

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAS

ALEXANDRE NIYAMA

**Avaliação da esferoidização de inclusões de sulfeto de manganês em aços
SAE5160 e SAE6150**

São Paulo

2018

Departamento de Engenharia
Metalúrgica e de Materiais da
Escola Politécnica da USP

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAS

ALEXANDRE NIYAMA

**Avaliação da esferoidização de inclusões de sulfeto de manganês em aços
SAE5160 e SAE6150**

Trabalho de formatura apresentado à
Escola Politécnica da Universidade de
São Paulo para obtenção de Bacharelado
em Engenharia de Materiais

Área de Concentração: Engenharia
Metalúrgica e de Materiais

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Franco de
Monlevade

São Paulo

2018

Departamento de Engenharia
Metalúrgica e de Materiais da
Escola Politécnica da USP

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAS

ALEXANDRE NIYAMA

**Avaliação da esferoidização de inclusões de sulfeto de manganês em aços
SAE5160 e SAE6150**

Trabalho de formatura apresentado à
Escola Politécnica da Universidade de
São Paulo para obtenção de Bacharelado
em Engenharia de Materiais

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Franco de
Monlevade

São Paulo

2018

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

TF - 2018
N 38 a
H - 2018 W
2325476

DEDALUS - Acervo - EPMT



31800009349

Catalogação-na-publicação

Niyama, Alexandre

Avaliação da esferoidização de inclusões de sulfeto de manganês nos aços SAE5160 e SAE6150 / A.
Niyama, E. F. Monlevade -- São Paulo, 2006. 2018

64 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

1.Esferoidização 2.Inclusões de sulfetos 3.Tratamento térmico 4.Aços ligados/especiais
I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais II.t. III.Monlevade, Eduardo Franco de

Resumo

O trabalho de formatura consiste em analisar a esferoidização das inclusões de manganês das amostras de aço SAE5160 e SAE6150 após a realização de tratamento térmico e comparar a composição química dos aços.

Os parâmetros sensibilizados neste trabalho foram a temperatura e o tempo de imersão das amostras. As temperaturas foram 800°C e 1000°C e os tempos de imersão foram 2, 4 e 6 horas, o que totalizaram 12 amostras, sendo 6 de cada tipo de aço.

Os resultados da composição química realizadas no EDS confirmaram a provável existência de inclusões de sulfeto de manganês misturados com outros sulfetos e óxidos. Na matriz foram encontrados elementos químicos esperados, exceto o flúor em algumas amostras, possivelmente decorrente de contaminação durante a etapa de preparação das amostras.

No aço SAE5160, o tratamento térmico que trouxe melhores resultados referente à esferoidização foi a realizada a 1000°C durante 6 horas, enquanto nas amostras que foram submetidas à temperatura de 800°C, foi pouco perceptível a esferoidização das inclusões. Na amostra de 1000°C e 6 horas, as inclusões de manganês diminuíram de tamanho, devido às múltiplas divisões e o formato delas tornaram-se esféricas.

Já no aço SAE6150, as temperaturas e o tempos de tratamento realizado neste trabalho de formatura não foram suficientes para a esferoidização como na amostra de SAE5160. Algumas inclusões foram encontradas em formato esférico, porém a maior parte observou-se o início da formação de pescoço que muito provavelmente viriam a se dividir e esferoidizar.

Abstract

This work consists in analyzing the spheroidization of the manganese inclusions of SAE5160 and SAE6150 samples after thermal treatment and also to compare the chemical composition of the steels.

The parameters sensitizes in this work were the temperature and the immersion time inside the blast furnace. The temperatures were 800 °C and 1000°C and the immersion time were 2, 4 and 6 hours, which totaled 12 samples, 6 of each type of steel.

The results of the chemical composition in the EDS confirmed the presence of inclusion of manganese sulfide mixed with other sulphides and oxides. In the matrix, expected chemical elements were found, except for fluorine in some samples, possibly due to contamination during the sample preparation stage.

In the SAE5160 steel, the heat treatment that brought the best results regarding spheroidization was carried out at 1000°C for 6 hours, while in the samples that were submitted to the temperature of 800°C, the spheroidization of the inclusions was barely perceptible. In the sample of 1000°C and 6 hours, the manganese inclusion decreased in size, due to the multiplex divisions that suffered and also the shape of them became spherical.

In SAE6150 steel, the temperatures and treatment times performed in this graduation work were not sufficient for spheroidization as in the SAE5160 sample. Some inclusions were found in spherical shape, but for the most part the onset of neck formation was most likely to divide and spheroidize.

Lista de figuras

Figura 1: Inclusões de sulfeto de manganês (KIESSLING, 1989).....	8
Figura 2: Imagem das inclusões de sulfeto de manganês (MnS) esferoidizado após tratamento térmico (SHAO et al., 2011)	10
Figura 3: Aço SAE 5160	15
Figura 4: Aço SAE 6150	15
Figura 5: Amostras de aço SAE 5160 após corte na serra fita.....	16
Figura 6: Amostra de aço SAE 6150 após cortado na serra fita.....	16
Figura 7: Serra fita Ronemak M 400 L	17
Figura 8: Corpos de prova do aço SAE5160 cortadas na serra cutoff	17
Figura 9: Corpos de provas do SAE6150 cortadas na serra cutoff	18
Figura 10: Serra cutoff.....	18
Figura 11: Detalhamento interno da serra cutoff	18
Figura 12: Embutidora metalográfica EM30D.....	19
Figura 13: Baquelite marrom	19
Figura 14: Amostras do aço SAE6150 e SAE5160 após o embutimento	20
Figura 15: Pasta de diamante utilizado no polimento.....	21
Figura 16: Microscópio óptico Olympus BX60M.....	22
Figura 17: Microscópio eletrônico de varredura (MEV) Inspect F50.....	23
Figura 18: Pontos e áreas selecionadas para a realização do EDS no aço SAE5160	24
Figura 19: Resultado do EDS do ponto 1	24
Figura 20: Resultado do EDS do ponto 2	25
Figura 21: Resultado do EDS da área 1	25
Figura 22: Forno mufla Grion	26
Figura 23: Cadiño de carbeto de silício	27
Figura 24: Amostras logo após o tratamento térmico	28
Figura 25: Micrografia no microscópio óptico da amostra SAE5160 sem tratamento térmico	29
Figura 26: Micrografia no microscópio óptico da amostra SAE5160 sem tratamento térmico	30
Figura 27: Micrografia no microscópio óptico da amostra SAE5160 sem tratamento térmico	30

Figura 28: Micrografia no microscópio óptico da amostra SAE5160 sem tratamento térmico	31
Figura 29: Micrografia da amostra SAE5160 no microscópio eletrônico de varredura (MEV)	32
Figura 30: Micrografia da amostra SAE5160 no microscópio eletrônico de varredura (MEV)	32
Figura 31: Micrografia da amostra SAE5160 no microscópio eletrônico de varredura (MEV)	33
Figura 32: Micrografia no microscópio óptico da amostra SAE6150 sem tratamento térmico	35
Figura 33: Micrografia no microscópio óptico da amostra SAE6150 sem tratamento térmico	35
Figura 34: Micrografia no microscópio óptico da amostra SAE6150 sem tratamento térmico	36
Figura 35: Micrografia no microscópio óptico da amostra SAE6150 sem tratamento térmico	36
Figura 36: Micrografia da amostra SAE6150 no microscópio eletrônico de varredura (MEV)	37
Figura 37: Micrografia da amostra SAE6150 no microscópio eletrônico de varredura (MEV)	38
Figura 38: Micrografia da amostra SAE6150 no microscópio eletrônico de varredura (MEV)	38
Figura 39: Micrografias do microscópio óptico da amostra SAE5160 pós tratamento térmico a 800°C	41
Figura 40: Micrografia de uma inclusão da amostra SAE5160 com tratamento térmico à 800°C e 2 horas	42
Figura 41: Micrografia de uma inclusão da amostra SAE5160 com tratamento térmico à 800°C e 2 horas	42
Figura 42: Micrografia de uma inclusão da amostra SAE5160 com tratamento térmico à 800°C e 4 horas	43
Figura 43: Micrografia de uma inclusão da amostra SAE5160 com tratamento térmico à 800°C e 4 horas	43
Figura 44: Micrografia de uma inclusão da amostra SAE5160 com tratamento térmico à 800°C e 6 horas	44

Figura 45: Micrografia de uma inclusão da amostra SAE5160 com tratamento térmico à 800°C e 6 horas	44
Figura 46: Micrografias do microscópio óptico da amostra SAE5160 pós tratamento térmico a 1000°C com aumento de 500x	46
Figura 47: Micrografia de uma inclusão da amostra SAE5160 com tratamento térmico à 1000°C e 2 horas	47
Figura 48: Micrografia de uma inclusão da amostra SAE5160 com tratamento térmico à 1000°C e 2 horas	47
Figura 49: Micrografia de uma inclusão da amostra SAE5160 com tratamento térmico à 1000°C e 4 horas	48
Figura 50: Micrografia de uma inclusão da amostra SAE5160 com tratamento térmico à 10000°C e 4 horas	48
Figura 51: Micrografia de uma inclusão da amostra SAE5160 com tratamento térmico à 1000°C e 6 horas	49
Figura 52: Micrografia de uma inclusão da amostra SAE5160 com tratamento térmico à 1000°C e 6 horas	49
Figura 53: Micrografias do microscópio óptico da amostra SAE6150 pós tratamento térmico a 800°C	51
Figura 54: Micrografia de uma inclusão da amostra SAE6150 com tratamento térmico à 800°C e 2 horas	52
Figura 55: Micrografia de uma inclusão da amostra SAE6150 com tratamento térmico à 800°C e 2 horas	52
Figura 56: Micrografia de uma inclusão da amostra SAE6150 com tratamento térmico à 800°C e 4 horas	53
Figura 57: Micrografia de uma inclusão da amostra SAE6150 com tratamento térmico à 800°C e 4 horas	53
Figura 58: Micrografia de uma inclusão da amostra SAE6150 com tratamento térmico à 800°C e 6 horas	54
Figura 59: Micrografia de uma inclusão da amostra SAE6150 com tratamento térmico à 800°C e 6 horas	54
Figura 60: Micrografias do microscópio óptico da amostra SAE6150 pós tratamento térmico a 1000°C	56
Figura 61: Micrografia de uma inclusão da amostra SAE6150 com tratamento térmico à 1000°C e 2 horas	57

Figura 62: Micrografia de uma inclusão da amostra SAE6150 com tratamento térmico à 1000ºC e 2 horas	57
Figura 63: Micrografia de uma inclusão da amostra SAE6150 com tratamento térmico à 1000ºC e 4 horas	58
Figura 64: Micrografia de uma inclusão da amostra SAE6150 com tratamento térmico à 1000ºC e 4 horas	58
Figura 65: Micrografia de uma inclusão da amostra SAE6150 com tratamento térmico à 1000ºC e 6 horas	59
Figura 66: Micrografia de uma inclusão da amostra SAE6150 com tratamento térmico à 1000ºC e 6 horas	59

Lista de tabelas

Tabela 1: Tipos de aço carbono (AISI - SAE) (CHIAVERINI, 1996).....	4
Tabela 2: Tendência geral de distribuição dos elementos de liga nos aços recocidos (ANTÔNIO LUIZ V. DA COSTA E SILVA, 2010).....	6
Tabela 3: Composição química do aço SAE5160 (FILHO, 2016)	11
Tabela 4: Composição química do aço SAE6150 (FILHO, 2016)	12
Tabela 5: Composição química do aço SAE5160 (FILHO, 2016)	13
Tabela 6: Composição química do aço SAE6150 (FILHO, 2016)	14
Tabela 7: Tempos e temperaturas do tratamento térmico.....	27
Tabela 8: Análise química do EDS para a matriz do aço SAE5160 sem tratamento térmico	34
Tabela 9: Análise química no EDS para a inclusão no aço SAE5160 sem tratamento térmico	34
Tabela 10: Análise química do EDS para a matriz na amostra sem tratamento térmico	39
Tabela 11: Análise química no EDS para a inclusão na amostra sem tratamento térmico	39
Tabela 12: Análise química do EDS para a matriz na amostra SAE5160 com tratamento térmico a 800°C.....	45
Tabela 13: Análise química do EDS para a inclusão na amostra SAE5160 com tratamento térmico a 800°C.....	45
Tabela 14: Análise química do EDS para a matriz na amostra SAE5160 com tratamento térmico a 1000°C.....	50
Tabela 15: Análise química do EDS para a inclusão na amostra SAE5160 com tratamento térmico a 1000°C.....	50
Tabela 16: Análise química do EDS para a matriz na amostra SAE6150 com tratamento térmico a 800°C.....	55
Tabela 17: Análise química do EDS para a inclusão na amostra SAE6150 com tratamento térmico a 800°C.....	55
Tabela 18: Análise química do EDS para a matriz na amostra SAE6150 com tratamento térmico a 1000°C.....	60
Tabela 19: Análise química do EDS para a inclusão na amostra SAE6150 com tratamento térmico a 1000°C.....	60

Sumário

1.	Introdução.....	1
1.1.	Objetivo	2
2.	Revisão bibliográfica.....	4
2.1.	Aços carbono e aços liga	4
2.2.	Elementos de liga.....	5
2.3.	Inclusão não metálica	7
2.3.1.	Inclusões de sulfetos	7
2.4.	Tratamentos térmicos	9
2.5.	Aços SAE5160 e SAE6150	10
3.	Materiais e métodos	13
3.1.	Aços SAE5160 e SAE6150	13
3.2.	Preparação da amostra.....	14
3.3.	Microscópio Óptico.....	21
3.4.	Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV)	22
3.5.	Eletroscopia de energia dispersiva (EDS).....	23
3.6.	Medição do tamanho da inclusão.....	26
3.7.	Tratamento térmico	26
4.	Resultados e discussão.....	29
4.1.	Amostras sem tratamento térmico	29
4.1.1.	SAE5160	29
4.1.2.	SAE6150	34
4.2.	Amostras com tratamento térmico	40
4.2.1.	SAE5160 após tratamento térmico a 800°C	40
4.2.2.	SAE5160 após tratamento térmico a 1000°C	45
4.2.3.	SAE6150 após tratamento térmico a 800°C	50

4.2.4. SAE6150 após tratamento térmico a 1000°C	55
5. Conclusão.....	61
6. Bibliografia	63

1. Introdução

A siderurgia no Brasil, que tem como principais consumidores os setores automotivo e da construção civil, movimenta cerca de US\$ 5,8 bilhões por ano. O Brasil está entre os maiores produtores mundiais de aço bruto e entre os maiores exportadores (10º no mundo). Este setor é bastante concentrado, composto basicamente por apenas 10 grupos empresariais que foram responsáveis em 2017, pela produção de 32,3 milhões de toneladas de produtos siderúrgicos. (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2018a)

Os principais produtos deste setor podem ser divididos em quatro grupos, se levado em consideração a composição química, o processamento, os controles e ensaios utilizados e o uso final: aços carbono, aços ligados/especiais, aços de construção mecânica e aços ferramenta (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2018b).

Visto que o setor siderúrgico possui uma estrutura de mercado concentrada, há uma competição muito forte entre eles, portanto para sobreviver é necessário que haja investimentos visando a manutenção ou o aumento da participação no mercado atual. Uma das maneiras para sobreviver seria aumentando sua produtividade sem aumentar os custos (SHINODA, 2008).

Um dos maiores problemas das indústrias relacionado à produtividade está no controle das inclusões metálicas e não metálicas decorrentes dos processos de fabricação, seja relacionado à morfologia, à distribuição no aço, à quantidade ou aos tipos que podem ser benéficos em alguns casos, porém maléficos em outros casos (CARDOSO, 2002).

O escopo deste trabalho de formatura será a avaliação da esferoidização do sulfeto de manganês nos aços SAE5160 e SAE6150 após serem submetidos a tratamentos térmicos no forno mufla. Esse grupo de material são caracterizados pela adição de elementos de liga ao sistema, que podem causar modificações nas microestruturas dos materiais e consequentemente nos resultados dos tratamentos térmicos (PINEDO, 2004). Os tratamentos térmicos podem ser definidos como quaisquer processos em que a amostra é aquecida ou resfriada de maneira controlada sem que ocorra alteração na forma final do produto (CARLA et al., 2014).

Os tratamentos térmicos são etapas essenciais nos processos de fabricação de aço, porém se não forem realizados de maneira correta, podem resultar em diferentes tipos de defeito durante a etapa de solidificação, como porosidades e inclusões. A presença desses defeitos pode prejudicar a propriedade final dos produtos e consequentemente não alcançar a qualidade mínima desejada pelos clientes (CARLA et al., 2014).

A não obtenção dessa qualidade mínima exigida pelos clientes tem como consequência o descarte desses produtos, porém isso traria muito prejuízo para as empresas já que foi gasto matéria-prima, energia e mão de obra para serem produzidos. Afim de evitar o descarte, tratamentos térmicos são realizados para diminuir ou sumir com esses defeitos de modo a atingir a qualidade mínima necessária para os clientes.

1.1. Objetivo

As amostras de aço SAE 5160 e SAE 6150, fornecidas pela Gerdau, possuem inclusões de sulfeto de manganês com o formato alongado pelo processo de laminação que o tarugo foi submetido, tornando o material mais suscetível à formação de trincas em um meio corrosivo e com uma menor dureza.

O objetivo deste trabalho de formatura é avaliar a esferoidização das inclusões de sulfeto de manganês nas amostras SAE5160 e SAE6150, após realizado o tratamento térmico. Nos tratamentos térmicos serão sensibilizados dois parâmetros: temperatura e tempo de imersão, para verificar quais combinações de parâmetros seriam os melhores, visando diminuir o tamanho da inclusão de manganês presentes no material e torná-los mais esféricos.

Os parâmetros a serem analisados serão os utilizados por Shao em seu artigo: temperatura de imersão e tempo de imersão (SHAO et al., 2011). Shao variou também a taxa de aquecimento, porém nesse trabalho de formatura não será possível fazer o mesmo, pois os laboratórios do departamento de Engenharia de Materiais da Escola Politécnica (PMT) não possuem equipamentos necessários para variar tal parâmetro.

Para cada um dos aços realizamos os tratamentos térmicos para as temperaturas de imersão de 800°C e 1000°C e tempos de imersão de 2 horas, 4 horas

e 6 horas. Portanto no final dos processos, serão 6 amostras de cada tipo de aço, totalizando 12 amostras.

Ao final dos tratamentos térmicos, as amostras serão preparadas para que sejam comparadas as micrografias antes e depois do tratamento térmico com o objetivo de concluir qual a temperatura e o tempo de imersão que trarão melhores resultados visando a esferoidização das inclusões de manganês. Além das comparações do tamanho e formato das inclusões, serão comparadas a composição química a ser realizada através do método de eletroscopia de energia dispersiva (EDS) com a realizada no trabalho de formatura pelo Filho (2016).

2. Revisão bibliográfica

2.1. Aços carbono e aços liga

Os aços podem ser classificados através de diferentes características como a composição química, os processos de acabamento ou forma do produto acabado. A classificação utilizada no Brasil é a diferenciação pela composição química, adotada pela "American Iron and Steel Institute (AISI) e Society of Automotive Engineering (SAE). A tabela 1 tem a relação dos grupos de aço carbono (CHIAVERINI, 1996).

