- Alimentação de água continua durante o lixamento

Figura 27: Indicação da lixadeira rotativa utilizada para preparação da superfície da amostra para observação das inclusões.

4.9.4 Polimento

Foi realizado em quatro etapas. Da primeira até a terceira, utilizou uma pasta à base de diamante, com tamanho de partícula que variou entre 6 e $\frac{1}{4}$ de micron. A última etapa do processo de polimento utilizou pasta de diamante com 0,3 micron. O equipamento utilizado para polimento foi uma máquina Struers, conforme pode ser observado na figura 28.

- Máquina: Struers modelo DP 9 A e DP 10
- Rotação: 300 e 600 RPM
- Panos: Struers 3 e 6 microns
- Panos de feltro felpudo 0,3 e 0,06 microns

Figura 28: Indicação da máquina utilizada no polimento das amostras.

4.9.5 Ataque

Para a observação das inclusões sobre a superfície do aço, nenhum ataque químico é realizado. A exceção se faz em alguns casos quando se observam muitas impurezas na superfície da amostra. Nesse caso, empregou-se a técnica de limpeza da superfície, dando um leve ataque químico, conforme segue: um ataque com solução de nital a 4% por 30 segundos, lavando a superfície, e, em seguida, polindo com panos de 0,06 micron. Repetia-se essa etapa por 3 vezes a fim de se ter garantia na operação de limpeza.

4.10 Observação ao microscópio

A análise metalográfica para estudo de inclusões é utilizada para determinação da quantidade, forma, tipo e distribuição do tamanho de inclusões. Este método não fornece porém informações sobre a composição química da inclusão.

As amostras, depois de preparadas, foram observadas em microscópio óptico (conforme figura 29). O registro dos defeitos de cada amostra foi feito utilizando uma impressora ligada a uma câmera conectada ao microscópio. O aumento definido foi o de 500x, por se tratarem de defeitos pequenos. O tamanho do defeito foi medido por uma escala, posicionada na ocular do aparelho. As inclusões contabilizadas para efeito de resultado, foram as que tiveram tamanho maior que 5 μ m.

Características:

- Marca: Axioplan
- Aumentos: 50, 100, 200, 500 e 1000x
- Periféricos: Printer + televisão para visualização de imagem

Figura 29: Microscópio óptico utilizado para análise das inclusões nas amostras de aço.

4.11 Análise qualitativa em microsonda

O sistema de microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi utilizado como suporte para caracterização das inclusões. As amostras, antes de serem encaminhadas ao microscópio óptico para contagem das inclusões, passavam pelo MEV representado na figura 30 para qualificar os elementos existentes em cada composto observado.

A microanálise eletrônica é baseada na medida de raios-X característicos, emitidos de uma região microscópica da amostra bombardeada por um feixe de elétrons. As linhas de raios-X característicos são específicas do número atômico da amostra e os seus comprimentos de onda (ou sua energia) podem identificar o elemento que está emitindo a radiação.⁽⁴¹⁾ A grande vantagem da utilização da microsonda eletrônica em comparação à análise química convencional é a possibilidade de análise localizada de pequenas regiões, sem necessidade de separação física das fases de interesse.⁽⁴²⁾

Características:

- Marca: JEOL
- Capacidade de aumento: 300.000x
- Elementos analisados: de Boro a Urânio

Figura 30: Microsonda utilizada para análise qualitativa das inclusões observadas em microscópio.

4.12 Análise de oxigênio, nitrogênio e elementos químicos presentes no aço.

Complementando às informações levantadas para cada corrida estudada, foi medido o teor de nitrogênio e oxigênio, utilizando-se para isso o cabinho da amostra de “pirulito” retirada de cada corrida, conforme figura 31. A análise dos teores de nitrogênio e oxigênio foram realizadas no equipamento denominado Leco TC 600, cujas principais características são listadas na figura 32.

Figura 31: Representação esquemática das posições onde foram retirados as amostras para análise de oxigênio e de nitrogênio, na amostra colhida.

Limites do equipamento:

Oxigênio: 0,05ppm até 5,0%

Nitrogênio: 0,05ppm até 3,0%

Precisão:

Oxigênio: 0,025 ppm

Nitrogênio: 0,025 ppm

Figura 32: Leco TC 600 - analisador de oxigênio e nitrogênio.

É cortado do cabinho da amostra, 1g de material que é fundido em cadinho de carbono. Após a fusão, o oxigênio presente na amostra irá combinar-se com o carbono do cadinho e o valor será medido por absorção infravermelha. O nitrogênio é liberado pelo aquecimento e o valor medido por condutividade térmica. ⁽⁴³⁾

Os constituintes químicos presentes nos aços estudados, foram obtidos de amostra também do tipo “pirulito”, colhidas no molde conforme padrão existente na COSIPA. As análises das amostras são feitas por espectrometria de emissão óptica, que é um método instrumental de análise por comparação, onde uma amostra é colocada sobre uma pequena mesa situada dentro do equipamento, e um eletrodo ligado a um gerador de energia produz faíscas sobre a superfície da amostra. Átomos ionizados são extraídos, emitindo luzes características para serem analisados. O instrumento converte a luz emitida pela descarga elétrica em corrente elétrica e integra a intensidade dentro de um temporizador durante um tempo estabelecido (tempo de integração). Um “*software*” capta o valor de integração, e calcula a concentração dos elementos.⁽⁴⁴⁾ A figura 33 apresenta o equipamento onde foi analisado a composição química das amostras.

Figura 33: Espectrômetro de emissão óptica, para análise da composição química dos elementos presentes no aço.⁽⁴⁴⁾

4.13 Norma utilizada

Para coleta dos dados observados nas amostras retiradas no distribuidor, foi adotada norma que define a prática de determinação de inclusão em aço.⁽³⁹⁾ Vale destacar que esse padrão é utilizado para caracterizar inclusões em produto acabado, ou seja, após conformação. Sendo assim, a norma não foi utilizada em sua abrangência, pois, no presente

estudo, tratam-se de amostras coletadas a partir de aço líquido que apresentam uma estrutura bruta de fusão. Aspectos mais importantes da norma são destacados na tabela 10.

Tabela 10: Procedimentos adotados diferentes da norma ASTM E 45 – 97.

Item da norma	O que a norma recomenda	O que foi adotado
11.1.1	<ul style="list-style-type: none"> • Resolução 100x • Inspeção em área de 160mm². 	<ul style="list-style-type: none"> • Foi adotada resolução de 500x, uma vez que a grande maioria das inclusões presentes na amostra era menor que 50µm. • A área da amostra foi totalmente inspecionada.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

São apresentados no capítulo que segue, os resultados obtidos nos diversos grupos de aço propostos no capítulo 4.

5.1 – Resultados apresentados pelo grupo I – Baixo carbono, acalmado ao alumínio.

Tabela 11: Dados sobre o tratamento das corridas na estação de borbulhamento com argônio.

Amostra	Pos. Seq.	Pos. Corrida Distrib.	Borbulhamento		Injeção Argônio		Aquecimento Corrida			Adições ligas				Temp. °C
			Vazão Argônio Nm ³ /h	Tempo Total min	PLUG	LANÇA	Tempo Total min	Vazão Oxigênio Nm ³ /h	Volume Gás Nm ³	Al Kg	Sucata Kg	C Kg	FeMnAC Kg	
1	4 ^a	4 ^a	18	23	X	....	....	....	....	58	2000	....		1578
2	6 ^a	6 ^a	18	13	X	....	....	....	....	96	....	110		1574
3	12 ^a	11 ^a	99	6	X	....	....	....	....	120	....	....	....	....
4	13 ^a	13 ^a	55	4	X	....	....	....	....	61	305	....	....	....
5	31 ^a	13 ^a	20	27	X	....	....	....	....	270	500	....	....	1585
6	34 ^a	16 ^a	20	12	X	....	....	....	....	144	....	....	....	1583
7	35 ^a	17 ^a	15	24	X	....	4	3894	318	133	403	....	203	....
8	38 ^a	20 ^a	20	18	X	....	....	....	....	163	1200	....	....	1580
9	39 ^a	16 ^a	20	15	X	....	....	....	....	96	....	....	....	1578
10	41 ^a	16 ^a	20	10	X	....	....	....	....	135	....	....	....	1574

Informações sobre a tabela:

Pos. Seq. = Representa a posição da corrida, em uma sequência ininterrupta de corridas lingotadas na máquina de lingotamento contínuo.

Pos. corrida Distrib. = Representa a posição da corrida, entre uma série de corridas lingotadas no distribuidor que está sendo utilizado.

Temp. = Temperatura da corrida após o final de tratamento no refino secundário

FeMnAC = Ferro Manganês Alto Carbono.

O processo de fabricação dos aços baixo carbono em aciaria, inicia-se com a preparação da carga que irá formar uma corrida específica de aço. A carga líquida, que é ferro gusa proveniente do alto forno, é pesada em panela, e após a realização da limpeza da escória que sobrenada o banho irá, então, aguardar o momento de ser introduzida dentro do conversor. A carga sólida, constituída pelos mais variados tipos de sucata originada das linhas de produção da indústria siderúrgica, é adequadamente posicionada em uma calha que, graças a seu formato, permite a colocação da sucata no interior do conversor.

Respectivamente, as cargas sólida e líquida, são colocadas no interior do conversor. Misturadas, receberão a injeção de oxigênio e escorificantes, que desencadearão reações que farão reduzir os teores dos elementos presentes no aço. Decorrido certo tempo, a injeção é então suspensa e toda massa líquida, agora homogênea, é vazada no interior da panela. Durante o processo de vazamento, o aço líquido recebe à adição de ferro-ligas que irão conferir ajustes finais à composição química do aço.

Inicialmente, são apresentados os dados das corridas durante preparação, no refino secundário. Cada amostra representa uma corrida e são listadas as principais informações de processo, obtidas durante sua elaboração. Alguns destaques da tabela 11 são relacionados conforme segue:

- Todas as corridas analisadas nesse grupo tiveram o argônio injetado pela base da panela, utilizando um “*plug*” poroso. A vazão média de gás argônio injetado foi $30,5 \pm 25,3 \text{ Nm}^3/\text{h}$.
- Tempo total de injeção de gás argônio para homogeneizar o aço líquido na panela, foi de $15,2 \pm 7,2 \text{ min}$. Desvio alto em relação à média se dá por razões ligadas ao sincronismo entre a área de refino secundário a máquina de lingotamento contínuo. Houve corridas que apresentaram alto tempo de injeção de argônio, como é o caso das corridas referentes às amostras 1 (23min), 5 (27min) e 7 (24min).
- A amostra 7 teve 4 min de aquecimento por aluminotermia, devido à introdução de 200Kg de FeMnAC.

