

RICHARD HATANAKA

ANÁLISE QUANTITATIVA DE INCLUSÕES EM AÇOS  
RESSULFURADOS ACALMADOS AO ALUMÍNIO PRODUZIDOS POR  
LINGOTAMENTO CONTÍNUO VIA ANÁLISE DE IMAGENS

São Paulo

2011

RICHARD HATANAKA

ANÁLISE QUANTITATIVA DE INCLUSÕES EM AÇOS  
RESSULFURADOS ACALMADOS AO ALUMÍNIO PRODUZIDOS POR  
LINGOTAMENTO CONTÍNUO VIA ANÁLISE DE IMAGENS

Trabalho de formatura apresentado à  
Escola Politécnica da Universidade de  
São Paulo

Área de concentração: Engenharia  
Metalúrgica e de Materiais.

Orientador:  
Prof. Dr. Jorge Alberto Soares Tenório

São Paulo

2011

## Agradecimentos

À Escola Politécnica e ao Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais por todas as oportunidades concedidas.

Aos meus pais, irmão e familiares por todo apoio, carinho e paciência na minha formação.

Aos amigos Álvaro, Fabíola, Fabio, Luigi, Fernando Takahiro, Fernando Andrade, Armando, Pedro, Bruno, Igor e Alexandre Suehiro pelo apoio em todos os momentos da minha vida, sendo eles fáceis ou difíceis.

Aos Mestres e Professores Nicolau, Gerda, Roque, Igino, Arruda, Maurício, Fernando, Henrique, Ivan, Martorano, Tah, Hélio, Mauro, Daniel, Yoshiaki e Michiko por toda amizade, apoio e sabedoria que recebi destes.

Ao Prof. Dr. Jorge Alberto Soares Tenório pela dedicação na orientação deste trabalho, e por sua imensa colaboração no meu crescimento pessoal e profissional.

À Professora Dra. Denise Crocce Romano Espinosa por aceitar o convite para avaliação deste trabalho, e pela disponibilidade e interesse para melhorar o seu conteúdo.

Ao Prof. Dr. Cláudio Geraldo Schön, que da mesma forma cedeu seu precioso tempo para participar na avaliação deste trabalho e por todos os conselhos que recebi deste durante a minha graduação. Agradeço profundamente por acreditar no meu potencial e por sempre ser um tutor que me ajudou nos momentos mais difíceis da graduação.

Aos técnicos de laboratório, Rafael e Lívio e aos funcionários da biblioteca Gilberto e Clélia pelo companheirismo e tempo dedicados à confecção deste trabalho.

À Gerdau pelo fornecimento das amostras utilizadas no trabalho.

À USP e seus funcionários, que muito me ajudaram no desenvolvimento deste trabalho, e pela amizade que tenho de muitos deles.

Enfim, a todos que contribuíram de alguma forma, direta ou indireta para que este trabalho fosse bem sucedido.

## Resumo

Um dos fatores críticos na competição da indústria siderúrgica é o controle das inclusões no aço durante a sua fabricação, pois a distribuição de tamanho, a composição química e a morfologia das inclusões modificam o desempenho do aço quando submetido a esforço mecânico.

Neste trabalho, o foco é o estudo das inclusões através de análise de imagens das amostras de diferentes corridas de aço na adição de elementos de liga e antes do lingotamento contínuo, comparando os resultados nesses diferentes estágios da produção.

Foram estudadas 6 corridas de aço baixa liga para uso em construção mecânica em duas usinas siderúrgicas não-integradas. De cada corrida foram retiradas 2 amostras: uma durante as adições de elementos de liga (Al, CaSi ou S) e outra no distribuidor do lingotamento contínuo (imediatamente, 30 ou 60 minutos após o fim da turbulência).

As amostras foram preparadas metalograficamente e analisadas ao microscópio óptico. As imagens foram captadas por uma câmera digital e processadas por um software de análise de imagens a fim de se caracterizar as inclusões nas diferentes etapas do processo.

Foram caracterizadas as seguintes informações: número de inclusões por  $\text{mm}^2$ , fração de área, razão de aspecto, diâmetro equivalente e comprimento da maior dimensão, gerando as respectivas médias, desvios padrão e histogramas na adição e antes do lingotamento contínuo.

Os resultados encontrados foram comparados aos da análise química e microestrutural realizados anteriormente, concluindo-se que em todas as corridas houve a indicação de eliminação de inclusões por flotação, nas corridas M2, P3, P4 e P7 houve indicação de modificação da morfologia das inclusões, nas corridas P1 e P2 houve indicação de precipitação de inclusões de espinélio (e CaS em P2), na corrida P4 houve indicação de reoxidação e que não houve discrepância entre as conclusões da análise de imagens deste trabalho e as conclusões da análise química e microestrutural realizada por MORAES<sup>(1)</sup>.

## Abstract

One of the critical factors on the competition of the steel industry is the control of inclusions in steel during its manufacture, since the size distribution, chemical composition and morphology of inclusions modify the performance of steel when subjected to mechanical stress.

In this work, the focus is the study of inclusions by image analysis of samples of steel of different heat during the additions of alloying elements and before the continuous casting, comparing the results of these different stages of production.

Were studied six heats of low alloy steel for use in mechanical construction in two mini-mills. In each heat two samples were taken: one during the additions of alloying elements (Al, CaSi or S) and another in the tundish (immediately, 30 or 60 minutes after the end of the turbulence).

The samples were prepared metallographically and examined under an optical microscope. The images were captured by a digital camera and processed by an image analysis software in order to characterize the inclusions in the different stages of the process.

Were characterized the following information: number of inclusions per  $\text{mm}^2$ , area fraction, aspect ratio, equivalent diameter and length of the largest dimension, generating the respective averages, standard deviations and histograms in addition and prior to continuous casting.

The results were compared with the microstructural and chemical analysis conducted earlier, concluding that in every heat there was an indication of removal of inclusions by flotation, in M2, P3, P4 and P7 heats there was an indication of change in the morphology of inclusions, in P1 and P2 heats there was an indication of precipitation of spinel inclusions (and CaS in P2), in P4 heat there was an indication of reoxidation and there was no discrepancy between the conclusions of the image analysis from this work and conclusions of the analysis carried out chemical and microstructural analysis carried by MORAES<sup>(1)</sup>.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Inclusão de alumina de formato dendrítico em aço ressulfurado acalmado ao alumínio.....	5
Figura 2: Danos causados pela alumina na superfície de uma chapa.....	6
Figura 3: Binário CaO-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	7
Figura 4: Comportamento das inclusões após conformação mecânica do aço .....	10
Figura 5: Diagrama de blocos de um sistema de captura de imagem baseado em computador.....	13
Figura 6: Exemplo de histograma de uma imagem digital .....	14
Figura 7: Transformação linear "Stretch" .....	15
Figura 8: Resultado da operação linear "Stretch" .....	16
Figura 9: Ajuste de brilho.....	17
Figura 10: Exemplos de propriedades geométricas de um objeto .....	18
Figura 11: Exemplo de área de objeto .....	19
Figura 12: Definição de razão de aspecto .....	20
Figura 13: Fluxograma simplificado da seqüência de adições no refino secundário dos aços estudados .....	26
Figura 14: Momento da retirada das amostras nos diferentes estágios do processo .....	27
Figura 15: Indicação do local e o momento da retirada da amostra .....	31
Figura 16: Coquilha na parte interna do cartucho.....	32
Figura 17: Imagem à esquerda indica o dispositivo utilizado para a retirada da amostra no distribuidor, e a imagem à direita, um exemplo da amostra colhida .....	32
Figura 18: Diagrama da localização da amostra.....	33

Figura 19: Foto da amostra da corrida P3 na etapa LC2 - 1000x Dark Field.....	38
Figura 20: Detalhe da eliminação do halo de difração pelo ajuste de contraste e brilho.....	39
Figura 21: Imagem binarizada da amostra da corrida P3 na etapa LC2 - 1000x.....	39
Figura 22: Distribuição das inclusões por $\text{mm}^2$ da corrida M2 na adição de CaSi....	44
Figura 23: Distribuição das inclusões por $\text{mm}^2$ da corrida M2 60 minutos após o fim da turbulência no distribuidor.....	44
Figura 24: Distribuição da porcentagem da área ocupada pelas inclusões da corrida M2 na adição de CaSi .....	45
Figura 25: Distribuição da porcentagem da área ocupada pelas inclusões da corrida M2 60 minutos após o fim da turbulência no distribuidor.....	45
Figura 26: Distribuição da razão de aspecto das inclusões da corrida M2 na adição de CaSi.....	46
Figura 27: Distribuição da razão de aspecto das inclusões da corrida M2 60 minutos após o fim da turbulência no distribuidor .....	46
Figura 28: Distribuição do diâmetro equivalente das inclusões na corrida M2 na adição de CaSi .....	47
Figura 29: Distribuição do diâmetro equivalente das inclusões na corrida M2 60 minutos após o fim da turbulência no distribuidor.....	47
Figura 30: Distribuição da maior dimensão das inclusões na corrida M2 na adição de CaSi.....	48
Figura 31: Distribuição da maior dimensão das inclusões na corrida M2 60 minutos após o fim da turbulência no distribuidor .....	48
Figura 32: Distribuição das inclusões por $\text{mm}^2$ da corrida P1 na adição de S .....	51

Figura 33: Distribuição das inclusões por $\text{mm}^2$ da corrida M2 60 minutos após o fim da turbulência no distribuidor.....	51
Figura 34: Distribuição da porcentagem da área ocupada pelas inclusões da corrida P1 na adição de S .....	52
Figura 35: Distribuição da porcentagem da área ocupada pelas inclusões da corrida P1 60 minutos após o fim da turbulência no distribuidor .....	52
Figura 36: Distribuição da razão de aspecto das inclusões da corrida P1 na adição de S .....	53
Figura 37: Distribuição da razão de aspecto das inclusões da corrida P1 60 minutos após o fim da turbulência no distribuidor .....	53
Figura 38: Distribuição do diâmetro equivalente das inclusões na corrida P1 na adição de S.....	54
Figura 39: Distribuição do diâmetro equivalente das inclusões na corrida P1 60 minutos após o fim da turbulência no distribuidor.....	54
Figura 40: Distribuição da maior dimensão das inclusões na corrida P1 na adição de S .....	55
Figura 41: Distribuição da maior dimensão das inclusões na corrida P1 60 minutos após o fim da turbulência no distribuidor .....	55
Figura 42: Distribuição das inclusões por $\text{mm}^2$ da corrida P2 na adição de S .....	58
Figura 43: Distribuição das inclusões por $\text{mm}^2$ da corrida P2 60 minutos após o fim da turbulência no distribuidor.....	59
Figura 44: Distribuição da porcentagem da área ocupada pelas inclusões da corrida P2 na adição de S .....	60

Figura 45: Distribuição da porcentagem da área ocupada pelas inclusões da corrida P2 60 minutos após o fim da turbulência no distribuidor .....	60
Figura 46: Distribuição da razão de aspecto das inclusões da corrida P2 na adição de S .....	61
Figura 47: Distribuição da razão de aspecto das inclusões da corrida P2 60 minutos após o fim da turbulência no distribuidor .....	61
Figura 48: Distribuição do diâmetro equivalente das inclusões na corrida P2 na adição de S.....	62
Figura 49:Distribuição do diâmetro equivalente das inclusões na corrida P2 60 minutos após o fim da turbulência no distribuidor.....	62
Figura 50: Distribuição da maior dimensão das inclusões na corrida P2 na adição de S .....	63
Figura 51: Distribuição da maior dimensão das inclusões na corrida P2 60 minutos após o fim da turbulência no distribuidor .....	63
Figura 52: Distribuição das inclusões por $\text{mm}^2$ da corrida P3 na adição de S .....	66
Figura 53: Distribuição das inclusões por $\text{mm}^2$ da corrida P3 30 minutos após o fim da turbulência no distribuidor.....	66
Figura 54: Distribuição da porcentagem da área ocupada pelas inclusões da corrida P3 na adição de S .....	67
Figura 55: Distribuição da porcentagem da área ocupada pelas inclusões da corrida P3 30 minutos após o fim da turbulência no distribuidor .....	67
Figura 56: Distribuição da razão de aspecto das inclusões da corrida P3 na adição de S .....	68

Figura 57: Distribuição da razão de aspecto das inclusões da corrida P3 30 minutos após o fim da turbulência no distribuidor .....	68
Figura 58: Distribuição do diâmetro equivalente das inclusões na corrida P3 na adição de S.....	69
Figura 59: Distribuição do diâmetro equivalente das inclusões na corrida P3 30 minutos após o fim da turbulência no distribuidor.....	69
Figura 60: Distribuição da maior dimensão das inclusões na corrida P3 na adição de S .....	70
Figura 61: Distribuição da maior dimensão das inclusões na corrida P3 30 minutos após o fim da turbulência no distribuidor .....	70
Figura 62: Distribuição das inclusões por $\text{mm}^2$ da corrida P4 na adição de S.....	73
Figura 63: Distribuição das inclusões por $\text{mm}^2$ da corrida P4 imediatamente após o fim da turbulência no distribuidor.....	73
Figura 64: Distribuição da porcentagem da área ocupada pelas inclusões da corrida P4 na adição de S .....	74
Figura 65: Distribuição da porcentagem da área ocupada pelas inclusões da corrida P4 imediatamente após o fim da turbulência no distribuidor .....	74
Figura 66: Distribuição da razão de aspecto das inclusões da corrida P4 na adição de S .....	75
Figura 67: Distribuição da razão de aspecto das inclusões da corrida P4 imediatamente após o fim da turbulência no distribuidor.....	75
Figura 68: Distribuição do diâmetro equivalente das inclusões na corrida P4 na adição de S.....	76

Figura 69: Distribuição do diâmetro equivalente das inclusões na corrida P4 imediatamente após o fim da turbulência no distribuidor.....	76
Figura 70: Distribuição da maior dimensão das inclusões na corrida P4 na adição de S .....	77
Figura 71: Distribuição da maior dimensão das inclusões na corrida P4 imediatamente após o fim da turbulência no distribuidor.....	77
Figura 72: Distribuição das inclusões por $\text{mm}^2$ da corrida P7 na adição de S.....	80
Figura 73: Distribuição das inclusões por $\text{mm}^2$ da corrida P7 30 minutos após o fim da turbulência no distribuidor.....	80
Figura 74: Distribuição da porcentagem da área ocupada pelas inclusões da corrida P7 na adição de S .....	81
Figura 75: Distribuição da porcentagem da área ocupada pelas inclusões da corrida P7 30 minutos após o fim da turbulência no distribuidor .....	81
Figura 76: Distribuição da razão de aspecto das inclusões da corrida P7 na adição de S .....	82
Figura 77: Distribuição da razão de aspecto das inclusões da corrida P7 30 minutos após o fim da turbulência no distribuidor .....	82
Figura 78: Distribuição do diâmetro equivalente das inclusões na corrida P7 na adição de S.....	83
Figura 79: Distribuição do diâmetro equivalente das inclusões na corrida P7 30 minutos após o fim da turbulência no distribuidor.....	83
Figura 80: Distribuição da maior dimensão das inclusões na corrida P7 na adição de S .....	84

Figura 81:Distribuição da maior dimensão das inclusões na corrida P7 30 minutos após o fim da turbulência no distribuidor .....	84
--	----

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composições dos aços analisados.....	24
Tabela 2: Relação das corridas analisadas e os compostiões de aços estudados .	25
Tabela 3: Nomenclatura das amostras quanto ao estágio do processo de retirada	27
Tabela 4: Resumo do efeito das composições das inclusões por corrida .....	29
Tabela 5: Comparações das informações obtidas da corrida M2 .....	42
Tabela 6: Comparações das informações obtidas da corrida P1.....	49
Tabela 7: Comparações das informações obtidas da corrida P2.....	56
Tabela 8: Comparações das informações obtidas da corrida P3.....	64
Tabela 9: Comparações das informações obtidas da corrida P4.....	71
Tabela 10: Comparações das informações obtidas da corrida P7.....	78

## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Vv	Fração Volumétrica
Aa	Fração em área
PPM	Partes por milhão
CCD	Charge-Coupled Device

## SUMÁRIO

1	OBJETIVOS .....	1
2	INTRODUÇÃO .....	2
2.1	Motivação .....	2
2.2	Processo utilizado para atingir os objetivos .....	2
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	4
3.1	Inclusões .....	4
3.1.1	Alumina .....	5
3.1.2	Aluminatos de cálcio .....	6
3.1.3	Sulfeto de Cálcio .....	8
3.1.4	Sulfeto de Manganês .....	8
3.1.5	Espinélio.....	9
3.1.6	Do ponto de vista da deformabilidade .....	10
3.1.7	Do ponto de vista da geração e eliminação de inclusões entre o forno panela e o distribuidor .....	10
3.2	Estereologia .....	11
3.3	Análise de imagens .....	12
3.3.1	Processo de aquisição de imagens digitalizadas pelo computador....	12
3.3.2	Exibição e armazenamento .....	13
3.3.3	Tratamentos de imagem .....	13
3.3.3.1	Histograma da Imagem .....	14
3.3.3.2	Contraste .....	15
3.3.3.3	Brilho .....	16
3.3.3.4	Binarização .....	17
3.3.3.5	Medidas .....	18
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	22
4.1	Materiais.....	22
4.1.1	Aços analisados .....	22
4.1.2	Corridas analisadas.....	25
4.1.3	Processo de fabricação dos tipos de aços analisados.....	25
4.1.4	Posições no processo de onde foram retiradas as amostras.....	26

4.1.5	Inclusões observadas por MORAES <sup>(1)</sup> nas corridas.....	28
4.1.5.1	Características ideais .....	28
4.1.5.2	Conclusões sobre as corridas durante o lingotamento contínuo .....	28
4.1.5.3	Efeito das composições das inclusões nas corridas analisadas.....	29
4.2	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL .....	31
4.2.1	Retirada das amostras .....	31
4.2.2	Preparação da amostra.....	32
4.2.3	Metalografia e preparação das amostras .....	33
4.2.3.1	Corte das amostras .....	33
4.2.3.2	Embutimento.....	34
4.2.3.3	Lixamento .....	35
4.2.3.4	Polimento.....	35
4.2.3.5	Ataque .....	36
4.3	ANÁLISE DE IMAGENS.....	37
4.3.1	Observação ao microscópio.....	37
4.3.2	Registro das imagens.....	37
4.3.3	Tratamento de imagens .....	38
4.3.4	Análise de imagens .....	40
4.3.5	Tratamento de dados .....	40
4.3.6	Automação do processo.....	40
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	41
5.1	Corrida M2: Comparação entre A5 e LC3 .....	42
5.1.1	Distribuição do número de inclusões por mm <sup>2</sup> .....	44
5.1.2	Distribuição da fração de área das inclusões.....	45
5.1.3	Distribuição da razão de aspecto das inclusões.....	46
5.1.4	Distribuição de tamanho das inclusões: diâmetro equivalente (µm) ...	47
5.1.5	Distribuição de tamanho das inclusões: comprimento da maior dimensão (µm).....	48
5.2	Corrida P1: Comparação entre A6 e LC3.....	49
5.2.1	Distribuição do número de inclusões por mm <sup>2</sup> .....	51
5.2.2	Distribuição da fração de área das inclusões.....	52
5.2.3	Distribuição da razão de aspecto das inclusões.....	53

5.2.4	Distribuição de tamanho das inclusões: diâmetro equivalente ( $\mu\text{m}$ ) ...	54
5.2.5	Distribuição de tamanho das inclusões: comprimento da maior dimensão ( $\mu\text{m}$ ).....	55
5.3	Corrida P2: Comparação entre A6 e LC3.....	56
5.3.1	Distribuição do número de inclusões por $\text{mm}^2$ .....	58
5.3.2	Distribuição da fração de área das inclusões.....	59
5.3.3	Distribuição da razão de aspecto das inclusões.....	61
5.3.4	Distribuição de tamanho das inclusões: diâmetro equivalente ( $\mu\text{m}$ ) ...	62
5.3.5	Distribuição de tamanho das inclusões: comprimento da maior dimensão ( $\mu\text{m}$ ).....	63
5.4	Corrida P3: Comparação entre A6 e LC2.....	64
5.4.1	Distribuição do número de inclusões por $\text{mm}^2$ .....	66
5.4.2	Distribuição da fração de área das inclusões.....	67
5.4.3	Distribuição da razão de aspecto das inclusões.....	68
5.4.4	Distribuição de tamanho das inclusões: diâmetro equivalente ( $\mu\text{m}$ ) ...	69
5.4.5	Distribuição de tamanho das inclusões: comprimento da maior dimensão ( $\mu\text{m}$ ).....	70
5.5	Corrida P4: Comparação entre A6 e LC1.....	71
5.5.1	Distribuição do número de inclusões por $\text{mm}^2$ .....	73
5.5.2	Distribuição da fração de área das inclusões.....	74
5.5.3	Distribuição da razão de aspecto das inclusões.....	75
5.5.4	Distribuição de tamanho das inclusões: diâmetro equivalente ( $\mu\text{m}$ ) ...	76
5.5.5	Distribuição de tamanho das inclusões: comprimento da maior dimensão ( $\mu\text{m}$ ).....	77
5.6	Corrida P7: Comparação entre A6 e LC2.....	78
5.6.1	Distribuição do número de inclusões por $\text{mm}^2$ .....	80
5.6.2	Distribuição da fração de área das inclusões.....	81
5.6.3	Distribuição da razão de aspecto das inclusões.....	82
5.6.4	Distribuição de tamanho das inclusões: diâmetro equivalente ( $\mu\text{m}$ ) ...	83
5.6.5	Distribuição de tamanho das inclusões: comprimento da maior dimensão ( $\mu\text{m}$ ).....	84
6	CONCLUSÕES .....	85

7	REFERÊNCIAS .....	87
8	ANEXO A .....	90
8.1	Aumento de 1000x .....	90
8.2	Aumento de 500x .....	91
8.3	Aumento de 200x .....	93
8.4	Aumento de 100x .....	95
8.5	Aumento de 50x .....	96

## 1 OBJETIVOS

Etapa 1 – MORAES<sup>(1)</sup> caracterizou a composição e a microestrutura das inclusões em diferentes corridas de aço ressulfurado acalmado ao alumínio. No presente trabalho, o objetivo primário é complementar o trabalho de MORAES<sup>(1)</sup>, caracterizando as corridas de aço ressulfurado analisadas em seu trabalho ao fim do refino secundário do aço e no início do lingotamento contínuo, em relação às seguintes médias, desvios padrão e histogramas:

- Número de inclusões por mm<sup>2</sup>
- Fração de área ocupada pelas inclusões
- Razão de aspecto
- Diâmetro equivalente
- Maior dimensão

Etapa 2 – O objetivo secundário é relacionar os resultados da etapa 1 às conclusões obtidas por MORAES<sup>(1)</sup>, discutindo as variações entre os dados das etapas do refino secundário e o lingotamento contínuo.

## 2 INTRODUÇÃO

### 2.1 Motivação

As propriedades mecânicas dos aços são dependentes da composição química, da microestrutura e dos tratamentos térmicos e mecânicos aos quais são submetidos. Contudo, defeitos estruturais como as inclusões não metálicas - sua distribuição de tamanho, composição química e morfologia – modificam o desempenho deste material quando submetido a esforço mecânico<sup>(2)</sup>.

Assim, um dos requisitos-chave encontrados pelas indústrias para manter a competitividade na fabricação do aço em relação à competição estrangeira e abrir novos mercados é o controle das inclusões não metálicas nos seus produtos<sup>(3)</sup>, sendo crítica a caracterização das inclusões nas corridas de aço, mensurando os efeitos das etapas do processo de produção nas características do produto final.

### 2.2 Processo utilizado para atingir os objetivos

Segundo Vilela<sup>(4)</sup>, das técnicas de caracterização consideradas mais promissoras, a análise de imagens, comparada com outros métodos utilizados pela indústria, possui dificuldade intermediária de operação, tempo de resposta de 3 horas e custo intermediário, e consiste em extrair informações relevantes contidas nas imagens por meio de processamento digital de dados.

As imagens utilizadas neste trabalho foram capturadas com uma câmera digital acoplada a um microscópio óptico com a luz polarizada no campo escuro (dark field), o que permitiu ver as inclusões presentes nos aços estudados<sup>(5)</sup>.

Como não se teve acesso aos softwares comerciais utilizados pelas indústrias para o processamento de múltiplas imagens, foi desenvolvido neste trabalho um algoritmo para automatizar a análise das inclusões, com baixa

dificuldade de operação e tempo de resposta de menos de uma hora e implementado num um programa Open Source e de domínio público, o ImageJ.

Os dados gerados pela análise foram analisados em um programa de planilha eletrônica, recebendo correções por meio de cálculos e filtros para eliminar as discrepâncias intrínsecas ao processo de aquisição de imagens. Os histogramas, médias e desvios padrão das diferentes etapas e corridas foram discutidos e relacionados aos resultados de MORAES<sup>(1)</sup>, obtendo assim as conclusões do trabalho.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para desenvolver o tema proposto serão revisados os seguintes temas: inclusões e estereologia.

Das inclusões, serão mostradas as características mecânicas e composições químicas dos principais tipos de inclusão. Da estereologia, serão descritos além dos conceitos básicos, também os detalhes relevantes dos principais os métodos de análise de imagem utilizados.

#### 3.1 Inclusões

Inclusões são partículas não metálicas cuja existência é inerente aos processos de produção industrial do aço e são responsáveis por produzir defeitos durante o processamento dos produtos na sua aplicação final. Na prática, as inclusões são classificadas como endógenas quando se originam de reações que acontecem no próprio aço e exógenas quando sua origem é de fontes externas ao aço.

As inclusões exógenas são principalmente fruto da lixiviação de materiais refratários dos fornos, materiais de isolamento térmico ou fluxantes durante o processamento e solidificação do aço. Essas inclusões geralmente possuem tamanho maior do que 50  $\mu\text{m}$  e ocorrência esporádica, preferencialmente numa placa ou lingote. Por via de regra, devem sempre ser evitadas e não é possível discutir sistematicamente esse tipo de inclusão, pois isso dependerá da prática individual de cada aciaria. <sup>(6)</sup>

Por outro lado, as inclusões endógenas são principalmente produtos da desoxidação e da reoxidação do aço durante o processo de refino secundário e são formadas basicamente pelo oxigênio e enxofre, sempre presentes em sua composição. Suas quantidades, tamanho, forma e distribuição podem ser

modificadas por adições de elementos de liga, mas sua presença nunca poderá ser evitada.<sup>(6)</sup>

Serão tratados os tipos de inclusões que segundo MORAES<sup>(1)</sup> estão presentes nas amostras analisadas neste trabalho.

### 3.1.1 Alumina

As inclusões de alumina ( $Al_2O_3$ ) são inclusões caracterizadas por serem duras (3.000-4.500 Kp/mm<sup>2</sup>) e de alta temperatura de fusão (2050°C) e composição normalmente pura, embora possa ter traços de outros óxidos de metais<sup>(7)</sup>.



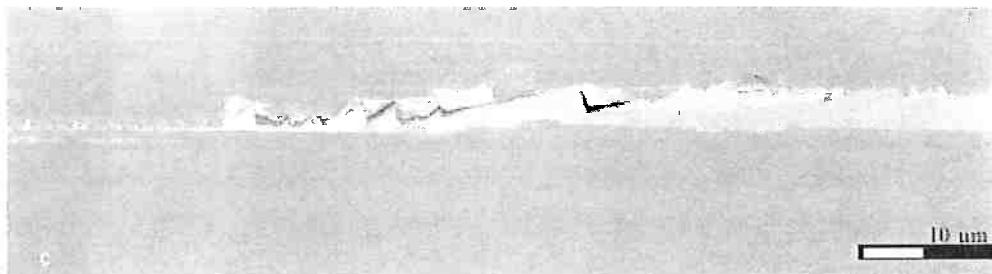
Figura 1: Inclusão de alumina de formato dendrítico em aço ressulfurado acalmado ao alumínio.<sup>(2)</sup>

Segundo DEKKERS as morfologias possíveis da alumina pura são: esferas, poliedros, placas, dendritas (Figura 1<sup>(2)</sup>) e clusters, sendo originadas na sua maior parte a partir das seguintes fontes<sup>(8)</sup>:

- A desoxidação do aço, quando é utilizado um arame de alumínio para reagir com o oxigênio dissolvido no aço e gerar  $Al_2O_3$

- A re-oxidação do aço, que ocorre quando há o contato do banho desoxidado com o ar, consumindo o alumínio dissolvido no banho para gerar  $Al_2O_3$ .
- Partículas que se originaram dos refratários <sup>(9)</sup>

Pela sua elevada dureza, inclusões de alumina não se deformam durante a laminação do aço, gerando assim defeitos durante a deformação mecânica dos aços, como mostra a Figura 2<sup>(2)</sup>.



**Figura 2: Danos causados pela alumina na superfície de uma chapa<sup>(2)</sup>**

Um dos problemas característicos das inclusões de alumina no fluxo da produção do aço é a obstrução de válvulas submersas ("Clogging"), que ocorre porque as inclusões estão no estado sólido nas temperaturas de lingotamento, formando depósitos de alumina nas válvulas. Essa obstrução impede o controle do nível de aço no molde, podendo resultar em macro-inclusões indesejáveis no produto.

### 3.1.2 Aluminatos de cálcio

Após a desoxidação com arame de alumínio e a consequente geração de alumina - de elevada dureza e de difícil remoção do aço<sup>(1)</sup> - é necessário a adição do arame de CaSi com objetivo de modificar a morfologia das inclusões angulosas

(maior razão de aspecto) de alumina em inclusões de cantos arredondados (menor razão de aspecto) de aluminatos de cálcio, os quais possuem um ponto de fusão menor, podendo estar líquidos nas temperaturas do processo da aaciaria. Portanto as inclusões de cálcio aluminatos são mais dúcteis que a alumina e menos nocivas às propriedades mecânicas do aço no produto final, evitando também problemas de entupimento nas válvulas submersas no lingotamento contínuo quando no estado líquido<sup>(10)</sup>. O aluminato de cálcio também é gerado também a partir da interação da escória quando há a adição da cal e também serve de base para a precipitação posterior de MnS e CaS.

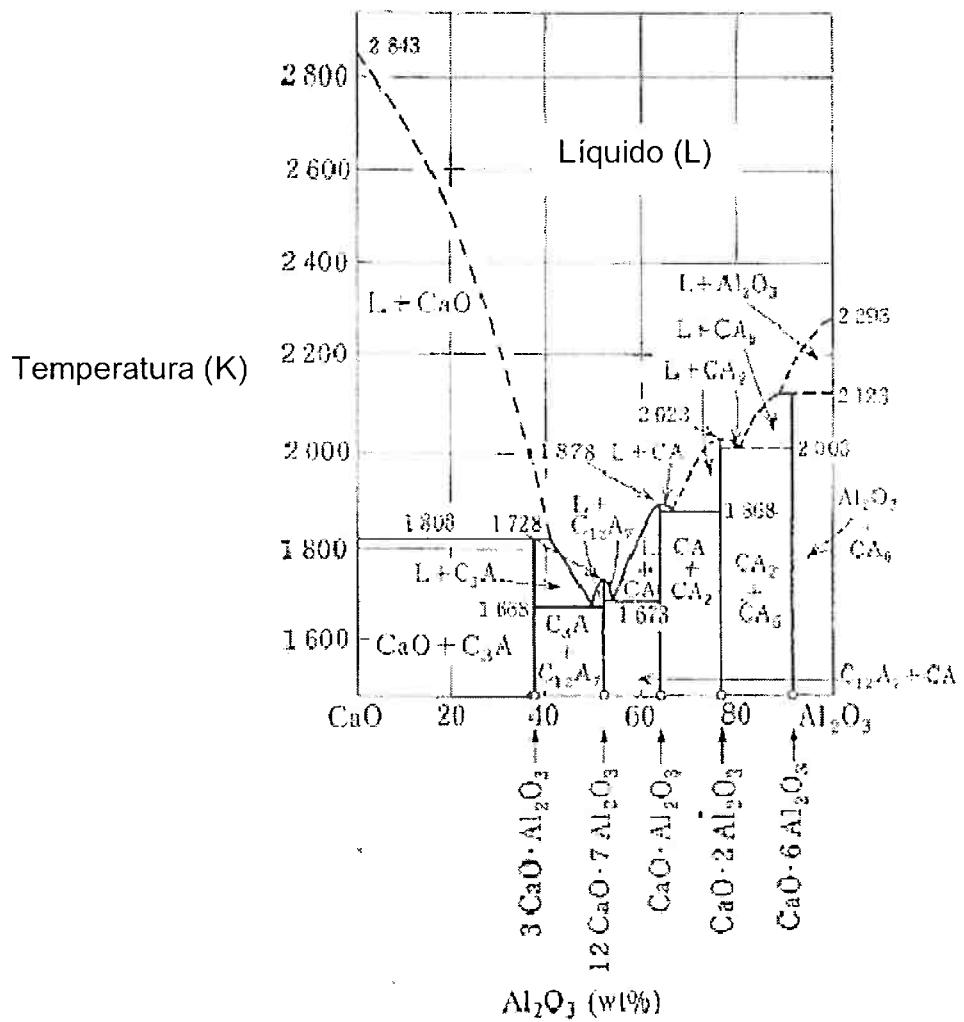


Figura 3: Binário CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>(2)</sup>

A Figura 3 <sup>(2)</sup> é o binário CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, o qual mostra o eutético formado com a adição de cálcio no aço, e este reagindo com oxigênio formado CaO e este se combinando com a alumina.

De acordo com o diagrama de equilíbrio entre CaO - Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Figura 3<sup>(2)</sup>) pode-se notar que conforme os teores de CaO aumentam, os pontos de fusão dos aluminatos diminuem até o eutético 12CaO.7Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> de temperatura aproximada de 1400°C, líquido à temperatura que ocorre o lingotamento de 1600°C.

Abaixo está a sequência da modificação de inclusões. O aumento da quantidade de Ca possibilita a modificação das inclusões de alumina até gerar os aluminatos de cálcio líquidos.

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> → CA<sub>6</sub> → CA<sub>2</sub> → CA → aluminatos de cálcio líquidos, “C” representando CaO e “A”, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

### 3.1.3 Sulfeto de Cálcio

Um dos efeitos indesejados da adição do CaSi é a sua reação com o enxofre dissolvido no banho, podendo formar as nocivas inclusões de CaS, que é sólido nas temperaturas de aciaria. A formação do CaS ocorre na a adição do CaSi quando a atividade da alumina baixa além de um valor crítico, resultando numa inclusão composta de aluminato de cálcio com uma crosta de CaS ao redor do núcleo, sendo que desse modo, o CaS é sólido nas temperaturas de aciaria e assim como a alumina, resulta no entupimento das válvulas submersas. Também é necessário o controle do teor de enxofre antes da adição de CaSi, pois para atingir a atividade 1, na qual acontece a precipitação de CaS, são necessários somente 35 PPM de enxofre dissolvido no aço<sup>(11)</sup>.

### 3.1.4 Sulfeto de Manganês

A terceira injeção de arame no processo é o de S, ocorrendo nesta etapa a reação do Mn presente no aço com o S do arame formando MnS, líquido à temperatura do lingotamento contínuo. Quanto maior for o teor de Mn no aço, maior será a quantidade de MnS em solução com CaS e consequentemente, menor será o teor de CaS no aço. Ou seja, a quantidade do CaS nas inclusões depende basicamente da quantidade (teor) de Mn no aço.

