

MARCO ANTÔNIO BAPTISTELLA

CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL DE UM AÇO AAR- M 201 GRAU E, EM  
ENGATE FERROVIÁRIO FIXO TIPO “F“, APÓS MAGNETIZAÇÃO POR PRODS NO  
ENSAIO COM PARTÍCULAS MAGNÉTICAS

Dissertação apresentada à Faculdade de  
Engenharia do Campus de Guaratinguetá,  
Universidade Estadual Paulista, para a obtenção  
do título de Mestre em Engenharia Mecânica na  
área de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo dos Santos Pereira

Co-orientadora: Prof<sup>ª</sup> Dra. Cristina de Carvalho  
Ares Elisei

Guaratinguetá 2016

B222c	<p>Baptistella, Marco Antonio</p> <p>Caracterização microestrutural de um aço aar- m 201 grau e, em engate ferroviário fixo tipo “F”, após magnetização por PRODS no ensaio com partículas magnéticas / Marco Antonio Baptistella – Guaratinguetá, 2016.</p> <p>131 f : il.</p> <p>Bibliografia: f. 121-126</p> <p>Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2016.</p> <p>Orientador: Prof. Dr. Marcelo dos Santos Pereira</p> <p>Coorientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Cristina de Carvalho Ares Elisei</p> <p>1. Aço de alta resistência. 2. Magnetização 3. Equipamento de ferrovia - Indústria. I. Título</p> <p style="text-align: right;">CDU 669.14(043)</p>
-------	---

Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá

"CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL DE UM AÇO AAR- M 201 GRAU E, EM  
ENGATE FERROVIÁRIO FIXO TIPO "F", APÓS MAGNETIZAÇÃO POR PRODS NO  
ENSAIO COM PARTÍCULAS MAGNÉTICAS"

**MARCO ANTÔNIO BAPTISTELLA**

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
"MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA"

PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA  
ÁREA: MATERIAIS

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

  
Prof. Dr. José Antonio Perrella Balestieri  
Coordenador

**BANCA EXAMINADORA:**

  
Prof. Dr. MARCELO DOS SANTOS PEREIRA  
UNESP/FEG

  
Prof. Dr. JOSÉ VITOR CANDIDO DE SOUZA  
UNESP/FEG

  
Prof. Dr. JOSÉ WILSON DE JESUS SILVA  
FATEA

Agosto de 2016

## **DADOS CURRICULARES**

### **MARCO ANTONIO BAPTISTELLA**

**NASCIMENTO:** 25.03.1969 – SÃO PAULO / SP

**FILIAÇÃO:** MOACYR BAPTISTELLA (*in memorian*)

AUGUSTA TREVISOL BAPTISTELLA

**1987/ 1992** Curso de Graduação:  
Engenharia Metalúrgica, na Faculdade de Engenharia Industrial FEI –  
São Bernardo do Campo – SP

**1998** Curso de Pós Graduação em Engenharia da Qualidade – Universidade  
de São Paulo – USP – EEL – Lorena - SP

**2003** Curso de Pós Graduação em Engenharia da Produção – Universidade  
Estadual Paulista – UNESP – Campus de Guaratinguetá – SP

**2015** Curso de Pós Graduação em Engenharia de Segurança do Trabalho –  
Universidade Cândido Mendes –UCAM -Campos dos Goytacazes - RJ

**1990 – 2016** 26 anos de trabalho em fundições de ferro e aço e montadoras, atuando  
como Engenheiro e Gerente de Qualidade e Produção

*De modo carinhoso, à minha esposa Patrícia Baptistella e ao meu filho Matheus Baptistella, que foram os grandes motivadores para que eu concluísse este curso.*

## AGRADECIMENTOS

A Deus, criador e pai de todos nós e razão da nossa permanência na terra.

À minha esposa Patrícia Baptistella e ao meu filho Matheus Baptistella, que sempre me incentivaram e souberam reconhecer todo este tempo ausente.

Aos meus pais Moacyr Baptistella (*in memorian*) e Augusta Trevisol Baptistella, que sempre incentivaram meus estudos, independentemente das dificuldades.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Marcelo dos Santos Pereira, Diretor da UNESP-FEG do período de 2012 a 2016, que pacientemente me acolheu e me incentivou, nos momentos mais difíceis, e me ajudou muito na conclusão do curso, bem como nos ensinamentos transmitidos.

À minha co-orientadora Cristina de Carvalho Ares Elisei, Diretora da FATEC de Pindamonhangaba, por todas as horas e tempo despendido.

Ao profissional e nível II de Ultrassom e Partículas Magnéticas, Adão Ribeiro Costa, por ter magnetizado o engate ferroviário e pelas literaturas fornecidas.

Ao Sr. Wanderson Lopes Marques e ao Bruno Peres Marchesani, técnicos de PM e Ultrassom nível II, pelo treinamento realizado na FATEC, junto aos professores e aos colaboradores.

Ao Sr. Lino Cesar Pereira, Técnico Especialista Eletrônico, por ter revisado e calibrado o equipamento de magnetização com Prods, da FATEC de Pindamonhangaba.

Aos operadores logísticos ferroviários, por terem cedido o engate ferroviário e dado todo o incentivo para análise deste trabalho.

À Güenka e em especial ao Sr. Léo Güenka pela guarda do engate e posterior corte, para permitir a magnetização da cauda do engate, na FATEC de Pindamonhangaba.

À modelação São Roque, por ter cortado os corpos de prova a frio em serra de fita, para permitir posterior preparação destes corpos de prova magnetizados para análise.

Ao Sr. Flávio Silva, à Prof. Gisélia Alves de Souza, a aluna de Graduação Eula Paula Mendes Soares Santos, por toda ajuda na obtenção das preparações metalográficas, corte, lixamento, polimento e fotos em microscopia ótica.

À Faculdade Santa Cecília - FASC e à Faculdade de Ciências Humanas de Cruzeiro - FACIC, ao Sr. Paulo Vieira e a toda diretoria e professores, pelo grande incentivo.

O futuro tem muitos nomes.  
Para os fracos é o inalcançável.  
Para os temerosos, o desconhecido.  
Para os valentes é a oportunidade.  
Victor Hugo

BAPTISTELLA, M. A. **Caracterização Microestrutural de um aço AAR M-201 Grau E, em Engate Ferroviário fixo tipo “F”, após magnetização por Prods no ensaio com Partículas Magnéticas.** 2016. 131 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica na área de Materiais) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2016.

## RESUMO

Atualmente, as cargas aplicadas nos eixos de vagões ferroviários têm sofrido aumento de esforços devido ao choque e tração no engate ferroviário. Neste trabalho o estudo foi realizado no engate tipo “F”, que tem maior utilização e interesse por parte da ferrovia, por se tratar de um engate rotativo e utilizado para descarregamento de vagões com os mais diversos tipos de carga. Este trabalho tem como objetivo, verificar se existem transformações da microestrutura no material do engate, e possíveis gerações de trincas, através do estudo do aço AAR M-201 Grau E, após o ensaio de partículas magnéticas, com corrente alternada através da aplicação de Prods. A faixa de amperagem variou-se de 100 a 1000 ampères e como meio de resfriamento, utilizou-se a água a temperatura ambiente e o ar forçado. A preparação foi feita partindo de um engate Tipo “F” completo, fornecido por um operador logístico, a cauda foi magnetizada por inteiro e depois separados os corpos de prova por corte de serra, refrigerado para não haver aquecimento. Para a caracterização microestrutural, utilizou-se uma preparação metalográfica de laboratório de bancada e ataque com Nital 2%, e fez-se uso de microscopia ótica convencional e microscopia eletrônica de varredura (MEV). Através da utilização da microscopia ótica e da microscopia eletrônica de varredura (MEV), pode-se verificar a microestrutura nas áreas que sofreram alterações microestruturais. Concluiu-se que o aço do engate, AAR M-201 grau E, após a magnetização por Prods de 300 a 1000 ampères, apresentou alteração microestrutural, onde observou-se uma estrutura de martensita acicular não revenida e geração de trincas, a mesma alteração microestrutural foi observada em amostras com resfriamento ao ar, porém sem a geração de trincas, em ampliações de 50 vezes foi nítido o efeito de queima provocado pelo Prods no material, bem como sua extensão, evidenciando áreas centrais de atuação do Prods, zonas de transição e áreas não afetadas. As trincas tiveram comportamento de propagação intergranular, para ampliações de 9300 vezes em MEV, pode-se observar que as mesmas se propagaram somente nas áreas com martensita e contornaram as áreas com maior presença da fase ferrítica.

**PALAVRAS-CHAVE:** Aço ferroviário. Magnetização. Prods. Indústria ferroviária. Partículas magnéticas.



BAPTISTELLA, M. A. **Caracterização Microestrutural de um aço AAR M-201 Grau E, em Engate Ferroviário fixo tipo “F”, após magnetização por Prods no ensaio com Partículas Magnéticas.** 2016. 131 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica na área de Materiais) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2016.

### ABSTRACT

Currently, the applied loads on the axles of railway cars has been increasing efforts due to shock and traction in railway coupling. In this work, the study was performed on the coupling type "F", which has increased use and interest on the part of the railway, because it is a rotary coupling and used for unloading of wagons with the most diverse types of cargo. This work aims, check for microstructural changes on the coupling material, and possible generation of cracks through the study of steel AAR M-201 grade and after the test of magnetic particles with alternating current by applying Prods. As amperage range, was varied from 100 to 1000 amps and as cooling medium water was used at room temperature and forced air. The preparation was made starting from a coupling type "F" full, provided by a logistics operator, the tail was magnetized in full and then separate the specimens by cutting saw, cooled to no heating. For microstructural characterization, we used a metallographic preparation of benchtop laboratory and attack Nital 2%, and was made use of conventional optical microscopy and scanning electron microscopy (SEM). By using light microscopy and scanning electron microscopy (SEM), you can check the microstructure in areas that suffered microstructural changes. It was concluded that the coupling of steel, AAR M-201 grade And after magnetization by Prods 300-1000 amps, presented change microstructural where there was a martensite acicular structure not tempered and generation of cracks, the same change microstructural was observed in air to cooling with samples, but without generating cracks at magnifications of 50 times was clear the burning effect caused by Prods in the material as well as its extension, showing the central areas of the Prods activities, transition zones and unaffected areas. The intergranular crack propagation behavior had to 9300 times magnification under SEM, it can be seen that they have spread only in areas with martensite and rounded areas with the greatest presence of the ferritic phase.

KEYWORDS: Rail steel. Magnetization. Prods. Railway industry. Magnetic particles.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 01	Engate acoplado padrão AAR M-201 grau E - Tipo “F” Ferrovia Americana.	17
Figura 02	Curva de Histerese.....	18
Figura 03	Diagrama Ferro Carbono.....	21
Figura 04	Martensita e ferrita.....	22
Figura 05	Bainita produzida pela austêmpera.....	23
Figura 06	Componentes do engate.....	28
Figura 07	Forno trifásico de eletrodos.....	29
Figura 08	Processo de Aciaria.....	30
Figura 09	Vazamento do aço.....	31
Figura 10	Vazamento do aço, do forno para a panela refratária.....	31
Figura 11	Mandíbula e machos da mandíbula.....	32
Figura 12	Processo de moldagem.....	34
Figura 13	Vazado em moldes de areia de sílica em caixas metálicas.....	35
Figura 14	Desmoldagem.....	36
Figura 15	Quebra de canais e massalotes.....	37
Figura 16	Processo de decapagem.....	37
Figura 17	Grafitagem e solda visual.....	38
Figura 18	Processo de normalização.....	39
Figura 19	<i>Shot Peening</i> .....	40
Figura 20	Processo de acabamento.....	41
Figura 21	Processo de reparo por solda.....	42
Figura 22	Processo de pintura.....	43
Figura 23	Peça final após pintura.....	44
Figura 24	Componentes do engate em detalhes.....	45
Figura 25	Uma visão esquemática da frente do sistema choque tração.....	46
Figura 26	Carregando um engate em máquina de ensaio universal de tração e compressão.....	47
Figura 27	Engate com extensômetro para registro de gráfico de tensões x deformações.....	47
Figura 28	Máquina universal de ensaio.....	48
Figura 29	Técnica de inspeção por Prods.....	50
Figura 30	Manuseio de prods.....	51
Figura 31	Equipamento de magnetização portátil tipo yoke.....	58

Figura 32	Croqui esquemático de um engate exemplificando a retirada dos CPs.....	62
Figura 33	Corte do engate.....	63
Figura 34	Máquina estacionária de partícula magnética detectores de trincas, com o uso de Prods.....	63
Figura 35	Vista Frontal e Lateral do Equipamento de Corte ( <i>Cut-off</i> com Disco de Corte Abrasivo para Aço).....	66
Figura 36	Desmoldante, baquelite, e prensa embutidora.....	66
Figura 37	CPs 01 a 13 embutidos.....	67
Figura 38	Lixadeiras AROTEC 110V com discos de lixa substituíveis (220, 320, 400, 800, 1000 e 2000).....	68
Figura 39	(a) e (b) Politrizes AROTEC 110V com feltro de polimento. (c) Pastas abrasivas (Sílica e alumina).....	69
Figura 40	À esquerda nital 10% , e a direita nital 2%.....	70
Figura 41	Foto do microscópio de luz refletida.....	70
Figura 42	Representação do Espectrômetro ARL utilizado para a análise Química das amostras.....	71
Figura 43	Microscópio eletrônico de varredura acoplado a uma micro sonda EDS de raios-X.....	71
Figura 44	Microscópio eletrônico de varredura acoplado a uma micro sonda EDS de raios-X.....	72
Figura 45	Fotomicrografia CP 01 (sem magnetização).....	76
Figura 46	Fotomicrografia CP 02 (100 ampères, resfriamento a água).....	79
Figura 47	Fotomicrografia CP 03 (200 ampères, resfriamento a água).....	82
Figura 48	Fotomicrografia CP 04 (300 ampères, resfriamento a água).....	84
Figura 49	Fotomicrografia CP 05 (400 ampères, resfriamento a água).....	87
Figura 50	Fotomicrografia CP 06 (500 ampères, resfriamento a água.....	90
Figura 51	Fotomicrografia CP 07 (800 ampères, resfriamento a água).....	93
Figura 52	Fotomicrografia CP 08 (1000 ampères, resfriamento a água).....	96
Figura 53	Fotomicrografia CP 09 (100 ampères, resfriamento ao ar forçado).....	99
Figura 54	Fotomicrografia CP 10 (200 ampères, resfriamento ao ar forçado).....	101
Figura 55	Fotomicrografia CP 11 (300 ampères, resfriamento ao ar forçado).....	103
Figura 56	Fotomicrografia CP 12 (500 ampères, resfriamento ao ar forçado).....	106
Figura 57	Fotomicrografia CP 13 (900 ampères, resfriamento ao ar forçado).....	109
Figura 58	Imagem 1 CP 08 – ampliação de 370x e técnica EBSD com 15 kV.....	112

Figura 59	Análise Química realizada por microscópio eletrônico de varredura acoplado a uma micro sonda EDS de raios-X. Realizado no MEV.....	119
Figura 60	Imagem 2 – CP 08 ampliação de 1650x e técnica EBSD com 15 kV.....	114
Figura 61	Imagem 3 – CP 08 ampliação de 2600x e técnica EBSD com 15 kV.....	115
Figura 62	Imagem 4 – CP 08 ampliação de 5700x e técnica EBSD com 15 kV.....	116
Figura 63	Imagem 5 – CP 08 ampliação de 5800x e técnica EBSD com 15 kV.....	117
Figura 64	Imagem 6 – CP 08 ampliação de 9300x e técnica EBSD com 15 kV.....	118

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AAR	Association of American Railroad (Associação de Ferrovias Americanas)
AL	Alongamento
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
B	Boro
C	Carbono
CA	Corrente alternada
CC	Corrente continua
CCC	Cúbica de corpo centrada
CEq	Carbono equivalente
CFC	Cúbica de face centrada
CP	Corpo de prova
Cr	Cromo
CSL	<i>Coincident Site Lattice</i>
Cu	Cobre
Fe	Ferro
FACIC	Faculdade de Ciências Humanas de Cruzeiro
FASC	Faculdade de Santa Cecília
FATEC	Faculdade de Tecnologia
FEG	Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá
FMEA	<i>Failure Mode and Effect Analysis</i>
HB	<i>Hardeness Brinell (Dureza Brinell)</i>
Hz	Unidade de frequência
Kg	Quilograma
Kgf	Quilograma força
K <sub>1c</sub>	K <sub>1c</sub> - Tenacidade à fratura
Le	Limite de escoamento
Lr	Limite de resistência
Mn	Manganês
MnS	Sulfeto de Manganês
Mo	Molibdênio
MPa	MegaPascal
Ni	Níquel
P	Fósforo
Ppm	Partes por milhão
RA	Redução de área
S	Enxofre
Si	Silício
Ti	Titânio
TiN	Nitreto de Titânio
UIC	União Internacional Ferroviária
V	Volts
Va	Vanádio

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\gamma$	Ferro gama – Austenita
$\alpha$	Ferro alfa – ferrita
=	Igual
<	Menor
$\mu\text{m}$	Micrômetro
$^{\circ}\text{C}$	Grau Celsius
$c$	Constante
Q	Energia de ativação
R	Constante universal dos gases
T	Temperatura absoluta
V	Velocidade da reação ou transformação

## SUMÁRIO

### LISTA DE FIGURAS

### LISTA DE ABREVIACÕES E SIGLAS

### LISTA DE SÍMBOLOS

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>17</b>
1.1.	OBJETIVO .....	23
<b>2.</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>25</b>
2.1.	AÇOS.....	25
2.2.	FERROVIAS .....	27
2.3.	FUNDIÇÃO.....	29
2.3.1.	Aciaria.....	30
2.3.2.	Modelação.....	32
2.3.3.	Moldagem.....	33
2.3.4.	Fusão e vazamento do metal.....	34
2.3.5.	Desmoldagem.....	35
2.3.6.	Dispositivos e martelete para remoção de areia.....	36
2.3.7.	Quebra de canais e massalotes.....	36
2.3.8.	Decapagem.....	38
2.3.9.	Grafitagem e solda visual.....	38
2.3.10.	Normalização.....	38
2.3.11.	<i>Shot Peening</i> .....	39
2.3.12.	Acabamento (rebarbação fina + calibração + pequenas soldas + montagem da chapa de desgaste).....	40
2.3.13.	Reparo por solda (maior volume).....	41
2.3.14.	<i>Shot Peening</i> após reparo para evitar novo tratamento térmico.....	42
2.3.15.	Pintura.....	43
2.4.	ENGATES FERROVIÁRIOS.....	44
2.5.	ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS – END.....	49
2.5.1.	Magnetização por Prods.....	49

2.6.	CRESCIMENTO DE GRÃOS.....	51
2.7.	ASPECTOS DE FALHA E PRODUÇÃO.....	52
2.8.	INSPEÇÃO POR PARTICULAS MAGNÉTICAS.....	53
<b>3.</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>61</b>
3.1.	AÇO AAR M-201 GRAU E .....	61
3.2.	PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA .....	61
3.3.	MAGNETIZAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA .....	63
3.4.	RESFRIAMENTO DOS CORPOS DE PROVA ENSAIO DE MAGNETIZAÇÃO ..	64
3.5.	PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA .....	65
3.5.1.	Corte .....	65
3.5.2.	Embutimento .....	66
3.5.3.	Lixamento .....	67
3.5.4.	Polimento .....	68
3.5.5.	Ataque Químico .....	69
3.6.	ANÁLISE METALOGRÁFICA.....	70
3.7.	ANÁLISE QUÍMICA .....	71
3.8.	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA .....	72
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>74</b>
4.1.	RESULTADOS.....	74
4.2.	ANÁLISE MICROESTRUTURAL .....	75
4.3.	RESULTADOS DA MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV).....	112
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>119</b>
<b>6.</b>	<b>SUGESTÕES.....</b>	<b>120</b>
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>121</b>
<b>ANEXO 1</b>	<b>.....</b>	<b>127</b>
<b>ANEXO 2</b>	<b>.....</b>	<b>128</b>



## 1. INTRODUÇÃO

O material analisado neste trabalho é o aço AAR M-201 Grau E, e a peça analisada é um Engate Ferroviário Tipo F, onde os engates do tipo E e do tipo F estão entre os mais utilizados pelas indústrias ferroviárias. O engate do tipo F é utilizado quando se tem o descarregamento de forma rotativa do vagão, vide Figura 01, cujo equipamento de descarga denomina-se *Car Dumper*, exigindo ainda mais em termos de tensões aplicadas ao engate, e não somente os esforços de tração e compressão aos quais são submetidos quando em serviço. Os engates são inspecionados por ensaios não destrutivos, através de aplicação de partículas magnéticas e magnetização por Prods, conforme planos de controle que retratam a norma AAR M-201 (2011). Quando em serviço são inspecionados conforme o Manual de Campo do AAR – *Field Manual* (2016), ou por suas últimas revisões disponíveis, cujas normas identificam muito bem as áreas críticas a serem inspecionadas através de croquis hachurados de cada peça ou componente. E estas áreas são denominadas críticas em termos de tensões e de inspeção.