A aluminotermia, é um processo de aquecimento químico que utiliza o calor de reação do alumínio com o oxigênio, para conseguir recuperar a temperatura de corridas que tiveram perdas acentuadas no processo de fabricação.

- Adição de alumínio durante o tratamento foi de $127,6 \pm 60,8 \text{ kg}$ - na amostra 1 foi adicionado a menor quantidade (58 kg). E na amostra 5 (270 kg) a maior quantidade.

- Adição de sucata é realizada pelo topo da panela, junto ao “olho” formado pela injeção do gás argônio. Funciona como “refrigerante” que, ao ser adicionada ao aço líquido, tem a finalidade de baixar a temperatura da corrida. As amostras 1, 4, 5, 7 e 8 tiveram adição de sucata, $881,6 \pm 717,5$ kg. Sendo que as demais corridas não tiveram nenhuma adição.

Os resultados do tamanho, quantidade e tipo de inclusão, individualmente por amostra, podem ser observados nas figuras de 39 a 48. Cada figura é identificada com um número da amostra situado no cabeçalho da tabela, posição na série de lingotamento, número total de inclusões em 160mm^2 e tamanho médio das inclusões. O tamanho médio representa a média ponderada calculada da expressão (28), ⁽⁴⁵⁾ com os dados indicados no gráfico que segue:

$$X_p = \frac{\sum_{i=1}^n (p_i * x_i)}{\sum_{i=1}^n p_i} \quad (28)$$

Onde :

X_p : Média ponderada.

p_i : Tamanho da inclusão.

x_i : Número de inclusões encontradas para um determinado tamanho de inclusão.

O gráfico da figura 34 apresenta o tamanho médio obtido por amostra. X_M representa a média aritmética dos tamanhos das inclusões observadas nas amostras e s é o desvio padrão.

O maior valor de tamanho foi observado nas amostras 4 e 6. Estas amostras, foram as que apresentaram menor tempo de injeção de argônio para homogeneização e flotação das inclusões que são procedimentos adotados para melhorar limpidez do aço. ⁽¹²⁾

A amostra 4 apresentou uma inclusão de $240\mu\text{m}$ de alumina, conforme pode ser observado na tabela 11, com baixo tempo de injeção de argônio na panela. Já a amostra 6 apresentou uma inclusão de $86\mu\text{m}$ de aluminato de cálcio, o que elevou o seu tamanho médio.

O menor tamanho de inclusão foi observado na amostra 5. O que destaca essa corrida das demais é o fato do tempo de borbulhamento de argônio ter sido um dos maiores: 27min, conforme discriminado na tabela 11.

Na figura 35 onde são apresentados os resultados das quantidades de inclusões por amostra, observa-se que a amostra 4 apresentou baixa quantidade de inclusões (12), a menor

entre todos os resultados apresentado pelo grupo, e que o comportamento da amostra 6, ao contrário se manteve dentro da média apresentada pelo grupo, que foi de $16,6 \pm 2,2$ inclusões, o que de certa forma contradiz MILLMAN, S..⁽¹²⁾

5.1.1 – Resultado do tamanho e quantidade de inclusão por amostra.

Figura 34: Gráfico apresentando o tamanho médio das inclusões (μm) dos aços do grupo I - Baixo carbono – Acalmado ao alumínio.

Figura 35: Gráfico apresentando a quantidade de inclusão apresentada pelo grupo I (Baixo carbono).

5.1.2 – Posição da corrida na sequência de lingotamento.

A figura 36, apresenta uma correlação entre a posição da corrida na sequência e o número de inclusões (a) e tamanho da inclusão (b). É possível notar que não houve nenhuma relação no comportamento das inclusões em função da sequência de máquina.

Figura 36: Gráfico (a), apresenta a quantidade de inclusão com a posição da sequência de lingotamento, e o gráfico (b), o tamanho da inclusão com a posição na sequência.

5.1.3 - Adição de alumínio na corrida durante o tratamento no refino.

A adição de alumínio nas corridas, é outro aspecto importante de se destacar. Foram adicionados em média $127,6 \pm 60,8$ kg de alumínio por corrida. Este fato porém não teve influência no aumento do tamanho e quantidade de inclusões, conforme pode ser observado na figura 35.

Na amostra 5, a quantidade adicionada foi maior do que a média (270 kg), esse fato não representou aumento no tamanho da inclusão, ao contrário, foi a amostra que apresentou menor tamanho. Na tabela 11 é possível observar que esta corrida apresentou maior tempo de borbulhamento. Ainda com relação a amostra 5, a quantidade de inclusão (conforme figura 35) manteve-se próximo à média alcançada pelo grupo $16,6 \pm 2,1$ inclusões por amostra.

Figura 37: Influência da quantidade de alumínio adicionada na corrida relacionado ao número de inclusão na corrida.

5.1.4 – Tamanho médio das inclusões.

O tamanho médio das inclusões apresentado pelo aço do grupo I (Baixo carbono – acalmado ao alumínio) na figura 34 foi de $12,6 \pm 2,6$ mm. É interessante observar que as amostras 4 e 6 apresentaram inclusões com tamanhos superiores ao valor médio. Na tabela 11 observa-se que estas corridas foram as que apresentaram menor tempo de borbulhamento de argônio, durante o seu tratamento, não permitindo assim que as inclusões fossem adequadamente flotadas.

Ao contrário, a amostra 5, foi a que apresentou durante o processo de refino, o maior tempo de borbulhamento de argônio e foi a que apresentou inclusões com tamanho menor do que o valor médio, mostrado pelo grupo I.

5.1.5 - Quantidade de inclusões.

A figura 35 apresenta a quantidade de inclusão no grupo I. Observa-se que o valor médio alcançado pelo grupo foi de 0,10 inclusões/mm² de amostra. Nesse ponto em específico, PIRES, J.C.S. e GARCIA, A.⁽¹⁾ apresentam resultado que mostra o número de inclusões obtidas no distribuidor em aços acalmados ao alumínio SAE 1010 tratado em forno panela. Os resultados encontrados foram de 0,16 inclusões/mm² de área de amostra. Há que se considerar aqui, possíveis diferenças entre sistemáticas adotadas para avaliar as quantidades de inclusões na amostra, mas é possível observar a proximidade entre os resultados.

Uma relação entre tamanho e quantidade de inclusão é tirada das amostras do grupo I e apresentada na figura 38.

Figura 38: Relação entre tamanho e quantidade de inclusão.

5.1.6 – Composição das inclusões observados nas amostras do grupo I (Aço baixo carbono, acalmado ao alumínio).

A tabela 12 a seguir, apresenta a composição das inclusões observadas nas amostras do grupo I. Verifica-se que a grande maioria das inclusões observadas teve em sua composição a presença de alumina (7 amostras). MILLMAN, S.,⁽¹²⁾ destaca que é a reação (22), uma das principais em aços acalmados ao alumínio.

As amostras 6 e 8, apresentaram inclusões de aluminato de cálcio. Porém uma investigação mais aprofundada na série lingotada pelo distribuidor, revelou que os aços lingotados anteriormente, eram da mesma composição química do grupo I. Muito provavelmente tratam-se de inclusões exógenas.⁽¹⁷⁾ A mesma consideração é feita para amostra 9, que apresentou inclusões contendo MgO em sua composição.

5.1.7 – Morfologia das inclusões abservadas na amostras.

As inclusões de alumina (ver tabela 12), apresentaram-se nas mais variadas formas tais como arredondadas, multi-facetadas e também agrupadas na forma de “*clusters*”. Algumas das inclusões observadas nas amostras estão representadas nas figuras de 39 a 48.

As inclusões com a presença de cálcio, apresentaram a forma mais arredondada. A alumina, pode apresentar-se pura e arredondada, ou combinada com o cálcio (tabela 5.10).⁽²⁶⁾

5.1.8 – Composição química das corridas estudadas.

Um aspecto relevante, que deve ser considerado para avaliação dos resultados do grupo I, é o fato de que todas as corridas estudadas, foram aprovadas conforme composição química especificada no capítulo referente a materiais e métodos.

5.1.9 – Teor de oxigênio e nitrogênio.

Com parte das amostras colhidas para avaliação das inclusões, foram analisados o teores de oxigênio e nitrogênio do aço do grupo I. O teor médio de oxigênio no final de cada corrida foi em média $164,6 \pm 69,6$ ppm, enquanto o de nitrogênio foi de $46,6 \pm 14,6$ ppm. A relação dessas duas impurezas, com tamanho e número de inclusão são mostradas na figuras 39 (a) e (b) respectivamente.

Figura 39: Teor de oxigênio (a) e nitrogênio (b) nos aços do grupo I, associados ao tamanho e quantidade de inclusão.

Um balanço das inclusões observadas nas figuras de 40 a 49 é apresentado na tabela 12. Verifica-se que 70 % das amostras apresentaram somente inclusão de alumina em sua composição. Foi também verificada a presença de inclusão exógena na amostra 9, além da já citada inclusão de aluminato de cálcio em 2 amostras, 6 e 8.

Tabela 12: Balanço das inclusões apresentadas no grupo I, decorrente das figuras 40 a 49.

AMOSTRA	INCLUSÃO OBSERVADA	MORFOLOGIA
1	Al ₂ O ₃ em 100% da amostra	Arredondadas
2	Al ₂ O ₃ em 100% da amostra	Agrupadas , algumas facetadas e agregadas
3	Al ₂ O ₃ em 100% da amostra	Agrupadas com “ <i>clusters</i> ”.
4	Al ₂ O ₃ em 100% da amostra	Multi Facetada.
5	Al ₂ O ₃ em 100% da amostra	Arredondada
6	<ul style="list-style-type: none"> ○ Al₂O₃.CaO - (a) ○ Al₂O₃ - (b) 	Aluminato de Cálcio – Arredondada Alumina - Facetada
7	Al ₂ O ₃ em 100% da amostra	Agrupadas com “ <i>clusters</i> ”.
8	<ul style="list-style-type: none"> ○ Al₂O₃. CaO - (a) ○ Al₂O₃ - (b) 	Aluminato de Cálcio – Arredondada Alumina - Facetada
9	<ul style="list-style-type: none"> ○ Al₂O₃ . CaO . MgO (a) ○ Al₂O₃ (b) 	Multi facetada Arredondada
10	Al ₂ O ₃ em 100% da amostra	Multi Facetada

As letras entre parêntesis, indicadas nas amostra 6, 8 e 9 representam as fotos apresentada nas figuras 45, 47 e 48 respectivamente.