As inclusões de MnS se caracterizam por precipitar ao redor das inclusões de aluminatos de cálcio líquido, junto com o CaS (as quais se formam em torno das inclusões de alumina) e são caracterizadas por serem dúcteis e de baixa dureza. Quando deformadas, as inclusões de MnS se tornam alongadas, e as inclusões de aluminato ou alumina não se deformam, permanecendo na forma de grãos dentro da fase MnS deformada.

Mecanicamente o sulfeto de manganês melhora a usinabilidade do aço, pois lubrifica a interface ferramenta-cavaco durante a operação de corte e promove a quebra dos cavacos, aumentando a vida útil da ferramenta<sup>(12)</sup>.

### 3.1.5 Espinélio

O espinélio possue ponto de fusão de 2135°C e dureza de 2300 Kp/mm<sup>2</sup> e é formado pelos óxidos MgO e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sendo sólido na temperatura de lingotamento e causando assim como a alumina, obstrução da válvula durante o lingotamento contínuo. O tratamento com cálcio não modifica as inclusões do tipo espinélio<sup>(2)</sup>.

Inclusões contendo MgO são caracterizadas como tendo origem exógena, principalmente os refratários no caso do forno e da panela e as válvulas e distribuidores no lingotamento contínuo.

### 3.1.6 Do ponto de vista da deformabilidade

A Figura 4 mostra esquematicamente alguns tipos de inclusão no quesito deformação mecânica do aço em produtos lingotados e laminados.

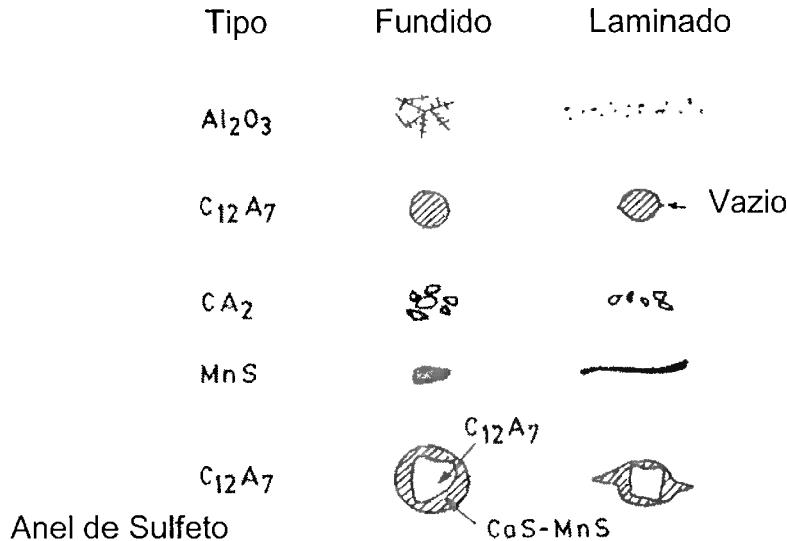


Figura 4: Comportamento das inclusões após conformação mecânica do aço<sup>(1)</sup>

Pode-se observar na Figura 4 as inclusões dendríticas de alumina, as globulares de aluminatos de cálcio indeformáveis, as de aluminatos de cálcio "frágeis", as sulfeto de manganês dúcteis e as de aluminatos de cálcio com anel de sulfeto de cálcio e manganês ao seu redor.<sup>(1)</sup>

### 3.1.7 Do ponto de vista da geração e eliminação de inclusões entre o forno panela e o distribuidor

Entre as adições de elementos de liga no forno panela e o fim da turbulência no distribuidor pode ocorrer a geração de inclusões pela reoxidação do aço e por degradação do refratário. Já a eliminação de inclusões ocorre pela flotação regida pela lei de Stokes:

$$v = \frac{g}{18\eta} (\rho_m - \rho_i) d^2$$

Variáveis:  $\eta$  a viscosidade do metal,  $v$  a velocidade de flotação,  $g$  a gravidade,  $d$  o diâmetro da inclusão,  $\rho_m$  a densidade do metal e  $\rho_i$  a densidade da inclusão.

Portanto, quanto maior a o diâmetro da partícula, maior será a probabilidade da velocidade de flotação da partícula ser alta e assim, maior a probabilidade da partícula ser eliminada.

### 3.2 Estereologia

Estereologia é o ramo da ciência que trata da inferência de propriedades tridimensionais de objetos a partir de seções bidimensionais dos mesmos<sup>(13)</sup>. Na prática, ela foi originalmente definida na ciência moderna como "a interpretação espacial das seções" e é um método que usa os princípios fundamentais da geometria e os da estatística como a amostragem aleatória e sistemática para coletar dados de modo imparcial e quantitativo<sup>(14)</sup>.

Dos princípios geométricos básicos, um deles é o princípio de Delesse, o qual foi definido da seguinte maneira: "Numa rocha composta de certa quantidade de minerais, a área ocupada por qualquer mineral na superfície da seção da rocha é proporcional ao volume do mineral na rocha"(15). Portanto, a fração volumétrica de um mineral numa rocha pode ser encontrada a partir da fração em área do mineral numa seção da rocha.

O princípio de Delesse também pode ser utilizado na ciência dos materiais, pois foi demonstrado matematicamente por Weibel<sup>(15)</sup>, o qual provou que a fração volumétrica de um material é igual à sua fração de área ( $Vv = Aa$ ) a partir de medidas de fração de área feitas de modo aleatório.

Portanto, no estudo das inclusões, pode-se assim inferir a fração volumétrica das inclusões num material a partir de sua fração em área nas seções de uma amostra utilizando uma quantidade representativa imagens das seções planares amostradas de modo aleatório <sup>(16)</sup> as partir da quais é assim extrapolada esta propriedades tridimensionais do material.

O cálculo das frações em área poderia ser feito manualmente. Mas, para maior precisão e velocidade na análise de um grande número de imagens é necessário um método mais prático do que o processo manual, sendo atualmente utilizados processos de análise assistidos por computadores.

### 3.3 Análise de imagens

Ao polir as amostras de metal embutidas em baquelite e observá-las ao microscópio óptico, podem-se utilizar métodos computacionais para a aquisição e processamento da imagem a fim de se melhorar a visibilidade da estrutura desejada e assim extrair os dados desejados e os armazenar para análise posterior.

#### 3.3.1 Processo de aquisição de imagens digitalizadas pelo computador

Um típico sistema de aquisição de imagens assistido por computador é mostrado na Figura 5<sup>(17)</sup>. Para que possam se ampliar as imagens da amostra é utilizado um microscópio e para aquisição das imagens, uma câmera. Atualmente são mais utilizadas câmeras de estado sólido do tipo CCD pelo seu custo menor na fabricação de câmeras de alta qualidade <sup>(18)</sup>. As imagens da câmera então digitalizadas por um software no computador e são armazenadas na memória e exibidas, armazenadas ou impressa, como pode se ver na Figura 5<sup>(17)</sup>

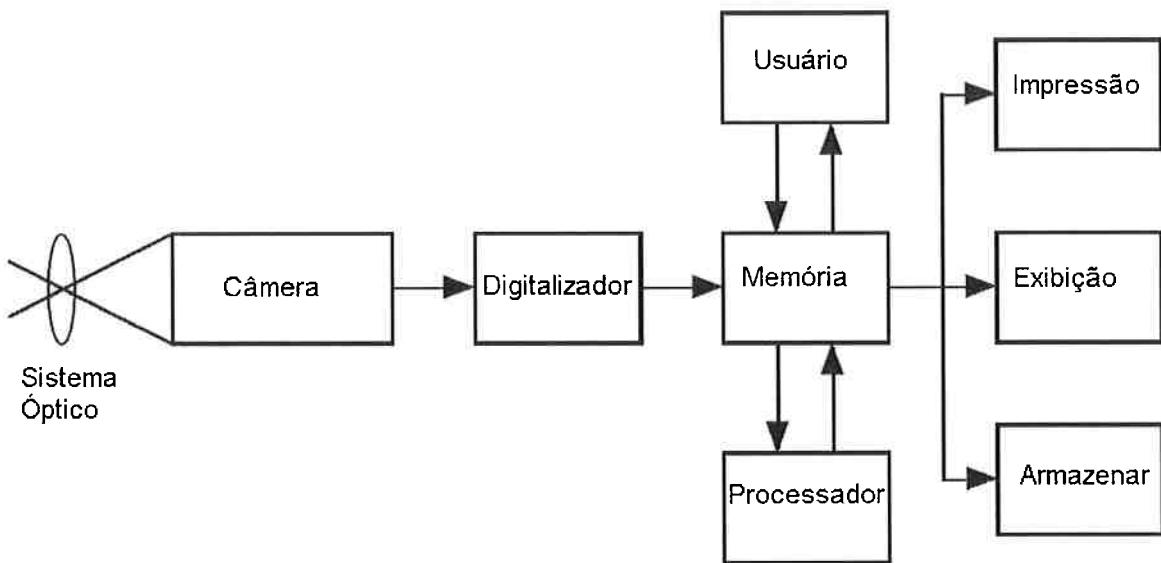


Figura 5: Diagrama de blocos de um sistema de captura de imagem baseado em computador<sup>(17)</sup>

### 3.3.2 Exibição e armazenamento

Uma das razões pelas quais transferir a imagem para o computador no formato digital é desejável é a flexibilidade com a qual pode ser exibida na tela do computador<sup>(19)</sup>. A imagem é representada por meio de pixels e salva num formato de arquivo de imagem sem perda, o qual pode ser em seguida ser usado para análise computacional. Para aplicações de ciência dos materiais, são usadas por padrão imagens em escala cinza (256 tonalidades - do branco 0 ao preto 255), pois representam melhor as morfologias das microestruturas.<sup>(18)</sup>

### 3.3.3 Tratamentos de imagem

Quando se adquirem as imagens, estas possuem certas distorções indesejadas, advindas tanto do preparo das amostras quanto dos instrumentos de captura de imagem. Idealmente essas distorções deveriam ser corrigidas antes das imagens serem adquiridas<sup>(20)</sup>, mas na realidade essas correções não são sempre possíveis ou práticas de serem realizadas. Portanto, as imagens adquiridas rotineiramente precisam ser tratadas antes da análise.<sup>(18)</sup>

### 3.3.3.1 Histograma da Imagem

O histograma de uma imagem é representação gráfica da distribuição do número de pixels de uma imagem em função das 256 tonalidades de pixels das imagens em escala cinza, como podemos observar na Figura 6<sup>(20)</sup>. A característica desse tipo de histograma é que ele não preserva a informação espacial da distribuição dos pixels, pois este contém apenas a quantidade de pixels com uma determinada tonalidade de cinza, mas não a sua posição na imagem.

Todas as operações básicas de tratamento de distorções são realizadas a partir do histograma das imagens, as quais se refletem em alterações na imagem.

(20)

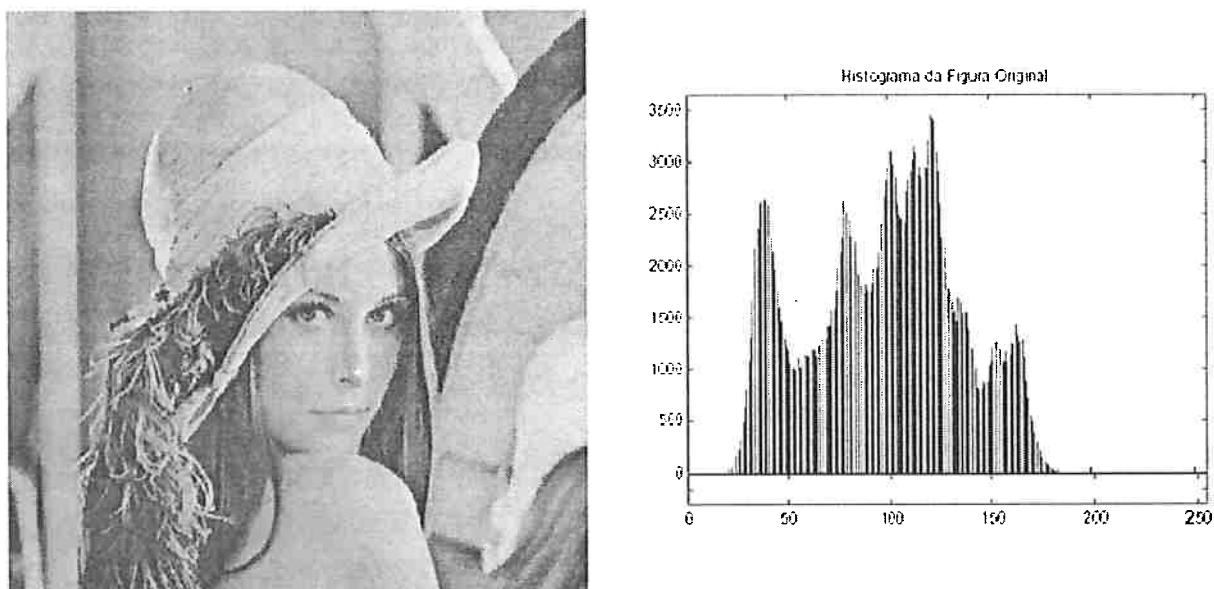


Figura 6: Exemplo de histograma de uma imagem digital<sup>(20)</sup>

### 3.3.3.2 Contraste

A quantidade de tonalidades cinza que as imagens analisadas possuem (256) é muito superior à capacidade do olho humano de distinguir as variações de tons, já que estes órgãos são capazes de identificar apenas 20 tonalidades de cinza numa dada fotografia.<sup>(18)</sup> Assim, para que detalhes em tons muito próximos de cinza possam ser mais bem visualizados pelo olho humano, é então realizada uma transformação linear chamada "Stretch" no histograma, na qual são mapeados o valor mais baixo (a) e o mais alto (b) dos tons de cinza de uma determinada figura e são atribuídos a eles respectivamente 0 (preto) e 255 (branco), sendo todos os outros valores intermediários normalizados segundo esta escala, como mostra a Figura 8<sup>(20)</sup>. O resultado desta transformação linear é um contraste melhor ou no mínimo igual ao da imagem em escala cinza original e é similar a uma "expansão" do histograma como mostra a Figura 7.<sup>(21)</sup>

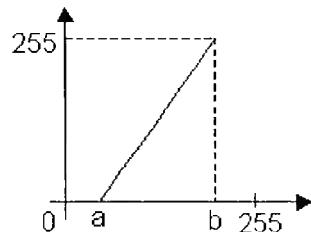


Figura 7: Transformação linear "Stretch"<sup>(21)</sup>

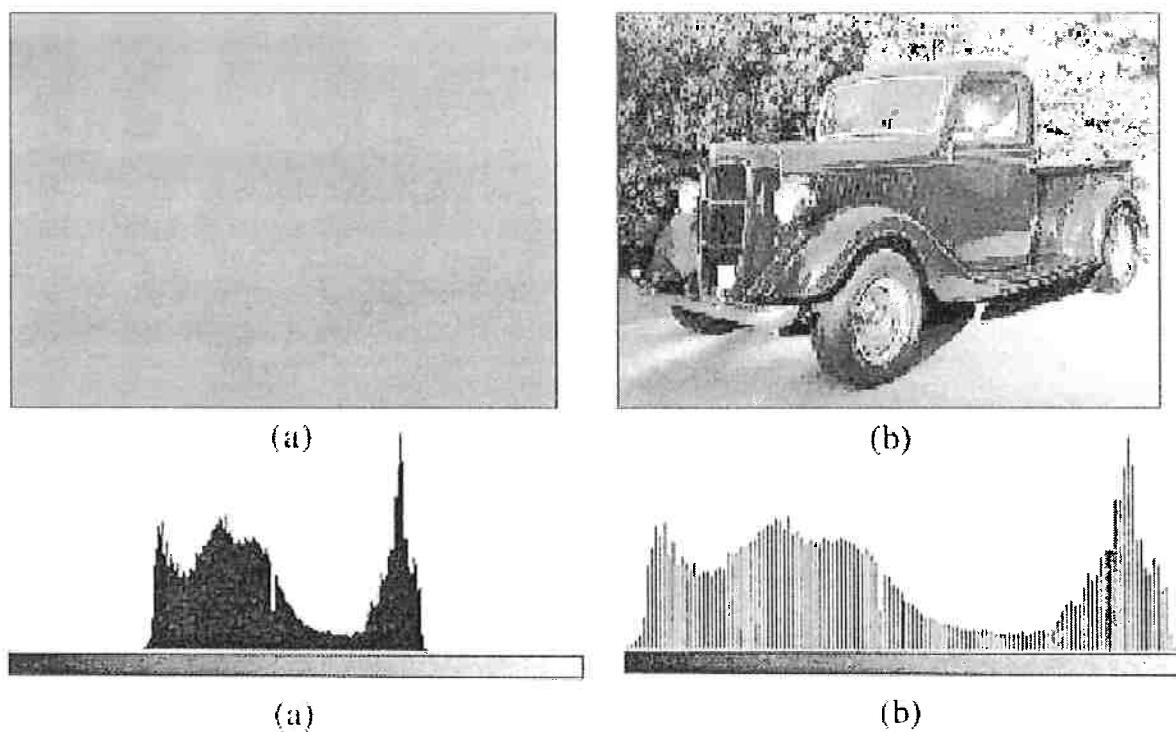


Figura 8: Resultado da operação linear "Stretch"<sup>(20)</sup>

### 3.3.3.3 Brilho

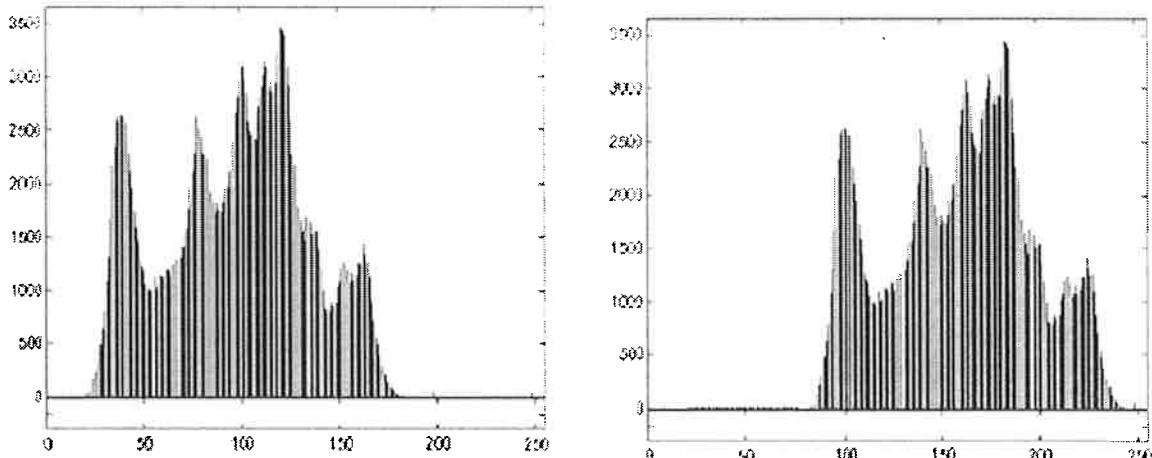
São quatro as principais causas de distorções nas imagens:

- As ferramentas de aquisição, assim como as de digitalização de imagens atenuam a luz em função da distância do eixo óptico.
- A foto-sensitividade dos sensores utilizados não é uniforme.
- A iluminação desigual de objetos.
- A presença dos halos de difração.

Todas essas fontes de interferência afetam o brilho das imagens e precisam ser corrigidas antes da etapa de análise de imagem, para que não interfiram na extração dos dados de interesse.

Assim, é realizada uma operação de soma/subtração pontual da intensidade dos pixels no histograma para diminuir ou acentuar o brilho das imagens,

equivalente a respectivamente mover o histograma para a direita ou para a esquerda, como mostra a Figura 9.



**Figura 9: Ajuste de brilho<sup>(20)</sup>**

### 3.3.3.4 Binarização

Imagens binárias (em preto e branco) são mais fáceis e rápidas de processar e analisar do que as imagens em escala cinza, pois nas imagens binárias há apenas dois tipos de informação que cada pixel pode conter (preto ou branco) contrastando com as 256 possibilidades de tonalidades de cor dos pixels nas imagens em escala cinza<sup>(22)</sup>.

Assim, é utilizado um tratamento de imagem chamado binarização após a correção do contraste e do brilho para aumentar a simplicidade da análise das imagens com o objetivo do aumento na velocidade da análise.

A binarização consiste em escolher uma tonalidade de cinza e, a partir dela, atribuir a todos os pixels com nível de cinza abaixo dessa tonalidade a informação "zero" e a todos os pixels com nível de cinza acima da determinada tonalidade a informação "um". Também é possível inverter as cores da imagem, ou seja, trocar os

valores "zero" por "um" e vice versa para selecionar diferentes estruturas de interesse da figura binarizada.

### 3.3.3.5 Medidas

Os softwares de análise de ciência dos materiais lêem a conexão entre os pixels de forma lateral (com os pixels acima, abaixo, à esquerda e à direita), sendo que não são consideradas as conexões dos pixels de forma diagonal. Isso quer dizer que se um algoritmo for percorrer uma linha na diagonal para calcular a distância entre dois pontos, ele calculará este caminho utilizando conexões entre pixels de forma lateral, ignorando as conexões diagonais entre os pixels.

Na medição das propriedades geométricas das partículas é utilizada como referência uma matriz de pixels onde o ponto na parte superior à esquerda da matriz é o ponto (0,0), como pode se observar na Figura 10 e a partir dessa orientação da matriz, todas as análises são realizadas, sendo que cada pixel possui uma correspondência de dimensões reais - calibradas com uma régua - para cada aumento da imagem.

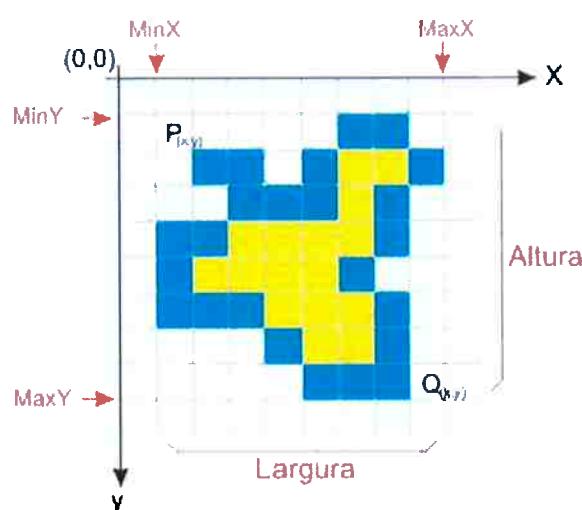


Figura 10: Exemplos de propriedades geométricas de um objeto<sup>(23)</sup>

- Número de partículas

Inicialmente são analisados e numerados todos os conjuntos de um ou mais pixels não conectados pelas laterais e a esses conjuntos é atribuído o nome partícula e um número para sua identificação.

- Inclusões /mm<sup>2</sup>

Calcula-se o valor da área total da imagem associando a cada pixel uma dimensão real em área (mm<sup>2</sup>) e somando todos os pixels da imagem. A partir desse valor da área total da imagem em mm<sup>2</sup> e da quantidade de partículas (inclusões) calculada na contagem do número de partículas, pode-se calcular a quantidade de inclusões/mm<sup>2</sup>.

- Área das partículas

Cada partícula possui certo número de pixels como mostra a Figura 11. O cálculo da área de cada partícula consiste na contagem dos pixels pertencentes a um objeto já numerado e associar a cada um deles o valor de área real equivalente.

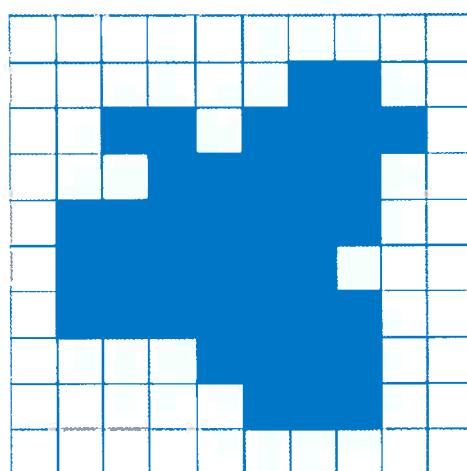


Figura 11: Exemplo de área de objeto<sup>(23)</sup>

- **Fração de área**

A fração de área é calculada pela razão entre o número total de pixels das partículas dividido pelo numero de pixels total da imagem.

### Razão de aspecto

A razão de aspecto é a razão entre a maior e a menor dimensão de uma partícula, ambas calculadas a partir do seu centro geométrico, como mostra a Figura 12<sup>(24)</sup>. Computacionalmente essa medida é realizada ajustando uma elipse para melhor representar a partícula (a que possuir menor erro de aproximação possível) e a razão entre os eixos transversal e conjugado (o maior e o menor respectivamente) é a aproximação computacional da razão de aspecto.

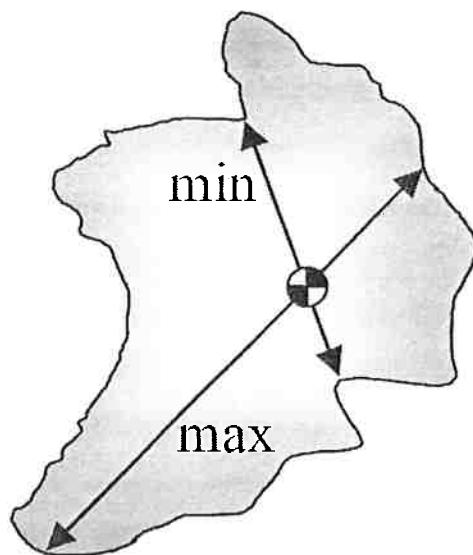


Figura 12: Definição de razão de aspecto <sup>(24)</sup>

- Maior dimensão

Computacionalmente a maior dimensão de uma partícula é encontrada calculando o retângulo de menor área possível que encapsula a partícula. O maior lado desse retângulo é a maior dimensão de uma partícula.

- Diâmetro equivalente

O diâmetro equivalente é o diâmetro do círculo cuja área é equivalente à área da partícula.

$$\text{Área}_{\text{Partícula}} = \text{Área}_{\text{Círculo}} = \pi \frac{\text{Diâmetro equivalente}^2}{4}$$

$$\text{Diâmetro equivalente} = \sqrt{\frac{4\text{Área}_{\text{Partícula}}}{\pi}}$$

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 Materiais

Para que os objetivos propostos fossem alcançados, amostras de metal líquido foram colhidas em diferentes etapas do processo de fabricação de aço para construção mecânica. O presente estudo complementa o trabalho de MORAES<sup>(1)</sup> realizando assim a análise quantitativa das inclusões das amostras das corridas já analisadas quimicamente em seu trabalho.

As amostras foram colhidas no forno panela após as injeções de arame de CaSi e de S e no distribuidor utilizado em lingotamento contínuo imediatamente, 30 ou 60 minutos após o fim da turbulência, sempre numa mesma posição. No caso, próximo à região do tampão (sistema que controla o fluxo de aço do distribuidor para o molde).<sup>(2)</sup>

#### 4.1.1 Aços analisados

Como se pode ver na

Tabela 1, foram analisados cinco tipos de aços baixa liga de composições químicas distintas produzidos em usinas não-integradas com maior quantidade de enxofre para melhorar a sua usinabilidade.

Em seguida são apresentadas, as corridas e os processos aos quais os aços são submetidos nos refinos oxidante e redutor assim como nas etapas finais de preparação do aço líquido que geram as inclusões analisadas nesse trabalho.

Tabela 1: Composições dos aços analisados<sup>(1)</sup>

	Composição A	Composição B	Composição D	Composição E	Composição F
C	0,15 - 0,23	0,15 - 0,23	0,23 - 0,28	0,14 - 0,22	0,14 - 0,19
Si	< 0,12	< 0,12	< 0,12	< 0,12	< 0,12
Mn	0,50 - 0,80	0,50 - 0,80	0,60 - 0,80	1,00 - 1,50	1,00 - 1,40
P	< 0,035	< 0,035	< 0,035	< 0,035	< 0,035
S	0,025 - 0,035	0,025 - 0,035	0,0020 - 0,035	0,020 - 0,035	0,020 - 0,035
Cr	0,65 - 0,85	0,65 - 0,85	0,80 - 1,00	0,8 - 1,3	0,8 - 1,2
Ni	1,5 - 1,9	1,5 - 1,9	< 0,25	< 0,25	< 0,25
Mo	0,28 - 0,38	0,28 - 0,38	< 0,06	< 0,06	< 0,06
Al	0,015 - 0,050	0,015 - 0,040	0,020 - 0,055	0,015 - 0,04	0,020 - 0,055
Cu	< 0,25	< 0,25	< 0,35	< 0,035	< 0,35
Sn	< 0,025	-	-	-	-
Nb	0,005 - 0,03	-	-	-	-
Ca	-	-	-	< 0,002	-

Os aços são desoxidados com alumínio e há presença deste elemento na composição final para controlar o tamanho de grão no produto final e melhorar suas propriedades mecânicas<sup>(25)</sup>. O Ca está presente devido à sua adição para a modificação de inclusões de alumina e os teores de enxofre dos aços analisados são propositalmente maiores do que o praticado para melhorar a usinabilidade (0,01-0,015%) formando inclusões de sulfeto de manganês, as quais que causam a quebra dos cavacos e lubrificam a superfície de corte na usinagem, além de melhorar a deformabilidade das inclusões de aluminatos de cálcio.<sup>(12)</sup> Os elementos Sn e Cu são provenientes da sucata.

Mas esses aços possuem diversos problemas em relação à lingotabilidade. O controle dos teores Cálcio passam a ser críticos, pois um teor mais baixo de cálcio, por exemplo, implica em problemas de entupimento da válvula submersa no lingotamento contínuo por inclusões de alumina ou aluminato de cálcio. Altos teores

de cálcio, por sua vez, podem implicar em problemas de entupimento da válvula submersa no lingotamento contínuo pela formação de inclusões de CaS<sup>(1)</sup>.

#### 4.1.2 Corridas analisadas

Os tipos de aço das corridas analisadas estão mostrados abaixo, na Tabela 2<sup>(1)</sup>.

**Tabela 2: Relação das corridas analisadas e os compostões de aços estudados<sup>(1)</sup>**

Corrida	Aço
M2	Tipo A
P1	Tipo F
P2	Tipo D
P3	Tipo D
P4	Tipo E
P7	Tipo B

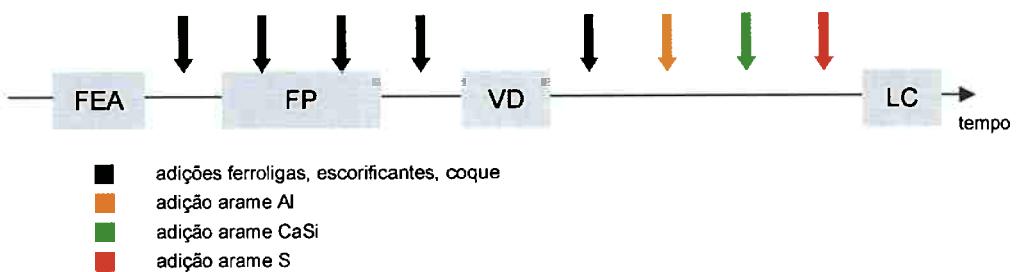
Mais corridas foram analisadas por MORAES<sup>(1)</sup>. Porém, como só as corridas M2, P1, P2, P3, P4 e P7 possuíam amostras nas duas etapas de interesse (final da adição e lingotamento contínuo), somente estas foram analisadas, por recomendação de MORAES<sup>(1)</sup>. A corrida M2 foi realizada numa usina diferente das demais corridas.

#### 4.1.3 Processo de fabricação dos tipos de aços analisados.

A produção dos aços foi realizada a partir da fusão e refino oxidante da sucata num forno elétrico a arco com lanças de oxigênio, sendo então realizadas várias adições (ferroligas, escorificantes, desoxidantes e elementos de liga) em vários estágios de fabricação. O aço líquido oriundo do forno elétrico a arco (FEA) é

então vazado no forno panela (FP), sendo adicionada uma adição de ferroliga no jato de aço para o FP. É realizada mais uma adição de ferroliga, escorificantes e coque no FP para o refino do aço. Após o refino, é realizada uma adição antes e outra depois da degaseificação pelo processo VD (Vacuum Degassing).

Após a finalização desse processo, é realizada a adição de arames de Al (para a desoxidação do aço), de CaSi (para a modificação das inclusões de alumina geradas pela desoxidação para aluminatos de cálcio) e S (para a precipitação da inclusão dúctil MnS de ao redor dos aluminatos de cálcio), seguida pelo lingotamento contínuo. O processo e as adições são mostradas pela Figura 13 <sup>(1)</sup>.



**Figura 13: Fluxograma simplificado da seqüência de adições no refino secundário dos aços estudados <sup>(1)</sup>**

#### 4.1.4 Posições no processo de onde foram retiradas as amostras

Para a caracterização das inclusões presentes, foram retiradas amostras de metal in situ em diferentes estágios do processo, de 6 corridas, conforme a Tabela 3<sup>(1)</sup> e a Figura 14.<sup>(1)</sup>

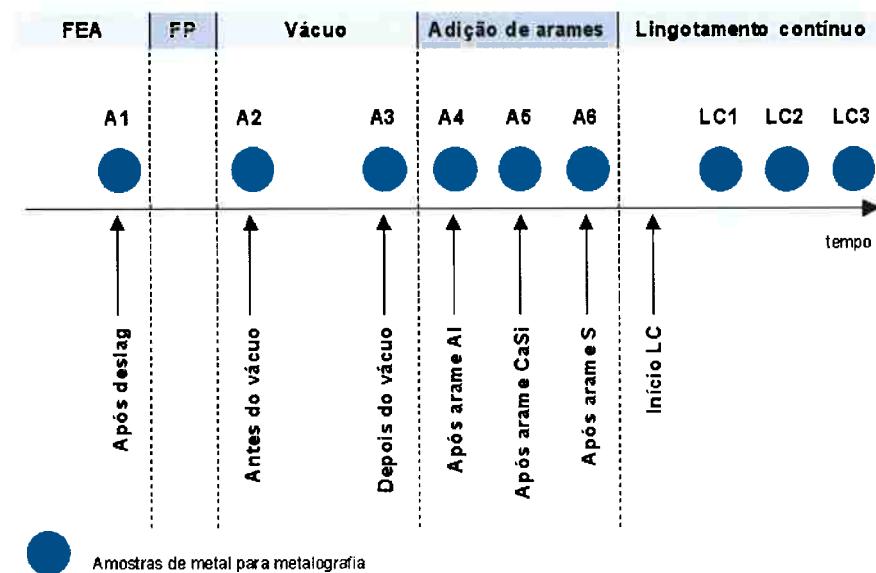
**Tabela 3: Nomenclatura das amostras quanto ao estágio do processo de retirada <sup>(1)</sup>**

Amostra	Momento da retirada
A5	5 <sup>a</sup> amostra FP: após a adição de CaSi
A6	6 <sup>a</sup> amostra FP: após a adição de S
LC1	1 <sup>a</sup> amostra LC <sup>**</sup> : imediatamente após o fim da turbulência no distribuidor
LC2	2 <sup>a</sup> amostra LC: 30 minutos após o fim da turbulência no distribuidor
LC3	3 <sup>a</sup> amostra LC: 60 minutos após o fim da turbulência no distribuidor

\* FP: Forno Panela

\*\* LC: Lingotamento contínuo

Por recomendação de MORAES<sup>(1)</sup>, só foram analisadas das corridas duas amostras: uma no final do processo de adição e uma no lingotamento contínuo, representativas das inclusões de nos estágios finais do processo.