Figura 01: Engate acoplado padrão AAR M-201 grau E - Tipo “F” Ferrovia Americana.



Fonte: Próprio Autor.

Existem relatos que houve elevação da carga por vagão e, conseqüentemente, por eixo, de acordo com o que demonstra BOELENA (2004). Nos últimos anos, as cargas cresceram em média de 16%. Entende-se por crescimento de carga o aumento do peso por vagão e conseqüentemente por eixo, o que ocasiona um aumento de tensão trativa no engate, e que pode levar ao surgimento de trincas ou mesmo propagação de trincas pré existentes no material, ou ainda redução da vida do engate.

Conforme Toller (2008), um determinado operador logístico que utilizava 2600 vagões e 186 locomotivas em 1986, dizia que nesta época as trincas de componentes eram raras, e não havia estatística significativa de fraturas do sistema de choque e tração, onde se compreende o engate, neste trabalho estudado. E neste mesmo operador logístico, os vagões eram carregados com 119 toneladas e existiam estudos para aumentar a carga para 130 toneladas, capacidade esta que foi elevada para 130 toneladas para os vagões GDT, conforme Randon (2016).

Existe também a Associação de ferrovias americanas (AAR) que é uma das mais fortes associações de normalizações do mundo nesta área ferroviária, fruto do trabalho intenso de pesquisa tanto acadêmica quanto de prática de campo, com diversos dados de coleta dentro e fora dos Estados Unidos. Vários países colaboram com as pesquisas e também utilizam destas normas, como é o caso de todo o continente americano. No Brasil, utiliza-se muito as normas da AAR para os transportes de carga e também para o transporte de passageiros, mas este último utiliza-se também de normas Européias, como é o caso da UIC (União Internacional Ferrovias) para o metrô brasileiro, mas que não será motivo de estudo deste trabalho.

Há séculos observou-se que determinadas pedras tinham propriedades de atrair pedaços de ferro ou interagir entre si, essas pedras foram chamadas de ímãs naturais, e os fenômenos de atração e repulsão de fenômenos magnéticos. Essas pedras correspondem a um óxido de ferro,  $Fe_3O_4$  denominada Magnetita.(Landgraf, 2002)

Em 1796 Oersted, descobriu que uma corrente elétrica, que passava por um fio condutor, gerava um campo magnético, essa descoberta é a da relação entre o campo magnético e a corrente elétrica.

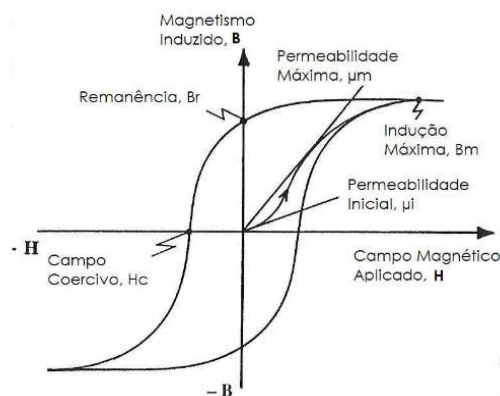
Atualmente, são utilizados os ímãs artificiais, ou seja, os equipamentos que utilizam a corrente elétrica para obter magnetismo, devido à vantagem e ao maior poder atrativo, podendo se adaptar da melhor forma ao tipo de uso. (Andreucci, 2014)

Define-se como sendo campo magnético, toda região próxima ou em torno de um fio condutor percorrido por uma corrente elétrica, ou em torno de um ímã. Para melhor entender, basta colocar um papelão sobre um ímã em forma de barra, espalhar camada fina de ferro sobre o papelão, e observar como a limalha se distribui uniformemente segundo as linhas de indução magnéticas. O conjunto dessas linhas de indução denomina-se espectro magnético e as extremidades chamadas, de dipolo norte e sul.

Essa curva é usada para indicar a magnetização e a desmagnetização do material. Cada tipo de material tem uma permeabilidade, essa permeabilidade pode ser determinada pelo aumento da força magnetizante até o material alcançar o seu ponto de saturação. O ponto de saturação é o ponto onde o aumento da força de magnetização não exerce mais nenhuma influência sobre o material. (Andreucci, 2014 apud Baptistella, 2014)

O modo mais comum para a avaliação das propriedades magnéticas de um material é a elaboração de sua curva de histerese, a Figura 02 demonstra a curva.

Figura 02: Curva de Histerese.



Fonte: Andreucci (2014 apud Baptistella, 2014)

Os materiais ferroviários são produzidos em larga escala e seriados, para tal com o passar do tempo, necessitou-se de uma inspeção de qualidade também de alta produtividade.

Os ensaios não destrutivos e dentro destes, os de partículas magnéticas, são requeridos em normas da AAR e de clientes da ferrovia.

A magnetização com partículas magnéticas passou a ser utilizada em todo o mundo, sendo um dos ensaios não destrutivos mais confiáveis na detecção de descontinuidades superficiais e sub superficiais, muitos fabricantes utilizam este ensaio, mas com a técnica do yoke, que será comentado posteriormente, e que não traz os efeitos de queima nas áreas inspecionadas e de contato com o equipamento, como é o sugerido pelo ensaio com magnetização por Prods, aqui estudado. (Andreucci, 2014 apud Baptistella, 2014)

Portanto na magnetização por Prods, tem-se um contato direto do eletrodo com a peça e destaca-se a passagem de corrente elétrica a qual sugere danos superficiais na estrutura, que será analisada neste trabalho.

O aço é equivalente a um aço ASTM (*American Society for Testing and Materials*) 13XX, Aço Carbono, com teores de Carbono da ordem de 0,30%, mas permitindo um Manganês mais elevado de 1,85% (Max), que irá conferir além de um maior carbono equivalente, uma maior temperabilidade ao material. Este será utilizado por ser um material aplicado no engate ferroviário, e utilizou-se para tal um engate do tipo “F”. Sabe-se que o engate tem apresentado falhas em campo, e o tempo para que estas ocorram, conforme relato dos usuários da ferrovia, assim denominados operadores logísticos ferroviários, que antes era de 30 a 50 anos, atualmente é de 05 a 10 anos. De acordo com Chundururu (2011), muitos engates estão sendo substituídos antes do término da sua vida útil esperada, gerando custos extras e não previstos de troca de componentes, além de custos de paradas de composições, que muitas vezes não é detectado nas manutenções periódicas das casas de máquinas destes operadores logísticos ferroviários.

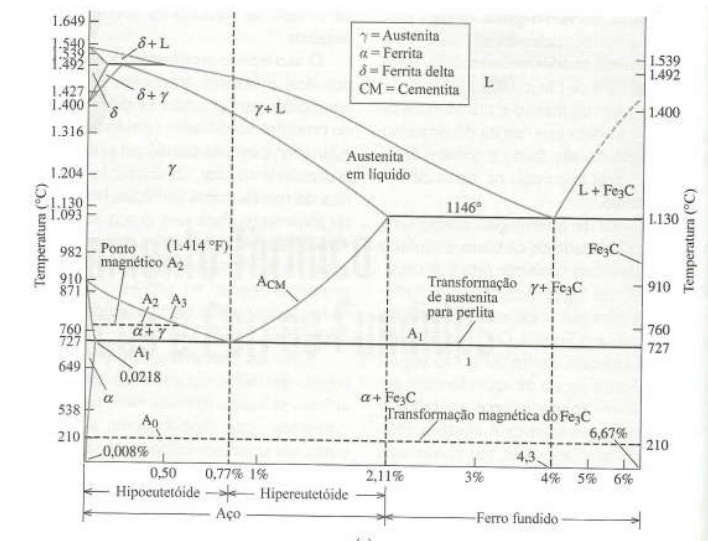
Os aços são ligas ferro-carbono que podem conter concentrações apreciáveis de outros elementos de liga (CALLISTER, 2014). Comumente, no mercado, são classificados em aços carbono, aço de média e alta liga, e ainda os micro ligados. Basicamente esta distribuição ocorre em função da composição química de cada liga.

É comum os aços serem conformados a quente, devido a menores níveis do limite de escoamento, quando submetidos a temperaturas elevadas. Conforme Colpaert (2008), o trabalho a quente é executado acima da zona crítica, onde nessa temperatura o aço é mais dútil do que a temperatura ambiente, por isso exige um menor esforço para ser deformado. Conforme o aço é conformado, ele vai se recristalizando de forma que os grãos não se

deformam, nucleando novos pequenos grãos. Com isso, o material pode ser conformado sem perder suas propriedades plásticas. O aço conformado acima da zona crítica recristaliza-se rapidamente, mas à temperatura ambiente não.

Para o aço carbono, normalmente espera-se uma estrutura martensítica na superfície e até certa profundidade, denominada de profundidade de têmpera. Esta estrutura é composta de agulhas de martensita, encontra-se mais acicular, e pontiaguda e é chamada de martensita não revenida, a qual é mais friável ou frágil que a martensita revenida, sendo que esta segunda sofre um processo de revenimento. Para que ocorra a têmpera, faz-se necessário aquecer acima da temperatura do patamar AL, conforme descrito na Figura 03 e disponível em Askeland (2008).

Figura 03: Diagrama Ferro Carbono.



Fonte: Askeland, 2008.

Após tratamento térmico, seja têmpera e revenimento ou mesmo quando é feito outro tratamento, denominado na literatura de Normalizado e Revenido, prescrito pela própria AAR (*Association of American Railroad* (Associação de Ferrovias Americanas)), deve-se fazer inspeções, visuais e por Partículas Magnéticas, ou mesmo por Ultrassom e Raios-X, sempre conforme especificação do cliente ou quando especificado em norma, de forma a atender ao especificado e quando solicitado em serviço.

Após o tratamento térmico de têmpera em aços carbono, normalmente tem-se a estrutura martensita e ferrita, conforme Figura 04, retirada de Colpaert (2008)

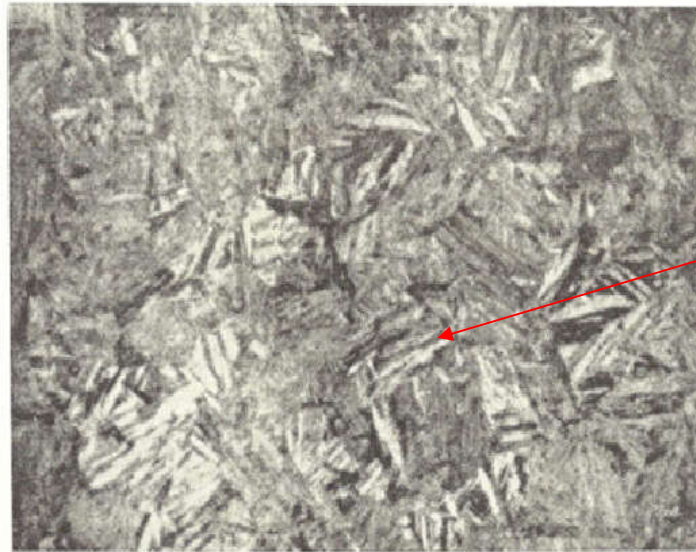
Figura 04: Aço extra-doce temperado. martensita e ferrita.



Fonte: Colpaert, 2008

Quando aquecido a certas condições, o processo denominado de austêmpera tem-se uma estrutura bainítica, muito semelhante em termos de microestrutura martensítica, mas não podem ser confundidas, conforme mostra a Figura 05.

Figura 05: Bainita produzida pela austêmpera em banho de chumbo a 400 °C.



Fonte: Colpaert, 2008.

Este trabalho possui tripla motivação: científica, social e pessoal.

A científica visa deixar uma referência para novos estudos, tendo em vista que a bibliografia é escassa e muitas vezes não encontrada facilmente, principalmente em português.

Já como contribuição social, visa deixar um legado para os fabricantes e para os operadores logísticos ferroviários com relação aos cuidados a serem tomados na fabricação e inspeção.

Por fim, como justificativa pessoal, apresenta-se o aluno pesquisador como engenheiro, professor e consultor de empresas no ramo ferroviário, dentre outros, e ainda aluno do programa de mestrado em engenharia mecânica com ênfase em materiais.

## 1.1 OBJETIVO

O Objetivo deste trabalho é verificar se existem transformações da microestrutura do material, aço AAR M-201 Grau E, após ensaio de partículas magnéticas onde ocorre a magnetização por Prods.

Verificar qual a faixa de amperagem aplicada por Prods no aço AAR M 201 grau E, na qual ocorrem transformações microestruturais e possíveis trincas.

Analisar a influência do meio de resfriamento, quer seja a água à temperatura ambiente ou mesmo o ar forçado, nas transformações microestruturais.

Através da utilização da microscopia óptica e de microscopia eletrônica de varredura (MEV), verificar a microestrutura do material.



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

De acordo com o *Handbook of Nondestructive Testing* (1967), as queimas com Prods são muito prejudiciais, especialmente em peças de alta temperabilidade, e podem contribuir para falhas dos componentes.

Com isto, é verificado como descrito no *Handbook of Nondestructive Testing* (1967) que já havia uma preocupação com a queima provocada pelo Prods e menção a possibilidade de falha de componentes de alta temperabilidade, como o aço do engate AAR M-201 Grau E.

Conforme estudo realizado na China, comprovou-se haver transformação de fases após magnetização e de acordo com Yudong Zhang *et al* (2008) “Semelhante a qualquer transformação de fase sólida, o processo de formação de uma nova fase consiste em duas fases: a nucleação e o crescimento. A introdução do campo magnético pode ter influência sobre ambos”.

### 2.1 AÇOS

É de conhecimento que existe uma vasta linha de classes de aço atualmente. Porém, sabe-se também que cada classe de aço é destinada para uma atividade ou produto específico. Essa diferenciação é feita a partir de especificações e necessidades dos produtos. Tendo em vista que os aços são ligas de ferro com Carbono e que contém outros elementos de liga.

Pannoni (2016), define dois tipos de aço, sendo:

1. Aço-Carbono são ligas de Ferro-Carbono contendo geralmente de 0,008% até 2,11% de carbono, além de certos elementos residuais resultantes dos processos de Fabricação.
2. Aço-ligado são os aços carbono que contém outros elementos de liga, ou apresenta os elementos residuais em teores acima dos que são considerados normais.

Desta forma, verifica-se a existência de dois tipos de aço, e estes possuem divisões entre si, o que vai ser estudado neste trabalho é o aço ferro carbono AAR M-201 Grau E, cujas composições químicas para os demais aços da AAR grau A, B, C e D são as mesmas, com exceção do teor de manganês e das propriedades mecânicas, o AAR buscou com este aço, um material de elevada tenacidade e resistência ao desgaste, baseado nos teores de Carbono e Manganês, sendo este último de valor em percentual também elevado.

Portanto, a composição química deste aço, conforme norma AAR M-201 Grau E, apresenta os seguintes teores máximos especificados, em porcentagem:

ESPECIFICAÇÃO	AAR M-201	FABRICANTE
Carbono (C)	0,32%	0,25 a 0,30%
Manganês (Mn)	1,85%	1,35 a 1,60%
Silício (Si)	1,5%	0,35 a 0,60%
Fósforo (P)	0,040%	0,035% Max
Enxofre (S)	0,040%	0,035% Max

Percebe-se pelas informações que o Fabricante respeita os limites do AAR com valores protetivos dentro da faixa especificada.

A norma AAR M-201 também fixa os valores de Carbono equivalente como máximo em 0,88%.

Como propriedades mecânicas deste aço pela AAR M-201 e pelo fabricante do engate em aço fundido tem-se:

Limite de resistência  $L_r > 827$  MPa, limite de escoamento  $L_e > 689$  MPa, alongamento AL 2% > 14% e redução de área RA > 30%.

Dureza – 241 a 311 HB (sendo este ensaio (*Brinell*) com esfera de 10 mm de carboneto de tungstênio e carga de 3000 Kg conforme norma ASTM E 10 (2015)). A dureza *Brinell* é a mais usual pois tem uma maior área do penetrador de 10 mm e devido à heterogeneidade do fundido, o valor resposta é mais confiável que outros processos de medição.

Conforme Minicucci, Milagres, Villas Bôas (2010) e Oliveira (2013), a tenacidade a fratura é maior para menores teores de carbono devido a uma maior presença de fase ferrítica.

## 2.2 FERROVIAS

As mudanças do sistema de engate estão relacionadas às evoluções de engenharia no desenvolvimento de vagões. O surgimento do mesmo se deu quando da troca de vagões de madeira com tração animal por vagões maiores e sobre trilho, motivados pela revolução industrial, que levou ao desenvolvimento de locomotivas potentes e maior número de vagões acoplados. Desde então, os sistemas de engate não pararam mais de se desenvolver, atualmente tem-se informação de mais de 330 vagões tracionados em uma mesma composição como nos mostra Bertossi (1991),

Conforme Bertossi (1991), por volta de 1830, iniciou-se a grande diferenciação no desenho do material rodante americano e europeu, quando a Baltimore & Ohio começou a utilizar carros de passageiros com 8 rodas.

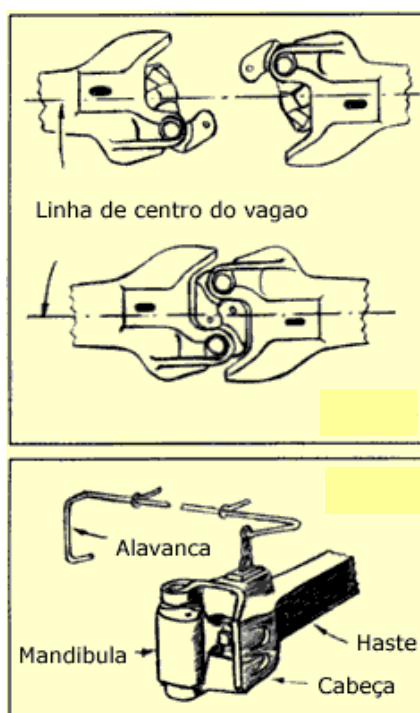
Com o desenvolvimento dos vagões, era preciso que os engates também evoluíssem. Bertossi (1991) cita que os primeiros vagões tinham comprimento de 9 metros, transportavam 9 toneladas de carga e usavam corrente e pára-choques como sistema de engate. Ainda de acordo com o pesquisador, em 1870, se dispunha de uma capacidade para 20 toneladas, caixa dupla de madeira com vigamento e reforço internos, sistema de engate por argola e pino, freio manual e infra-estrutura em madeira com tirantes em aço.

