



UNIVERSIDADE FEDERAL DO SUL E SUDESTE DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS E ENGENHARIAS
FACULDADE DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

THALES LIMA DA SILVA

**AVALIAÇÃO DA COMPOSIÇÃO, MICROESTRUTURA, DUREZA E
RESISTÊNCIA AO IMPACTO DA LIGA FERRO – SILÍCIO – MANGANÊS
PRODUZIDA POR FORNO ELÉTRICO DE REDUÇÃO**

MARABÁ-PA

2018

THALES LIMA DA SILVA

**AVALIAÇÃO DA COMPOSIÇÃO, MICROESTRUTURA, DUREZA E
RESISTÊNCIA AO IMPACTO DA LIGA FERRO – SILÍCIO – MANGANÊS
PRODUZIDA POR FORNO ELÉTRICO DE REDUÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Faculdade de Engenharia de Materiais da
Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará
em cumprimento às exigências para obtenção
do grau de Bacharel em Engenharia de
Materiais.

Orientador:

Profº. Me. Eng. Márcio Paulo de Araújo Mafra.

MARABÁ-PA

2018

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Biblioteca II da UNIFESSPA. CAMAR, Marabá, PA

Silva, Thales Lima da

Avaliação da composição, microestrutura, dureza e resistência ao impacto da liga ferro - silício – manganês produzida por forno elétrico de redução / Thales Lima da Silva; orientador, Márcio Paulo de Araújo Mafra. — 2018.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará, Campus Universitário de Marabá, Instituto de Geociências e Engenharias, Faculdade de Engenharia de Materiais, Curso de Engenharia de Materiais, Marabá, 2018.

1. Ligas de ferro. 2. Aço - Metalurgia. 3. Ligas de silício. 4. Ligas de ferro-manganês. I. Mafra, Márcio Paulo de Araújo, orient. II. Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará. III. Título.

CDD: 22. ed.: 669

Elaborado por Nádia Lopes Serrão
Bibliotecária-Documentalista CRB2/575

THALES LIMA DA SILVA

**AVALIAÇÃO DA COMPOSIÇÃO, MICROESTRUTURA, DUREZA E
RESISTÊNCIA AO IMPACTO DA LIGA FERRO – SILÍCIO – MANGANÊS
PRODUZIDA POR FORNO ELÉTRICO DE REDUÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Faculdade de Engenharia de Materiais da
Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará
em cumprimento as exigências para obtenção
do grau de Bacharel em Engenharia de
Materiais.

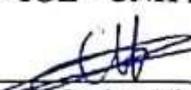
DATA DA AVALIAÇÃO: 13/03/2018

CONCEITO: EXCELENTE.

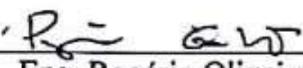
BANCA EXAMINADORA



Prof. Msc. Márcio Paulo de Araújo Mafra
(FEMAT - IGE - UNIFESSPA - Orientador)



Prof. Esp. Carlos Vinicius Paes Santos
(IFPA - Membro - Externo)



Eng. Rogério Oliveira Galvão
(Membro - Externo)

Dedico este trabalho aos meus pais que nunca mediram esforços para realização deste sonho.

AGRADECIMENTOS

Ao Deus criador, por sua grandeza e generosidade, permitindo que eu chegasse até aqui com saúde e determinação;

Aos meus pais, Ildete Lacerda Lima e Ciliverio Rodrigues Da Silva, pelo apoio e por sempre se dedicarem ao máximo fazendo sempre o melhor, para que hoje eu estivesse aqui;

Aos meus irmãos, por sempre terem me ajudado e me dado apoio nessa jornada;

A Adrieli Oliveira da Silva, pelo apoio e dedicação dado no decorrer de todo o curso;

A Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará pela estrutura disponibilizada;

A FERMAR e ao meu supervisor de estágio, Eng. Rogério Galvão, pela oportunidade concedida em estudar a ferro liga produzida pela empresa;

Ao meu orientador, Prof. Msc. Márcio Paulo de Araújo Mafra, pela indicação dos caminhos necessários ao desenvolvimento deste trabalho;

A todos os amigos da FEMAT 2013, pelas trocas de conhecimento e experiências compartilhadas, que sempre contribuíram para meu aprendizado;

Aos membros da banca examinadora, por se disporem a avaliar e contribuírem para a melhor apresentação deste trabalho;

E por fim, a todas as pessoas que de alguma forma contribuíram diretamente ou indiretamente para a realização deste trabalho, o meu muito obrigado.

Os limites só existem se você os deixar existir.

Son Goku

RESUMO

As ferro ligas a base de manganês são de grande importância para o setor siderúrgico especificamente para produção do aço, devido suas propriedades de dessulfuração e desoxidação. Neste trabalho avaliou-se a liga ferro-silício-manganês, em termos de sua composição, microestrutura, resistência ao impacto e dureza. A partir do vazamento da liga em forno elétrico de redução, foram preparadas amostras para duas vertentes distintas, primeiro para a análise química e posteriormente para a confecção e preparação de corpos de prova para ensaios mecânicos. Realizou-se a caracterização microestrutural por microscopia eletrônica de varredura, para fins de se avaliar a composição final da liga, e os teores dos elementos constituintes da ferro liga com auxílio do EDS, procurando avaliar as fases presentes por difração de raios-x. Em relação às propriedades mecânicas, avaliou-se a absorção de energia ao impacto, e tenacidade a fratura por meio de fractografias da região fraturada. Quanto ao ensaio de dureza, obtiveram-se valores acima de 300 HB. Esses parâmetros mostraram que os corpos de prova se comportaram de maneira esperada, tendo relação inversa entre as variáveis dureza e energia de impacto.

Palavras-chave: Ferro ligas, Microestrutura, Ferro-Silício-Manganês.

ABSTRACT

Manganese iron alloys are of great importance for the steel sector specifically for the production of steel, due to its desulphurisation and deoxidation properties. In this work the ferro-silicon-manganese alloy was evaluated in terms of its composition, microstructure, impact strength and hardness. From the leakage of the alloy in an electric furnace of reduction, samples were prepared for two different slopes, first for the chemical analysis and later for the preparation and preparation of test specimens for mechanical tests. Microstructural characterization was carried out by scanning electron microscopy, in order to evaluate the final composition of the alloy, and the contents of the constituent elements of the iron alloy with the aid of EDS, attempting to evaluate the phases present by X-ray diffraction. Regarding the mechanical properties, the impact energy absorption and fracture toughness were evaluated by means of fracture fracture fracture. As for the hardness test, values above 300 HB were obtained. These parameters showed that the specimens behaved in an expected manner, having an inverse relationship between the hardness and impact energy variables.

Keywords: Iron alloys, Microstructure, Iron-silicon-manganese.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Consumo aparente de ferro manganês.....	20
Figura 2 - Produção de ferro ligas no Brasil de 2007 a 2011.....	21
Figura 3 - Produção brasileira de ferro ligas de manganês, entre os anos de 2007 à 2011.....	23
Figura 4 - Minério de Manganês.....	27
Figura 5 - Minério de Ferro.....	28
Figura 6 - Quartzo.....	29
Figura 7 - Carvão vegetal.....	30
Figura 8 - Representação esquemática de um Forno Elétrico de Redução (FER) utilizado para a fabricação de ferro ligas.....	31
Figura 9 - Corpos de prova Charpy, recomendado pela ASTM e ABNT pra ensaio de impacto.....	34
Figura 10 - Representação esquemática da máquina de ensaios para impacto, e do corpo de prova Charpy.....	34
Figura 11 - As várias fases de aplicação de carga no método de dureza Rockwell.....	36
Figura 12 - Etapas da determinação da dureza Rockwell.....	37
Figura 13 - Fluxograma do Procedimento Experimental.....	39
Figura 14 - Amostras da liga ferro-silício-manganês já britadas.....	40
Figura 15 - Lixadeira utilizada para preparação da amostra.....	41
Figura 16 - Amostra antes (a) e durante (b) o lixamento.....	41
Figura 17 - Lixadeira politriz modelo PLF (a), polimento da amostra com pasta de diamante (b).....	42
Figura 18 - Amostra polida e atacada quimicamente com nital 5%.....	42
Figura 19 - Microscópio Ótico utilizado para visualização da microestrutura da liga.....	43
Figura 20 - Equipamentos para realização da Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV (a) e EDS (b).....	44
Figura 21 - Preparação da amostra para realizar o DRX. Cadinho (a), pilha de peneiras (b), amostra peneirada em granulometria de 100# (mesh).....	45
Figura 22 - Máquina para realização do Difratoograma de Raios-X.....	45
Figura 23 - Modelo do corpo de prova para ensaio de impacto tipo Charpy.....	46
Figura 24 - Molde confeccionado segundo a norma ASTM E23-94a, tipo Charpy.....	46

Figura 25 - Molde adaptado para receber o vazamento da liga (a) e os corpos de prova após o vazamento (b).	47
Figura 26 - Corpos de prova de impacto usinados.	47
Figura 27 - Corpo de prova de impacto com entalhe.	47
Figura 28 - Máquina utilizada para o ensaio de impacto.	48
Figura 29 - Corpo de prova fraturado após o ensaio mecânico.	48
Figura 30 - Durômetro de bancada modelo PANTEC, utilizado para realização do ensaio de dureza Rockwell.	49
Figura 31 - Micrografia da liga Fe-si-Mn feita em microscópio ótico com aumento de 10x.	50
Figura 32 - Microestrutura da liga Fe-Si-Mn (a) e da liga de ferro com alto silício (b).	51
Figura 33 - Imagens feitas por microscopia eletrônica de varredura, da liga Fe-Si-Mn.	52
Figura 34 - Imagem feita em microscopia eletrônica de varredura, com auxílio do EDS.	53
Figura 35 - Composição total da ferro liga ferro-silício-manganês feita com o auxílio do EDS.	54
Figura 36 - Mapa de elementos: Manganês (vermelho) (b), Ferro (verde) (c), Sílica (azul) (d).	54
Figura 37 - Resultados de difração de raios X da liga Fe-Si-Mn.	55
Figura 38 - Resultados do ensaio de impacto – Resistencia ao impacto.	57
Figura 39 - Zona da fratura dos corpos de prova ensaiados por impacto a temperatura ambiente com auxílio de uma lupa com aumento de 100X.	58
Figura 40 - Gráfico comparativo do valor médio dos resultados de dureza Brinel e energia de Impacto	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composições químicas típicas das principais ferro ligas de manganês produzidas no Brasil.....	23
Tabela 2 - Elementos de liga – Caracterização e efeitos objetivados.....	27
Tabela 3 - Quantificação dos elementos presentes na liga.....	53
Tabela 4 - Energia absorvida pelos corpos de prova durante o ensaio de impacto.....	57
Tabela 5 - Resultados do ensaio de dureza convertidos para a escala Brinell.....	59

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

Al_2O_3 - Alumina

$\text{AlO}_x(\text{OH})_{3-2x}$ - Bauxita

C - Carbono

CaCO_3 - Calcário

$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ - Dolomita

CaO - Óxido de Cálcio

CO - Monóxido de carbono

De-O - Desoxidante

De-S - Dessulfurante

DRX - Difração de raios – X

EDS - Espectroscopia de energia dispersiva

Fe - Ferro

FeMnA - Ferro manganês alto carbono

FeMnMC - Ferro manganês médio carbono

FER - Forno elétrico de redução

FERMAR - Indústria de Ferro Ligas Marabá, LTDA.

FeSiMn - Ferro silício manganês

MEV - Microscopia eletrônica de varredura

Mn - Manganês

MnO - Óxido de manganês

MnS - Sulfeto de manganês

°C - Graus célsius

P - Fósforo

PE - Perdas elétricas

R - Redutor

RC - Resistência a corrosão

RD - Resistência ao desgaste

RM - Resistência mecânica

S - Enxofre

Si - Silício

SiO_2 - Dióxido de Silício

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	16
2. OBJETIVO.....	18
2.1. OBJETIVO GERAL	18
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	18
3. REFERENCIAL TEÓRICO	19
3.1. BREVE HISTÓRICO DAS FERRO LIGAS NO BRASIL.....	19
3.2. PROPRIEDADES FÍSICAS RELEVANTES NAS FERRO LIGAS DE MANGANÊS ..	23
3.3. FERRO LIGAS DE MANGANÊS	24
3.4. MATÉRIAS PRIMAS PARA PRODUÇÃO DE FERRO-LIGAS DE MANGANÊS	26
3.4.1 Minério de Manganês.....	26
3.4.2 Minério de Ferro.....	27
3.4.3 Quartzo.....	28
3.4.4 Redutores.....	29
4. PRODUÇÃO DA FERRO LIGA FERRO-SILÍCIO-MANGANÊS.....	30
4.1. PROCESSO DE REDUÇÃO DOS ÓXIDOS UTILIZADOS	30
4.2. PROCEDIMENTOS ADOTADOS PARA PRODUÇÃO DA LIGA FERRO-SÍLÍCIO-MANGANÊS	31
5. ENSAIOS MECÂNICOS.....	32
5.1. ENSAIO DE IMPACTO.....	32
5.1.1. Tenacidade ao Impacto	35
5.2. ENSAIO DE DUREZA.....	35
5.2.1 Dureza Rockwell.....	36
6. MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA.....	37
7. DIFRAÇÃO DE RAIOS - X	38
8. MATERIAIS E MÉTODOS	39
8.1. PROCEDIMENTOS PARA CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL.....	40
8.2. PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS PARA REALIZAÇÃO DA MICROSCOPIA ELETRONICA DE VARREDURA - MEV - EDS	43

8.3. PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS PARA A REALIZAÇÃO DO DIFRATOGRAMA DE RAIOS-X (DRX)	44
8.4. PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA PARA OS ENSAIOS MECÂNICOS	45
8.4.1. Ensaio de Impacto – Charpy	45
8.4.2. Ensaio de Dureza - Rockwell	49
9. RESULTADOS E DISCUSSÃO	50
9.1. ANÁLISE MICROESTRUTURAL.....	50
9.1.2 Microscopia Ótica.....	50
9.1.3 Microscopia Eletrônica de Varredura - MEV	51
9.1.4. Análise do Difratoograma de Raios – X	55
9.2. ANÁLISES DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS.....	56
9.2.1 Ensaio de Impacto	56
9.2.1.1 Análise da fratura dos corpos de prova de impacto.....	57
9.2.2 Ensaio de dureza.....	58
9.2.3. Comparativo entre dureza e tenacidade.....	59
10. CONCLUSÃO	61
10.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	62
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63

1. INTRODUÇÃO

Os metais utilizados pela indústria raramente apresentam todas as características desejadas ou necessárias para sua utilização nas diversas áreas de aplicação os quais se encaixam. Então as características desejadas são obtidas pela fabricação de liga com outros elementos, de acordo com as propriedades que se quer obter ou melhorá-las se já existente. As ligas têm suma importância na metalúrgica e siderurgia, por possuírem propriedades e características que seus elementos constituintes não apresentam de forma separada. São substâncias resultantes da mistura de dois ou mais elementos, sendo que entre eles pelo menos um é metal. Geralmente se recorre às ligas para proporcionar aos metais determinadas propriedades mecânicas, térmicas, elétricas, magnéticas ou anticorrosivas, visando o interesse do campo de aplicação (BRASIL, 1999).