**Figura 14: Momento da retirada das amostras nos diferentes estágios do processo <sup>(1)</sup>**

#### 4.1.5 Inclusões observadas por MORAES<sup>(1)</sup> nas corridas

##### 4.1.5.1 Características ideais

O considerado ideal para se evitar a presença de inclusões no produto final, é a presença de aluminatos de cálcio que se formam no estado líquido nas temperaturas de aciaria (em torno de 1600°C), que chamaremos de aluminatos de cálcio líquidos. Estas inclusões são esféricas e plásticas, além disso, as inclusões que se formam no estado sólido tendem a formar depósitos na válvula submersa do lingotamento contínuo, e o desprendimento de pedaços destes depósitos geram macro inclusões no produto final.<sup>(1)</sup>

##### 4.1.5.2 Conclusões sobre as corridas durante o lingotamento contínuo

Foi observado por MORAES<sup>(1)</sup> que das corridas analisadas, somente as corridas P7 e P3 atingiram as composições das inclusões líquidas nas temperaturas de aciaria. A corrida P2 apresentou inclusões de aluminatos de cálcio, porém de pontos de fusão superiores às temperaturas de aciaria.

Nas corridas M2, P1 e P4, as composições das inclusões encontradas nas amostras após a adição de CaSi indicaram que não foi convertido um grande número de inclusões de alumina para aluminatos de cálcio. Isto sugere quantidade insuficiente de CaSi adicionado. Além disso, as três corridas apresentaram inclusões características do campo de precipitação da fase espinélio no ternário Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CaO-MgO, a qual é rica em MgO, o que sugere desgaste de refratários do distribuidor ou excesso de alumínio dissolvido no aço, o que diminui a atividade do oxigênio dissolvido no aço, levando ao deslocamento do Mg do refratário para o aço líquido, favorecendo a formação de inclusões de espinélio<sup>(1)</sup>

Na corrida P2 foram encontradas inclusões de CA-(Ca,Mn)S, indicando neste caso excesso de CaSi adicionado<sup>(1)</sup>

Em todas corridas foram encontradas inclusões de (Fe,Mn)S.

#### 4.1.5.3 Efeito das composições das inclusões nas corridas analisadas

Em cada corrida foram discutidos se as composições das inclusões após a adição de CaSi, e durante o lingotamento contínuo, atingiram as composições de inclusões líquidas nas temperaturas de aciaria. Além disso, também foi observado se houve aumento no teor de MgO nas composições das inclusões encontradas nas amostras retiradas durante o refino em comparação com as amostras retiradas durante o lingotamento contínuo.<sup>(1)</sup>

A Tabela 4 apresenta um resumo do efeito das composições das inclusões nas corridas analisadas.

**Tabela 4: Resumo do efeito das composições das inclusões por corrida**

Corridas	Presença de inclusões líquidas após a adição de CaSi	Presença de inclusões líquidas no lingotamento	Aumento da %MgO da panela para o lingotamento
M2	Não	Não	Não
P1	Não	Não	Não
P2	Sim	Não	Sim
P3	Não	Sim	Não
P4	Não	Não	Sim
P7	Sim	Sim	Sim

A presença de inclusões líquidas nas temperaturas de aciaria após a adição de CaSi indica que a quantidade de CaSi foi adequada na modificação das inclusões de alumina em aluminatos de cálcio. Estas inclusões líquidas devem permanecer nas amostras retiradas durante o lingotamento contínuo, quando isto não ocorre, pode indicar reoxidação no distribuidor.<sup>(1)</sup>

Já o aumento do teor de MgO comparando amostras retiradas durante o refino com amostras retiradas durante o lingotamento sugere dissolução de refratários do distribuidor, ou mesmo da panela no final do refino, com o Mg dos refratários passando para o aço líquido, e levar a formação de novas inclusões de espinélio havendo oxigênio no aço líquido no distribuidor.<sup>(1)</sup>

## 4.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

### 4.2.1 Retirada das amostras

As amostras utilizadas para a análise e a verificação das inclusões nas corridas foram retiradas do forno panela pelo seu topo e do distribuidor (Figura 15) <sup>(2)</sup> pela região do tampão que é a mais próxima da saída do aço do distribuidor para o para o molde, antes de iniciar o processo da solidificação, o que permite assim fácil acesso e manuseio do dispositivo de coleta.

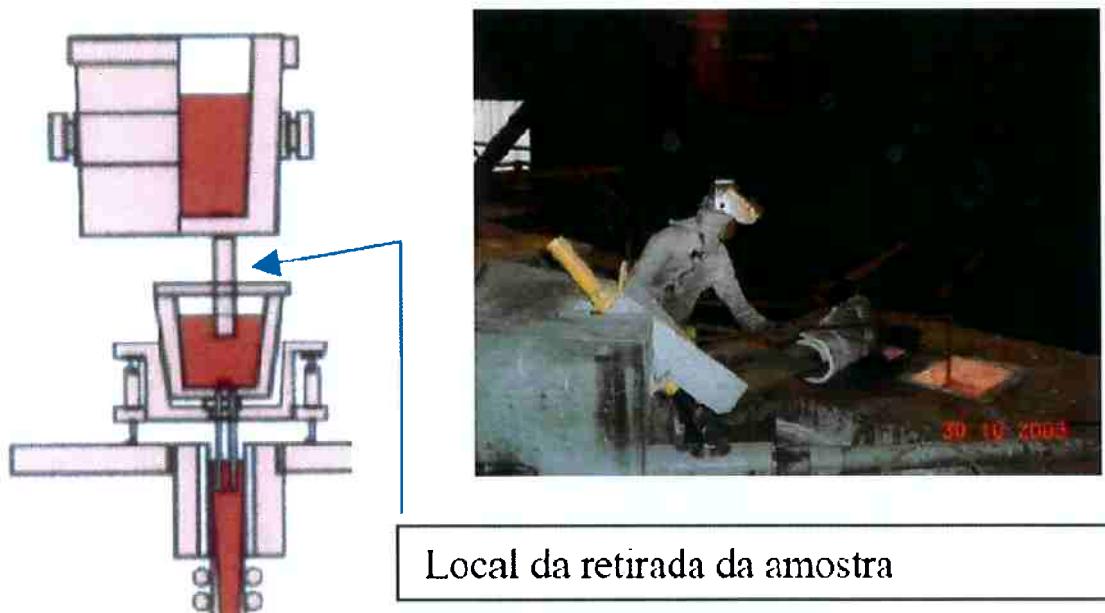


Figura 15: Indicação do local e o momento da retirada da amostra<sup>(2)</sup>

A coleta foi realizada pela submersão de um cartucho (Figura 16<sup>(2)</sup>) no aço líquido existente no forno panela e no distribuidor. Pela pressão ferrostática, o aço líquido preencheu a coquilha formando um corpo de prova do formato de um "pirulito" como mostra a Figura 17<sup>(2)</sup> e foram analisadas neste trabalho<sup>(2)</sup>, por recomendação de MORAES<sup>(1)</sup>, duas amostras por corrida: uma na adição de arames com elementos de liga e no lingotamento contínuo. 6 corridas foram analisadas, totalizando 12 amostras.

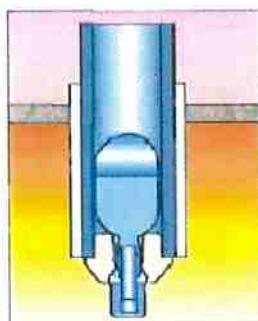


Figura 16: Coquilha na parte interna do cartucho<sup>(2)</sup>

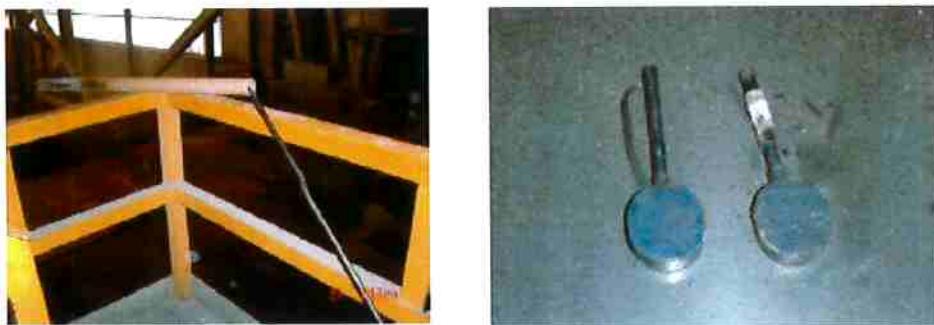


Figura 17: Imagem à esquerda indica o dispositivo utilizado para a retirada da amostra no distribuidor, e a imagem à direita, um exemplo da amostra colhida<sup>(2)</sup>

#### 4.2.2 Preparação da amostra

A amostra a ser analisada foi definida conforme a Figura 18. <sup>(2)</sup>, sendo que a seção de 12x10x16mm foi retirada do centro do "pirulito". Finalizando, a amostra foi dividida novamente ao meio, obtendo as dimensões de 6x10x16mm.

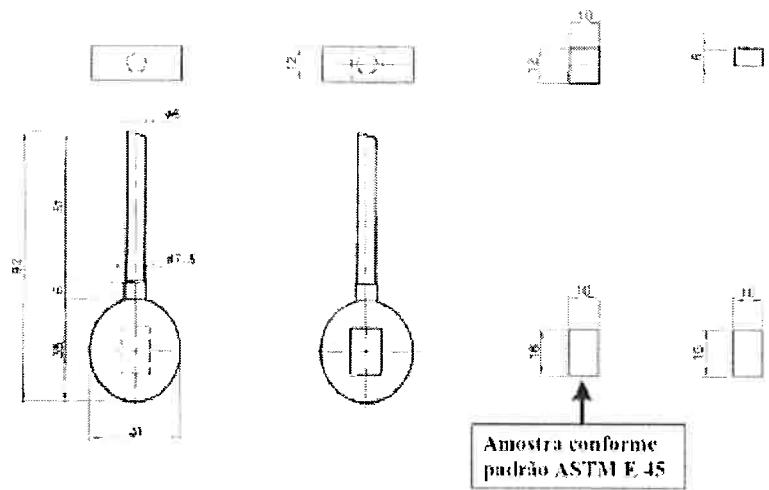


Figura 18: Diagrama da localização da amostra<sup>(2)</sup>

#### 4.2.3 Metalografia e preparação das amostras

O estudo da estrutura e morfologia dos metais - a metalografia - é crítica neste trabalho pelo uso da análise de imagens para caracterizar as inclusões e se obter dados que façam sentido neste estudo. Assim, os processos de corte, embutimento e lixamento devem ser realizados para que não se altere a microestrutura a ser observada, assim como evitar o aparecimento de artefatos de preparação que vão alterar a qualidade das imagens tiradas.

#### 4.2.3.1 Corte das amostras

Nesta etapa, o foco foi o corte das amostras com um disco de corte de carbeto de silício refrigerado à água de uma maneira lenta e cuidadosa para que não se modificasse a microestrutura do metal e das inclusões pelo aquecimento da amostra, seguindo os procedimentos de segurança usando máscara, luvas e avental para que as partículas de material desprendido não causassem ferimentos.

#### 4.2.3.2 Embutimento

Devido ao tamanho pequeno da área da amostra a ser polida (10x16mm) e a pequena altura da amostra (6 mm), a amostra foi embutida em baquelite para se pudesse lixar e polir a superfície de interesse com mais facilidade, assim como conseguir um foco mais estável no microscópio. As amostras foram embutidas à quente numa embutidora à temperatura de 160°C e pressão de 25 MPa por 15 minutos.

Baquelite é um polímero termofixo feito a partir de resina fenólica hexamina, serragem de Madeira, estearato de zinco, carbonato de Cálcio, negro de fumo <sup>(2)</sup>

#### 4.2.3.3 Lixamento

As amostras embutidas foram então lixadas para normalizar sua superfície utilizando-se tiras de lixas d'água de carbeto de silício começando pela granulação #80 mesh e se seguindo pelas granulações mais finas, #120, #220, #400, #600, #800, #1200 e #4000, sendo as duas últimas constituídas de um material menos abrasivo que o carbeto de silício. A cada troca de lixa foi realizado um giro de 90 graus para garantir que todos os riscos do processo anterior sejam removidos e uma lavagem com detergente para que partículas do desbaste anterior não riscassem com uma profundidade maior a amostra no processo seguinte. Durante o lixamento foi usada água para que as partículas de material desprendido tanto da amostra quanto da lixa fossem levadas pelo fluido, impedindo assim impregnações na lixa e na amostra, e desse modo aumentando o rendimento geral do processo.

Ao final do lixamento, as amostras foram lavadas com detergente e álcool e secadas antes de passar para a fase do polimento.

#### 4.2.3.4 Polimento

O polimento foi realizado duas partes. A primeira parte foi realizada em politrizes cuja rotação é controlada eletronicamente com panos impregnados com pasta de diamante Foi realizado em quatro etapas. Da primeira até a terceira, utilizou uma pasta de diamante com partículas de 6, 3 e 1 micron, nessa ordem sempre rotacionando a amostra de 90 graus entre panos para eliminar todos os riscos da etapa anterior e lavando as amostras e secando com álcool para que as partículas do pano anterior não contaminassem o próximo pano. O polimento foi realizado a 600 RPM.

A segunda etapa foi a finalização do polimento utilizando uma máquina de polimento automatizada e sílica coloidal para que não houvesse riscos perceptíveis ao microscópio óptico no campo escuro.

#### **4.2.3.5 Ataque**

Ataques químicos não podem ser feitos para a visualização de inclusões no aço, pois o ataque aumentaria a área das inclusões e mudaria o perfil de distribuição de tamanhos e a morfologia das inclusões.

## 4.3 ANÁLISE DE IMAGENS

### 4.3.1 Observação ao microscópio

É utilizado o campo escuro <sup>(5)</sup> para que a luz refletida pela superfície das amostras seja polarizada e as inclusões fiquem em evidência. No campo escuro os riscos também ficam em evidência, e, portanto foi crítica a etapa da preparação da amostra para que as fotos da microestrutura pudessem ser feitas sem artefatos na imagem. Foi utilizado um aumento de 1000x, pois o tamanho das inclusões era muito pequeno para o aumento de 500x.

### 4.3.2 Registro das imagens

As imagens do microscópio óptico foram registradas por uma câmera digital de resolução de 3.2 megapixels acoplada ao microscópio e o uso dos conjuntos de lentes utilizado no microscópio possibilitou a análise de inclusões de até 0,4 micrômetros. Partículas com tamanho menor do que 0,4 um Abaixo desse tamanho começa a ocorrer um erro muito grande na análise de imagens formado pelo halo de difração das imagens das inclusões <sup>(5)</sup>.

As imagens do microscópio foram através do CCD da câmera de 3.2 megapixels salvas em arquivos JPG em escala cinza com 2048 x 1536 pixels e resolução de 96 x 96 dpi com cada pixel variando de 0 (preto) a 255 (branco), o que possibilitou uma representação muito apurada das imagens em questão. Para que as fotos fossem representativas das amostras, foram tiradas 50 fotos por amostra, totalizando 600 fotos na totalidade das 12 amostras. Um exemplo da imagem capturada está na Figura 19.

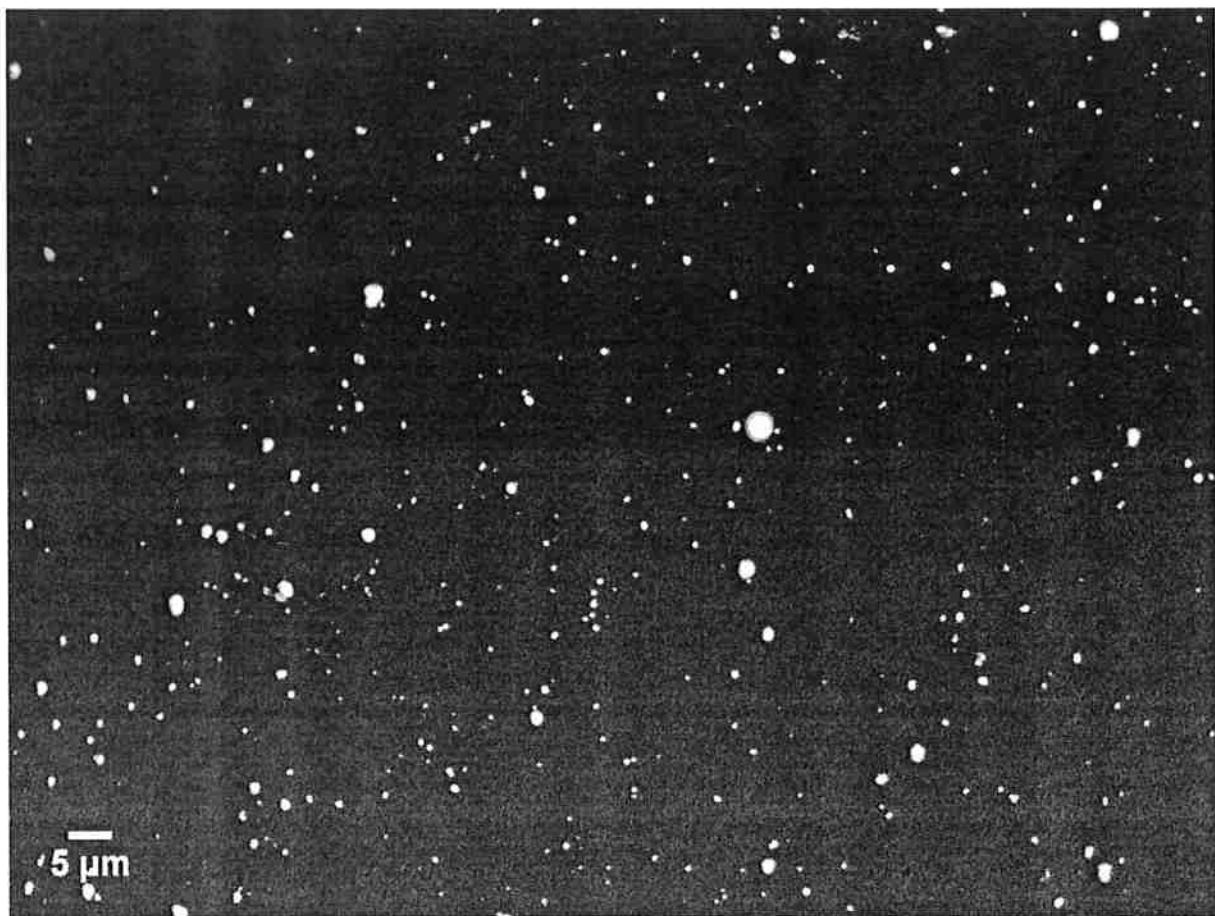


Figura 19: Foto da amostra da corrida P3 na etapa LC2 - 1000x Dark Field

#### 4.3.3 Tratamento de imagens

As imagens em JPG tiradas através da câmera acoplada ao microscópio ainda apresentam ocasionais riscos causados por partículas que o processo de polimento não conseguiu retirar e os halos em volta de cada inclusão devido à difração intrínseca ao uso do conjunto de lentes do microscópio usado. Foi então feito um processo de tratamento de imagens ajustando os tons de cinza mais claros e escuros para que ao mesmo tempo fossem eliminados os halos da difração e os riscos através de ajustes no brilho e no contraste. Após as imagens terem sido tratadas, elas foram binarizadas (processo de transformar pixels em escala cinza para representar somente branco ou preto) para se conseguir realizar a análise de imagens. Um exemplo da eliminação do halo de difração está na Figura 20 e um exemplo de imagem binarizada está na Figura 21.

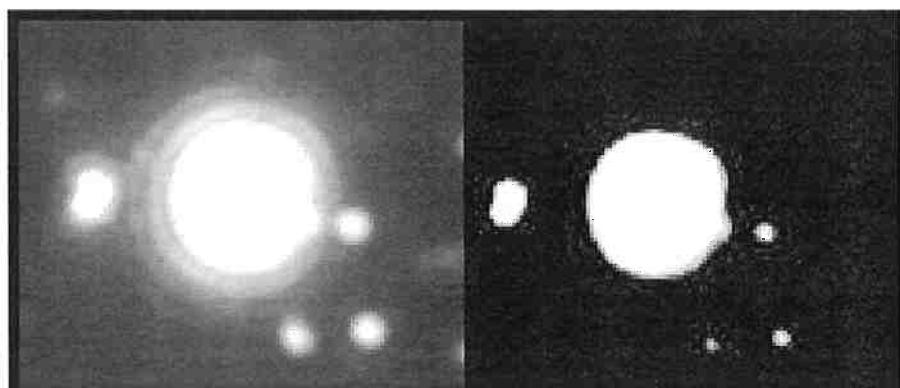


Figura 20: Detalhe da eliminação do halo de difração pelo ajuste de contraste e brilho.

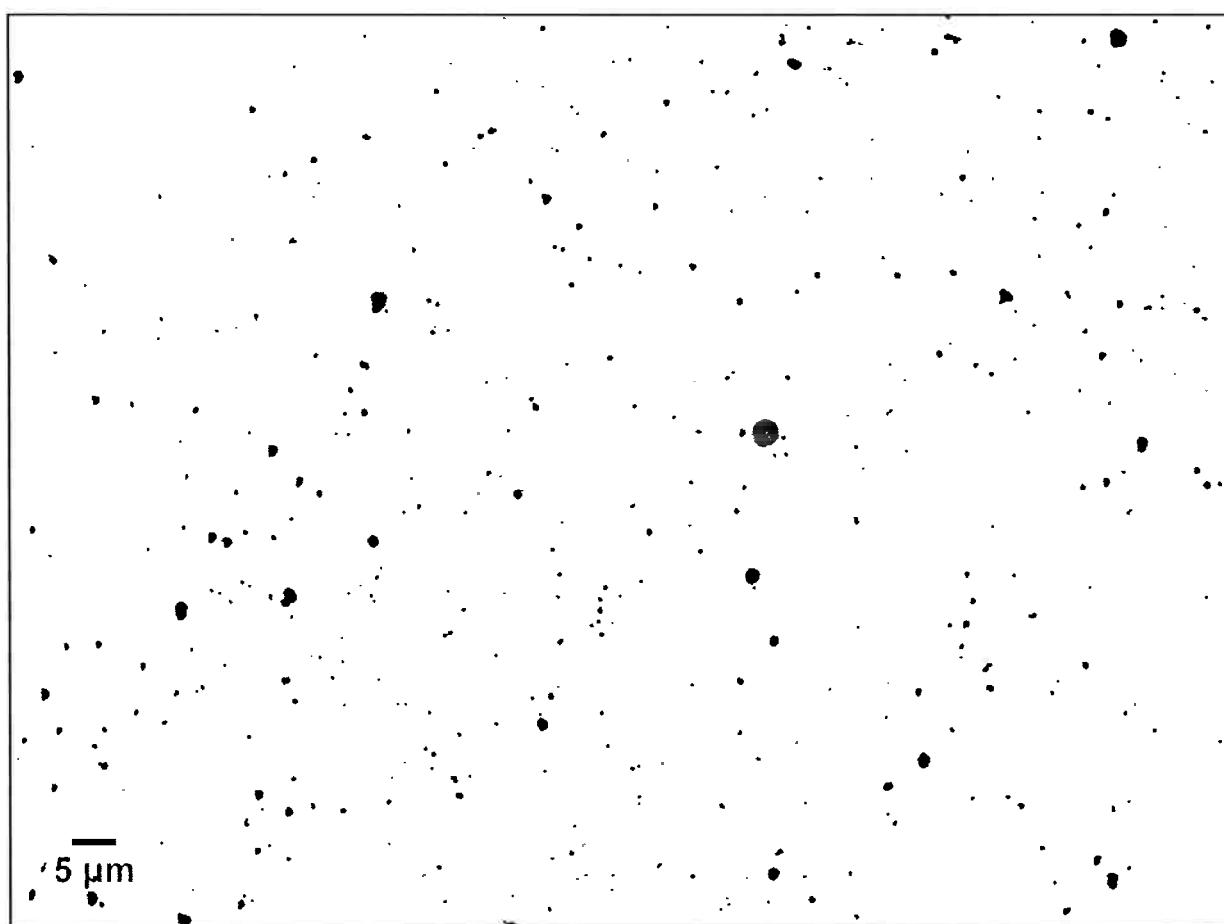


Figura 21: Imagem binarizada da amostra da corrida P3 na etapa LC2 - 1000x

O tratamento das imagens foi realizado pelo software ImageJ.

#### **4.3.4 Análise de imagens**

A análise das imagens foi realizada através do algoritmo de análise de imagens do software ImageJ, que determinou através das imagens binarizadas a quantidade, fração de área, razão de aspecto, o tamanho, a área, o perímetro e a circularidade de cada inclusão, gerando uma tabela no formato texto separada por tabulações.

#### **4.3.5 Tratamento de dados**

Os dados foram analisados e utilizando o programa MS Excel 2007, no qual se corrigiram as diferenças de notação numérica nacional e estrangeira dos resultados do software e foram construídos histogramas.

#### **4.3.6 Automação do processo**

Como se tinham muitas imagens para tratar e analisar individualmente (50 por amostra) foi criado um algoritmo em macro para o programa ImageJ que automatizou todo o processo de tratamento e análise das imagens, gerando 12 arquivos no formato texto, cada arquivo com a análise detalhada de todas as 50 imagens de cada uma das 12 amostras. O corte, lixamento e polimento das amostras, o tratamento de dados no Excel e a confecção dos histogramas foram realizados manualmente. Porém, mas todo o processo - desde o corte até os resultados do tratamento de dados - poderiam ser automatizados e realizados em menos de uma hora para fins industriais.

Uma cópia do código do algoritmo automatizador está no anexo A.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados extraídos pelo software de análise foram os seguintes:

- Número de inclusões por  $\text{mm}^2$
- Fração de área
- Razão de aspecto
- Diâmetro equivalente
- Maior dimensão

A partir destes dados foram construídos os histogramas, as médias e os desvios padrão nas amostras na adição de elemento de liga e após o fim da turbulência no distribuidor, sendo estas relacionadas às as conclusões de MORAES<sup>(1)</sup>.

As distribuições do número de inclusões por  $\text{mm}^2$  e a fração de área são dados extraídos do total de cada uma das duas amostras. A fração de área de inclusões é proporcional à fração de volume de inclusões pelo princípio de Delesse e a fração de volume é relacionada à massa total das inclusões numa amostra.

## 5.1 Corrida M2: Comparação entre A5 e LC3

Na corrida M2 (feita numa usina diferente das demais corridas) houve a coleta de amostras na posição A5, correspondente à adição do arame de CaSi e na posição LC3, correspondente à 60 minutos após o final da turbulência no distribuidor. A seguir são comparadas e comentadas as distribuições das duas etapas, assim como suas médias e desvios padrões na Tabela 5 e nos gráficos da sessão 7.1

**Tabela 5: Comparações das informações obtidas da corrida M2**

INFORMAÇÃO	Descrição	M2-A5	M2-LC3	VARIAÇÃO A→LC
# INCLUSÕES POR MM <sup>2</sup>	MÉDIA	29976,38	10782,77	-64,03%
	DESV. PADRÃO	7114,34	3342,47	-53,02%
FRAÇÃO EM ÁREA (%)	MÉDIA	3,33	0,75	-77,60%
	DESV. PADRÃO	1,43	0,32	-77,58%
RAZÃO DE ASPECTO	MÉDIA	1,33	1,26	-4,83%
	DESV. PADRÃO	0,31	0,33	3,70%
DIÂMETRO EQUIVALENTE (um)	MÉDIA	1,71	1,32	-22,81%
	DESV. PADRÃO	1,57	1,27	-19,11%
MAIOR DIMENSÃO (um)	MÉDIA	0,97	0,73	-24,80%
	DESV. PADRÃO	0,96	0,75	-21,86%

Tabela 5, Figura 22 e Figura 23 mostram que houve diminuição tanto na média quanto no desvio padrão do número de inclusões/mm<sup>2</sup> entre as etapas da adição de CaSi (A5) e 60 minutos após o fim da turbulência no distribuidor (LC3). Também ocorreu uma diminuição na média e desvio padrão da fração de área de inclusões nas amostras, evidenciadas pela Tabela 5, a Figura 24 e a Figura 25 e uma redução tanto na média quanto do desvio padrão do tamanho equivalente das inclusões, como mostram a Figura 28 e a Figura 29.

Portanto, esses resultados mostram que houve uma redução na quantidade e massa total das inclusões, principalmente das de tamanho maior (de tamanhos menos próximos da média do diâmetro equivalente).

A flotação das inclusões é regida pela lei de Stokes, que dá a velocidade de flotação de uma esfera de inclusão em meio metálico por diferença de densidade:  $v = \frac{g}{18\eta}(\rho_m - \rho_i)d^2$ , sendo  $\eta$  a viscosidade do metal. Segundo esta lei, as inclusões de tamanho maior têm a probabilidade de flotar mais rapidamente do que inclusões menores.

Portanto tipo de eliminação de inclusões da corrida M2, principalmente as maiores indica a eliminação das inclusões por flotação na panela e/ou no distribuidor.

Houve também uma redução na média e desvio padrão da maior dimensão das inclusões, e uma redução na média da razão de aspecto e um aumento em seu desvio padrão entre as etapas de A5 e LC3, como mostram a Tabela 5, a Figura 26, a Figura 27, a Figura 30 e a Figura 31.

Portanto, ocorreu uma mudança na quantidade das inclusões maiores e de formato menos arredondado (anguloso), prevalecendo na etapa LC3 inclusões menores e de formato mais arredondado.

Segundo MORAES<sup>(1)</sup>, na corrida M2 houve uma adição de CaSi insuficiente para a geração de aluminatos de cálcio líquidos tanto na adição quanto no distribuidor<sup>(1)</sup> que mesmo não chegando ao estado líquido, modificam a morfologia das inclusões de alumina para inclusões mais arredondadas.

Assim, juntamente com a flotação, em média também ocorreu uma redução das inclusões angulosas, indicando que o tratamento de cálcio foi efetivo para a modificação das inclusões de alumina.

### 5.1.1 Distribuição do número de inclusões por $\text{mm}^2$

#### Inclusões por $\text{mm}^2$ - M2 A5

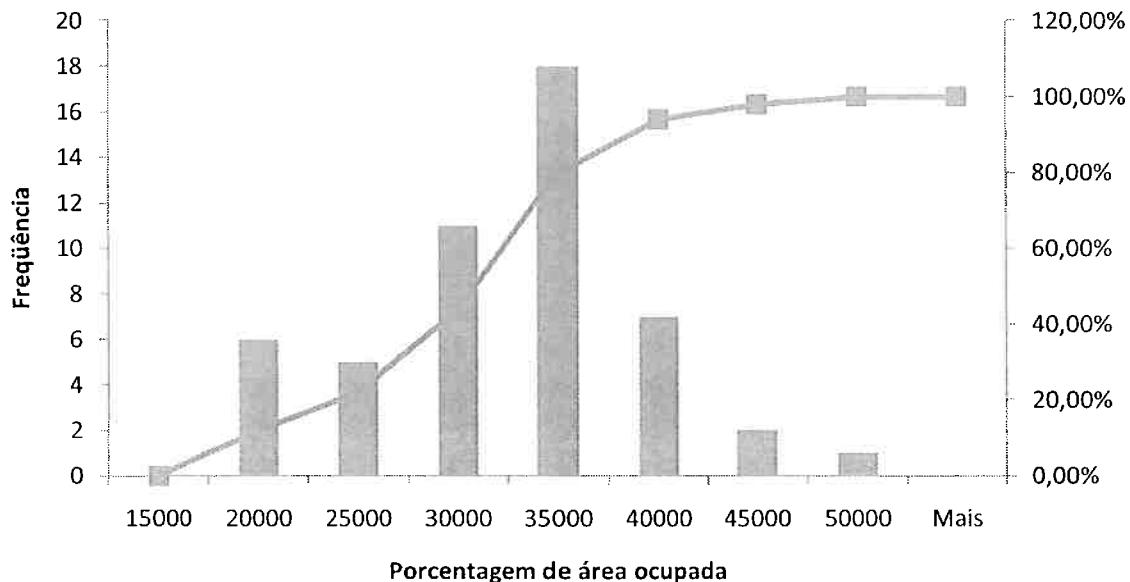


Figura 22: Distribuição das inclusões por  $\text{mm}^2$  da corrida M2 na adição de CaSi

#### Inclusões por $\text{mm}^2$ - M2 LC3

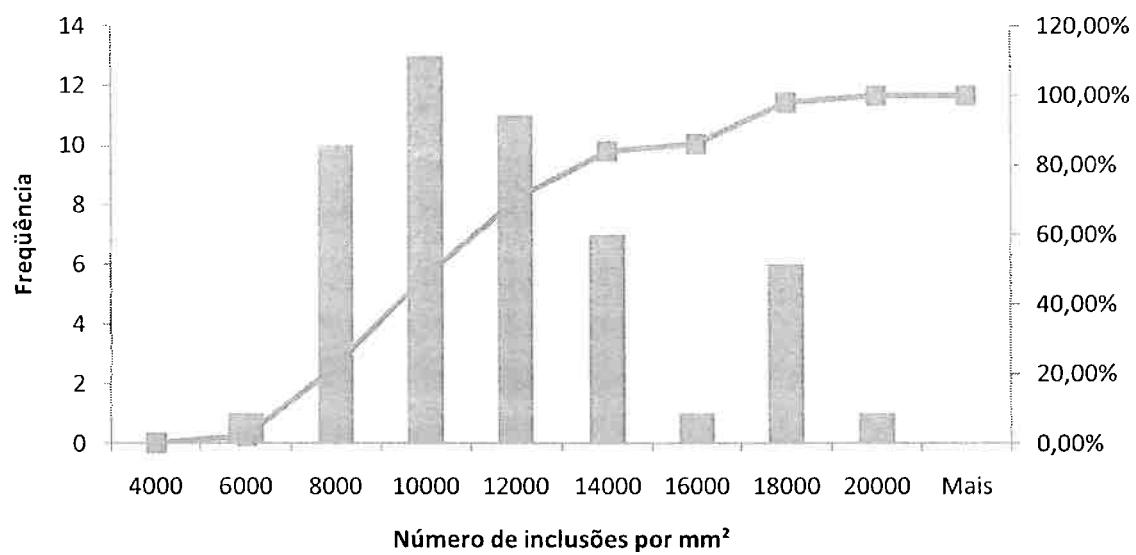


Figura 23: Distribuição das inclusões por  $\text{mm}^2$  da corrida M2 60 minutos após o fim da turbulência no distribuidor

### 5.1.2 Distribuição da fração de área das inclusões

**Fração de área - M2 A5**

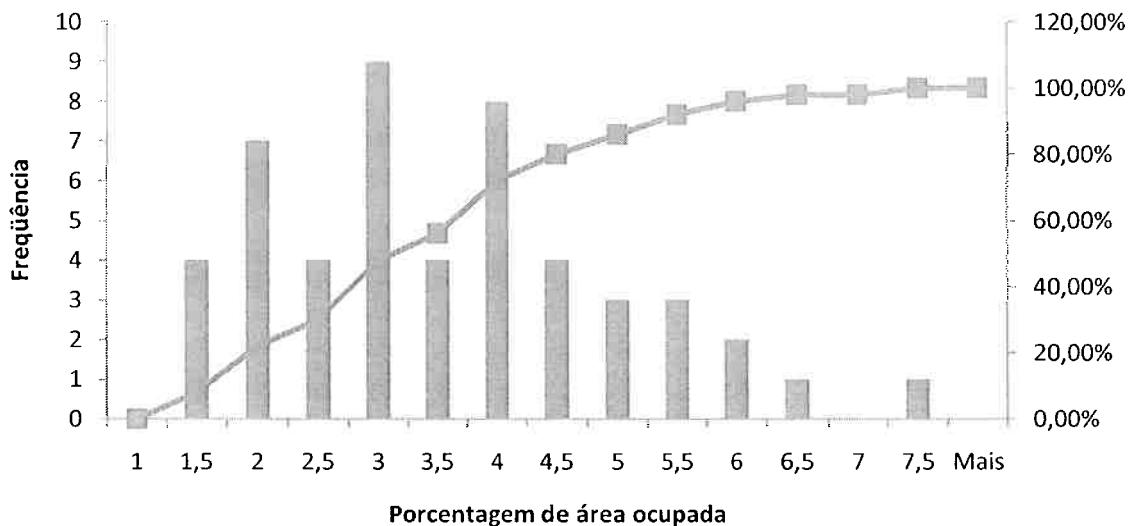


Figura 24: Distribuição da porcentagem da área ocupada pelas inclusões da corrida M2 na adição de CaSi