Amostra	Posição na Seq.	Total de inclusões em 160 mm ²	Tamanho médio das inclusões (μm)	Morfologia
1	4 ^a	19	13,9	Arredondadas

Resultado	Composição Química final da corrida (%)							
	C	Mn	P	S	Si	Al _{Total}	N	O _{Total}
Obtido	0,04	0,24	0,011	0,004	0,010	0,048	0,0051	0,0191
Objetivado	0,05	0,27	0,020	0,010	0,00	0,060	0,0050	....

Figura 40: Resultado da amostra 1 do grupo I: número de inclusões, distribuição de tamanhos, microanálise e composição química.

Amostra	Posição na Seq.	Total de inclusões em 160 mm ²	Tamanho médio das inclusões (μm)	Morfologia
2	6 ^a	24	14,1	Agrupadas/ Facetadas

Resultado da microanálise da figura (a).

Resultado	Composição Química final da corrida (%)							
	C	Mn	P	S	Si	Al _{Total}	N	O _{Total}
Obtido	0,03	0,18	0,013	0,005	0,004	0,062	0,0063	0,0311
Objetivado	0,05	0,27	0,020	0,010	0,00	0,060	0,0050	....

Figura 41: Resultado da amostra 2 do grupo I: : número de inclusões, distribuição de tamanhos, microanálise e composição química.

Amostra	Posição na Seq.	Total de inclusões em 160 mm ²	Tamanho médio das inclusões (μm)	Morfologia
3	12 ^a	21	10,4	"Clusters"

Resultado	Composição Química final da corrida (%)							
	C	Mn	P	S	Si	Al _{Total}	N	O _{Total}
Obtido	0,06	0,39	0,015	0,006	0,008	0,052	0,0052	0,0118
Objetivado	0,05	0,27	0,020	0,010	0,00	0,060	0,0050	....

Figura 42: Resultado da amostra 3 do grupo I : número de inclusões, distribuição de tamanhos, microanálise e composição química.

Amostra	Posição na Seq.	Total de inclusões em 160 mm ²	Tamanho médio das inclusões (μm)	Morfologia
4	13 ^a	22	16,5	Multi-Facetada

Resultado da microanálise da figura (a).

Resultado	Composição Química final da corrida (%)							
	C	Mn	P	S	Si	Al _{Total}	N	O _{Total}
Obtido	0,05	0,37	0,015	0,007	0,002	0,043	0,0069	0,0183
Objetivado	0,05	0,27	0,020	0,010	0,00	0,060	0,0050	....

Figura 43: Resultado da amostra 4 do grupo I: número de inclusões, distribuição de tamanhos, microanálise e composição química.

Amostra	Posição na Seq.	Total de inclusões em 160 mm ²	Tamanho médio das inclusões (μm)	Morfologia
5	31 ^a	15	9,1	Arredondada

Resultado da microanálise da figura (a).

Resultado	Composição Química final da corrida (%)							
	C	Mn	P	S	Si	Al _{Total}	N	O _{Total}
Obtido	0,04	0,27	0,017	0,007	0,006	0,056	0,0053	0,0109
Objetivado	0,05	0,27	0,020	0,010	0,00	0,060	0,0050	....

Figura 44: Resultado da amostra 5 do grupo I : número de inclusões, distribuição de tamanhos, microanálise e composição química.

Amostra	Posição na Seq.	Total de inclusões em 160 mm ²	Tamanho médio das inclusões (μm)	Morfologia
6	34 ^a	17	16,7	Arredondada/Facetada

Resultado da microanálise da figura (a).

Resultado da microanálise da figura (b).

Resultado	Composição Química final da corrida (%)							
	C	Mn	P	S	Si	Al _{Total}	N	O _{Total}
Obtido	0,04	0,28	0,014	0,008	0,0044	0,050	0,0037	0,0111
Objetivado	0,05	0,27	0,020	0,010	0,00	0,060	0,0050	....

Figura 45: Resultado da amostra 6 do grupo I : número de inclusões, distribuição de tamanhos, microanálise e composição química.

Amostra	Posição na Seq.	Total de inclusões em 160 mm ²	Tamanho médio das inclusões (μm)	Morfologia
7	35 ^a	23	11,2	"Clusters"

Resultado da microanálise da figura (a).

Resultado	Composição Química final da corrida (%)							
	C	Mn	P	S	Si	Al _{Total}	N	O _{Total}
Obtido	0,05	0,31	0,017	0,009	0,007	0,050	0,0041	0,0107
Objetivado	0,05	0,27	0,020	0,010	0,00	0,060	0,0050	....

Figura 46: Resultado da amostra 7 do grupo I : número de inclusões, distribuição de tamanhos, microanálise e composição química.

Amostra	Posição na Seq.	Total de inclusões em 160 mm ²	Tamanho médio das inclusões (μm)	Morfologia
8	38 ^a	16	11,9	Arredondada/Facetadas

Resultado da microanálise da figura (a).

Resultado da microanálise da figura (b).

Resultado	Composição Química final da corrida (%)							
	C	Mn	P	S	Si	Al _{Total}	N	O _{Total}
Obtido	0,04	0,28	0,016	0,009	0,0034	0,049	0,0031	0,0248
Objetivado	0,05	0,27	0,020	0,010	0,00	0,060	0,0050	....

Figura 47: Resultado da amostra 8 do grupo I : número de inclusões, distribuição de tamanhos, microanálise e composição química.

Amostra	Posição na Seq.	Total de inclusões em 160 mm ²	Tamanho médio das inclusões (µm)	Morfologia
9	39 ^a	20	11,0	Facetada/Arredondada

Resultado	Composição Química final da corrida (%)							
	C	Mn	P	S	Si	Al _{Total}	N	O _{Total}
Objetivado	0,05	0,27	0,020	0,010	0,00	0,060	0,0050	....

Figura 48: Resultado da amostra 9 do grupo I : número de inclusões, distribuição de tamanhos, microanálise e composição química.

Amostra	Posição na Seq.	Total de inclusões em 160 mm ²	Tamanho médio das inclusões (μm)	Morfologia
10	41 ^a	17	10,7	Multi-Facetadas

Resultado	Composição Química final da corrida (%)							
	C	Mn	P	S	Si	Al _{Total}	N	O _{Total}
Obtido	0,04	0,28	0,011	0,003	0,003	0,049	0,0033	0,0155
Objetivado	0,05	0,27	0,020	0,010	0,00	0,060	0,0050	....

Figura 49: Resultado da amostra 10 do grupo I : número de inclusões, distribuição de tamanhos, microanálise e composição química.

5.2 – Resultado apresentado pelo grupo II – Aços peritéticos acalmados ao alumínio e silício.

Tabela 13: Informações sobre o tratamento das corridas do grupo II (aços peritéticos) no forno panela.

Amostra	Pos. Seq.	Borbulhamento (Ar)			Sistema de injeção		Aquecimento Corrida min.	Adições ligas							Temp. °C
		Vazão Argônio NI/min	Volume Gás NI	Tempo Total min	"PLUG"	LANÇA		Al Kg	CaSi Kg	C Kg	FeMn Kg	Fe-Si Kg	Cal Kg	Nefelina Kg	
1	1ª	500		43	X	.....	20	20	550	.....	.....	.....	500	50	1585
2	2ª	500		31	X	.....	13	30	600	.....	.....	50	500	150	1577
3	3ª	450		27	X	.....	7	15	500	.....	210	.....	300	150	1570
4	1ª	550		45	X	.....	18	30	650	.....	100	.....	500	100	1575
5	2ª	450		34	X	.....	15	25	700	.....	.....	.....	500	50	1566
6	1ª	450		83	X	....	15	30	550	....	200	90	500	.....	1585
7	2ª	500		31	X	....	18	20	600	....	60	40	500	.....	1575
8	4ª	600		41	....	X	20	40	550	....	50	...	500	.....	1573
9	5ª	450		44	X	....	11	100	550	16	120	20	600	.....	1582
10	6ª	450		44	X	....	10	90	550	....	400	127	700	.....	1578

Informações sobre a tabela:

Pos. Seq. = Representa a posição da corrida, entre uma série de corridas lingotadas na máquina de lingotamento contínuo.

Temp. = Temperatura da corrida após o final de tratamento no refino secundário.

O processo de fabricação de aço peritético em aciaria do tipo LD, é semelhante ao descrito para os aços do grupo I. Após o vazamento das corridas, elas são destinadas ao forno panela, um equipamento de refino secundário, que utiliza a energia elétrica através de eletrodos de carbono, com as seguintes finalidades:

- o Elevar a temperatura do aço líquido.
- o Reduzir o teor de enxofre.
- o Corrigir as faixas dos elementos especificados no aço.
- o Globulizar as inclusões produzidas pela manufatura.

A tabela 13, apresenta os dados de refino realizado no forno panela. Foram avaliadas 10 amostras, conforme descrito no capítulo de materiais e métodos. Com relação ao tratamento no forno panela vale destacar:

- o Todas as corridas analisadas estavam com sua composição química rigorosamente dentro do padrão, conforme especificado no capítulo de materiais e métodos.
- o 90% das corridas foram tratadas utilizando o “*plug*” poroso, ou injeção de argônio pela base da panela. Apenas a amostra 8 foi tratada com lança de argônio, ou seja, a injeção foi realizada pelo topo da panela.
- o Devido à quantidade de liga adicionada na preparação da corrida, 100% das corridas são aquecidas.

O borbulhamento de argônio, no forno panela em cada corrida durou em média $42,3 \pm 15,7$ min. e a vazão média de argônio empregada em cada corrida foi de 490 ± 52 NL/min. O sistema de injeção adotado foi sempre o de “*plug*” pelo fundo de panela, exceção foi a corrida da amostra 8, na qual usou-se lança. O tempo de aquecimento de cada corrida foi de $14,7 \pm 4,4$ min. Em todas as corridas adicionaram-se $40 \pm 29,9$ kg de alumínio e liga de Ca-Si à razão de $580 \pm 58,7$ kg por corrida. Também foram adicionadas $510 \pm 99,4$ kg de cal por corrida. Os ferro-ligas FeMn e FeSi foram adicionados a respectivamente, 70% e 50% das corridas amostradas, nas respectivas quantidades de $62,9 \pm 121,8$ kg por corrida e $65,4 \pm 42,8$ kg por corrida. A nefelina foi adicionada apenas a cinco corridas na quantidade de $100,0 \pm 50$ kg por corrida.