Neste contexto, destacam-se as ligas de ferro que serão estudadas neste trabalho. As ferro ligas que são ligas de ferro combinadas com um ou mais elementos, sendo que a proporção do elemento adicionado a composição da ferro liga é sempre maior que a quantidade de ferro. As ferro ligas destinam-se sobretudo à produção de aço, contribuindo como um importante insumo para aumento da qualidade dos produtos siderúrgicos ao agregar características específicas de acordo com o elemento ligado no que condiz à maleabilidade, tenacidade e dureza, além das propriedades gerais, como dessulfurantes e desoxidantes. Já de uma forma mais específica, as ferro ligas de manganês e de silício são utilizadas na fabricação de praticamente todos os tipos de aços e fundidos de ferro, devido estas propriedades, citadas acima (BATISTA, LÓES e OLIVEIRA, 2010). Além da siderurgia que é uma importante atividade econômica, pode-se dizer também que, o gênero ferro ligas situa-se entre outra importante atividade econômica que é a mineração (ANDRADE, 1999). Vimos de uma forma superficial que as ferro ligas são insumos essenciais na indústria siderúrgica, devido serem indispensáveis na produção de praticamente qualquer tipo de aço, desde os processos mais básicos como também na refinada agregação de propriedades e valor aos aços especiais, sendo 85 % da produção destinada ao setor siderúrgico e o restante para os demais setores como o químico, o farmacêutico, entre outros. (ANDRADE,1999).

Em âmbito geral, as ferro ligas se dividem entre ferro ligas de cromo, manganês e silício e as ferro ligas especiais, constituídas de cobalto, molibdênio, nióbio, níquel, tungstênio e vanádio (BATISTA, LÓES e OLIVEIRA, 2010). O silício manganês é usado principalmente como material intermediário em agentes desoxidantes e agente de liga na produção de aço, mas também é uma das principais matérias-primas na produção de ferro manganês baixo carbono. Neste trabalho foi feito o estudo das ferro ligas a base de manganês, que é a liga produzida pela FERMAR – Indústria de Ferro Ligas Marabá LTDA., localizada no setor distrito industrial na cidade de Marabá, sudeste do estado do Pará, a qual é considerada como a maior indústria produtora de ferro ligas de manganês do norte e nordeste do Brasil. A liga trabalhada pela empresa é a ferro-silício-manganês e se dá por meio de aquecimento em um forno elétrico à arco de uma mistura de minérios de manganês e ferro, carbono na forma de carvão vegetal e dióxido de silício (quartzo). A FERMAR disponibilizou amostras de sua liga para serem estudadas e analisadas neste trabalho.

O trabalho está disposto em breves comentários sobre as ferro ligas a base de manganês, sua importância para a indústria siderúrgica, e como é o seu mercado de trabalho no Brasil de uma forma bem sucinta, descrevendo também, as matérias primas e como é o procedimento de produção das ferro ligas, com ênfase na liga ferro-silício-manganês a qual é o objeto de estudo deste trabalho, seguido dos procedimentos realizados para caracterização da liga ferro-silício-manganês e da preparação dos corpos de prova para ensaios mecânicos de dureza e impacto da liga.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

O presente trabalho tem por finalidade submeter uma análise microestrutural e química da liga Fe-Si-Mn, disponibilizada pela FERMAR, e discutir os possíveis resultados, além de verificar propriedades mecânicas direcionadas a tenacidade à fratura e dureza.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar a liga Fe-Si-Mn do ponto de vista microestrutural, para identificar as fases da liga e o teor aproximado dos elementos presentes em sua composição.
- Avaliar a dureza da liga, aplicando o método de dureza Rockwell.
- Medir a quantidade de energia absorvida pela liga durante os ensaios de impacto tipo Charpy.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

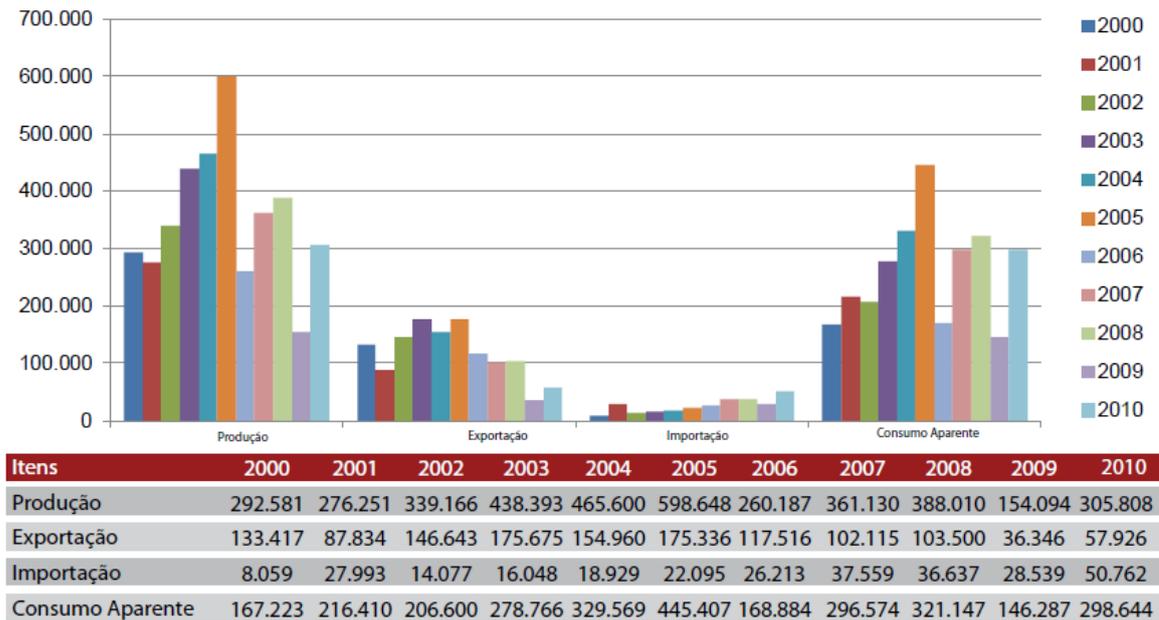
A seguir serão abordados temas que servem como embasamento técnico-científico para o desenvolvimento do estudo realizado, tendo como base o conhecimento amplo sobre as ferro ligas, bem como suas matérias-primas e seu processo de produção.

3.1. BREVE HISTÓRICO DAS FERRO LIGAS NO BRASIL

O segmento brasileiro de ferro-ligas é razoavelmente diversificado e ocupa uma posição de destaque no cenário mundial. Dentre os fatores que conduziram a esta condição, relaciona-se a disponibilidade de matérias primas com qualidade e custo convenientes, a distribuição e localização favorável dos jazimentos, a disponibilidade de energia elétrica e o grande crescimento do mercado interno, decorrente da expansão do segmento siderúrgico (KRUGER, 2009).

No Brasil, análises feitas até o ano de 2010 mostraram o setor de ferro ligas fortemente voltado para o mercado externo, com consumo aproximadamente de 56% do volume produzido, o que correspondia a 73% do seu faturamento. No ano de 2010 segundo (BATISTA et al., 2010), Japão, Estados Unidos e alguns países europeus, como Reino Unido e Alemanha, eram os principais importadores mundiais de ferro ligas.

Na maior parte das abordagens, o ano de 2007 é usado como referência da situação atual, uma vez que tanto 2008, quanto 2009 são anos atípicos, podendo levar a uma visualização irreal do setor. O Brasil ocupava, em 2007, a sexta posição no ranking dos produtores de ferro ligas. A grande alavancagem deste segmento decorre da conjugação de diversos fatores. Do lado das ferro ligas, pode-se relacionar a expansão do parque siderúrgico, a disponibilidade de matérias primas e a disponibilidade de energia elétrica (KRUGER, 2009). Sendo o Brasil, um país autossuficiente no consumo de ferro manganês. Em 2010, o país exportou 19% da produção e importou 17% do consumo aparente. (SINDIEXTRA, 2011)

Figura 1 - Consumo aparente de ferro manganês.

Fonte: (SINDIEXTRA, 2011).

Analisando agora o consumo de matéria prima base da liga ferro manganês, que tem o minério de manganês como matéria prima principal. Do total da produção do minério de manganês no país, que é a base principal das ferro ligas de manganês, aproximadamente 50% deste minério tem como destino o mercado externo. No entanto, historicamente estas exportações vêm se reduzindo na proporção em que o mercado interno passa a consumir parte do minério antes de exporta-los. Os principais depósitos de minérios de manganês no Brasil estão localizados no estado do Mato Grosso do Sul, Pará e Minas Gerais (TRINDADE e CUNHA, 2016).

O parque produtor de ferro ligas instalado no estado do Pará é pioneiro e demonstra ao cenário nacional um novo polo para o setor, dada à tendência de fatores favoráveis, existentes e futuros. O estado conta com reservas importantes de minério de manganês, disponibilidade conveniente de quartzo. Há também uma boa disponibilidade de energia elétrica provinda da Hidrelétrica de Tucuruí (LAMEIRA, 2011).

Minas Gerais é o principal produtor de ferro ligas do Brasil e é responsável por 50% da produção nacional. Os ferros ligas são produtos eletro-intensivos e os gastos com energia chegam a atingir, em média, 35% do custo total de produção. A exportação brasileira de ferro ligas atinge 46% da produção total. (SINDIEXTRA, 2011).

Existem em média 57 países produtores de ferro ligas, os 10 maiores totalizam 78 % da produção mundial. Ocupando a sexta posição entre eles, o Brasil, com 4,8 % da produção

mundial de ferro ligas de manganês, é o maior produtor da América Latina (ANDRADE e CUNHA, 2011).

Em 2011 a produção brasileira de ferro ligas foi da ordem de 854 mil toneladas, com declínio, em torno de 8 %, em relação ao ano anterior. Observa-se, no período 2007 a 2011, um recuo da produção da ordem de 16 %, atribuído à crise de 2008 que afetou a indústria, registrando nos anos 2008 e 2009 quedas da produção. Em 2010, o setor iniciou um processo de recuperação, quando obteve crescimento de 65 %, voltando, porém, a recuar em 2011 (MME, 2012 apud OLIVEIRA, R.W.H., 2013). A figura 2 apresenta a produção de ferro ligas de 2007 a 2011.

Figura 2 - Produção de ferro ligas no Brasil de 2007 a 2011.



Fonte: (MME,2012).

As ferro ligas a base de manganês produzidas no Brasil tem as seguintes composições químicas apresentadas na tabela 1. Os teores de manganês dependem da relação Mn/Fe na carga e, conseqüentemente, dos teores destes elementos no minério.

Tabela 1 - Composições químicas típicas das principais ferro ligas de manganês produzidas no Brasil.

	FeMnAC (%)	FeMnMc (%)	FeSiMn (12-16%)	FeSiMn (16-20%)
Mn	75	79	66	66
Fe	16,7	18,3	16,5	13,5
Si	0,5	0,1	14	18
C	7,5	2,25	3,25	2,25
S	0,05	0,05	0,05	0,05
P	0,25	0,3	0,2	0,2

Fonte: Adaptado (BENIQUE, 2007).

As ligas de Fe-Si-Mn constituem-se em maior parcela, tanto no Brasil quanto no mundo. Isto decorre da maior flexibilidade no que se refere ao minério e ao seu excepcional desempenho na desoxidação do aço. Além disto, é uma liga tipicamente de médio teor de carbono.

No geral, como as ligas de manganês estão diretamente relacionadas ao setor de ferro e aço, isto é, aos segmentos siderúrgicos e de fundição, que são seus únicos mercados. Assim, a sua evolução, ou retrocesso, é sempre relacionado às tendências destes setores, com ampla predominância da siderurgia (KRUGER, 2009).

Contudo, atualmente o setor de ferro ligas tem algumas variáveis mais delicadas para serem analisadas, como o elevado consumo de energia elétrica no processo de fabricação de ligas de manganês, associado a uma baixa disponibilidade deste recurso no Brasil, o que justifica a busca por processos mais eficientes que promovam o aumento da competitividade e sustentabilidade do negócio (TRINDADE e CUNHA, 2016). Como pode ser observado, na figura 3 que mostra a produção de ferro ligas de manganês, o setor passa por oscilações devido à crise de 2008 que afetou a indústria, registrando no ano 2009 quedas da produção. Observa-se, também, a predominância das ligas Fe-Si-Mn.

Figura 3 - Produção brasileira de ferro ligas de manganês, entre os anos de 2007 à 2011.



Fonte: (MME, 2012).

3.2. PROPRIEDADES FÍSICAS RELEVANTES NAS FERRO LIGAS DE MANGANÊS

Para muitos elementos de liga, os minérios já possuem variados teores de ferro na sua estrutura mineralógica, que são incorporados ao metal, sendo necessários processos mais complexos para sua remoção. Quando o ferro incorporado se constitui em uma impureza e o valor agregado do produto resultante é compatível, a obtenção do elemento puro se justifica. Porém, no caso dos setores siderúrgicos e de fundição, o ferro não é considerado como um contaminante e, portanto não há razão de removê-lo. Com isto, é produzida uma liga de ferro com o elemento de liga, cujo custo é sensivelmente menor que o do caso anterior. São exemplos disto os minérios de manganês, cromo, níquel, titânio, vanádio e nióbio. (KRUGER, 2009)

Como o uso de ligas de ferro manganês é uma atividade comum e importante na fabricação dos aços. Elas são incorporadas ao aço com intuito de melhorar suas propriedades. Com isso, as ligas são mais eficazes do que os metais puros, pois têm menor ponto de fusão, densidade e custo de produção. Outro uso importante dessas ligas na produção dos aços está na etapa final da refinação de aço, durante a remoção de oxigênio. A liga Fe-Si-Mn é produzida por redução carbotérmica de minérios de manganês a altas temperaturas em fornos de arco elétrico (LÚCIO et al., 2008).

Devido à importância das características necessárias que a ferro liga deve possuir, algumas propriedades físicas são importantes para análise de uma possível produção de determinada ferro liga, como ponto de fusão, ebulição e densidade. Caso alguns elementos sejam usados em sua forma pura, por exemplo, têm um ponto de ebulição muito baixo, o que levaria a perdas, tanto na fabricação, quanto na aplicação final. Já na forma de ligas com o ferro, tais elementos são estabilizados, possibilitando maiores rendimentos tanto na extração, quanto na incorporação a outros materiais. Para tal, é adicionado nos processos de fabricação fontes de ferro na forma de minério de maneira deliberada na carga do forno, ou até mesmo sucata.

Por conseguinte, certos elementos têm um ponto de fusão muito elevado, o que acarreta em um consumo de energia mais elevado para o processo de redução e separação do metal da escória. Sendo que se a temperatura de fusão é mais alta, o processo de incorporação é mais lento, exigindo assim que os dispositivos de agitação do banho sejam mais prolongados. Com a adição de ferro, a temperatura de fusão da liga é menor, reduzindo as necessidades energéticas e a sua incorporação no aço é mais rápida e eficaz.