**Fração de área - M2 LC3**

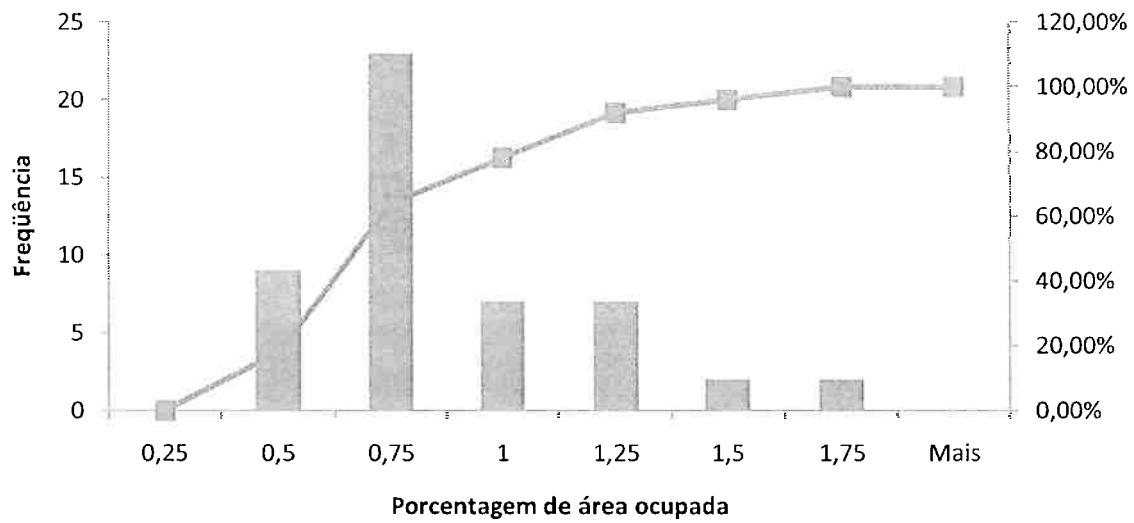


Figura 25: Distribuição da porcentagem da área ocupada pelas inclusões da corrida M2 60 minutos após o fim da turbulência no distribuidor

### 5.1.3 Distribuição da razão de aspecto das inclusões

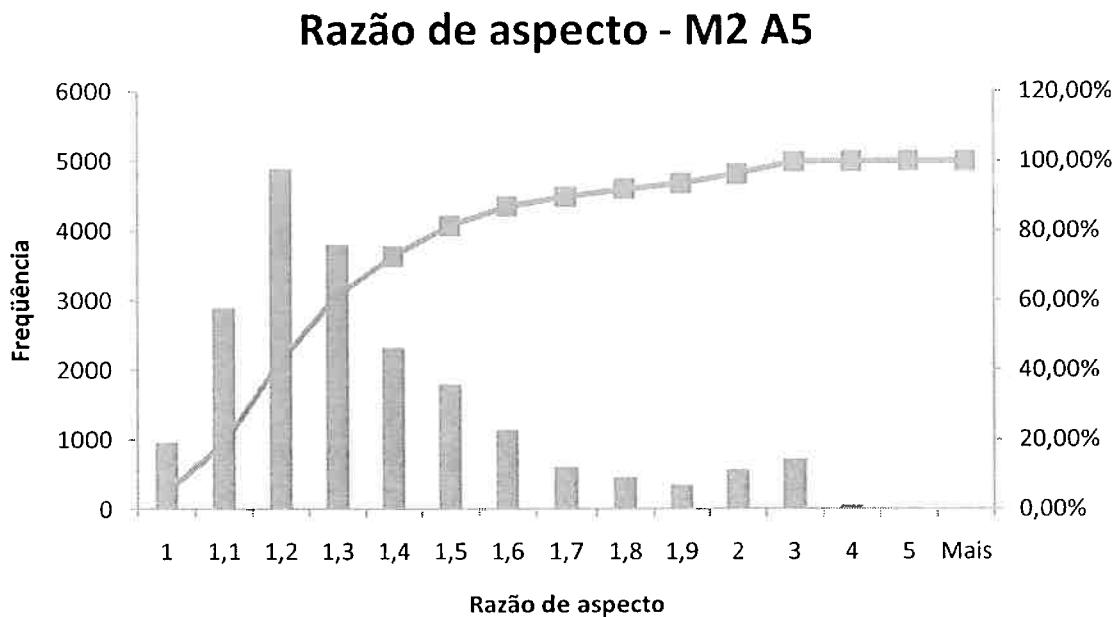


Figura 26: Distribuição da razão de aspecto das inclusões da corrida M2 na adição de CaSi

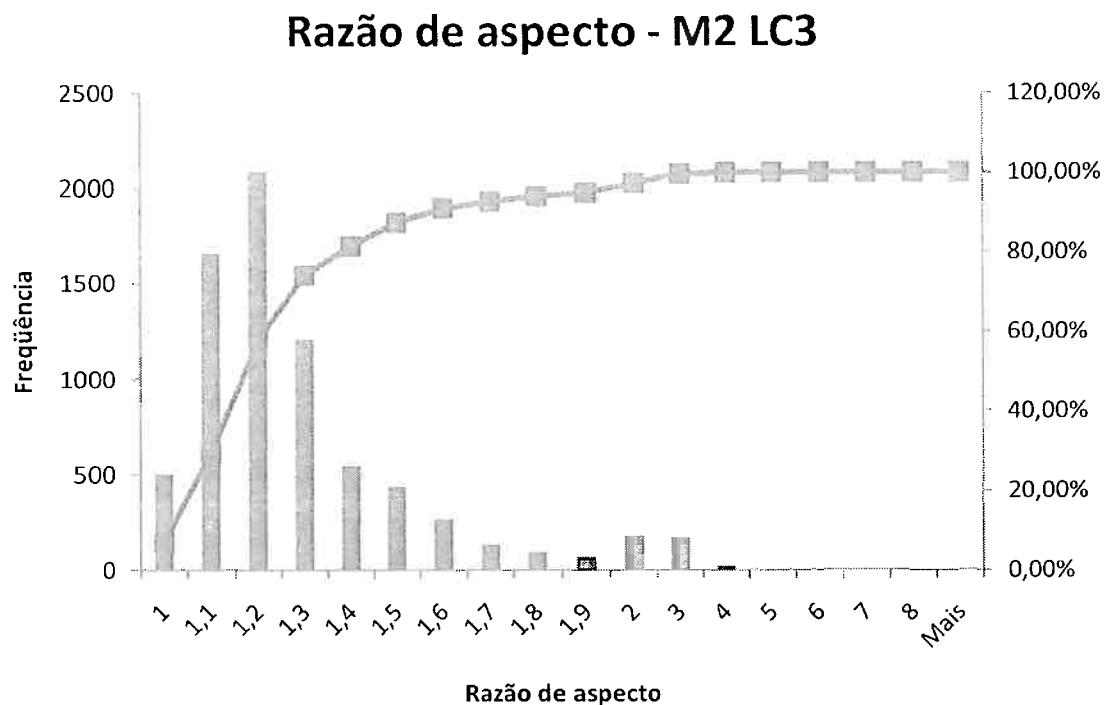


Figura 27: Distribuição da razão de aspecto das inclusões da corrida M2 60 minutos após o fim da turbulência no distribuidor

#### 5.1.4 Distribuição de tamanho das inclusões: diâmetro equivalente ( $\mu\text{m}$ )

**Diâmetro equivalente ( $\mu\text{m}$ ) - M2 A5**

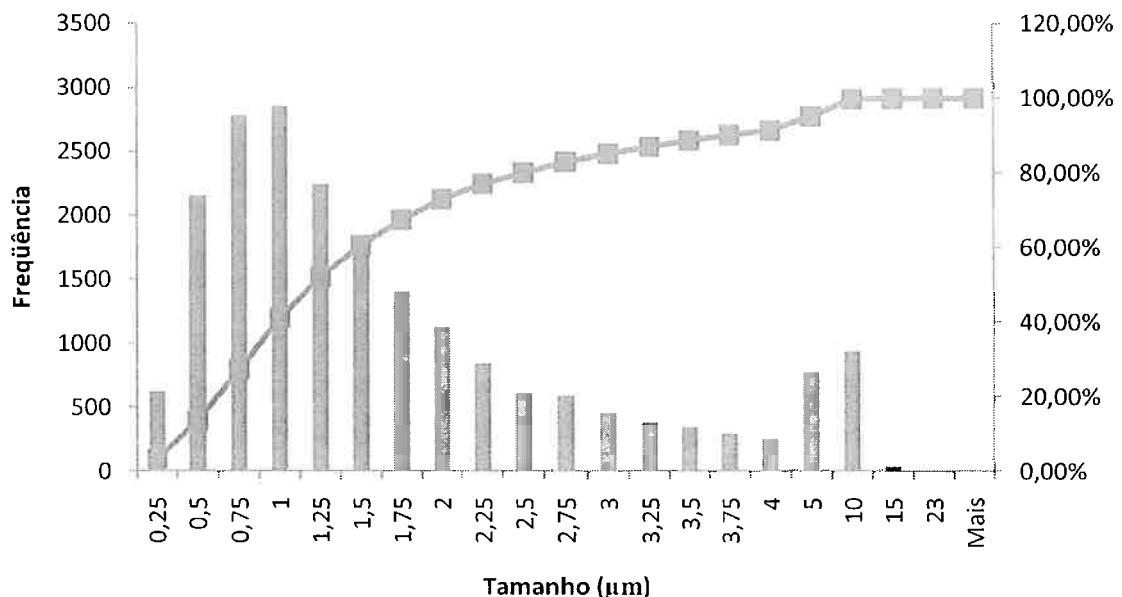


Figura 28: Distribuição do diâmetro equivalente das inclusões na corrida M2 na adição de CaSi

**Diâmetro equivalente ( $\mu\text{m}$ ) - M2 LC3**

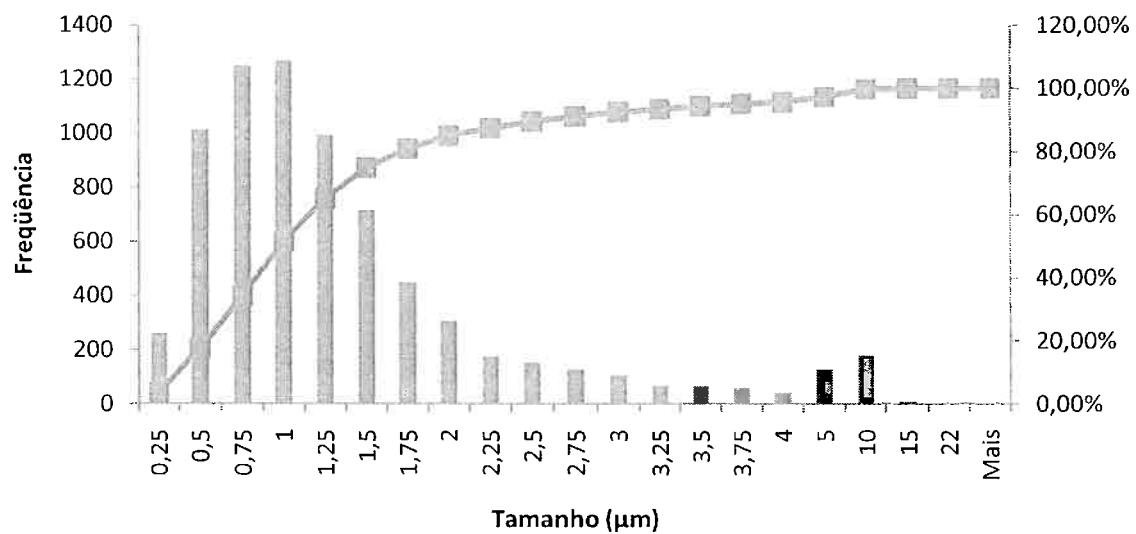


Figura 29: Distribuição do diâmetro equivalente das inclusões na corrida M2 60 minutos após o fim da turbulência no distribuidor

### 5.1.5 Distribuição de tamanho das inclusões: comprimento da maior dimensão ( $\mu\text{m}$ )

**Maior dimensão ( $\mu\text{m}$ ) - M2 A5**

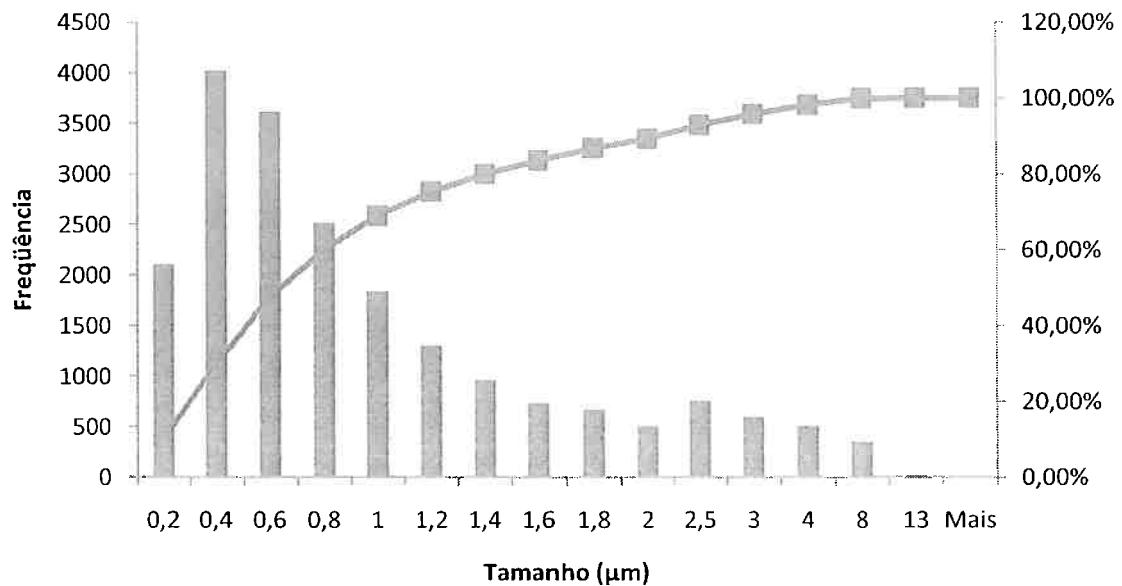


Figura 30: Distribuição da maior dimensão das inclusões na corrida M2 na adição de CaSi

**Maior dimensão ( $\mu\text{m}$ ) - M2 LC3**

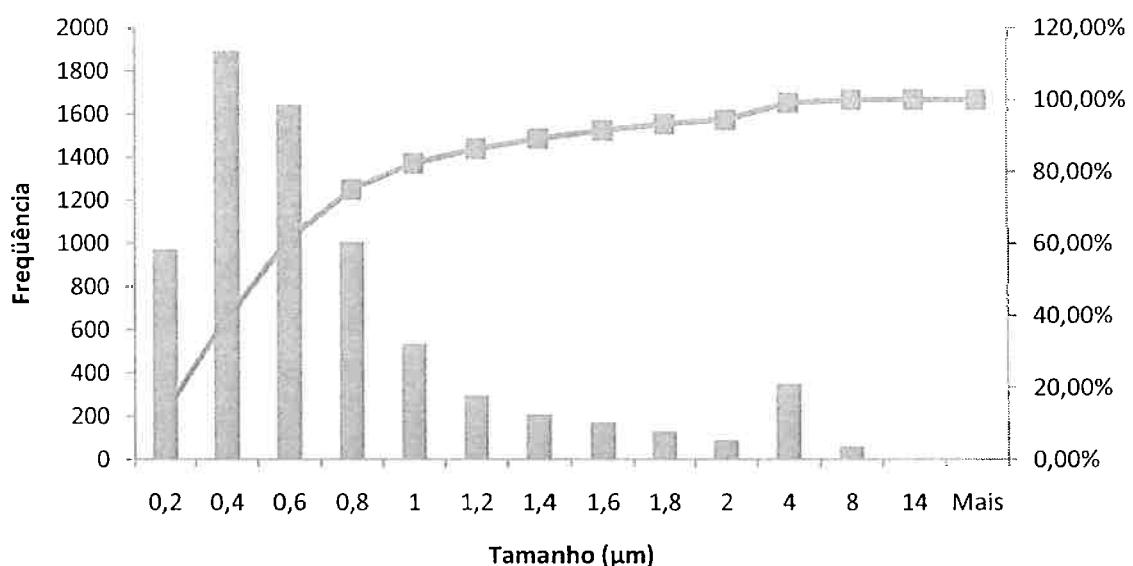


Figura 31: Distribuição da maior dimensão das inclusões na corrida M2 60 minutos após o fim da turbulência no distribuidor

## 5.2 Corrida P1: Comparação entre A6 e LC3

Na corrida P1 houve a coleta de amostras na posição A6, correspondente à adição do arame de S e na posição LC3, correspondente à 60 minutos após o final da turbulência no distribuidor. A seguir são comparadas e comentadas as distribuições das duas etapas, assim como suas médias e desvios padrões.

**Tabela 6: Comparações das informações obtidas da corrida P1**

INFORMAÇÃO	Descrição	P1-A6	P1-LC3	VARIAÇÃO A→LC
# INCLUSÕES POR MM <sup>2</sup>	MÉDIA	30203,46	24604,04	-18,54%
	DESV. PADRÃO	13665,33	6274,24	-54,09%
FRAÇÃO EM ÁREA (%)	MÉDIA	1,17	1,35	14,62%
	DESV. PADRÃO	0,57	0,36	-36,65%
RAZÃO DE ASPECTO	MÉDIA	1,25	1,28	2,23%
	DESV. PADRÃO	0,26	0,29	11,17%
DIÂMETRO EQUIVALENTE (um)	MÉDIA	1,08	1,22	13,40%
	DESV. PADRÃO	0,86	1,05	22,49%
MAIOR DIMENSÃO (um)	MÉDIA	0,59	0,68	15,22%
	DESV. PADRÃO	0,51	0,63	24,62%

Houve uma diminuição tanto na média quanto no desvio padrão do número de inclusões/mm<sup>2</sup>, aumento da média da fração de área, mas diminuição de seu desvio padrão e aumento tanto da média quanto do desvio padrão do diâmetro equivalente da corrida P1 entre a adição de S (A6) e 60 minutos após o final da turbulência no distribuidor (LC3), como mostram a Tabela 6, a Figura 32 e a Figura 33, a Figura 34, a Figura 35, a Figura 38 e a Figura 39.

Portanto, ocorreu um aumento da massa total das inclusões, assim como da quantidade das inclusões de maior tamanho e uma redução da quantidade de inclusões de menor tamanho.

A flotação das inclusões é regida pela lei de Stokes, que dá a velocidade de flotação de uma esfera de inclusão em meio metálico por diferença de densidade:  $v = \frac{g}{18\eta} (\rho_m - \rho_i) d^2$ , sendo  $\eta$  a viscosidade do metal. Segundo esta lei, as inclusões

de tamanho maior têm a probabilidade de flotar mais rapidamente do que inclusões menores.

A eliminação de inclusões de tamanho menor é característica do processo de flotação. Porém o aumento da quantidade de inclusões maiores sugere que este não foi o único evento ocorrendo em relação às inclusões da corrida P1.

A Tabela 6, a Figura 36, a Figura 37, a Figura 40 e a Figura 41 mostram que aumentaram tanto a média quanto o desvio padrão da razão de aspecto e da maior dimensão.

Ocorreu, portanto, um aumento da quantidade de inclusões mais angulosas e de tamanho maior de A6 para LC3.

Segundo MORAES,<sup>(1)</sup> na corrida P1 a quantidade de CaSi não foi suficiente para a formação de aluminatos de cálcio líquidos, sendo as inclusões no final da turbulência do distribuidor típicas do campo de precipitação espinélio, formadas por desgaste do refratário ou excesso de Al no aço, o que diminui a atividade do oxigênio e favorece a migração de Mg para o aço.

Assim, o aumento do desvio padrão da fração de área e o aparecimento de inclusões angulosas de razão de aspecto maiores que 4 no distribuidor que não existiam antes na panela, indicam a formação de inclusões de espinélio.

### 5.2.1 Distribuição do número de inclusões por $\text{mm}^2$

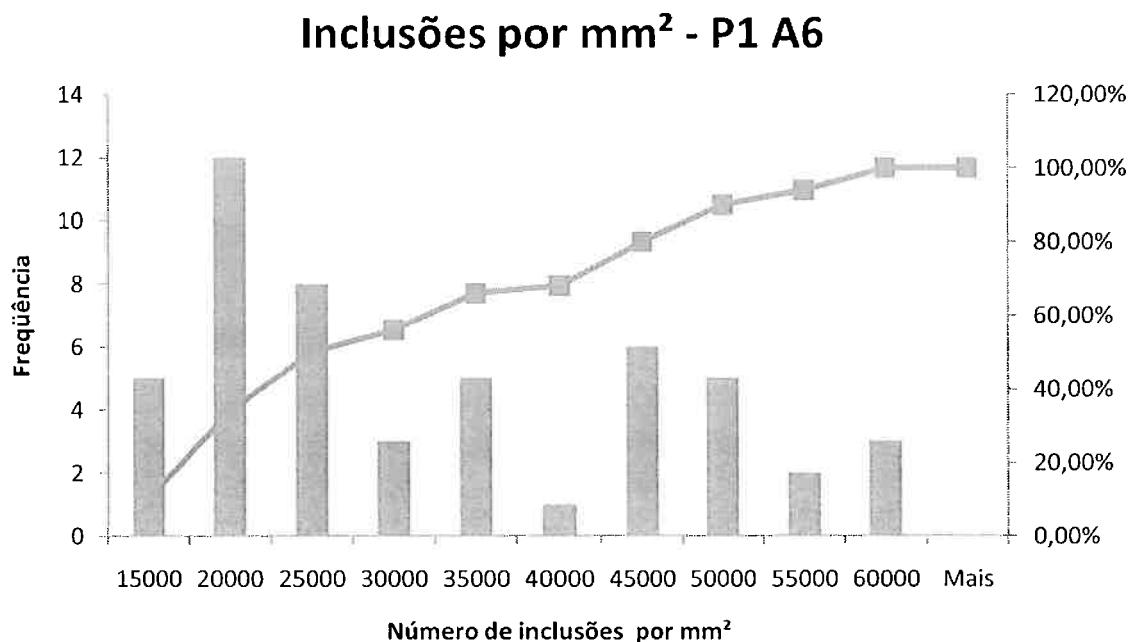


Figura 32: Distribuição das inclusões por  $\text{mm}^2$  da corrida P1 na adição de S

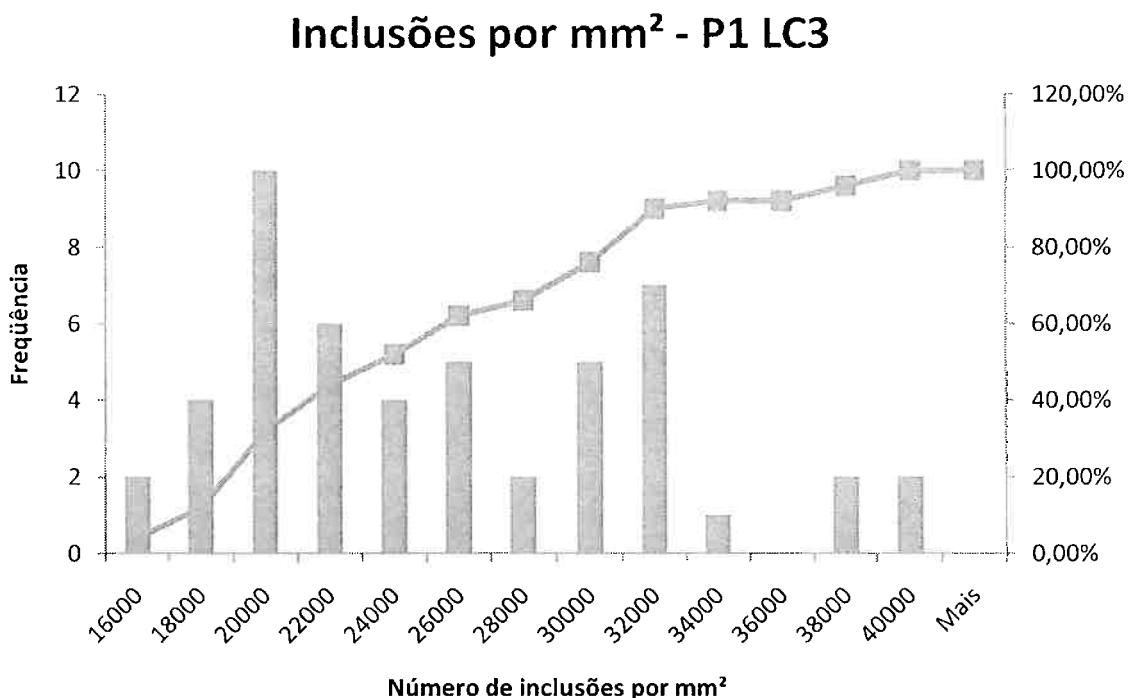


Figura 33: Distribuição das inclusões por  $\text{mm}^2$  da corrida M2 60 minutos após o fim da turbulência no distribuidor

### 5.2.2 Distribuição da fração de área das inclusões

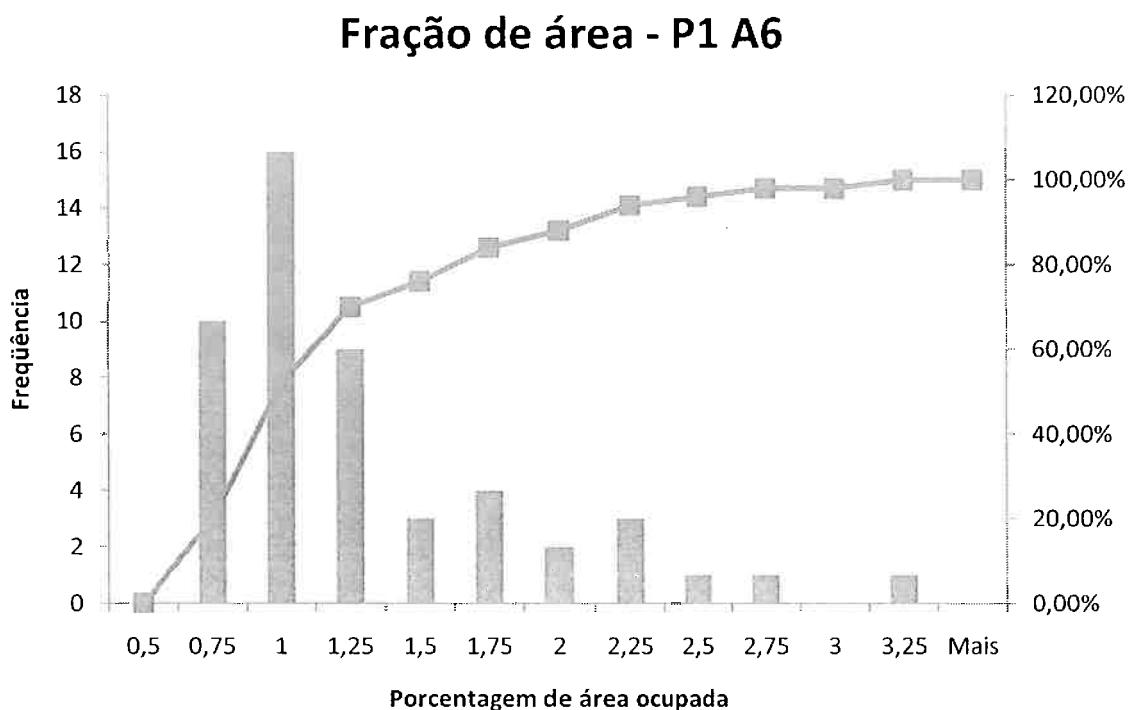


Figura 34: Distribuição da porcentagem da área ocupada pelas inclusões da corrida P1 na adição de S

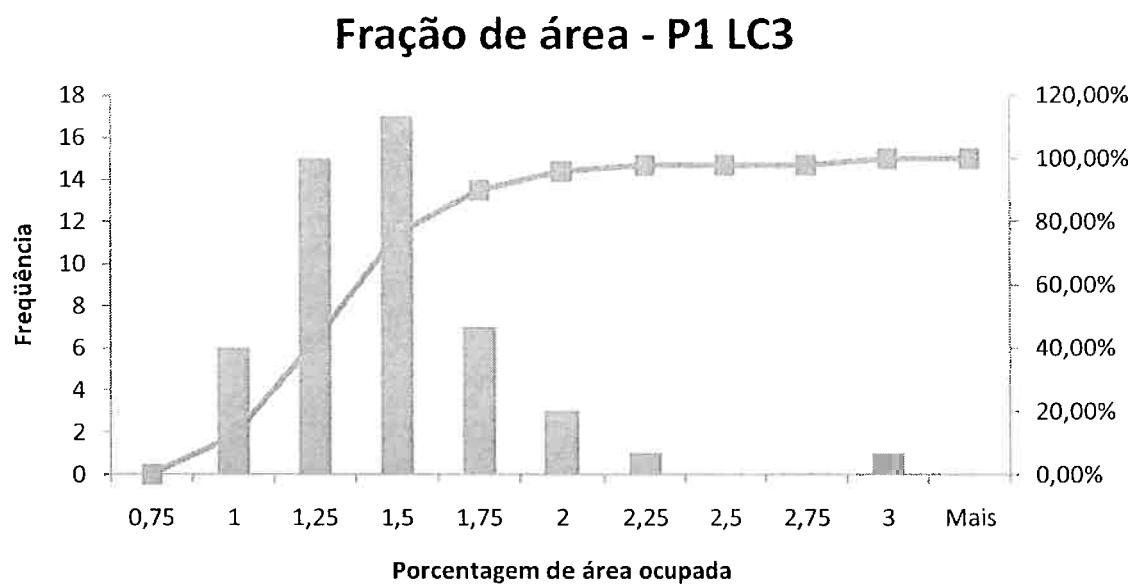


Figura 35: Distribuição da porcentagem da área ocupada pelas inclusões da corrida P1 60 minutos após o fim da turbulência no distribuidor

### 5.2.3 Distribuição da razão de aspecto das inclusões

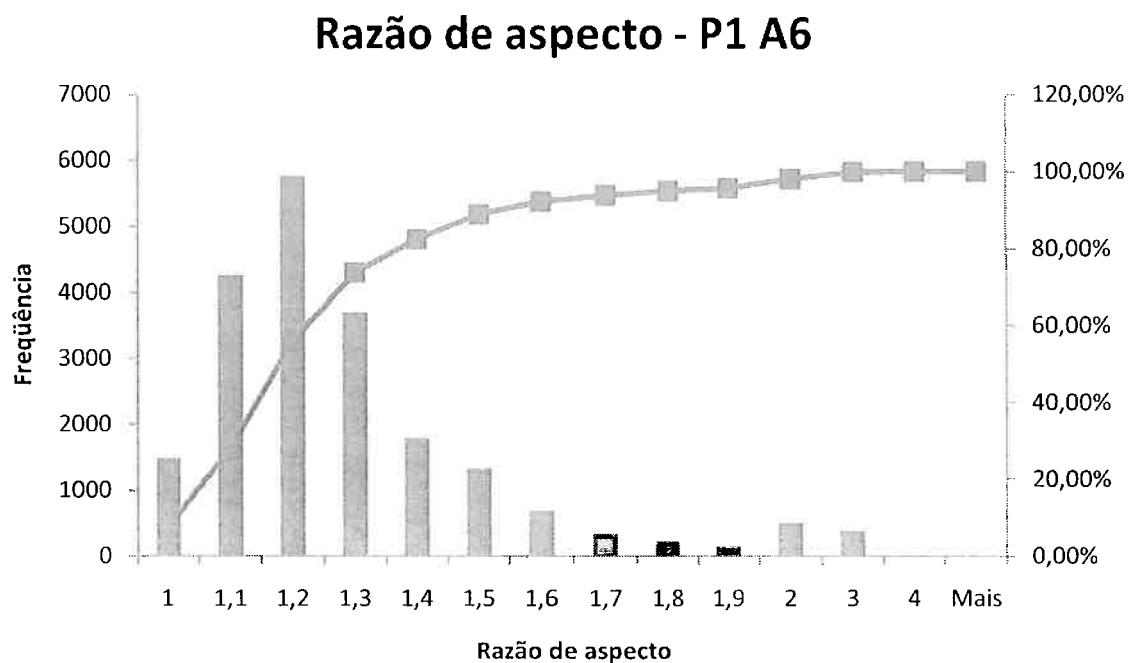


Figura 36: Distribuição da razão de aspecto das inclusões da corrida P1 na adição de S

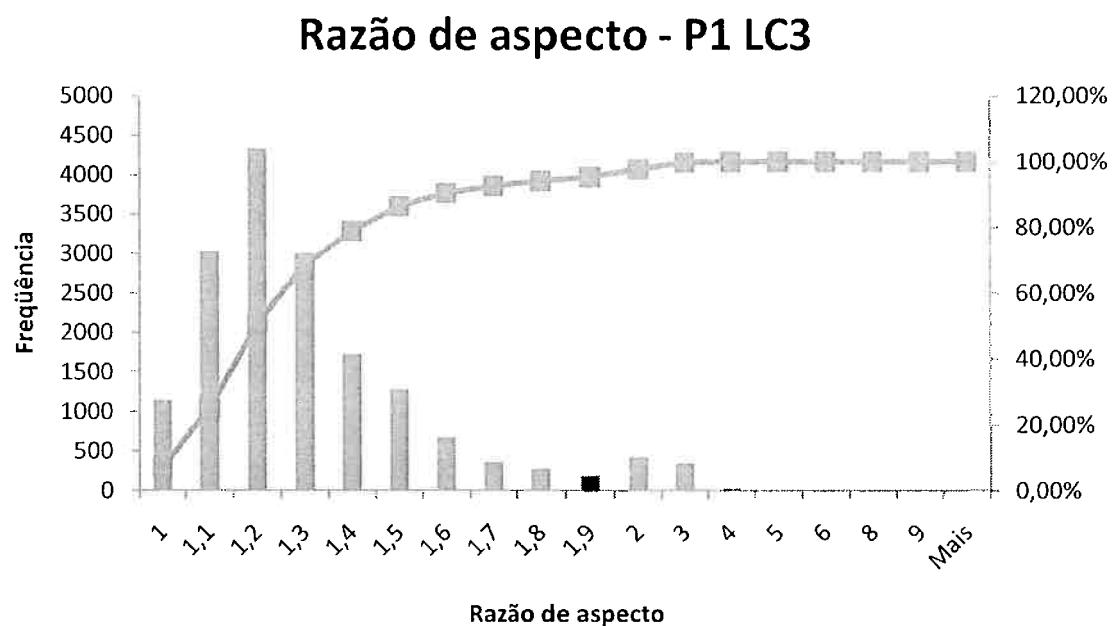


Figura 37: Distribuição da razão de aspecto das inclusões da corrida P1 60 minutos após o fim da turbulência no distribuidor