Com a virada do século, ainda de acordo com Bertossi (1991), veio a época de maior evolução dos vagões, com o desenvolvimento de muitos aspectos e componentes transformando o modo como era o engate. Nesta época, foi inventado o sistema de freio a ar, truques fundidos em aço e infraestrutura em aço, bem como foi desenvolvido o desenho do engate que se tem conhecimento nos dias de hoje. Desta forma, os vagões passaram a ter capacidade para 40 toneladas.

Francisco (2016) diz que atualmente as ferrovias brasileiras usam o aparelho de choque e tração (engate central automático) do tipo norte americano, por garantir maior segurança, facilidade de manutenção e funcionamento perfeito, atendendo às exigências dos atuais veículos.

Na Figura 06 é demonstrado com maior detalhe os componentes do engate.

Figura 06: Componentes do engate.



Fonte: Bertossi, 1991.

Francisco (2016) cita que este meio de transporte surgiu na Europa por volta dos anos de 1850, com locomotivas que trafegavam com uma velocidade aproximada de 70 km/h. Porém seu desenvolvimento se deu muito rapidamente e logo se tinha trilhos e vagões em todos os continentes do globo. Diante de tanta tecnologia, os trens e seus componentes mantiveram sua evolução, existindo hoje trens que chegam à velocidade de 250 km/h, bem diferentes dos que foram inicialmente projetados na Inglaterra. Apesar de todo esse desenvolvimento tecnológico, as ferrovias são ainda nos dias de hoje de grande valia no sistema de transporte, principalmente no transporte de carga, devido à sua capacidade de transportar uma grande quantidade de carga em uma única vez. No entanto, apesar do baixo custo do transporte, os valores para manutenção e construção são elevados o que leva ao desestímulo do uso deste meio de transporte.

### 2.3 FUNDIÇÃO

O processo de fundição de peças fundidas ferroviárias, o qual compreende os engates, consiste na preparação do aço em forno trifásico de eletrodos, conforme Figura 07. O forno possui uma porta de carregamento superior, chamada de abóboda móvel, para carregamento de cestos de sucata metálica, e porta por onde se faz a oxidação do aço com oxigênio, para promover o *Carbon Drop* que é a queda de carbono, e também o carregamento de ferro ligas e adições, de forma a garantir a composição química visada. (Chiaverini, 2008).

Figura 07: Forno trifásico de eletrodos



Fonte: Próprio autor

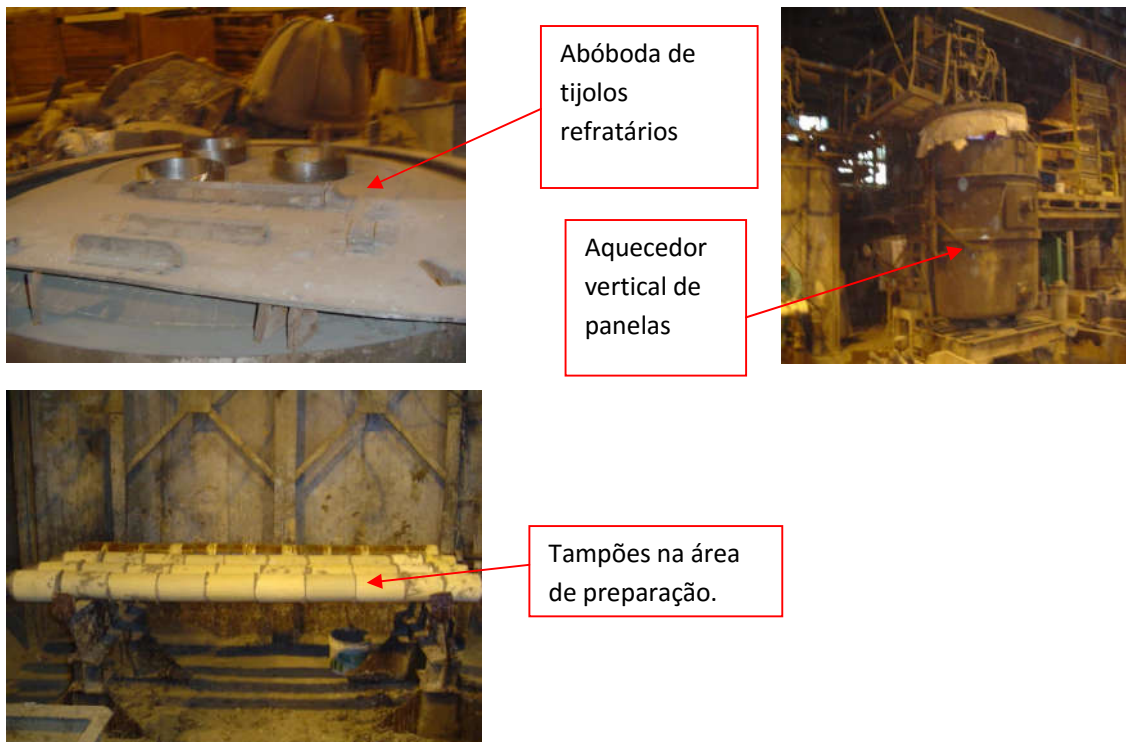
A fumaça de coloração avermelhada trata-se da oxidação do ferro que sai no formato de  $\text{FeO}$ , pois o ferro possui maior afinidade com o oxigênio à temperatura de 1600 graus Celsius, conforme diagrama de Ellingham (Chiaverini, 2008).

### 2.3.1 Aciaria

Uma área de aciaria trabalha com profissionais experientes, e muitas práticas padrão estão normatizadas para evitar problemas de segurança ou mesmo desvios no processo. O autor tem em seus registros fotos de fundidos ferroviários em aço, semelhantes aos utilizados para os engates.

Conforme Figura 08, tem-se detalhes da abóboda do forno, do aquecedor de panelas e da preparação dos tampões de uma aciaria usada para produção de fundidos ferroviários.

Figura 08: Processo de Aciaria



Fonte: Próprio autor.

Depois de o aço ter a composição química feita pelo laboratório e liberada pela Aciaria, através de análise de composição química em Espectrômetro e analisador de carbono e enxofre, sendo este também usado para análise de carbono, faz-se o vazamento do aço a

uma temperatura em torno de 1650 graus Celsius, para dentro de uma panela revestida com tijolos refratários, de acordo com a Figura 09.

Figura 09: Vazamento do aço



Fonte: Próprio autor.

Este vazamento objetiva sempre o centro da panela evitando cavitações dos refratários de forma a não ter-se inclusões não metálicas, que pode ser mais bem visto na Figura 10.

Figura 10: Vazamento do aço, do forno para a panela refratária.



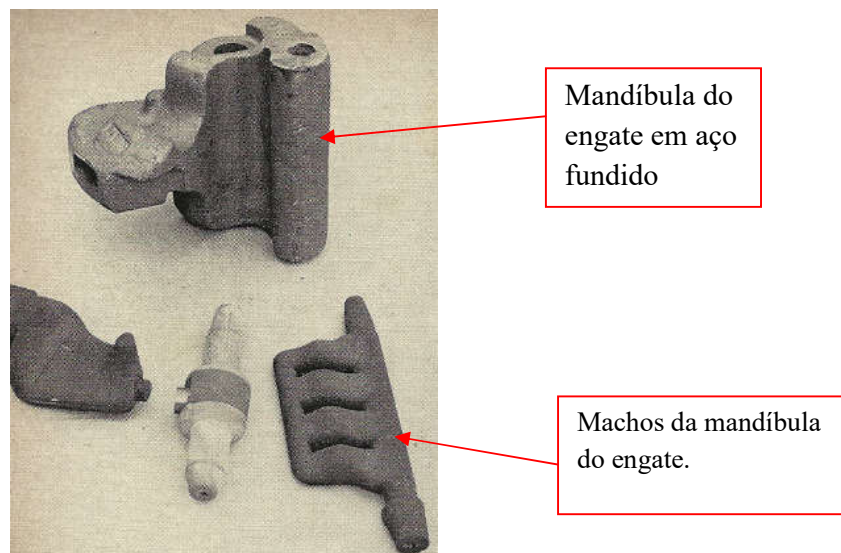
Fonte: Próprio autor.

### 2.3.2 Modelação

Os modelos são produzidos em diversos materiais como isopor, cera perdida, madeira e metal, sendo os dois últimos os mais utilizados em fundições seriadas de grandes peças. Estes modelos são confeccionados não na medida exata da peça, pois se leva em consideração a contração do metal no processo de solidificação. Detalhes dos modelos do engate e caixas de macho podem ser melhor visualizados no anexo 2. Adicionalmente, são confeccionadas caixas de macho que irão produzir os machos a serem posicionados dentro do molde, de forma a produzir as cavidades e reentrâncias que objetivamos no interior das peças, como demonstrado na Figura 11. Tanto os modelos quanto as caixas de macho são pintadas com tintas mais resistentes à abrasão da areia e um controle visual é aplicado para verificar o desgaste. Porém, de forma periódica, estes ferramentais são medidos em metrologia para a verificação dimensional e conforme norma ISO é obrigatório a inspeção de *layout*.

A geração dos modelos das peças a serem fundidas: geralmente, fabricados em madeira ou alumínio, darão o formato interno dos moldes (CHIAVERINI, 2008).

Figura 11: Mandíbula e machos da mandíbula



Fonte: Briggs, 2009.



### 2.3.3 Moldagem

A moldagem é uma das partes mais importantes e mais complexas em um processo de produção de uma fundição, devido à quantidade de variáveis, e de insumos para a produção destes moldes, que variam inclusive com a temperatura e a umidade do ambiente e consequentemente da areia, podendo o processo usar areia verde ou cura a frio.

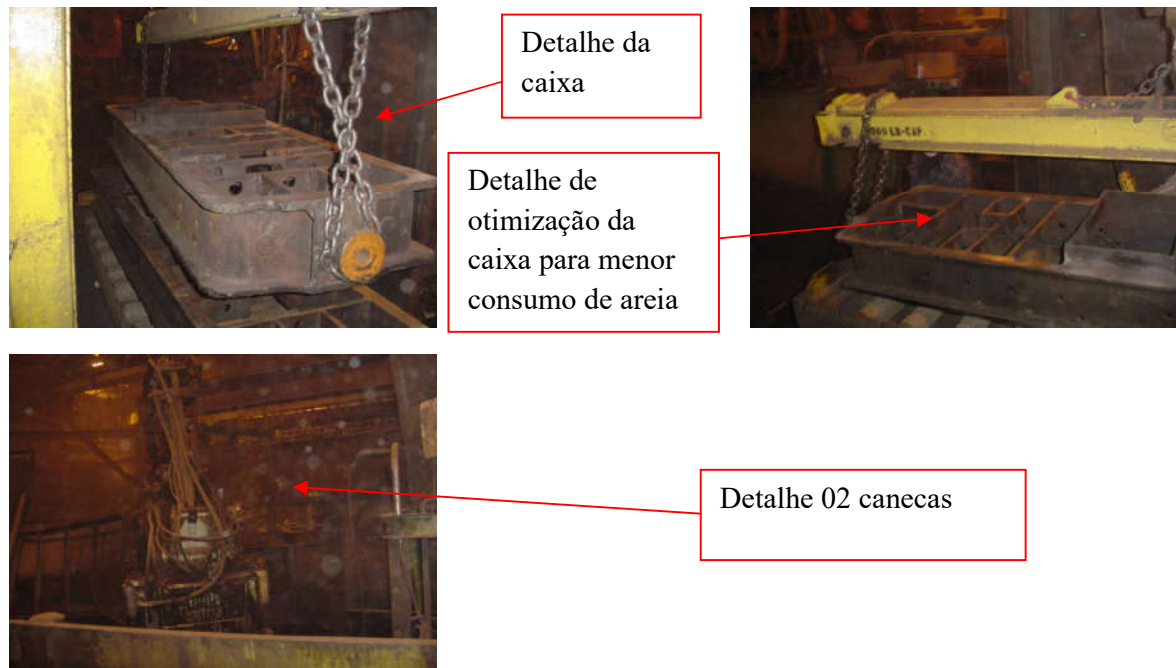
A areia verde ainda é o mais usual para fundições seriadas de grande porte, devido à possibilidade de tornar a areia reciclada dentro de um sistema fechado, onde se corrige a umidade através da adição de água, e o teor de finos através de análises e entrada de areia nova no sistema. Em função desta última, o teor de bentonita, que com a adição de água irá promover o inchamento das lamelas de bentonita e irão promover a resistência e a moldabilidade da areia, irá definir a capacidade da mesma em copiar os detalhes do molde, fazendo um negativo para a peça que será formada.

Com o vazamento do metal líquido e posterior solidificação, nesta moldagem utiliza-se de ligantes e aditivos, como microesferas de aço, para promover o resfriamento ou mesmo a cromita, areia mais nobre e de maior custo que faz o mesmo efeito, também pode-se usar de resfriadores metálicos que irão melhor direcionar o resfriamento do metal dentro do molde. Sabe-se da utilização também de aditivos, como melaço, babaçu, amido, pó de carvão, além da pintura do molde com tinta refratária à base de sílica, zirconita dentre outras, sempre com a finalidade de maior perfeição do fundido e menor índice de inclusões não metálicas devido à atenuação da reação metal/molde.

Moldagem das areias nos modelos, e montagem das caixas de fundição: promove-se a compactação das areias sobre os modelos, normalmente bipartidos, cada qual numa caixa de fundição. Fazem-se os devidos canais de alimentação, para que o metal fundente possa fluir internamente, e juntam-se à caixa superior e à caixa inferior, constituindo o molde para fundição (CHIAVERINI, 2008).

Na Figura 12, vê-se maiores detalhes dos equipamentos e dispositivos usados na área de moldagem.

Figura 12: Processo de moldagem.



Fonte: Próprio autor.

#### 2.3.4 Fusão e vazamento do metal.

Na sequência, o aço é vazado em moldes, obtidos através da compactação da areia de sílica contra um modelo de madeira ou metálico com as dimensões preteridas, descontando a contração que é de 1,5 a 2% do material. Este vazamento é feito por gravidade através de um varão, fixo na panela e acionado pelo operador de vazamento, de acordo com a Figura 13, em processo que se procura encher o molde através do canal de vazamento. O metal desce pelo canal de descida e depois adentra o molde pelo canal de ataque enchendo a peça e massalote, sendo este último responsável por segurar a contração e as impurezas. “Funde-se o metal em fornos próprios a essa aplicação e transfere-se este material para dentro do molde, preenchendo toda a sua cavidade”. Conforme Chiaverini (2008).

Figura 13: Vazamento em moldes de areia de sílica em caixas metálicas.



Fonte: Próprio autor.

Após o vazamento, e determinado tempo de resfriamento, faz-se a desmoldagem onde se retira a peça da caixa, além de toda a areia presa a esta. Em seguida faz-se o corte de canais e rebarbação, posteriormente a limpeza por granalhas de aço, e por fim o tratamento térmico, que consiste de normalização, têmpera e revenimento.

### 2.3.5 Desmoldagem

Verifica-se que após o vazamento de uma peça volumosa como uma lateral ou travessa ferroviária, ou mesmo engate, a tampa do molde é retirada após cerca de 15 minutos. Procura-se, com isto, evitar a possibilidade de trincas a quente, associado ao fato de que os moldes somente são manuseados após o acúmulo de 10 caixas. Aproximadamente 1 hora depois, retira-se o molde fundo, fazendo a desmoldagem efetiva das peças. Conclui-se, desta forma que tal ação é indispensável, mas requer um grande investimento em termos de quantidade de caixas, pois é primordial respeitar o tempo de desmoldagem de grandes peças. Este processo pode ser visto conforme Figura 14.

Figura 14: Desmoldagem



Vista parcial da área de  
acumulo de molde para  
desmoldagem

Fonte: Próprio autor.

Após o vazamento do metal, as caixas de fundição são submetidas a uma ação vibratória, para que as peças fundidas e as areias de fundição sejam separadas.

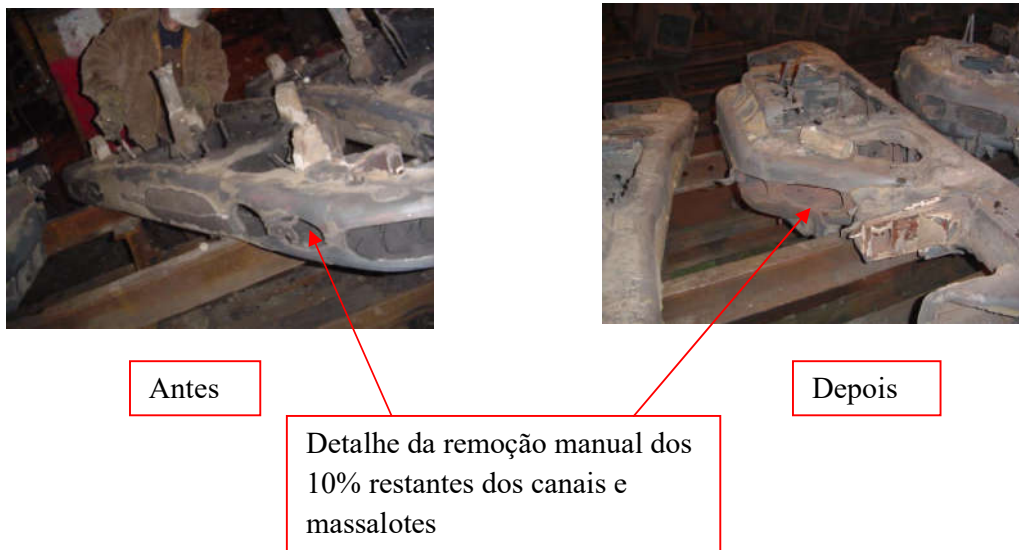
### 2.3.6 Dispositivos e Marteletoes para remoção da areia

Algumas indústrias de fundição utilizam-se de um martelete de grandes proporções para retirada grosseira da areia. Porém, pode-se concluir que numa análise preliminar trata-se de um equipamento dispensável já que tal atividade pode ser feita em outro processo.

### 2.3.7 Quebra de Canais e Massalotes

Os canais e massalotes são, nas indústrias, quebrados por uma máquina automática, supervisionada por operadores. Um robô faz este primeiro processo de retirada nas peças desmoldadas com uma eficiência de 90% na remoção dos canais e massalotes. Os 10% restantes são removidos manualmente na etapa de grafitagem, como mostrado na Figura 15.

Figura 15: Quebra de canais e massalotes

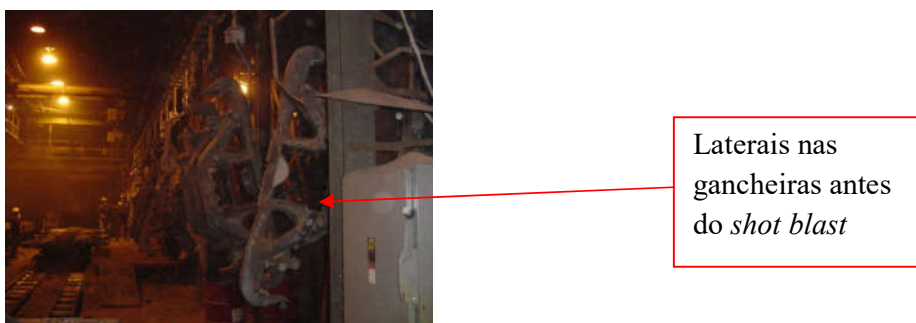


Fonte: Próprio autor.