A densidade também é um fator relevante, pois no caso de elementos que possuem densidades baixas neste caso em relação ao aço, o elemento de liga tende a flutuar, ficando sujeito à oxidação pelo ar, exigindo também uma agitação mais prolongada e mais enérgica. Neste caso, estão elementos como o silício, o titânio, o boro, o cálcio, o magnésio e o fósforo. Suponhamos agora uma densidade mais alta, o elemento de liga tende a decantar, exigindo agitação vigorosa e prolongada. Estes são os casos do tungstênio e molibdênio.

Esses parâmetros mostram as vantagens de se terem fontes de elementos de liga na forma de ligas com o ferro, que são as ferro ligas. As características destas ligas podem variar dentro de faixas relativamente amplas, tanto em função do uso final, quanto da matéria prima disponível e redutor empregado (KRUGER, 2009).

3.3. FERRO LIGAS DE MANGANÊS

As ferro ligas são várias ligas de ferro, que contêm quantidades significativas de um ou mais elementos, que podem ser o manganês, carbono, silício, entre outros. O termo ferro ou férrico se refere a um composto que contém ou é relacionado com ferro.

A metalurgia do manganês é semelhante à metalurgia do ferro, exceto no que se refere a temperaturas mais elevadas, por volta de 1200°C, é o que se precisa para a redução de

óxidos de manganês (BENIQUE, 2007). Para se obter uma boa eficiência no processo de produção das ferro ligas, o minério de manganês e outros concentrados com baixo teor de ferro devem ser granulares ou materiais sinterizados (BATISTA, LÓES e OLIVEIRA, 2010).

As ferro ligas a base de manganês se apresentam na forma Fe-Mn alto carbono, Fe-Mn baixo carbono e Fe-Si-Mn. O ferro manganês é o ferro liga mais utilizado na fabricação de aço, e é de grande importância para o mesmo, sendo o manganês um elemento que está presente na composição de praticamente todos os tipos de aços. (SINDIEXTRA, 2011).

A produção de ferro-manganês e silício-manganês é baseada em uma mistura de manganês contendo óxidos como matéria prima primária. O ferro manganês pode ser produzido em alto forno ou em forno elétrico a arco, a partir de minérios contendo óxidos de manganês e de ferro, já que o minério de manganês contém sempre óxidos de ferro e o ferro incorpora-se na fase metálica, isto porque o manganês é menos nobre que o ferro, então o teor de ferro na liga estará determinado pela quantidade de ferro no minério (BENIQUE, 2007).

As principais aplicações do manganês são evidenciadas no final da produção do aço a partir do gusa líquido, sendo que esse material contém além do ferro e carbono normalmente uma quantidade indesejável de oxigênio, e por vezes de enxofre. Com isso, o manganês desempenha um papel chave devido sua habilidade poderosa de desoxidação e de se combinar ou reagir com o enxofre (BENIQUE, 2007). A etapa final do refino do aço consiste numa importante operação tecnológica denominada desoxidação que tem por objetivo extrair o oxigênio dissolvido no aço. Essa operação é essencial, pois esse oxigênio dissolvido afeta fortemente as propriedades mecânicas do aço. A desoxidação é efetuada mediante a adição de ferro ligas, principalmente de silício, manganês e titânio, que se combinam com o oxigênio formando óxidos estáveis insolúveis no aço, esses elementos são denominados desoxidantes (OLIVEIRA, R.W.H. 2013). Sendo assim, no momento que o manganês reage com o oxigênio dissolvido no banho de refino do aço formando os óxidos evita-se a formação de monóxido de carbono (CO), que ao sair do banho poderia gerar quantidades consideráveis de poros no metal prejudicando suas propriedades (SILVEIRA e ALMEIDA, 1987). Essa capacidade desoxidante do manganês, também evita a formação de bolhas e conseqüentemente a presença de descontinuidades no aço (BENIQUE, 2007). Entretanto, em relação ao enxofre de uma forma geral, o manganês reage com o enxofre presente formando o sulfeto de manganês MnS, evitando assim que o enxofre reaja com o ferro e forme um sulfeto de baixo ponto de fusão, que possa se fundir nas temperaturas de laminação a quente, causando trincas na superfície e aumentando a fragilidade do aço, tornando-o mais difícil de

forjar. Um excesso de manganês, reagindo com o carbono, origina a formação carbeto de manganês, melhorando as propriedades do aço. Os processos atuais de dessulfuração reduzem a necessidade de manganês para este fim. Então, pode-se afirmar que o manganês adicionado na forma de ferro liga, é um dos mais importantes elementos de liga para melhorar as propriedades mecânicas durante a produção de diversos tipos de aço, auxiliando no refinamento da estrutura de grãos, aumentando a resistência mecânica e melhorando a temperabilidade e a ductilidade do aço. O manganês associado a teores mais elevados de enxofre facilitam a usinagem, melhorando o acabamento superficial dos aços (BENIQUE, 2007; CHIAVERINI, 1990; CHAUDHARY et al., 2001).

A tabela 02 dispõe de algumas propriedades que são atribuídas com a adição dos elementos de ligas Silício.

Tabela 2- Elementos de liga – Caracterização e efeitos objetivados.

Elemento	Ponto de Fusão	Densidade	Efeito Objetivado	
	°C	Kg/dm ³	No processo	No produto
Silício	1414	2,37	De-O,R	D, RM, RC, PE
Manganês	1244	7,3	De-O, De-S	D, RM, RC, RD

Fonte: Adaptado (KRUGER, 2009)

De-O = desoxidante ; R = redutor; D = dureza ; RM = resistência mecânica; RC = resistência à corrosão; PE = perdas elétricas; De-S = dessulfurante; RD = resistência ao desgaste.

3.4. MATÉRIAS PRIMAS PARA PRODUÇÃO DE FERRO-LIGAS DE MANGANÊS

3.4.1 Minério de Manganês

O minério de manganês é um recurso natural de grande importância no Brasil, devido suas reservas existentes, sua essencialidade na produção de ferro ligas e no aço, nos quais é um insumo fundamental (MINERAÇÃO SEM FRONTEIRA, 2018). Os minérios de manganês são disponíveis de varias fontes e com diversos conteúdos de manganês, ferro, sílica, alumina, cal magnésia, fósforo e outras impurezas.

O manganês não é encontrado na natureza em seu estado elementar, e sim na forma de compostos com outros elementos, principalmente como óxidos, carbonatos e silicatos, dispostos em uma variedade de rochas. Os dióxidos constituem as mais importantes fontes

comerciais do metal, destacando-se a pirolusita (MnO_2), o psilomelano [$\text{Ba Mn}^{+2} \text{Mn}_8^{+4} \text{O}_{16} (\text{OH})_4$] e a manganita ($\text{Mn}_2\text{O}_3\text{H}_2\text{O}$) (BENIQUE, 2007).

Um das características mais importantes do minério de manganês é o fato dele ser essencial para a produção do aço onde é usado como agente dessulfurante e desoxidante. O uso do minério de manganês é feito na forma de minério natural com adição no alto forno de gusa, e como adição nos fornos para a produção de ferro ligas a base de manganês. As ferro ligas posteriormente são consumidas na indústria siderúrgica em praticamente todos os tipos de aço e ferros fundidos, devido a sua propriedade de dessulfuração como já dito no tópico 3.3 deste trabalho. O setor siderúrgico absorve pouco mais de 85% do minério de manganês, sejam de forma natural ou transformados em ligas a base de manganês, dos 15% restantes sob a forma de dióxido de manganês, 10% são utilizados como componente de pilhas, no qual o manganês-zinco dá origem às pilhas alcalinas e 5% como insumo da indústria química como adubos, ração e vidro (QUARESMA, 2007).

Figura 4 - Minério de Manganês.



Fonte: (MINÉRIO DE MANGANÊS, 2018).

3.4.2 Minério de Ferro

O minério de ferro também não é encontrado na natureza em sua forma elementar, e sim na forma de compostos misturado a outros elementos, na forma de óxidos. Contudo com auxílio de processos industriais, o minério é beneficiado para depois ser comercializado para os setores siderúrgico e metalúrgico. Sendo o minério de ferro, muito importante como um dos insumos no processo de produção de ferro ligas, juntamente com o minério de manganês, carvão vegetal ou coque e fundentes, para serem fundidos em forno elétrico de redução - FER.

Figura 5 - Minério de Ferro.



Fonte: (OBTENÇÃO DO FERRO, 2018).

3.4.3 Quartzo

Visando alcançar uma alta qualidade nas ferro ligas e uma operação do forno eficiente, materiais auxiliares como quartzo (SiO_2), bauxita ($\text{AlOx}(\text{OH})_{3-2x}$), alumina (Al_2O_3), óxido de cálcio (CaO), olivina ($\text{Mg}_{1,5}\text{Fe}_{0,5}\text{SiO}_4$), calcário (CaCO_3) e dolomita [$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$] podem ser adicionados como agentes de fluxo.

Evidenciando de forma específica o uso do quartzo, que é muito utilizado na siderurgia como fundente para obtenção de ferro ligas. O quartzo é a forma estável de sílica em temperaturas abaixo de 573°C , cristalizada no sistema trigonal, e pertence à classe mineralógica dos silicatos, sendo sua fórmula molecular a do dióxido de silício (SiO_2), cuja composição é de 46,75% silício e 53,25% de oxigênio, em porcentagem massa.

Devido suas características individuais e suas propriedades combinadas a outros elementos, que são obtidas nos processos siderúrgicos, o quartzo tem se tornado um insumo básico na indústria no atual estágio tecnológico (MINERAÇÃO FRONTEIRA, 2018).

Atuando como fundente, o quartzo tem a função de combinar-se com as impurezas dos minérios e com as cinzas do carvão formando assim a escória, sendo obtida no estágio líquido, diminuindo o ponto de fusão das impurezas, assim eliminando-as.

O quartzo é utilizado na produção de ferro silício, ferro-silício-manganês, silício metálico e cálcio-silício. A força térmica do quartzo é de grande importância na qualidade do processo de produção, porque está relacionada à permeabilidade do gás na carga onde a presença de uma grande quantidade de finos pode impedir o fluxo de gás.

Figura 6 - Quartzo.



Fonte: (MINERAÇÃO FRONTEIRA, 2018).

3.4.4 Redutores

De uma forma geral, a maioria dos óxidos se decompõe por intermédio de um agente redutor, estes podem ser carbono, monóxido de carbono ou hidrogênio, e em algumas situações mais específicas outro metal, no entanto que tenha uma maior afinidade pelo oxigênio. Os agentes redutores citados acima são os redutores de maior importância a nível industrial e economicamente falando, e que podem ser produzidos a partir de matérias primas como o carvão, o petróleo e o gás natural (BENIQUE, 2007).

Para que se tenha uma boa operação dos fornos é de grande importância se atentar a escolha dos agentes redutores, assim como uma possível combinação entre eles. No Brasil frequentemente são utilizados como redutores o carvão vegetal, coque metalúrgico, coque de petróleo, coque verde de petróleo e cavacos de madeira. Ressaltando que os agentes redutores utilizados na redução carbotérmica são o carvão e o coque. Há também a possibilidade de realizar a redução sílico-térmica quando a quantidade de carbono requerida na liga for baixa. Por exemplo, para produção de ferro-cromo alto carbono, o carbono é utilizado como redutor na forma de carvão mineral ou vegetal. Para produção de ferro-cromo baixo carbono, é utilizada a sílica como agente de redução.

Figura 7 - Carvão vegetal.



Fonte: (CARVÃO VEGETAL, 2018).

4. PRODUÇÃO DA FERRO LIGA FERRO-SILÍCIO-MANGANÊS

4.1. PROCESSO DE REDUÇÃO DOS ÓXIDOS UTILIZADOS

A principal tecnologia utilizada na produção de ferro ligas é a do forno elétrico a arco submerso. O arco elétrico fornece calor para a redução dos diferentes óxidos presentes nas matérias primas pelo carbono e outros elementos (BATISTA, LÓES e OLIVEIRA, 2010).

O processo a arco submerso é uma operação de redução de fundição, onde se tem a fusão dos óxidos. Os reagentes consistem em óxidos metálicos e os agentes de redução, usualmente na forma de coque, carvão vegetal ou mineral. O material já pronto é adicionado acima do forno, por meio de uma calha. Na temperatura elevada da zona de reação, a fonte de carbono reage com o óxido de metal para formar monóxido de carbono e reduzir os óxidos para formação do metal.

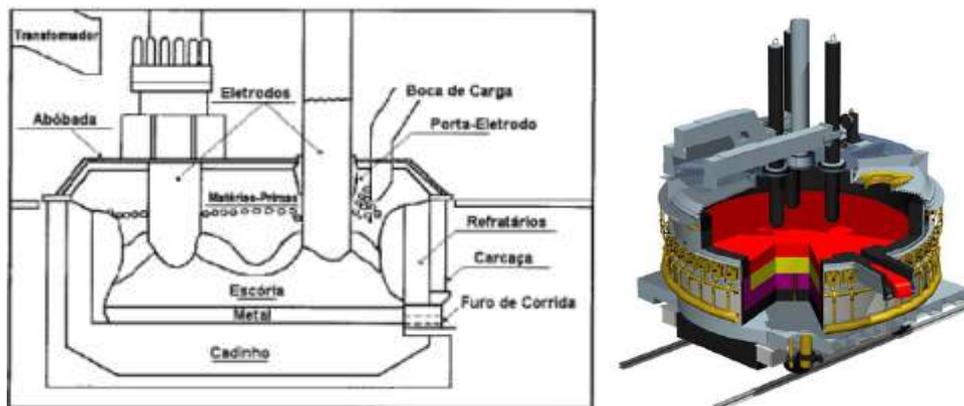
O aquecimento em um forno elétrico a arco é obtido pelo efeito joule, que consiste na transformação de energia elétrica em calor. Normalmente três eletrodos de carbono de forma arranjada dispostos de forma triangular estendem-se através da abertura do forno. São utilizados geralmente eletrodos pré-fabricados ou eletrodos Soderberg com faixa de diâmetro variando entre 76 a 100 cm.

O triangulo formado entre os eletrodos é estabelecido em função da ferro liga que se quer produzir. Então, é aplicada uma corrente alternada trifásica nos eletrodos provocando um fluxo de corrente através da carga entre as pontas dos três eletrodos que mudam continuamente de polaridade com os fluxos de corrente, ocorrendo assim varias reações para que ocorra a redução e fusão da carga, formando assim o produto desejado quando a energia

elétrica é convertida em calor, proporcionando uma zona de reação com temperaturas de até 2000°C. As extremidades dos eletrodos são mantidas acerca de 0,9 a 1,0 m abaixo da superfície da carga. (BATISTA, LÓES e OLIVEIRA, 2010).

A parte rica em carbono na carga do forno reage com o oxigênio dos óxidos metálicos também da carga, reduzindo assim os óxidos em metal fundido, formando grandes quantidades de monóxido de carbono que passam através da carga do forno. O metal fundido e a escória são removidos por meio de um ou mais orifícios ao longo da corrida.

Figura 8 - Representação esquemática de um Forno Elétrico de Redução (FER) utilizado para a fabricação de ferro ligas.