#### 5.2.4 Distribuição de tamanho das inclusões: diâmetro equivalente ( $\mu\text{m}$ )

**Diâmetro equivalente ( $\mu\text{m}$ ) - P1 A6**

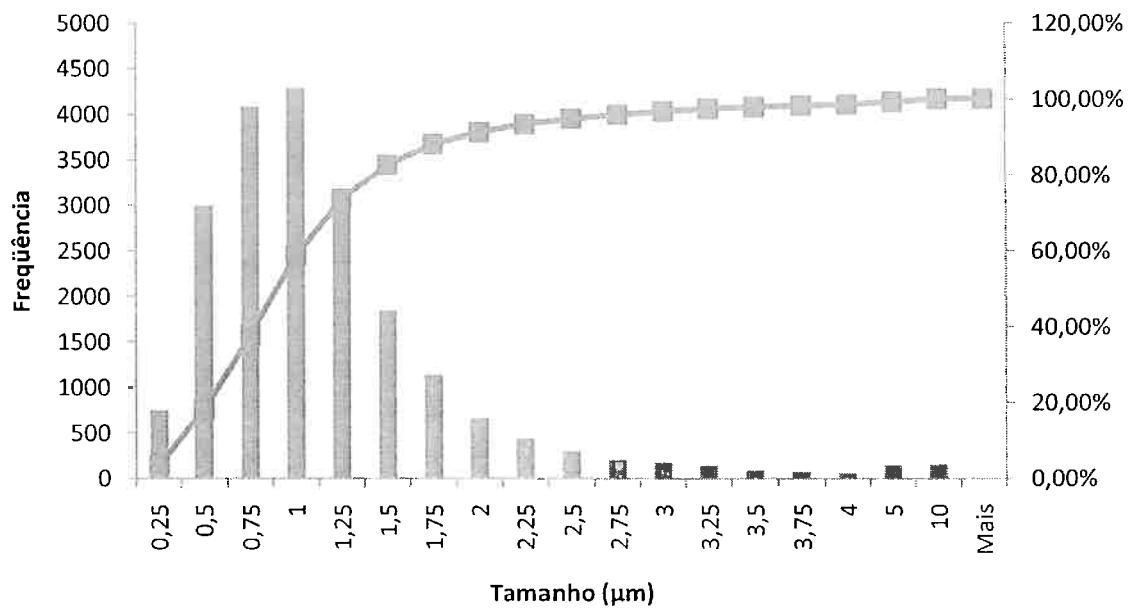


Figura 38: Distribuição do diâmetro equivalente das inclusões na corrida P1 na adição de S

**Diâmetro equivalente ( $\mu\text{m}$ ) - P1 LC3**

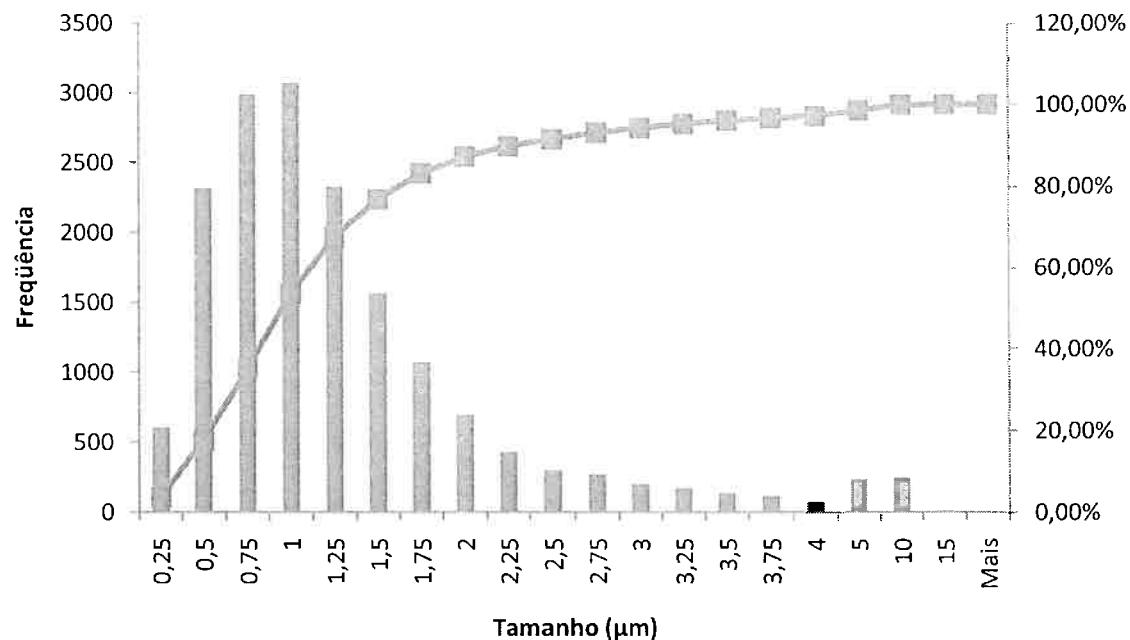


Figura 39: Distribuição do diâmetro equivalente das inclusões na corrida P1 60 minutos após o fim da turbulência no distribuidor

### 5.2.5 Distribuição de tamanho das inclusões: comprimento da maior dimensão ( $\mu\text{m}$ )

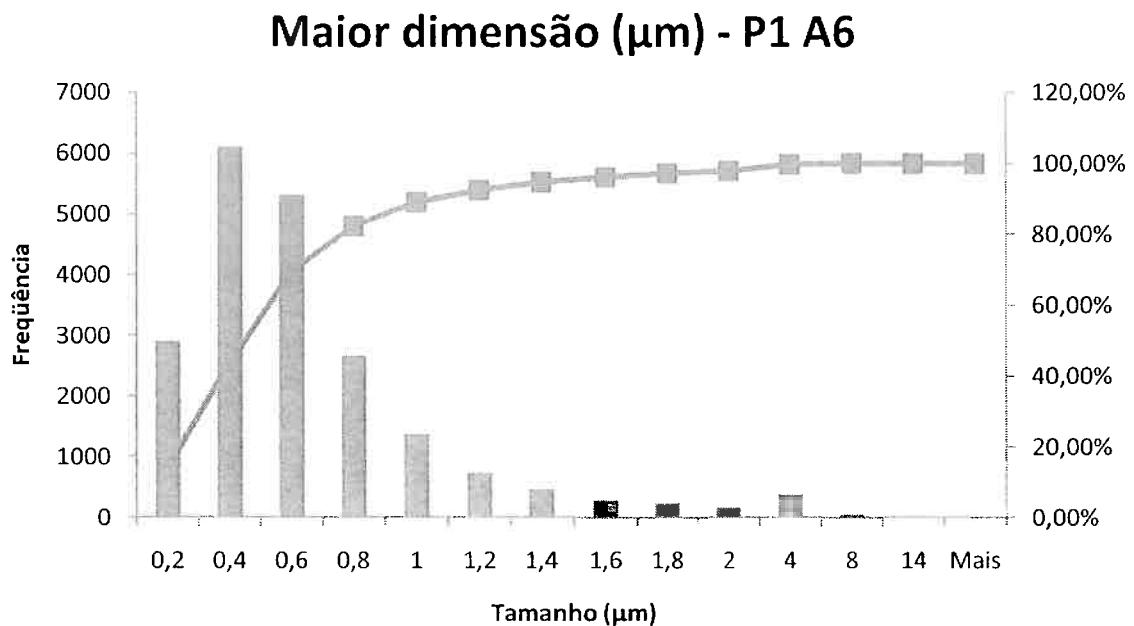


Figura 40: Distribuição da maior dimensão das inclusões na corrida P1 na adição de S

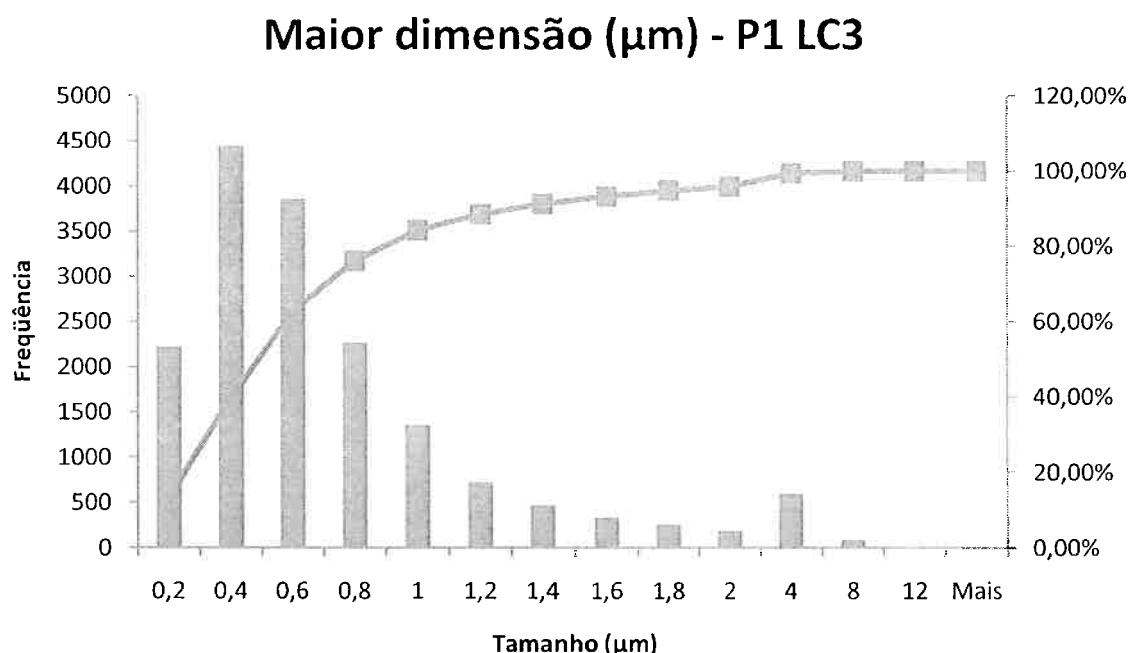


Figura 41: Distribuição da maior dimensão das inclusões na corrida P1 60 minutos após o fim da turbulência no distribuidor

### 5.3 Corrida P2: Comparação entre A6 e LC3

Na corrida P2 houve a coleta de amostras na posição A6, correspondente à adição do arame de S e na posição LC3, correspondente à 60 minutos após o final da turbulência no distribuidor. A seguir são comparadas e comentadas as distribuições das duas etapas, assim como suas médias e desvios padrões.

**Tabela 7: Comparações das informações obtidas da corrida P2**

INFORMAÇÃO	Descrição	P2-A6	P2-LC3	VARIAÇÃO A→LC
# INCLUSÕES POR MM <sup>2</sup>	MÉDIA	21988,93	21421,96	-2,58%
	DESV. PADRÃO	8654,89	8023,90	-7,29%
FRAÇÃO EM ÁREA (%)	MÉDIA	1,18	2,10	78,23%
	DESV. PADRÃO	0,52	1,08	109,32%
RAZÃO DE ASPECTO	MÉDIA	1,28	1,34	4,36%
	DESV. PADRÃO	0,32	0,31	-4,32%
DIÂMETRO EQUIVALENTE (um)	MÉDIA	1,07	1,56	45,22%
	DESV. PADRÃO	1,18	1,51	28,04%
MAIOR DIMENSÃO (um)	MÉDIA	0,60	0,88	48,14%
	DESV. PADRÃO	0,71	0,91	28,84%

Entre a adição de S (A6) e 60 minutos após o fim da turbulência no distribuidor (LC3), a

Tabela 7, a Figura 42 e a Figura 43 mostram que apesar da diminuição da média e do desvio padrão da quantidade de inclusões por mm<sup>2</sup> possuírem uma variação de ordem de grandeza menor em relação a outras corridas, os histogramas indicam que houve a diminuição de concentrações acima de 40.000 inclusões/mm<sup>2</sup> assim como um aumento da concentração de inclusões da faixa de 30.000 inclusões/mm<sup>2</sup>. Em relação à fração de área e maior diâmetro equivalente, houve aumentos tanto na média e desvio padrão, como mostram a Figura 44, a Figura 45, a Figura 48 e a Figura 49.

Houve aumento na massa total das inclusões, e diminuição na quantidade de inclusões de tamanho menores e aumento de inclusões maiores em relação ao diâmetro equivalente.

A flotação das inclusões é regida pela lei de Stokes, que dá a velocidade de flotação de uma esfera de inclusão em meio metálico por diferença de densidade:  $v = \frac{g}{18\eta}(\rho_m - \rho_i)d^2$ , sendo  $\eta$  a viscosidade do metal. Segundo esta lei, as inclusões de tamanho maior têm a probabilidade de flotar mais rapidamente do que inclusões menores.

A eliminação de inclusões de tamanho menor é característica do processo de flotação. Porém o aumento da quantidade de inclusões maiores sugere que este não foi o único evento ocorrendo em relação às inclusões da corrida P2 indicando que ocorreu outro(s) fenômeno(s) que aumentou (aram) a concentração de inclusões para a faixa de 30.000 inclusões por mm<sup>2</sup>.

## A

Tabela 7, a Figura 46, a Figura 47, a Figura 50, a Figura 51 mostram que houve aumento na quantidade de inclusões de maior dimensão a partir de 0,6 µm assim como aumento na média e desvio padrão da razão de aspecto e maior dimensão.

Assim, ocorreu um aumento na quantidade de inclusões angulosas e de maior tamanho entre A6 e LC3.

Segundo MORAES,<sup>(1)</sup> na corrida P2, houve a presença de inclusões de aluminato de cálcio líquidos na adição de S, mas não 60 minutos após o fim da turbulência no distribuidor, que pode ser explicado pelo um aumento na porcentagem de MgO da panela para o distribuidor. Esse aumento na quantidade de MgO pode ter ocorrido devido ao desgaste no refratário ou o excesso de Al que diminui a atividade de oxigênio no banho e promove a migração de Mg do refratário para o aço, causando um aumento da temperatura de fusão das inclusões pela formação de espinélio. Além disso, ocorreu a presença das inclusões de CA-

(Ca,Mn)S, sólida na temperatura de lingotamento, a qual causa entupimento nas válvulas submersas do distribuidor.

Desse modo, os aumento nas quantidades de inclusões maiores e mais angulosas, a presença das inclusões de CA-(Ca,Mn)S e o aumento na % de MgO da panela para o lingotamento indicam a formação do espinélio e do CaS.

### 5.3.1 Distribuição do número de inclusões por mm<sup>2</sup>

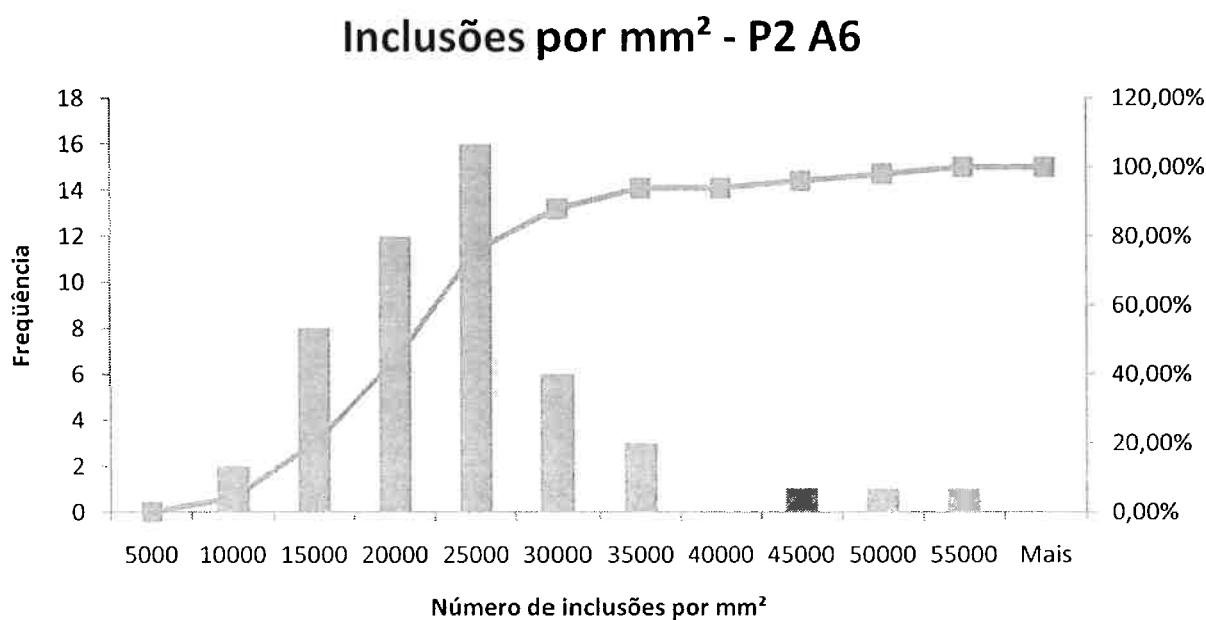


Figura 42: Distribuição das inclusões por mm<sup>2</sup> da corrida P2 na adição de S

### Inclusões por mm<sup>2</sup> - P2 LC3

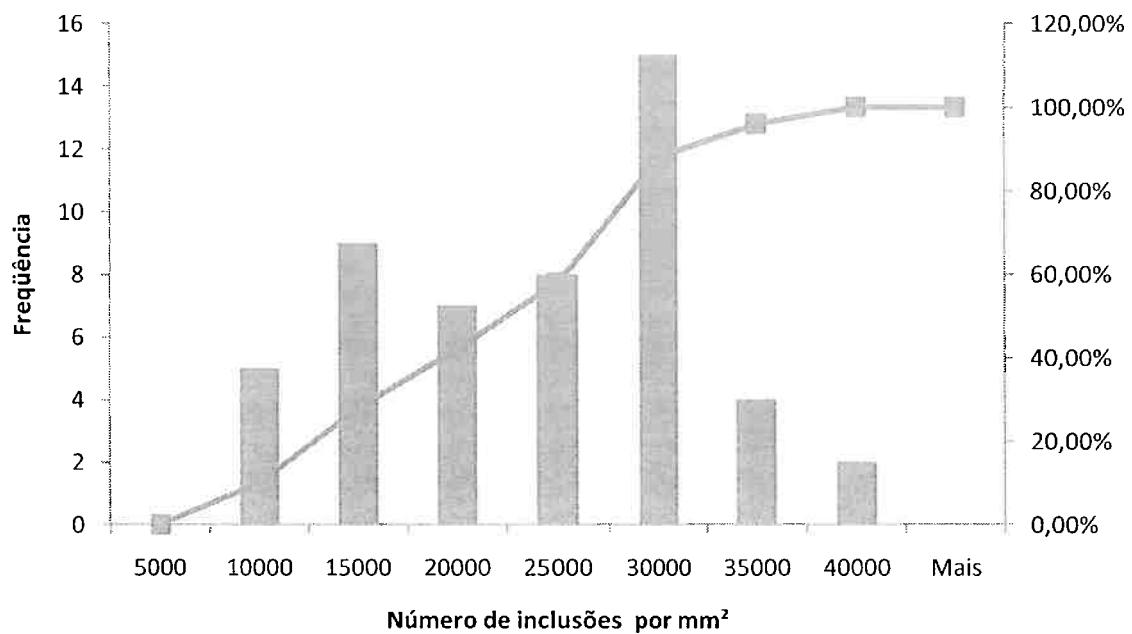


Figura 43: Distribuição das inclusões por mm<sup>2</sup> da corrida P2 60 minutos após o fim da turbulência no distribuidor

#### 5.3.2 Distribuição da fração de área das inclusões

### Fração de área - P2 A6

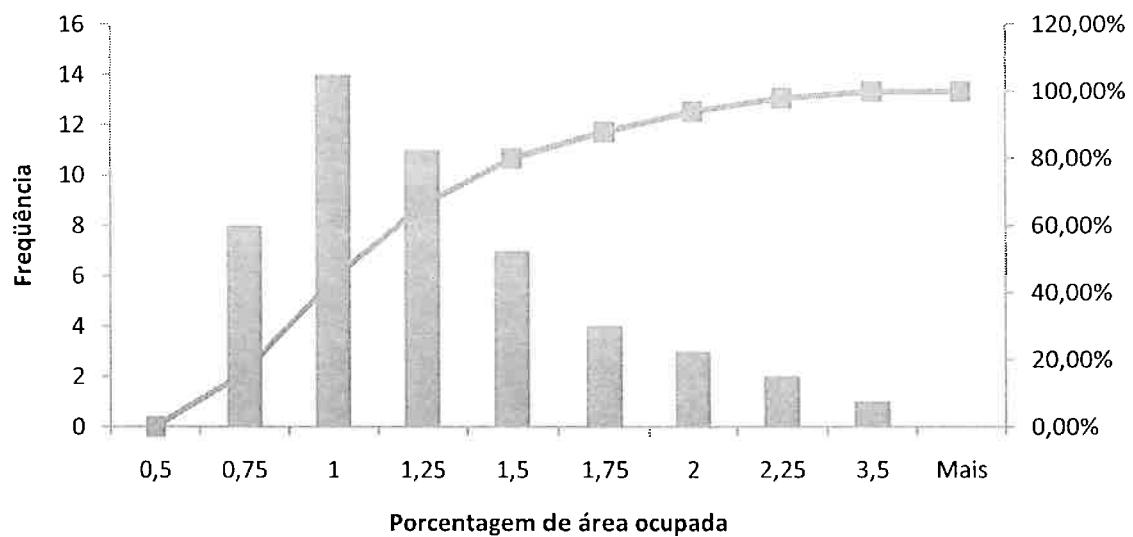


Figura 44: Distribuição da porcentagem da área ocupada pelas inclusões da corrida P2 na adição de S

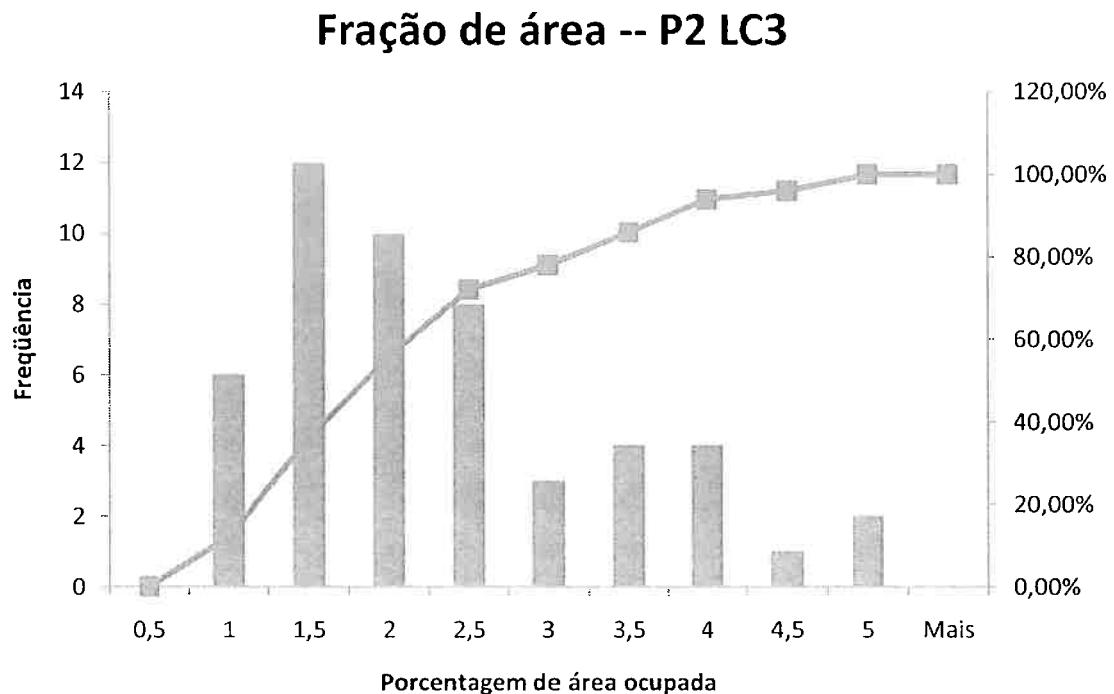


Figura 45: Distribuição da porcentagem da área ocupada pelas inclusões da corrida P2 60 minutos após o fim da turbulência no distribuidor

### 5.3.3 Distribuição da razão de aspecto das inclusões

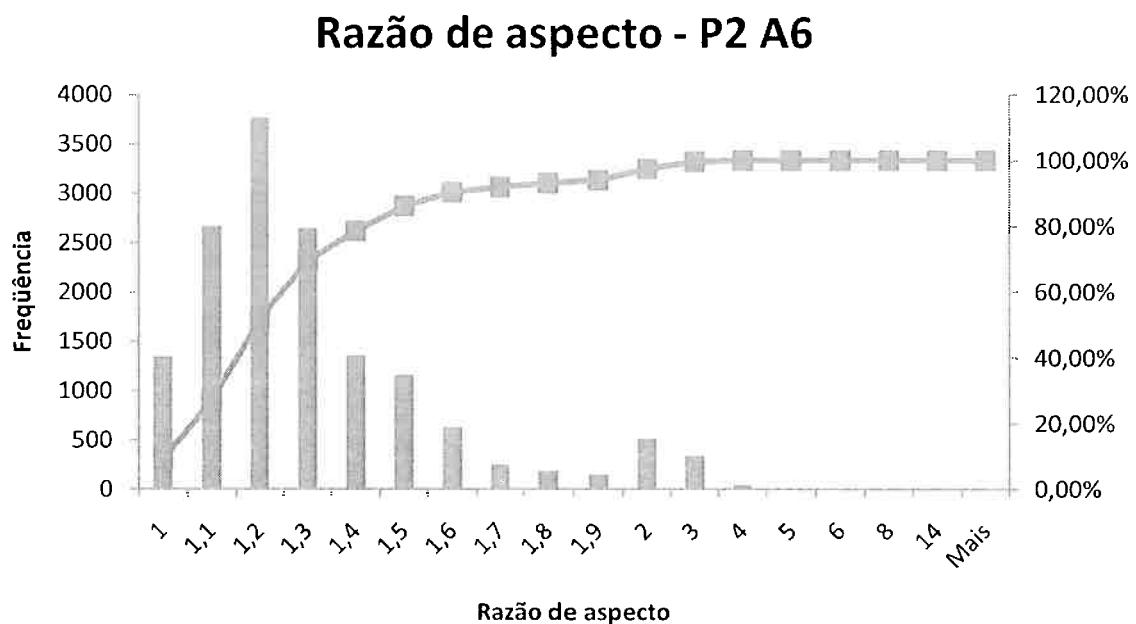


Figura 46: Distribuição da razão de aspecto das inclusões da corrida P2 na adição de S

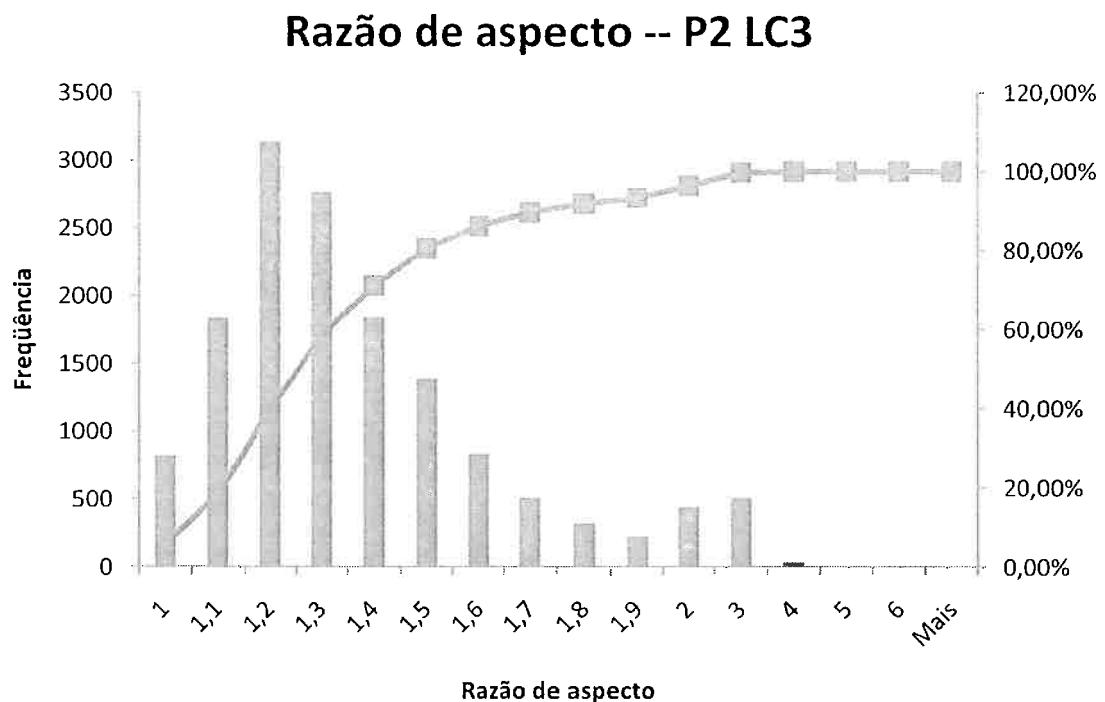


Figura 47: Distribuição da razão de aspecto das inclusões da corrida P2 60 minutos após o fim da turbulência no distribuidor

### 5.3.4 Distribuição de tamanho das inclusões: diâmetro equivalente ( $\mu\text{m}$ )

**Diâmetro equivalente ( $\mu\text{m}$ ) - P2 A6**

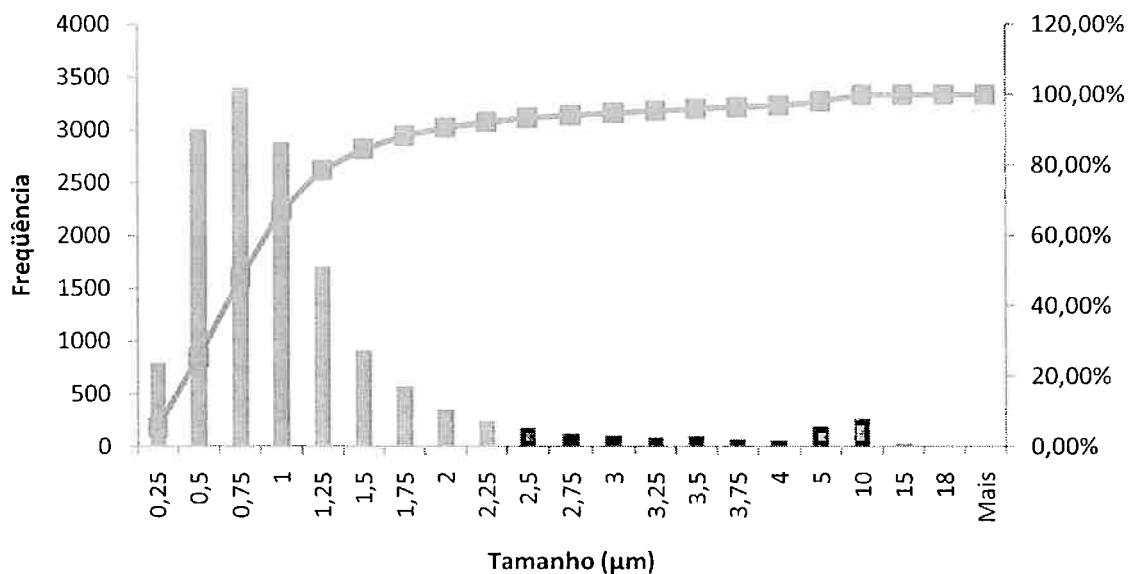


Figura 48: Distribuição do diâmetro equivalente das inclusões na corrida P2 na adição de S

**Diâmetro equivalente ( $\mu\text{m}$ ) -- P2 LC3**

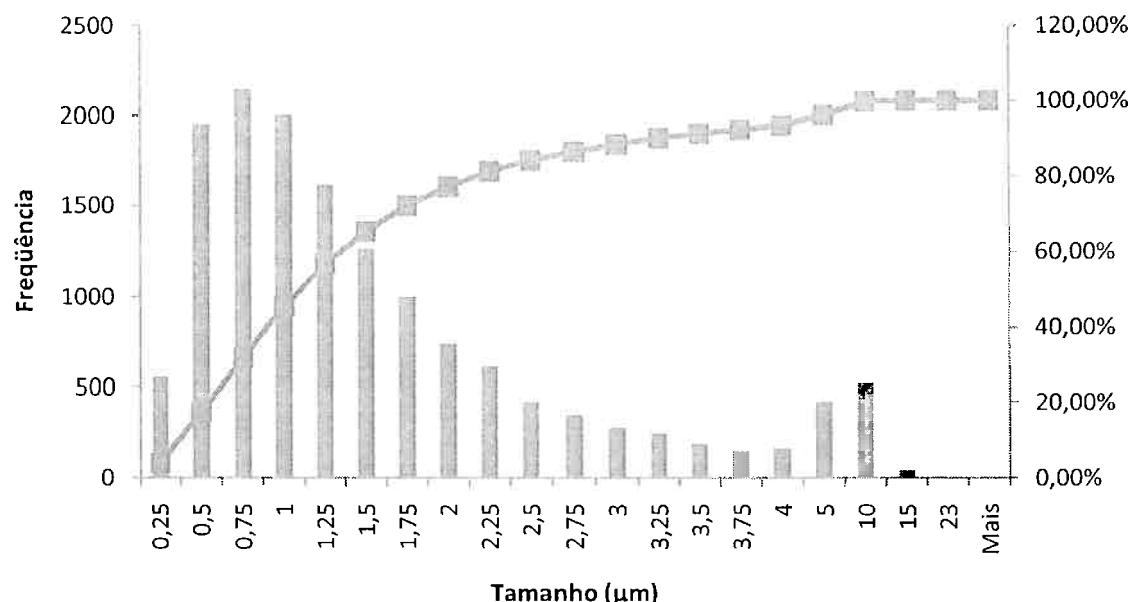


Figura 49: Distribuição do diâmetro equivalente das inclusões na corrida P2 60 minutos após o fim da turbulência no distribuidor

### 5.3.5 Distribuição de tamanho das inclusões: comprimento da maior dimensão ( $\mu\text{m}$ )

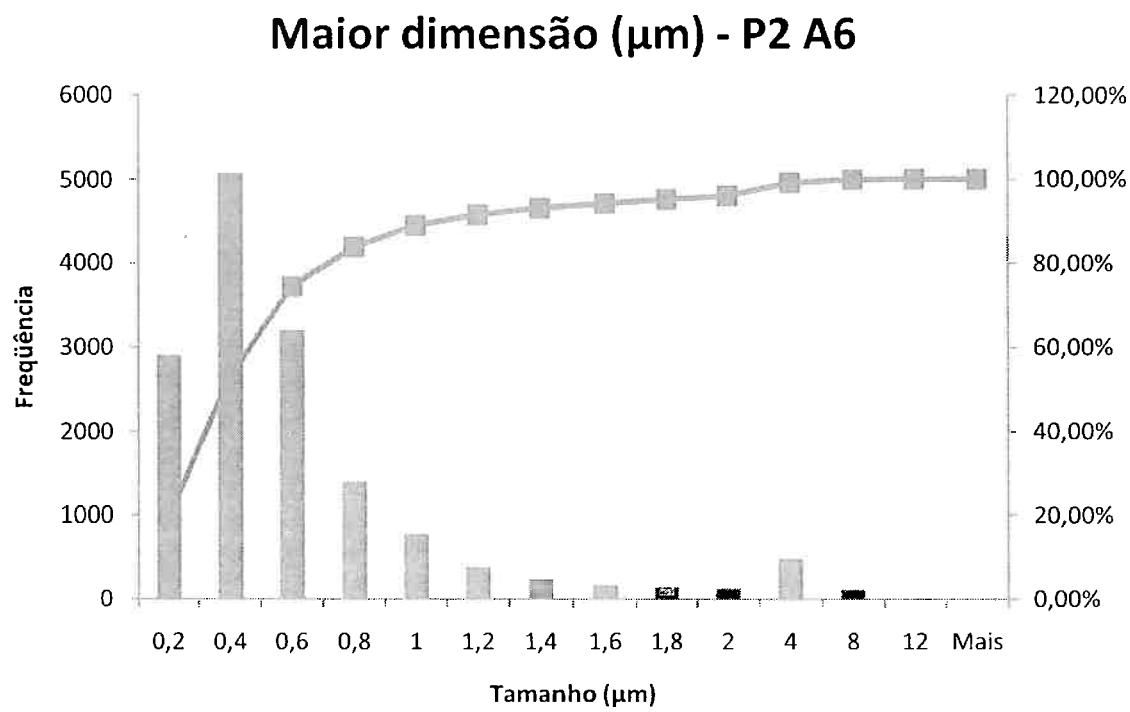


Figura 50: Distribuição da maior dimensão das inclusões na corrida P2 na adição de S

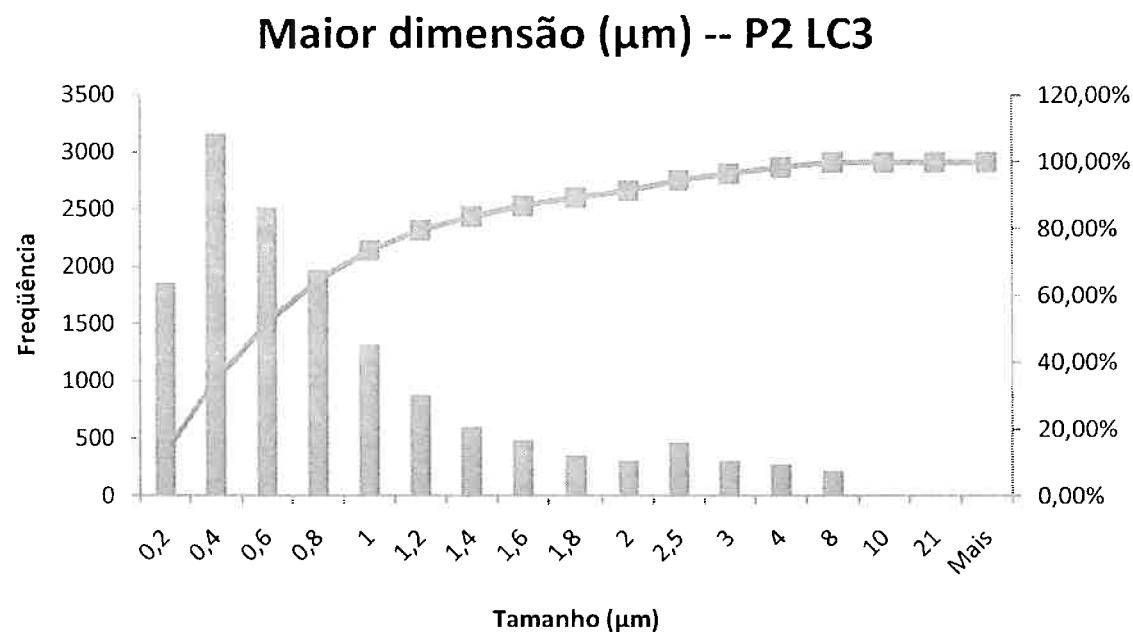


Figura 51: Distribuição da maior dimensão das inclusões na corrida P2 60 minutos após o fim da turbulência no distribuidor

## 5.4 Corrida P3: Comparação entre A6 e LC2

Na corrida P3 houve a coleta de amostras na posição A6, correspondente à adição do arame de S e na posição LC2, correspondente à 30 minutos após o final da turbulência no distribuidor. A seguir são comparadas e comentadas as distribuições das duas etapas, assim como suas médias e desvios padrões.