Tabela 1: Tipos de aço carbono (AISI - SAE) (CHIAVERINI, 1996)

AISI – SAE	Tipos de aço
10XX	Aço-carbono comuns
11XX	Aço de usinagem fácil, com alto S
12XX	Aço de usinagem fácil, com alto S e P
15XX	Aço-Mn com manganês acima de 1%
13XX	Aço-Mn com 1,75% de Mn médio
40XX	Aço-Mo com 0,25% de Mo médio
41XX	Aço-Cr-Mo com 0,4-1,1% de Cr e 0,08-0,35% de Mo
43XX	Aço-Ni-Cr-MO com 1,65-2% de Ni, 0,4-0,9% de Cr e 0,2-0,3% de Mo
46XX	Aço-Ni-Mo com 0,7-2% de Ni e 0,15-0,3% de Mo
47XX	Aço-Ni-Cr-Mo com 1,05% de Ni, 0,45% de Cr e 0,2% de Mo
48XX	Aço-Ni-Mo com 3,25-3,75% de Ni e 0,2-0,3% de Mo
51XX	Aço-Cr com 0,7-1,1% de Cr
E51100	Aço-Cr (Forno elétrico) com 1% de Cr
E52100	Aço-Cr (Forno elétrico) com 1,45% de Cr
61XX	Aço-Cr-V com 0,6 ou 0,95% de Cr e 0,1 ou 0,15% de V min.
86XX	Aço-Ni-Cr-Mo com 0,55% de Ni, 0,5% de Cr e 0,2% de Mo
87XX	Aço-Ni-Cr-Mo com 0,55% de Ni, 0,5% de Cr e 0,25% de Mo
88XX	Aço-Ni-Cr-Mo com 0,55% de Ni, 0,5% de Cr e 0,3-0,4% de Mo
9260	Aço-Si com 1,8-2,2% de Si
50BXX	Aço-Cr com 0,2-0,6% de Cr e 0,0005-0,03% de boro
51B60	Aço-Cr com 0,8% de Cr e 0,0005-0,03% de boro.
81B45	Aço-Ni-Cr-Mo com 0,3% de Ni, 0,45% de Cr, 0,12% de Mo e 0,0005-0,03% de boro
94BXX	Aço-Ni-Cr-Mo com 0,45% de Ni, 0,4% de Cr, 0,12% de Mo e 0,0005-0,03% de boro

Neste trabalho de formatura os aços utilizados são os aços liga do grupo 51XX (Aço-Cr com 0,7-1,1% de Cr) e 61XX (Aço-Cr-V com 0,6 ou 0,95% de Cr e 0,1 ou 0,15% de V min.).

Segundo a norma 6006 da ABNT a diferença entre o aço carbono e o aço liga está na quantidade de elemento de liga presente no aço (CHIAVERINI, 1996). Os aços liga ou especiais são aqueles que contém uma quantidade de elementos de liga acima dos aços convencionais com a finalidade de promover uma melhoria em propriedade para um determinado uso (SILVA et al., 2011).

Nos aços liga, de acordo com a ABNT, a soma dos elementos de liga não pode ultrapassar 6% e os teores de silício (Si), manganês (Mn) e alumínio (Al), sempre presentes no aço carbono, precisam estar acima de 0,6%, 1,65% e 0,1%, respectivamente (CHIAVERINI, 1996).

A adição de elementos de liga pode ter diversas finalidades como por exemplo, aumentar a dureza e a resistência mecânica do aço, diminuir o peso final para reduzir a inércia, aumentar a resistência à corrosão, melhorar as propriedades elétricas e magnética e entre outras propriedades (CHIAVERINI, 1996).

2.2. Elementos de liga

Os elementos de liga, como foi falado no capítulo anterior, dependendo da quantidade adicionada, podem alterar as propriedades dos aços. A classificação dos elementos de liga é caracterizada pela fase estabilizada por eles, ferrita ou austenita, ou seja, aumenta a faixa de temperatura na qual uma das fases se mantém estável (ANTÔNIO LUIZ V. DA COSTA E SILVA, 2010).

Os elementos de liga podem se apresentar de cinco modos diferentes nos aços resfriados lentamente: dissolvido na ferrita, combinado na forma de carbonetos, na forma de inclusões não metálicas, na forma de compostos intermetálicos ou no estado elementar, e a tendência de formação para cada elemento de liga é mostrada na tabela 2. O número de asterisco equivale a força da tendência, ou seja, quanto maior o número de asterisco, maior a tendência do modo final do elemento de liga (ANTÔNIO LUIZ V. DA COSTA E SILVA, 2010).

Tabela 2: Tendência geral de distribuição dos elementos de liga nos aços recozidos (ANTÔNIO LUIZ V. DA COSTA E SILVA, 2010)

Dissolvido na ferrita	Combinado na forma de carbonetos	Na forma de inclusões não metálicas	Na forma de compostos intermetálicos	No estado elementar
Ni (***)	-	-	Ni_3Al	-
Si (***)	-	SiO_2	-	-
Al (***)	-	Al_2O_3, Al_xO_y	-	-
Zr (***)	-	ZrO_2, Zr_xO_y	-	-
Cu (***)	-	-	-	$Cu > 0,8\%$
P (***)	-	-	-	-
Mn (***)	Mn (*)	MnS, MnO	-	-
Cr (**)	Cr (*)	Cr_xO_y	-	-
W (**)	W (**)	-	-	-
Mo (**)	Mo (**)	-	-	-
V (*)	V (**)	V_xO_y, V_xN_y	-	-
Ti (*)	Ti (**)	Ti_xO_y, Ti_xN_y	-	-
Nb (*)	Nb (***)	Ti_xO_y, Nb_xN_y	-	-

A adição de elemento de liga nos aços pode influenciar as propriedades dos mesmos, como por exemplo no aumento da resistência e da dureza, resistência a corrosão, altas temperaturas e abrasão, melhora na soldabilidade e entre outros (CHIAVERINI, 1996). Nos aços utilizados neste trabalho de formatura, os elementos de liga são o cromo (Cr) e o vanádio (V), como mostrado na tabela 1.

O cromo tem como principais efeitos o aumento da resistência à corrosão e à oxidação, aumento da dureza, aumento da resistência a altas temperaturas e ao desgaste com alto carbono. Já o vanádio tem como principais efeitos no aço o refinamento do grão, o aumento da dureza quando dissolvido, aumento da resistência ao revenido e melhoria no endurecimento secundário (CHIAVERINI, 1996).

O cromo e o vanádio, juntamente com outros elementos de liga como o manganês, tungstênio e entre outros, tem a tendência de formarem carbonetos, como mostrado na tabela 2. Dentro do grupo de carbonetos, ainda podem ser subdivididos em quatro grupos possíveis de serem formados: carbonetos de ferro livre $[Fe_xCy]$, carbonetos de ferro contendo elementos de liga em solução sólida $[(Fe,X)_xCy]$, carbonetos mistos de ferro e elemento de liga $[(Fe_xX_z)Cy]$ e carbonetos livres de ferro

$[X_xC_y]$ (SILVA, 2006). Os carbonetos no geral aumentam a dureza dos aços, mas também os tornam frágeis.

2.3. Inclusão não metálica

Inclusões não metálicas são definidos como impurezas que reagiram entre si ou com outros elementos não metálicos.

A presença de inclusões não metálicas nos aços pode ter efeitos negativos, caso a quantidade, a forma e a distribuição não esteja de forma controlada, e positivos nas propriedades dos aços. Por exemplo, um efeito negativo das inclusões não metálicas no aço são a possibilidade de ser um ponto potencial de início de corrosão ou de fratura por fadiga. Por outro lado, a presença de inclusões pode ser importante para reduzir o risco de fragilização por hidrogênio ou controlar as propriedades dos metais durante o processo de soldagem (KIESSLING, 1989).

As inclusões podem ser divididas em duas categorias: exógenas e endógenas (KIESSLING, 1989).

As exógenas são inclusões provenientes da incorporação mecânica de escórias, refratários ou de algum material externo ao banho metálico. Elas podem ocorrer de diferentes formas e são facilmente diferenciadas das endógenas, pois possuem estruturas mais complexas, formas irregulares e um tamanho maior. Além disso, estão localizadas preferencialmente no lingote ou tarugo e ocorrem de maneira esporádica (CARDOSO, 2002).

Por outro lado, as inclusões endógenas são originadas através das precipitações durante as reações de homogeneização no aço e podem ser encontradas na forma de sulfetos, óxidos, silicatos e aluminatos (CARDOSO, 2002).

2.3.1. Inclusões de sulfetos

Neste trabalho de formatura o tipo de inclusão que será analisado serão as de sulfetos. Devido à baixa solubilidade do enxofre na fase sólida, este composto tende a segregar, formando sulfetos metálicos durante a solidificação do aço.

Um dos sulfetos que pode ser formado é o sulfeto de ferro (FeS), que possui um ponto de fusão de aproximadamente $1190^{\circ}C$ (KIESSLING; LANGE, 1978), considerada baixa, pois as conformações mecânicas a quente acontecem em

temperaturas entre 900 - 1200°C, portanto pode ocasionar no aço tipo de defeito que pode prejudicar o processo de conformação mecânica, a “fragilidade a quente”. A formação deste sulfeto leva ao descarte de todo o aço (GUIMARÃES; SOUZA, 2015).

Uma das alternativas para não formar o sulfeto de ferro é através da adição de manganês, pois o enxofre possui uma maior afinidade com o manganês em relação ao ferro, e o sulfeto de manganês por possuir uma temperatura de fusão de 1610°C, não confere ao aço o defeito de “fragilidade a quente” durante os processos de conformação mecânica, que ocorrem em temperaturas entre 900 - 1200°C (KIESSLING; LANGE, 1978).

As inclusões de manganês (MnS) são facilmente reconhecidas no microscópio óptico, como na figura 1, com a morfologia de acordo com a forma de fabricação do aço e na cor acinzentada. Além disso, o MnS pode ser dividido em três tipos, o I, o II e o III. O tipo I é globular, com diversas formas e possui uma distribuição aleatória no aço com componentes de oxigênio precipitado. São encontrados em aços efervescentes ou semi-acalmados, com alto teor de oxigênio e baixa solubilidade do enxofre. O tipo II é encontrado em aços básicos acalmados com alumínio com baixo teor de oxigênio e alta solubilidade pelo enxofre. Por fim, o tipo III são irregulares e com formatos angulares e são encontrados geralmente em aços desoxidados com excesso de alumínio (CARDOSO, 2002).

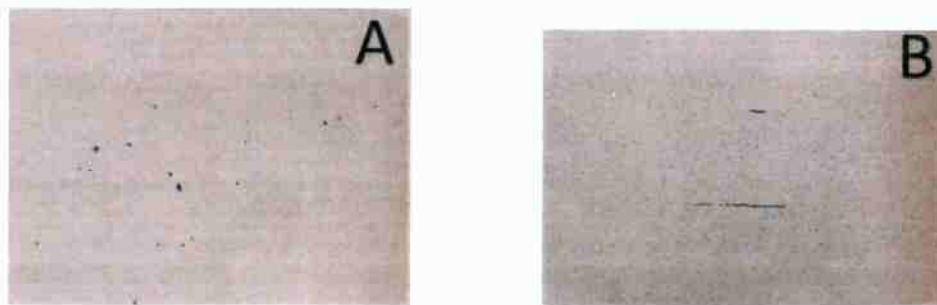


Figura 1: Inclusões de sulfeto de manganês (KIESSLING, 1989)

Apesar da inclusão de manganês ser uma das soluções para a não formação do sulfeto de ferro, este pode tornar-se prejudicial ao aço caso sua forma e distribuição não sejam controlados.

As inclusões de manganês são relativamente plásticas (GUIMARÃES; SOUZA, 2015), portanto quando o aço é submetido ao processo de laminação, elas se

deformam no mesmo sentido, conferindo um formato alongado, como por exemplo na imagem B da figura 1. Porém, essa inclusão na forma alongada, de acordo com Shao (2011), podem causar corrosão sob tensão e diminuir a dureza do aço.

Em conclusão, as inclusões de manganês ajudam no aço, pois não causam a fragilização à quente, porém deve-se controlar a forma, sendo pequeno e de preferência no formato esférico e serem distribuídas uniformemente pela matriz do aço para não as tornar prejudiciais ao aço.

2.4. Tratamentos térmicos

Tratamento térmico é o processo de mudança de temperatura controlada com a finalidade de modificar alguma propriedade sem que a forma do aço seja alterada (CARLA et al., 2014).

Os tratamentos térmicos podem ser divididos em dois tipos: os de amolecimento e os de endurecimento. Os tratamentos de amolecimento são realizados para refinar o grão do material, remover tensões residuais e melhorar a tenacidade do material, enquanto os tratamentos de endurecimento são realizados para aumentar a resistência do material (CARLA et al., 2014).

Os processos de tratamentos térmicos de amolecimento mais comuns são o recocimento pleno, esferoidização, alívio de tensões e normalização. Já os os de endurecimento do aço são a têmpera, martêmpera, austêmpera e revenimento.

Neste trabalho de formatura, o objetivo do tratamento térmico é diminuir o tamanho e esferoidizar as inclusões de manganês que está alongado devido ao processo de lingotamento ao qual o aço foi submetido.

No trabalho de Shao (2011), os parâmetros sensibilizados para verificar os melhores resultados visando a esferoidização das inclusões de sulfeto de manganês foram a taxa de aquecimento, a temperatura e o tempo de tratamento térmico.

A taxa de aquecimento foi sensibilizada em 0,5 K/s, 1 K/s, 2 K/s, 6 K/s e 10 K/s até atingir a temperatura de 1463 K. Porém, neste trabalho de formatura não será possível utilizá-la como um dos parâmetros de análise, pois não existem equipamentos no departamento para variá-la de forma precisa.

A temperatura de tratamento térmico sensibilizada por Shao foram até atingir 873 K, 1073 K, 1273 K e 1463 K a uma taxa de aquecimento de 6 K/s e após atingir a temperatura escolhida, esperar por 300 segundos. Neste trabalho de formatura, como dito anteriormente não foi possível variar a taxa de aquecimento e não foi possível realizar tratamentos térmicos à temperatura acima de 1273 K, pois os fornos disponíveis não suportavam temperaturas tão extremas, logo as temperaturas de banho utilizadas foram de 1073 K e 1273 K.

Por fim, os tempos de tratamento térmico utilizados por Shao foram de 1h, 2h, 3h e 4h e os tempos utilizados neste trabalho foram de 2h, 4h e 6h.

Ao fim do tratamento térmico, é esperado que as inclusões de sulfeto de manganês, antes alongada como na imagem B da figura 1, se dividam de dois modos, como mostrado nas imagens A e B da figura 2.

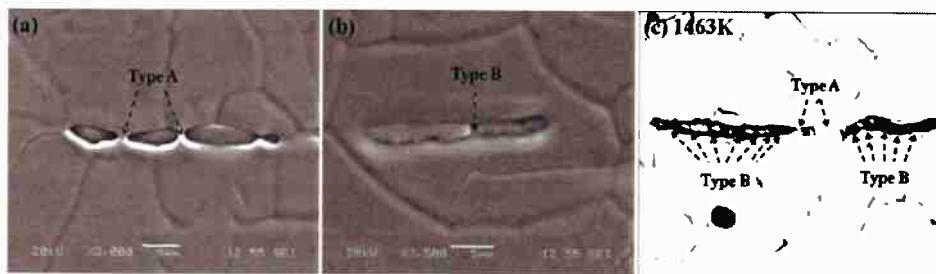


Figura 2: Imagem das inclusões de sulfeto de manganês (MnS) esferoidizado após tratamento térmico (SHAO et al., 2011)

2.5. Aços SAE5160 e SAE6150

Os aços utilizados nesse trabalho de formatura são os SAE5160 e SAE6150, os quais, segundo a tabela 1, são aço-cromo e aço-cromo-vanádio respectivamente.

O aço SAE5160, de média temperabilidade, são utilizados para fabricação de componentes sujeitos a condições severas de uso na seção transversal, como por exemplo parafusos, molas helicoidais e barras de torção e na fabricação de perfis especiais, como as molas parabólicas e facas para colheitadeira agrícola. Já o aço o aço SAE6150, que possuem uma maior temperabilidade, é muito utilizado na produção de molas semi-elípticas e helicoidais, molas para válvulas e barras de torção.

A composição química teórica dos aços SAE5160 e SAE6150 são mostradas nas tabelas 3 e 4, respectivamente.

Tabela 3: Composição química do aço SAE5160 (FILHO, 2016)

Aço SAE5160		
Elemento Químico	Faixa Composição	
(%)	Mínimo	Máximo
C	0,5800	0,6300
Mn	0,800	1,0000
Si	0,1500	0,3500
P	0,0000	0,0300
S	0,0000	0,0300
Al	0,0000	0,0100
Cr	0,7000	0,9000
Cu	0,0000	0,3000
B	0,0000	0,0040
Ti	0,0200	0,0600
Ni	0,0000	0,2000
Mo	0,0000	0,0600
Sn	0,0000	0,0250
V	0,0000	0,0100
Nb	0,0000	0,0400
P + S	0,0000	0,0550
N ppm	60,0000	110,0000
Ceq	0,8500	0,9800

Tabela 4: Composição química do aço SAE6150 (FILHO, 2016)

Aço SAE6150		
Elemento Químico	Faixa Composição	
(%)	Mínimo	Máximo
C	0,5000	0,5300
Mn	0,8000	0,9000
Si	0,2000	0,3000
P	0,0000	0,0250
S	0,0000	0,0250
Cr	1,0000	1,1000
Ni	0,0000	0,2000
V	0,2000	0,2500
Cu	0,0000	0,2500
Sn	0,0000	0,0200
Al	0,0100	0,0350
Ti	0,0000	0,0040
Nb	0,0050	0,0400
N	0,0000	0,0120
Pb	0,0000	0,0050
Ca	0,0000	0,0020
H ppm	0,0000	9,9999
W	0,0000	0,0070
Co	0,0000	0,1000
Sb	0,0000	0,0400
Zn	0,0000	0,1000
Al + Nb	0,0150	0,0400
Cu + 10 Sn	0,0000	0,4000
P + S	0,0000	0,0500
Ceq	-	-

3. Materiais e métodos

3.1. Aços SAE5160 e SAE6150

Os valores experimentais das composições químicas das amostras são dados nas tabelas 5 e 6 e foram obtidas do trabalho de formatura de Filho (2016).

Tabela 5: Composição química do aço SAE5160 (FILHO, 2016)

Aço SAE5160	
Elemento Químico	Valor (%)
C	0,5900
Mn	0,9300
Si	0,3000
P	0,0210
S	0,0100
Al	0,0050
Cr	0,7300
Cu	0,0000
B	0,0001
Ti	0,0280
Ni	0,0100
Mo	0,0000
Sn	0,0030
V	0,0080
Nb	0,0030
P + S	0,0310
N ppm	106,0000
Ceq	0,8940

Tabela 6: Composição química do aço SAE6150 (FILHO, 2016)

Aço SAE6150	
Elemento químico	Valor (%)
C	0,5000
Mn	0,8700º
Si	0,2900
P	0,0190
S	0,0070
Cr	1,0200
Ni	0,1000
V	0,2000
Cu	0,2200
Sn	0,0110
Al	0,0140
Ti	0,0035
Nb	0,0070
N	0,0106
Pb	0,0020
Ca	0,0013
H ppm	0,0002
W	0,0010
Co	0,0060
Sb	0,0011
Zn	0,0011
Al + Nb	0,0210
Cu + 10 Sn	0,3300
P + S	0,0260
Ceq	0,8844

3.2. Preparação da amostra

As amostras utilizadas serão os aços SAE 5160 e SAE 6150, de construção mecânica. As amostras foram cedidas pela Gerdau Aços Especiais Brasil - Unidade Mogi das Cruzes.

Cada aço foi fornecido na forma de barra chata com canto redondo, figura 3 e 4.



Figura 3: Aço SAE 5160



Figura 4: Aço SAE 6150

As preparações das amostras foram realizadas no laboratório de metalografia do departamento de Engenharia de Materiais da Escola Politécnica – USP e os procedimentos foram os seguintes: corte, embutimento, lixamento e polimento.