### 2.3.8 Decapagem

A decapagem ou jateamento, conforme Figura 16, é feita pela primeira vez, nesta etapa, através de operadores, e utiliza-se o conceito de “*Shot Blast*”, que é uma decapagem sem controle de *peening*; o *shot peening* é feito através de chapas tipo *Almen* (A e C) que será demonstrada no sub capítulo 2.2.11. Esta etapa visa uma limpeza geral da peça para preparar para as próximas etapas.

Figura 16: Processo de Decapagem

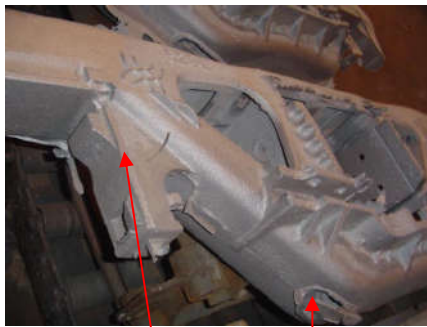


Fonte: Próprio autor.

### 2.3.9 Grafitagem e solda visual

Faz-se neste processo uma limpeza por completo da peça e solda-se grandes defeitos visuais antes da normalização. Algumas peças não seguem para uma nova decapagem e sim para o tratamento de normalização, economizando assim uma etapa de decapagem. Sabe-se que após o tratamento térmico forma-se uma carepa superficial que também deve ser removida e que dificulta o processo de inspeção por partículas magnéticas. Na Figura 17 é visto o processo de grafitagem.

Figura 17: Grafitagem e solda visual



Peça limpa de areia e impurezas, com rebarbas a remover na grafitagem.



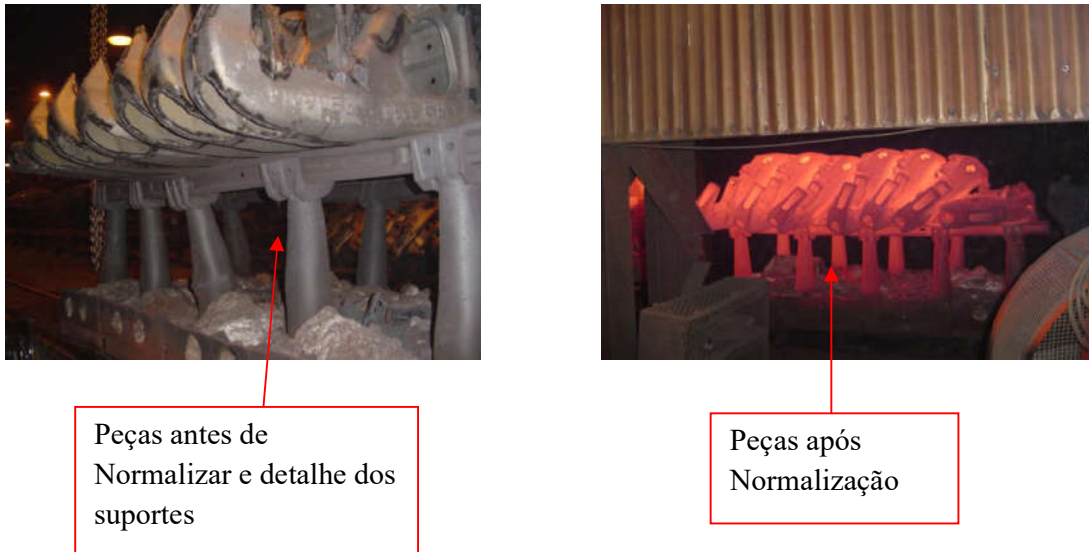
Peça após grafitagem e prontas para Normalizar

Fonte: Próprio autor.

### 2.3.10 Normalização

As peças entram limpas e sem areias inclusas para este tratamento, como visto na Figura 18. Verifica-se a utilização de suportes que facilitam a circulação de ar no forno e o bom tratamento das peças.

Figura 18: Processo de normalização

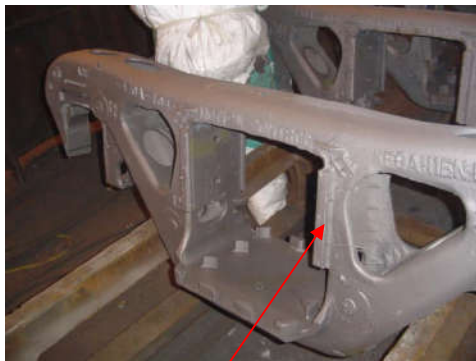


Fonte: Próprio autor.

### 2.3.11 *Shot Peening*

Após a normalização, a logística da linha leva as peças a sofrerem um *shot peening*, que se diferencia do *Shot Blast*, devido aos fabricantes seguirem o prescrito para o AAR quanto ao *peening*, que subentende-se fazer o teste com chapas de aço (tipo Almen A ou C) em dispositivos fixos na zonas 1 prescrita pelo AAR.

Este processo, se bem empregado substitui pelo AAR a necessidade de alívio de tensões pós solda em fornos de tratamento térmico, trazendo ganhos de tempo e custos para a empresa, mantendo a qualidade requerida pelos clientes, como é demonstrado na Figura 19.

Figura 19: *Shot Peening*

Detalhe da peça após  
o *shot peening*,  
totalmente limpa



Detalhe da fixação do  
dispositivo Almen C na  
Zona 1

Fonte: Próprio autor.

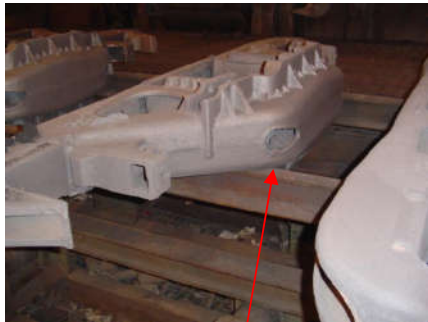
### 2.3.12 Acabamento

Nesta área é possível observar um grande fluxo de peças em linha, processando em lotes puxados.

As chapas de desgaste são montadas na linha de acabamento e o material é SAE 1095, conforme visto na Figura 20.



Figura 20: Processo de Acabamento



Peças prontas para  
acabamento nas bancadas



Detalhe da aplicação de um  
calibre + espião agregado



Detalhe de áreas da  
peça no acabamento



Detalhe dos  
botões



Detalhe de montagem das  
chapas de desgaste e  
fixação das mesmas.

Fonte: Próprio autor.

### 2.3.13 Reparo por solda.

O reparo por solda de maior nível é feito por diversas pessoas que se revezam em soldas e esmerilhamentos, como é visto na Figura 21.

Figura 21: Processo de reparo por solda.



Fonte: Próprio autor.

### 2.3.14 *Shot Peening* após reparo para evitar novo tratamento térmico

Este *shot peening* é idêntico ao anterior e novamente substitui o alívio das peças pós solda, evitando a entrada desnecessária em forno. O *peening* criado na superfície consiste de uma tensão superficial aplicada ao material e que evita que pequenas descontinuidades ou mesmo defeitos possam propagar sob tensão tratativa, uma vez que este *peening* cria exatamente uma tensão de compressão superficial. Pois a superfície jateada e afixada à tira de *Almen* A ou C tem uma deformação em milésimos de polegada, que indica exatamente a flecha de deformação criada pela granalha de aço na superfície do metal. Vale ressaltar que as normas SAE J-442 e SAE J-443 definem o mínimo de concentração de granalhas que é de 85% de granalha S-550 e cobertura de 95%, bem como definem o padrão do corpo de prova e da utilização de tiras *Almen*, detalhes também são cobertos pela norma AAR M-208 (2011).

### 2.3.15 Pintura

Operação realizada com a peça transportada por ganchos, posicionando a mesma na vertical, como é visto na Figura 22.

Figura 22: Processo de pintura



Peças antes da pintura  
evidenciando aspecto superficial



Peça antes da cabine de  
pintura



Lateral logo após a  
pintura e antes da  
pesagem.

Fonte: Próprio autor.

No processo de pintura, utiliza-se de um *primer* e uma camada controlada de tinta, inclusive com medição de espessura, com a finalidade de resistir à oxidação até a chegada e montagem no cliente. Esta é a última etapa do processo. Depois a peça final é colocada em pallet de madeira, conforme Figura 23 e finalmente fixada com fitas de aço para envio ao cliente. Cada etapa do processo é sucedida por inspeções de qualidade que compreendem também os ensaios não destrutivos, conforme requeridos em plano de controle.

Figura 23: Peça final após pintura.



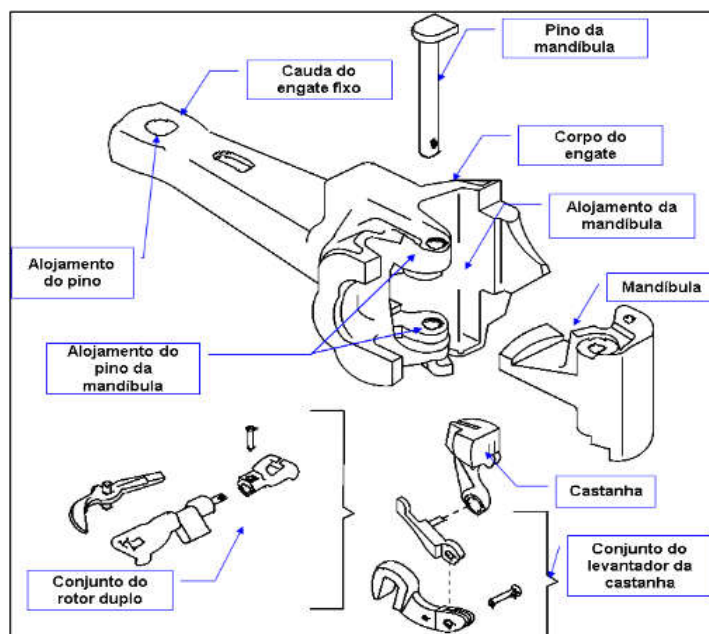
Fonte: Próprio autor.

## 2.4 ENGATES FERROVIÁRIOS

O engate é um componente do conjunto de choque e tração de um vagão, tem por finalidade amortecer os impactos, transmitir os esforços e fazer a união dos vagões. Depois que os vagões são unidos, os engates fazem a função de transmitir os esforços de tal modo que os esforços sejam minimizados reduzindo o impacto.

De acordo com a revista *Acta Brazilian Science* (2014), o engate é fisicamente composto de um corpo fundido, mandíbula e diversos componentes que operam no travamento ou destravamento da mandíbula, fazendo com que os vagões se unam ou apartem-se um do outro. Para vagão tipo GDT, são utilizados dois tipos de engates, o Fixo e o Rotativo devido à descarga no Virador de Vagões. Na figura 24 vêem-se em detalhes os componentes do engate.

Figura 24: Componentes do engate em detalhes

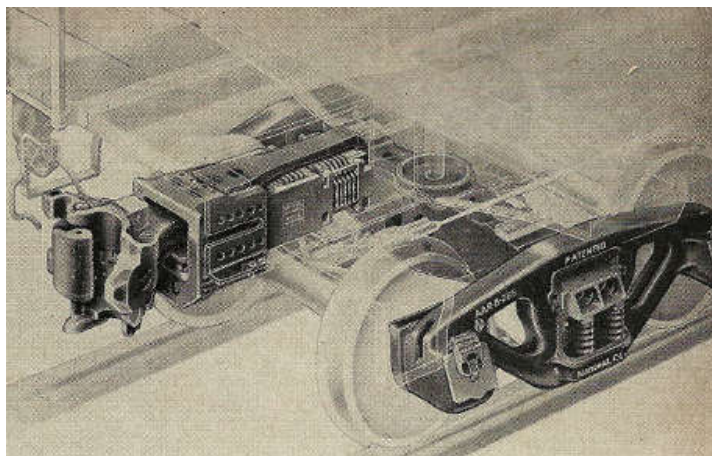


Fonte: *Acta Brazilian Science* (2014)

Conforme Alves (2009), em face de sua complexidade, determinados tipos de peças, como blocos de motor, caixas de transmissão, engates de vagões ferroviários, torneiras e corpos de válvulas, hoje são produzidos somente por fundição. Os fabricantes devem estudar uma possibilidade de ter essas peças por outro processo que não por fundição, para tal os mesmos devem pesquisar materiais e projetos, que no caso do engate, possam suportar as cargas e a dinâmica aplicada ao vagão e, conseqüentemente, ao sistema de choque e tração, além deste processo alternativo poder trazer ganhos financeiros ao fabricante, em termos de custos de produção e mesmo com o pós vendas.

Briggs (2009) demonstra, com a Figura 25 em maiores detalhes, uma visão esquemática do posicionamento do engate no sistema de choque e tração.

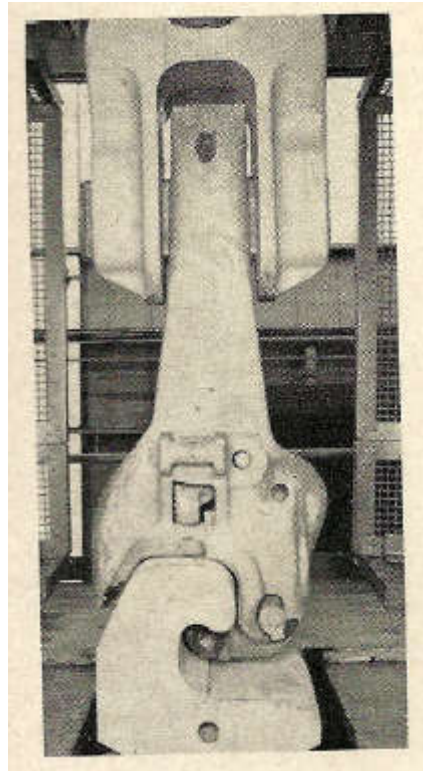
Figura 25: Uma visão esquemática da frente do sistema choque tração.



Fonte: Briggs, 2009

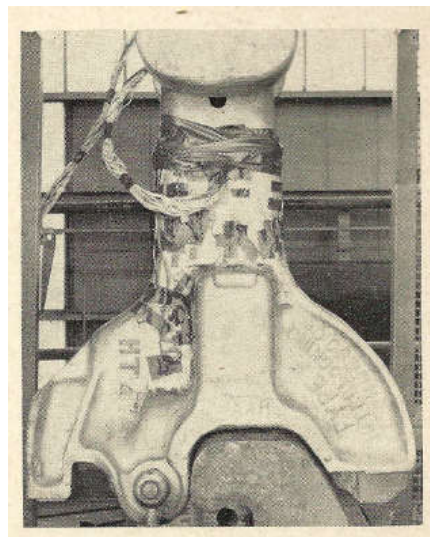
Os engates são muito solicitados e termos de tensões e, conforme Briggs (2009), ensaios de tração e compressão são realizados para a validação de novos projetos em máquinas de ensaio universal específicas, conforme Figuras 26 e 27.

Figura 26: Carregando um engate em máquina de ensaio universal de tração e compressão.



Fonte: Briggs, 2009.

Figura 27: Engate com extensômetros para registro de gráfico de tensões x deformações.



Fonte: Briggs, 2009

Figura 28: Máquina universal de ensaio



Fonte: Próprio autor

Esta foto da Figura 28 mostra o engate fixo e a ponteira no sistema de choque e tração, em teste do conjunto e não somente de componentes, conforme norma AAR M 211 (2015), existe uma distribuição de tensões de tração e compressão, quando aplicada à carga de tensões no conjunto e este tem um número de ciclos mínimo a ser atingido, e subentende-se que o componente terá o mesmo comportamento em serviço, quando solicitado mecanicamente.

## 2.5 ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS – END

Existem diversos ensaios não destrutivos, tais como, líquido penetrante, ultrassom e raios-X, gamagrafia, ressonância acústica, ressonância magnética, porém não serão abordados neste trabalho, o foco será o ensaio de partículas magnéticas, mas sabe-se que todos os ensaios interagem entre si, de forma complementar na detecção de descontinuidades. (Andreucci, 2014 *apud* Baptistella 2014)

Em materiais fundidos, é comum usar o ensaio de partículas magnéticas, com o objetivo de encontrar possíveis descontinuidades superficiais e sub superficiais, levando-se



em consideração que essas descontinuidades podem ser trincas, dobras, inclusões, falta de fusão, e muitos outros defeitos. (Andreucci, 2014 *apud* Baptistella 2014)

Os materiais se classificam em três grandes grupos, sendo eles: ferromagnéticos; paramagnéticos e diamagnéticos. Andreucci (2014 *apud* Baptistella 2014) descreve suas características:

Materiais Ferromagnéticos: Permeabilidade ( $\mu$ ) > 1: são materiais fortemente atraídos por uma força magnetizante, ou por um ímã. Ex.: Ferro, Cobalto, e quase todos os tipos de aço. São ideais para o ensaio de Partículas Magnéticas.

Materiais Paramagnéticos: Permeabilidade ( $\mu$ ) = 1: São materiais levemente atraídos por uma força magnetizante, ou por um ímã. Ex.: Platina, Alumínio, Cromo, Estanho, Potássio. Não são recomendados para ensaio de partículas Magnéticas.

Materiais Diamagnéticos: Permeabilidade ( $\mu$ ) < 1: São materiais levemente repelidos por uma força magnetizante, ou por um ímã. Ex.: Prata, Zinco, Chumbo, Cobre, Mercúrio. Não é aplicável o ensaio de Partículas Magnéticas.

Conforme ASTM E 709 (2015) as pontas de contato dos Prods deveriam ser de alumínio, cobre ou ligas de cobre.

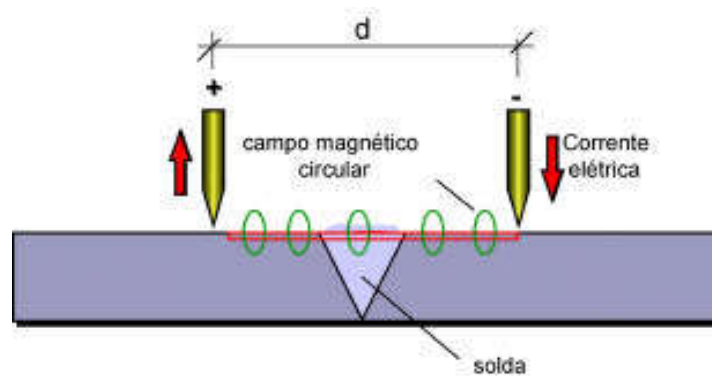
Prods são usados para magnetizações locais. Os Prods de contato com a peça devem ser de alumínio, ligas de cobre. Com Prods de cobre sólidos, arcos acidentais durante a colocação do prods ou remoção podem causar a penetração de cobre no que pode resultar em danos metalúrgicos (endurecimento, rachaduras, etc.)

### 2.5.1 Magnetização por Prods.

A técnica de magnetização por Prods, também conhecida como eletrodo de contato, consiste em pontas metálicas, normalmente pontas de ligas de cobre, que quando apoiadas na superfície da peça, permitem a passagem de corrente elétrica. Desta forma, o campo magnético que se forma é circular, tal ensaio é aplicado em peças fundidas, em indústrias siderúrgicas, caldeirarias, soldas, dentre outros. (Andreucci, 2014)

Este ensaio induz um campo magnético que faz uma relação entre a distância entre os eletrodos (d) e a corrente elétrica que circula por eles, conforme Figura 29.

Figura 29: Técnica de inspeção por Prods



Fonte: Andreucci, 2014

Como referência, pode-se encontrar no Código ASME Sec. V Art 7, os valores referentes à corrente elétrica a ser aplicada nas peças, conforme tabela 01.