Fonte: (BATISTA, LÓES e OLIVEIRA, 2010); (TECNOLOGIAS DA RECICLAGEM, 2018).

4.2. PROCEDIMENTOS PARA PRODUÇÃO DA LIGA FERRO-SÍLÍCIO-MANGANÊS

Como o minério de manganês é a matéria prima principal nos processos de produção das ligas de manganês, ele deve ser escolhido com muita atenção juntamente com os outros minerais da mistura. Já em granulometria adequada após britagem, as matérias primas são colocadas nos silos de armazenamento de carga, onde serão posteriormente transportadas por correias para passarem pela pesagem da mesma.

Nos fornos a arco elétrico ocorre a redução dos óxidos de manganês, ferro e silício utilizados para produção do Fe-Si-Mn. A produção comercial de ferro-ligas de manganês ocorre pela redução carbotérmica de óxidos de manganês. A mistura de matérias primas alimentadas no forno de redução ao atingir temperaturas na ordem de 1200°C se funde, com exceção dos redutores (TRINDADE e CUNHA, 2016).

A temperatura de redução do MnO irá depender da composição da escória e do teor de manganês da liga. A temperatura onde deve ocorrer a redução do MnO é alta o suficiente

para que se tenha praticamente somente CO nos gases. Já a redução dos óxidos de ferro termodinamicamente deve ocorrer antes de 800°C no forno operado com carvão vegetal, ou 950°C para fornos a coque. A sílica depende de quanto a atividade do MnO diminui na escória, assim incorporando mais silício à liga. Sendo assim, quanto maior for a recuperação do MnO da escória, menor o teor de silício da liga.

Para o vazamento da liga o forno é furado manualmente com uma vara de metal (vergalhão), o furo se dá através de descargas elétricas, semelhante à um curto circuito fase neutro, ou quando necessário faz-se o uso das P.P.L's que utilizam gás oxigênio para reagir com a indução elétrica do forno e gerar a combustão, assim furando o forno de forma eficaz. O mesmo furo desce tanto a liga quanto a escória. A liga metálica e a escória depositam-se no cadinho e durante o vazamento do forno são separadas, por diferença de densidade, em um dispositivo chamado *skimmer*, o qual direciona o percurso final da liga e da escória para suas respectivas baias de areia (TRINDADE e CUNHA, 2016). A liga é vazada primeiro por ser mais densa, em temperaturas de 1200°C aproximadamente, logo em seguida vem a escória, já numa faixa de temperatura em torno de 800°C.

Após o vazamento da liga e escória é feito o fechamento do forno, também de forma manual, com massa argilosa e pasta de *soderberg*. Depois da liga ser solidificada e resfriada, mesma é britada para ficar em granulometria adequada para ser comercializada. Por fim se faz uma análise química tanto da liga produzida quanto da escória, para verificar se ambas estão com suas composições adequadas, com teores de manganês, silício e ferro dentro dos padrões da FERMAR.

5. ENSAIOS MECÂNICOS

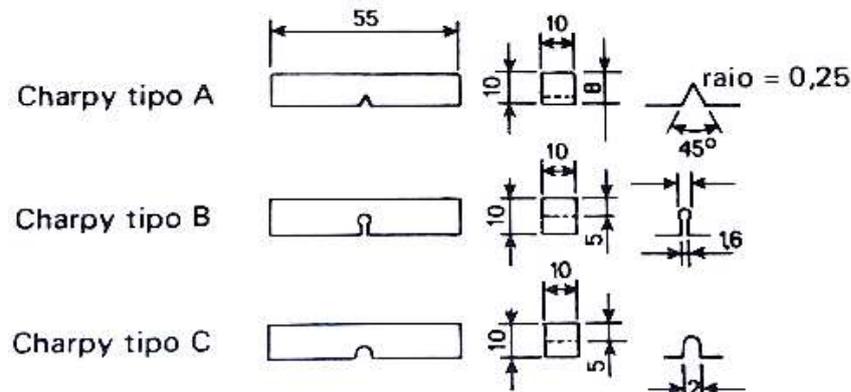
5.1. ENSAIO DE IMPACTO

O ensaio de impacto é um dos primeiros e até hoje um dos ensaios mais empregados para o estudo de fratura frágil nos metais. Esse ensaio às vezes denominado ensaio de choque ou impropriamente de ensaio de resistência, é um ensaio dinâmico usado principalmente para materiais utilizados em baixa temperatura, como teste de aceitação do material (SOUZA, 1982).

A tendência de um metal se comportar de uma maneira frágil é então medida pelo ensaio de impacto. O corpo de prova é padronizado e provido de um entalhe para localizar a sua ruptura e produzir um estado triaxial de tensões, quando ele é submetido a uma flexão por impacto, produzida por um martelo pendular. A energia que o corpo de prova absorve para se deformar e romper são medidas pela diferença entre a altura atingida pelo martelo antes e após o impacto, multiplicada pelo peso do martelo. Nas máquinas em geral, essa energia é lida na própria máquina através do ponteiro que ocorre numa escala graduada já absorvida por unidade de área, que também é útil. Quanto menor for a energia absorvida, mais frágil será o comportamento do material aquela sollicitação dinâmica (SOUZA, 1982).

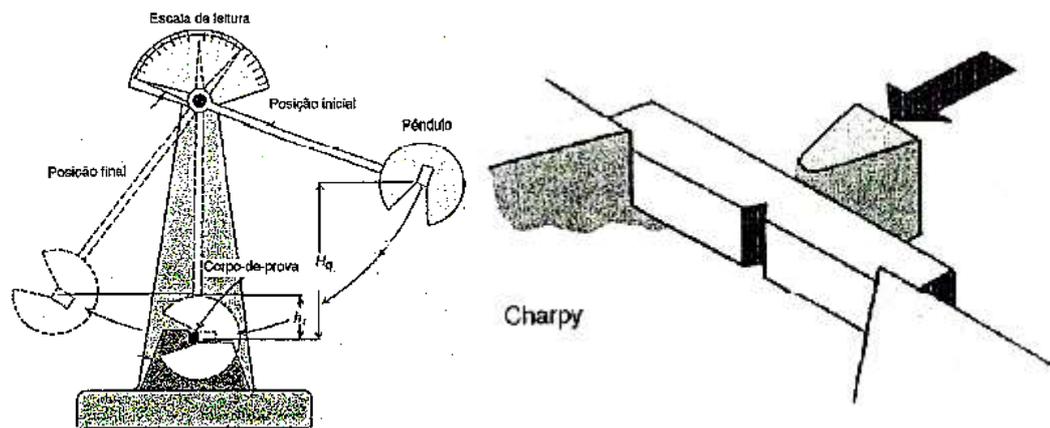
A norma internacional encarregada de padronizar os ensaios de impacto é a ASTM E23-94A, aplicada a materiais metálicos. Sendo aplicado neste trabalho o modelo de ensaio Charpy, no qual o corpo de prova é apenas apoiado entre dois suportes, o entalhe é feito no meio do corpo de prova, podendo estar em três diferentes configurações: tipo V, formando um ângulo de 45° e profundidade de aproximadamente 2 mm, tipo U, com raio da ponta do entalhe de 1mm e profundidade geralmente de 5 mm, e o entalhe cilíndrico, formado por um rasgo com um furo em sua extremidade (*keyhole*). Para o ensaio Izod, normalmente utilizam-se corpos de prova com entalhe em V, que deve ser posicionado próximo ao suporte onde o corpo de prova é engastado (GARCIA, 2000). Contudo os corpos de prova Charpy podem ser divididos em três tipos, conforme a forma de seu entalhe como já mencionado acima. Assim, têm-se corpos de prova Charpy tipo A, B e C, tendo eles uma secção quadrada de 10 mm de lado e um comprimento de 55 mm, como é mostrado na figura 9 (SOUZA, 1982).

Figura 9 - Corpos de prova Charpy, recomendado pela ASTM e ABNT pra ensaio de impacto.



Fonte: (SOUZA, 1982).

Figura 10 - Representação esquemática da máquina de ensaios para impacto, e do corpo de prova Charpy.



Fonte: (ASTM E23-94a); (GARCIA, 2000).

Neste contexto, é importante esclarecer que o entalhe produz um estado triplo de tensões como já dito acima, e que é suficiente para provocar uma ruptura de caráter frágil. No entanto, não se podem medir satisfatoriamente os componentes das tensões existentes, pois podem mesmo variar conforme o metal usado ou conforme a estrutura interna a que o metal apresente. Desse modo, o ensaio de impacto em corpos de prova entalhados tem limitada significação e interpretação, sendo útil apenas para comparação de materiais ensaiados nas mesmas condições (CALLISTER, 2000).

5.1.1. Análise de fratura da tenacidade ao Impacto

Fratura é a separação ou fragmentação de um corpo sólido em duas ou mais partes sob a ação de uma tensão. O processo de fratura pode ser considerado como constituído de duas partes, início de trinca e propagação de trinca. A fratura pode ser classificada em duas categorias, fratura frágil e fratura dúctil (DIETER, 1981). A classificação destes dois modos de fratura está baseada na habilidade de um material em deformar-se plasticamente. As fraturas frágeis são caracterizadas por seu aspecto cristalino, e ocorrem com baixa absorção de energia, sendo característica de materiais de baixa tenacidade, além ser caracterizada pela rápida propagação da trinca, com nenhuma deformação macroscópica. Já as fraturas dúcteis possuem superfície fibrosa, conseqüente da alta absorção de energia durante o impacto, e é característica de materiais que possuem alta tenacidade, tendo como característica chave ter uma apreciável deformação plástica antes e durante a propagação da trinca.

Uma trinca promove concentração de tensões muito elevadas, o que faz com que a maior parte da energia produzida pela ação de um golpe seja concentrada numa região localizada da peça, com a conseqüente formação da fratura frágil. A existência de uma trinca por menor que seja, muda substancialmente o comportamento do material dúctil. Esta característica do material dúctil, de comportar-se como frágil devido à trinca, é frequentemente chamada de sensibilidade ao entalhe (PANDOLFO, 2009).

Em relação à temperatura, esta variável tem um efeito muito acentuado na resistência dos metais ao choque, ao contrário do que ocorre na resistência estática. Logo a energia absorvida por um corpo de prova varia sensivelmente com a temperatura do ensaio. Então um corpo de prova a uma temperatura mais elevada pode absorver muito mais energia do que se estivesse a uma temperatura inferior.

5.2. ENSAIO DE DUREZA

O ensaio de dureza consiste na impressão de uma pequena marca feita na superfície da peça pela aplicação de pressão com uma ponta de penetração.

A dureza é uma propriedade mecânica cujo conceito se segue à resistência que um material quando pressionado por outro material ou por marcadores padronizados, apresenta ao risco ou a formação de uma marca permanente. Os métodos mais aplicados em engenharia utilizam-se de penetradores com formato padronizado e que são pressionados na superfície do

material sob condições específicas de pré-carga e carga, causando inicialmente deformação elástica e em seguida deformação plástica. A área da marca superficial formada ou a sua profundidade são medidas correlacionadas com um valor numérico que representa a dureza do material. Esta correlação é baseada na tensão que o penetrador necessita para vencer a resistência da superfície do material (GARCIA, 2000).

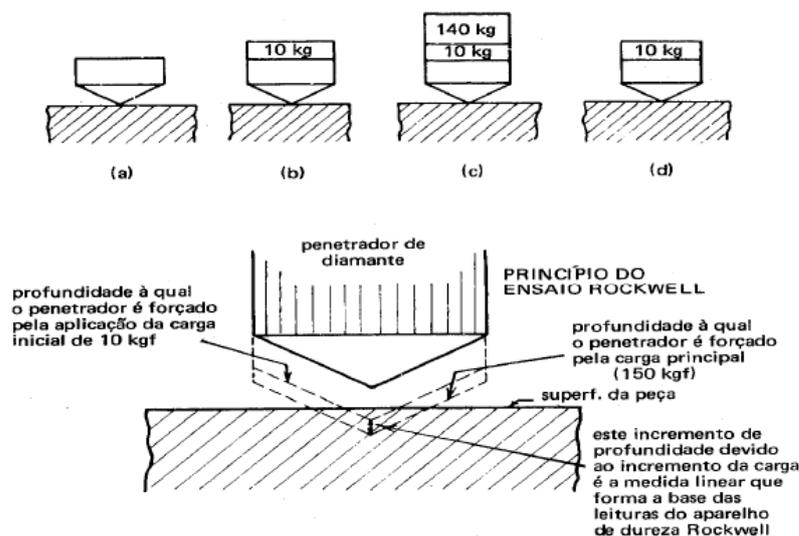
5.2.1 Dureza Rockwell

Este ensaio é o método mais utilizado internacionalmente. Esse tipo de ensaio de dureza utiliza-se da profundidade da impressão causada por um penetrador sob ação de uma carga como indicador da medida de dureza Rockwell, que pode ser classificada como comum ou superficial, dependendo o penetrador e da pré-carga e carga aplicadas (GARCIA, 2000).

Neste método, a carga do ensaio é aplicada em etapas, ou seja, primeiro se aplica uma pré-carga, para garantir um contato firme entre o penetrador e o material ensaiado, e depois aplica-se a carga do ensaio propriamente dita. A leitura do grau de dureza é feita diretamente num mostrador acoplado à máquina de ensaio, de acordo com uma escala predeterminada, adequada à faixa de dureza do material.

Os penetradores utilizados na máquina de ensaio de dureza Rockwell são do tipo esférico (esfera de aço temperado) ou cônico (cone de diamante com 120° de conicidade).

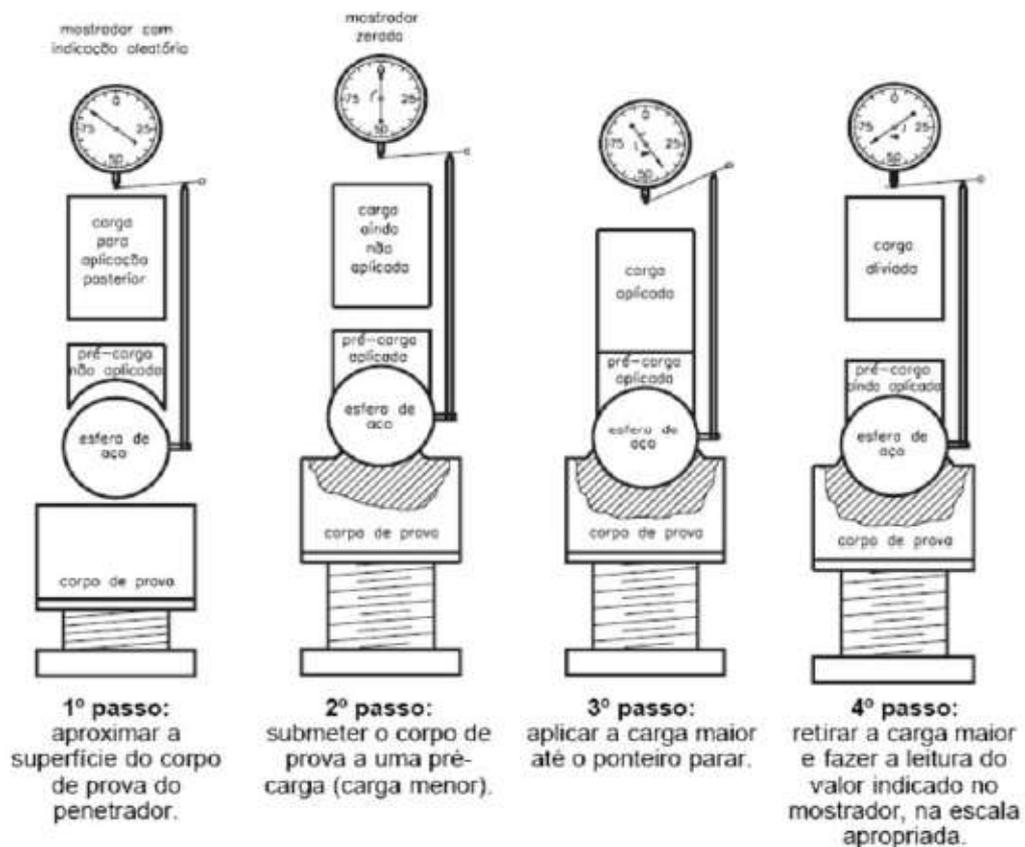
Figura 11 - As várias fases de aplicação de carga no método de dureza Rockwell.