5.2.1 – Resultado do tamanho e quantidade de inclusão por amostra.

Os dados referentes às quantidades das inclusões são apresentados na figura 50. Observa-se que a quantidade de inclusões nas amostras é muito grande quando comparada, com o grupo I, anteriormente descrito. Nas figuras que se seguem de (58 a 67), onde o número de inclusões observado foi muito grande, foi colocada uma imagem apresentando uma vista parcial com aumento de 50 vezes, afim de se destacar melhor a quantidade das inclusões nas amostras.

Figura 50: Gráfico apresentando a quantidade de inclusões nas amostras do grupo II (aços peritéticos acalmado ao alumínio e silício).

Figura 51: Gráfico apresentando o tamanho das inclusões das amostras do grupo II (aços peritéticos acalmado ao alumínio e silício).

A figura 51, apresenta o tamanho médio das inclusões. Estes foram relativamente baixos, quando comparados com o grupo I e II. Muitas das inclusões situaram-se entre 8 a 10 μm com formato arredondado e distribuídas por toda a superfície da amostra.

SOUZA COSTA, S. L.; BATISTA CAMPOS, E.⁽⁴⁶⁾, encontraram em aços acamaldos ao alumínio e silício 20 inclusões por cm^2 . Tomando-se a mesma base dessa referência, os aços do grupo II, apresentaram um resultado de 72 inclusões/ cm^2 . O tamanho médio das inclusões encontradas por estes pesquisadores⁽⁴⁶⁾, situa-se entre 10 e 20 μm , enquanto que nos resultados aqui apresentados (conforme figura 51) o tamanho médio foi de aproximadamente de 10 μm . Vale destacar que, segundo a mesma referência, foram consideradas somente inclusões maiores que 10 μm .

5.2.2 – Relação do teor de oxigênio com quantidade de inclusões

A figura 52 apresenta o resultado da correlação entre o teor de oxigênio medido nas amostras com o tamanho das inclusões observadas. Como pode ser notado não se verifica relação de nenhuma espécie com a variação do oxigênio medido, conforme sugerido por ZHANG, L.; THOMAS, B. G..⁽³⁷⁾ Idêntico resultado é observado quando se relaciona o teor de oxigênio com a quantidade das inclusões, figura 53.

Figura 52: Relação teor de oxigênio x tamanho das inclusões.

Figura 53: Gráfico apresentando a relação do teor de oxigênio encontrado com a quantidade de inclusões observada.

5.2.3 – Relação do número e tamanho das inclusões com a posição da corrida na seqüência.

Houve uma tendência fraca do aumento do número de inclusões em relação à posição crescente da corrida na seqüência, conforme pode ser observado na figura 54. Porém esta mesma relação não pode ser verificada em relação ao tamanho das inclusões, conforme figura 55.

Figura 54: Relação entre número de inclusões e posição da corrida na seqüência de lingotamento.

Figura 55: Relação tamanho de inclusão e posição na série.

5.2.4 – Composição das inclusões:

Observa-se na figura 56, que, além da elevada quantidade de inclusões, a sua composição também se mostrou variada, apresentando uma grande ocorrência de inclusões de $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaO} \cdot \text{CaS}$; $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaO} \cdot \text{MnO}$ e $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaO}$, que provavelmente se formaram por difusão e colisão, conforme hipótese formulada por OTOTANI, ⁽²⁶⁾ sendo em sua maioria, de pequeno tamanho. A menor incidência de inclusões foi a de $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{TiO}_2$ e $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$.

Figura 56: Frequência dos tipos de inclusões observadas nas amostras do grupo II.

5.2.5 – Relação quantidade de inclusão e o tempo de borbulhamento de argônio.

Na corrida da amostra 6 o borbulhamento de argônio foi realizado muito acima da vazão média apresentada pelo grupo $42,3 \pm 15,7$ min.. Conforme MILLMAN, S.⁽¹²⁾ isso fez com que a quantidade de inclusão na corrida fosse a menor com apenas 54 inclusões, o melhor resultado observado entre as amostras dos grupo II. Porém, o seu tamanho médio não manteve a mesma tendência, ou seja, foi o segundo maior entre as amostras do seu grupo ($12,7 \mu\text{m}$).

Contrariamente, no caso da amostra 3 o tempo de borbulhamento de argônio foi de apenas 27 min., o menor do seu grupo e o número de inclusões foi relativamente alto. Outro fato interessante, foi a amostra 8 não ter recebido injeção de argônio através do “*plug*” isso pode ter afetado a quantidade de inclusões na amostra, que foi o maior do seu grupo com 276 inclusões.

5.2.6 – Influência do tempo de aquecimento nas corridas do grupo II.

Em função da quantidade de liga adicionada nas corridas pertencentes ao grupo II, faz-se necessário o aquecimento através dos eletrodos existentes no forno panela. Porém, não foi verificado na literatura estudada, influência do aquecimento na quantidade de inclusões.

5.2.7 – Influência da adição de alumínio.

Nas corridas referentes às amostras 9 e 10, adicionou-se mais alumínio do que a média da série, isso porém não afetou a quantidade de inclusões e nem o resultado do tamanho das inclusões, conforme apresentado na figura 50 e 51.

5.2.8 - Influência da adição de Ferro-silício.

Pelos dados apresentados na tabela 13, em metade das corridas analisadas foi adicionado ferro-silício, isto porque o aço possui em sua especificação Si, e os valores apresentados no tratamento em forno panela, exigiam a correção do elemento por ele encontrar-se fora da faixa especificada. A corrida que mais recebeu ferro-silício, foi a da amostra 10 e foi a que apresentou uma quantidade de inclusões acima da média do grupo (175 inclusões). Ao contrário o resultado de tamanho da inclusão foi de apenas $9,3 \mu\text{m}$.

5.2.9 – A adição de nefelina.

A nefelina, conforme pode ser observado na tabela 14, é um constituinte à base de sílica, que é adicionado durante o tratamento do aço com a finalidade de evitar a aglomeração da cal, também é adicionada ao processo. Esse constituinte portanto, não tem efeito sobre o número de inclusões obtidas na amostra, bem como influência em seu tamanho.

Não foi observado também, influência do tipo deste componente, na morfologia das inclusões. As amostras cujas as corridas tiveram adição de nefelina (5 no total), três tiveram a sílica incorporada à inclusão de aluminatos. Fato igualmente ocorrido nas corridas que não tiveram adição de nefelina. Ver tabela 15.

Tabela 14: Especificação da nefelina.

Elemento	FAIXA (%)	
	Mínimo	Máximo
SiO ₂	52,0	54,0
Al ₂ O ₃	23,0	25,0
Fe ₂ O ₃	1,9	2,0
CaO	0,4	0,5
MgO	0,3	0,5
TiO ₂	0,15	0,25
Na ₂ O	11,7	12,7
K ₂ O	2,9	5,4

5.2.10 – A adição de cal.

O CaO adicionado após o vazamento da corrida tem a finalidade de formar uma nova escória sobre o banho líquido, afim de baixar o teor de elemento indesejável, presente na composição química do aço, no caso o enxofre. Uma das características da cal é a de reter as inclusões formadas no banho, na escória.⁽⁵⁾ Como a adição de cal foi em média de 510 ± 99 kg e houve grande variação na quantidade de inclusões produzidas pelas corridas, é possível considerar que a cal não influencia na quantidade de inclusões nas corridas.

5.2.11 – Análise de WDS na inclusão da amostra 3.

A figura 57 é o resultado de análise de WDS de uma inclusão observada na amostra 3 (ver foto (a)) localizada na figura 60. A análise do WDS é qualitativa, onde pelas cores representadas nas imagens, avalia-se como estão constituídas as inclusões.⁽⁴⁷⁾ No caso específico da inclusão analisada observa-se:

- o O cálcio não está completamente distribuído na inclusão, havendo partes dela sem nenhuma presença de cálcio, indicado pela cor preta. Sua concentração é baixa, essa indicação é feita pela cor azul.
- o O oxigênio de forma intensa está distribuído por toda área da inclusão, indicado pela cor vermelha.
- o Titânio, em pequena área de forma intensa, mesmo comentário válido para a alumina, porém com uma abrangência moderada sobre a superfície da inclusão.
- o O manganês apareceu bem disperso sobre toda a superfície da inclusão de forma moderada.
- o Não foi encontrado ferro nesta inclusão.

Figura 57: Resultado da análise WDS da inclusão (a) amostra 3, grupo II aços peritéticos.

A tabela 15, apresenta um resumo da composição das inclusões observadas nas figuras de 58 a 67 do grupo II.

Tabela 15: Resumo das inclusões observadas no grupo II – Aços peritéticos.