Na primeira etapa, o corte das barras em amostras de aproximadamente 15 mm, figura 5 e 6, foi realizado na serra fita da marca Ronemak, modelo M 400 L, figura 7, para facilitar a confecção das amostras a serem utilizadas nas análises metalográficas, análises no MEV e nos tratamentos térmicos. O sentido do corte na serra fita foi realizado no sentido transversal à laminação da chapa.



Figura 5: Amostras de aço SAE 5160 após corte na serra fita

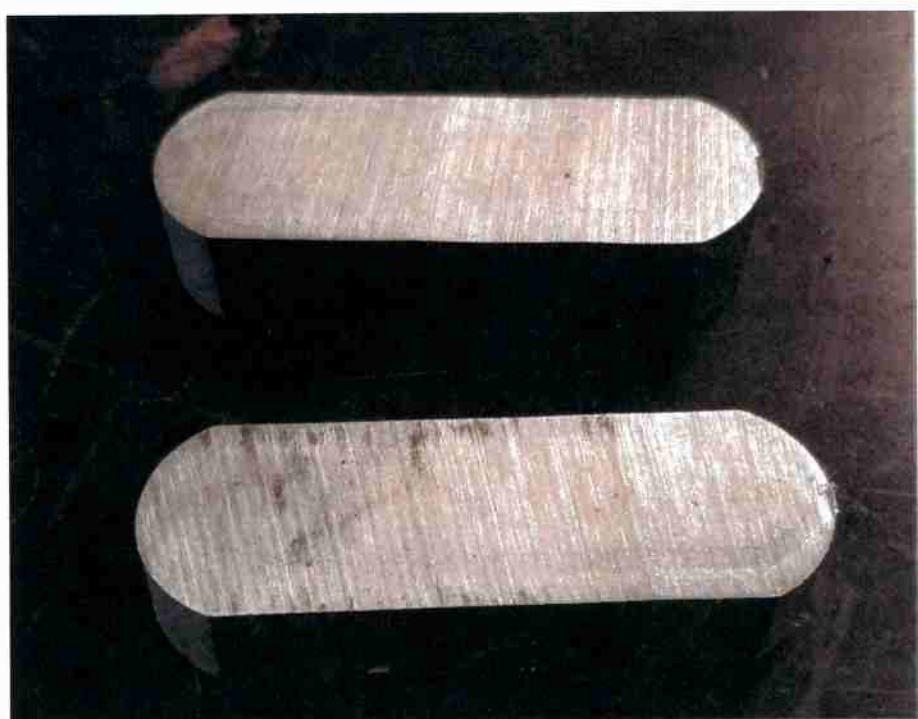


Figura 6: Amostra de aço SAE 6150 após cortado na serra fita



Figura 7: Serra fita Ronemak M 400 L

As amostras das figuras 5 e 6 foram cortadas em corpos de provas menores, de tamanho entre 10 e 12 mm na serra cutoff, como demonstrado na figura 8 e 9. As extremidades arredondadas foram descartadas e os corpos de provas foram retirados da parte restante. Esses corpos de provas serão as amostras utilizadas nos tratamentos térmicos, nas análises metalográfica e no MEV. O sentido dos cortes, desta vez, foi no sentido da laminação.



Figura 8: Corpos de prova do aço SAE5160 cortadas na serra cutoff



Figura 9: Corpos de provas do SAE6150 cortadas na serra cutoff

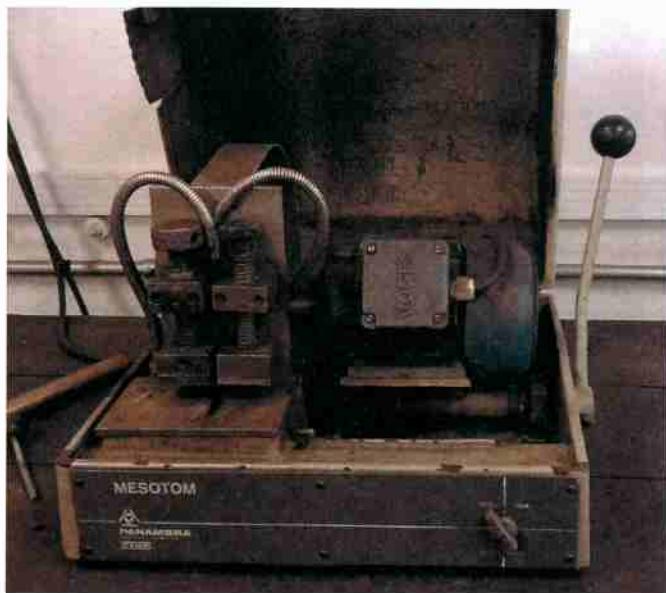


Figura 10: Serra cutoff



Figura 11: Detalhamento interno da serra cutoff

Em seguida, foi selecionado um corpo de prova de cada aço para ser embutido na embutidora metalográfica, figura 12, utilizando baquelite, figura 13.

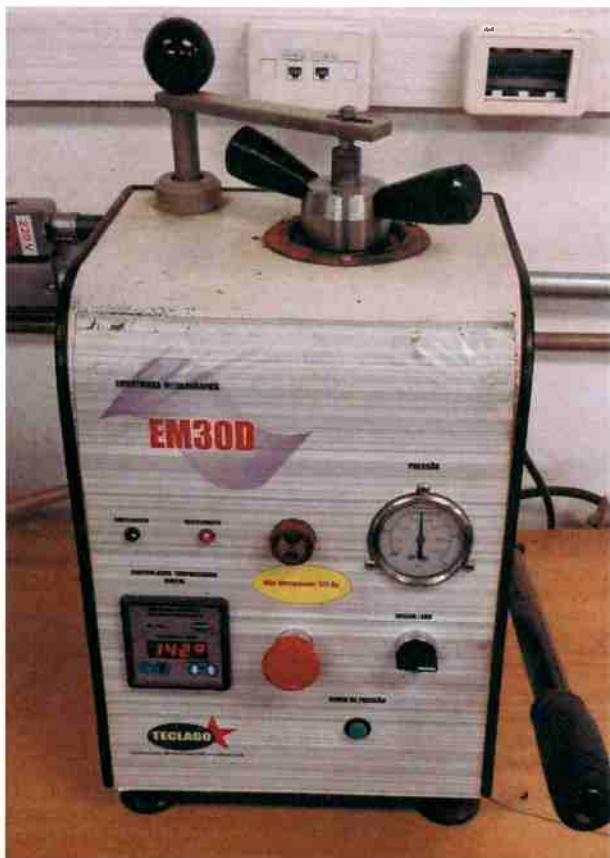


Figura 12: Embutidora metalográfica EM30D



Figura 13: Baquelite marrom

As amostras embutidas estão demonstradas na figura 14, a maior é o aço SAE6150 e a menor o SAE5160.

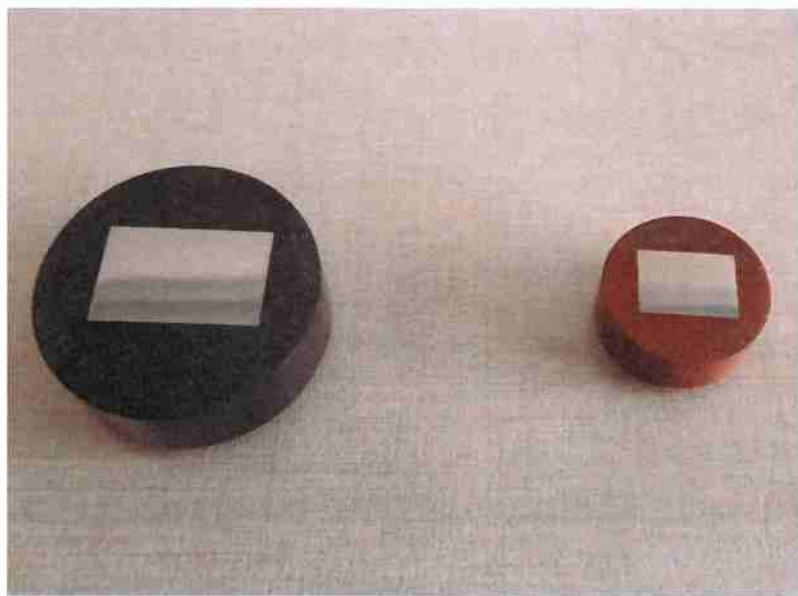


Figura 14: Amostras do aço SAE6150 e SAE5160 após o embutimento

Após o embutimento, as amostras, figura 14, foram lixadas com as lixas #100, #180, #220, #320, #400, #600 e #1200, nessa ordem. Além das lixas, foi utilizado álcool etílico com 95% de concentração para que as amostras não fossem danificadas pelo aumento de temperatura durante o lixamento. As lixas eram trocadas no momento em que, a olho nu, todos os riscos estivessem no sentido do lixamento, e a cada troca, as amostras foram rotacionadas em 90°.

Após o lixamento, as amostras foram polidas utilizando os panos para polimento de 6, 3 e 1 µm, com o uso da pasta de diamante para os respectivos panos, figura 15, e foi utilizado álcool etílico com 95% de concentração com a mesma finalidade utilizada no lixamento, como lubrificante. Nessa etapa, do mesmo modo que no lixamento, a cada troca de pano as amostras eram rotacionadas em 90° e foi utilizado o microscópio óptico no modo de luz negra para verificar se o polimento estava bom ou se ainda continham muitos riscos.



Figura 15: Pasta de diamante utilizado no polimento

Além dos materiais citados anteriormente, foram utilizados algodão, detergente e secadora para limpar e secar as amostras entre as trocas de lixa e de panos de polimento.

As amostras não foram atacadas, pois as inclusões eram possíveis de serem observadas sem o ataque e não tínhamos o objetivo de observar as microestruturas como ferrita, austenita e entre outros.

Os mesmos procedimentos de preparação da amostra: corte, embutimento, lixamento e polimento, foram realizados nas amostras submetidas aos tratamentos térmicos de 800° e 1000° .

3.3. Microscópio Óptico

Após a etapa de preparação das amostras, no microscópio óptico, figura 16, foram feitas micrografias de diferentes regiões das duas amostras (SAE5160 e SAE6150) com 200x, 500x e 1000x de aumento para verificar e confirmar a existência de inclusões. O microscópio óptico utilizado foi da marca Olympus e do modelo BX60M.



Figura 16: Microscópio óptico Olympus BX60M

Do mesmo modo que nas amostras sem tratamento térmico, a etapa de microscopia óptica foi realizada nas amostras que foram submetidas ao tratamento térmico.

3.4. Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV)

No microscópio eletrônico de varredura (MEV) do departamento de engenharia de materiais (PMT), modelo Inspect F50, foram feitas as micrografias das amostras de SAE5160 e SAE6150 sem e com tratamento térmico em diferentes regiões das amostras que continham as inclusões, que serão utilizadas neste trabalho de formatura para verificar a esferoidização ou não das inclusões.

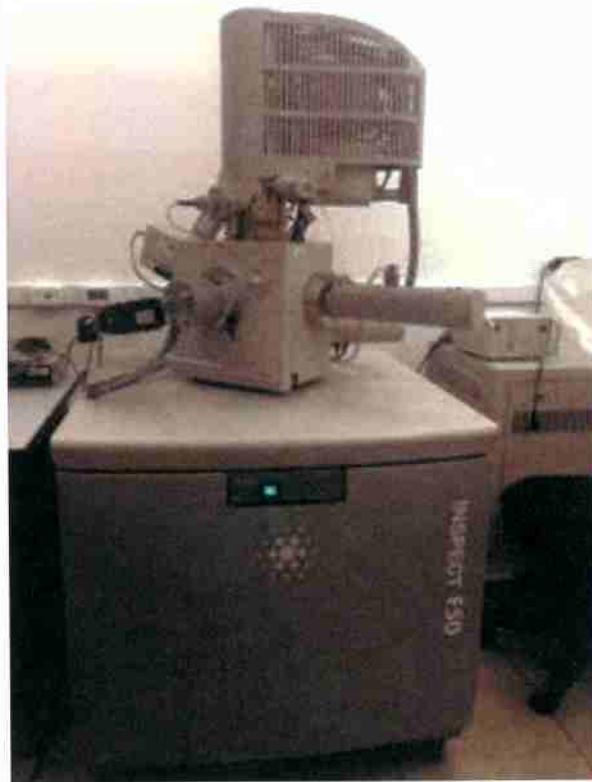


Figura 17: Microscópio eletrônico de varredura (MEV) Inspect F50

3.5. Eletroscopia de energia dispersiva (EDS)

No MEV é possível realizar a EDS para obter a análise química de um determinado ponto ou região e o método da análise química consiste em microanálises dos raios-X emitidos e da geração de espectros de energia.

As análises químicas foram realizadas em diferentes regiões das amostras e em uma mesma região foram selecionados pontos para análise química das inclusões e regiões para análise química da matriz. A seleção de pontos e área é mostrado na figura 18, e nas figuras 19 a 21, os resultados do EDS para os pontos e para as áreas.

No capítulo 4, serão fornecidas, as análises químicas das inclusões e da matriz de forma qualitativa, pois o número de pontos e regiões analisadas nesse trabalho de formatura não trará resultados de composição química condizentes com o esperado.

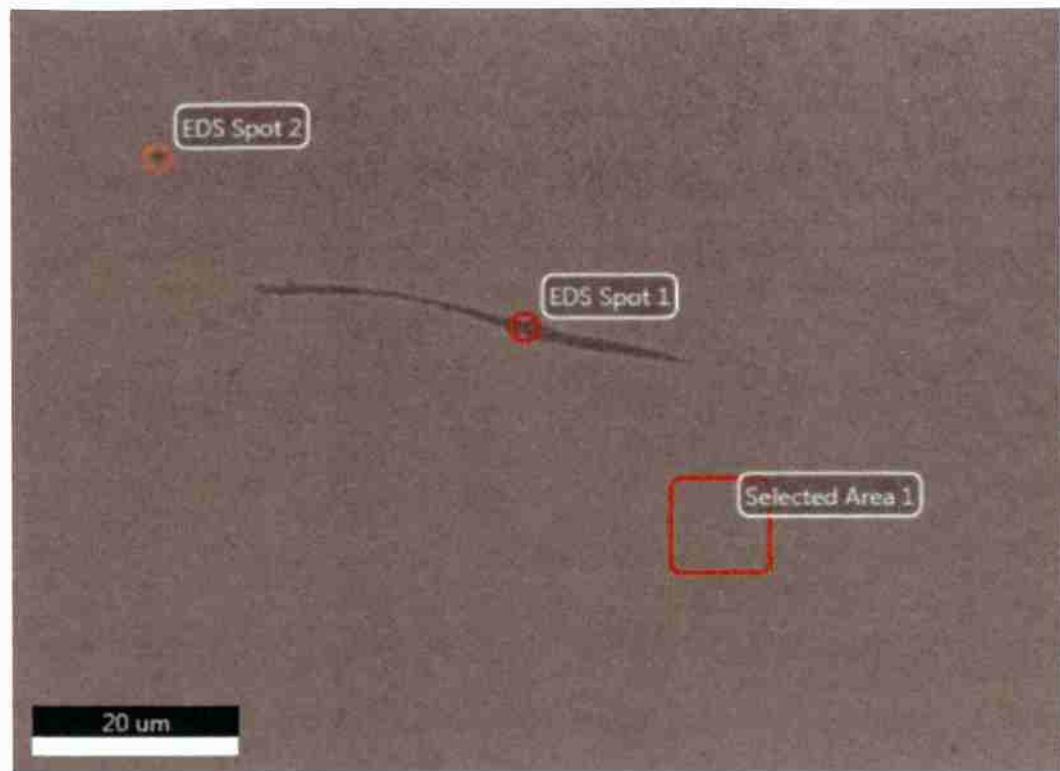


Figura 18: Pontos e áreas selecionadas para a realização do EDS no aço SAE5160

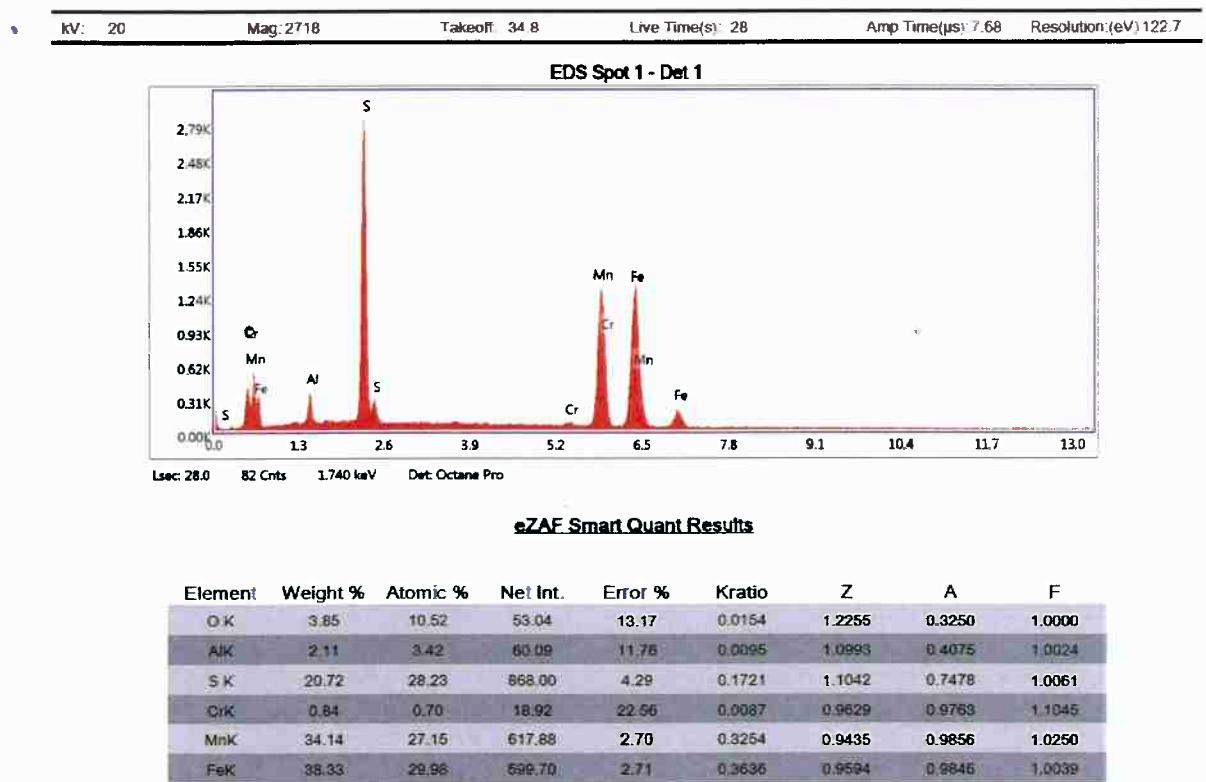
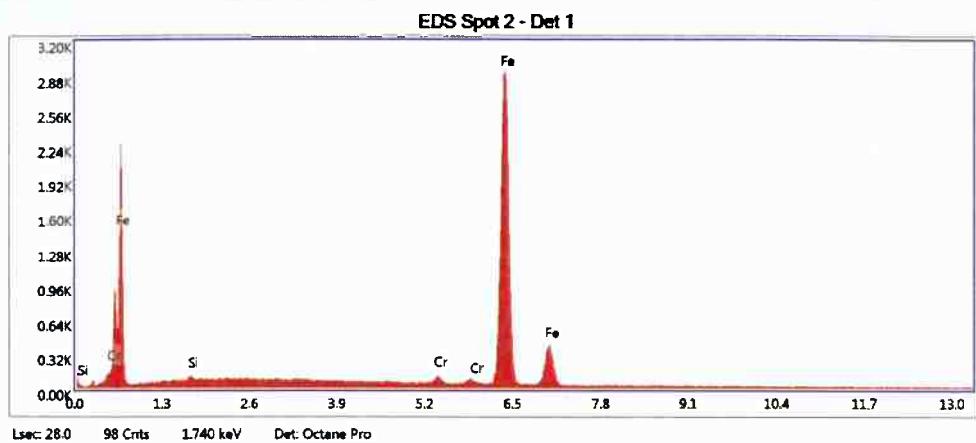