Fonte: (CHIAVERINI, 1986).

O teste de dureza Rockwell é bastante versátil e confiável, contudo, devem-se observar algumas precauções. O penetrador e o suporte devem estar limpos e bem assentados, e na realização do ensaio, recomenda-se que a espessura do corpo de prova seja no mínimo 10 vezes maior que a profundidade da impressão. A norma brasileira é a NBR-6671, e a norma internacional de maior utilização no país é a ASTM E18-94 (GARCIA, 2000).

Figura 12 - Etapas da determinação da dureza Rockwell.



Fonte: (CHIAVERINI, 1986).

6. MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

Na microscopia eletrônica de varredura os sinais de maior interesse para a formação da imagem são os elétrons secundários e os retroespalhados. À medida que o feixe de elétrons primários vai varrendo a amostra estes sinais vão sofrendo modificações de acordo com as variações da superfície. Os elétrons secundários fornecem imagem de topografia da superfície

da amostra e são os responsáveis pela obtenção das imagens de alta resolução, já os retroespalhados fornecem imagem característica de variação de composição.

O MEV tem seu potencial ainda mais desenvolvido com a adaptação na câmara da amostra de detectores de raios-x permitindo a realização de análise química na amostra em observação. Através da captação pelos detectores e da análise dos raios-x característicos emitidos pela amostra, resultado da interação dos elétrons primários com a superfície, é possível obter informações qualitativas e quantitativas da composição da amostra na região submicrométrica de incidência do feixe de elétrons. Este procedimento facilita a identificação de precipitados e mesmo de variações de composição química dentro de um grão. Atualmente quase todos os MEV são equipados com detectores de raios-x, sendo que devido à confiabilidade e principalmente devido à facilidade de operação, a grande maioria faz uso do detector de energia dispersiva - EDX (MALISKA, 2000).

7. DIFRAÇÃO DE RAIOS - X

A difratometria de raios-x corresponde a uma das principais técnicas de caracterização microestrutural de materiais cristalinos, encontrando aplicações em diversos campos do conhecimento, mais particularmente na engenharia e ciências de materiais, engenharias metalúrgica, química e de minas, além de geociências, dentre outros.

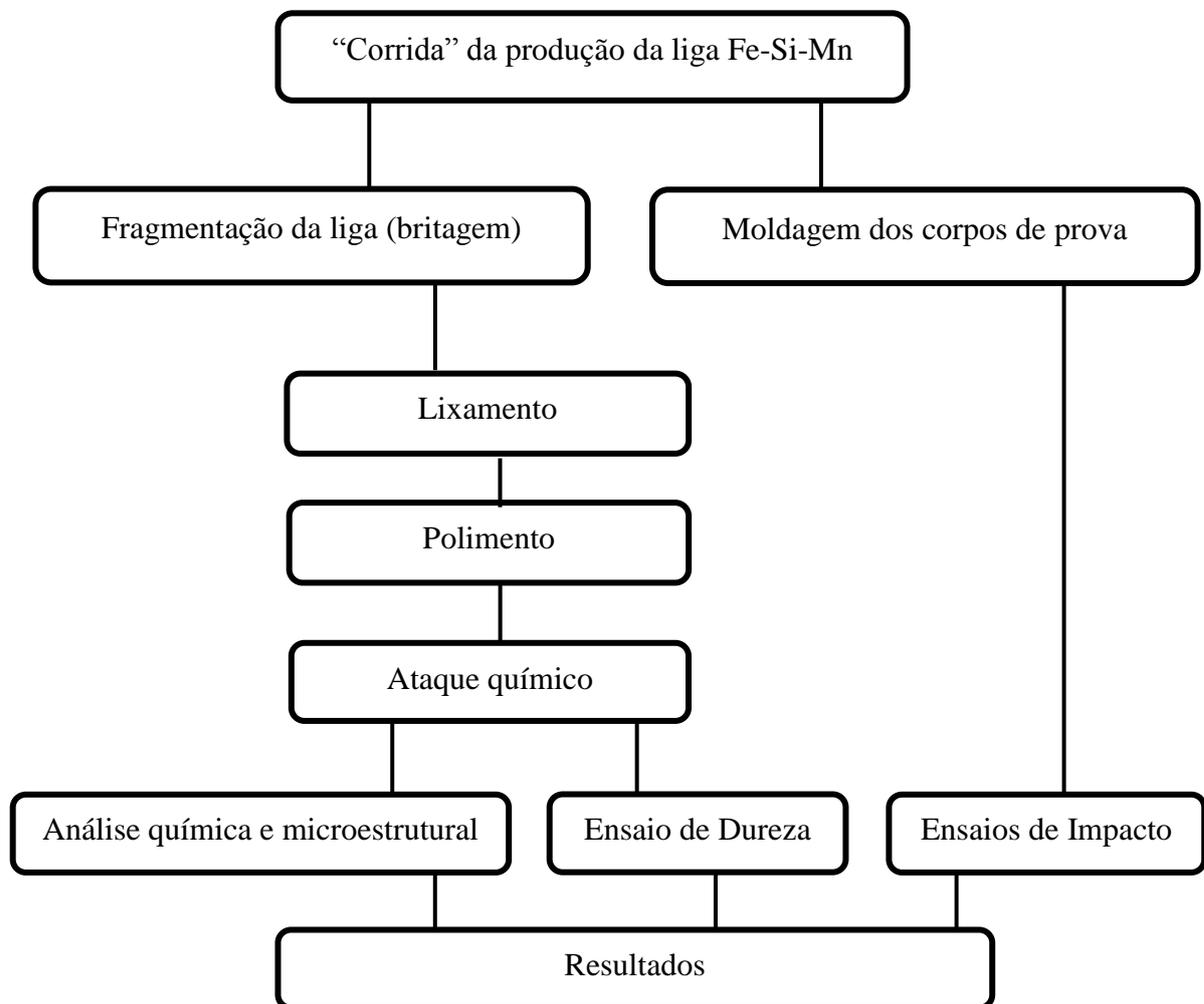
Os raios-x ao atingirem um material podem ser espalhados elasticamente, sem perda de energia pelos elétrons de um átomo (dispersão ou espalhamento coerente). O fóton de raios-x após a colisão com o elétron muda sua trajetória, porém, mantendo a mesma fase e energia do fóton incidente. Sob o ponto de vista da física ondulatória, pode-se dizer que, a onda eletromagnética é instantaneamente absorvida pelo elétron e reemitida, portanto cada elétron atua como centro de emissão de raios-x (DIFRAÇÃO DE RAIOS X, 2000).

8. MATERIAIS E MÉTODOS

Para realização deste trabalho foram adquiridas amostras da liga ferro-silício-manganês, as quais foram concedidas pela FERMAR – Indústria de Ferro Ligas LTDA. A ferro liga a qual é objeto desse estudo, possui composição com aproximadamente 65% em teor de manganês acerca de 12 % em teor de silício.

Para o desenvolvimento deste trabalho adotou-se a seguinte metodologia, representada no fluxograma a seguir, na figura 13:

Figura 13 - Fluxograma do Procedimento Experimental.



Fonte: Autor, 2018.

8.1. PROCEDIMENTOS PARA CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL

Para realização desta etapa, acompanhou-se o vazamento da liga, e logo após ser solidificada e resfriada, foram pegos alguns pedaços da liga já fragmentados como mostra a figura 14, os quais foram preparados com forma e tamanho adequados para a etapa de lixamento, não sendo necessário realizar embutimento da peça, devido à amostra ter um tamanho considerado aceitável para ser lixada na lixadeira.

Figura 14 - Amostras da liga ferro-silício-manganês já britadas.



Fonte: Autor, 2018.

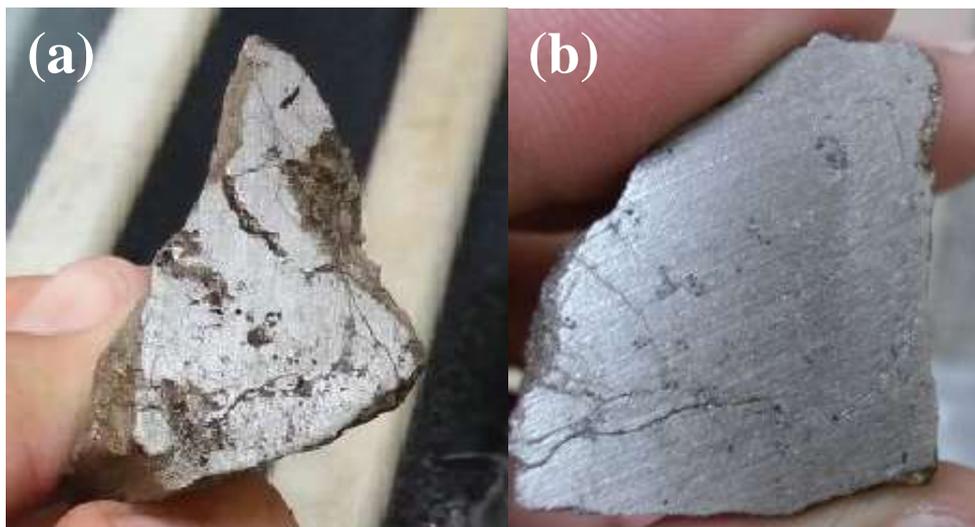
A amostra foi lixada na lixadeira, vista na figura 15, e foi submetida há uma sequência de lixas d'água, e passou pelas seguintes granulometrias em *mesh* (80, 100, 150, 220, 320, 400, 600, 800, 1200 e 1500) como se é de costume para amostras de aço ou ligas de ferro, para se obter uma superfície plana. Na figura 16, pode se ver a etapa de preparação da amostra antes 16(a) e durante o lixamento 16(b).

Figura 15 - Lixadeira utilizada para preparação da amostra.



Fonte: Autor, 2018.

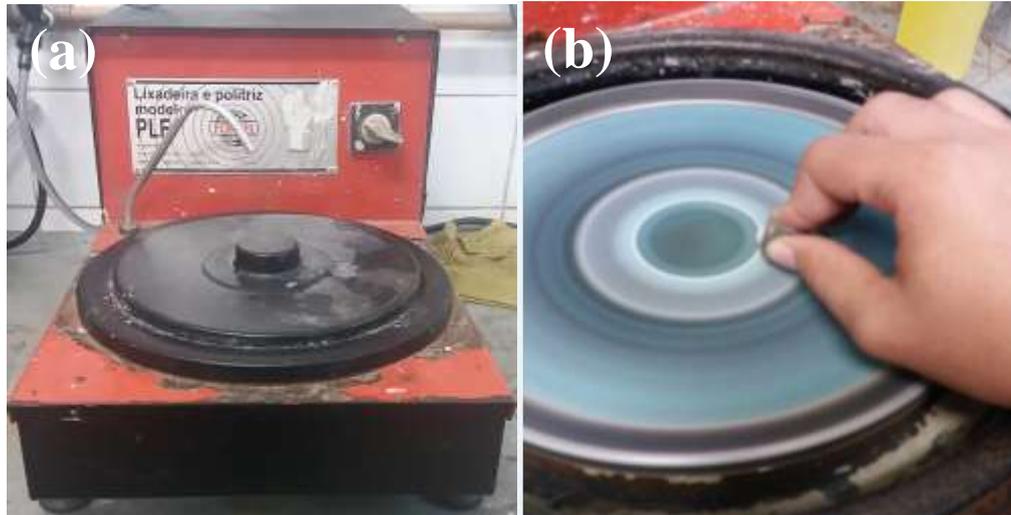
Figura 16 - Amostra antes (a) e durante o lixamento (b).



Fonte: Autor, 2018.

Ao término do lixamento, prosseguiu-se para o polimento da amostra, para se obter o acabamento da superfície (espelhamento). Nesta etapa foi utilizada uma lixadeira politriz de modelo PLF mostrada na figura 17(a). O polimento seguiu parâmetros semelhantes ao lixamento, como se pode ver na figura 17(b). A amostra foi polida usando pastas de diamante nas sequencias a seguir: 9, 6, 3 e 1 microns.

Figura 17 - Lixadeira politriz modelo PLF (a), polimento da amostra com pasta de diamante (b).



Fonte: Autor, 2018

Esta etapa é finalizada com o ataque químico, com uso de nital que é o agente químico mais convencional para produtos de origem siderúrgica. A amostra foi atacada por imersão numa solução de nital 5% por um período de tempo de 15 segundos, parâmetros estes que foram necessários para revelar a microestrutura da amostra, ficando aparentemente ofuscada como mostra a figura 18.

Figura 18 - Amostra polida e atacada quimicamente com nital 5%.



Fonte: Autor, 2018.

Após o ataque químico a amostra foi levada ao microscópio ótico, representado na figura 19, para a visualização da microestrutura revelada.

Figura 19 - Microscópio Óptico utilizado para visualização da microestrutura da liga.



Fonte: Autor, 2018.

8.2. PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS PARA REALIZAÇÃO DA MICROSCOPIA ELETRONICA DE VARREDURA - MEV - EDS

O próximo passo para a caracterização das amostras foi à visualização das fases formadas em microscópio eletrônico de varredura, modelo HITACHI TM 3000 com aceleração de voltagem de 15KV (figura 20-a), e análise da composição química com uso do EDS modelo SwiftED3000, (figura 20-b). Nesta etapa, foi realizada a microscopia das amostras polidas. As amostras foram devidamente preparadas, estando isenta de impurezas em suas superfícies, para que o ensaio ocorresse de maneira eficaz e se tivesse a correta identificação das fases presentes, e a quantificação das mesmas com o auxílio do EDS.

Figura 20 - Equipamentos para realização da Microscopia Eletrônica de Varredura - MEV (a) e EDS (b).



Fonte: Autor, 2018.