AMOSTRA	INCLUSÕES DETECTADAS	COMENTÁRIOS
1	<ul style="list-style-type: none"> o $\text{Al}_2\text{O}_3.\text{CaO}$ o $\text{Al}_2\text{O}_3.\text{SiO}_2$ 	<ul style="list-style-type: none"> o 90% das ocorrências. o Representou 10%, das ocorrências.
2	<ul style="list-style-type: none"> o $\text{Al}_2\text{O}_3.\text{CaO}$ o $\text{Al}_2\text{O}_3.\text{TiO}_2$ o $\text{Al}_2\text{O}_3.\text{CaO}.\text{CaS}$ 	<ul style="list-style-type: none"> o Predominante, 95% das ocorrências. o Representou 5% das ocorrências. o Encontrada 1 inclusão de $40\mu\text{m}$.
3	<ul style="list-style-type: none"> o $\text{Al}_2\text{O}_3.\text{SiO}_2.\text{MnO}$ 	<ul style="list-style-type: none"> o 100% das ocorrências foram deste tipo de inclusão.
4	<ul style="list-style-type: none"> o $\text{Al}_2\text{O}_3.\text{CaO}$ 	<ul style="list-style-type: none"> o 100% das ocorrências foram deste tipo de inclusão.
5	<ul style="list-style-type: none"> o $\text{Al}_2\text{O}_3.\text{CaO}.\text{CaS}$ o $\text{Al}_2\text{O}_3.\text{SiO}_2.\text{MnO}$ 	<ul style="list-style-type: none"> o Em 95% das ocorrências. o Representou 5% aproximadamente.
6	<ul style="list-style-type: none"> o $\text{Al}_2\text{O}_3.\text{SiO}_2.\text{MnO}$ o $\text{Al}_2\text{O}_3.\text{CaO}$ 	<ul style="list-style-type: none"> o 1 inclusão de $180\mu\text{m}$. o Representou 95% das ocorrências.
7	<ul style="list-style-type: none"> o $\text{Al}_2\text{O}_3.\text{CaO}.\text{CaS}$ o $\text{Al}_2\text{O}_3.\text{SiO}_2.\text{MnO}$ 	<ul style="list-style-type: none"> o 100% das ocorrências. o 1 inclusão com esta composição aproximadamente $20\mu\text{m}$.
8	<ul style="list-style-type: none"> o $\text{Al}_2\text{O}_3.\text{CaO}.\text{CaS}$ o $\text{Al}_2\text{O}_3.\text{SiO}_2.\text{MnO}$ 	<ul style="list-style-type: none"> o 100% das ocorrências. o 1 inclusão com esta composição aproximadamente $50\mu\text{m}$.
9	<ul style="list-style-type: none"> o $\text{Al}_2\text{O}_3.\text{CaO}.\text{CaS}$ o $\text{Al}_2\text{O}_3.\text{SiO}_2.\text{CaO}$ 	<ul style="list-style-type: none"> o 100% das ocorrências. o 1 inclusão com esta composição aproximadamente $240\mu\text{m}$.
10	<ul style="list-style-type: none"> o $\text{Al}_2\text{O}_3.\text{CaO}.\text{CaS}$ 	<ul style="list-style-type: none"> o 100% das ocorrências.

A morfologia apresentada por todas as inclusões observadas ao microscópio era na totalidade das amostras estudadas, arredondada.

Amostra	Posição na Série	Total de inclusões em 160 mm ²	Tamanho médio das inclusões (μm)	Morfologia
1	1 ^a	106	9,3	Arredondada

Resultado da microanálise da figura (a).

Resultado da microanálise da figura (c).

Resultado	Composição Química final da corrida (%)										
	C	Mn	P	S	Si	Al _{Total}	Nb	Ti	N	Ca	O _{Total}
Obtido	0,08	1,41	0,015	0,003	0,23	0,023	0,038	0,013	0,0064	0,0026	0,0217
Objetivado	0,09	1,50	0,020	0,005	0,23	0,030	0,040	0,010	0,0040	0,0030	.....

Figura 58: Resultado da amostra 1 do grupo II: número de inclusões, distribuição de tamanhos, microanálise e composição química.

Amostra	Posição na Série	Total de inclusões em 160 mm ²	Tamanho médio das inclusões (μm)	Morfologia
2	2 ^a	110	9,2	Arredondada

Resultado da microanálise da figura (a).

Resultado da microanálise da figura (c).

Resultado	Composição Química final da corrida (%)										
	C	Mn	P	S	Si	Al _{Total}	Nb	Ti	N	Ca	O _{Total}
Obtido	0,09	1,49	0,015	0,003	0,22	0,031	0,043	0,019	0,0054	0,0034	0,0081
Objetivado	0,09	1,50	0,020	0,005	0,23	0,030	0,040	0,010	0,0040	0,0030	.....

Figura 59: Resultado da amostra 2 do grupo II: número de inclusões, distribuição de tamanhos, microanálise e composição química.

Amostra	Posição na Série	Total de inclusões em 160 mm ²	Tamanho médio das inclusões (μm)	Morfologia
3	3 ^a	164	9,3	Arredondada

Resultado da microanálise da figura (a).

Resultado	Composição Química final da corrida (%)										
	C	Mn	P	S	Si	Al _{Total}	Nb	Ti	N	Ca	O _{Total}
Obtido	0,07	1,52	0,016	0,004	0,21	0,035	0,041	0,012	0,0058	0,0027	0,0143
Objetivad	0,09	1,50	0,020	0,005	0,23	0,030	0,040	0,010	0,0040	0,0030	.....

Figura 60: Resultado da amostra 3 do grupo II : número de inclusões, distribuição de tamanhos, microanálise e composição química.

Amostra	Posição na Série	Total de inclusões em 160 mm ²	Tamanho médio das inclusões (μm)	Morfologia
4	1 ^a	79	10,4	Arredondada

Resultado da microanálise da figura (a).

Resultado	Composição Química final da corrida (%)										
	C	Mn	P	S	Si	Al _{Total}	Nb	Ti	N	Ca	O _{Total}
Obtido	0,09	1,60	0,018	0,004	0,22	0,024	0,043	0,010	0,0052	0,0022	0,0186
Objetivado	0,09	1,50	0,020	0,005	0,23	0,030	0,040	0,010	0,0040	0,0030	.....

Figura 61: Resultado da amostra 4 do grupo II: número de inclusões, distribuição de tamanhos, microanálise e composição química.

Amostra	Posição na Série	Total de inclusões em 160 mm ²	Tamanho médio das inclusões (µm)	Morfologia
5	2 ^a	64	10,8	Arredondadas

Resultado da microanálise da figura (a).

Resultado da microanálise da figura (c).

Resultado	Composição Química final da corrida (%)										
	C	Mn	P	S	Si	Al _{Total}	Nb	Ti	N	Ca	O _{Total}
Obtido	0,10	1,54	0,021	0,003	0,27	0,028	0,042	0,012	0,0062	0,0020	0,0095
Objetivado	0,09	1,50	0,020	0,005	0,23	0,030	0,040	0,010	0,0040	0,0030	.....

Figura 62: Resultado da amostra 5 do grupo II número de inclusões, distribuição de tamanhos, microanálise e composição química.

Amostra	Posição na Série	Total de inclusões em 160 mm ²	Tamanho médio das inclusões (µm)	Morfologia
6	1 ^a	54	12,7	Arredondada

Resultado da microanálise da figura (a).

Resultado da microanálise da figura (b).

Resultado	Composição Química final da corrida (%)										
	C	Mn	P	S	Si	Al _{Total}	Nb	Ti	N	Ca	O _{Total}
Obtido	0,09	1,46	0,016	0,003	0,25	0,030	0,039	0,012	0,0059	0,0032	0,0125
Objetivado	0,09	1,50	0,020	0,005	0,23	0,030	0,040	0,010	0,0040	0,0030	.....

Figura 63: Resultado da amostra 6 do grupo II: número de inclusões, distribuição de tamanhos, microanálise e composição química.

Amostra	Posição na Série	Total de inclusões em 160 mm ²	Tamanho médio das inclusões (µm)	Morfologia
7	2 ^a	64	9,2	Arredondada

Resultado da microanálise da figura (a).

Resultado da microanálise da figura (b).

Resultado	Composição Química final da corrida (%)										
	C	Mn	P	S	Si	Al _{Total}	Nb	Ti	N	Ca	O _{Total}
Obtido	0,09	1,47	0,021	0,004	0,23	0,033	0,042	0,015	0,0061	0,0032	0,0097
Objetivado	0,09	1,50	0,020	0,005	0,23	0,030	0,040	0,010	0,0040	0,0030	.....

Figura 64: Resultado da amostra 7 do grupo II: número de inclusões, distribuição de tamanhos, microanálise e composição química.

Amostra	Posição na Série	Total de inclusões em 160 mm ²	Tamanho médio das inclusões (µm)	Morfologia
8	4 ^a	276	9,3	Arredondada

Resultado da microanálise da figura (a).

Resultado da microanálise da figura (c).

Resultado	Composição Química final da corrida (%)										
	C	Mn	P	S	Si	Al _{Total}	Nb	Ti	N	Ca	O _{Total}
Obtido	0,09	1,41	0,019	0,003	0,22	0,032	0,039	0,015	0,0056	0,0038	0,0192
Objetivado	0,09	1,50	0,020	0,005	0,23	0,030	0,040	0,010	0,0040	0,0030	.....

Figura 65: Resultado da amostra 8 do grupo II: número de inclusões, distribuição de tamanhos, microanálise e composição química.

Amostra	Posição na Série	Total de inclusões em 160 mm ²	Tamanho médio das inclusões (μm)	Morfologia
9	5 ^a	69	14	Arredondada

Resultado da microanálise da figura (a).

Resultado da microanálise da figura (c).

Resultado	Composição Química final da corrida (%)										
	C	Mn	P	S	Si	Al _{Total}	Nb	Ti	N	Ca	O _{Total}
Obtido	0,09	1,52	0,021	0,004	0,23	0,032	0,039	0,015	0,0046	0,0029	0,0211
Objetivado	0,09	1,50	0,020	0,005	0,23	0,030	0,040	0,010	0,0040	0,0030	.....

Figura 66: Resultado da amostra 9 do grupo II: número de inclusões, distribuição de tamanhos, microanálise e composição química.

Amostra	Posição na Série	Total de inclusões em 160 mm ²	Tamanho médio das inclusões (μm)	Morfologia
10	6 ^a	175	9,3	Arredondada

Resultado da microanálise da figura (a).

Resultado	Composição Química final da corrida (%)										
	C	Mn	P	S	Si	Al _{Total}	Nb	Ti	N	Ca	O _{Total}
Obtido	0,10	1,54	0,019	0,003	0,24	0,033	0,042	0,011	0,0048	0,0036	0,0144
Objetivado	0,09	1,50	0,020	0,005	0,23	0,030	0,040	0,010	0,0040	0,0030	.....

Figura 67: Resultado da amostra 10 do grupo II: número de inclusões, distribuição de tamanhos, microanálise e composição química.

5.3 Resultados apresentados pelo grupo III – Ultra baixo carbono, acalmado ao alumínio.

Tabela 16: Dados obtidos no tratamento das corridas no R.H.