Figura 19: Resultado do EDS do ponto 1

KV: 20 Mag: 2718 Takeoff: 34.8 Live Time(s): 28 Amp Time(μs): 7.68 Resolution:(eV) 122.7

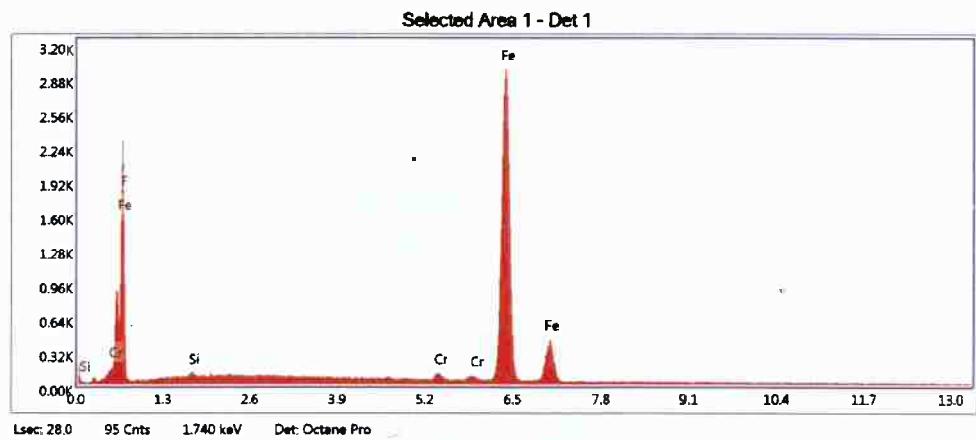


eZAF Smart Quant Results

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	A	F
SiK	0.21	0.43	6.28	66.48	0.0011	1.1676	0.4459	1.0030
CrK	1.45	1.55	32.48	10.26	0.0165	1.0023	0.9888	1.1488
FeK	98.34	98.02	1483.36	1.99	0.9803	0.9996	0.9972	1.0001

Figura 20: Resultado do EDS do ponto 2

KV: 20 Mag: 2718 Takeoff: 34.8 Live Time(s): 28 Amp Time(μs): 7.68 Resolution:(eV) 122.7



eZAF Smart Quant Results

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	A	F
FeK	3.42	9.40	111.91	8.25	0.0242	1.1759	0.6024	1.0000
SiK	0.25	0.47	7.72	47.36	0.0013	1.1600	0.4499	1.0029
CrK	1.34	1.35	31.19	11.49	0.0152	0.9953	0.9897	1.1492
FeK	94.99	88.78	1465.57	1.99	0.9411	0.9925	0.9980	1.0003

Figura 21: Resultado do EDS da área 1

3.6. Medição do tamanho da inclusão

A comparação do tamanho e formato das inclusões nas amostras sem e após o tratamento térmico será feita de maneira qualitativa, comparando a morfologia das inclusões e se ocorreu ou não repartição das mesmas em menores tamanhos, a partir das micrografias realizadas no MEV. Devido à falta de equipamentos nos laboratórios do departamento, como por exemplo o "Confocal Scanning Laser Microscope" utilizado por Shao (SHAO et al., 2011) em seu experimento, não foi possível comparar uma mesma inclusão ao longo do tempo de tratamento térmico para uma mesma temperatura ou entre duas temperaturas diferentes para um mesmo tempo de imersão.

3.7. Tratamento térmico

Na etapa do tratamento térmico, as amostras utilizadas foram as mesmas das figuras 8 e 9. O forno mufla foi pré-aquecido a temperaturas de 5 a 10°C acima da temperatura de tratamento e foram colocados três cadinhos de carbeto de silício por vez, e a cada 2 horas de tratamento térmico, 1 cadinho era retirado para minimizar o tempo total de utilização do forno. Cada cadinho continha uma amostra de cada tipo de aço utilizado neste trabalho de formatura e carvão para minimizar a perda de carbono da amostra durante o tratamento térmico.

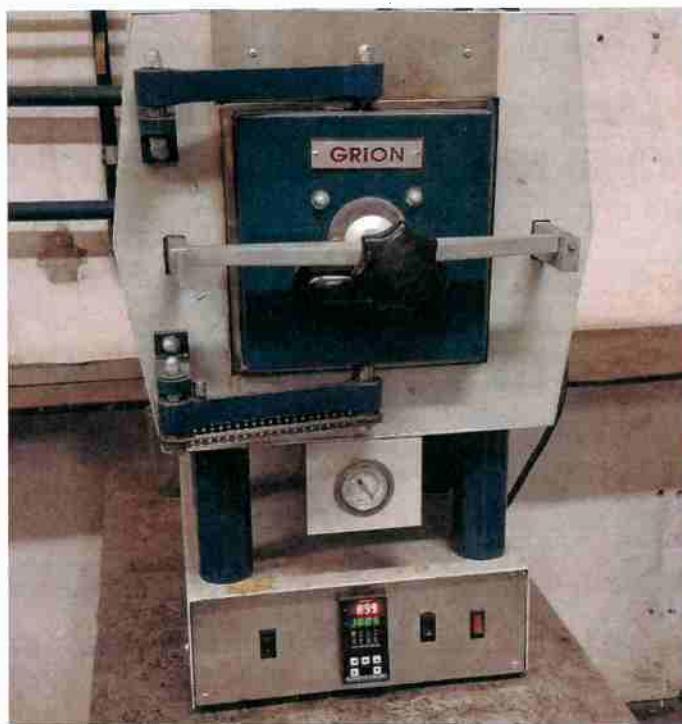


Figura 22: Forno mufla Grion



Figura 23: Cadiño de carbeto de silício

Os tratamentos térmicos foram realizados nos tempos e nas temperaturas mostradas na tabela 7. Os valores de temperaturas de 800°C e 1000°C e tempos de 2, 4 e 6 horas foram escolhidos baseadas no artigo de Shao, na qual para a amostra de aço resulfurado, temperaturas abaixo de 1073K, e tempos de imersão abaixo de 3 horas foram observadas poucas alterações no tamanho e na forma das inclusões.

Na figura 24, temos o modo que as amostras saem do forno, logo foi necessário as resfriarmos. O método de resfriamento utilizado foi ao ar, para evitar a formação de martensita, o que tornaria a amostra mais dura dificultando posteriormente na etapa de lixamento e polimento.

Tabela 7: Tempos e temperaturas do tratamento térmico

Amostra	Temperatura de imersão	Tempo de imersão
1	800°C	2 horas
2	800°C	4 horas
3	800°C	6 horas
4	1000°C	2 horas
5	1000°C	4 horas
6	1000°C	6 horas



Figura 24: Amostras logo após o tratamento térmico

4. Resultados e discussão

4.1. Amostras sem tratamento térmico

Os resultados das amostras sem tratamento térmico serão divididos da seguinte forma em relação aos resultados: primeiro as micrografias do microscópio óptico e MEV serão mostradas para cada amostra e os resultados da composição química da matriz e das inclusões serão demonstrada de forma qualitativa, apenas citando os elementos encontrados.

4.1.1. SAE5160

4.1.1.1. Microscópio óptico

No microscópio óptico, foram realizadas micrografias da amostra SAE5160 sem tratamento térmico, e nas figuras 25 e 26, o aumento utilizado foi de 500x e as figuras 27 e 28 mostram micrografias com 1000x de aumento. Nelas podemos encontrar algumas inclusões de cor acinzentada, como mencionada por Cardoso (2002) em seu trabalho de defesa de doutorado. Nas figuras 25 a 28, as inclusões estão destacadas com círculos amarelo, e elas aparecem em um formato alongado devido ao processo de laminação ao qual o aço foi submetido durante a fabricação.

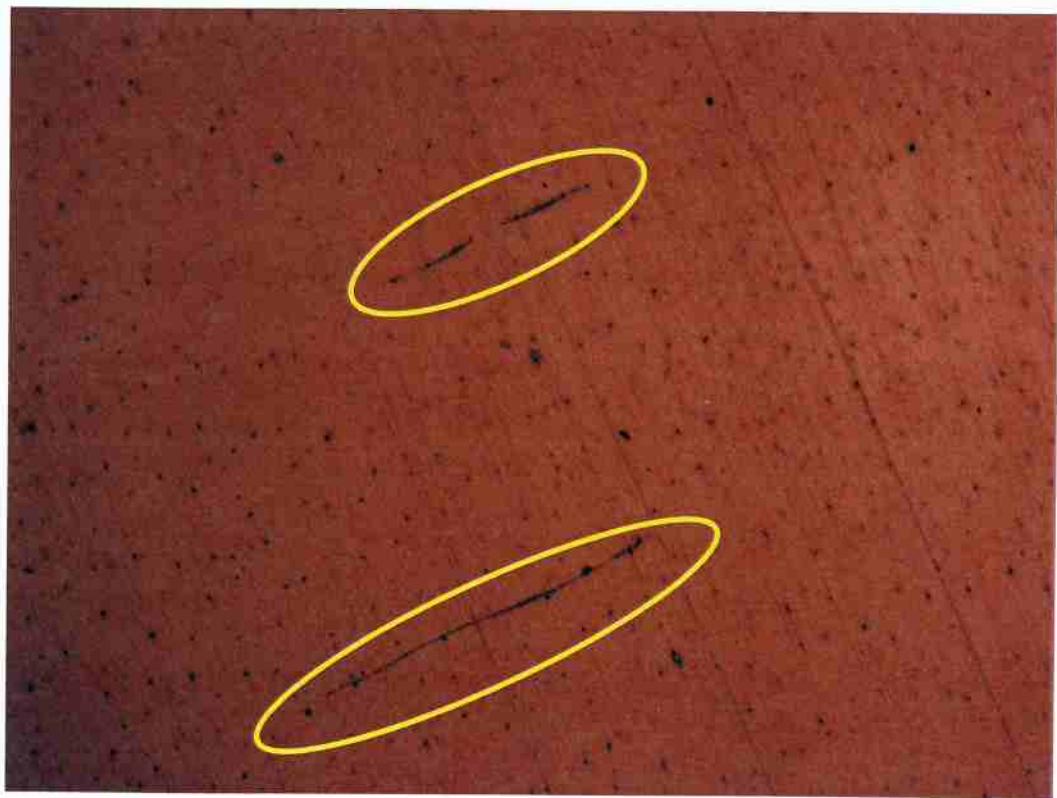


Figura 25: Micrografia no microscópio óptico da amostra SAE5160 sem tratamento térmico

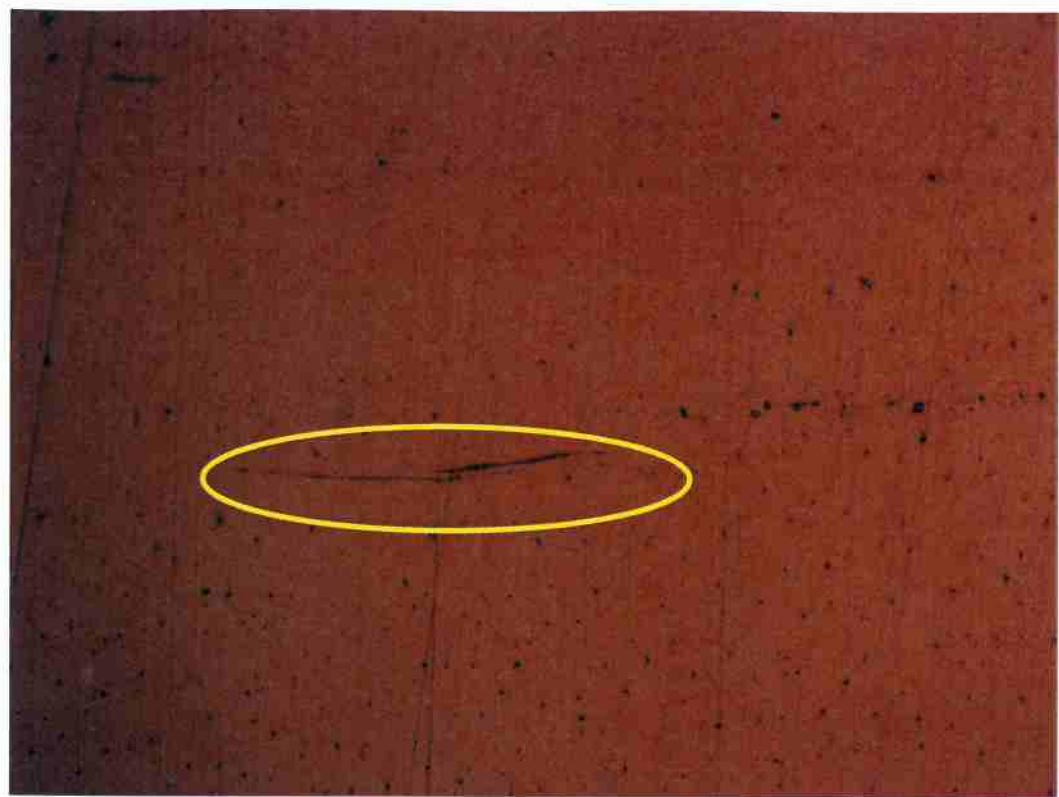


Figura 26: Micrografia no microscópio óptico da amostra SAE5160 sem tratamento térmico

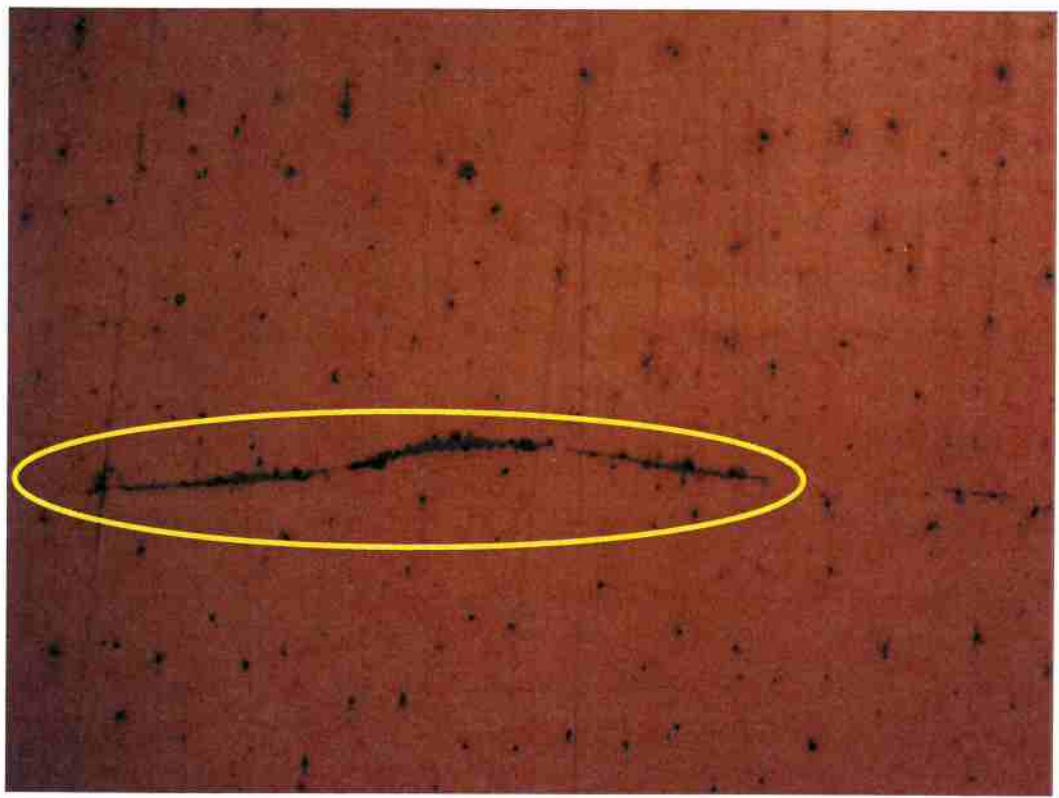


Figura 27: Micrografia no microscópio óptico da amostra SAE5160 sem tratamento térmico

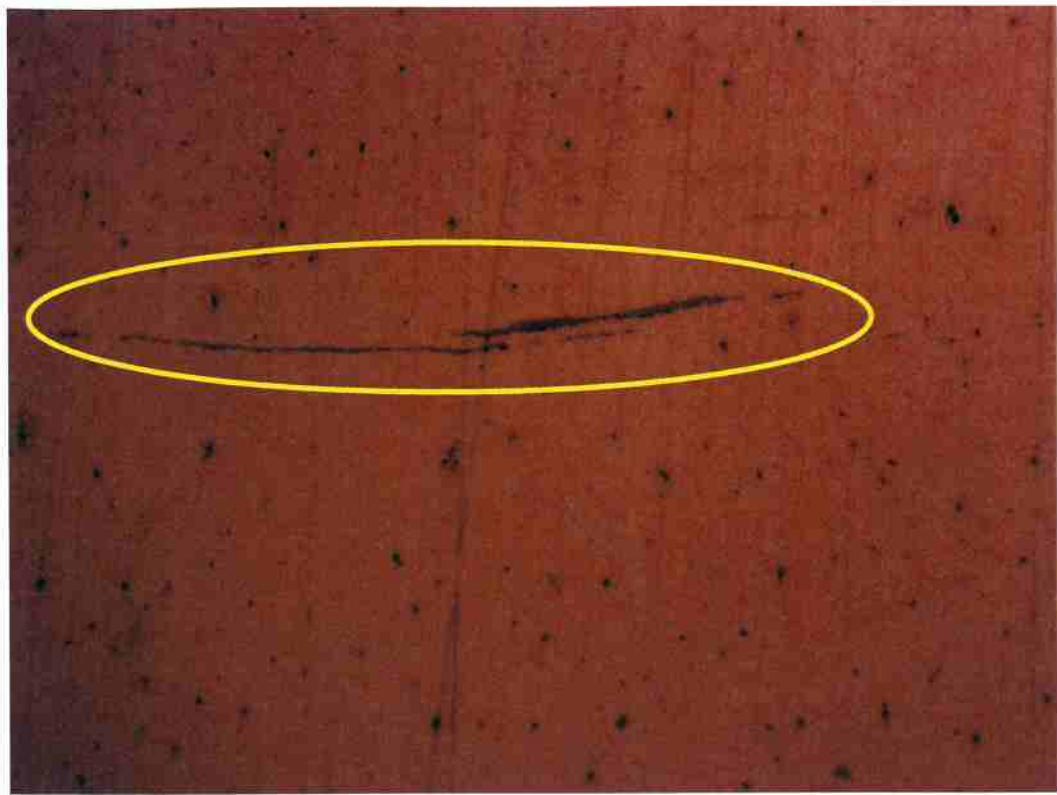


Figura 28: Micrografia no microscópio óptico da amostra SAE5160 sem tratamento térmico

4.1.1.2. Microscópio eletrônico de varredura (MEV)

No microscópio eletrônico de varredura (MEV), na figura 29 com o aumento de 400x, é possível observar diversas inclusões, que estão destacadas em amarelo.

Nas figuras 30 e 31, com o aumento de 3000x, é possível ver com maior precisão o formato e o tamanho das inclusões. A partir dessas imagens serão feitas as comparações das formas e dos tamanhos das inclusões das amostras com e sem tratamento térmico e verificar qual temperatura e tempo de tratamento térmico trouxe melhores resultados para a esferoidização.