8.3. PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS PARA A REALIZAÇÃO DO DIFRATOGRAMA DE RAIOS-X (DRX)

Após o vazamento e solidificação da liga, as amostras foram britadas por um britador mecânico e por seguinte fragmentadas manualmente em um cadinho até ficarem na consistência de pós, depois foram passadas por uma pilha de peneiras para ficar na granulometria ideal para realização do ensaio, essas etapas são brevemente observadas na figura 21. Feito isto, as amostras já preparadas, foram levadas para realização do difratograma de raios-x, com um difratômetro modelo Rigaku Miniflex 600, operando a 30KV, com passo de 0,002/grau e velocidade de varredura de 20°/min (figura 22), para identificar as fases que estão presentes na liga e os picos mais característicos das mesmas.

Figura 21 - Preparação da amostra para realizar o DRX. Cadinho (a), pilha de peneiras (b), amostra peneirada em granulometria de 100# (*mesh*).



Fonte: Autor, 2018.

Figura 22 - Máquina para realização do Difratoograma de Raios-X.



Fonte: Autor, 2018.

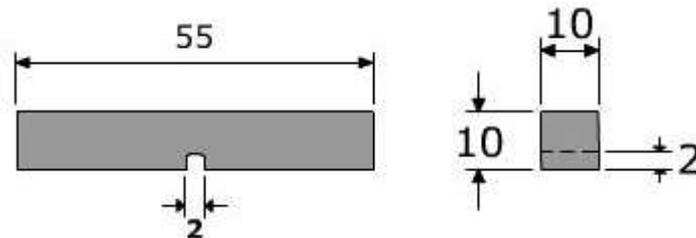
8.4. PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA PARA OS ENSAIOS MECÂNICOS

8.4.1. Ensaio de Impacto - Charpy

Os corpos de prova foram confeccionados a partir da corrida da liga, ocorrendo o vazamento da liga em um molde de aço inoxidável (figura 24), material este, capaz de resistir às altas temperaturas decorrentes do processo de vazamento da liga, a corrida ocorre em temperaturas de 1100 à 1200°C, aproximadamente. Os corpos de prova foram fundidos com

uma secção quadrada de 10 mm de lado e com comprimento de 55 mm, seguindo os parâmetros dimensionais do ensaio, como mostra a figura 23.

Figura 23 - Modelo do corpo de prova para ensaio de impacto tipo Charpy.



Fonte: Autor, 2018.

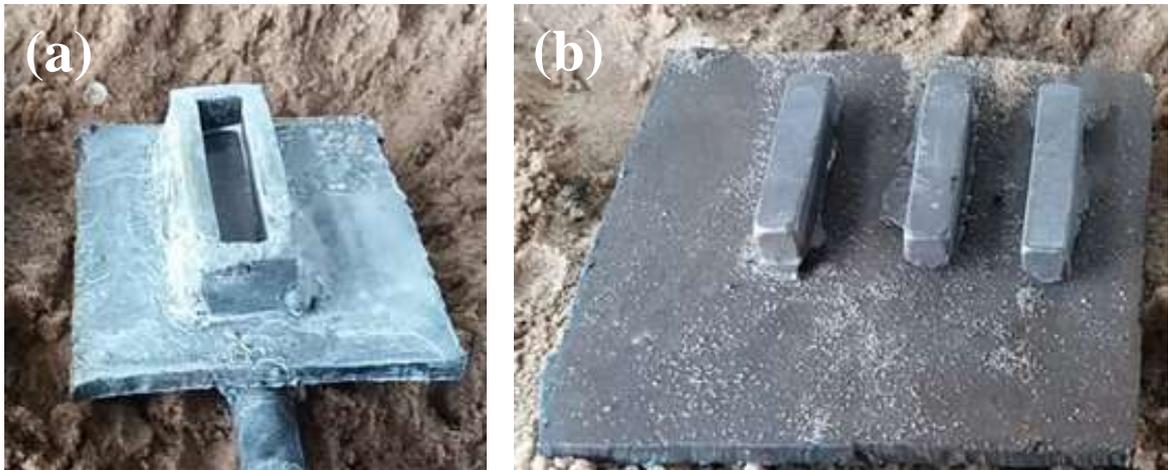
Figura 24 - Molde confeccionado segundo a norma ASTM E23-94a, tipo Charpy.



Fonte: Autor, 2018.

Durante a “corrida” com auxílio de um cadinho adaptado com uma garra metálica (figura 25-a), foi retirada certa quantidade de liga durante sua passagem pelo canal de vazamento, para ser vazada no molde. Esse processo foi realizado varias vezes até se chegar à quantidade ideal de corpos de prova, para se alcançar uma maior precisão nos resultados do ensaio mecânico, totalizando seis corpos de prova como é mostrado na figura 26. Ao término da fundição de todos os corpos, foi necessário realizar uma etapa a mais, que foi a retirada de rebarbas oriundas do processo de fundição da liga no molde metálico, para que o corpo mantivesse suas dimensões padronizadas para a perfeita realização do ensaio (figura 26). Por seguinte se fez o entalhe nos corpos de prova para que os mesmos estivessem aptos para a realização do ensaio de impacto tipo charpy, como é mostrado na figura 27.

Figura 25 - Molde adaptado para receber o vazamento da liga (a) e os corpos de prova após o vazamento (b).



Fonte: Autor, 2018.

Figura 26 - Corpos de prova de impacto usinados.



Fonte: Autor, 2018

Figura 27 - Corpo de prova de impacto com entalhe.



Fonte: Autor, 2018.

O ensaio de impacto foi realizado em uma máquina JB – 300 B, com capacidade de medição de até 150 Joules, em temperatura ambiente, usando um Smal Pendulun, como é

ilustrado na figura 28. Não se teve dificuldades para realização do mesmo. A figura 29 mostra o corpo de prova após o ensaio mecânico.

Figura 28 - Máquina utilizada para o ensaio de impacto.



Fonte: Autor, 2018.

Figura 29 - Corpo de prova fraturado após o ensaio de impacto.



Fonte: Autor, 2018.

A equação (1) foi a última variável utilizada para fins de se analisar aos corpos de prova em função do ensaio de impacto tipo Charpy. A equação é utilizada para calcular a resistência ao impacto dos corpos de prova ensaiados.

$$a_{cu} = \frac{w}{h \times b} \times 10^3 \quad (1)$$

Onde:

w = energia absorvida ao fraturar os corpos de prova (J);

h = espessura do corpo medida do eixo do entalhe (mm);

b = largura d corpo de prova (mm).

8.4.2. Ensaio de Dureza - Rockwell

Este ensaio foi realizado no durômetro de marca PANTEC, como se pode ver na figura 30. A peça tinha um tamanho pequeno, então foram explorados sete pontos da peça para serem feitas as medidas de dureza na escala Rockwell A, com penetrador de diamante (cone) com carga de 60 Kgf adequada para metais de caráter duro, foi à escala que mais ficou dentro dos padrões e características da peça a ser ensaiada. Posteriormente ao ensaio, os resultados foram convertidos de HRA para HB, que é uma escala conceitualmente mais popular entre os estudos.

Figura 30 - Durômetro de bancada modelo PANTEC, utilizado para realização do ensaio de dureza Rockwell.



Fonte: Autor, 2018.

9. RESULTADOS E DISCUSSÃO

9.1. ANÁLISE MICROESTRUTURAL

9.1.2 Microscopia Ótica

A microestrutura da ferro liga foi revelada com ataque químico como pode ser visto nas figuras 31 e 32(a), onde estão as imagens feitas por microscopia ótica com aumento de 10x. Aparentemente não se veem contornos de grão definidos, e pode-se observar uma microestrutura consideravelmente homogênea, observando também traços finos formando algumas figuras disformes, tendo três regiões distintas com colorações diferentes, provavelmente o manganês é a região mais clara que se encontra em maior quantidade e de forma mais ampla pela amostra, essas regiões de coloração mais escuras geralmente são características da presença ferro na amostra, restando apenas o silício para as outras regiões de coloração intermediária.

Figura 31 - Micrografia da liga Fe-Si-Mn feita em microscópio ótico com aumento de 10x.

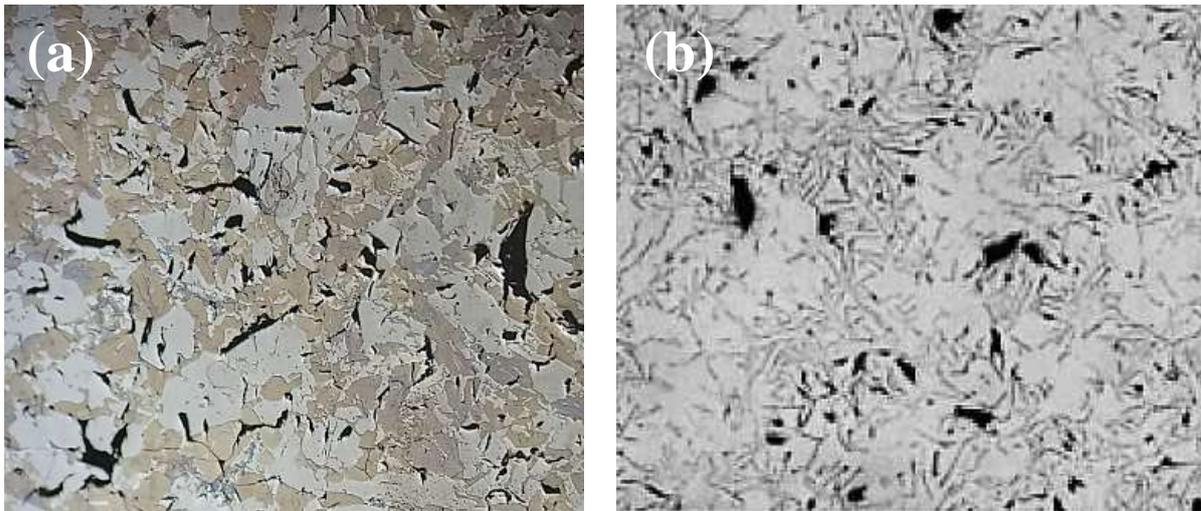


Fonte: Autor, 2018.

Seguindo o fato de não ser ter estudos anteriores sobre a liga abordada neste trabalho, foi necessário procurar na literatura micrografias semelhantes, as quais poderiam se encaixar com a microestrutura revelada com o ataque químico realizado na mesma. Com o auxílio do Metals Handbook encontrou-se a micrografia mostrada na figura 32 (b) que consiste em uma

liga de ferro com alto teor de silício apresentando um teor de 14,5 % em silício, tendo certa semelhança com a liga estudada neste trabalho que também é uma liga de ferro, e que possui um teor de aproximadamente 12% de silício.

Figura 32 - Microestrutura da liga Fe-Si-Mn como aumento de 10x (a) e da liga de ferro com alto silício com aumento de 100x (b).

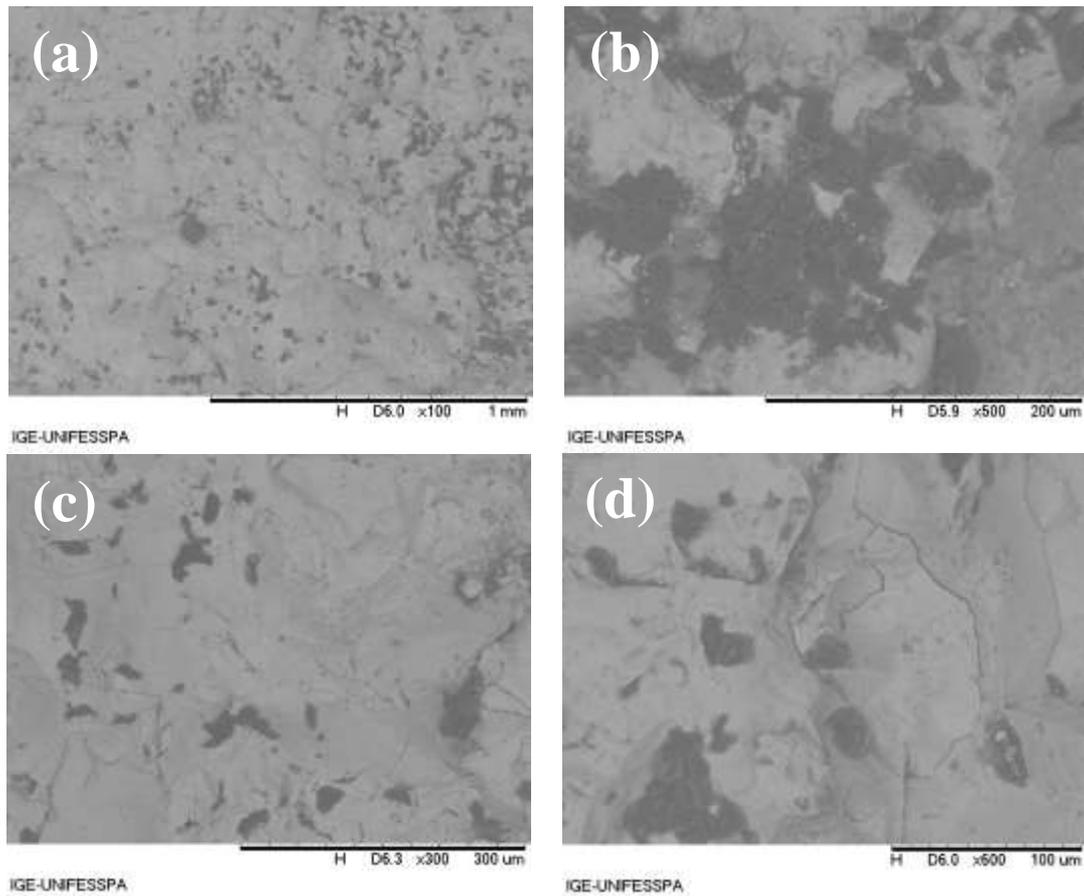


Fonte: Autor, 2018; (VANDER VOORT, 2004).

9.1.3 Microscopia Eletrônica de Varredura - MEV

Com base nas imagens abaixo feitas por microscopia eletrônica de varredura confirmou-se a presença dos elementos presentes nas especificações da liga. De acordo com a estrutura da liga, provavelmente essa região mais escura são precipitados de ferro, devido este provavelmente ter baixa solubilidade na matriz, como se pode ver na figura 33(a) onde se apresentam de forma bem distribuída, e na figura 33(b) o ferro já se encontra na superfície dos grãos, de forma mais segregada.

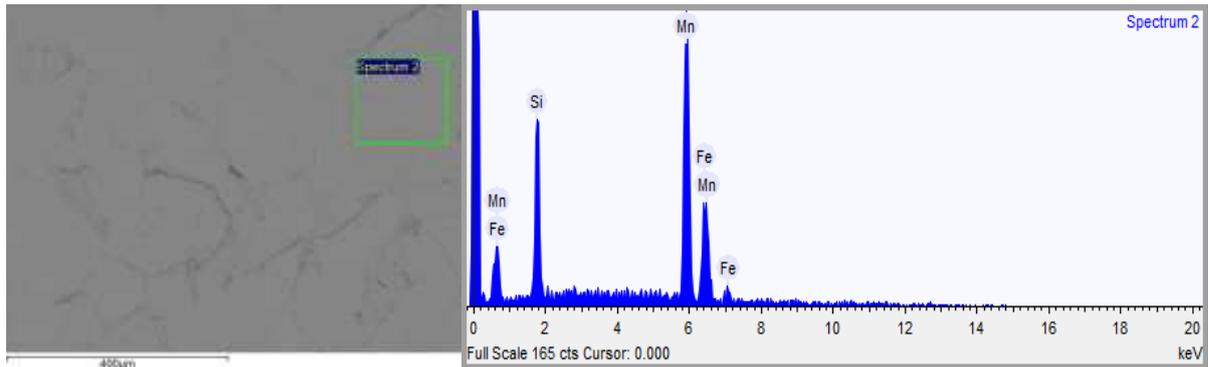
Figura 33 - Imagens feitas por microscopia eletrônica de varredura, da liga Fe-Si-Mn.