Quadro 01: Limitação da corrente elétrica na técnica de eletrodos.

Espessura da peça	Corrente Elétrica aplicada por polegada de espaçamento entre os eletrodos
$< \frac{3}{4}$ pol. (19 mm)	Mínimo de 90 até 110 A/pol.
$> \frac{3}{4}$ pol.	Mínimo de 100 até 125 A/pol.

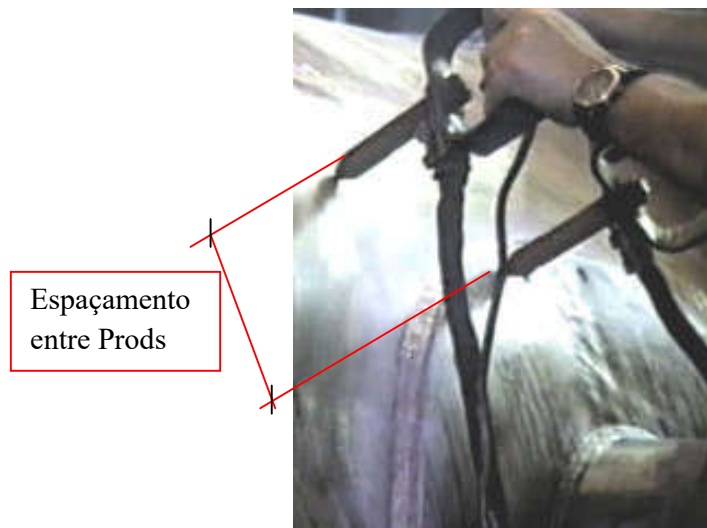
Fonte: ASME, Sec. V Art. 7

Conforme ASME (2011), reforça a importância quanto ao espaçamento entre os Prods ao citar que:

O espaçamento entre os eletrodos não deve ultrapassar a 8 polegadas. Espaçamentos menores podem ser utilizados para acomodar limitações geométricas na área que está sendo examinada, porém espaçamentos menores que 3 polegadas devem ser evitados. Os pólos de contato dos eletrodos devem estar limpos.

Para melhor exemplificar tal citação, Andreucci (2014), disponibiliza a Figura 30 que demonstra como devem ser manuseados os Prods.

Figura 30: Manuseio dos Prods



Fonte: Andreucci, 2014

## 2.6 INFLUÊNCIA DA MAGNETIZAÇÃO NOS GRÃOS

A magnetização pode influenciar no aquecimento da peça em função do tempo, e por difusão levar a um aumento do tamanho de grão

A microestrutura torna os grãos instáveis e alguns podem crescer de forma anormal, consumindo os recristalizados menores. Este processo, que pode levar a diâmetros de grãos de

vários milímetros ou maiores, é conhecido como o crescimento anormal. Porque este descontínuo crescimento tem cinética semelhante à recristalização primária e tem algumas semelhanças microestruturais, é por vezes conhecido como recristalização secundária, Humphreys (2004). O crescimento anormal é um importante método de produção de materiais de grande granulação. A evasão de crescimento anormal em altas temperaturas é um aspecto importante do controle do tamanho de grãos em aços e outras ligas, Humphreys (2004) dão uma extensa revisão do crescimento anormal em uma ampla variedade de materiais.

A força motriz para o crescimento anormal é geralmente a redução da energia dos contornos para o crescimento normal de grãos. No entanto, em materiais finos uma condução adicional de força pode surgir a partir da dependência da orientação da energia de superfície.

## 2.7 ASPECTOS DE FALHAS EM CAMPO EM ENGATES, QUANDO SUBMETIDOS A ESFORÇOS EM SERVIÇO

Verifica-se que atualmente existe uma incidência maior de fratura de engates por fadiga com geração de trincas e microtrincas, que os removem de serviço antes da expectativa de vida média quando comparados com engates feitos no passado, conforme casos discutidos no *Case Studies in Engineering Failure Analysis* (Huang, 2013).

Mais especificamente em engates ferroviários, pode-se verificar os diversos mecanismos de fraturas brilhantes em mandíbulas de aço grau E, ligados ao engate ferroviário de acordo com Huang (2013).

Oliveira (2008) demonstra em sua dissertação que os processos de fabricação ferroviários, conforme AAR M – 101 (2004) passam por outros tratamentos térmicos, dentre eles um processo de normalização, têmpera e revenimento, os quais melhoram significativamente as propriedades mecânicas dos materiais e que eram aplicados a longa data por fabricantes de engates.

De acordo com Ribeiro (2008), vê-se que:

Microrechupes ou porosidades tendem a ser confundidos com defeitos provenientes da evolução de gases, que quando ocorrem, estes aparecem nos mesmos locais. São típicos de ligas com alto intervalo de solidificação, surgindo normalmente nos centros geométricos de peças regulares.

## 2.8 INSPEÇÃO POR PARTÍCULAS MAGNÉTICAS

Quanto ao ensaio de partículas magnéticas, existem diversas técnicas, como por bobinas, yokes, magnetização por multicampos e magnetização direta por Prods, neste trabalho será abordado o ensaio por partículas magnéticas com magnetização direta com Prods.

Existem imperfeições e inclusões superficiais e estas podem, com a magnetização por Prods, resultar em abertura de arcos e danos maiores como a geração de microtrincas. Yudong Zhang *et al.* (2008) citam o aparecimento de trincas em aço AAR M-201 Grau E, após magnetização por Prods a 800 Ampères, conforme anexo 1.

Atualmente a maioria dos fabricantes utiliza o ensaio não destrutivo por partículas magnéticas com a utilização de Prods, que são pontas de cobre por onde passa a corrente do equipamento transferida para a peça, gerando o campo magnético de forma a realizar o ensaio, conforme Andreucci (2014 *apud* Baptistella 2014).

As Indústrias navais e aeronáuticas americanas proíbem a utilização de magnetização por Prods em peças metálicas ligadas aos seus produtos. Já a indústria ferroviária americana faz menção, em normas internas dos fabricantes, do uso de Magnetização por Yokes, que utilizam um princípio diferente por bobinas, não gerando o mesmo tipo de dano causado pelo Prods, conforme discutido no *Steel Casting Handbook* (Briggs, 2009) e também proíbe o Prods para inspeção de rodas ferroviárias fundidas, conforme norma AAR M-208 (2011)

O Ensaio por Partículas Magnéticas é uma técnica onde o material metálico e condutor é magnetizado, quer seja por uma bobina em equipamento estacionário, ou mesmo por equipamento portátil como o Yoke, e também em equipamentos fixos que se utilizam de pontas de Cobre (Cu) denominadas Prods, onde pode-se utilizar corrente contínua ou alternada, sendo que esta última técnica é que será estudada aqui, ou seja, corrente alternada e utilização de Prods. (Andreucci, 2014 *apud* Baptistella 2014).

Rafael Gomes (2010) demonstra em sua dissertação que:

O método está baseado na geração de um campo magnético que percorre toda a superfície do material, desviam-se de uma trajetória ao encontrar uma descontinuidade superficial ou subsuperficial, criando assim uma região com polaridade magnética, altamente atrativa a partículas. No momento em que se provoca essa magnetização na peça, aplicam-se as partículas magnéticas por sobre a peça que será atraída à localidade da superfície que contiver uma descontinuidade, formando assim uma clara indicação de defeito.

Alguns exemplos típicos de aplicações são fundidos de aços ferríticos, forjados, laminados, extrudados, soldas, peças que sofreram usinagem ou tratamento térmico (porcas e parafusos), trincas por retífica e muitas outras aplicações em materiais ferrosos.

Uma técnica muito empregada em indústrias para a detecção de trincas e micro trincas é a inspeção por partículas magnéticas que, de acordo com Andreucci (2014), é um método de localização de descontinuidades superficiais e sub-superficiais em materiais ferromagnéticos, onde através da magnetização do material examinado, descontinuidades dispostas em uma determinada localização e sentido, geralmente na transversal à direção do campo magnético, irão formar um campo de fuga, que poderão ser detectadas através da aplicação de partículas ferromagnéticas, pequenas limalhas de aço, de grãos com formatos definidos, sobre a superfície avaliada, pois o campo de fuga gerado irá aglomerar, destacar, as partículas ferromagnéticas aplicadas. Baptistella (2014) comenta que a aglomeração das partículas magneticamente retidas expressa um esboço da descontinuidade e geralmente indica sua localização, tamanho, forma e extensão. Além disso, estas partículas podem ser aplicadas sobre uma superfície na condição seca ou através de outras técnicas, que utilizam água como veículo de transporte das partículas.

O método de partículas magnéticas possui vantagens e desvantagens, que precisam ser avaliadas durante a definição de qual método será utilizado para avaliação do item em questão. Nunes (2012) descreve como limitações o material não ferromagnético que não pode ser inspecionado por partículas magnéticas, tais materiais incluem ligas de alumínio, de magnésio, de cobre, chumbo, titânio e os aços inoxidáveis austeníticos, e como vantagens o método de partículas magnéticas é um meio sensível de localização de pequenas e superficiais fissuras em materiais ferromagnéticos, as indicações podem ser produzidas suficientemente em tamanhos para serem vistas a olho nu.

Os principais usos industriais de análise por partículas magnéticas são em inspeção final, visando o controle e garantia de qualidade, e a avaliação de eficiência e eficácia de reparos de solda.

Ainda pode-se perceber que existem, de acordo com Garcia, Spim e Santos (2012), outros métodos de ensaio não destrutivos, como por exemplo, o ultrassom, porém este também conta com uma incerteza de aproximadamente 5%, o qual não será abordado neste trabalho.

Os operadores treinados e qualificados podem fazer uma estimativa razoável de profundidade da indicação detectada e avaliada, sendo necessários monitoramentos ocasionais da intensidade de campo magnético para garantir força suficiente para aglomeração das partículas magnéticas.

Segundo Nunes (2012), existe pouca limitação em relação ao tamanho ou forma da peça pretendida à avaliação, e que há certas atenções que o inspetor deve atentar durante a avaliação, pode-se citar como exemplo: camadas finas de tinta e outros revestimentos não magnéticos, além do que o método pode ser utilizado apenas em materiais ferromagnéticos, para melhores resultados, o campo magnético deve ser numa direção que vai interceptar o plano principal da descontinuidade e isso às vezes exige duas ou mais sequências de inspeções com diferentes magnetizações.

Desmagnetização na sequência da inspeção muitas vezes faz-se necessária, segundo Andreucci (2014), alguns materiais, devido às suas propriedades magnéticas, são capazes de reter parte do magnetismo proveniente da inspeção por partículas magnéticas, após a interrupção da força magnetizante e conforme a aplicação subsequente destes materiais, o magnetismo residual ou remanescente poderá desenvolver problemas de desempenho para o item durante utilização, além de que uma peça com magnetismo residual poderá interferir nos processos futuros de usinagem, pois o magnetismo da peça induzirá a magnetização das ferramentas de corte afetando o acabamento da peça. É necessário cuidado para evitar um aquecimento localizado e queima, devido ao contato elétrico do Prods, com superfícies acabadas, já alertava Andreucci (2014).

Embora as indicações de partículas magnéticas sejam facilmente vistas, experiência e habilidade dos inspetores são necessárias, além de qualificação dos mesmos por normas internacionais para emitir laudos. O ensaio por partículas magnéticas exige conhecimentos de magnetização, com isso Nunes (2012) nos ensina que quando um material magnético é colocado entre os pólos de um “ímã ferradura” com extremidades quadradas, formando um conjunto fechado ou em forma de anel, as linhas de fluxo de força do pólo norte atravessam para o pólo sul, já as linhas de força magnética fluem preferencialmente através de material

magnético e não através de material não magnético como, por exemplo, o ar. As linhas de força magnética estarão fechadas dentro do conjunto de anel porque não existem pólos externos e a limalha de ferro ou partículas magnéticas aplicadas sobre o conjunto não são atraídas ao ímã, embora existam linhas de força magnética que fluem através dele. A parte em forma de anel magnetizado desta maneira se diz conter um campo magnético circular que está totalmente dentro da peça.

Quando a extremidade do ímã não é quadrada e existe um intervalo de ar entre o efeito do ímã, os pólos irão atrair materiais magnéticos, com isso partículas magnéticas vão se agrupar aos pólos e com isso qualquer fissura radial em um pedaço magnetizado circularmente criará um pólo norte e um pólo sul magnético nas bordas de uma abertura, atraindo as partículas magnéticas para os pólos criados, devido à abertura da trinca, formando assim uma indicação da descontinuidade na peça. Estes campos criados pelas trincas ou outras descontinuidades físicas ou magnéticas na superfície são chamados campos de fuga. A força de um campo de fuga determina o número de partículas magnéticas que se reúnem para formar indicações, ou seja, fortes indicações são formadas em áreas fortes, fracas indicações em campos fracos. (Nunes 2012)

Segundo Nunes (2012), um simples pedaço de material magnetizado tem um pólo em cada extremidade, onde linhas de forças magnéticas fluem através da barra do pólo sul para o pólo norte, sempre neste sentido, obtendo um campo magnético longitudinal e caso uma barra magnética seja dividida em duas peças, um campo de fuga com pólos norte e sul é criado entre as peças. A passagem de corrente elétrica através de qualquer condutor em linha reta, como um fio ou barra cria um campo magnético circular em torno do condutor e quando o condutor de corrente elétrica é um material ferromagnético, a passagem da corrente induz um campo magnético no condutor, bem como no espaço circundante, cita Nunes (2012).

É necessário definir um método de magnetização a ser utilizado pela técnica por partículas magnéticas a ser aplicada como inspeção, as mesmas podem ser aplicadas durante a corrente de magnetização, estar fluindo ou após a corrente ter cessado, dependendo em grande parte da capacidade de retenção de magnetismo do material. A primeira técnica é conhecida como o método contínuo e o segundo, método residual.

Andreucci (2014). Se o magnetismo remanescente na peça após a corrente ser desligada por um período de tempo, ou seja, o magnetismo residual, não fornece um campo de fuga suficientemente forte para produzir indicações legíveis, quando as partículas



magnéticas são aplicadas à superfície, a peça deve ser continuamente magnetizada durante a aplicação das partículas, o método residual pode ser utilizado apenas em materiais com capacidade de retenção de magnetismo. O método contínuo pode ser usado para a maioria das partes, inclusive para o engate neste trabalho estudado.

Outra variável muito importante para a inspeção é o tipo de corrente a ser utilizada. Andreucci (2014) comenta que tanto a corrente contínua (CC) quanto à corrente alternada (CA) são adequadas para a magnetização de peças e que a força, direção e distribuição de campos magnéticos são muito afetadas pelo tipo de corrente utilizada para magnetização, sendo a corrente alternada a mais empregada e inclusive a utilizada para o engate.

Existem equipamentos portáteis e estacionários para utilização em inspeções por partículas magnéticas, os equipamentos portáteis disponíveis têm peso entre 16 e 40 kg, encontrados em fonte de alimentação que possa ser facilmente transportado para o local de inspeção, geralmente, são concebidos para utilização 115 V, 230 V ou 460 V de corrente alternada, utilizados para uma ampla gama de aplicações. Já os equipamentos estacionários podem ser obtidos para uso geral ou para fins especiais, onde a unidade de propósito geral destina-se principalmente para uso no método úmido, com um reservatório embutido que contém um sistema de bomba para armazenamento e agitação contínua da solução com partículas magnéticas, as partículas são aplicadas através de mangueiras. Um diferencial dos equipamentos estacionários é que são máquinas com capacidade de magnetização multidirecional, onde algumas unidades dispõem de até três circuitos de saída, que são sistematicamente energizados em sequência rápida, como isso revela descontinuidades que se encontram em qualquer direção depois de apenas uma única etapa de processamento, conforme comenta Andreucci (2014)

Existem muitos contatos do Prods com a peça, e isto se deve ao fato do Prods ter que fazer uma magnetização cruzada, como é demonstrado por Salomão (2016).

As descontinuidades existentes só são detectadas quando o campo magnético as atravessa perpendicularmente e, por isso, o ensaio de partículas magnéticas deve ser realizado em pelo menos duas direções de magnetização, garantindo que a inspeção elimine todas as possibilidades de detecção de defeitos.

Portanto em uma única área a ser inspecionada, tem-se no mínimo quatro pontos de contato, possivelmente quatro pontos com potenciais alterações microestruturais e geração de trincas.

Máquinas estacionárias têm algumas limitações descritas por Andreucci (2014), grandes áreas não podem ser magnetizadas com força suficiente para produzir indicações satisfatórias, a densidade de fluxo não pode ser variada à vontade, se o ímã é muito forte, ela pode ser difícil de separar de uma peça e as partículas podem acumular ao ímã, ocultando indicações.

Dentre os equipamentos portáteis demonstrados por Nunes (2012), com um peso menor está o Yoke, conforme Figura 31, o equipamento é composto por uma bobina enrolada em torno de um núcleo em forma de U, de ferro macio, com articulações fixas ou ajustáveis, os que possuem possibilidade de ajustes permitem mudar o contato de espaçamento e o ângulo relativo de contato para melhor avaliação da peça inspecionada, principalmente caso seja muito irregular.

Figura 31: Equipamento de magnetização portátil tipo Yoke



Fonte: Andreucci (2014 *apud* Baptistella, 2014).

Quando utiliza-se os métodos não destrutivos, percebe-se que são ferramentas que possuem possibilidades de aplicações diferenciadas, ou seja, formas deferentes de realização para obtenção de um objeto em comum, com isso Andreucci (2014) comenta:

[...] O ensaio por partículas magnéticas deve ser sempre executado com base em um procedimento qualificado e aprovado, com finalidade de estabelecer e fixar as variáveis essenciais do ensaio. Assim, a técnica de magnetização, o método de

ensaio, e outros, não necessitam serem determinadas pelo inspetor responsável, no momento do ensaio.

Percebe-se que com a citação de Andreucci, que como em todos os métodos não destrutivos, o processo de inspeção pela técnica de partículas magnéticas precisa ser procedimentado e detalhado, por uma pessoa treinada e qualificada, capaz de demonstrar os pontos importantes de execução e atividades padrões, visando padronização entre utilização por inspetores diferentes, para que os resultados finais obtidos com a avaliação não destrutiva sejam semelhantes e uniformes. Verificações constantes para análise da eficiência e eficácia do ensaio são necessárias, Andreucci (2014) afirma que periodicamente a iluminação do ambiente, aplicação de blocos de referências, medição do campo magnético, dimensionamento da intensidade de luz fluorescente, análise da concentração de partículas magnéticas, devem ser avaliadas, porém dependem da técnica definida.

Em função do presente trabalho simular a condição prática de aplicação de campo magnético pelo Prods, com possível aquecimento do aço, neste caso do engate, ainda conforme Padilha (2007), vê-se que:

Numerosos fenômenos em ciência dos materiais ocorrem mais rapidamente quando a temperatura é aumentada. Em muitos casos, a dependência da velocidade de reação ou transformação (V) segue uma equação do tipo Arrhenius (1859-1927).

É demonstrada na equação (1) a dependência da velocidade de reação ou transformação, segue a equação de *Artrhenius*.

$$V = c \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right) \quad (1)$$

Onde se tem:

V é a velocidade da reação ou transformação;

c é uma constante;

Q é a energia de ativação;

R é a constante dos gases;

T é a temperatura absoluta.

As propriedades dos materiais estão fortemente ligadas à microestrutura. E para a caracterização destas microestruturas, exigem-se diversas técnicas complementares de análise microestrutural.