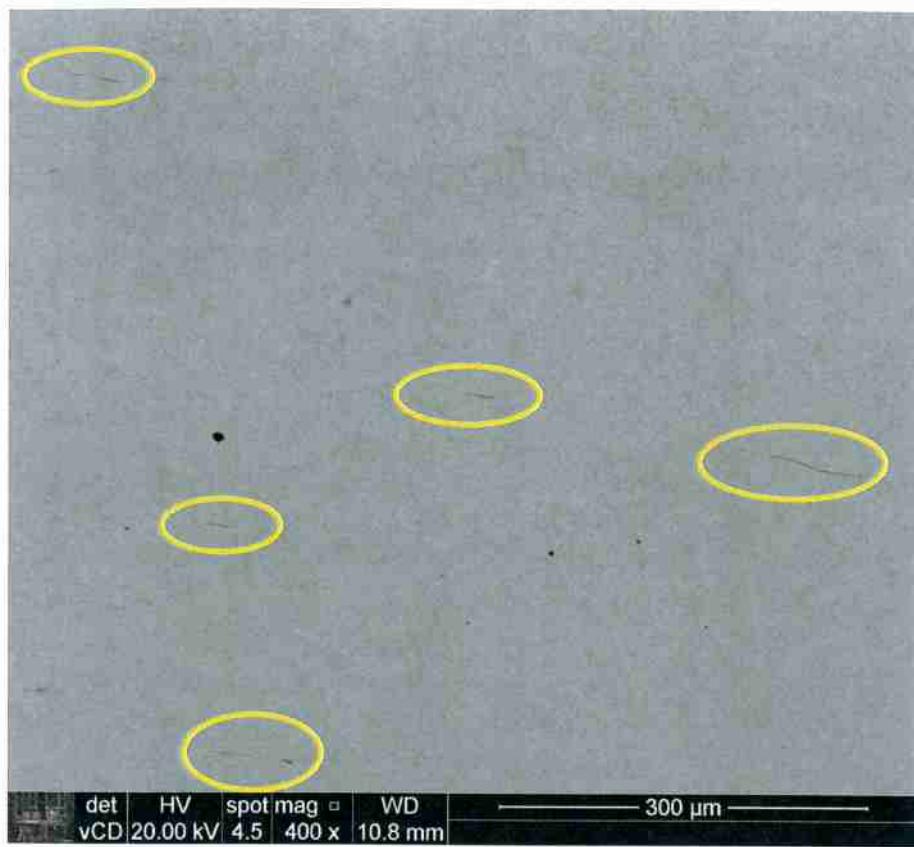


Figura 29: Micrografia da amostra SAE5160 no microscópio eletrônico de varredura (MEV)



Figura 30: Micrografia da amostra SAE5160 no microscópio eletrônico de varredura (MEV)



Figura 31: Micrografia da amostra SAE5160 no microscópio eletrônico de varredura (MEV)

4.1.1.3. Eletroscopia de energia dispersiva (EDS)

A partir do EDS, obtivemos os resultados da matriz e das inclusões. Na tabela 8 e 9 são dados os elementos químicos encontrados no EDS para a matriz e para a inclusão, respectivamente.

Em comparação com os resultados da análise química realizada pelo Filho (2016), a presença de flúor não era esperada. A presença de flúor detectada pelo EDS pode ser decorrente de possível contaminação durante o processo de preparação das amostras.

Nas inclusões, os elementos químicos encontrados nos levam a concluir que provavelmente as inclusões são de sulfetos de manganês, porém é possível encontrar outros tipos de sulfetos e óxidos misturados, uma vez que foi detectado pelo EDS o átomo de oxigênio e outros metais.

Tabela 8: Análise química do EDS para a matriz do aço SAE5160 sem tratamento térmico

Matriz SAE5160 – sem tratamento térmico

Elemento químico

Fe
Cr
F
Si

Tabela 9: Análise química no EDS para a inclusão no aço SAE5160 sem tratamento térmico

Inclusão SAE5160 – sem tratamento térmico

Elemento químico

Fe
Mn
S
O
Cr
Al
Ca
Si

4.1.2. SAE6150

4.1.2.1. Microscópio óptico

Do mesmo modo que no aço SAE5160, no aço SAE6150, encontrou-se através do microscópio óptico as inclusões. Elas têm um formato alongado e uma coloração acinzentada do mesmo jeito que foi mencionado por Cardoso (2002).

Nessa amostra, as inclusões foram encontradas através do microscópio óptico com o aumento de 200x, como são mostradas nas figuras 32 e 33, e posteriormente foram realizadas micrografias com o aumento de 500x, como mostrado nas figuras 34 e 35.

As inclusões no aço SAE6150 foram relativamente fáceis de serem encontradas no microscópio óptico, já que estão em abundância e em tamanho maior que na amostra do aço SAE5160, sendo possível a visualização com o aumento de 200x.

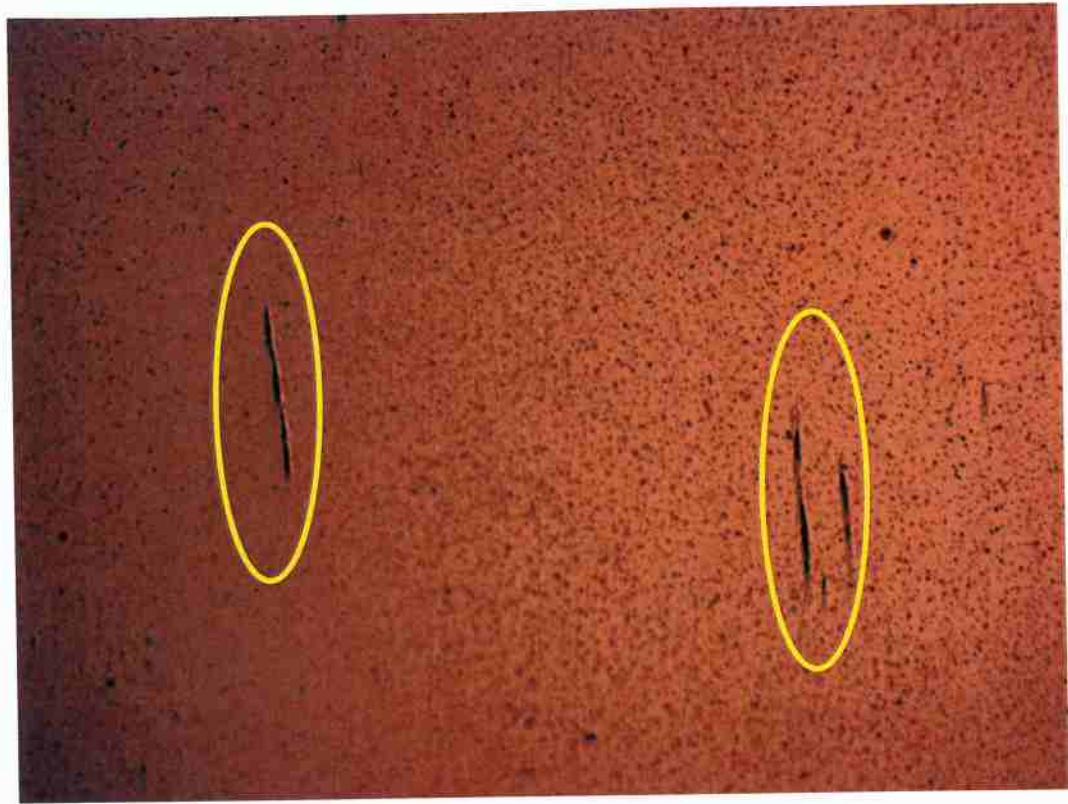


Figura 32: Micrografia no microscópio óptico da amostra SAE6150 sem tratamento térmico

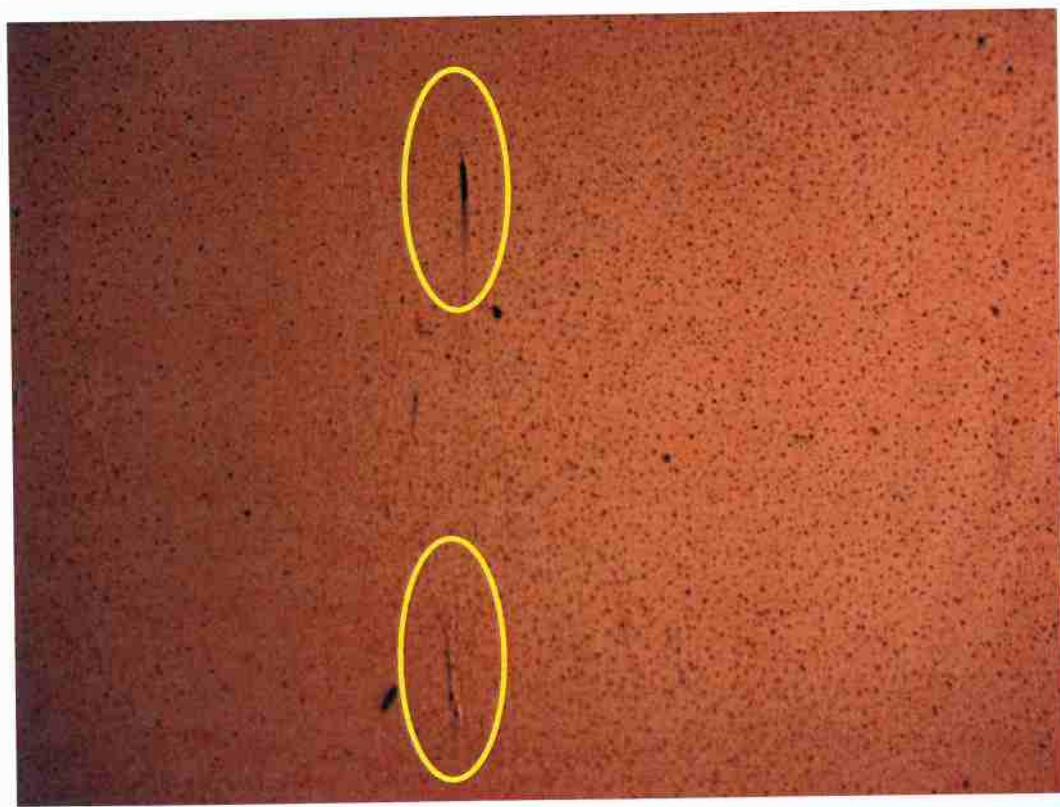


Figura 33: Micrografia no microscópio óptico da amostra SAE6150 sem tratamento térmico

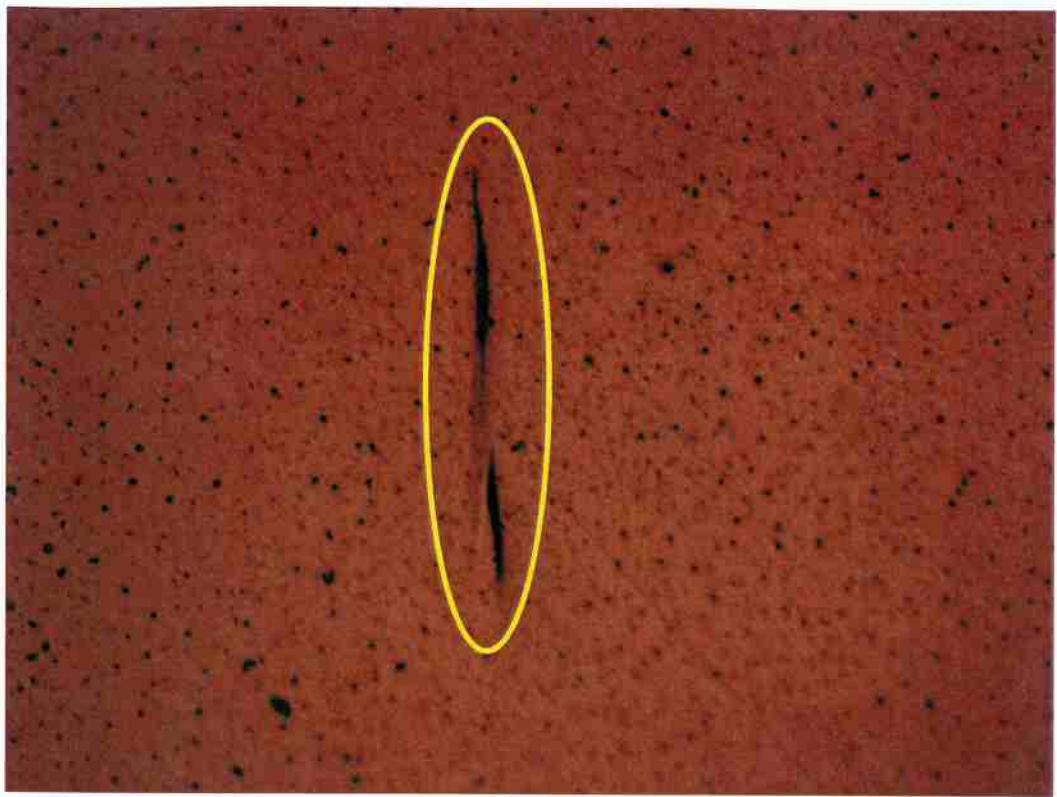


Figura 34: Micrografia no microscópio óptico da amostra SAE6150 sem tratamento térmico

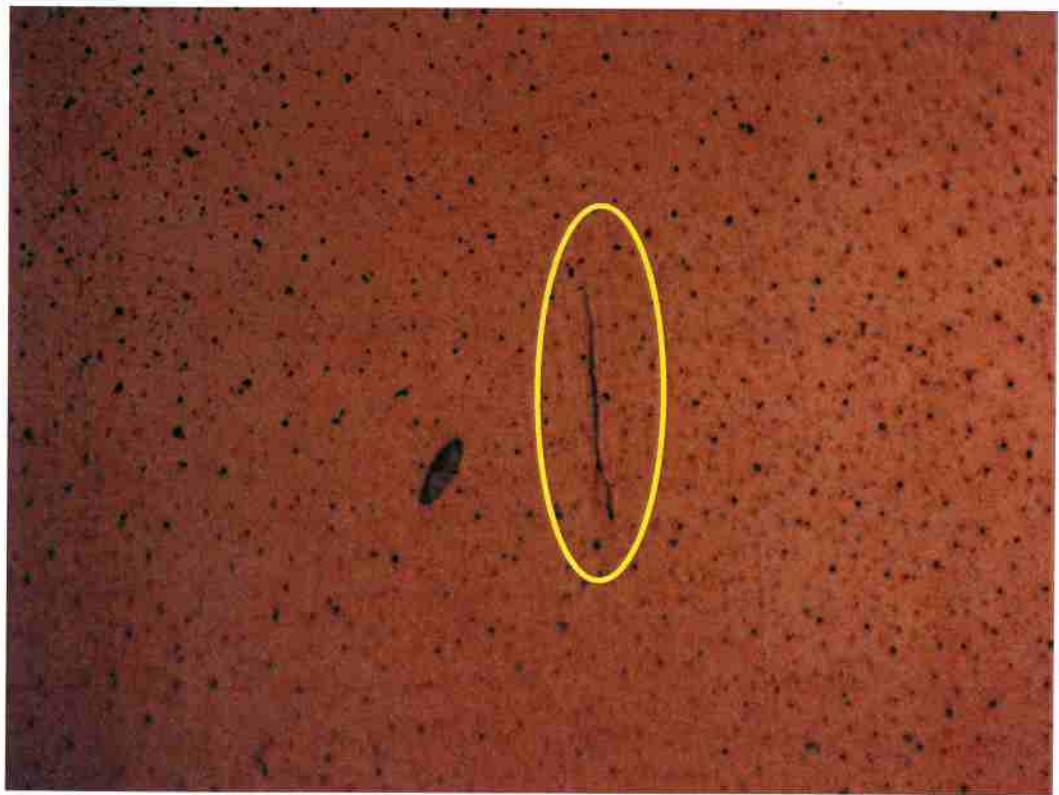


Figura 35: Micrografia no microscópio óptico da amostra SAE6150 sem tratamento térmico

4.1.2.2. Microscópio eletrônico de varredura (MEV)

No microscópio eletrônico de varredura (MEV), com o aumento de 1000x, observa-se algumas inclusões alongadas no sentido vertical destacadas por círculos amarelos na figura 36.

Nas figuras 37 e 38, com o aumento de 2000x e 4000x, respectivamente, foi observada as inclusões alongadas com um maior nível de detalhamento.

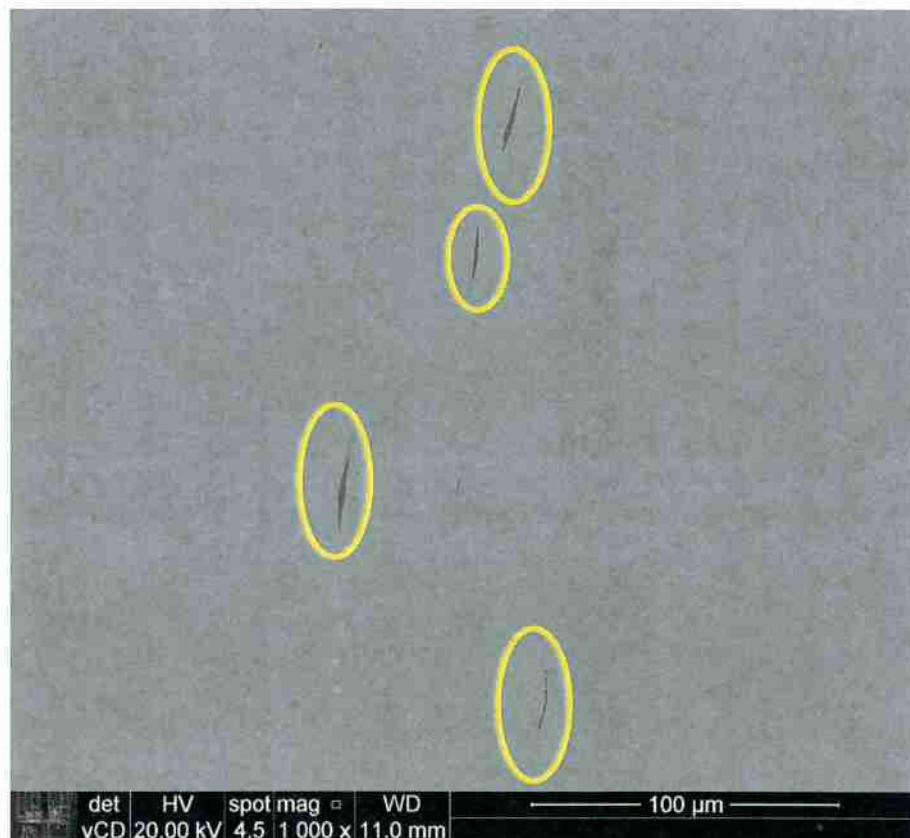


Figura 36: Micrografia da amostra SAE6150 no microscópio eletrônico de varredura (MEV)

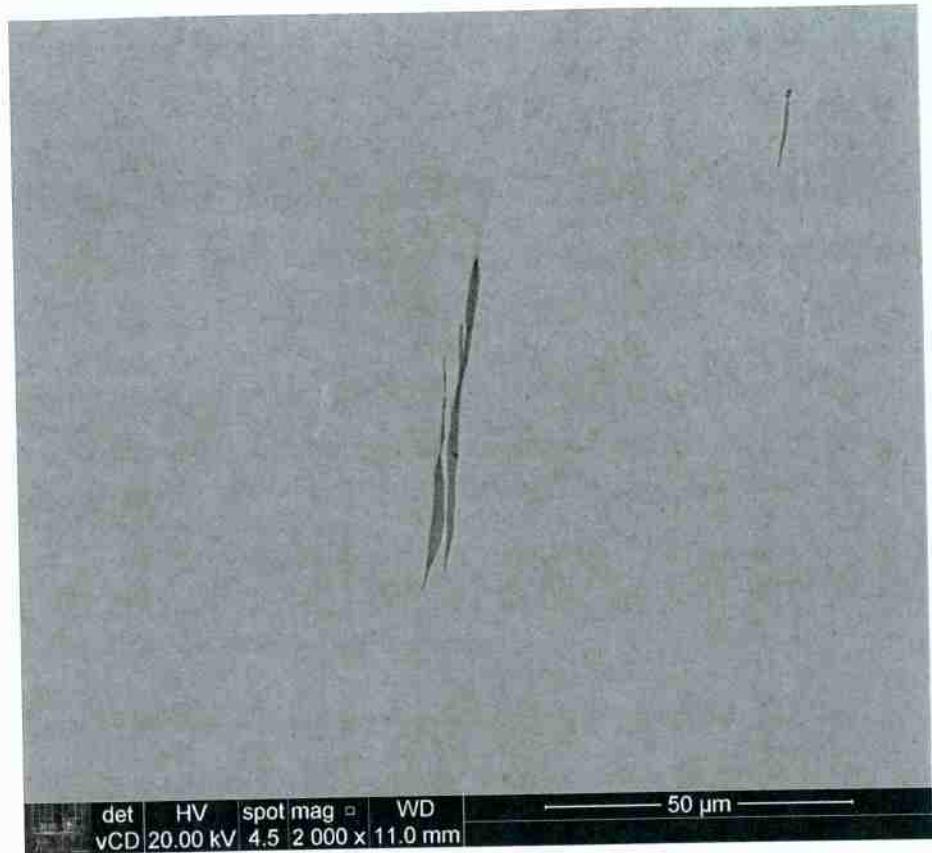


Figura 37: Micrografia da amostra SAE6150 no microscópio eletrônico de varredura (MEV)



Figura 38: Micrografia da amostra SAE6150 no microscópio eletrônico de varredura (MEV)

4.1.2.3. Eletroscopia de energia dispersiva (EDS)

Os resultados do EDS da amostra do aço SAE6150, mostraram assim como na amostra do aço SAE5160, a presença de flúor que não eram esperadas e provavelmente foram detectadas decorrente de contaminação durante o processo de preparação das amostras. Além disso, apesar do aço SAE6150 ser classificado como aço cromo-vanádio, não foi detectado a presença significativa de vanádio.