Amostra	Pos. Seq.	Tempo Vácuo	Borbulhamento Argônio			Aquecimento Corrida			Adições ligas				Temp.
			Vazão Argônio	Volume Gás	Tempo Total	Tempo Total	Vazão O ₂	Volume O ₂	Al	FeMn	FeTi	Suc	
			NL / min	NL	min	min	Nm ³ /h	Nm ³	Kg	Kg	Kg	Kg	
1	1 ^a	29	.....	.....	.....	21	1800	286	409	98	517		1628
2	2 ^a	27	.....	.....	.....	4	1800	57	280	.....	481		1610
3	3 ^a	24	.....	.....	.....	4	1800	100	315	62	481		1608
4	4 ^a	22	.....	.....	.....	5	1800	80	300	.....	483		1610
5	5 ^a	24	.....	.....	.....	N.H	.....	.....	170	.....	439		1603
6	7 ^a	21	.....	.....	.....	N.H	.....	.....	218	.....	470		1605
7	8 ^a	24	.....	.....	.....	5	1800	57	237	.....	448		1605
8	10 ^a	22	.....	.....	.....	22	1800	256	470	.....	460	512	1611
9	11 ^a	20	.....	.....	.....	2	1800	260	353	96	457		1610
10	12 ^a	28	.....	.....	.....	4	1800	179	313	.....	467		1614

Informações sobre a tabela :

Pos. Seq. = Representa a posição da corrida, em uma seqüência ininterrupta de corridas na máquina de lingotamento contínuo.

N.H. = Não houve

Temp. = Temperatura da corrida após o final de tratamento no refino secundário

Suc = Sucata

O processo de fabricação de aços desgaseificados em conversores LD, não é muito diferente do descrito no item 5.1, ou seja, até o momento do vazamento em panela as etapas que devem ser cumpridas para a fabricação deste tipo de aço são idênticas as dos aços baixo carbono acalmados ao alumínio.

O processo de desgaseificação ou R.H, consiste em circular o aço líquido, dentro de um vaso, revestido interiormente por refratário, onde promove-se o vácuo. O processo é empregado com o objetivo principal de remover gases formados no interior do aço líquido, nas reações de refino principalmente, o hidrogênio.

No caso dos aços ultra baixo carbono, destaque para a reação que ocorre durante esta etapa de refino é (20) mostrada na página 7, afim de se conseguir valores extremamente baixos de carbono ($< 35\text{ppm}$), requisito imposto pela especificação do aço.⁽⁹⁾

Na tabela 16, são listadas as informações da operação de desgaseificação (R.H.), onde é possível notar:

- O tempo sob vácuo foi aproximadamente o mesmo para todas as corridas, em média 24 minutos.
- As temperaturas, após o final de tratamento, são elevadas, justificadas por:
 - Ajustes de sincronização entre a máquina de lingotamento contínuo e o R.H.
 - Temperatura de “*liquidus*” desse grupo de aço ser mais elevada que os demais grupos aqui estudados.
- 80% das corridas avaliadas receberam aquecimento durante o tratamento, exceto as corridas referente às amostras 5 e 6 .
- Corridas deste grupo de aço devem ser realizadas obedecendo a uma mesma sequência, sem que haja, portanto, mistura entre corridas de aço com outras faixas de composição química, que é frequente nos grupos I e II. Até mesmo as panelas são agrupadas dentro de um mesmo padrão, o que permite uma avaliação mais precisa das inclusões produzidas pelo grupo III.
- Todas as corridas pertencentes a este grupo foram devidamente aprovadas, conforme especificação no capítulo de materiais e métodos.

5.3.1 - Resultado do tamanho e quantidade de inclusão por amostra.

Os tamanhos das inclusões verificadas neste grupo de aço são apresentados na figura 68. Distingue-se a amostra 7, na qual o tamanho médio verificado foi de $16,8\ \mu\text{m}$. Através dos dados disponíveis, não se conseguiu determinar uma provável causa.

Figura 68: Gráfico apresentando o tamanho das inclusões obtidas no grupo III. Ultra baixo carbono.

A figura 69 apresenta a quantidade de inclusão por amostra. O que se pode observar é que neste caso houve uma leve tendência para as últimas corridas do distribuidor apresentarem um número de inclusões maior do que as do início da sequência.

Figura 69: Gráfico da quantidade de inclusões por amostra do grupo III. Ultra baixo carbono.

Os resultados apresentados nas figuras 69 e 68, são comparados com os resultados obtidos por ZHONGCHAO,Y.;SHIYANG,W.;XIAOCHUAN,W.⁽⁴⁸⁾. Amostras de aço ultra baixo carbono, coletadas em placas a $\frac{1}{4}$ da espessura foram analisadas, e os resultados apresentados conforme segue:

- As inclusões são menores que $5\mu\text{m}$, muito inferiores ao tamanho médio das inclusões observadas no grupo III, que foi de $11,3\mu\text{m}$.
- A quantidade, foi de $204 \text{ inclusões/mm}^2$.⁽⁴⁸⁾ No presente trabalho, somente foram avaliadas inclusões maiores que $5\mu\text{m}$.
- Os tipos de inclusões observadas foram alumina (Al_2O_3) pura em menor quantidade e a grande maioria composta de $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiN}$.⁽⁴⁸⁾

Apesar dos resultados de tamanho de inclusão apresentados na figura 69 e 68, terem sido de amostras colhidas em distribuidor, que entre outras funções é a de flotar as inclusões.^(11,12) é possível afirmar-se que a quantidade observada por aqueles autores foi bastante elevada.⁽⁴⁸⁾

5.3.2 – Influência da posição da corrida na seqüência de lingotamento.

Como nos demais grupos, foi investigada a influência da posição da corrida na seqüência de lingotamento, e nenhuma influência sobre tamanho e quantidade de inclusões foi observado, conforme pode observado nas figuras 70 e 71.

Figura 70: Posição da corrida na seqüência de lingotamento com relação à quantidade de inclusões produzidas.

Figura 71: Posição da corrida na seqüência de lingotamento com relação ao tamanho das inclusões produzidas.

5.3.3 – Aquecimento de corrida.

O tempo médio de aquecimento da corrida foi de $8,4 \pm 8,0$ min., havendo corridas que inclusive não foram aquecidas. Também neste grupo não houve nenhuma relação do aquecimento no resultado da quantidade de inclusões, conforme pode ser observado na figura 72 abaixo:

Figura 72: Tempo de aquecimento em função da quantidade de inclusões.

5.3.4 – Adição de alumínio nas corridas.

A adição média de alumínio por corrida foi de $305,8 \pm 103,4$ kg. A amostra 8, teve uma adição de 470 kg, muito acima da média apresentada pela série. Com relação ao tamanho e quantidade de inclusões, os valores obtidos foram acima da média apresentada pelo grupo, conforme pode ser observado nas figuras 68 e 69.

5.3.5 – Adição de ferro manganês.

Nas corridas onde houve adição de ferro manganês, amostras 1, 3 e 9 não foram encontradas inclusões contendo manganês.

5.3.6 – Relação tamanho e quantidade de inclusões.

Conforme gráfico da figura 73, nenhuma relação foi observada entre as quantidade e o tamanho das inclusões.

Figura 73: Tamanho vs. quantidade de inclusões.

5.3.7 - Teor de oxigênio total.

Observou-se, que a média de oxigênio total apresentada pelo grupo foi de $179,9 \pm 119,3$ ppm. A amostra 8 apresentou valor de oxigênio total superior a média da série. Associado a este fato é possível verificar que os resultados de tamanho e quantidade de inclusões desta amostra também foram superiores aos apresentados pela série.

Com relação ao tipo e morfologia das inclusões, a tabela 17 traz um arranjo das observações feitas por microscopia ótica e na microscopia eletrônica. Observou-se que em 100% das amostras as inclusões presentes são de alumina. Não foram observadas nesse grupo inclusões exógenas. A morfologia é bem variada, apresentando desde inclusões facetadas, “clusters”, além de inclusões angulares. O resultado de cada amostra individual pode ser observado nas figuras 74 a 83.

Tabela 17: Resumo das inclusões observadas no grupo III – Aços ultra baixo carbono.

AMOSTRA	INCLUSÕES DETECTADA	MORFOLOGIA
1	o Al_2O_3	Multi facetadas
2	o Al_2O_3	Multi facetadas
3	o Al_2O_3	Angular
4	o Al_2O_3	Angular
5	o Al_2O_3	Agrupadas angulares
6	o Al_2O_3	“clusters”
7	o Al_2O_3	Arredondadas
8	o Al_2O_3	Angulares
9	o Al_2O_3	“clusters”
10	o Al_2O_3	Angulares

Amostra	Posição na Seq.	Total de inclusões em 160 mm ²	Tamanho médio das inclusões (μm)	Morfologia
1	1 ^a	17	11,9	Multi-Facetada

Resultado de Microanálise

Resultado	Composição Química final da corrida (%)								
	C	Mn	P	S	Si	Al _{Total}	Ti	N	O _{Total}
Obtido	0,003	0,12	0,014	0,007	0,01	0,034	0,08	0,0047	0,0133
Objetivado	0,005	0,10	0,020	0,020	0,00	0,050	0,08	0,0030	.....

Figura 74: Resultado da amostra 1 do grupo III : número de inclusões, distribuição de tamanhos, microanálise e composição química.

Amostra	Posição na Seq.	Total de inclusões em 160 mm ²	Tamanho médio das inclusões (μm)	Morfologia
2	2 ^a	16	10,5	Multi-Facetada

Resultado	Composição Química final da corrida (%)								
	C	Mn	P	S	Si	Al _{Total}	Ti	N	O _{Total}
Obtido	0,002	0,14	0,013	0,007	0,02	0,050	0,08	0,0030	0,0152
Objetivado	0,005	0,10	0,020	0,020	0,00	0,050	0,08	0,0030	.....

Figura 75: Resultado da amostra 2 do grupo III : número de inclusões, distribuição de tamanhos, microanálise e composição química.

Amostra	Posição na Seq.	Total de inclusões em 160 mm ²	Tamanho médio das inclusões (μm)	Morfologia
3	3 ^a	15	10,9	Angular

Resultado	Composição Química final da corrida (%)								
	C	Mn	P	S	Si	Al _{Total}	Ti	N	O _{Total}
Obtido	0,002	0,12	0,008	0,007	0,01	0,071	0,08	0,0031	0,0123
Objetivado	0,005	0,10	0,020	0,020	0,00	0,050	0,08	0,0030	.....

Figura 76: Resultado da amostra 3 do grupo III: número de inclusões, distribuição de tamanhos, microanálise e composição química.