**Tabela 8: Comparações das informações obtidas da corrida P3**

INFORMAÇÃO	Descrição	P3-A6	P3-LC2	VARIAÇÃO A→LC
# INCLUSÕES POR MM <sup>2</sup>	MÉDIA	42394,14	26203,88	-38,19%
	DESV. PADRÃO	9986,05	10071,54	0,86%
FRAÇÃO EM ÁREA (%)	MÉDIA	2,12	1,30	-38,96%
	DESV. PADRÃO	0,70	0,53	-23,71%
RAZÃO DE ASPECTO	MÉDIA	1,29	1,28	-0,87%
	DESV. PADRÃO	0,30	0,31	1,79%
DIÂMETRO EQUIVALENTE (um)	MÉDIA	1,23	1,18	-4,71%
	DESV. PADRÃO	0,97	1,01	3,19%
MAIOR DIMENSÃO (um)	MÉDIA	0,69	0,66	-4,88%
	DESV. PADRÃO	0,59	0,63	7,63%

Entre as etapas de adição de S (A6) e de 30 minutos após o fim da turbulência no distribuidor (LC2) houve uma diminuição na média do número de inclusões por mm<sup>2</sup> assim como uma mudança no formato do histograma do número de inclusões por mm<sup>2</sup>, mas com a variação do desvio padrão foi menor do que 1%, sinalizando que as concentrações em A6 e LC2 se mantiveram igualmente próximas às médias. Houve uma diminuição na média e no desvio padrão da fração de área, e uma diminuição da média e um aumento no desvio padrão maior dimensão das inclusões, como mostram a Tabela 8, a Figura 52, a Figura 53, a Figura 54, a Figura 55, a Figura 58 e a Figura 59.

Portanto, ocorreu uma diminuição na massa e na quantidade de inclusões de todos os tamanhos, porém o histograma variou pouco no formato.

A flotação das inclusões é regida pela lei de Stokes, que dá a velocidade de flotação de uma esfera de inclusão em meio metálico por diferença de densidade:

$v = \frac{g}{18\eta} (\rho_m - \rho_i)d^2$ , sendo  $\eta$  a viscosidade do metal. Segundo esta lei, as inclusões de tamanho maior têm a probabilidade de flotar mais rapidamente do que inclusões menores.

Portanto tipo de eliminação de inclusões da corrida P3 indica a eliminação das inclusões por flotação na panela e/ou no distribuidor.

Houve também uma redução na média e desvio padrão da razão de aspecto e na média do diâmetro equivalente. Porém houve um aumento no desvio padrão do diâmetro equivalente entre as etapas de A6 e LC2, como mostram a Tabela 8, a Figura 56, a Figura 57, a Figura 60 e a Figura 61.

Assim, houve uma redução na quantidade das inclusões maiores e de formato menos arredondado (anguloso), prevalecendo na etapa LC2 inclusões menores e de formato mais arredondado.

Segundo MORAES<sup>(1)</sup>, na corrida P3 houve uma adição de CaSi suficiente para a geração de aluminatos de cálcio líquidos tanto no distribuidor, gerando inclusões de formato arredondado.

Portanto, juntamente com a flotação, a formação de aluminatos de cálcio líquidos e a redução das inclusões angulosas indicam que o tratamento de cálcio foi efetivo para a modificação das inclusões de alumina

#### 5.4.1 Distribuição do número de inclusões por $\text{mm}^2$

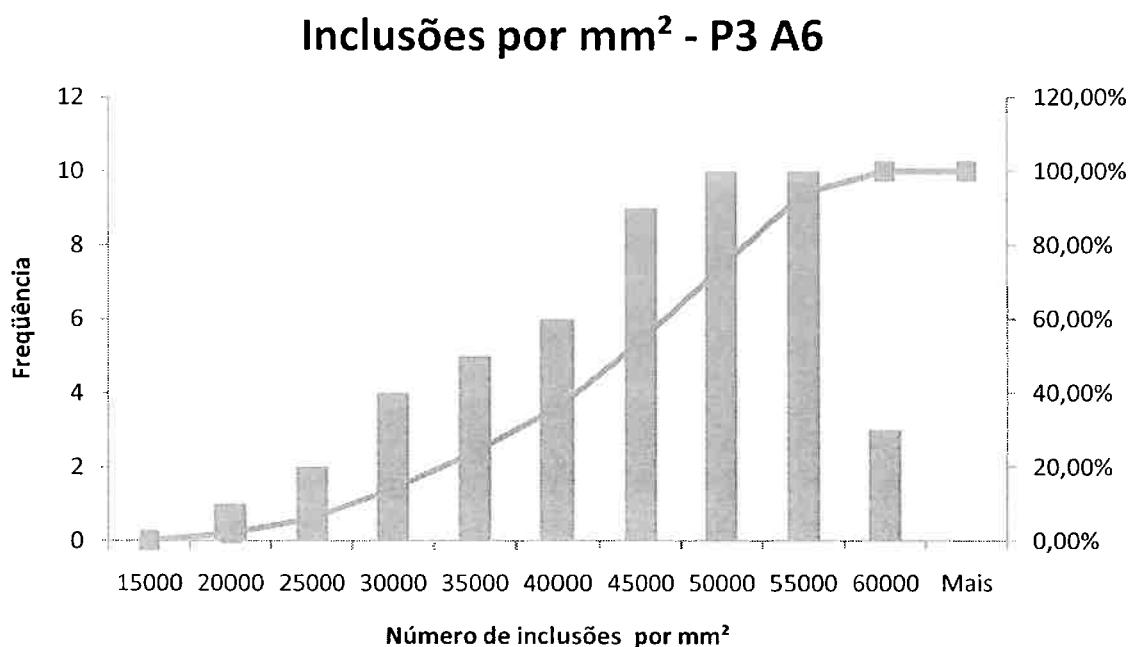


Figura 52: Distribuição das inclusões por  $\text{mm}^2$  da corrida P3 na adição de S

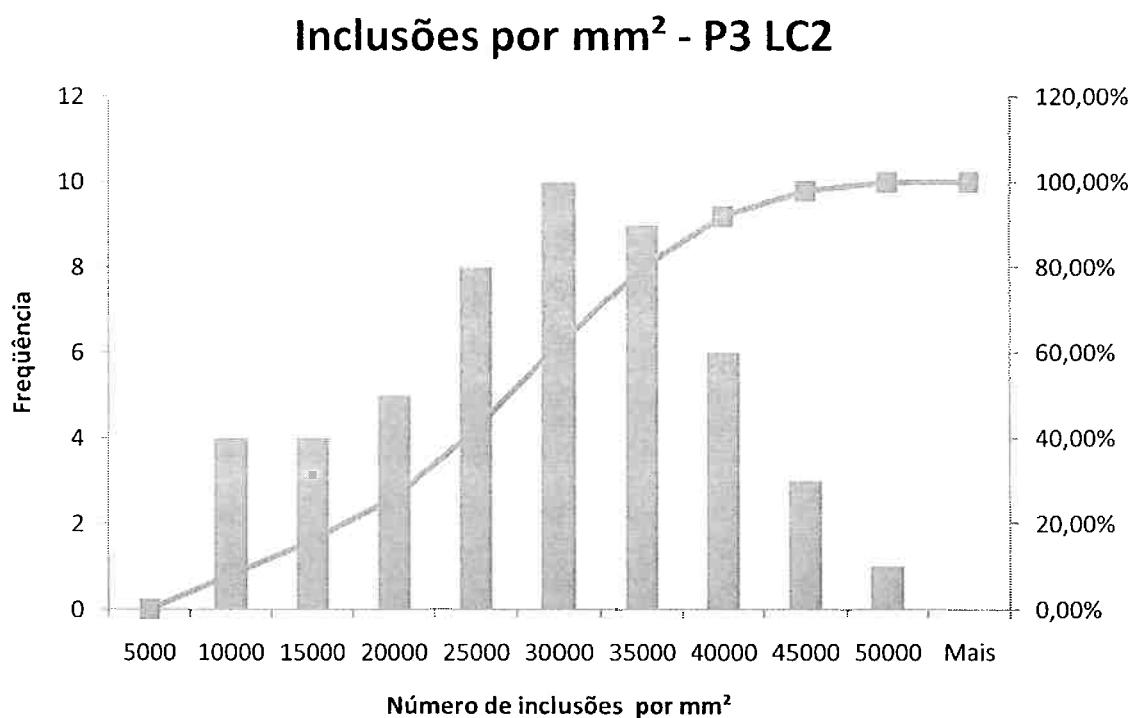


Figura 53: Distribuição das inclusões por  $\text{mm}^2$  da corrida P3 30 minutos após o fim da turbulência no distribuidor

#### 5.4.2 Distribuição da fração de área das inclusões

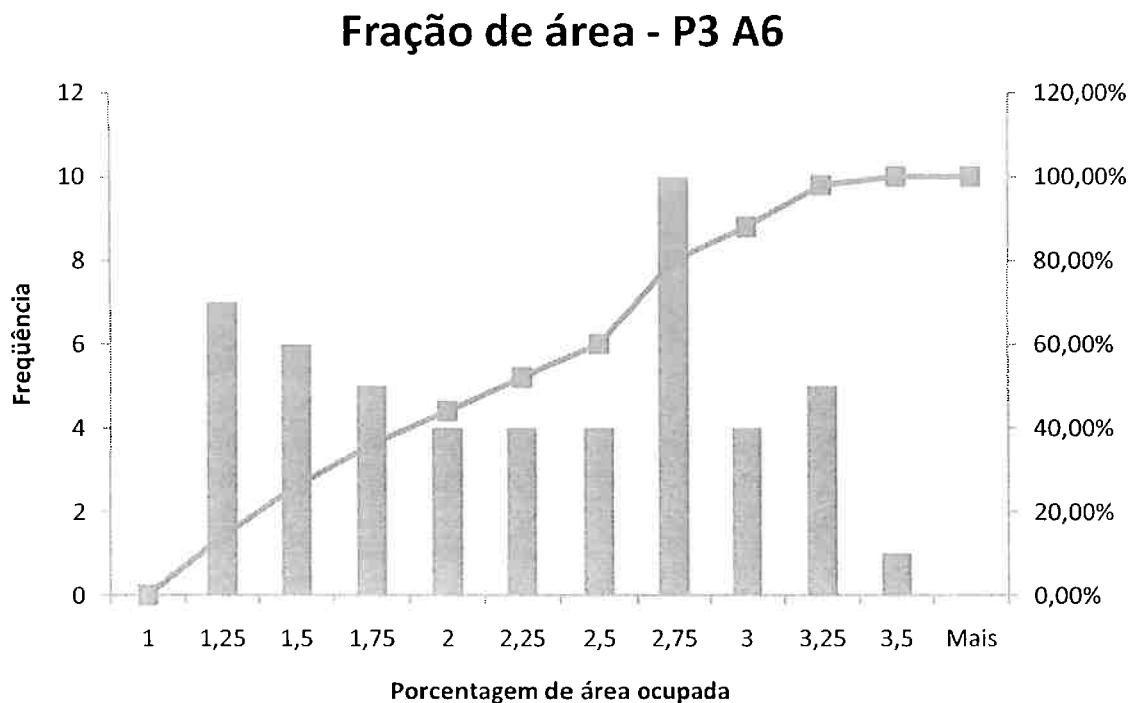


Figura 54: Distribuição da porcentagem da área ocupada pelas inclusões da corrida P3 na adição de S

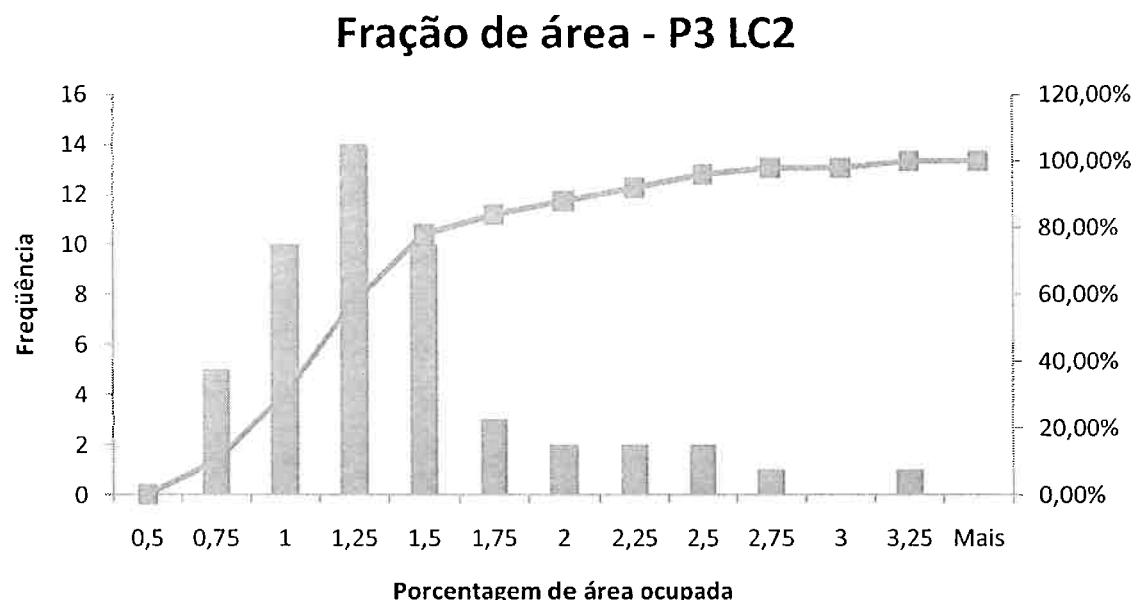


Figura 55: Distribuição da porcentagem da área ocupada pelas inclusões da corrida P3 30 minutos após o fim da turbulência no distribuidor

#### 5.4.3 Distribuição da razão de aspecto das inclusões

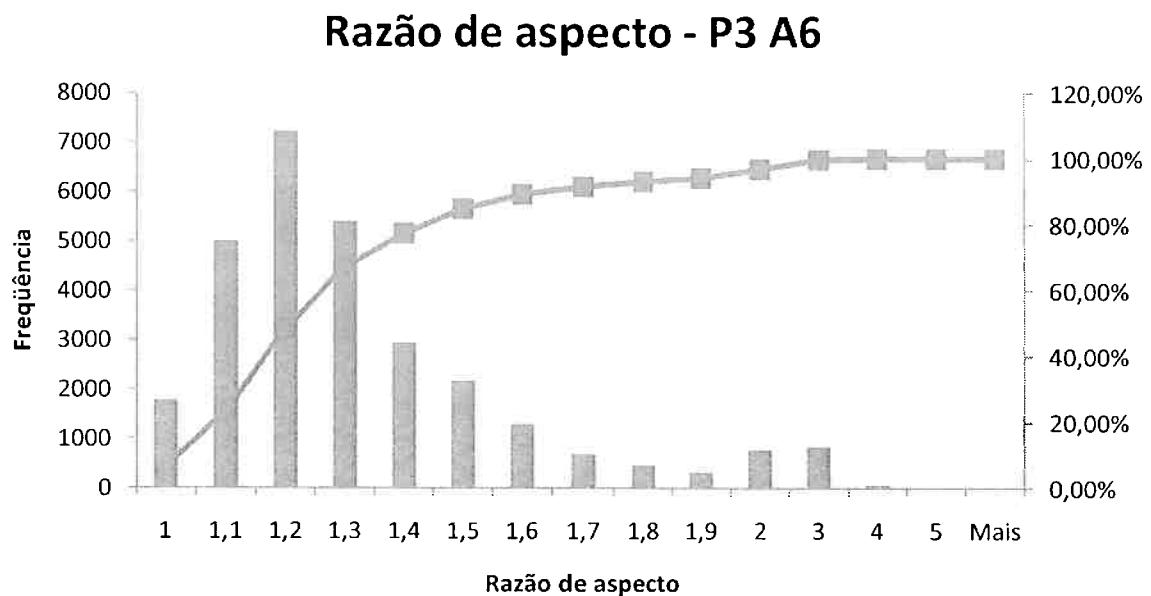


Figura 56: Distribuição da razão de aspecto das inclusões da corrida P3 na adição de S

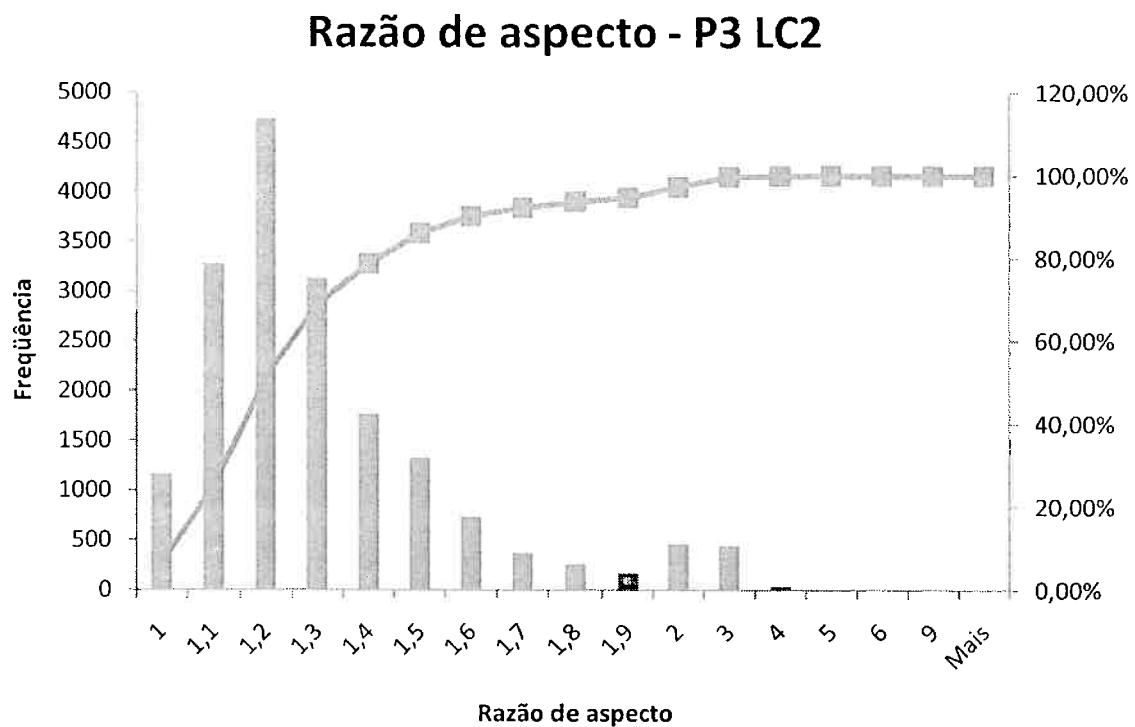


Figura 57: Distribuição da razão de aspecto das inclusões da corrida P3 30 minutos após o fim da turbulência no distribuidor

#### 5.4.4 Distribuição de tamanho das inclusões: diâmetro equivalente ( $\mu\text{m}$ )

**Diâmetro equivalente ( $\mu\text{m}$ ) - P3 A6**

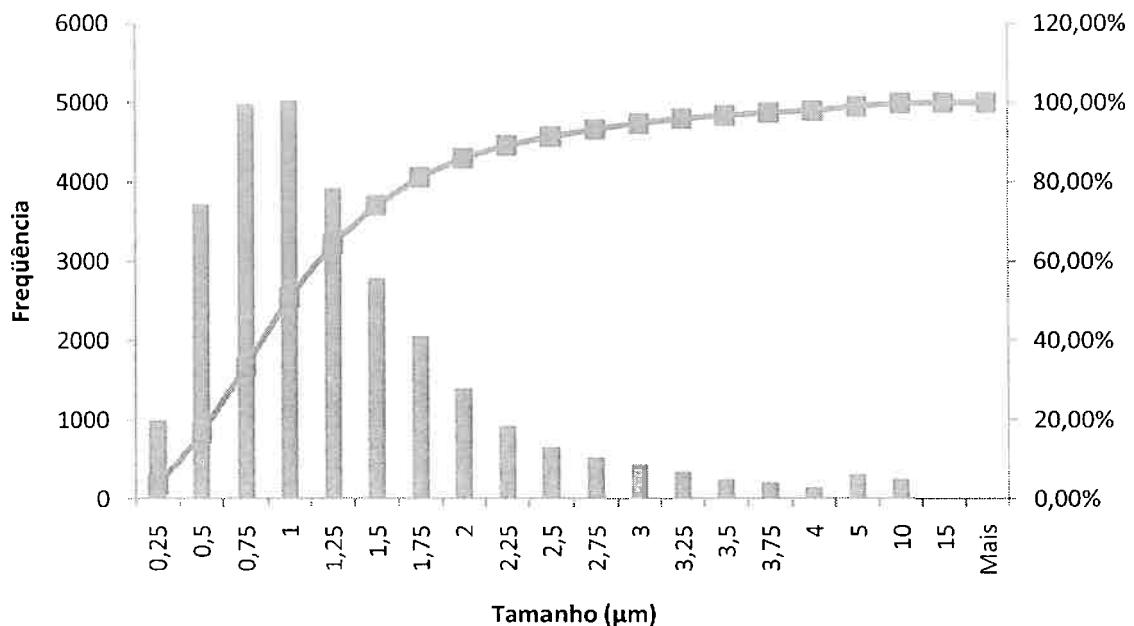


Figura 58: Distribuição do diâmetro equivalente das inclusões na corrida P3 na adição de S

**Diâmetro equivalente ( $\mu\text{m}$ ) - P3 LC2**

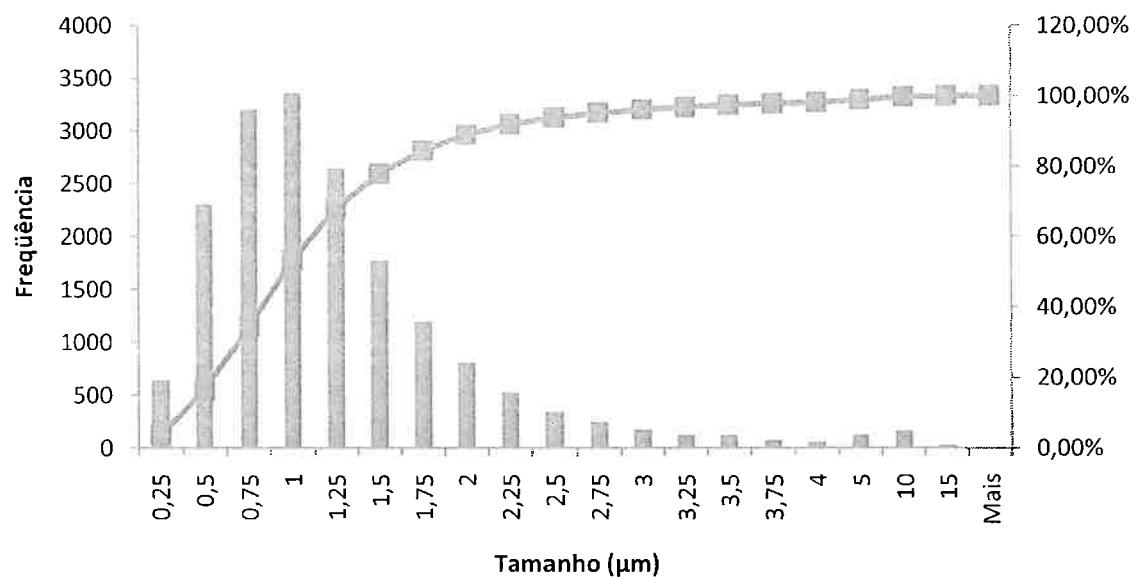


Figura 59: Distribuição do diâmetro equivalente das inclusões na corrida P3 30 minutos após o fim da turbulência no distribuidor

#### 5.4.5 Distribuição de tamanho das inclusões: comprimento da maior dimensão ( $\mu\text{m}$ )

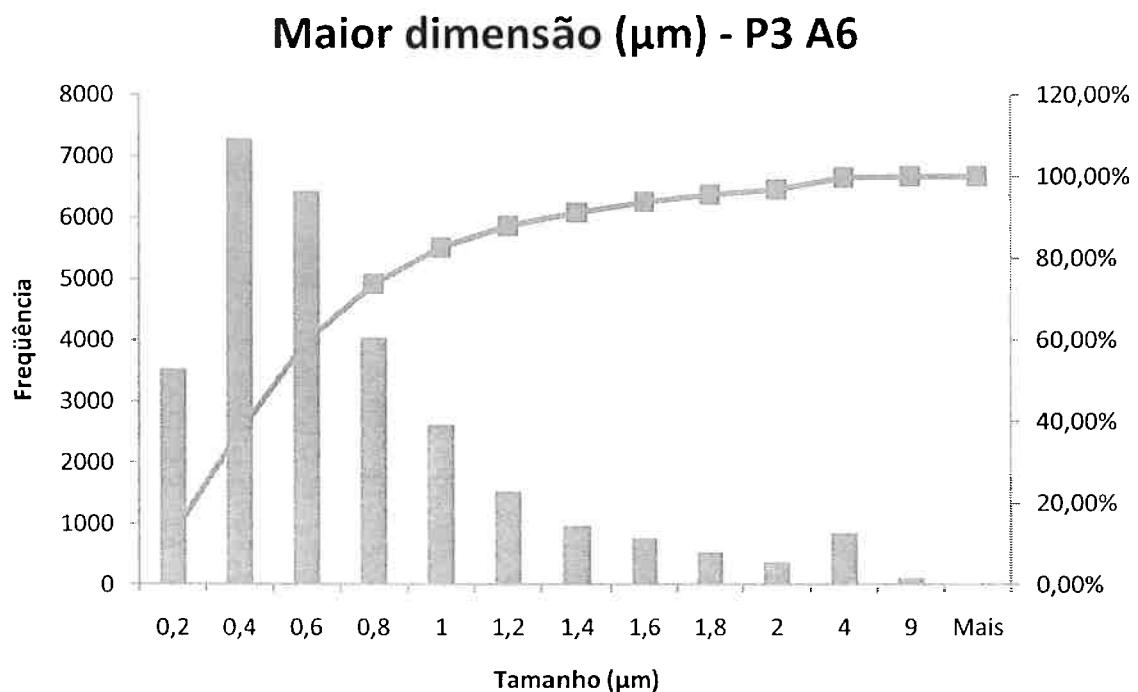


Figura 60: Distribuição da maior dimensão das inclusões na corrida P3 na adição de S

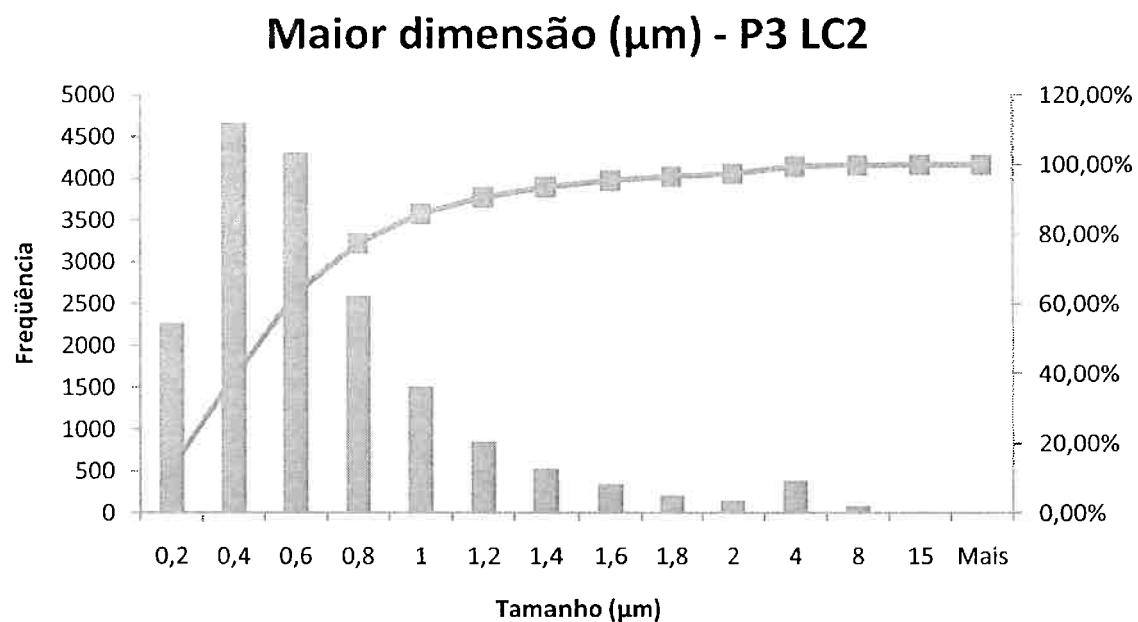


Figura 61: Distribuição da maior dimensão das inclusões na corrida P3 30 minutos após o fim da turbulência no distribuidor

## 5.5 Corrida P4: Comparação entre A6 e LC1

Na corrida P4 houve a coleta de amostras na posição A6, correspondente à adição do arame de S e na posição LC1, correspondente à imediatamente após o final da turbulência no distribuidor. A seguir são comparadas e comentadas as distribuições das duas etapas, assim como suas médias e desvios padrões.

**Tabela 9: Comparações das informações obtidas da corrida P4**

INFORMAÇÃO	Descrição	P4-A6	P4-LC1	VARIAÇÃO A→LC
# INCLUSÕES POR MM <sup>2</sup>	MÉDIA	5457,31	25551,93	368,21%
	DESV. PADRÃO	2363,58	7539,48	218,98%
FRAÇÃO EM ÁREA (%)	MÉDIA	0,96	1,53	58,53%
	DESV. PADRÃO	0,67	0,54	-19,20%
RAZÃO DE ASPECTO	MÉDIA	1,33	1,31	-1,80%
	DESV. PADRÃO	0,39	0,33	-16,99%
DIÂMETRO EQUIVALENTE (um)	MÉDIA	1,88	1,36	-27,78%
	DESV. PADRÃO	2,20	1,04	-52,88%
MAIOR DIMENSÃO (um)	MÉDIA	1,07	0,76	-28,47%
	DESV. PADRÃO	1,28	0,63	-50,95%

Entre a adição de S (A6) e imediatamente após o fim da turbulência no distribuidor (LC1) houve o aumento da média e desvio padrão do número de inclusões por mm<sup>2</sup> em 368% e 218% respectivamente, sendo esses valores 10 vezes maiores do que o padrão de outras corridas. A média da fração em área aumentou, mas seu desvio padrão diminuiu, juntamente com a média e desvio padrão do diâmetro equivalente, como mostra a Tabela 9, a Figura 62, a Figura 63, a Figura 64, a Figura 65, a Figura 68 e a Figura 69

A massa total das inclusões aumentou, juntamente com a sua quantidade, ocorrendo principalmente nas inclusões de menor tamanho.

Segundo MORAES <sup>(1)</sup> a reoxidação da superfície de metal líquido é caracterizada pela reação de elementos constituintes do aço com o oxigênio do ar. Ela pode ocorrer quando o banho é exposto à atmosfera temporariamente, como na superfície do banho que ficam desprotegidas no forno panela, no distribuidor ou nas

juntas de refratários e válvulas. O processo de reoxidação envolve o transporte de oxigênio para o banho, precipitação da fase óxido e crescimento do precipitado de óxido.

Portanto, o aumento de massa e quantidade de inclusões, principalmente as de tamanho menor, sugerindo reoxidação da corrida P4.