As inclusões observadas no MEV são possivelmente de sulfeto de manganês e em alguns encontra-se a presença de óxidos dentro das inclusões em uma coloração mais escura.

Os elementos químicos encontrados na matriz e nas inclusões pelo EDS são mostrados tabelas 10 e 11, respectivamente.

Tabela 10: Análise química do EDS para a matriz na amostra sem tratamento térmico

Matriz SAE6150 – sem tratamento térmico

Elemento químico

Fe
F
Cr
C
Si

Tabela 11: Análise química no EDS para a inclusão na amostra sem tratamento térmico

Inclusão SAE6150 – sem tratamento térmico

Elemento químico

Mn
Fe
S
O
C
Al
Cr
Ca
Mg
Ti
Si
P

4.2. Amostras com tratamento térmico

Nas amostras que foram realizadas o tratamento térmico, os resultados do microscópio óptico e do MEV serão mostrados a cada amostra, temperatura e tempo de tratamento térmico. Já para os resultados do EDS, foram montadas tabelas com as composições químicas dos elementos presentes em uma determinada amostra (SAE5160 ou SAE6150), temperatura (800°C ou 1000°C) e tempos variados (2h, 4h e 6h).

4.2.1. SAE5160 após tratamento térmico a 800°C

4.2.1.1. *Microscópio óptico*

Na figura 39 estão as micrografias com aumento de 500x das amostras do aço SAE5160 que foram realizados os tratamentos térmicos a 800°C. Nas micrografias para os tempos de tratamento térmico de 2 e 4 horas observa-se possíveis divisões nas inclusões, que consequentemente diminuíram o tamanho delas, porém as mesmas continuam em um formato alongado.

Nas micrografias para o tempo de tratamento térmico de 6 horas observa-se maior número de inclusões menores, decorrente de prováveis divisões das inclusões e elas são encontradas em um formato mais esferoidizado.

Nas micrografias do MEV serão mostrados maiores detalhes das inclusões, pois foi utilizado aumentos maiores sem a perda da qualidade, em relação ao microscópio óptico.



Figura 39: Micrografias do microscópio óptico da amostra SAE5160 pós tratamento térmico a 800°C

4.2.1.2. Microscópio eletrônico de varredura (MEV)

Nas micrografias realizadas no MEV, é possível analisar com maior detalhe, pois utilizam-se aumentos maiores como de 2500x e 5000x, como é mostrado nas figuras 40 a 45.

Como já observado no microscópio óptico, as inclusões de manganês nas micrografias de 2 e 4 horas de tratamento térmico, figuras 40 a 43, estão praticamente sem divisões e em um formato alongado. Nas micrografias de 6 horas de tratamento térmico, figuras 44 e 45 observa-se inclusões alongadas, porém próximos às extremidades delas observa-se inclusões menores em um formato arredondado, possivelmente decorrente do tratamento térmico realizado.



Figura 40: Micrografia de uma inclusão da amostra SAE5160 com tratamento térmico à 800°C e 2 horas



Figura 41: Micrografia de uma inclusão da amostra SAE5160 com tratamento térmico à 800°C e 2 horas

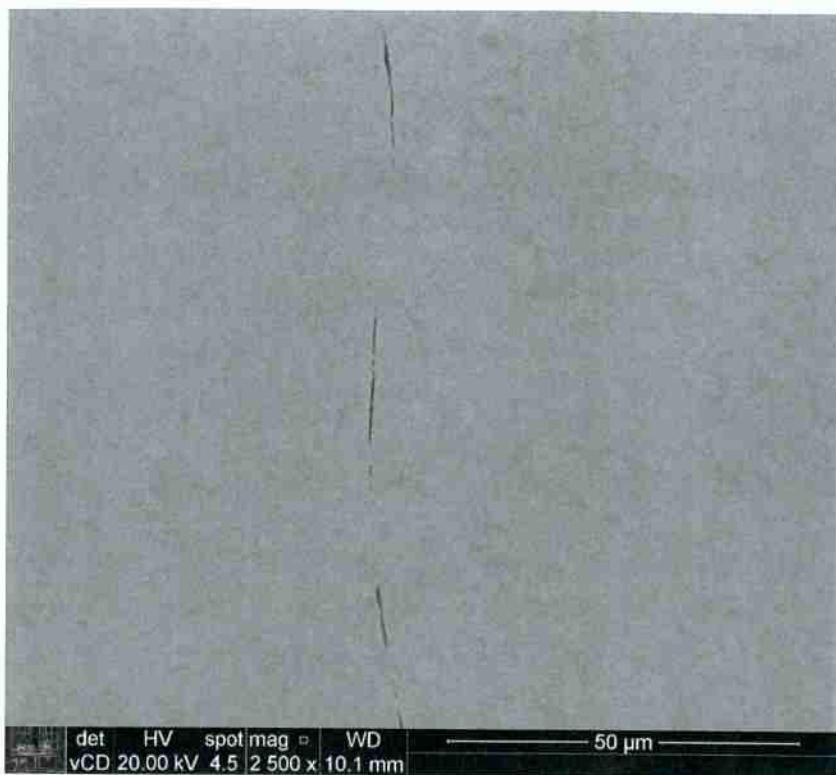


Figura 42: Micrografia de uma inclusão da amostra SAE5160 com tratamento térmico à 800°C e 4 horas



Figura 43: Micrografia de uma inclusão da amostra SAE5160 com tratamento térmico à 800°C e 4 horas



Figura 44: Micrografia de uma inclusão da amostra SAE5160 com tratamento térmico à 800°C e 6 horas



Figura 45: Micrografia de uma inclusão da amostra SAE5160 com tratamento térmico à 800°C e 6 horas

4.2.1.3. Eletroscopia de energia dispersiva (EDS)

Nos resultados do EDS, verificamos a presença de cromo, manganês, vanádio e silício na matriz, como é mostrado na tabela 12. Na tabela 13, mostra-se os elementos químicos encontrados nas inclusões, possivelmente formado pelo sulfeto de manganês. Além do sulfeto de manganês, outros sulfetos e óxidos também podem ser encontrados nas inclusões.

Tabela 12: Análise química do EDS para a matriz na amostra SAE5160 com tratamento térmico a 800°C

Matriz SAE5160 – com tratamento térmico a 800°C	
Elemento químico	
Fe	
Cr	
Mn	
V	
Si	

Tabela 13: Análise química do EDS para a inclusão na amostra SAE5160 com tratamento térmico a 800°C

Inclusão SAE5160 – com tratamento térmico a 800°C	
Elemento químico	
Fe	
Mn	
S	
O	
Al	
Ca	
Mg	
Cu	
Cr	
V	

4.2.2. SAE5160 após tratamento térmico a 1000°C

4.2.2.1. Microscópio óptico

Na figura 47 são mostradas as micrografias com aumento de 500x das amostras de aço SAE5160 que foram realizados os tratamentos térmicos a 1000°C. Nas micrografias de 2 e 4 horas de tratamento térmico, observa-se um maior número de divisões se comparado as micrografias da figura 39. As inclusões estão menores, porém ainda não é possível verificar a esferoidização das mesmas. Já nas micrografias de 6 horas de tratamento térmico observa-se várias divisões com as

inclusões bem menores e com a forma esferoidizada, possivelmente decorrentes do tratamento térmico realizado na amostra.

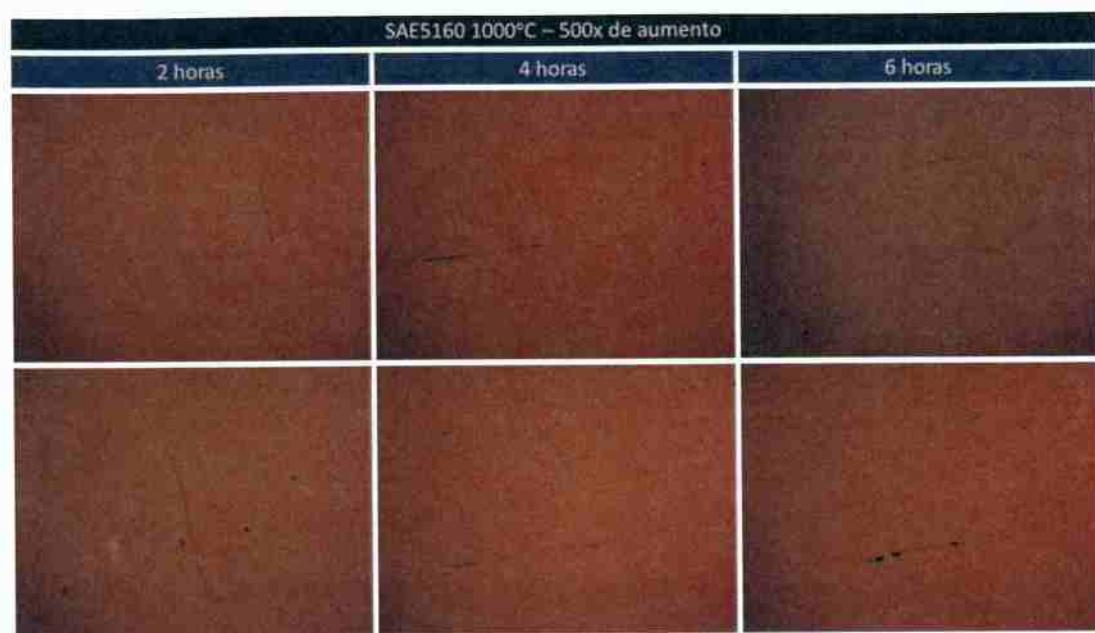


Figura 46: Micrografias do microscópio óptico da amostra SAE5160 pós tratamento térmico a 1000°C com aumento de 500x

4.2.2.2. Microscópio eletrônico de varredura (MEV)

Na amostra de SAE5160 tratadas termicamente a 1000°C, foi observado o aumento de divisões nas inclusões inclusive nos tempos de tratamento térmico de 2 e 4 horas, o que não foi observado nas figuras 40 a 43, porém algumas das inclusões continuam em um formato alongado. Além disso, observa-se a formação de pescoço nas inclusões, sendo possível concluir que mais divisões ocorrerão nas inclusões caso tivesse maior tempo de tratamento térmico.

Nas micrografias realizadas em amostras com 6 horas de tratamento térmico, as inclusões estão subdivididas em várias inclusões menores e no formato esferoidizado, possivelmente causado pelo tratamento térmico, atingindo o objetivo inicial do trabalho que era a esferoidização as inclusões.



Figura 47: Micrografia de uma inclusão da amostra SAE5160 com tratamento térmico à 1000°C e 2 horas



Figura 48: Micrografia de uma inclusão da amostra SAE5160 com tratamento térmico à 1000°C e 2 horas



Figura 49: Micrografia de uma inclusão da amostra SAE5160 com tratamento térmico à 1000°C e 4 horas



Figura 50: Micrografia de uma inclusão da amostra SAE5160 com tratamento térmico à 10000°C e 4 horas

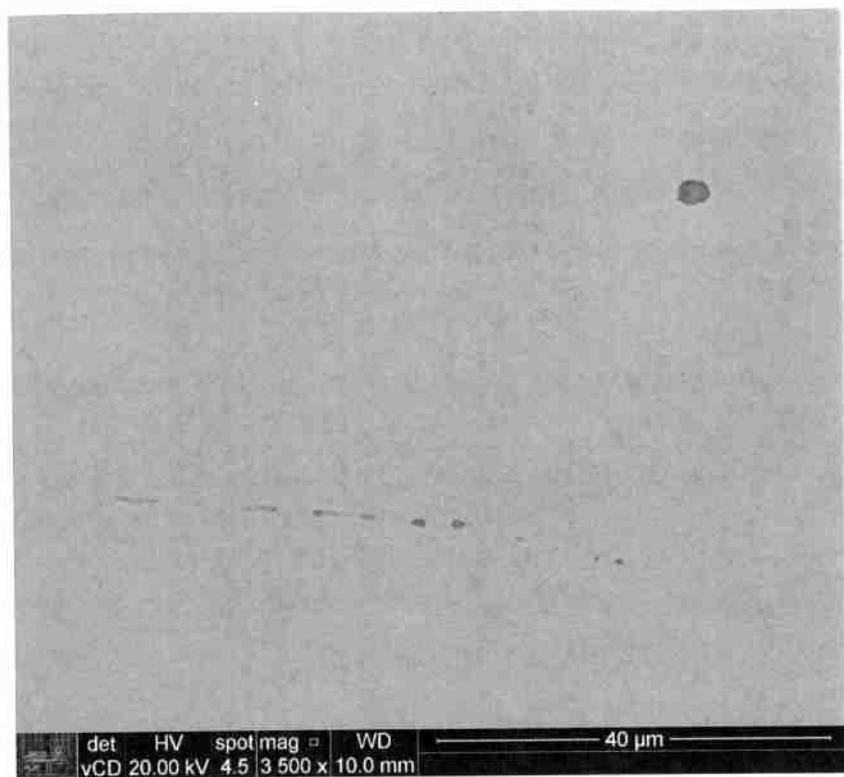


Figura 51: Micrografia de uma inclusão da amostra SAE5160 com tratamento térmico à 1000°C e 6 horas

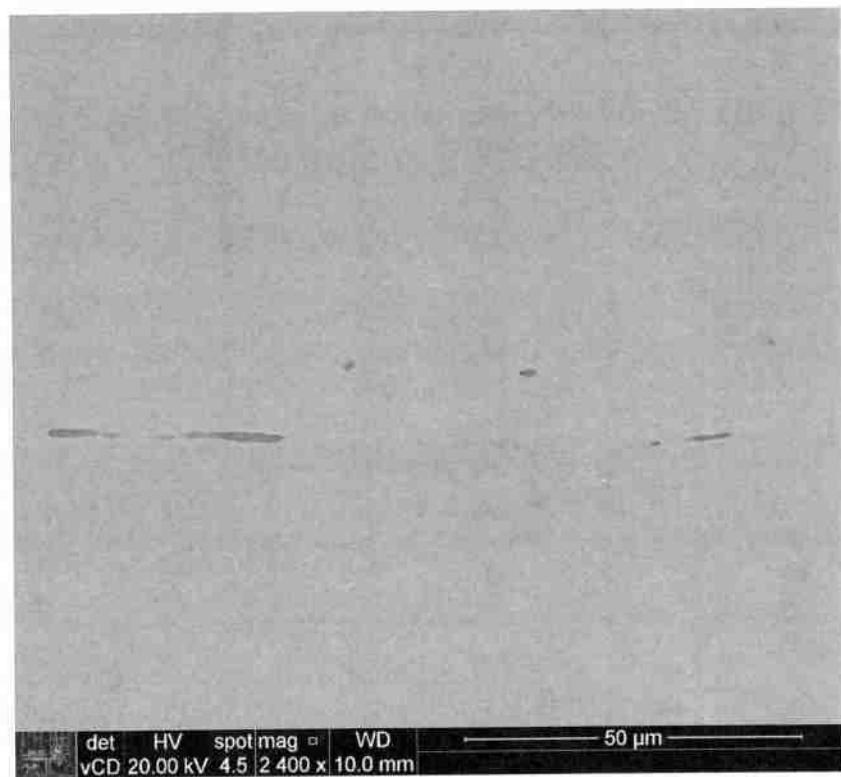


Figura 52: Micrografia de uma inclusão da amostra SAE5160 com tratamento térmico à 1000°C e 6 horas

4.2.2.3. Eletroscopia de energia dispersiva (EDS)

O resultado do EDS para as amostras com o tratamento térmico a 1000°C não diferiram tanto em relação aos resultados do EDS para as amostras com o tratamento térmico a 800°C, porém foi detectado titânio e nitrogênio, elementos que não haviam sido encontrado, porém esperados devido à composição teórica do aço dada na tabela 5.

Tabela 14: Análise química do EDS para a matriz na amostra SAE5160 com tratamento térmico a 1000°C

Elemento químico
Fe
Ti
Cr
Mn
N
Si
V

Tabela 15: Análise química do EDS para a inclusão na amostra SAE5160 com tratamento térmico a 1000°C

Elemento químico
Fe
Mn
S
Ca
C
Cr
Al
Mg
O
Ti
V
Si

4.2.3. SAE6150 após tratamento térmico a 800°C

4.2.3.1. Microscópio óptico

Na figura 54 estão as micrografias das amostras de SAE6150 tratadas termicamente a 800°C, com aumento de 500x. Não foi possível observar divisões significativas nas inclusões para as amostras que foram tratadas durante 2 e 4 horas.

Por outro lado, apesar de não ser possível observar divisões claras das inclusões nas amostras tratadas durante 6 horas, observou-se uma criação de “pescoço” nas inclusões, ou seja, um afinamento em algumas regiões com a possibilidade de divisão.