Amostra	Posição na Seq.	Total de inclusões em 160 mm ²	Tamanho médio das inclusões (μm)	Morfologia
4	4 ^a	12	9,0	Angular

Resultado de Microanálise

Resultado	Composição Química final da corrida (%)								
	C	Mn	P	S	Si	Al _{Total}	Ti	N	O _{Total}
Obtido	0,002	0,13	0,012	0,005	0,01	0,061	0,08	0,0033	0,0161
Objetivado	0,005	0,10	0,020	0,020	0,00	0,050	0,08	0,0030	.....

Figura 77: Resultado da amostra 4 do grupo III: número de inclusões, distribuição de tamanhos, microanálise e composição química.

Amostra	Posição na Seq.	Total de inclusões em 160 mm ²	Tamanho médio das inclusões (μm)	Morfologia
5	5 ^a	17	11,4	Angular/Agrupada

Itado	Composição Química final da corrida (%)								
	C	Mn	P	S	Si	Al _{Total}	Ti	N	O _{Total}
Obtido	0,003	0,20	0,016	0,008	0,01	0,059	0,07	0,0030	0,0162
	0,005	0,10	0,020	0,020	0,00	0,050	0,08	0,0030	.....

Figura 78: Resultado da amostra 5 do grupo III: número de inclusões, distribuição de tamanhos, microanálise e composição química.

Amostra	Posição na Seq.	Total de inclusões em 160 mm ²	Tamanho médio das inclusões (μm)	Morfologia
6	7 ^a	16	10,4	"Clusters"

Resultado	Composição Química final da corrida (%)								
	C	Mn	P	S	Si	Al _{Total}	Ti	N	O _{Total}
Obtido	0,002	0,15	0,014	0,007	0,02	0,057	0,08	0,0036	0,0115
Objetivado	0,005	0,10	0,020	0,020	0,00	0,050	0,08	0,0030	.....

Figura 79: Resultado da amostra 6 do grupo III : número de inclusões, distribuição de tamanhos, microanálise e composição química.

Amostra	Posição na Seq.	Total de inclusões em 160 mm ²	Tamanho médio das inclusões (μm)	Morfologia
7	8 ^a	16	16,8	Arredondada

Resultado	Composição Química final da corrida (%)								
	C	Mn	P	S	Si	Al _{Total}	Ti	N	O _{Total}
Obtido	0,002	0,17	0,012	0,008	0,01	0,057	0,08	0,0024	0,0209
Objetivado	0,005	0,10	0,020	0,020	0,00	0,050	0,08	0,0030	.....

Figura 80: Resultado da amostra 7 do grupo III : número de inclusões, distribuição de tamanhos, microanálise e composição química.

Amostra	Posição na Seq.	Total de inclusões em 160 mm ²	Tamanho médio das inclusões (μm)	Morfologia
8	10 ^a	18	12,1	Angular

Resultado	Composição Química final da corrida (%)								
	C	Mn	P	S	Si	Al _{Total}	Ti	N	O _{Total}
Obtido	0,004	0,19	0,013	0,007	0,01	0,081	0,08	0,0035	0,0509
Objetivado	0,005	0,10	0,020	0,020	0,00	0,050	0,08	0,0030	.....

Figura 81: Resultado da amostra 8 do grupo III : número de inclusões, distribuição de tamanhos, microanálise e composição química.

Amostra	Posição na Seq.	Total de inclusões em 160 mm ²	Tamanho médio das inclusões (μm)	Morfologia
9	11 ^a	20	10,9	"Cluster"

Resultado	Composição Química final da corrida (%)								
	C	Mn	P	S	Si	Al _{Total}	Ti	N	O _{Total}
Obtido	0,002	0,16	0,011	0,005	0,06	0,041	0,07	0,0027	0,0119
Objetivado	0,005	0,10	0,020	0,020	0,00	0,050	0,08	0,0030	.....

Figura 82: Resultado da amostra 9 do grupo III: número de inclusões, distribuição de tamanhos, microanálise e composição química.

Amostra	Posição na Seq.	Total de inclusões em 160 mm ²	Tamanho médio das inclusões (µm)	Morfologia
10	12 ^a	19	9,5	Angular

Resultado	Composição Química final da corrida (%)								
	C	Mn	P	S	Si	Al _{Total}	Ti	N	O _{Total}
Obtido	0,002	0,15	0,013	0,006	0,01	0,043	0,07	0,0024	0,0116
Objetivado	0,005	0,10	0,020	0,020	0,00	0,050	0,08	0,0030	.....

Figura 83: Resultado da amostra 10 do grupo III: número de inclusões, distribuição de tamanhos, microanálise e composição química.

5.4 - Comparação dos resultados obtidos entre os 3 grupos de aço.

O processo de metalurgia primária, para a fabricação dos aços pertencentes aos três grupos estudados é basicamente o mesmo, não havendo, portanto, nenhuma característica que produza interferência nos resultados levantados neste trabalho.

Porém, no refino secundário observou-se certas diferenças. Os aços do grupo I foram tratados em estações de borbulhamento de argônio, onde o objetivo principal é agitação da massa líquida para homogeneização (da temperatura e da composição química) e flotação das inclusões, permitindo-se certo ajuste de alguns elementos químicos tais como alumínio e carbono, além do ajuste da temperatura; neste caso, para se retirar calor, usa-se a introdução de sucata.

Os aços do grupo II, tiveram como destino o forno panela, e lá receberam grandes adições de ferro-ligas, como FeMn, FeSi, adição de compostos visando formar escória na panela tais como a cal e nefelina, além da injeção de CaSi (Cálcio silício), para modificar a morfologia das inclusões e reduzir o teor de enxofre. Adições de alumínio também foram realizadas, e pequenas adições de carbono. Neste grupo também a homogeneização se deu através da injeção de argônio através do “*Plug*” situado na base da panela.

Os aços do grupo III, seguiram para o R.H., onde tiveram a adição de ferro-ligas, como no grupo II, destacando-se principalmente o Fe-Ti, e através da circulação do aço em seu vaso, para homogeneização e desgaseificação.

Algumas características metalúrgicas entre estes processos podem ser observadas, como segue:

- o As temperaturas finais após tratamento dos aços referente ao grupo III foram maiores em 20°C, devido ao sincronismo entre a estação de refino (R.H) e a máquina de lingotamento contínuo. Há de se considerar o fato de que os aços deste grupo possuem uma temperatura de “*liquidus*”, mais elevada que os grupos anteriores (1536°C).
- o As adições de liga em panela durante o tratamento no refino, nos aços do grupo II, foram bastante acentuadas.

Um resumo das inclusões produzidas por este processo é feito na tabela 18, onde são apresentados o tamanho médio e quantidades das inclusões por grupo e seus respectivos desvio padrão.

Tabela 18: Balanço dos resultados de inclusões apresentadas pelos grupos de aço.

Grupo	Descrição Grupo	Tamanho médio da Inclusão(μm)	Desvio Padrão (μm)	Quantidade média das inclusões	Desvio Padrão
Grupo I	Baixo carbono Acalmado ao Alumínio	12,6	2,6	16,6	2,2
Grupo II	Peritético Acalmado ao Alumínio e Silício	10,4	1,7	116,1	70,2
Grupo III	Ultra Baixo Carbono Acalmado ao Alumínio	11,3	2,1	16,6	2,2

É possível observar que os aços do grupo II, apresentaram uma quantidade de inclusões bem superior aos demais grupos. Porém, o seu tamanho médio foi o menor, fato talvez justificado pelos elevados tempos de borbulhamento durante o tratamento no refino.

Esperava-se uma quantidade de inclusões maior nos aços do grupo I, por se tratar de um processo de simples agitação através de gás argônio. O resultado em termos de inclusão foi próximo ao de um aço produzido via desgaseificação, que a rigor deveria ser mais limpo em termos de inclusão, que os demais grupos I e II.

Os aços do grupo III apesar de apresentar grande quantidade de inclusões, apresentou um tamanho médio menor. Porém, a morfologia de sua inclusão é bem mais favorável que os demais grupos, pois a adição de CaSi, conferiu à inclusão forma arredondada o que, a princípio, não interfere grandemente nas propriedades finais do aço.

6 – Conclusões.

Os objetivos do trabalho foram alcançados, uma vez que foram determinadas composição química, tamanho e quantidades das inclusões geradas nos processos de refino de aços, adotados na COSIPA, para os aços de baixo-carbono (Grupo I), peritéticos (Grupo II) e de extra baixo carbono (Grupo III).

- Aços de baixo carbono (Grupo I)

1. A composição das inclusões endógenas presentes na totalidade das amostras foi alumina. As inclusões com outras composições, presentes nas amostras 6, 8 e 9 são de natureza exógena.
2. A posição da corrida na seqüência de corridas lingotadas não influenciou sobre o número e o tamanho das inclusões observadas.
3. Corridas em que o tempo de borbulhamento de argônio foi menor apresentaram inclusões maiores e corridas com mais tempo de borbulhamento de argônio apresentaram menor número de inclusões.

- Aços peritéticos (Grupo II)

4. As inclusões observadas nas amostras deste grupo de aços apresentaram composição química variada devido às adições feitas ao aço no forno panela.
5. As inclusões apresentaram morfologia arredondada devido à adição de Ca-Si.
6. O número de inclusões observado foi alto, apesar o tempo de borbulhamento de argônio ter sido elevado.