A média da razão de aspecto diminuiu, mas seu desvio padrão diminuiu, assim como a média e desvio padrão da maior dimensão, sendo que houve aumento da quantidade das inclusões de tamanho maior como mostram a Tabela 9, a Figura 66, a Figura 67, a Figura 70 e a Figura 71.

Houve a predominante formação de inclusões menores e menos angulosas.

Segundo MORAES,<sup>(1)</sup> na corrida P4 foi insuficiente a quantidade CaSi para formar aluminatos de cálcio líquidos, tanto na fase A6 quanto na fase LC1. Houve aumento na quantidade de MgO da panela para o distribuidor, sendo as inclusões características da fase espinélio. Esse aumento na quantidade de MgO pode ter ocorrido devido ao desgaste no refratário ou o excesso de Al que diminui a atividade de oxigênio no banho e promove a migração de Mg do refratário para o aço. Houve um pequeno aumento nas inclusões de maior tamanho.

Assim, o brusco aumento de massa das inclusões, principalmente as de menor dimensão assim como o aumento da porcentagem de MgO na corrida P4 indica reoxidação no banho e formação de espinélio. Porém, a diminuição na razão de aspecto indica que a adição de CaSi foi teve sucesso na alteração da morfologia das inclusões de alumina, porém ainda sendo insuficiente para a formação de aluminatos de cálcio no estado líquido.

### 5.5.1 Distribuição do número de inclusões por $\text{mm}^2$

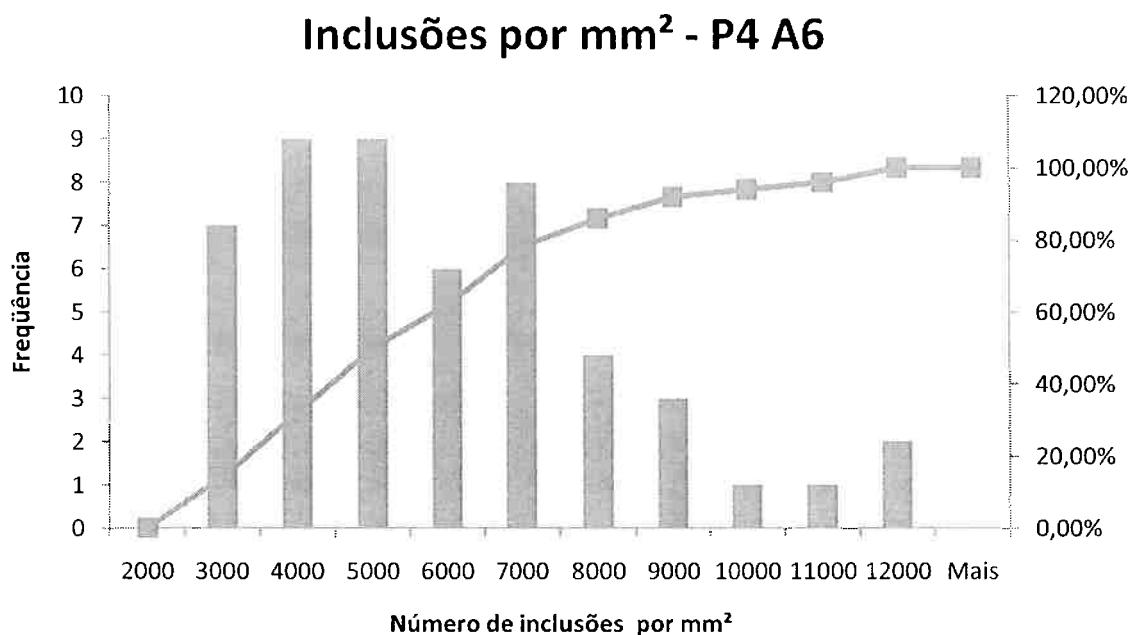


Figura 62: Distribuição das inclusões por  $\text{mm}^2$  da corrida P4 na adição de S

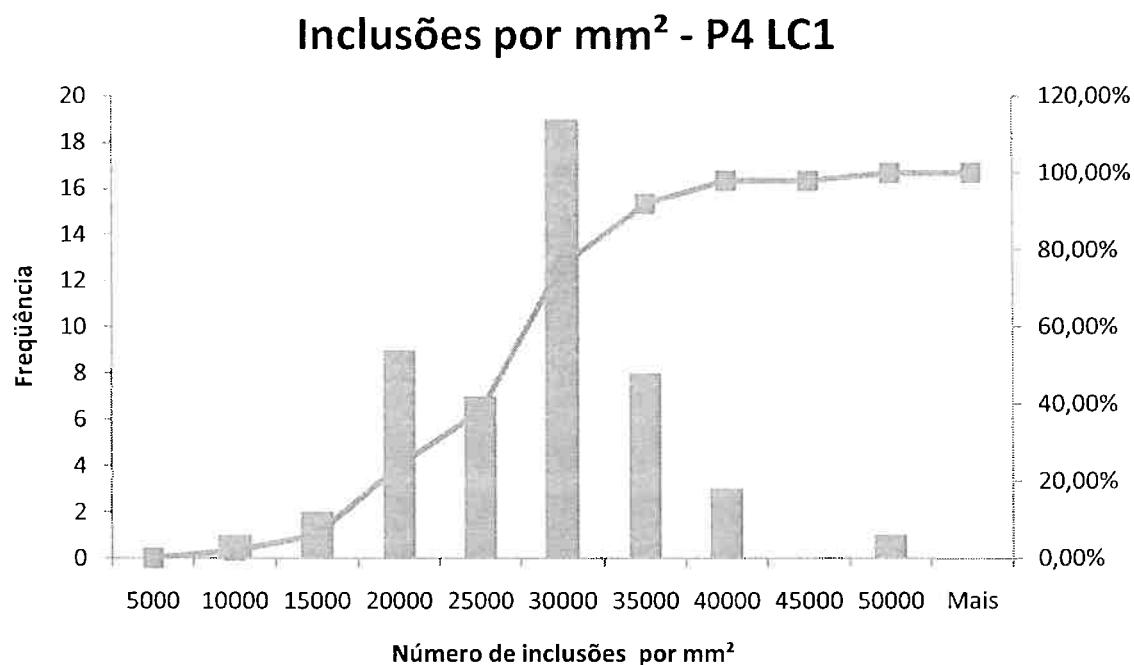


Figura 63: Distribuição das inclusões por  $\text{mm}^2$  da corrida P4 imediatamente após o fim da turbulência no distribuidor

### 5.5.2 Distribuição da fração de área das inclusões

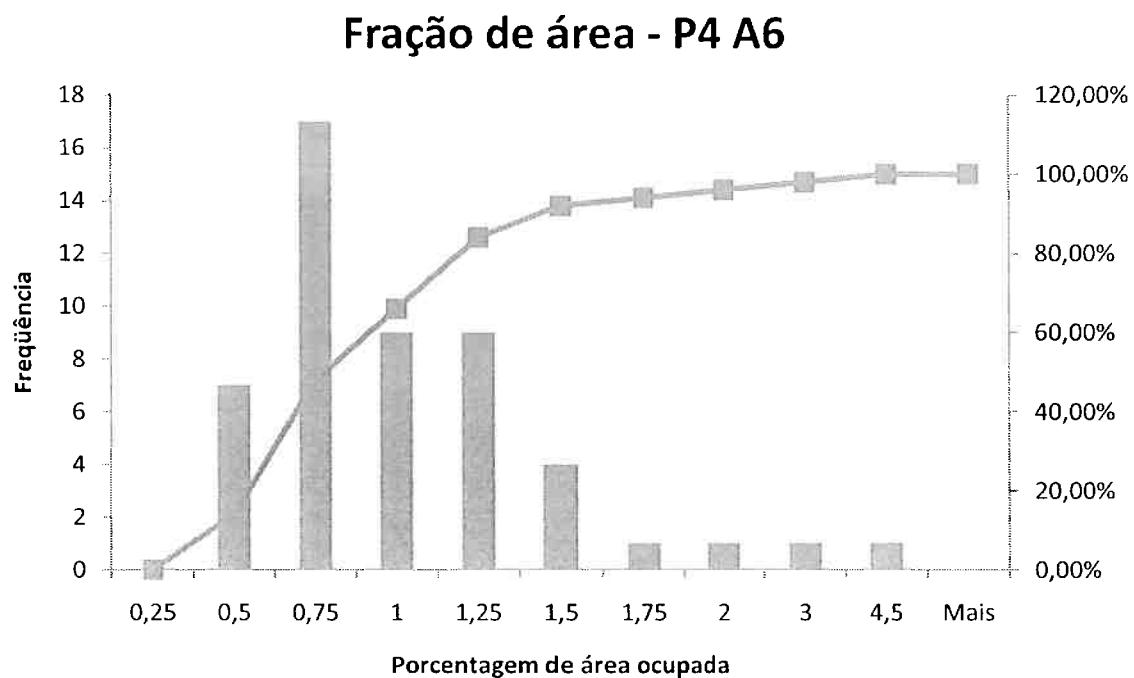


Figura 64: Distribuição da porcentagem da área ocupada pelas inclusões da corrida P4 na adição de S

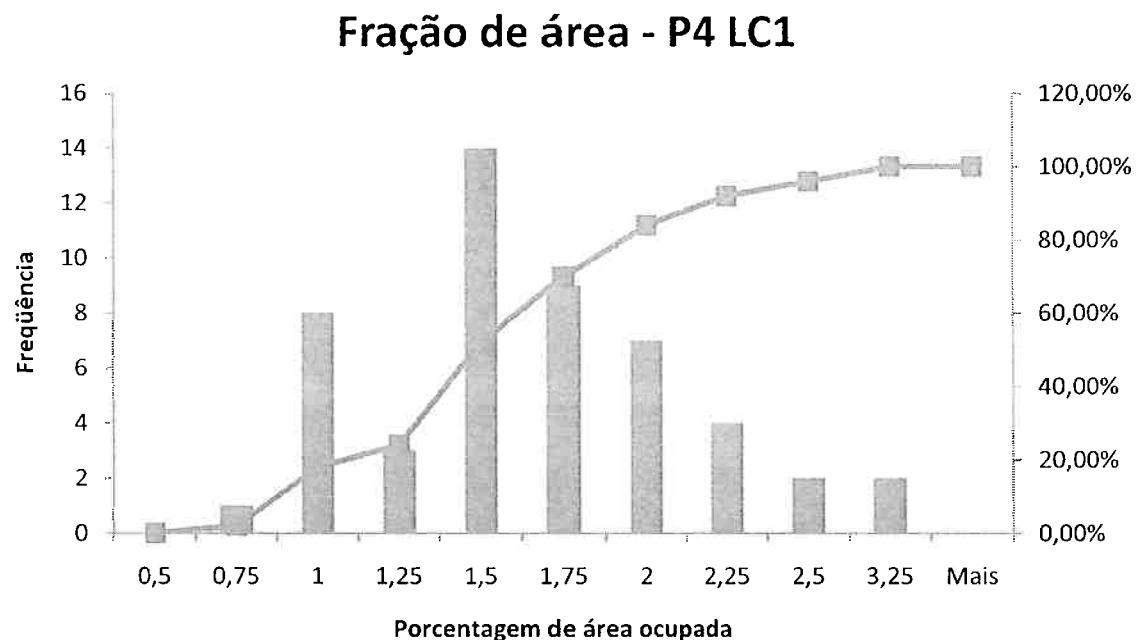


Figura 65: Distribuição da porcentagem da área ocupada pelas inclusões da corrida P4 imediatamente após o fim da turbulência no distribuidor

### 5.5.3 Distribuição da razão de aspecto das inclusões

**Razão de aspecto - P4 A6**

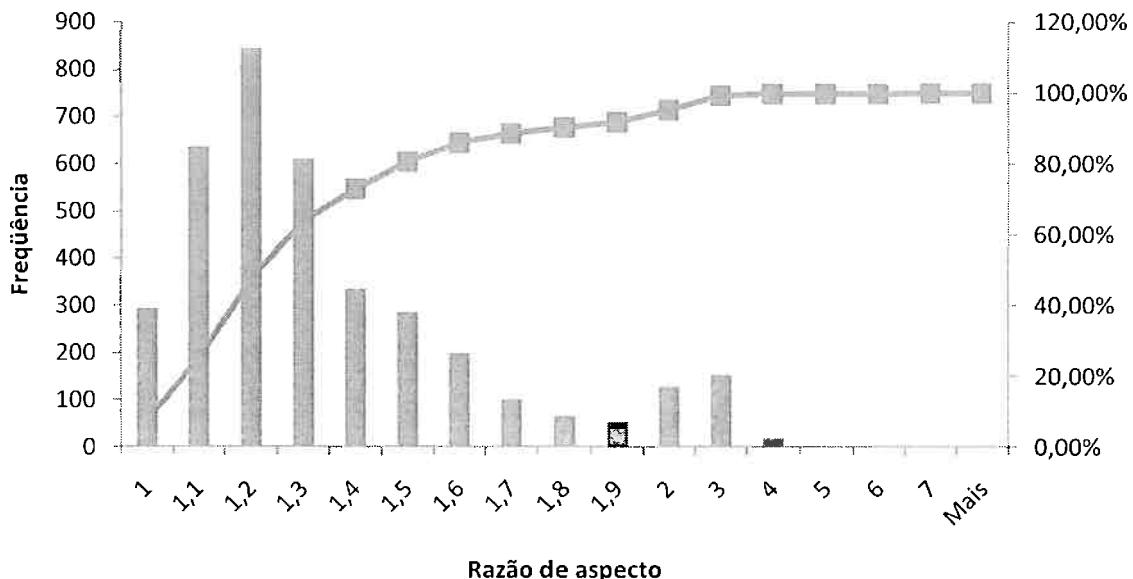


Figura 66: Distribuição da razão de aspecto das inclusões da corrida P4 na adição de S

**Razão de aspecto - P4 LC1**

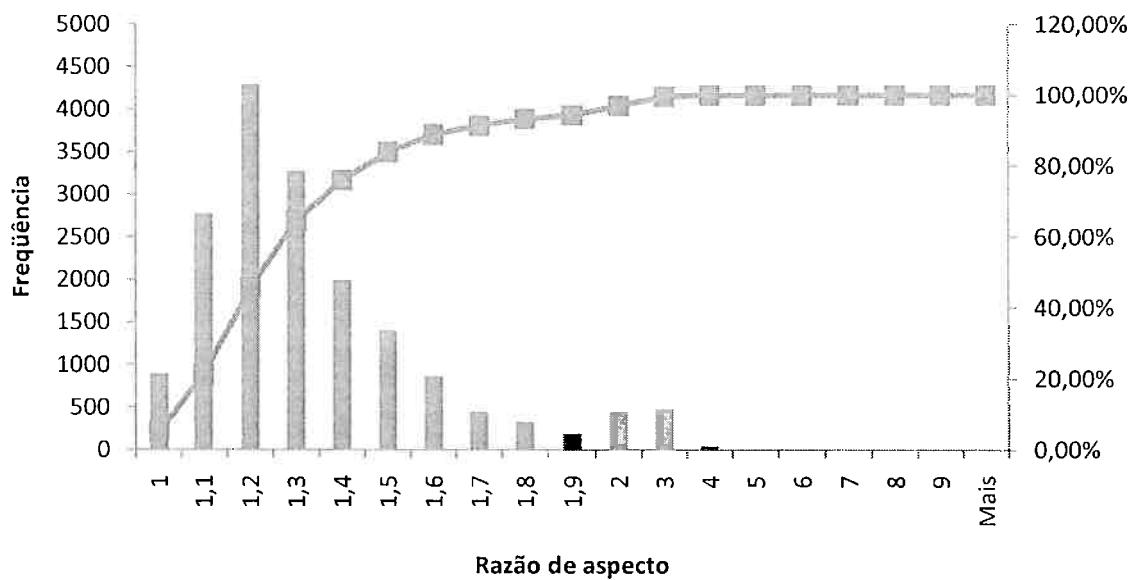


Figura 67: Distribuição da razão de aspecto das inclusões da corrida P4 imediatamente após o fim da turbulência no distribuidor

#### 5.5.4 Distribuição de tamanho das inclusões: diâmetro equivalente ( $\mu\text{m}$ )

**Diâmetro equivalente ( $\mu\text{m}$ ) - P4 A6**

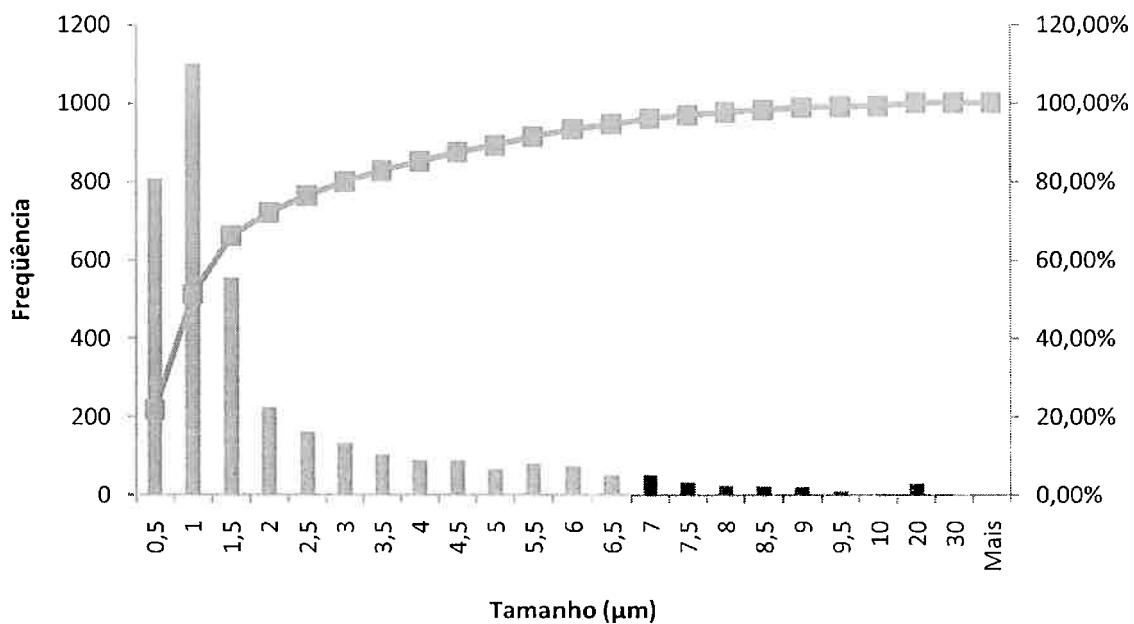


Figura 68: Distribuição do diâmetro equivalente das inclusões na corrida P4 na adição de S

**Diâmetro equivalente ( $\mu\text{m}$ ) - P4 LC1**

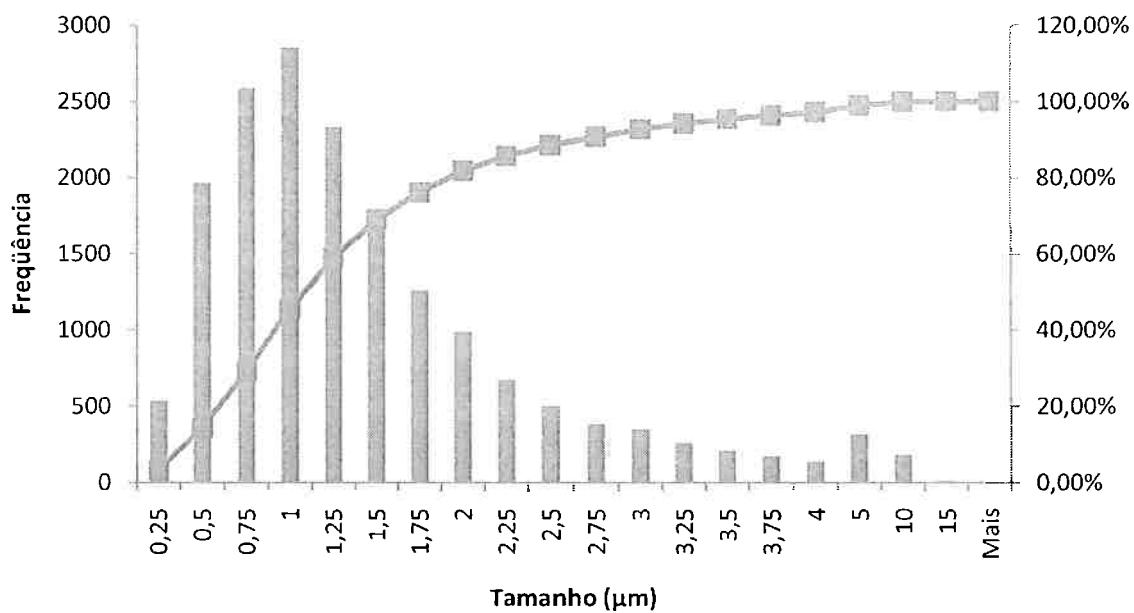


Figura 69: Distribuição do diâmetro equivalente das inclusões na corrida P4 imediatamente após o fim da turbulência no distribuidor

### 5.5.5 Distribuição de tamanho das inclusões: comprimento da maior dimensão ( $\mu\text{m}$ )

**Maior dimensão ( $\mu\text{m}$ ) - P4 A6**

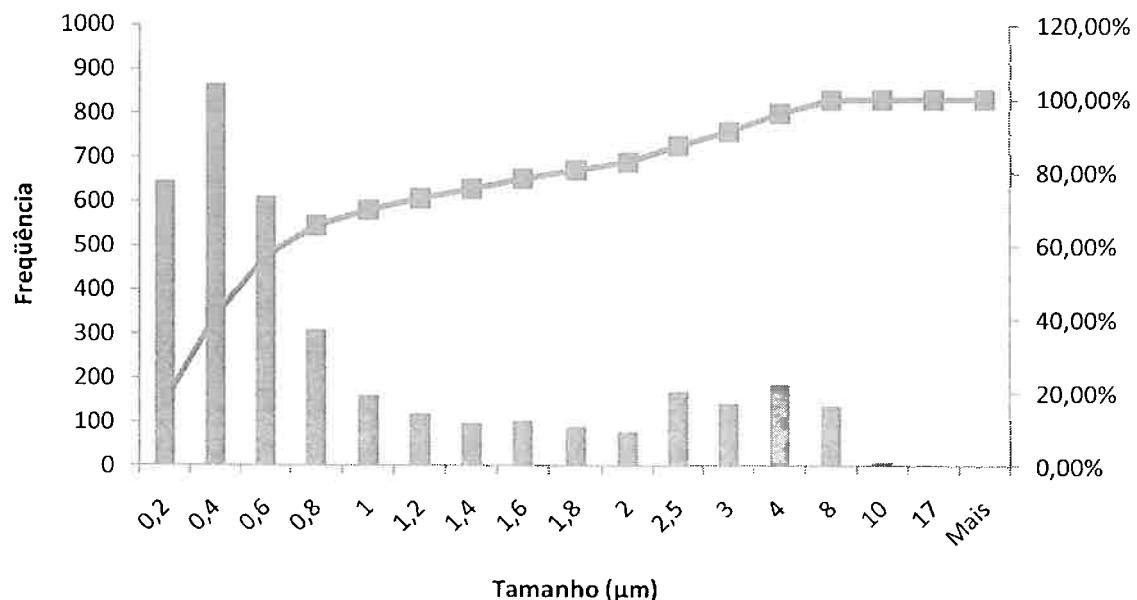


Figura 70: Distribuição da maior dimensão das inclusões na corrida P4 na adição de S

**Maior dimensão ( $\mu\text{m}$ ) - P4 LC1**

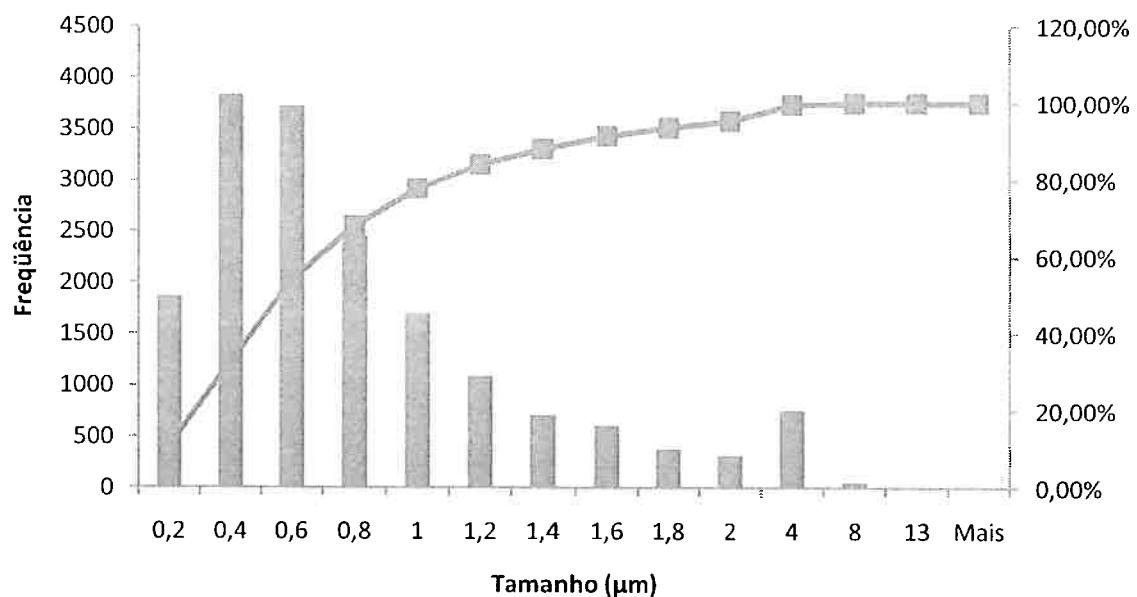


Figura 71: Distribuição da maior dimensão das inclusões na corrida P4 imediatamente após o fim da turbulência no distribuidor

## 5.6 Corrida P7: Comparação entre A6 e LC2

Na corrida P7 houve a coleta de amostras na posição A6, correspondente à adição do arame de S e na posição LC2, correspondente à 30 minutos após o final da turbulência no distribuidor. A seguir são comparadas e comentadas as distribuições das duas etapas, assim como suas médias e desvios padrões.

**Tabela 10: Comparações das informações obtidas da corrida P7**

INFORMAÇÃO	Descrição	P7-A6	P7-LC2	VARIAÇÃO A→LC
# INCLUSÕES POR MM <sup>2</sup>	MÉDIA	20412,54	28158,85	37,95%
	DESV. PADRÃO	4398,05	9654,32	119,51%
FRAÇÃO EM ÁREA (%)	MÉDIA	1,29	1,16	-10,23%
	DESV. PADRÃO	0,49	0,58	16,62%
RAZÃO DE ASPECTO	MÉDIA	1,29	1,29	0,14%
	DESV. PADRÃO	0,35	0,31	-11,74%
DIÂMETRO EQUIVALENTE (um)	MÉDIA	1,32	1,09	-17,26%
	DESV. PADRÃO	1,15	0,91	-20,37%
MAIOR DIMENSÃO (um)	MÉDIA	0,74	0,61	-17,33%
	DESV. PADRÃO	0,70	0,55	-21,73%

Entre a adição de S (A6) e 30 minutos após o fim da turbulência no distribuidor (LC2), a Tabela 10, a Figura 72, a Figura 73, a Figura 74, a Figura 75, a Figura 78 e a Figura 79 mostram que houve aumento na média e desvio da quantidade de inclusões por mm<sup>2</sup> e do desvio padrão da fração em área das inclusões. Porém, houve aumento da média da fração de área das inclusões, assim como a média e o desvio padrão do diâmetro equivalente.

Ocorreu uma diminuição da massa total e do tamanho das inclusões, porém ocorreu um aumento na quantidade de inclusões.

A flotação das inclusões é regida pela lei de Stokes, que dá a velocidade de flotação de uma esfera de inclusão em meio metálico por diferença de densidade:  $v = \frac{g}{18\eta}(\rho_m - \rho_i)d^2$ , sendo  $\eta$  a viscosidade do metal. Segundo esta lei, as inclusões

de tamanho maior têm a probabilidade de flotar mais rapidamente do que inclusões menores.

A diminuição massa e da quantidade de inclusões de tamanho maior indicam eliminação de inclusões por flotação. Porém o aumento da quantidade de inclusões de tamanho menor indica que a flotação não foi o único evento ocorrido na corrida P7.

A média da razão de aspecto praticamente se manteve, mas seu desvio padrão diminuiu, juntamente com a média e desvio padrão do maior diâmetro, como mostram a Tabela 10, a Figura 76, a Figura 77, a Figura 80 e a Figura 81.

Portanto, houve uma diminuição do tamanho equivalente das inclusões e praticamente não houve variação na razão de aspecto.

Segundo MORAES,<sup>(1)</sup> na corrida P7, houve a presença de inclusões de aluminato de cálcio líquidos na adição de S e 30 minutos após o fim da turbulência no distribuidor, indicando que a quantidade de CaSi foi suficiente para atingir o objetivo esperado. O aumento da quantidade de inclusões pode ser explicado pelo um aumento na porcentagem de MgO da panela para o distribuidor. Esse aumento na quantidade de MgO pode ter ocorrido devido ao desgaste no refratário ou o excesso de Al que diminui a atividade de oxigênio no banho e promove a migração de Mg do refratário para o aço

Desse modo, os aumento nas quantidades de inclusões menores e o aumento da quantidade de MgO na indicam a formação do espinélio.

### 5.6.1 Distribuição do número de inclusões por $\text{mm}^2$

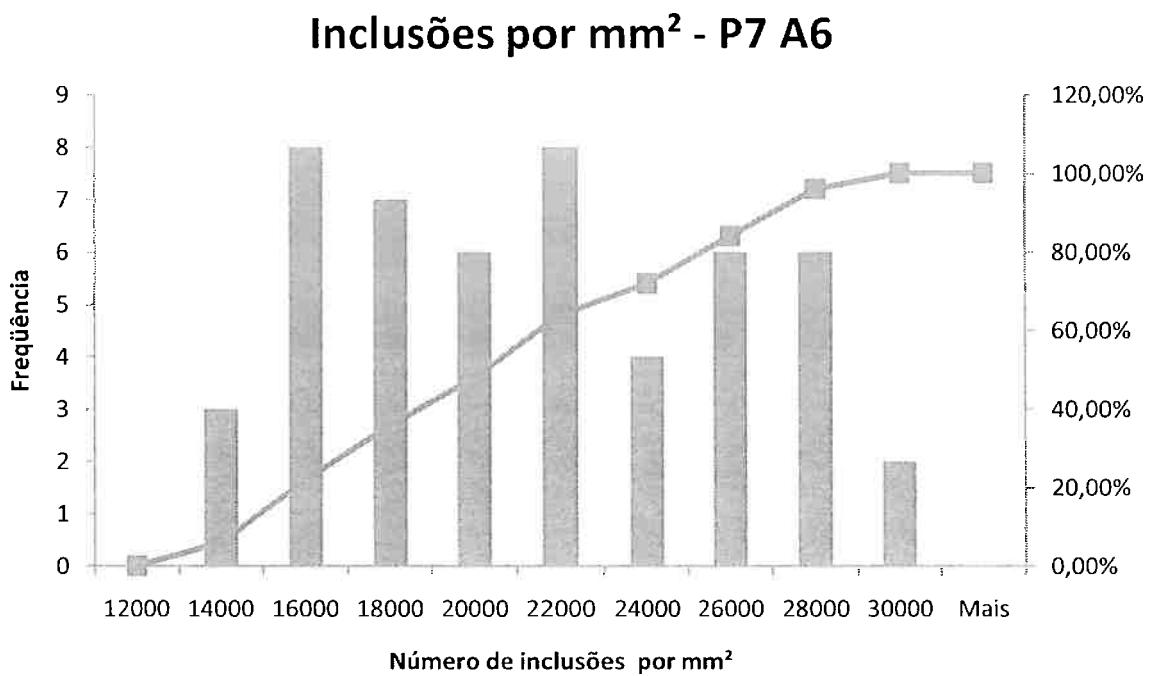


Figura 72: Distribuição das inclusões por  $\text{mm}^2$  da corrida P7 na adição de S

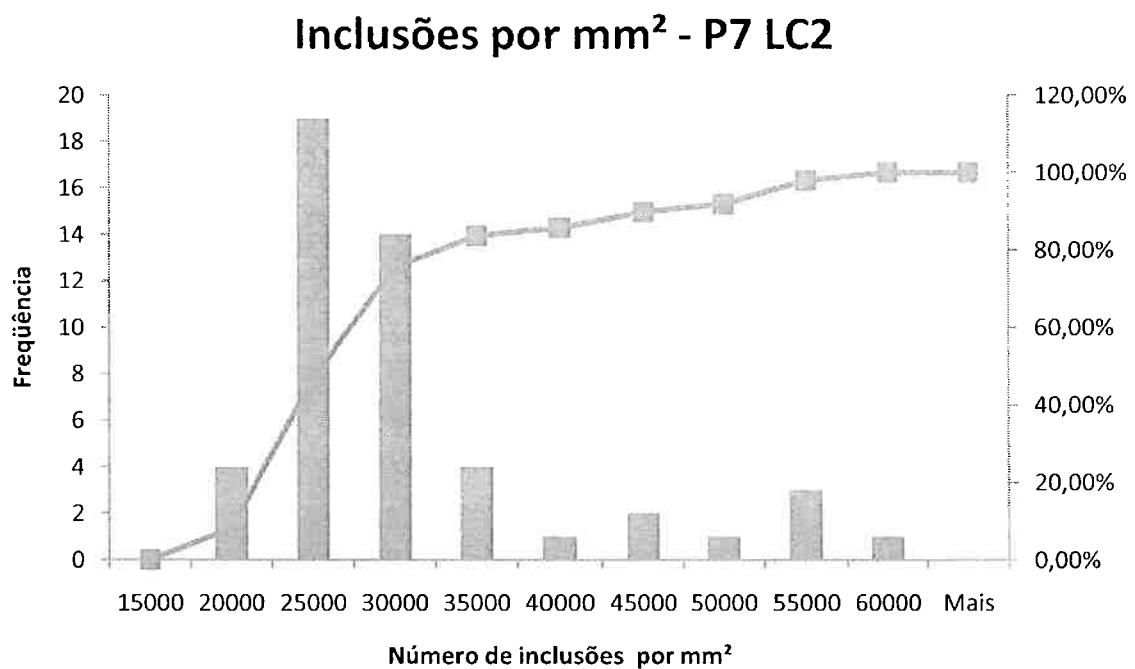


Figura 73: Distribuição das inclusões por  $\text{mm}^2$  da corrida P7 30 minutos após o fim da turbulência no distribuidor