Fonte: Autor, 2018.

Na figura 34 está o EDS da liga estudada neste trabalho, o qual mostrou os elementos presentes e seus teores de forma precisa. Foi feito o EDS de várias amostras e de diferentes regiões das mesmas, e observou-se bastante similaridade em sua composição, independente das amostras ou região adotada, sempre seguindo um padrão específico, com variações mínimas nos teores dos elementos presentes na liga. Na tabela 3 podem-se observar as composições dos elementos constituintes da liga em porcentagem peso e atômica.

Figura 34 - Imagem feita em microscopia eletrônica de varredura, com auxílio do EDS.



Fonte: Autor, 2018.

Tabela 03 - Quantificação dos elementos presentes na liga.

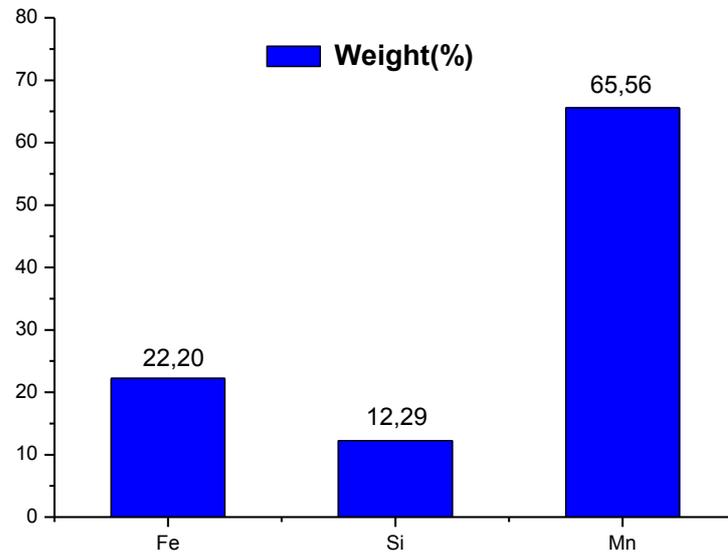
Elemento	Peso %	Peso % σ	Atômico %
Silício	13.545	0.714	23.524
Manganês	66.683	1.479	59.207
Ferro	19.772	1.499	17.269

Fonte: Autor, 2018.

A figura 35 apresenta na forma de gráfico os resultados obtidos em função da análise de composição da liga feita com o EDS, confirmando as especificações químicas da ferro liga, que são os teores de ferro entorno de 20%, silício aproximadamente 12% e o manganês ficando entre 65 e 66%, todos os valores estão em porcentagem peso.

Foram analisadas varias regiões de uma mesma amostra, para se ter maior eficiência na quantificação dos elementos presentes. Sendo assim, obtiveram-se vários resultados semelhantes, tirou-se uma média dos valores para se chegar a valores mais precisos, os quais estão expostos na forma de gráfico, na figura 35.

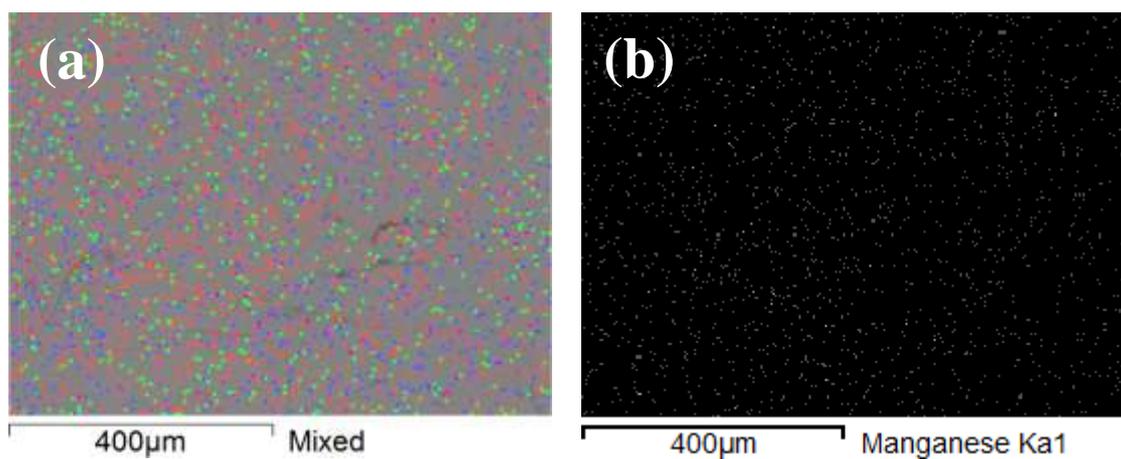
Figura 35 - Composição total da ferro liga ferro-silício-manganês feita com o auxílio do EDS.

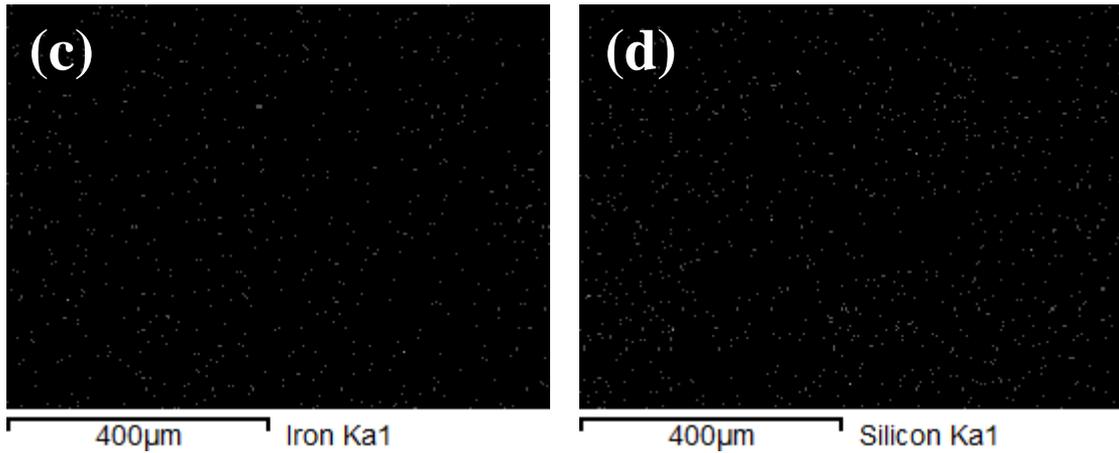


Fonte: Autor, 2018.

O mapa de cores deixa evidente nas regiões da amostra os seus constituintes presentes, nos quais se conferem a presença de cada elemento. De acordo com as figuras 36(a), (b), (c) e (d) vemos a uniformidade da composição, ou seja, sua distribuição perante a mistura.

Figura 36 - Mapa de elementos: Manganês (vermelho) (b), Ferro (verde) (c), Silício (azul) (d).



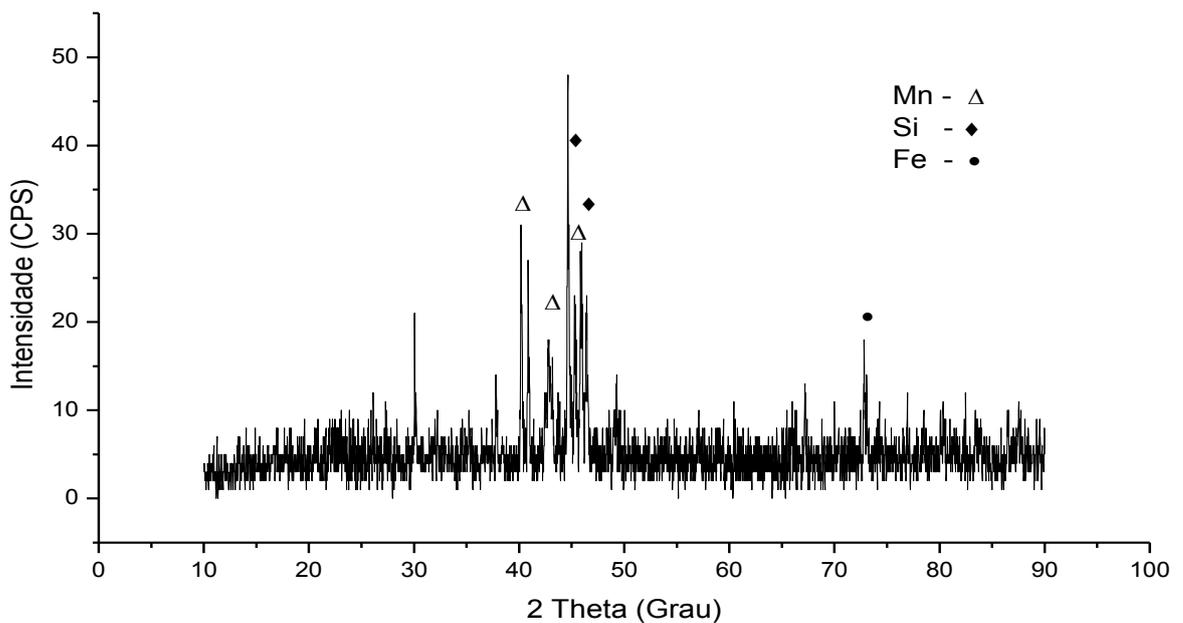


Fonte: Autor, 2018.

9.1.4. Análise do Difratoograma de Raios – X

O difratograma resultante das análises em raios-x demonstrou a presença das fases de interesse para este trabalho, as quais já eram esperadas, que foram a presença de ferro, silício e manganês, como se pode ver na figura 37. Ao analisar o DRX percebeu-se que, com certa frequência os picos dos elementos que foram identificados, apareciam também no composto $Mn_4 \cdot 6FeO \cdot SiO_3$.

Figura 37 - Resultados de difração de raios-x da liga Fe-Si-Mn.



Fonte: Autor, 2018.

9.2. ANÁLISES DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS

9.2.1 Ensaio de Impacto

De acordo com o ensaio de impacto tipo Charpy, se teve um uso reduzido de corpos de prova e o ensaio foi de fácil execução, e é visto na literatura como sendo bem utilizado para materiais de caráter frágil como os materiais metálicos frágeis. Alguns corpos de prova tiveram certa porosidade interna e também em sua superfície, a qual foi oriunda do processo de vazamento da liga no molde, o que acarretou em valores de absorção de energia menores, durante o ensaio. Seguem na tabela 4 os valores de absorção de energia ao impacto. O corpo teve sua fratura na região entalhada, ocorrendo sem qualquer tipo de deformação apreciável, e a alguns corpos de prova fraturaram em três pedaços.

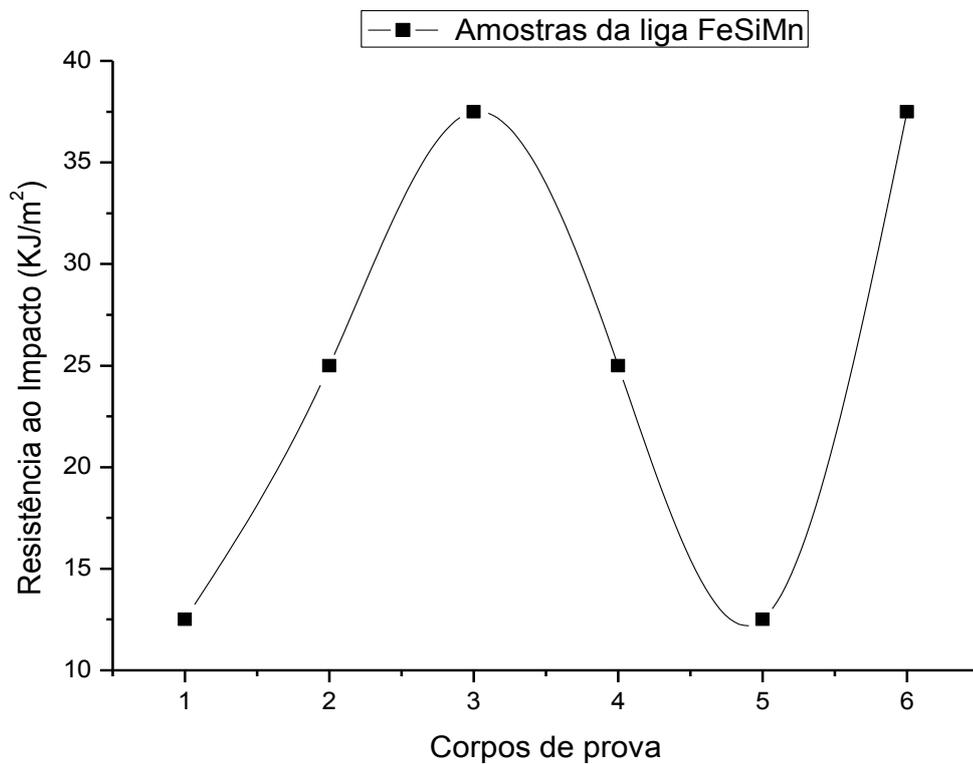
Tabela 4 – Energia absorvida pelos corpos de prova durante o ensaio de impacto.

Corpos de prova	Energia absorvida (J)
1	1
2	2
3	2
4	1
5	3
6	3

Fonte: Autor, 2018.

Através do ensaio realizado, com base nas dimensões do corpo de prova e nos parâmetros do ensaio de impacto tipo Charpy, calculou-se a resistência de impacto dos corpos ensaiados. O cálculo é determinado pela equação (1), realizando o mesmo procedimento para todos os corpos de prova, com seus respectivos valores de energia absorvida até a fratura e com uso das dimensões de sua secção transversal no eixo do entalhe. Os resultados estão expostos na forma de gráfico na figura 38.

Figura 38 - Resultados do ensaio de impacto – Resistencia ao impacto.