- Aços de ultra baixo carbono (Grupo III)

7. Todas as inclusões observadas nas amostras desse grupo de aços foram de alumina.
8. Foram observadas inclusões arredondadas e na forma de “clusters”.
9. Não foram observadas inclusões exógenas.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1) PIRES, J.C.S.; GARCIA,A. – “Study of the nature of non-metallic inclusions in samples of aluminum and silicon killed low carbon steels, collected in the refining treatment and continuous casting stages” – Materials Research, Vol. 7, nº 4, pp 517-521,2004.
- 2) AMERICAN IRON AND STEEL INSTITUTE – AISI:
www.steel.org/learning/flowline/index.htm “site” consultado em janeiro de 2005.
- 3) TEWORTE, R.; WIEGMANN, V.; KUBBE, A. – “Aspects of variant RH plant design”- MPT International, 6, pp. 44-46, 2004.
- 4) ROSENQVIST, T. – “Principles of extractive metallurgy”– McGraw Hill Kogakusha LTD., Tokio, Japan, pp. 264-259, pp. 374-407, 1974.
- 5) MILLER, T. W.; JIMENEZ, J.; SHARAN, A.; GOLDSTEIN, D. A. – “Oxygen steelmaking process” – In: The Making, Shaping and Treating of Steel, 11th Edition, Steel Making and Refining Volume, pp 475-524, The AISE Steel Foundation (FRUEHAN, R.J., Editor), Pittsburgh, PA, USA, 1998.
- 6) MALYNOWSKI, A. – “Fabricação de aço líquido em conversor a oxigênio” – In: Siderurgia para Não-Siderurgistas, Curso ABM, 24 a 27 de setembro, São Paulo, SP, Brasil, pp. 87-119, 2001.
- 7) VALADARES, C. A. G.; BEZERRA, M. C. C. – “Solidificação de aço no molde” – In: Lingotamento contínuo de placas, Curso ABM, São Paulo, SP, Brasil, pp. 65-90, 2005.
- 8) RIBEIRO, D. B.; QUINTÃO, H. A.; CRUZ, C. A. – “Refino do aço em forno panela” – In: Refino secundário dos aços, Curso ABM, São Paulo, SP, Brasil, pp. 119-252, 2004.
- 9) SILVA, C. A.; MARTINS, A. A.; SUZAKI, K.; FERREIRA, M. A. C.; AZEVEDO, F. R. S. – “Tratamento sob vácuo” – In: Refino secundários dos aços, Curso ABM, São Paulo, SP, Brasil, pp. 289-444, 2004.
- 10) INTERNATIONAL IRON AND STEEL INSTITUTE – CONTINUOUS CASTING OF STEEL 1985 – A SECOND STUDY; “Chapter 1: The First 25 years and The present position of continuous casting” – Brussels – Belgium - pp.1-1 a 1-31.
- 11) KOZAK, B.; DZIERZAWSKI, J. – “Continuous casting of steel. Basic principles” – In: AISI-american Iron and Steel Institute, “site”
<http://www.steel.org/learning/howmade/concast.htm> consultado em janeiro de 2005.
- 12) MILLMAN, S. – “Basic features and operating practices-Clean steel.” – In: IISI Study on Clean Steels, pp. 39-60, International Iron and Steel Institute-IISI, Brussels, Belgium, 2004.

- 13) TREADGOLD, C. J. – “Behaviour of inclusions in RH vacuum degasser” – Ironmaking and Steelmaking, vol. 30, n. 2, pp. 120-124, 2003.
- 14) CHENG, J.; ERIKSSON, R; JÖNSSON, P. – “Determination of macro inclusions during clean steel production” – Ironmaking and Steel making, vol. 30, n. 1, pp. 66-72, 2003.
- 15) SIMENSEN, C. J. – “The effect of dissolved elements and inclusions on the properties of metal products” – In: ENGH, T. A. – “Principles of metal refining”, Oxford University Press, Oxford, UK, pp. 1-38, 1992.
- 16) FRUEHAM, R. J. – “Principles and practices for clean steel production” – Vitória, ES, Brasil, ABM, São Paulo, SP, Brasil, 2005. In: Steelmaking Seminar – International, 36, 2005 [Apostila de Curso].
- 17) KIESSLING, R. – “Non-metallic inclusions in steel (Part III: The origins and behaviour of inclusions and their influence on the properties of steel)” – The Iron and Steel Institute, London, UK, 1968.
- 18) PEREIRA, P. F.; – “Controle da qualidade das placas” – In: “Lingotamento contínuo de placas de aços”, Curso ABM, Campos de Jordão, SP, Brasil, ABM, São Paulo, SP, Brasil, 1988.
- 19) MCPHERSON, N. A.; MCEAN, A. (Editors) – “Continuous casting”, vol. 7, Non-metallic inclusions in continuously casting steel” – The Iron and Steel Society, Warrendale, Pennsylvania, USA, 1995.
- 20) KIESSLING, R.; LANGE, N. – “Non-metallic inclusions in steel (Part I: Inclusions belonging to the pseudo-ternary system $\text{MnO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ and related systems)” – The Iron and Steel Institute, London, UK, 1964.
- 21) DEKKERS, R. – “Non-metallic inclusions in steel”, Ph.D Thesis, Katholieke Universiteit Leuven, Leuven, Belgium, 158 pp., Chapter 1, Introduction, pp. 1-6, 2002.
- 22) OTOTANI, T. – “Calcium clean steel” – Materials Research Engineering, Springer-Verlag, Berlin, Germany, pp. 4 a 19, 1986.
- 23) KAY, D. A. R. – “Inclusions in calcium treated steels. In: International Symposium on the effects and control of inclusions and residual steels, 2; Annual Conference on Metallurgists, 25, Toronto, Canada, 1986, Warrendale, Iron and Steel Society of AIME, pp. I-25 – I-42, 1986.
- 24) PIELET, H. M.; BHATTACHARYA, D. – “Thermodynamics of nozzle blockage in continuously casting of calcium-containing steels” – Metallurgical Transactions B, vol. 15B, September, pp. 547-562, 1984 .

- 25) KIESSLING, R.; LANGE, N. – “Non-metallic inclusions in steel (Part II: Inclusions belonging to the systems $\text{MgO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$, $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ and related oxide systems. Sulphide inclusions)” – The Iron and Steel Institute, London, UK, 1966.
- 26) OTOTANI, T. – “Calcium clean Steel” – Materials Research Engineering, Springer-Verlag, Berlin, Germany, pp.62-77 , 1986.
- 27) FRUEHAM, R. J. – “Introduction and fundamentals of clean steel production” – In: Principles and practices for clean steel production. Vitória, ES, Brasil, ABM, São Paulo, SP, Brasil, 2005, cap. 2, pp. 1-37 Steelmaking Seminar-International, 36, Vitória, ES, Brasil, [Apostila de Curso], 2005.
- 28) DEKKERS, R. – “Non-metallic inclusions in steel”, PhD Thesis, Katholieke Universiteit Leuven, Leuven, Belgium, 158 pp., Chapter 2, A literature review, pp. 7-17, 2002.
- 29) CAMPOS, A.; TEIXEIRA, A.V.; CAVALIERI, E.S.; ROSSI, E.H.; LIMA, F.G.; CASTRO, G.M.; QUINTÃO, H.A.; ANK, J.G; FERREIRA, N.; TEIXEIRA, O.A.C.; LOURENÇO, S.A.B. – “Desenvolvimento do processo de fabricação de aços-carbono de alta pureza” – In: 40º Seminário de Laminação, processos e produtos laminados revestidos, Seminário da ABM, 21-23 outubro, Vitória, ES, Brasil, pp. 215-224, 2003.
- 30) FRANK, L. A. – “Castability from alumina to spinels (and more)” – In: 84 th Steelmaking Conference Proceedings, 25-28 March, Baltimore, Maryland, USA, The Iron and Steel Society, Warrendale, Pennsylvania, USA, pp. 403-416, 2001.
- 31) PACK, A. – “Tracing of the origin of oxide inclusions in continuously cast steel using stable oxygen isotopes – an interdisciplinary approach”, Doctorate dissertation, Universität Bonn, Germany, pp. 6-15, 2000.
- 32) MILLS, K. C.; BILLANY, T. J. H.; NORMANTON, F. S.; WALKER, B.; GRIEVENSON, P. – “Causes of sticker breakout during continuous casting” – Ironmaking and steelmaking, vol.18, n.2, pp. 253-265, 1991.
- 33) CARVALHO, J. L. R. – “Solidificação de aço no molde” – In: “Lingotamento contínuo de placas de aços”, Curso ABM, Campos de Jordão, SP, Brasil, ABM, São Paulo, SP, Brasil, 1988.
- 34) UCHIYAMA, HIKARU – Characteristics and selection criteria of mould flux in different casting conditions – AISI technical committee on strand casting – September 1985.
- 35) VAN VLACK, L. H. – “Princípios de ciências dos materiais” – Editora Edgard Blücher Ltda. Editora da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil, pp. 1-17, 1964.

- 36) KISSLING, R. – “Non-metallic inclusions in steel (Part V)” – The Iron and Steel Institute, London, UK, 1989.
- 37) ZHANG, L.; THOMAS, B. G. – “State of the art in evaluation and control of steel inclusions” – ISIJ International, vol. 43, n. 3, pp. 271-291, 2003.
- 38) COLPAERT, H. – “Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns” – Editora Edgard Blücher Ltda., São Paulo, SP, Brasil, pp. 121-198, 1983.
- 39) AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS – Standard Test Methods for determining inclusion content in steel; E-45-97. Annual Book of ASTM Standards.1997 (Reapproved 2002).
- 40) Samp-O-Line – manual de especificações técnicas de amostradores da Electro-Nite
- 41) VIEIRA, F. B.; MARCHI, F. S. C.; FERREIRA NETO, O. A.; ABREU, C. N.; REZENDE, H. – “Caracterização dos refratários e insumos utilizados na aciaria da V&M do Brasil via microscópio eletrônico de varredura” – In: 34º Seminário de Fusão, Refino e Solidificação dos Metais, Seminário da ABM, 2003, Belo Horizonte, MG, Brasil, pp. 1-10 , 2003.
- 42) BOTA FILHO, W. J.; BORGES JÚNIOR, A.; MOREIRA, A. – “Microscopia Eletrônica de varredura e sua utilização na resolução de problemas industriais” – São Paulo, SP, Brasil, ABM, [Apostila de Curso], 2002.
- 43) Specification Sheet TC600 Leco instrument – Rio de Janeiro – www.leco.com.
Consultado em abril de 2005.
- 44) www.Thermo.com/com/cda/product/details - Consultado em setembro de 2005.
- 45) www.somatemática.com.br/fundam/medias.php – Consultado em junho 2005.
- 46) SOUZA COSTA, S. L.; BATISTA CAMPOS, E. – “Controle de inclusões de óxidos no lingotamento de placas na Usiminas” – In: Conferência Internacional de Dessulfuração e Controle de Inclusões, 1997, Volta Redonda, RJ. São Paulo: ABM, 1997. pp.329-337.
- 47) MALISKA, A. M. – Microscopia eletrônica de varredura – Universidade Federal de Santa Catarina – Departamento de engenharia mecânica - Laboratório de materiais
- 48) ZHONGCHAO, Y.; SHIYANG, W.; XIAOCHUAN, W. – “Studies of the inclusion in IF steel.” In: International Conference on the Processing, Microstructure and Properties of IF Steels, 2000, Pittsburgh. IF steels 2000 proceedings. Warrendale: Iron & Steel Society, 2000. pp.137-143.