### 5.6.2 Distribuição da fração de área das inclusões

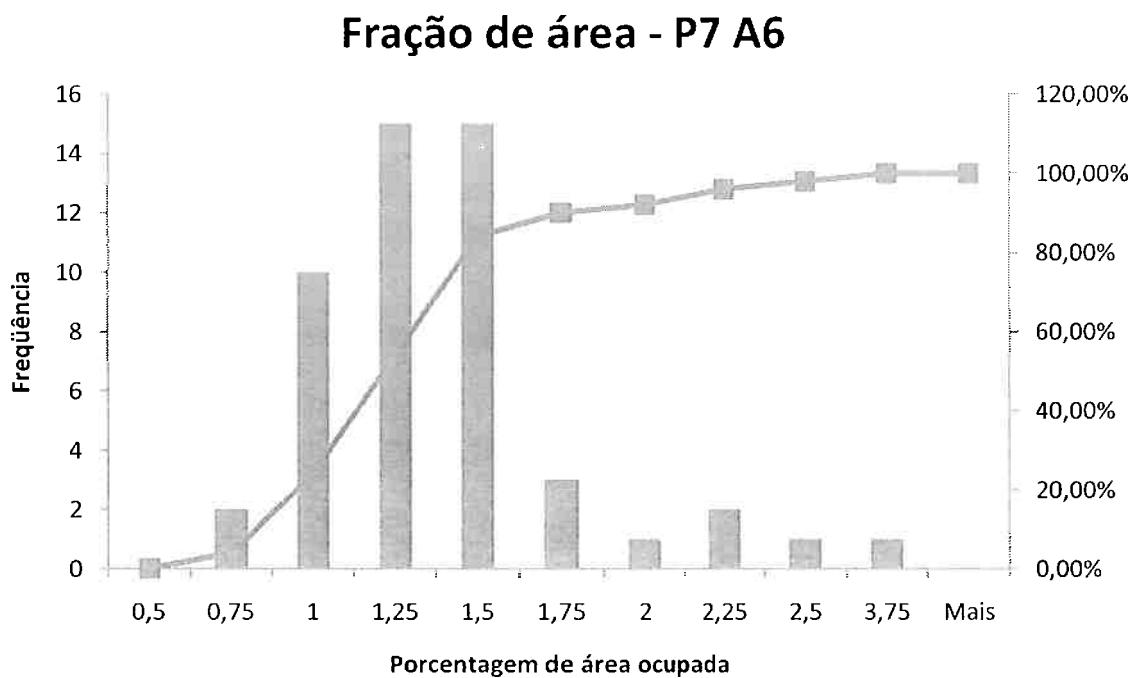


Figura 74: Distribuição da porcentagem da área ocupada pelas inclusões da corrida P7 na adição de S

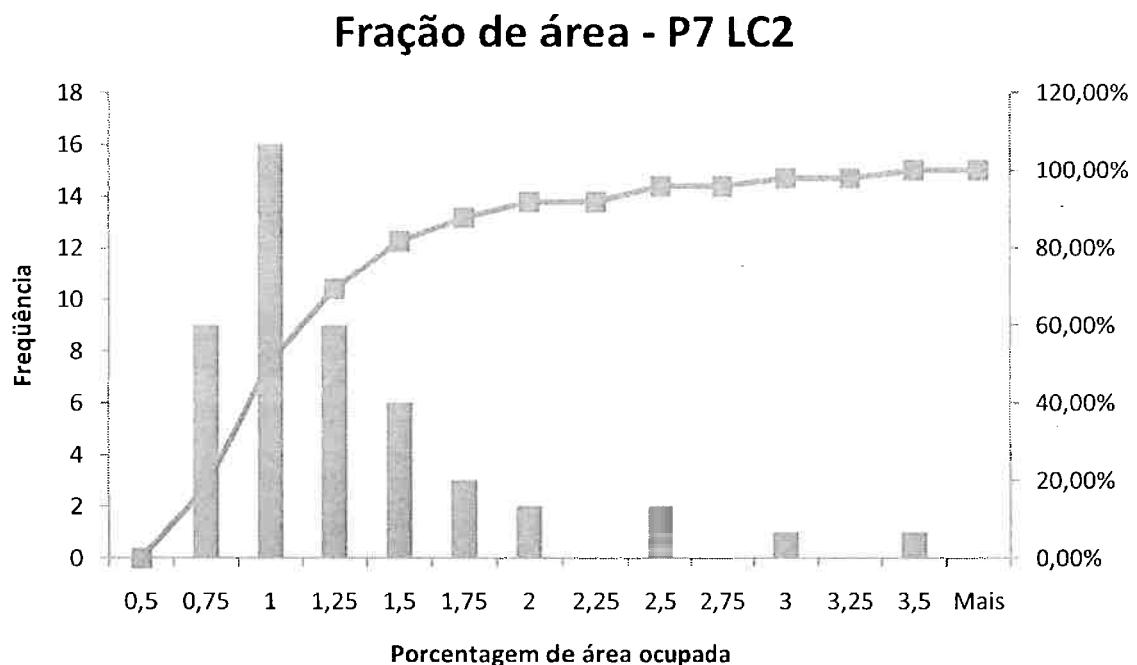


Figura 75: Distribuição da porcentagem da área ocupada pelas inclusões da corrida P7 30 minutos após o fim da turbulência no distribuidor

### 5.6.3 Distribuição da razão de aspecto das inclusões

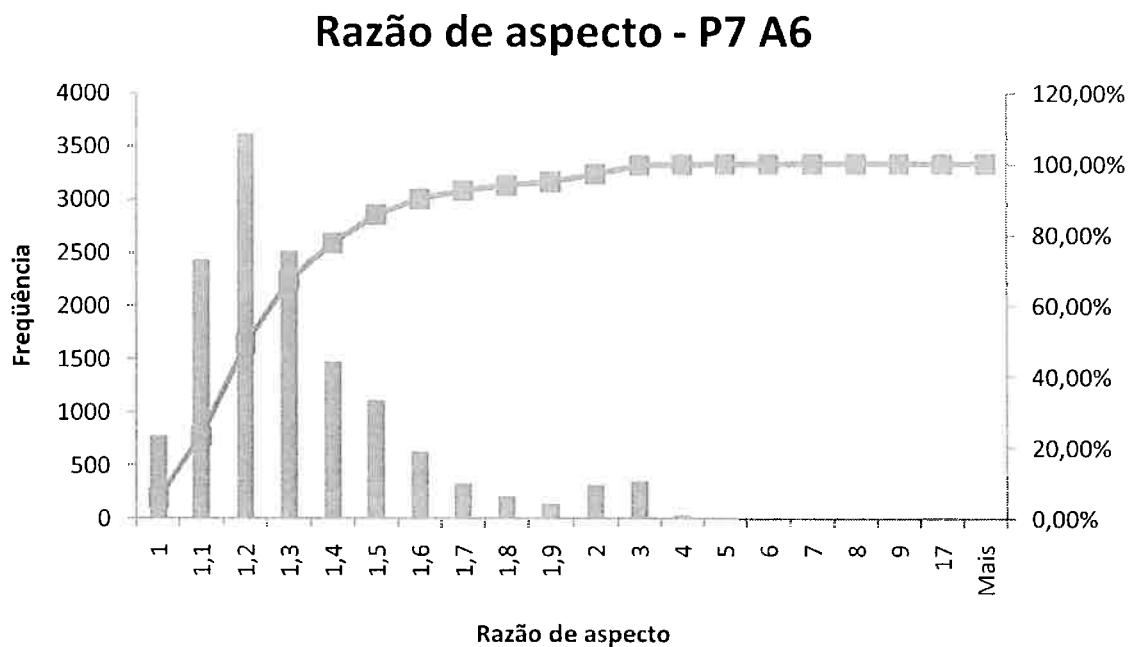


Figura 76: Distribuição da razão de aspecto das inclusões da corrida P7 na adição de S

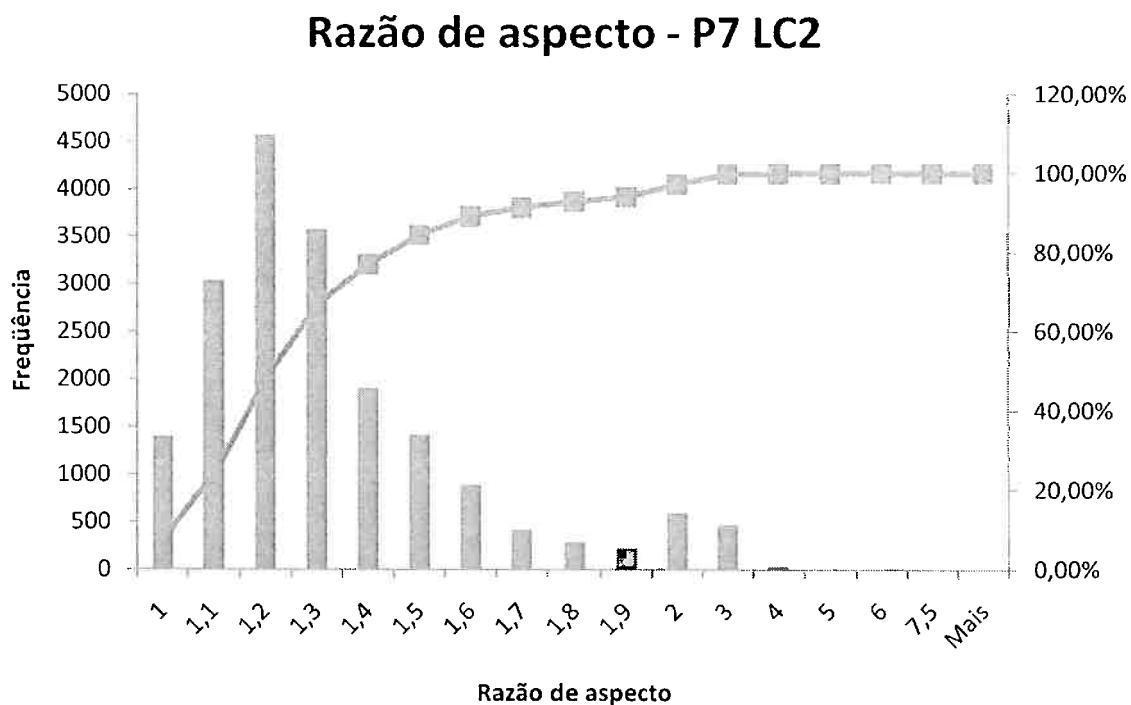


Figura 77: Distribuição da razão de aspecto das inclusões da corrida P7 30 minutos após o fim da turbulência no distribuidor

#### 5.6.4 Distribuição de tamanho das inclusões: diâmetro equivalente ( $\mu\text{m}$ )

**Diâmetro equivalente ( $\mu\text{m}$ ) - P7 A6**

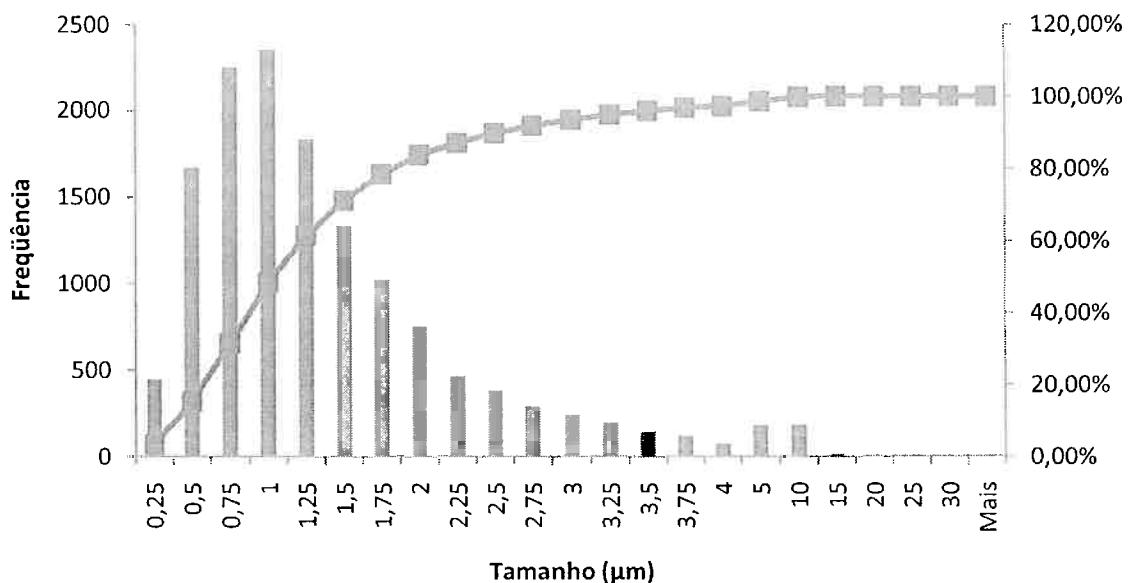


Figura 78: Distribuição do diâmetro equivalente das inclusões na corrida P7 na adição de S

**Diâmetro equivalente ( $\mu\text{m}$ ) - P7 LC2**

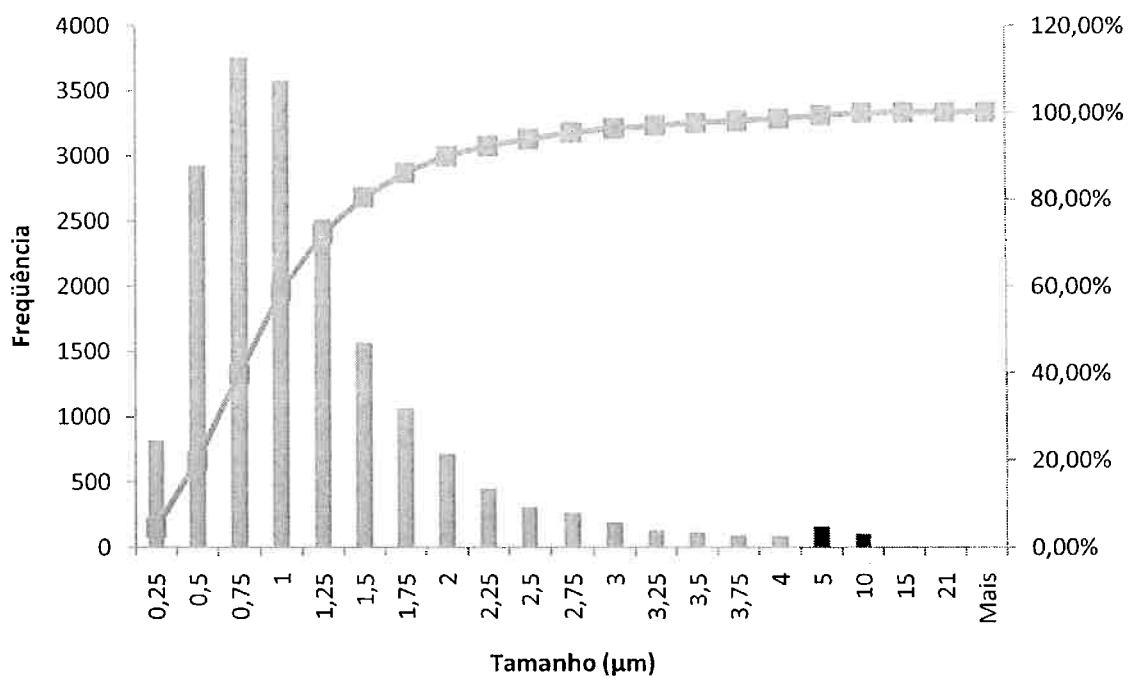


Figura 79: Distribuição do diâmetro equivalente das inclusões na corrida P7 30 minutos após o fim da turbulência no distribuidor

### 5.6.5 Distribuição de tamanho das inclusões: comprimento da maior dimensão ( $\mu\text{m}$ )

**Maior dimensão ( $\mu\text{m}$ ) - P7 A6**

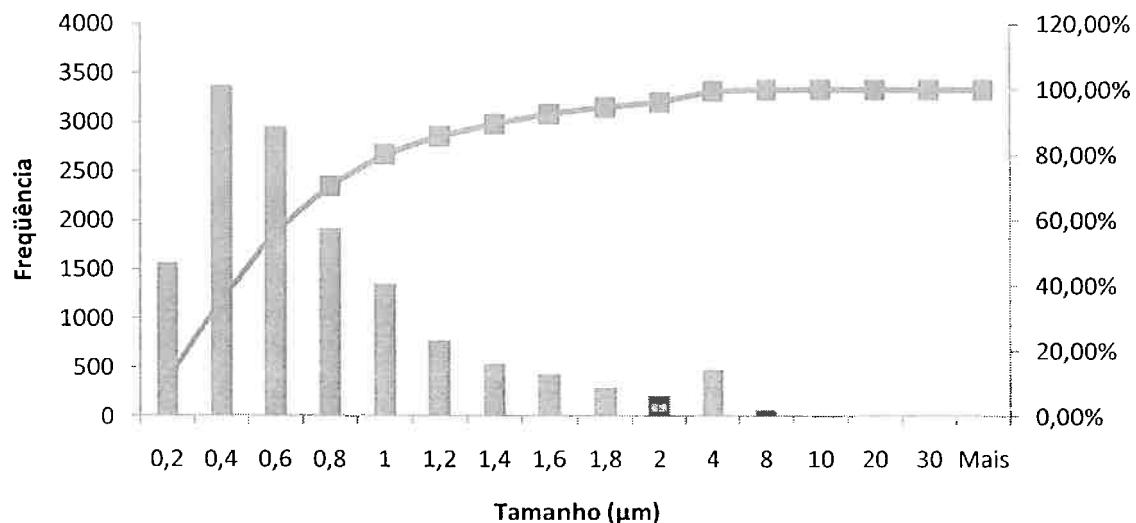


Figura 80: Distribuição da maior dimensão das inclusões na corrida P7 na adição de S

**Maior dimensão ( $\mu\text{m}$ ) - P7 LC2**

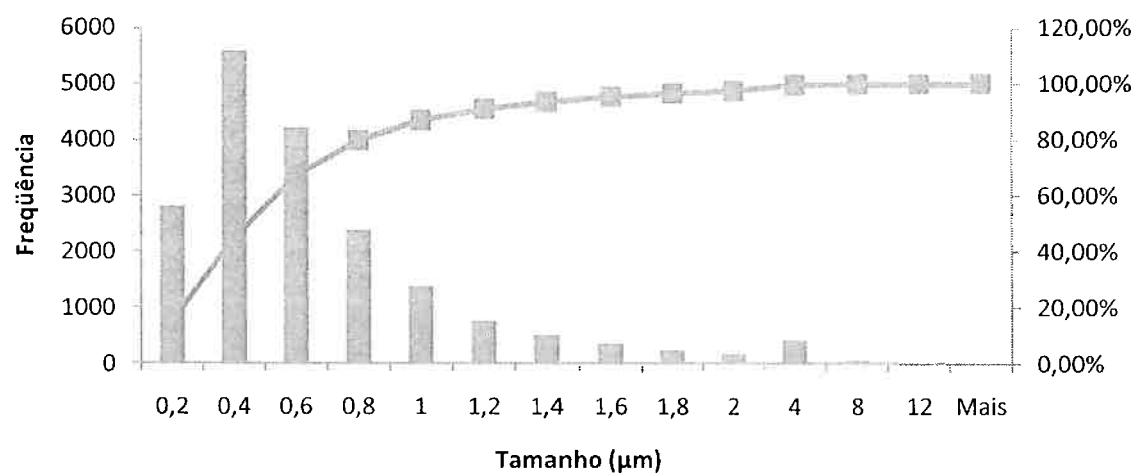


Figura 81: Distribuição da maior dimensão das inclusões na corrida P7 30 minutos após o fim da turbulência no distribuidor

## 6 CONCLUSÕES

Foram estudadas 6 corridas de aço na adição de elemento de liga (CaSi ou S) e após o fim da turbulência no distribuidor (imediatamente, 30 ou 60 minutos após o fim) utilizando microscopia óptica para o aumento das imagens e uma câmera digital para captura das imagens. Um algoritmo foi escrito para automatizar a análise e tratamento de imagens via software e dos resultados da análise foram gerados histogramas, médias e desvios padrão. A partir destes resultados e das conclusões de MORAES<sup>(1)</sup> se chegaram às seguintes informações sobre as corridas:

### Corrida M2:

Houve eliminação de inclusões da corrida M2, principalmente as maiores, indicando eliminação das inclusões por flotação na panela e/ou no distribuidor. Também ocorreu uma redução das inclusões angulosas, indicando que o tratamento de cálcio foi efetivo para a modificação das inclusões de alumina.

### Corrida P1:

Houve eliminação de inclusões de menor tamanho na corrida P1, indicando eliminação das inclusões por flotação. Porém, ocorreu um aumento da quantidade de inclusões de maior tamanho, assim de inclusões angulosa no distribuidor que não existiam antes na panela, indicando a formação de inclusões de espinélio.

### Corrida P2:

Houve eliminação de inclusões de menor tamanho na corrida P2, indicando eliminação das inclusões por flotação. Porém o aumento da quantidade de inclusões maiores e mais angulosas, a presença das inclusões de CA-(Ca,Mn)S e o aumento na porcentagem de MgO da panela para o lingotamento indicam a formação do espinélio e do CaS.

### Corrida P3:

Houve eliminação de inclusões de menor tamanho na corrida P3, indicando eliminação das inclusões por flotação. A formação de aluminatos de cálcio líquidos e

a redução das inclusões angulosas indicam que o tratamento de cálcio foi efetivo para a modificação das inclusões de alumina.

#### Corrida P4:

O aumento de massa e da quantidade de inclusões, principalmente as de tamanho menor, sugere reoxidação da corrida P4. O aumento da porcentagem de MgO na corrida P4 indica reoxidação no banho e formação de espinélio. Porém, a diminuição na razão de aspecto indica que a adição de CaSi foi teve sucesso na alteração da morfologia das inclusões de alumina.

#### Corrida P7:

A diminuição da massa total de inclusões e de inclusões de tamanho maior indica eliminação de inclusões por flotação. Porém o aumento da quantidade de inclusões de tamanho menor e o aumento da quantidade de MgO na indicam a formação do espinélio.

## 7 REFERÊNCIAS

1. MORAES, L. A. B. **Caracterização de macro e micro-inclusões em aços acalmados ao alumínio produzidos por lingotamento contínuo.** São Paulo : Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2009. p. 131-152
2. FACO, R. **Levantamento das inclusões nos principais grupos de aços produzidos em aciaria do tipo LD.** São Paulo : Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2005. p.44-103
3. SVOBODA, J. M. **Clean Steel Technology.** Modern Casting. October 1, 1991.
4. VILELA, A. C. F., et al. **Evolução das técnicas de caracterização de inclusões em aço.** Metalurgia e Materiais. 2007, Vols. v. 63 p. 46-49.
5. ASM. **Metals Handbook.** Vol. 9.
6. KIESSLING, R. **Non-metallic inclusions in steel (Part III: The origins and behaviour of inclusions and their influence on the properties of steel).** London : The Iron and Steel Institute, 1968.
7. KIESSLING, R. e LANGE, **Non-metallic inclusions in steel (Part I: Inclusions belonging to pseudo-ternary system MnO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and related systems).** London : The Iron and Steel Institute, 1964.
8. DEKKERS, R., BLANPAIN, B. e WOLLANTS, P. **Crystal Growth in liquid steel during secondary metallurgy.** Metallurgical and Materials Transactions. 2003, Vols. 34B pp. 161-171.
9. MCPHERSON, N. A. e MCEAN, A. (Editors). **Continuous casting vol. 7: Nonmetallic inclusions in continuously casting steel.** Warrendale, Pennsylvania, USA : The Iron and Steel Society, 1995. Vols. vol. 7.
10. PIRES, J. e GARCIA, A. **Modification of oxide inclusions present in aluminum-killed low carbon steel by addition of calcium.** *REM: R. Esc. Minas, Ouro Preto.* n. 57: Jul. e Set., 2004, Vols. 3 pp. 183-189.
11. CARBONI, M., SCRIPNIC, I. e BOLOTA, J. **Avaliação das inclusões encontradas durante o refino secundário de aços para construção mecânica acalmados ao alumínio com enxofre controlado.** XXXV Seminário de Fusão, Refino e Solidificação dos Metais, ABM, Salvador. mai. 2004. pp. 438-448., mai. 2004 pp. 438-448.

12. KLUJSZO, L. A. C. e SOARES, R. B. **Aços de usinabilidade melhorada Corfac(R) na Gerdau Açominas S.A. Aços final Piratini.** Charqueadas, RS. : s.n., 2006.
13. DICIONÁRIO DE TERMOS DE ESTEREOLOGIA disponível em: <<http://www.merriam-webster.com/dictionary/stereological>> Acessado em 15 de abr. 2011.
14. DESCRIÇÃO DO TERMO ESTEREOLOGIA NUMA ENCICLOPÉDIA DIGITAL disponível em: <<http://en.wikipedia.org/wiki/Stereology>> Acessado em: 19 de abr. 2011.
15. LOUD, A. V. **A quantitative stereological description of the ultrastructure of normal rat liver parenchymal cells.** THE JOURNAL OF CELL BIOLOGY. 1968, Vol. VOLUME 37.
16. ASTM. **E1245-03:Standard Practice for Determining the Inclusion or Second-Phase Constituent Content of Metals by Automatic Image Analysis.**
17. INOUE, S. **Video Microscopy.** New York : Plenum Press, 1986.
18. RUSS, J. C., DEHOFF, R.T. **Practical stereology 2nd edition.** New York : Plenum Publishers, 2000 pp.183-193.
19. FOLEY, J. D., A. VAN DAM **Fundamentals of Interactive Computer Graphics.** Reading : Addison Wesley, 1984.
20. **Slides da aula de pré-processamento de imagens da disciplina SCC 5830 - Processamento de Imagens.** São Carlos : ICMC-USP, 2010. p. 17
21. EQUALIZAÇÃO DE IMAGENS. disponível em: <[http://www.di.ufpe.br/~if143/projetos/99\\_2/equali/Equalizacao.html](http://www.di.ufpe.br/~if143/projetos/99_2/equali/Equalizacao.html)> Acessado em: 27 de abr. 2011.
22. IMAGENS BINÁRIAS disponível em: <<http://www.intelligence.tuc.gr/~petrakis/courses/computervision/binary.pdf>> Acessado em: 20 de 04 de 2011
23. LASCOSQUI, P. S. B. **Avaliação da limpidez do aço líquido através da modelagem matemática do desgaseificador – RH da Companhia Siderúrgica de Tubarão – CST.** Ouro Preto : Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Ouro Preto, 2006. p. 45-53

24. CARTER, R. M. E YAN, Y. **Measurement of particle shape using digital imaging techniques.** Journal of Physics: Conference Series. 15, 2005 pp.177–182.
25. KOHLER, A. et al. **Perfil inclusionário durante a fabricação de aços clean steel.** *XXXVII Seminário de Aciaria Internacional, ABM, Porto Alegre.* mai. 2006. pp. 554-563.

## 8 ANEXO A

Algoritmos em macro do IMAGEJ para a análise de imagens de inclusões capturadas através de microscopia ótica em diversos aumentos sem ataque no campo escuro.

### 8.1 Aumento de 1000x

```

dir1 = getDirectory("Choose Source Picture Directory");
dir2 = getDirectory("Choose Destination Directory for Analise Detalhada Total");
dir4 = getDirectory("Choose Destination Directory for Analise Simples Total")
setBatchMode(true);

list = getFileList(dir1);
//Analise Detalhada Total+Sumários
for (i=0; i<list.length; i++) {
showProgress(i+1, list.length);
open(dir1+list[i]);
run("Set Scale...", "distance=1518 known=100 pixel=1 unit=µm");
run("Window/Level...");
run("Enhance Contrast", "saturated=0.5");
run("Apply LUT");
run("Brightness/Contrast...");
setMinAndMax(79, 255);
run("Apply LUT");
setAutoThreshold();
run("Threshold...");
setThreshold(77, 255);
run("Convert to Mask");
run("Set Measurements...", "area perimeter bounding circularity feret's area_fraction
display redirect=None decimal=3");
run("Analyze Particles...", "size=0-Infinity circularity=0.00-1.00 show=Nothing display
exclude include summarize record add");

```

```

if (i==list.length-1) saveAs("Measurements", dir2+list[i]);
//if (i==list.length-1) saveAs("Summary", dir3+list[i]);
close();
}
run("Clear Results");
//Analise Simples Total
for (i=0; i<list.length; i++) {
showProgress(i+1, list.length);
open(dir1+list[i]);
run("Set Scale...", "distance=1518 known=100 pixel=1 unit=µm");
run("Window/Level...");
run("Enhance Contrast", "saturated=0.5");
run("Apply LUT");
run("Brightness/Contrast...");
setMinAndMax(79, 255);
run("Apply LUT");
setAutoThreshold();
run("Threshold...");
setThreshold(77, 255);
run("Convert to Mask");
run("Measure");
if (i==list.length-1) saveAs("Measurements", dir4+list[i]);
close();
}
run("Clear Results");

```

## 8.2 Aumento de 500x

```

dir1 = getDirectory("Choose Source Picture Directory");
dir2 = getDirectory("Choose Destination Directory for Analise Detalhada Total");
dir4 = getDirectory("Choose Destination Directory for Analise Simples Total")
setBatchMode(true);

list = getFileList(dir1);

```

```
//Analise Detalhada Total+Sumários
for (i=0; i<list.length; i++) {
    showProgress(i+1, list.length);
    open(dir1+list[i]);
    run("Set Scale...", "distance=1512 known=200 pixel=1 unit=um");
    run("Window/Level...");
    run("Enhance Contrast", "saturated=0.5");
    run("Apply LUT");
    run("Brightness/Contrast...");
    setMinAndMax(79, 255);
    run("Apply LUT");
    setAutoThreshold();
    run("Threshold...");
    setThreshold(77, 255);
    run("Convert to Mask");
    run("Set Measurements...", "area perimeter bounding circularity feret's area_fraction
display redirect=None decimal=3");
    run("Analyze Particles...", "size=0-Infinity circularity=0.00-1.00 show=Nothing display
exclude include summarize record add");
    if (i==list.length-1) saveAs("Measurements", dir2+list[i]);
    //if (i==list.length-1) saveAs("Summary", dir3+list[i]);
    close();
}
run("Clear Results");
//Analise Simples Total
for (i=0; i<list.length; i++) {
    showProgress(i+1, list.length);
    open(dir1+list[i]);
    run("Set Scale...", "distance=1518 known=100 pixel=1 unit=µm");
    run("Window/Level...");
    run("Enhance Contrast", "saturated=0.5");
    run("Apply LUT");
```

```

run("Brightness/Contrast...");
setMinAndMax(79, 255);
run("Apply LUT");
setAutoThreshold();
run("Threshold...");
setThreshold(77, 255);
run("Convert to Mask");
run("Measure");
if (i==list.length-1) saveAs("Measurements", dir4+list[i]);
close();
}
run("Clear Results");

```

### 8.3 Aumento de 200x

```

dir1 = getDirectory("Choose Source Picture Directory");
dir2 = getDirectory("Choose Destination Directory for Analise Detalhada Total");
dir4 = getDirectory("Choose Destination Directory for Analise Simples Total")
setBatchMode(true);

```

```

list = getFileList(dir1);
//Analise Detalhada Total+Sumários
for (i=0; i<list.length; i++) {
showProgress(i+1, list.length);
open(dir1+list[i]);
run("Set Scale...", "distance=1821.02 known=600 pixel=1 unit=um");
run("Window/Level...");
run("Enhance Contrast", "saturated=0.5");
run("Apply LUT");
run("Brightness/Contrast...");
setMinAndMax(79, 255);
run("Apply LUT");
setAutoThreshold();

```

```
run("Threshold...");  
setThreshold(77, 255);  
run("Convert to Mask");  
run("Set Measurements...", "area perimeter bounding circularity feret's area_fraction  
display redirect=None decimal=3");  
run("Analyze Particles...", "size=0-Infinity circularity=0.00-1.00 show=Nothing display  
exclude include summarize record add");  
if (i==list.length-1) saveAs("Measurements", dir2+list[i]);  
//if (i==list.length-1) saveAs("Summary", dir3+list[i]);  
close();  
}  
run("Clear Results");  
//Analise Simples Total  
for (i=0; i<list.length; i++) {  
showProgress(i+1, list.length);  
open(dir1+list[i]);  
run("Set Scale...", "distance=1518 known=100 pixel=1 unit=µm");  
run("Window/Level...");  
run("Enhance Contrast", "saturated=0.5");  
run("Apply LUT");  
run("Brightness/Contrast...");  
setMinAndMax(79, 255);  
run("Apply LUT");  
setAutoThreshold();  
run("Threshold...");  
setThreshold(77, 255);  
run("Convert to Mask");  
run("Measure");  
if (i==list.length-1) saveAs("Measurements", dir4+list[i]);  
close();  
}  
run("Clear Results");
```

#### 8.4 Aumento de 100x

```

dir1 = getDirectory("Choose Source Picture Directory");
dir2 = getDirectory("Choose Destination Directory for Analise Detalhada Total");
dir4 = getDirectory("Choose Destination Directory for Analise Simples Total")
setBatchMode(true);

list = getFileList(dir1);
//Analise Detalhada Total+Sumários
for (i=0; i<list.length; i++) {
showProgress(i+1, list.length);
open(dir1+list[i]);
run("Set Scale...", "distance=1506 known=1000 pixel=1 unit=um");
run("Window/Level...");
run("Enhance Contrast", "saturated=0.5");
run("Apply LUT");
run("Brightness/Contrast...");
setMinAndMax(79, 255);
run("Apply LUT");
setAutoThreshold();
run("Threshold...");
setThreshold(77, 255);
run("Convert to Mask");
run("Set Measurements...", "area perimeter bounding circularity feret's area_fraction
display redirect=None decimal=3");
run("Analyze Particles...", "size=0-Infinity circularity=0.00-1.00 show=Nothing display
exclude include summarize record add");
if (i==list.length-1) saveAs("Measurements", dir2+list[i]);
//if (i==list.length-1) saveAs("Summary", dir3+list[i]);
close();
}
run("Clear Results");

```

```

//Analise Simples Total
for (i=0; i<list.length; i++) {
  showProgress(i+1, list.length);
  open(dir1+list[i]);
  run("Set Scale...", "distance=1518 known=100 pixel=1 unit=µm");
  run("Window/Level...");
  run("Enhance Contrast", "saturated=0.5");
  run("Apply LUT");
  run("Brightness/Contrast...");
  setMinAndMax(79, 255);
  run("Apply LUT");
  setAutoThreshold();
  run("Threshold...");
  setThreshold(77, 255);
  run("Convert to Mask");
  run("Measure");
  if (i==list.length-1) saveAs("Measurements", dir4+list[i]);
  close();
}
run("Clear Results");

```

## 8.5 Aumento de 50x

```

dir1 = getDirectory("Choose Source Picture Directory");
dir2 = getDirectory("Choose Destination Directory for Analise Detalhada Total");
dir4 = getDirectory("Choose Destination Directory for Analise Simples Total")
setBatchMode(true);

list = getFileList(dir1);
//Analise Detalhada Total+Sumários
for (i=0; i<list.length; i++) {
  showProgress(i+1, list.length);

```

```
open(dir1+list[i]);
run("Set Scale...", "distance=760 known=1000 pixel=1 unit=um");
run("Window/Level...");
run("Enhance Contrast", "saturated=0.5");
run("Apply LUT");
run("Brightness/Contrast...");
setMinAndMax(79, 255);
run("Apply LUT");
setAutoThreshold();
run("Threshold...");
setThreshold(77, 255);
run("Convert to Mask");
run("Set Measurements...", "area perimeter bounding circularity feret's area_fraction
display redirect=None decimal=3");
run("Analyze Particles...", "size=0-Infinity circularity=0.00-1.00 show=Nothing display
exclude include summarize record add");
if (i==list.length-1) saveAs("Measurements", dir2+list[i]);
//if (i==list.length-1) saveAs("Summary", dir3+list[i]);
close();
}
run("Clear Results");
//Analise Simples Total
for (i=0; i<list.length; i++) {
showProgress(i+1, list.length);
open(dir1+list[i]);
run("Set Scale...", "distance=1518 known=100 pixel=1 unit=µm");
run("Window/Level...");
run("Enhance Contrast", "saturated=0.5");
run("Apply LUT");
run("Brightness/Contrast...");
setMinAndMax(79, 255);
run("Apply LUT");
```

```
setAutoThreshold();
run("Threshold...");
setThreshold(77, 255);
run("Convert to Mask");
run("Measure");
if (i==list.length-1) saveAs("Measurements", dir4+list[i]);
close();
}
run("Clear Results");
```