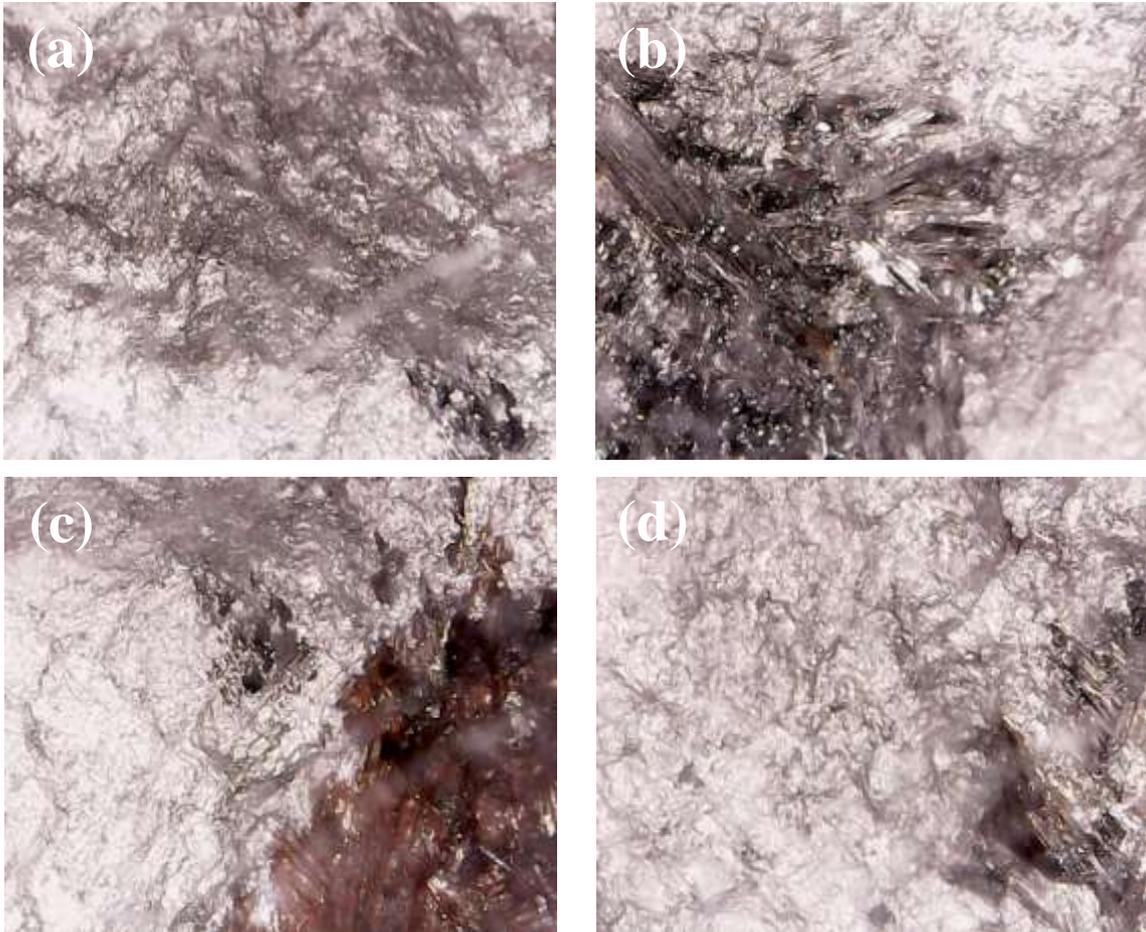
Fonte: Autor, 2018.

9.2.1.1. Análise da fratura dos corpos de prova de impacto

De acordo com os corpos de prova fraturados durante o ensaio de impacto, não houve deformação plástica e se teve baixa absorção de energia até a fratura.

A fratura ocorrida nos corpos de prova é identificada como frágil devido ter as características correspondentes que já foram mencionadas anteriormente, além deste tipo de fratura ter uma região com aspecto mais brilhoso, vale ressaltar que a região de fratura possui aspecto de fraturas transgranulares, como mostra as figuras 39(a), (b), (c) e (d).

Figura 39 - Zona da fratura dos corpos de prova ensaiados por impacto a temperatura ambiente com auxílio de uma lupa com aumento de 100x.



Fonte: Autor, 2018.

9.2.2 Ensaio de dureza

Neste ensaio avaliaram-se as amostras em seu ponto de vista estrutural através de um durômetro com escala em Rockwell A. A liga estudada tem um carácter de dureza elevado, ou seja, seguindo os parâmetros básicos da engenharia, quanto maior a dureza do material mais frágil ele será. Os resultados do ensaio de dureza foram convertidos da escala Rockwell A para a escala Brinell para fins de melhores análises, os resultados estão expostos na tabela 5.

Tabela 5 - Resultados do ensaio de dureza convertidos para a escala Brinell.

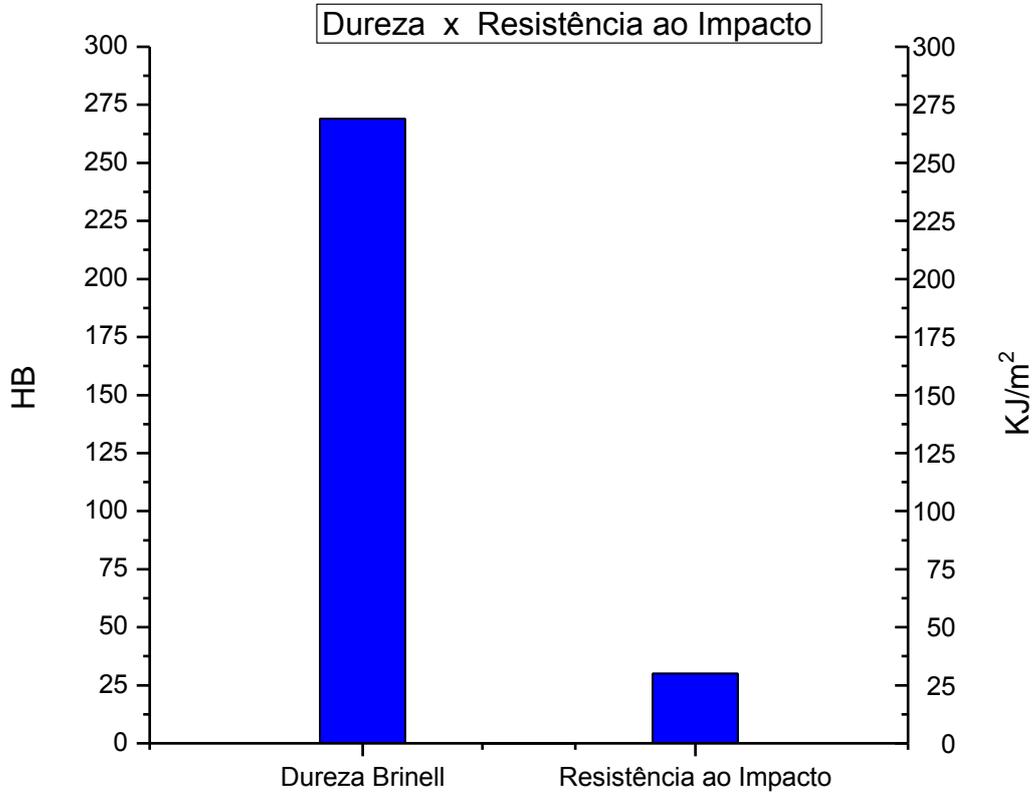
Medições	HRA	HB
Ponto 1	57.8	204
Ponto 2	64.2	271
Ponto 3	70.4	369
Ponto 4	59	214
Ponto 5	62.8	253
Ponto 6	68.4	333
Ponto 7	60.2	225
Média	63.25	267

Fonte: Autor, 2018.

9.2.3. Comparativo entre dureza e tenacidade

Com base nos resultados discutidos sobre os resultados de dureza e resistência ao impacto em função da ferro liga, podemos chegar à conclusão de que a dureza e a tenacidade ao impacto são parâmetros inversamente proporcionais, sendo assim, quanto mais duro for o material menos tenaz ele será. Logo os corpos de prova de impacto que tiveram menores valores de energia absorvida seriam amostras com uma dureza mais elevada. Esta situação é bem exemplificada no gráfico de barras na figura 40.

Figura 40 - Gráfico comparativo entre o valor médio dos resultados de dureza Brinell e resistência ao impacto.



Fonte: Autor, 2018.

10. CONCLUSÃO

Neste trabalho avaliou-se a liga ferro-silício-manganês tanto do ponto de vista microestrutural, quimicamente e em relação a propriedades mecânicas, de acordo com o que mais condizia a ser analisado. Embora já se soubesse os elementos constituintes da liga, a mesma vem de um processo de redução de minérios de manganês e ferro em forno elétrico de redução, onde ocorrem várias reações químicas e operações automatizadas durante o processo de redução, nas quais podem intervir na composição final da liga. Sendo assim, foram feitas análises químicas de várias amostras e diferentes regiões das mesmas que frisaram as especificações químicas da liga de uma forma mais precisa e detalhada, mostrando também as fases presentes, reafirmando os elementos chave presentes na microestrutura final do material.

Em relação às propriedades mecânicas, constatou-se que os corpos que tinham pequena porosidade interna e superficial refletiram de forma significativa para que os mesmos tivessem uma menor absorção de energia. Vale ressaltar que o fato do material estudado ter caráter de elevada dureza, resultando assim em uma menor tenacidade ao impacto, então se pôde correlacionar as duas variáveis comprovando que estas se comportam de maneira inversamente proporcional.

10.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Estabelecer novos parâmetros para se analisar a liga ferro-silício-manganês, já que este estudo foi de certa forma inicial e breve.

Com base nos ensaios já realizados neste trabalho, continuar a estudar as propriedades mecânicas da liga, sendo assim realizar outros tipos de ensaios mecânicos, como flexão, fluência, ente outros, ou até mesmo melhorar o que foi realizado neste trabalho, como melhorar o processo de confecção dos corpos de prova de impacto, evitando a porosidade existente.

Estudar a influencia que cada elemento presente tem na liga, de acordo com o seu teor na ferro liga.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, M. L. A, CUNHA, L. M. S., GANDRA, G. T. Panorama da Indústria Mundial de Ferroligas, n.º 10, Rio de Janeiro, 1999.

ANDRADE, M. L. A.; CUNHA, L. M. S. O setor siderúrgico. Disponível em: <www.bndes.gov.br/conhecimento/livrosetorial/setorial03.pdf>. Acesso em 22/10/2011.

ASTM Standard E23-9404^a – Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials. American Society for Testing and Materials (1994).

BATISTA, A. A. M., LÓES, H. R., OLIVEIRA, V. F. Levantamento da situação ambiental e energética do setor de ferroligas e silício metálico no Estado de Minas Gerais, prospecção de ações para o desenvolvimento sustentável da atividade. Fundação Estadual do Meio Ambiente, Belo Horizonte, p. 184, dez. 2010.

BENIQUE, F. S. B. Contribuição à Auto-redução Carbotérmica de Aglomerados contendo Óxidos de Manganês. v. 35, n. June 2001, p. 161, 2007.

BRASIL, S. P. A ENERGIA E GÊNERO INDUSTRIAL DE FERROLIGAS : Sinclair Mallet Guy Guerra , Álvaro Martins DE / FE / UNICAMP CP 6122. p. 1–12, 1999.

BOGADO, M.S.B. Avaliação da microestrutura, dureza e impacto de uma liga do sistema Al-Cu. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará. 2014.

CALLISTER, W. D.; Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução. Rio de Janeiro: LTC, 2000. 589p.

CARVÃO VEGETAL – WIKIPÉDIA, A ENCICLOPÉDIA LIVRE. Disponível em: https://pt.wikipedia.org/wiki/Carv%C3%A3o_vegetal. Acessado em: 12/02/2018.

CHAUDHARY, P. N.; GOEL, R. P.; ROY, G. G. Dephosphorization of high carbon ferromanganese using BaCO₃ based fluxes. Ironmaking and Steelmaking, 2001. vol. 28, n° 5.

CHIAVERNI, V. Tecnologia mecânica: Estrutura e Propriedades das Ligas Metálicas. 2ªEd. São Paulo: McGraw-Hill, 1986.

CHIAVERINI, V. Aços e ferros fundidos. ABM, 6ª Edição. São Paulo, 1990.

DIETER, G. E. Metalurgia Mecânica. Ed. Guanabara Dois, 2a. ed., 1.981.

Difração de Raios X - 2008. Disponível em: <http://www.angelfire.com/crazy3/qfl2308/1_multipart_xF8FF_2_DIFRACAO.pdf> Acessado em 01/03/2018.

KRUGER, P. VON. Relatório Técnico 60- PERFIL FERROLIGAS (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA -MME). J. Macedo Consultoria - Ministerio De Minas E Energia (Mme), v. 315517, 2009.

LAMEIRA, C. P. T. Controle e otimização de processo de produção de ferroligas de manganês em uma indústria siderúrgica. 2011. 53 f.. Trabalho de Conclusão de Curso - Faculdade de Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Pará, Marabá, 2011.

LÚCIO, G. et al. Characterization of Manganese Alloy Residues for the Recycling of FeSiMn and High-Carbon FeMn fines. Materials Research, v. 11, n. 4, p. 405–408, 2008.

MALISKA, A. M. Microscopia Eletrônica de Varredura - Microscopia Eletrônica de Varredura e Microanálise, p. 98, 2000.

MINÉRIO DE MANGANÊS. Disponível em: <https://portuguese.alibaba.com/product-detail/manganese-ore-18-20-hard-lump-700-mt-132764274.html>. Acessado em: 12/02/2018.

MINERAÇÃO FRONTERIA. Disponível em: <http://www.mineracaofronteira.com.br/produtos.html>. Acessado em: 12/02/2018.

MME – Ministério de Minas e Energia. Anuário estatístico do setor metalúrgico. Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral, Departamento de Transformação e Tecnologia Mineral, 2012.

OBTENÇÃO DE FERRO - OBTENÇÃO DE FERRO E DE AÇO EM SIDERÚRGICAS -

MUNDO EDUCAÇÃO. Disponível em:
<http://mundoeducacao.bol.uol.com.br/quimica/obtencao-ferro.htm>. Acessado em: 12/02/2018.

OLIVEIRA, R.W.H. Caracterização da escória de ferro-silício-manganês para aplicação como agregado em pavimentação ferroviária. Dissertação de Mestrado. UFOP. Ouro preto. 2013

PANDOLFO, D. Estudo da tenacidade ao impacto de um aço SAE 1020 submetido a tratamentos térmicos. Porto Alegre. Trabalho de Conclusão de Curso. PUCRS, 2009

QUARESMA, L. F. Produto 11 - Minério de Manganês. Relatório Técnico 19: Perfil da mineração de manganês. Ministério de Minas e Energia - MME. Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral, p. 40, 2007.

SINDIEXTRA. Ferro Ligas. p. 16, 2011. Acessado em: 27 maio. 2016, 23:32:35.1

SILVEIRA, R.C & ALMEIDA, A.M.M. Projeto e operação dos fornos elétricos de redução. São Paulo: editora Associação Brasileira de Metais, 1987.

SOUZA, S. A. Ensaios Mecânicos de Materiais Metálicos – Fundamentos teóricos e práticos. 5ª Edição. São Paulo: Editora Blucher, 1982.

TECNOLOGIAS DE RECICLAGEM - NOSSAS ATIVIDADES. Disponível em:
<http://www.paulwurth.com/pt/NOSSAS-ATIVIDADES/Tecnologias-de-Reciclagem/i-Meltor>.
Acessado em: 12/02/2018.

TRINDADE, S.,CUNHA, A. A. Avaliação da influência da composição Mineralógica no consumo energético na Produção de ligas de manganês. ABM Week. 330-337. 2016.

VANDER VOORT, George F. et al. ASM handbook. Metallography and microstructures, v. 9, p. 44073-0002, 2004.