A análise microestrutural deste trabalho motivou-se devido à correlação desta com as principais propriedades mecânicas, pois Padilha (2007) mostra que:

Muitas propriedades dos materiais, tais como limite de escoamento, limite de resistência, tenacidade à fratura, resistência ao desgaste e resistência à corrosão são fortemente dependentes da microestrutura.

A caracterização da microestrutura dos materiais exige naturalmente a utilização de numerosas técnicas complementares de análise microestrutural tais como difração de raios x, microscopia óptica, microscopia eletrônica de varredura, microscopia eletrônica de transmissão, microssonda eletrônica e numerosas técnicas indiretas.

Outro fator relevante é levantado por Huang (2013), indicando que um FMEA deveria ser aplicado em análises de fraturas de componentes devido à possibilidade de múltiplas causas, sugerindo não haver uma causa única para falhas de componentes.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, irá ser mencionado todos os materiais e métodos que foram utilizados para a realização deste estudo. Será abordado sobre o aço em estudo, AAR M-201, como foram preparados os corpos de prova, a descrição da magnetização dos corpos de prova, o resfriamento dos corpos de prova, bem como as análises que foram feitas para as discussões que virão no capítulo 4.

#### 3.1 AÇO AAR M-201 GRAU E

O material utilizado para este trabalho foi o aço AAR M-201 grau E, utilizado como engate ferroviário de aço fundido tipo “F”.

O aço Grau E é equivalente ao aço ASTM 13XX que é um aço Carbono com teores de carbono na faixa de 0,32% C, e com teores de Manganês mais elevados, podendo chegar até ao máximo de 1,85%, mas sempre respeitando a relação de Carbono equivalente.

#### 3.2 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

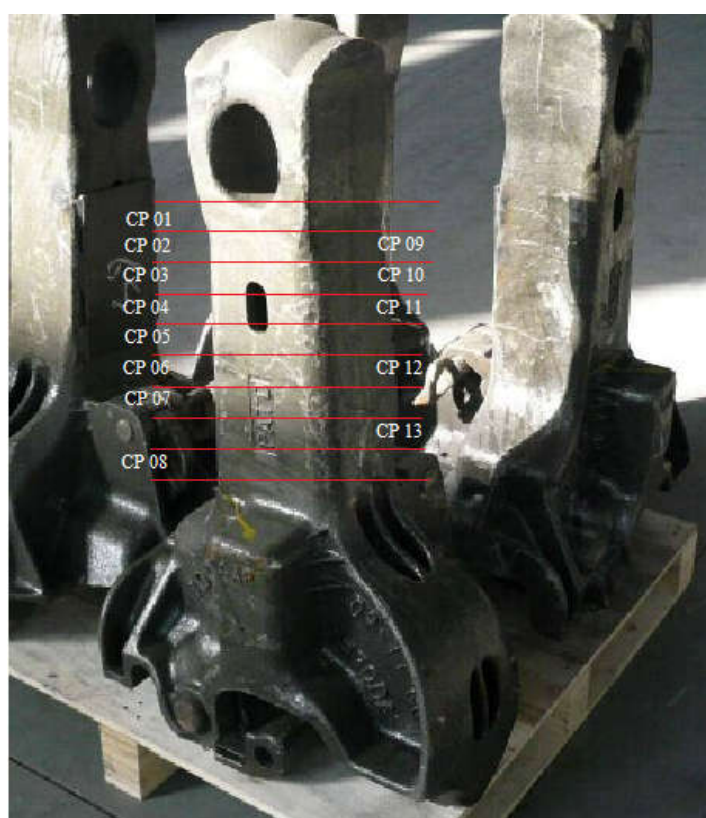
Os corpos de prova foram obtidos na parte da cauda do engate. O engate foi cortado com uso de um maçarico, para a separação da cabeça do engate e da cauda do engate. Posteriormente, esta cauda foi magnetizada. Após o corte, foi inspecionado de forma a garantir um espaçamento de mais de 500 mm da área a ser analisada e a temperatura não passou de 100°C nas áreas dos CPs de 01 a 13. O controle da medição da temperatura foi feito com lápis térmico, o qual funde-se a temperatura for superior ao valor especificado no lápis. Trata-se de um método utilizado por parte de fabricantes de fundidos,

Para o estudo em questão, também faz-se uso de um medidor de campo magnético Digital da Magnaflux Modelo PM – 200, que opera ligado na energia a 220 Volts e sua medição de campo magnético se dá em Gauss com precisão de 0,5 Gauss, para verificar o correto funcionamento do equipamento e a estabilidade de campo magnético ao centro das pontas dos Prods, de forma a garantir a máxima intensidade de campo magnético em Gauss exatamente no centro entre os dois Prods.

Após a magnetização utilizou-se para tal a solução de Nital (2%) durante 10 segundos com o intuito de revelar a estrutura do aço AAR M-201 Grau E, mostrando a estrutura original e a estrutura após magnetização com Prods, portanto pretende-se revelar áreas com a presença de perlita fina e martensita não revenida, sendo esta última o foco do trabalho, além, é claro, se houver a presença de trincas e microtrincas sugeridas devido ao aquecimento e resfriamento brusco destas áreas magnetizadas com o Prods, o que pode provocar o aparecimento não desejado de trincas e microfissuras, lembrando que o processo de inspeção por Prods é justamente para verificar a presença de descontinuidades e estas são indesejáveis ao processo e a peça final expedida, e conforme citado existe uma elevação de cargas que pode em estado trativo propagar possíveis trincas geradas anteriormente pelo processo de fabricação e ou inspeção, quer seja por partículas magnéticas ou outros que gerem alterações microestruturais.

Os corpos de prova foram cortados conforme demonstrado nas Figuras 32 e 33.

Figura 32: Croqui esquemático do engate exemplificando a retirada dos CPs.



Fonte: Próprio autor.

Nas Figuras 32 e 33, vê-se o croqui esquemático do corte de serra do engate após a magnetização, detalhando como foi seccionado o engate para que fossem retiradas as amostras para análise, em fatias de aproximadamente 40 mm de espessura.

Figura 33: Corte do engate.



Fonte: Próprio autor.

### 3.3 MAGNETIZAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Os corpos de prova foram magnetizados no laboratório da FATEC da unidade de Pindamonhangaba – SP, em uma máquina estacionária de partícula magnética s da Foerster Imaden, conforme Figura 34.

Figura 34: Máquina estacionária de partícula Magnética, com o uso de Prods.



Fonte: Próprio autor.

O Equipamento utilizado foi um Foerster IMADEN que trabalha com a seguinte especificação:

Fabricante: Foerster IMADEN

Tensão: 220 Volts

Frequência: 60 Hz

Corrente de entrada: 30 Ampères

Corrente de saída: 1200 Ampères (com um variômetro para reduzir a amperagem de saída)

O mesmo foi operado com os Prods, que são pontas metálicas de ligas de Cobre (Cu) para fazer o contato entre o equipamento e a superfície da peça.

A cauda do engate foi magnetizada por completo com tempo de magnetização do Prods de 10 segundos, e utilização de corrente alternada com leitura direta no amperímetro do aparelho, lembrando que a denominação de Corpo de prova (CP) de 1 a 13 refere-se à área que após magnetização foi cortada para obtenção dos corpos de prova. Portanto, não houve magnetização de corpos de prova separados e sim da peça por completo, simulando a condição real aplicada pelo fabricante:

Os corpos de prova foram magnetizados conforme demonstra a tabela 1.

Tabela 01: Demonstração do corte do engate. Cada corpo de prova foi magnetizado com uma amperagem e com um tipo de resfriamento.

Identificação do CP	Corrente de Magnetização (Ampères)	Meio de resfriamento
01	Sem magnetização	não aplicável
02	100	água
03	200	água
04	300	água
05	400	água
06	500	água
07	800	água
08	1000	água
09	100	ar forçado
10	200	ar forçado



11	300	ar forçado
12	500	ar forçado
13	900	ar forçado

Fonte: Próprio autor.

### 3.4 RESFRIAMENTO DOS CORPOS DE PROVA DURANTE ENSAIO DE MAGNETIZAÇÃO

O resfriamento dos corpos de prova se deu de duas formas: ao ar forçado e com água, sendo que no primeiro caso, ao ar, utilizou um ventilador para simular a condição de operação dentro da cabine de partículas magnéticas onde, devido a ser um ambiente fechado e sem circulação de ar, liga-se um ventilador industrial que acaba promovendo um resfriamento forçado da superfície da peça.

A segunda forma de resfriamento foi com o uso de água, para simular a condição de ensaio por partículas magnéticas via úmida, pois o pó magnético utilizado é conduzido via úmida através da água e, portanto, a severidade de resfriamento tem pouca variação com o uso de água ou da mistura com o pó magnético.

### 3.5 PREPARAÇÃO METALOGRÁFICA DOS CORPOS DE PROVA

#### 3.5.1 Corte

O Processo de corte realizou-se em duas etapas, primeiramente o corte da peça após a magnetização, com uma máquina de corte a frio. Como a cauda do engate foi toda magnetizada, depois disso realizou-se o corte dos corpos de prova por serra de fita, corte lento e a frio para evitar o aquecimento da peça. Ainda assim, utilizou-se fluido de refrigeração no corte.

Num segundo estágio, realizou-se o corte em *Cut-off* de Laboratório. É demonstrado, na Figura 35, a vista Frontal e Lateral do Equipamento de Corte (*Cut-off* com Disco de Corte Abrasivo para Aço).

Figura 35: Vista Frontal e Lateral do Equipamento de Corte (*Cut-off* com Disco de Corte Abrasivo para Aço)



Fonte: Próprio autor.

### 3.5.2. Embutimento

Procedeu-se o embutimento com baquelite para facilitar o manuseio das amostra.

Todas as amostras foram devidamente identificadas, no verso do baquelite conforme identificação relatada, de acordo com a amperagem e a forma de resfriamento no pé do Prods, de CP 01 a CP 13 além do CP 01 não magnetizado, todos foram gravados por uma microretífica, promovendo a sua identificação permanente.

É demonstrado na Figura 36 todos os materiais utilizados, tais como: desmoldante, baquelite e prensa embutidora.

Figura 36: Desmoldante



Baquelite



Prensa embutidora



Fonte: Próprio autor.

Na Figura 37 vê-se os corpos de prova após embutimento com baquelite.

Figura 37: CPs 01 a 13 embutidos.

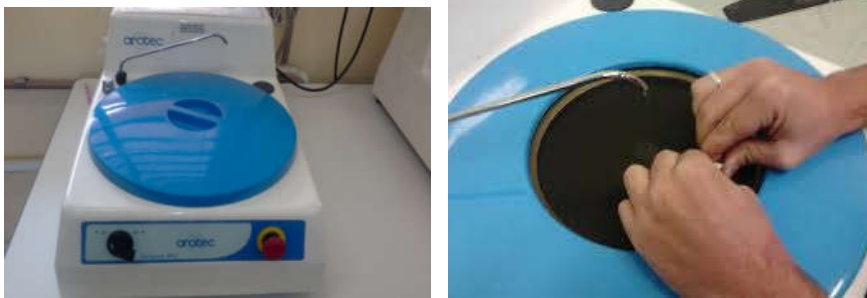


Fonte: Próprio autor.

### 3.5.3. Lixamento

Processo utilizado para eliminar as marcas deixadas pela ferramenta de corte na amostra, melhorando acabamento superficial da amostra. Utilizaram-se lixas d'água de granulometrias diferentes (220, 320, 400, 600, 800, 1000 e 2000), sendo que inicialmente utilizaram-se lixas de maior granulometria, e finalizou-se com lixas de baixa granulometria, com o intuito de que cada nova lixa deve retirar as marcas deixadas pela lixa anterior. O processo foi feito com Lixadeiras AROTEC 110V com discos de lixa substituíveis (220, 320, 400, 800, 1000 e 2000), como mostrado na Figura 38.

Figura 38: Lixadeiras AROTEC 110V com discos de lixa substituíveis (220, 320, 400, 800, 1000 e 2000).



Fonte: Próprio autor.

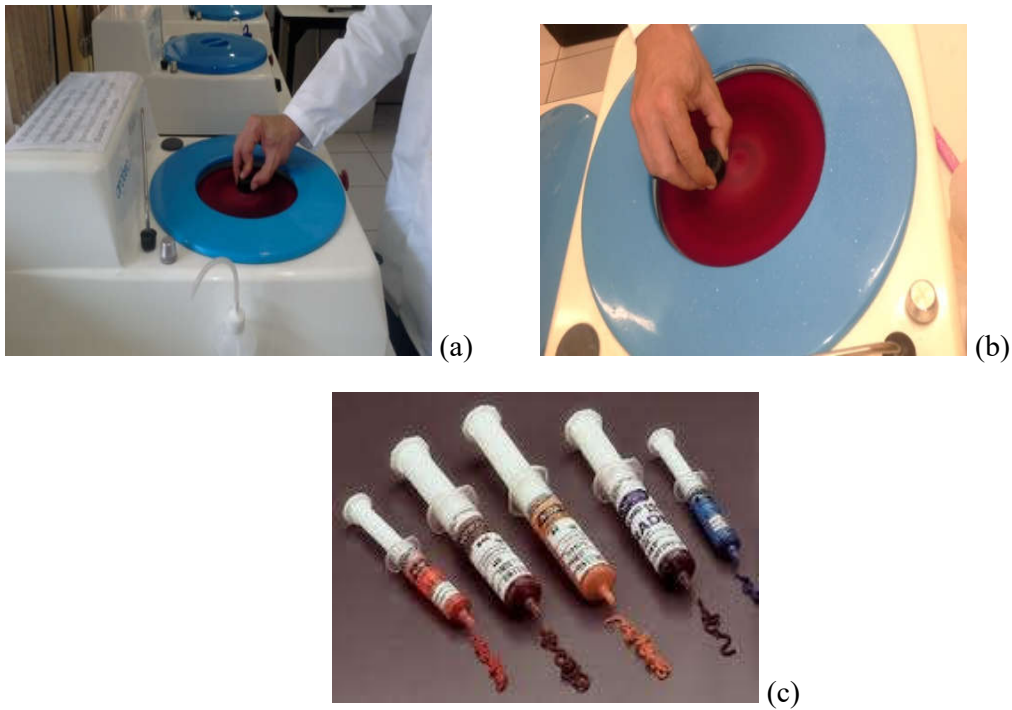
#### 3.5.4- Polimento

Iniciou-se o polimento com abrasivo a base de Alumina e depois Sílica 1 micra e 0,5 micra respectivamente.

O critério de escolha dos abrasivos utilizado foi função das propriedades do material estudado.

É demonstrado na Figura 39 as politrizes AROTEC 110V com feltro de polimento. (c) pastas abrasivas (sílica e alumina).

Figura 39: (a) e (b) Politrizes AROTEC 110V com feltro de polimento. (c) pastas abrasivas (sílica e alumina).



Fonte: Próprio autor.

### 3.5.5 Ataque químico

Após ser realizado o polimento, realizou-se o ataque químico na amostra, sendo utilizado Nital 2%, conforme Figura 40. Com a realização do ataque, verifica-se a presença de fases distintas, sendo o reconhecimento dessas fases fundamental para o entendimento das propriedades mecânicas do material.

Figura 40: À esquerda nital 10% , e à direita nital 2%.



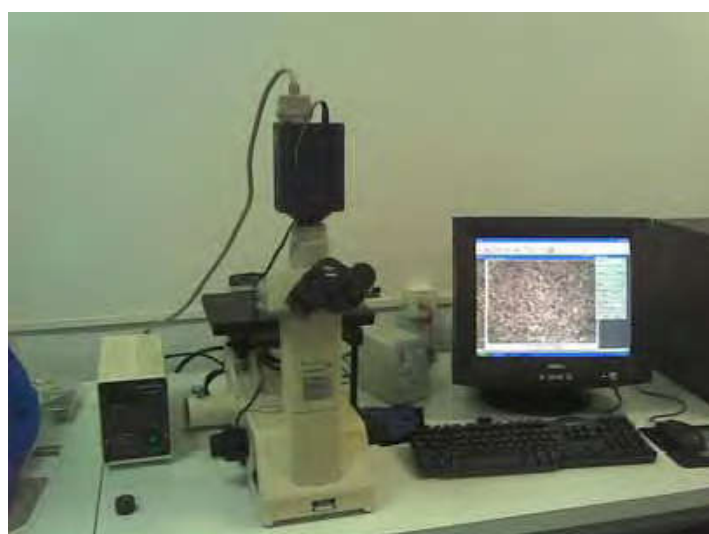
Fonte: Próprio autor.

### 3.6 ANÁLISE METALGRÁFICA

Utilizou-se para esta análise metalográfica de microestrutura a microscopia óptica com aumentos de 50x, 100x, 200x, 500x e 1000x, as micrografias foram obtidas no LAIMat do DMT/FEG/UNESP, com o microscópio óptico Nikon EIPHOT 200, acoplado a um microcomputador e uma câmera Axiocam ICc3-ZEISS.

Na Figura 41, é apresentado a foto do microscópio de luz refletida que foi utilizado.

Figura 41: Foto do microscópio de luz refletida



Fonte: Próprio autor.

### 3.7 ANÁLISE QUÍMICA

A análise química foi feita por espectrometria a vácuo, em equipamento ARL 400, vide Figura 42, em duas queimas, os resultados médios de todos os elementos encontram-se descritos nos resultados do item 4.1.

Figura 42: Representação do Espectrômetro ARL utilizado para a análise Química.



Fonte: Próprio autor.

Outro método utilizado para análise química foi a utilização de microscópio eletrônico de varredura acoplado a uma micro sonda EDS de raios-X, conforme Figura 43 e os resultados constam no capítulo 4, sub capítulo 4.2.

Figura 43: Microscópio eletrônico de varredura acoplado a uma micro sonda EDS de raios-X



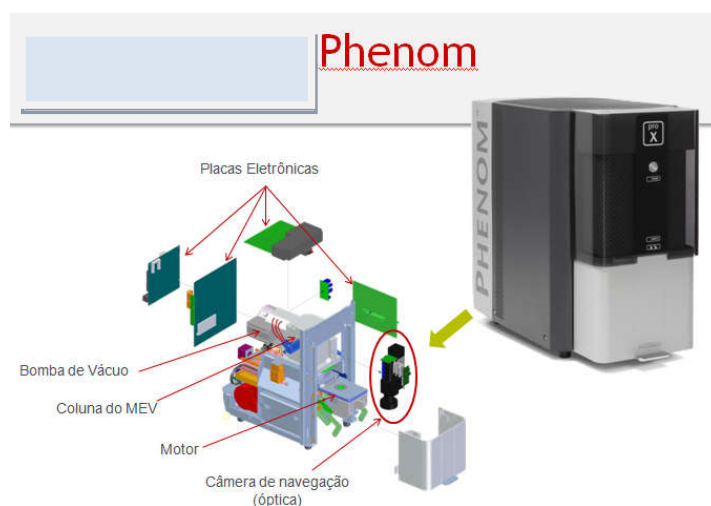
Fonte: Próprio autor.

### 3.8. MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

Utilizou a microscopia eletrônica de varredura (MEV), para a amostra do CP 08, que foi magnetizada com 1.000 ampères e apresentou além de alteração microestrutural, uma série de trincas e, portanto, considerou-se a mais representativa.

O ensaio de microscopia eletrônica de varredura foi feito utilizando o equipamento Phenom, demonstrado na Figura 44:

Figura 44: Microscópio eletrônico de varredura acoplado a uma micro sonda EDS de raios-X



Fonte: Próprio autor.