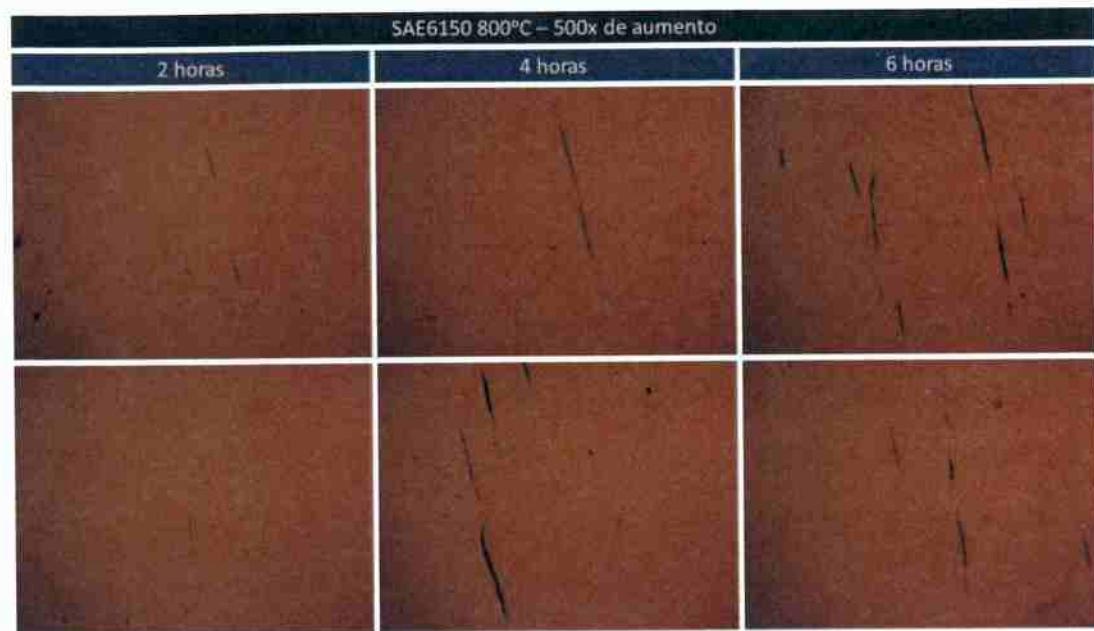


Figura 53: Micrografias do microscópio óptico da amostra SAE6150 pós tratamento térmico a 800°C

4.2.3.2. Microscópio eletrônico de varredura (MEV)

De acordo com as micrografias realizadas no MEV, figura 54 a 59, as amostras de SAE6150 que passaram por tratamento térmico a 800°C, não mostrou mudanças significativas no formato e no tamanho das inclusões, as inclusões continuaram alongadas e sem quase nenhuma divisão ou formação de pescoço que dê indícios de que as inclusões fosse dividir-se com o aumento do tempo de tratamento térmico.

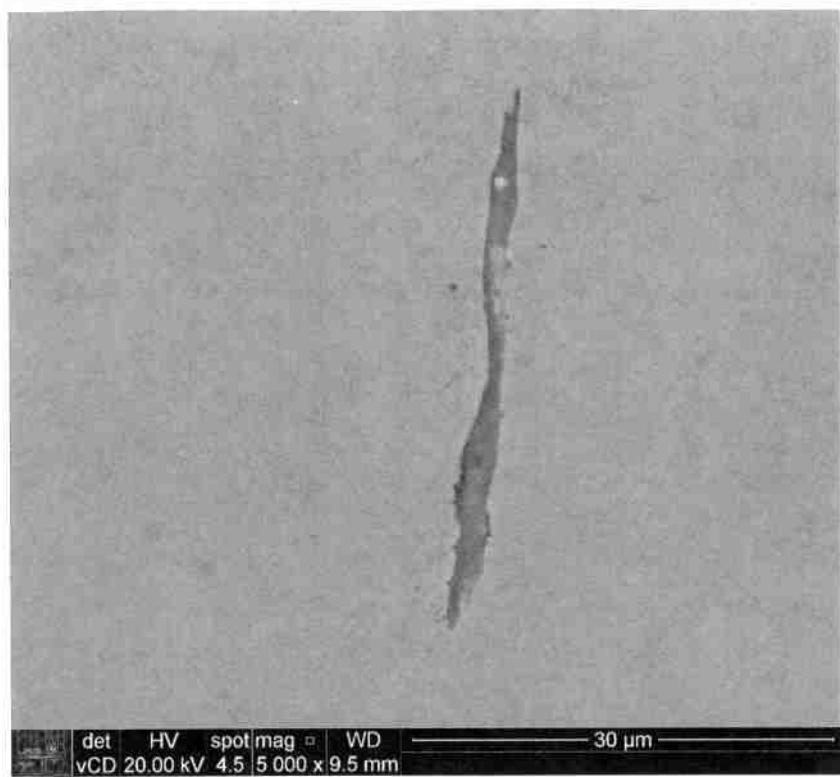


Figura 54: Micrografia de uma inclusão da amostra SAE6150 com tratamento térmico à 800°C e 2 horas



Figura 55: Micrografia de uma inclusão da amostra SAE6150 com tratamento térmico à 800°C e 2 horas

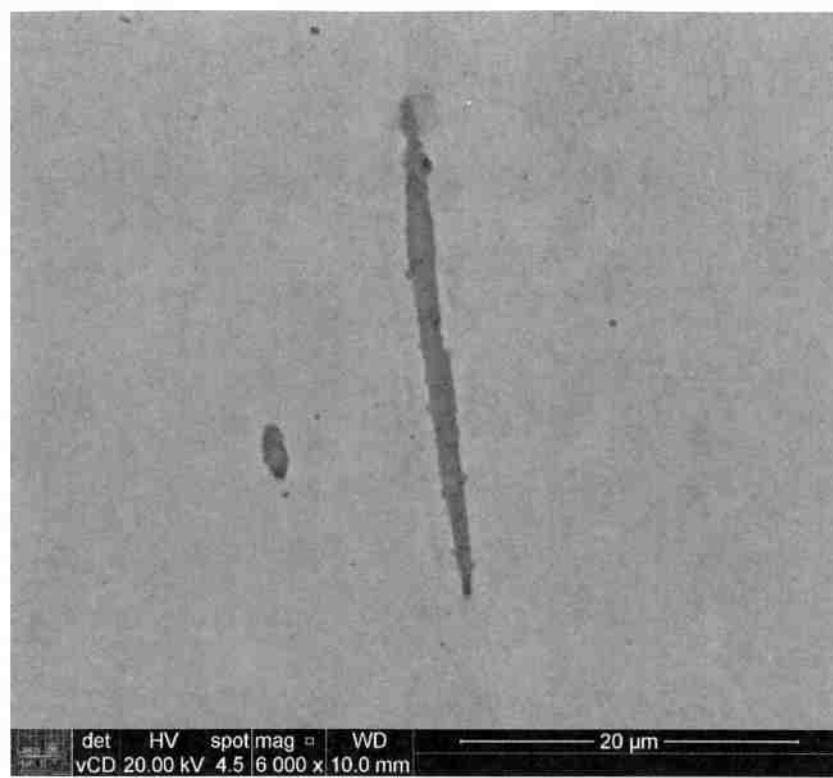


Figura 56: Micrografia de uma inclusão da amostra SAE6150 com tratamento térmico à 800°C e 4 horas

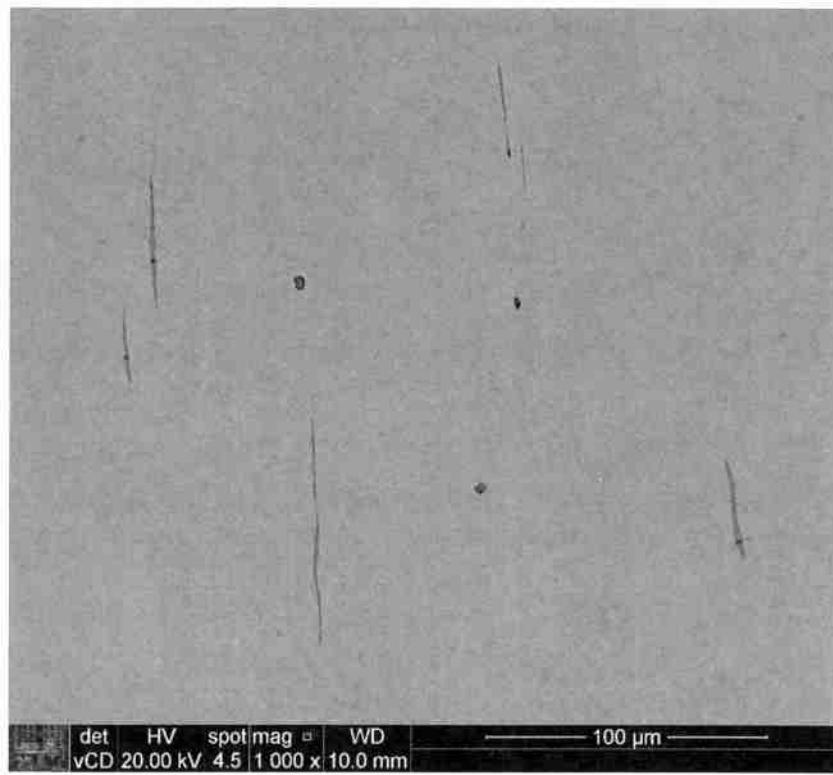


Figura 57: Micrografia de uma inclusão da amostra SAE6150 com tratamento térmico à 800°C e 4 horas

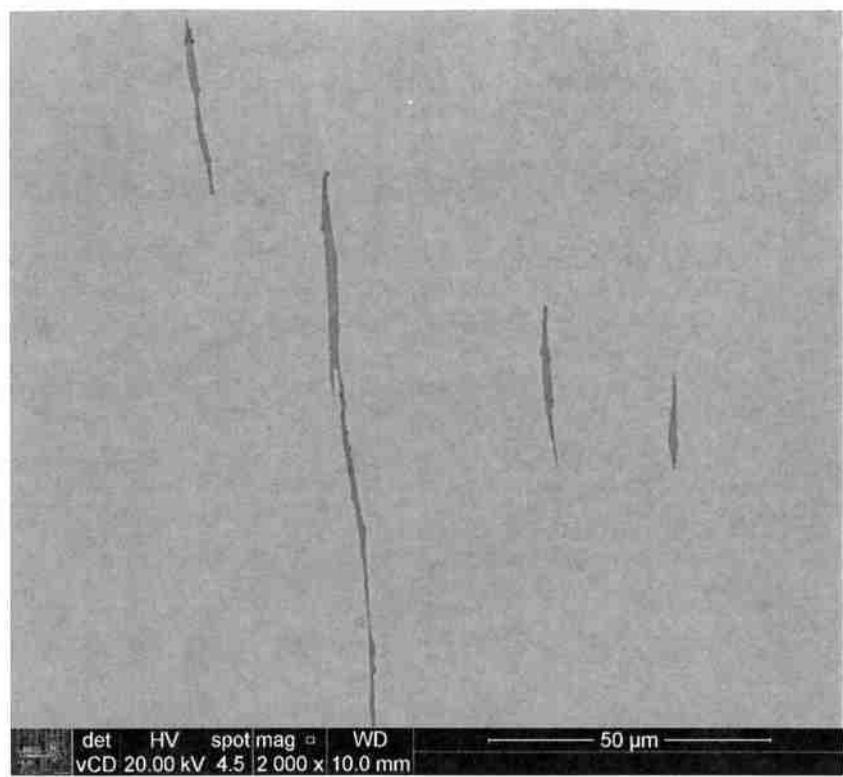


Figura 58: Micrografia de uma inclusão da amostra SAE6150 com tratamento térmico à 800°C e 6 horas

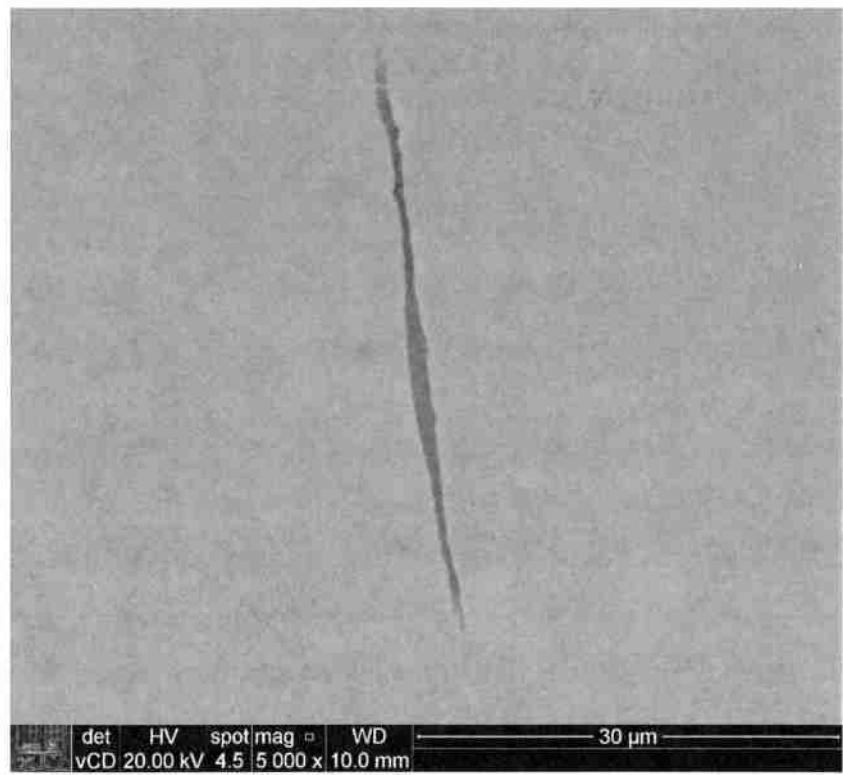


Figura 59: Micrografia de uma inclusão da amostra SAE6150 com tratamento térmico à 800°C e 6 horas

4.2.3.3. *Eletroscopia de energia dispersiva (EDS)*

Nos resultados do EDS, assim como nos resultados anteriores, para a amostra SAE6150, na matriz foram encontrados cromo e manganês, esperados devido à classificação do aço. Além desses elementos, foi encontrado o vanádio, silício e manganês, como mostrado na tabela 16.

As inclusões dessa amostra, assim como nas anteriores, são possivelmente formados por sulfeto de manganês, outros sulfetos e óxidos.

Tabela 16: Análise química do EDS para a matriz na amostra SAE6150 com tratamento térmico a 800°C

Matriz SAE6150 – com tratamento térmico a 800°C

Elemento químico

Fe
Cr
Mn
V
Si

Tabela 17: Análise química do EDS para a inclusão na amostra SAE6150 com tratamento térmico a 800°C

Inclusão SAE6150 – com tratamento térmico a 800°C

Elemento químico

Mn
Fe
S
O
Ca
Cr
V
Cl

4.2.4. SAE6150 após tratamento térmico a 1000°C

4.2.4.1. *Microscópio óptico*

Na figura 61 estão as micrografias com aumento de 500x das amostras de SAE6150 que foram tratadas termicamente a 1000°C. Nas micrografias de tempos de tratamento térmico de 2 e 4 horas observou-se algumas divisões, mas não foi encontrada inclusões com formato esférico. Já nas micrografias realizadas nas amostras de 6 horas de tratamento térmico, é possível observar inclusões com várias

divisões e com leves traços esféricos. A forma das inclusões poderão ser melhor analisadas no capítulo seguinte com as micrografias realizadas no MEV.

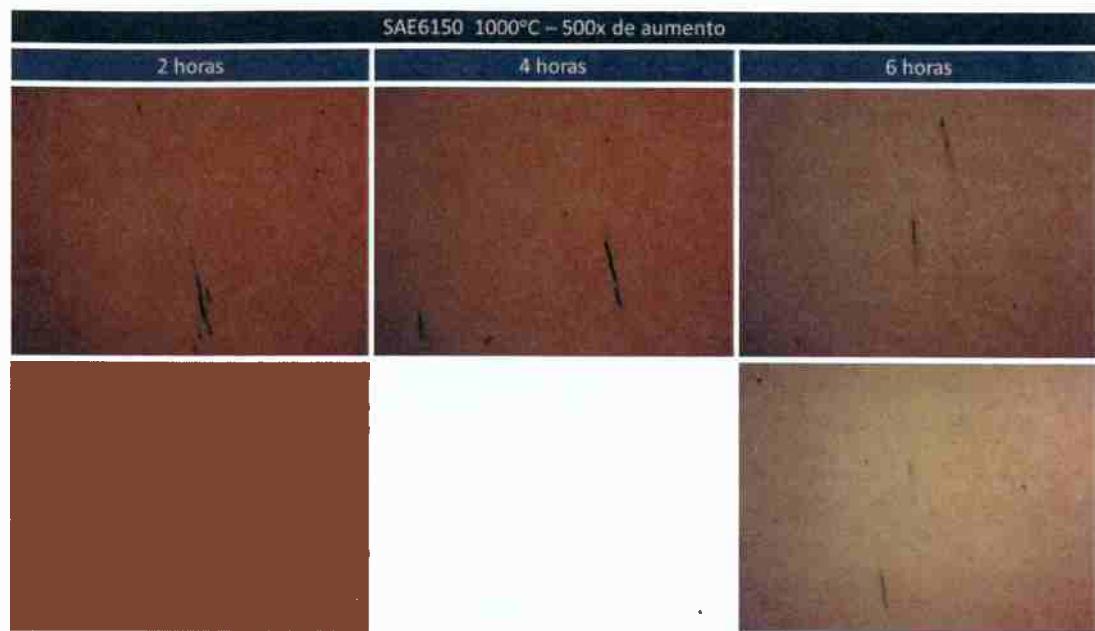


Figura 60: Micrografias do microscópio óptico da amostra SAE6150 pós tratamento térmico a 1000°C

4.2.4.2. Microscópio eletrônico de varredura (MEV)

Nas micrografias realizadas no MEV para as amostras SAE6150 com tratamento térmico a 1000°C, entre as figuras 61 e 66, verificou-se uma diminuição gradual das inclusões conforme aumentou o tempo de tratamento térmico, ou seja, as inclusões estavam maiores quando tratadas durante 2 horas e diminuíram de tamanho quando tratadas por 6 horas. Além da diminuição do tamanho, em alguns casos as inclusões estão formando “pescoços”, consequentemente poderão vir a se dividir em um número ainda maior. A possível esferoidização ocorre em alguns casos, mas não é tão claro a quanto na amostra SAE5160 com tratamento a 1000°C durante 6 horas.