O equipamento onde foi feito o ensaio de microscopia eletrônica de varredura tem como especificação:

Marca: Phenom pro Suite

*Pro Suite Hardware*

- Monitor 19º + computador (EEE-box)
- Roteador – conexão de rede
- Teclado e *mouse*

*Pro Suit Software*



- Analise elementar (sistemas EDS)
- Reconstrução de rugosidades 3D
- Mapeamento de imagem automatizado
- *Fibermetric* (medição de fibras)
- *Porometric* (medição de poros)

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os corpos de prova retirados das fatias obtidas do engate foram analisados quanto à composição química em espectrometria (ARL 400) e microestrutura em microscopia óptica, e os resultados seguem nos sub capítulos seguintes.

##### 4.1. RESULTADOS : (média de 2 queimas)

Carbono (C)	=	0,28 %
Manganês (Mn)	=	1,60 %
Silício (Si)	=	0,5 %
Fósforo (P)	=	0,025%
Enxofre (S)	=	0,020 %
Alumínio (Al)	=	0,02 %
Titânio (Ti)	=	0,005%
Boro (B)	=	0,001%
Residuais	=	0,000%
Carbono eq (CE)	=	0,7216%

Os valores de composição química obtidos acima estão de acordo com a norma AAR M-201 Grau E que foram descritos no capítulo 2.

O Carbono equivalente foi calculado com base na seguinte fórmula (2), conforme a norma AAR M-201:

$$CE = C + \frac{Mn + Si}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \quad (2)$$

Vê-se que além do Carbono as variações de Manganês e Silício é que são as mais importantes, pois os outros elementos estão mais na forma residual, advindos possivelmente da sucata ou de ferro ligas em baixos teores.

## 4.2 ANÁLISE MICROESTRUTURAL

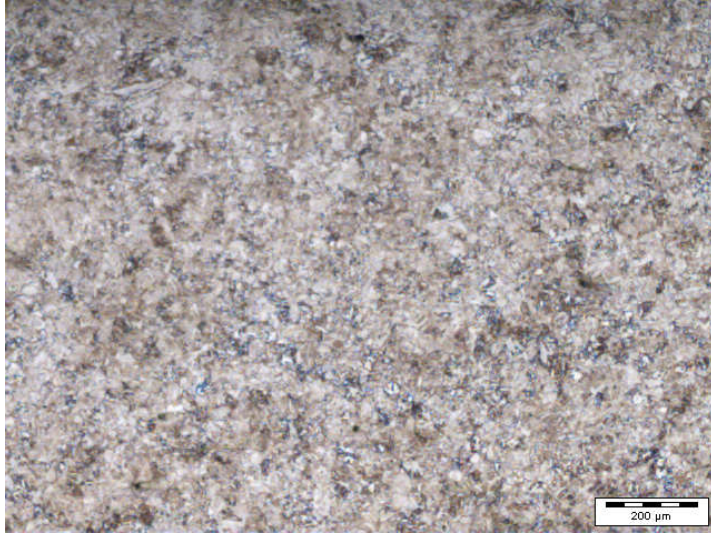
A análise microestrutural foi realizada após a magnetização por Prods, com o objetivo de verificar se ocorre a transformação de fase da microestrutura.

Conforme análises realizadas nos CPs de 1 a 13, após ataque de 15 segundos com Nital 2%, fez-se um acervo com mais de 200 fotos em termos de micrografia da estrutura com o objetivo de verificar a alteração microestrutural localizada na região de contato do Prods.

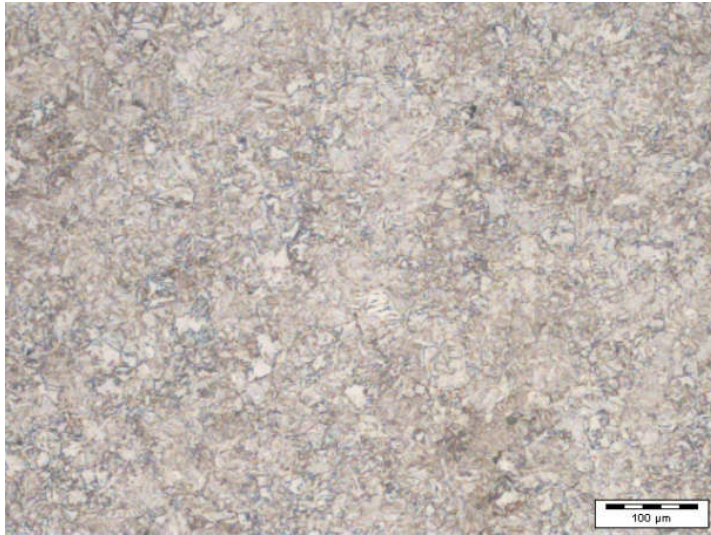
A seguir serão apresentadas as fotos das micrografias feitas nos 13 Corpos de prova a fim de analisar a microestrutura após a magnetização com Prods e resfriamento a água e a ar.

Serão discutidos os resultados das micrografias a partir de cada CP de forma individual.

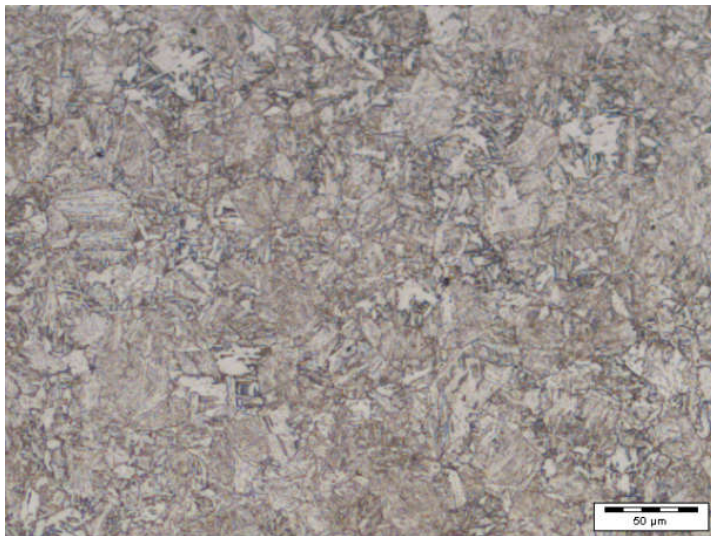
Figura 45: Fotomicrografia CP 01 (sem magnetização). Microscopia óptica, Nital 2% com ampliações de (a) 50x; (b)100x; (c) 200x; (d) 500x e (e) 1000x



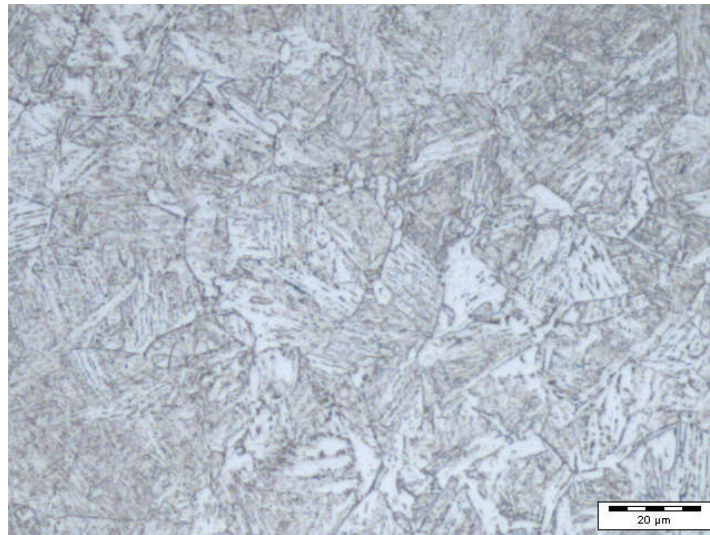
(a) CP 01 – 50x



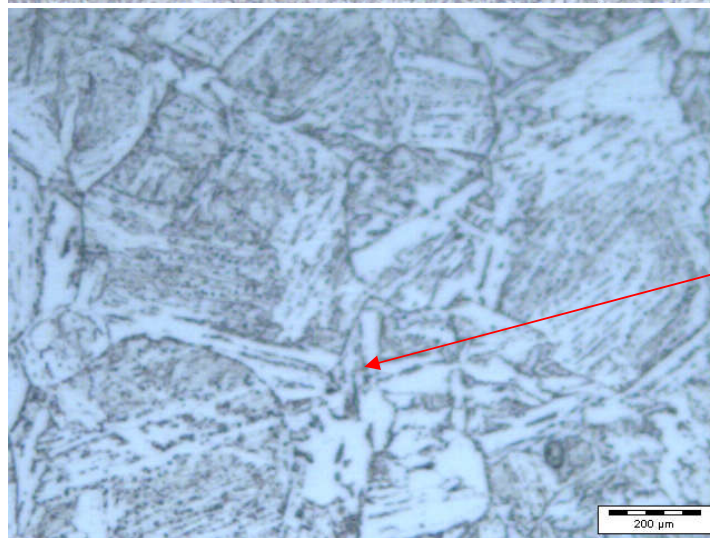
(b) CP 01 – 100x



(c) CP 01 – 200x



(d) CP 01 – 500x



Material de  
base estrutura  
ferrítica

(e) CP 01-1000x

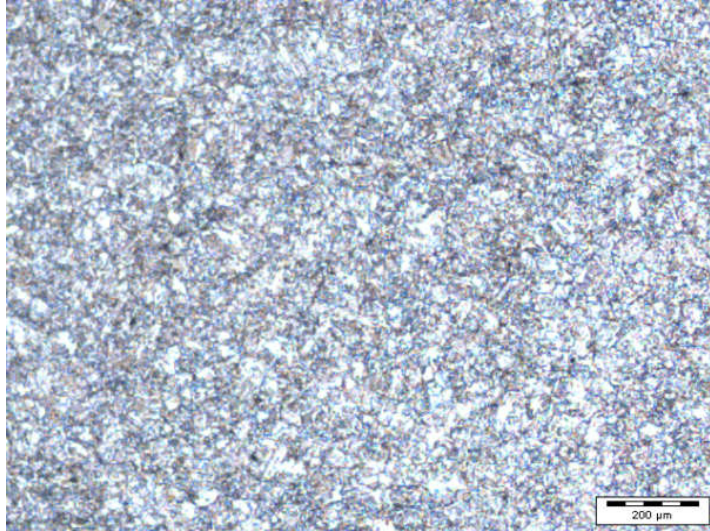
O objetivo de ter-se retirado o corpo de prova 01, da área de inspeção do engate e sem magnetização, foi para criar o efeito de comparação com todos os demais corpos de prova magnetizados, uma vez que o CP 01, sem estar magnetizado, está com a estrutura como produzida pelo fabricante.

Desta forma, pode-se verificar a ocorrência ou não de alteração microestrutural, e possível geração de trincas, devido ao aquecimento induzido pelo Prods nos CPs de 02 a 13.

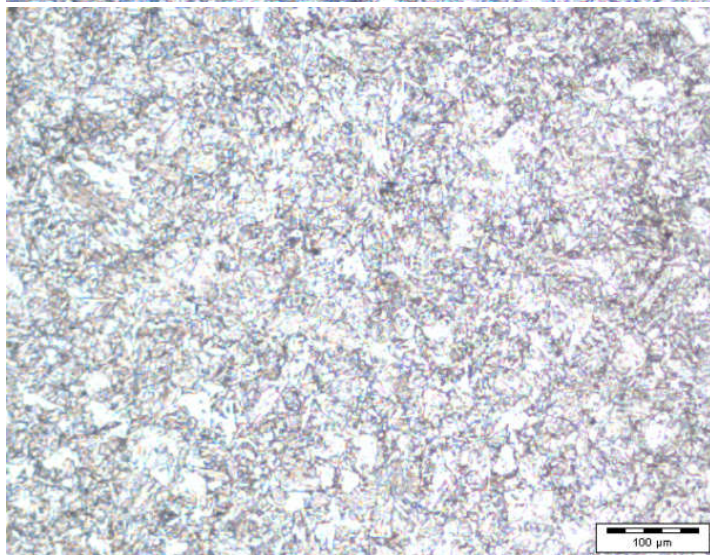
A microestrutura obtida no CP 01 com ataque Nital 2% por 15 segundos, e sem magnetização por Prods, tem-se: (a) microestrutura predominante ferrítica (b) detalhe da microestrutura ferrítica (c) detalhe da microestrutura ferrítica (d) microestrutura ferrítica (e) vê-se os contornos de grão e estrutura de ferrita.

Este tipo de microestrutura composta integralmente pela fase ferrítica é compatível com o material na condição como fornecido pelo fabricante.

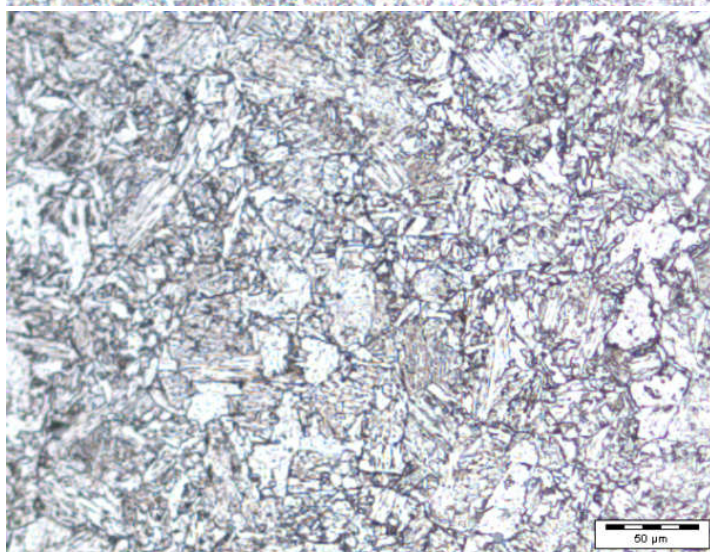
Figura 46: Fotomicrografia CP 02 (100 ampères, resfriamento a água). Microscopia óptica, Nital 2% com ampliações de (a) 50x; (b)100x; (c) 200x; (d) 500x e (e) 1000x



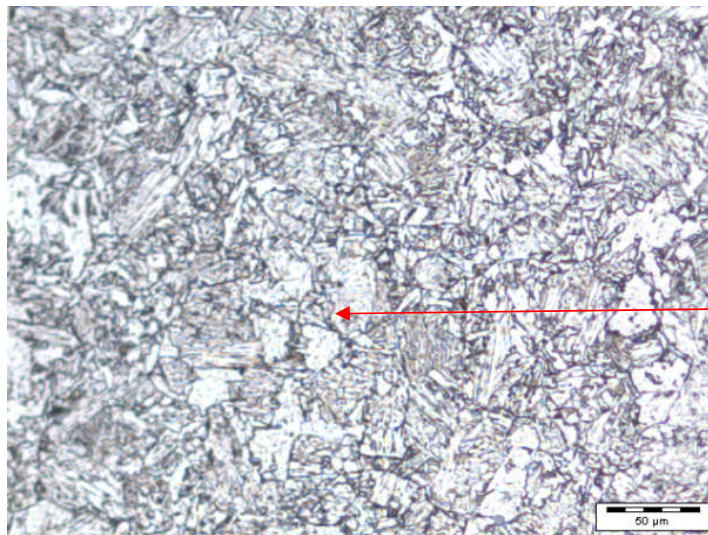
(a) CP 02 – 50x



(b) CP 02 – 100x

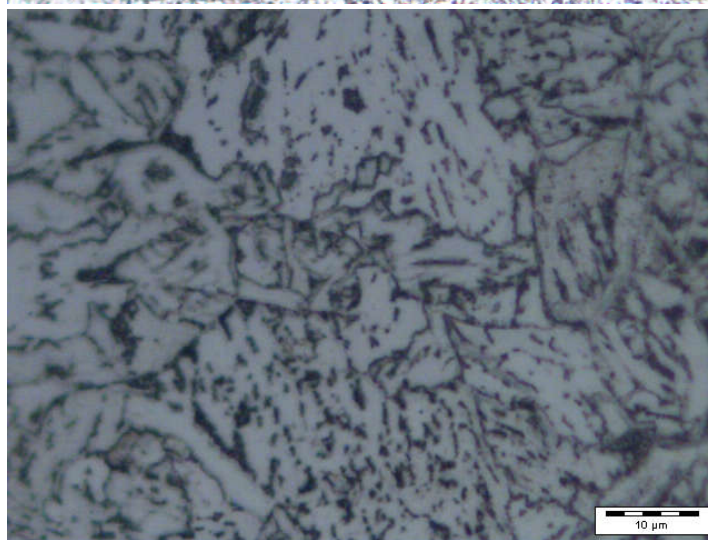


(c) CP 02 – 200x



Estrutura  
Ferrítica

(d) CP 02 – 500x



(e) CP 02-1000x

A microestrutura obtida no CP 02, com ataque Nital 2% por 15 segundos e com magnetização por Prods por 5 segundos, com 100 Ampères, e resfriamento com água no pé do Prods.

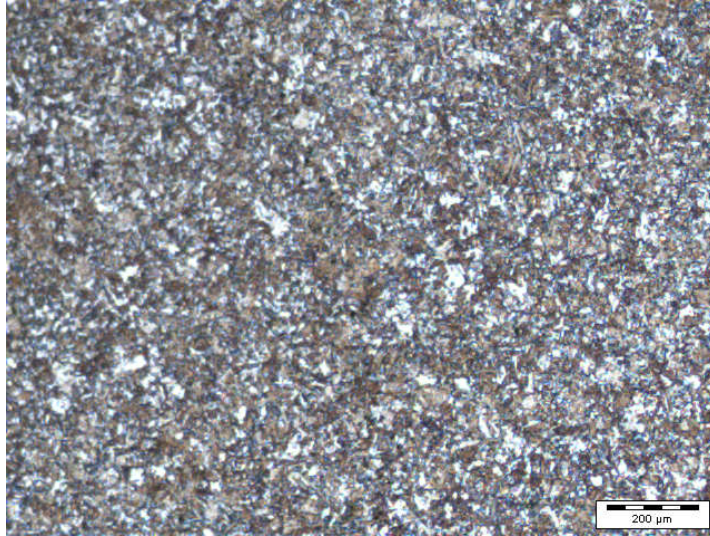
Tem-se: (a) microestrutura sem sinal de aquecimento localizado, na região magnetizada, (b) microestrutura ferrítica e sem sinais de alteração microestrutural ou aquecimento localizado, (c) presença de microestrutura ferrítica, sem sinais de alteração microestrutural, (d) maior detalhe da microestrutura, sem alteração microestrutural (e) vê-se os contornos de grão e sem alteração microestrutural.

Vê-se que devido à baixa amperagem e, conseqüentemente, ao não aquecimento suficiente do material a temperaturas mais elevadas, a microestrutura mantém-se inalterada do seu estado original, conforme CP 01.

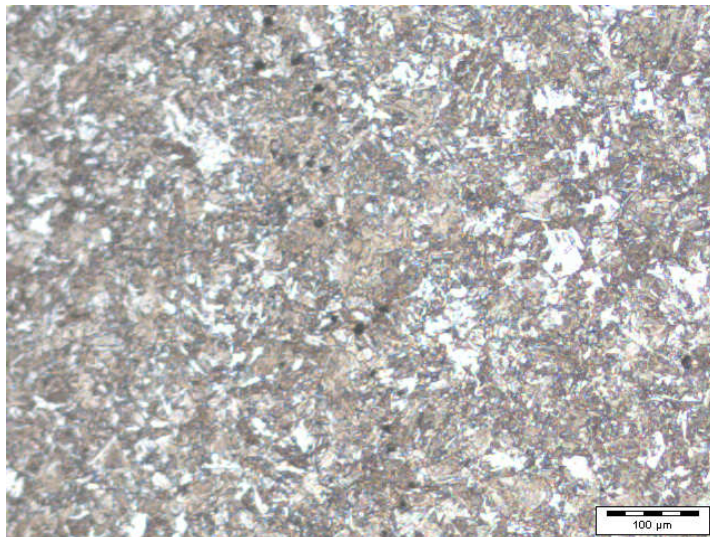


Percebeu-se, desta forma, que com amperagem de 100 ampères e com resfriamento com água no pé do Prods, não houve mudança microestrutural e a mesma permaneceu como estrutura ferrítica, conforme Colpaert (2008).