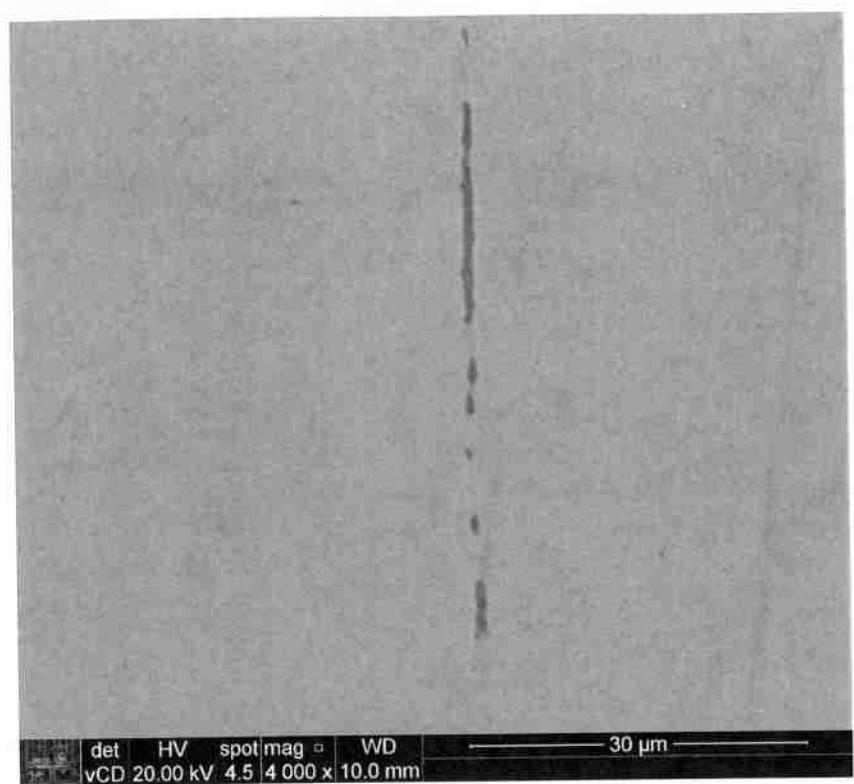


Figura 61: Micrografia de uma inclusão da amostra SAE6150 com tratamento térmico à 1000°C e 2 horas



Figura 62: Micrografia de uma inclusão da amostra SAE6150 com tratamento térmico à 1000°C e 2 horas

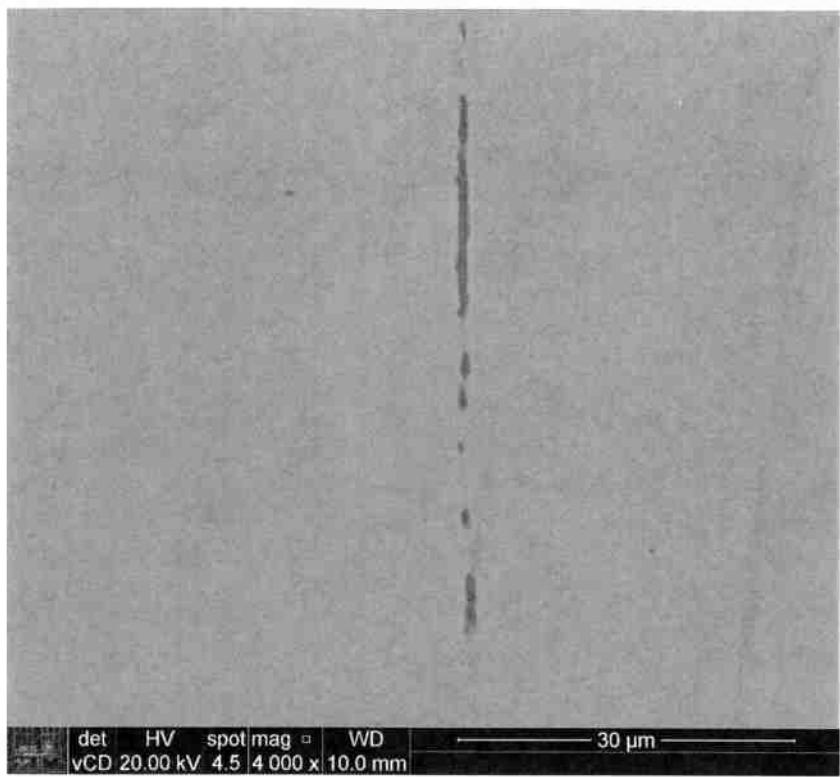


Figura 61: Micrografia de uma inclusão da amostra SAE6150 com tratamento térmico à 1000°C e 2 horas

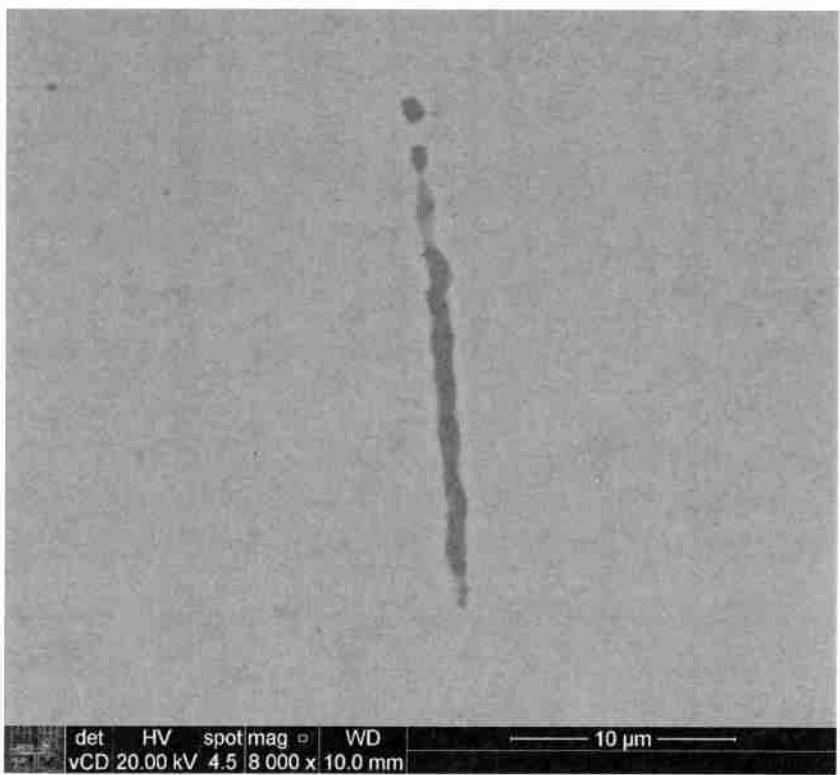


Figura 62: Micrografia de uma inclusão da amostra SAE6150 com tratamento térmico à 1000°C e 2 horas

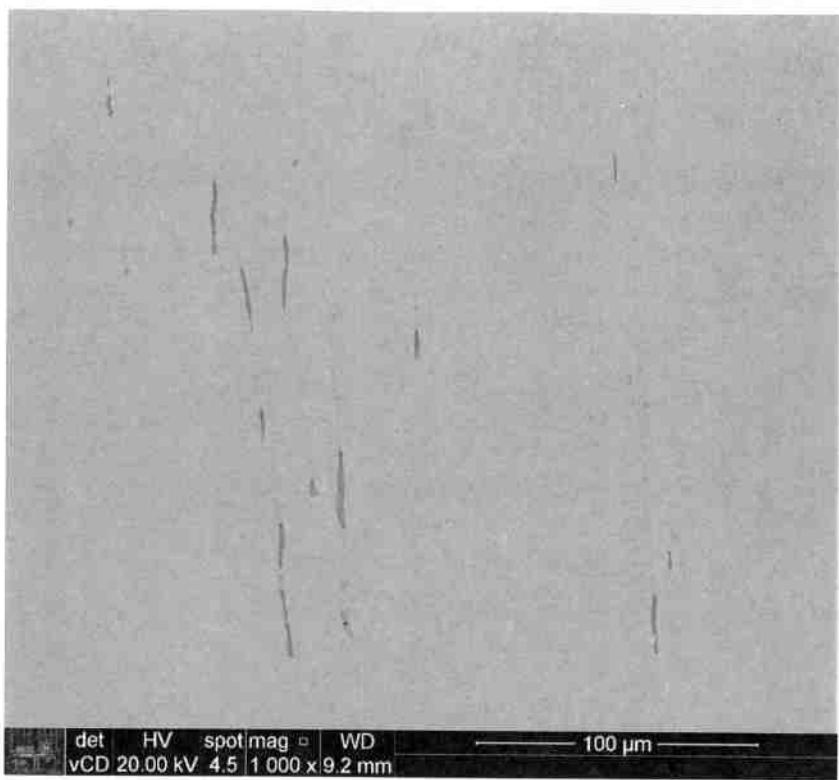


Figura 63: Micrografia de uma inclusão da amostra SAE6150 com tratamento térmico à 1000°C e 4 horas

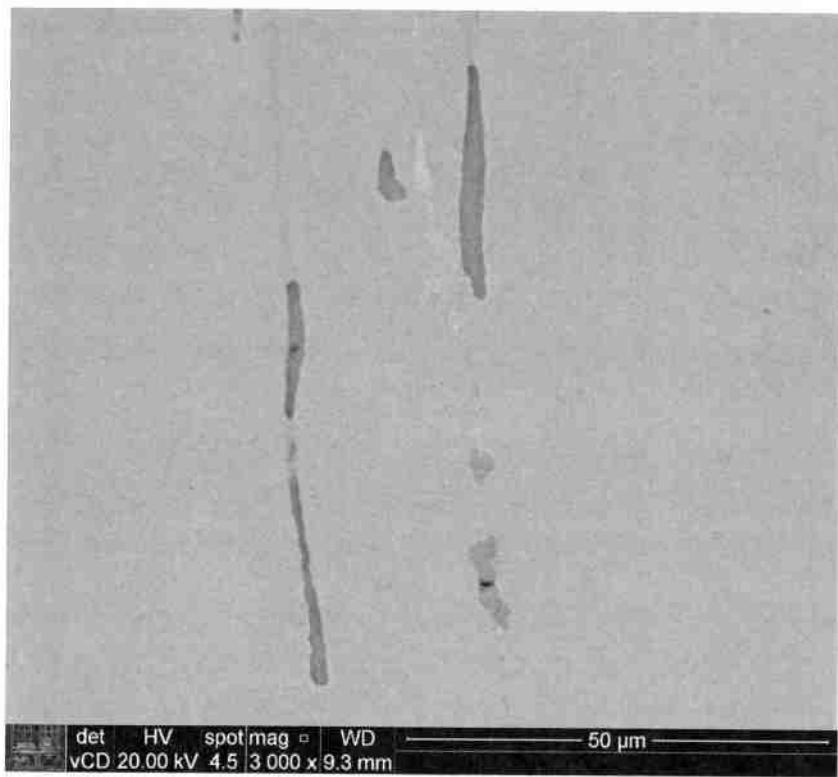


Figura 64: Micrografia de uma inclusão da amostra SAE6150 com tratamento térmico à 1000°C e 4 horas

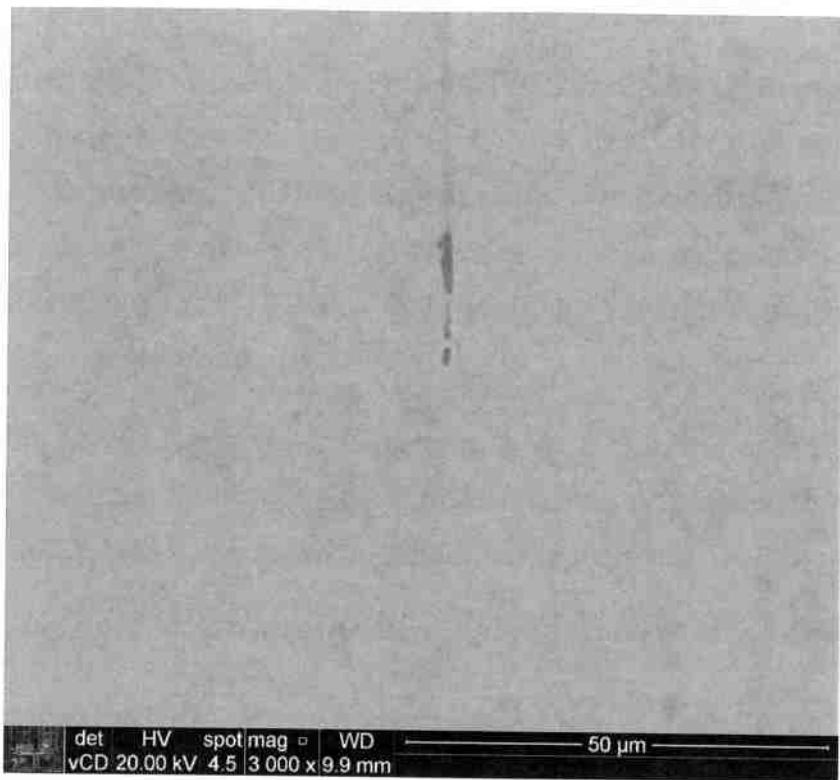


Figura 65: Micrografia de uma inclusão da amostra SAE6150 com tratamento térmico à 1000°C e 6 horas

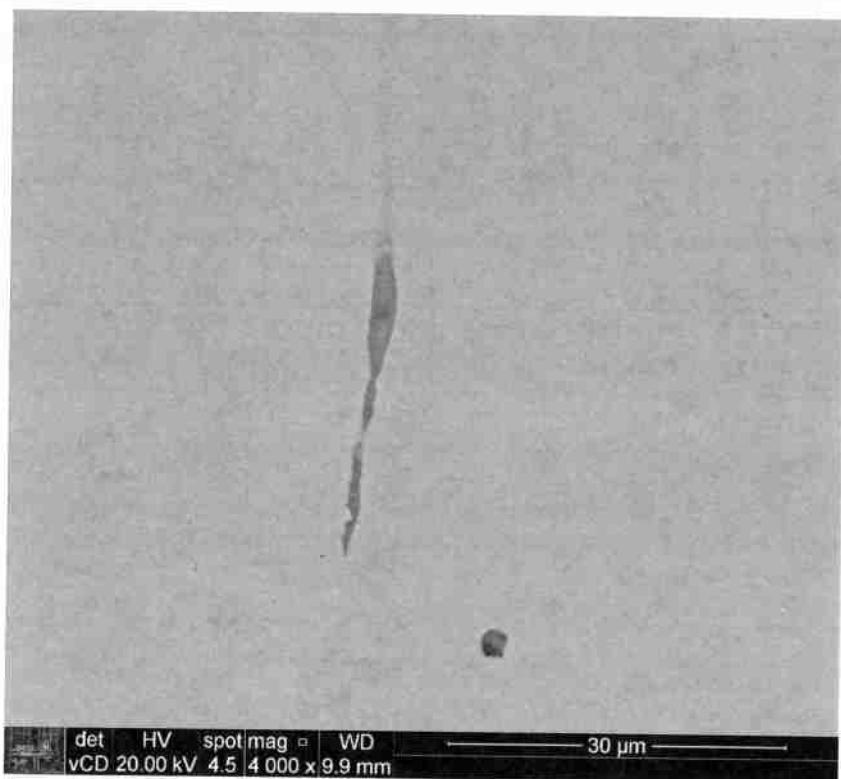


Figura 66: Micrografia de uma inclusão da amostra SAE6150 com tratamento térmico à 1000°C e 6 horas

4.2.4.3. Eletroscopia de energia dispersiva (EDS)

Os resultados do EDS para a amostra SAE6150 com o tratamento térmico a 1000°C foram parecidos com os resultados encontrados anteriormente, com a presença de vanádio e cromo, conforme era esperado. Além desses dois elementos foram detectados silício, manganês e flúor, este último provavelmente foi decorrente de alguma contaminação durante a etapa de preparação das amostras, pois não era esperado a presença deste elemento.

Em relação ao resultado do EDS referente às inclusões, como nas outras amostras, é provável que as inclusões sejam formadas por sulfeto de manganês, misturados com outros sulfetos e óxido, mostrados na tabela 19.

Tabela 18: Análise química do EDS para a matriz na amostra SAE6150 com tratamento térmico a 1000°C

Matriz SAE6150 – com tratamento térmico a 1000°C

Elemento químico

Fe
Cr
Mn
F
V
Si

Tabela 19: Análise química do EDS para a inclusão na amostra SAE6150 com tratamento térmico a 1000°C

Inclusão SAE5160 – com tratamento térmico a 1000°C

Elemento químico

Mn
Fe
S
O
Al
C
Cr
Mg
V
Mo
Ca
Si
P

5. Conclusão

Como conclusão deste trabalho de formatura, as amostras do aço SAE5160 e SAE6150 continham inclusões de sulfeto de manganês na forma alongada como previsto e isto foi comprovado pelo EDS, que mostrou grande quantidade de manganês e enxofre nas inclusões, e pelo MEV com as micrografias com o aumento de 2500x a 5000x.

Na comparação da análise química realizada pelo EDS com a análise química realizada por Filho (2016), os elementos químicos esperados foram detectados tanto na matriz quanto nas inclusões, exceto o flúor que apareceu em algumas amostras provavelmente decorrente de contaminação da amostra durante o preparo das amostras. Já em relação às inclusões, o sulfeto de manganês provavelmente está misturado com outros sulfetos e óxidos.

Dentre os valores sensibilizados neste trabalho de formatura, o aço SAE5160 com o tratamento térmico de 800°C, não sofreu grandes mudanças na forma alongada das inclusões para os tempos de 2 e 4 horas de processo térmico e para o tempo de 6 horas observou-se o início da divisão de inclusões menores e a formação de pescoço em algumas regiões.

Por outro lado, no mesmo aço SAE5160 com o tratamento térmico de 1000°C, foi verificado um aumento no número de divisões das inclusões, ou seja, provavelmente o tamanho das inclusões foram diminuindo ao longo do tratamento térmico. Na amostra em que foi realizado o tratamento térmico por 6 horas é possível verificar uma provável esferoidização de grande quantidade das inclusões.

Nas amostras do aço SAE6150, o tratamento térmico de 800°C não teve êxito visando a esferoidização das inclusões de sulfeto de manganês tanto para 2, 4 e 6 horas de tratamento térmico, portanto, provavelmente a temperatura foi insuficiente para a esferoidização das inclusões. Com a temperatura de tratamento térmico aumentada para 1000°C, observou-se o início de divisões das inclusões em partículas menores, com formação de partículas no formato esférico.

Entre os aços analisados, o aço SAE5160 obteve melhores resultados do que o aço SAE6150 no que diz respeito à esferoidização das inclusões de sulfeto de manganês para as temperaturas e tempos de tratamento térmico propostos. O aço

SAE5160 obteve ótimos resultados para a temperatura e tempo de tratamento térmico de 1000°C e 6 horas, respectivamente. Já no aço SAE6150, à 1000°C a esferoidização das inclusões se iniciou, mas talvez seria necessária uma temperatura maior de tratamento térmico, que não foi possível ser realizada neste trabalho de formatura devido à limitação de equipamento. Por outro lado, tratamentos térmicos a temperaturas muito elevadas e por um longo tempo acaba sendo inviabilizado para aplicações industriais pois aumenta muito o custo do produto.

A diferença nos resultados entre os aços SAE5160 e SAE6150 pode estar relacionado à diferença de composição química entre os aços. O aço SAE6150, que não esferoidizou contém uma quantidade maior de vanádio, que possui uma menor tendência a formar carbonetos ou se dissolver na ferrita, dificultando a esferoidização das inclusões.

6. Bibliografia

ANTÔNIO LUIZ V. DA COSTA E SILVA, P. R. M. Aços e Ligas Especiais. 3^a Edição ed. [s.l.] Editora Edgard Blucher, 2010.

CARDOSO, P. H. S. Inclusões não metálicas em aços: Caracterização e mecanismos de formação. [s.l.] Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2002.

CARLA, R. et al. Tratamentos Térmicos dos Aços: Recozimento, Normalização, Têmpera e Revenimento. **Spectru**, v. 3, n. 21, p. 1–18, 2014.

CHIAVERINI, V. Aços e Ferros Fundidos. 7^a Edição ed. São Paulo: ABM, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais -, 1996.

FILHO, C. P. DOS S. Levantamento experimental de curvas TTT para os aços de construção mecânica SAE5160 e SAE6150. Estudo da hipótese de obtenção da curva com número reduzido de amostras. [s.l.] Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2016.

GUIMARÃES, D. O. M.; SOUZA, C. F. DE. Estudo da fragilização a quente nos aços produzidos pela companhia siderúrgica nacional. 2015.

INSTITUTO AÇO BRASIL. **Dados do Setor.** Disponível em:
<http://www.acobrasil.org.br/site2015/dados.asp>. Acesso em: 6 jul. 2018a.

INSTITUTO AÇO BRASIL. **Produtos por tipo de aço.** Disponível em:
<http://www.acobrasil.org.br/site2015/produtos.asp>.

KIESSLING, R. **Non-metallic inclusions in steel Part V.** [s.l.] Institute of Metals, 1989.

KIESSLING, R.; LANGE, N. **Non-metallic inclusions in steel Part I - IV.** 2nd. ed. [s.l; s.n.].

PINEDO, C. E. Tratamento Térmico e Superficial do aço inoxidável martensítico AISI 420 destinado a moldes para injeção de polímeros Parte II - Tratamento Superficial. **Heattech**, p. 293–301, 2004.

SHAO, X. et al. Effect of Heat Treatment Conditions on Shape Control of Large-sized Elongated MnS Inclusions in Resulfurized Free-cutting Steels. **ISIJ**

International, v. 51, n. 12, p. 1995–2001, 2011.

SHINODA, C. Viabilidade de projetos de investimento em equipamentos com tecnologia avançada de manufatura: estudo de múltiplos casos na siderurgia brasileira. São Paulo: Universidade de São Paulo, 26 mar. 2008.

SILVA, A. L. V. DA C. E. Efeito dos Elementos de Liga na Tempera. *Aços e Ligas Especiais*, p. 282–285, 2006.

SILVA, A. C. DA et al. Mecânica - Tecnologia dos materiais e industrial. [s.l: s.n.].