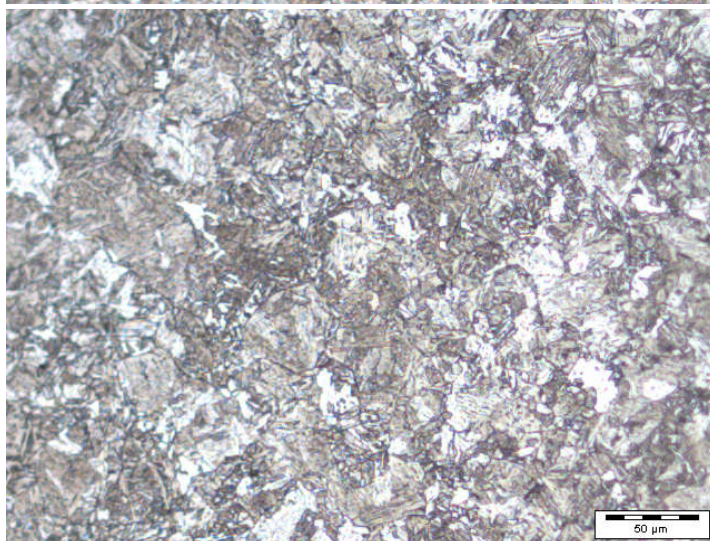
Figura 47: Fotomicrografia CP 03 (200 ampères, resfriamento a água). Microscopia óptica, Nital 2% com ampliações de (a) 50x; (b)100x; (c) 200x; (d) 500x e (e) 1000x



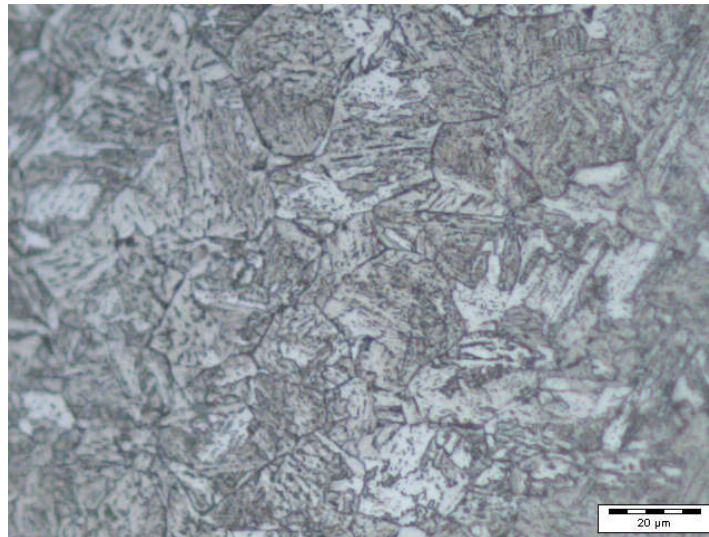
(a) CP 03 – 50x



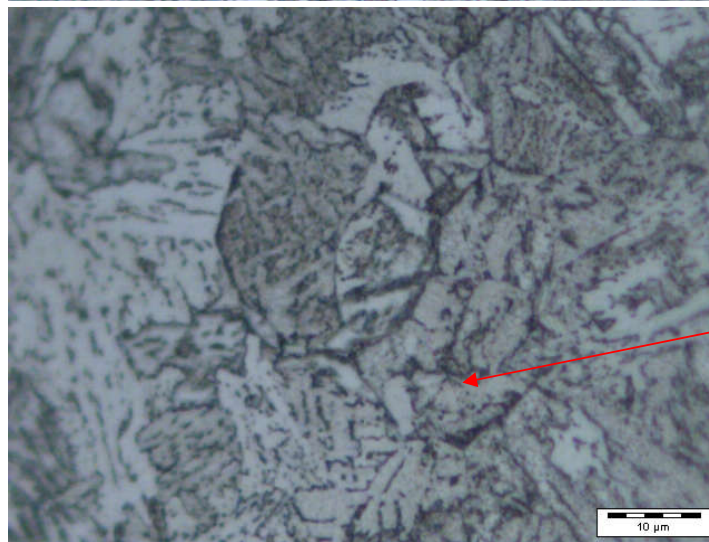
(b) CP 03 – 100x



(c) CP 03 – 200x



(d) CP 03 – 500x



(e) CP 03–1000x

Estrutura  
Ferrítica

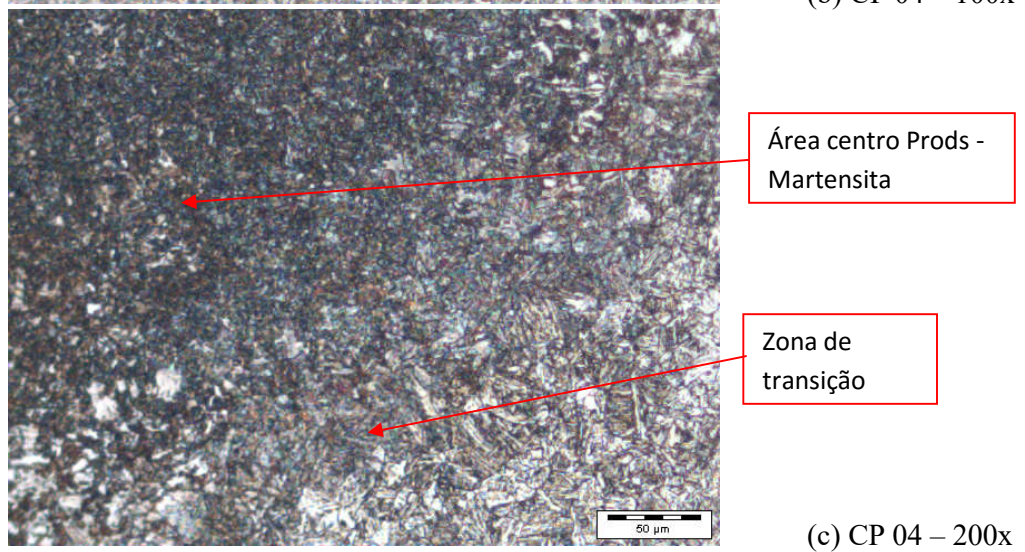
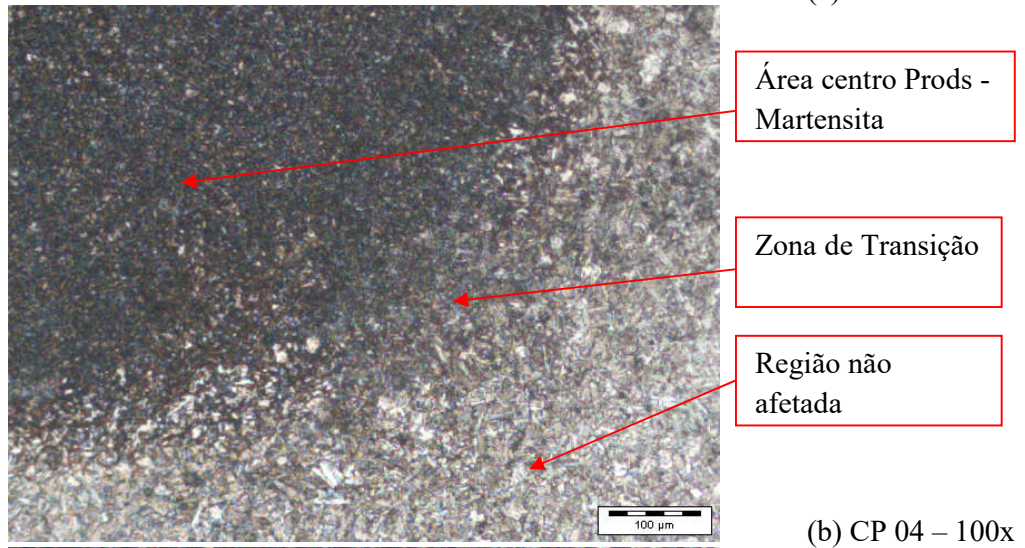
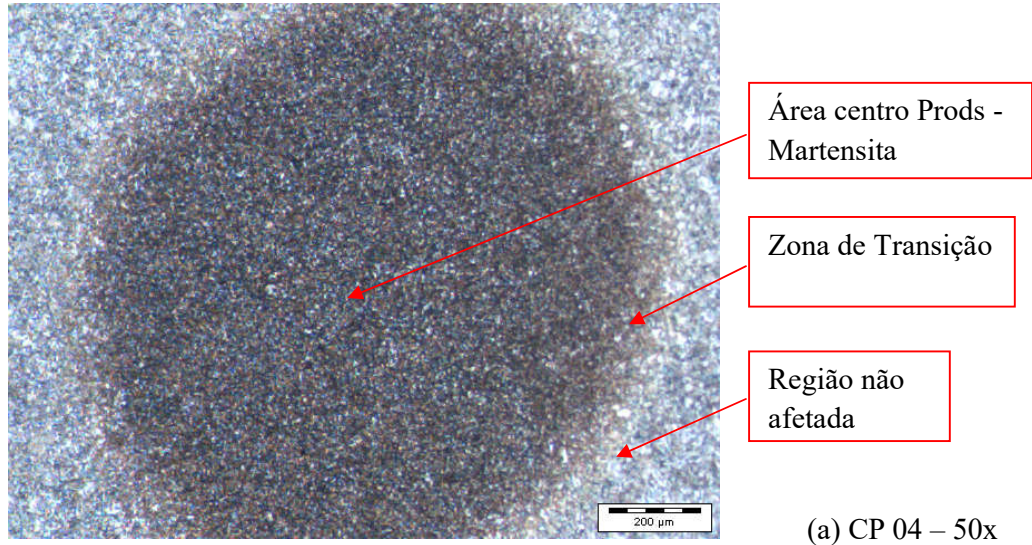
Microestrutura obtida com ataque Nital 2% por 15 segundos e com magnetização por Prods por 5 segundos com 200 Ampères, e resfriamento com água no pé do Prods,

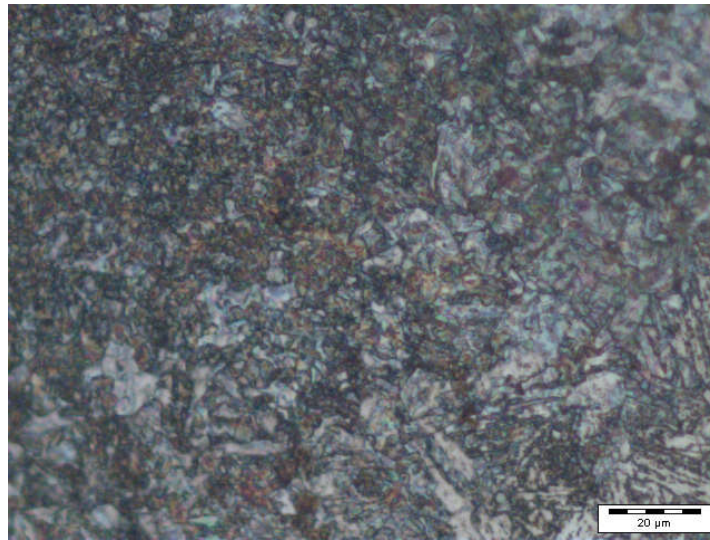
Tem-se: (a) microestrutura ferrítica sem sinais de aquecimento localizado na região magnetizada (b) microestrutura ferrítica e sem sinais de alteração microestrutural ou aquecimento localizado (c) microestrutura ferrítica, sem sinais de alteração microestrutural (d) microestrutura ferrítica sem sinais de alteração microestrutural (e) microestrutura ferrítica e sem alteração microestrutural do material, conforme comparado com CP 01.

Na micrografia (c), vê-se uma estrutura Ferrítica, conforme Colpaert (2008).

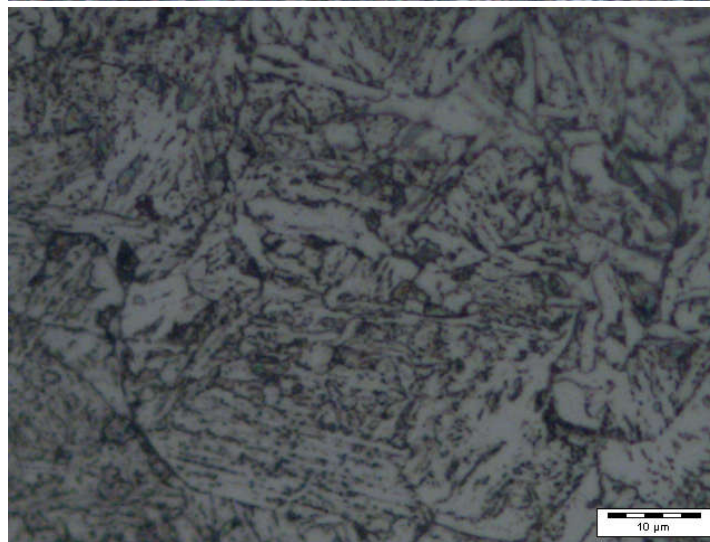
Em (d) vê-se em maior detalhe que devido à baixa amperagem, não houve aquecimento suficiente para elevar a temperatura no patamar da austenização e consequentemente temperar o material.

Figura 48: Fotomicrografia CP 04 (300 ampères, resfriamento a água). Microscopia óptica, Nital 2% com ampliações de (a) 50x; (b) 100x; (c) 200x; (d) 500x e (e) 1000x





(d) CP 04 – 500x



(e) CP 04–1000x

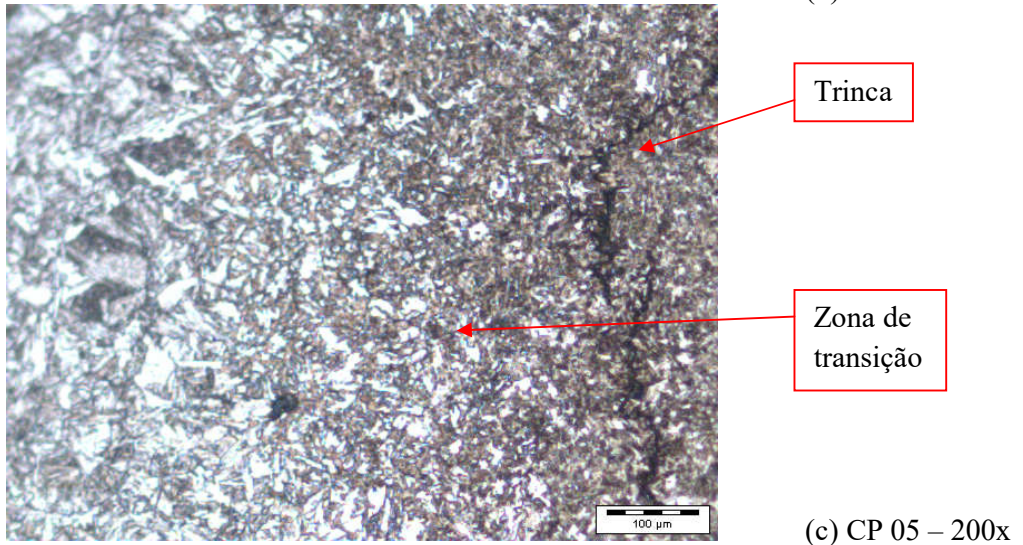
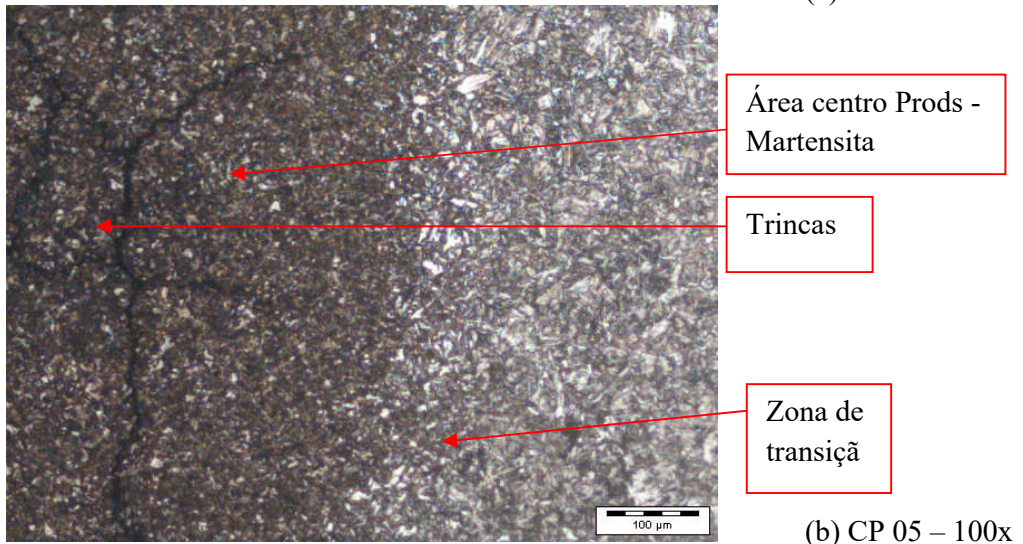
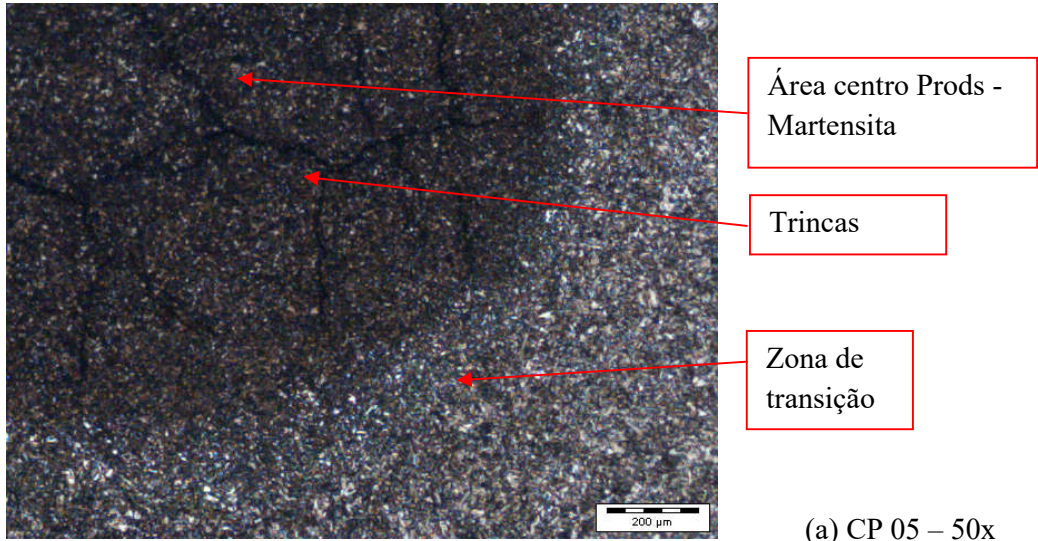
Microestrutura obtida com ataque Nital 2% por 15 segundos e com magnetização por Prods por 5 segundos com 300 Ampères, e resfriamento com água no pé do Prods.

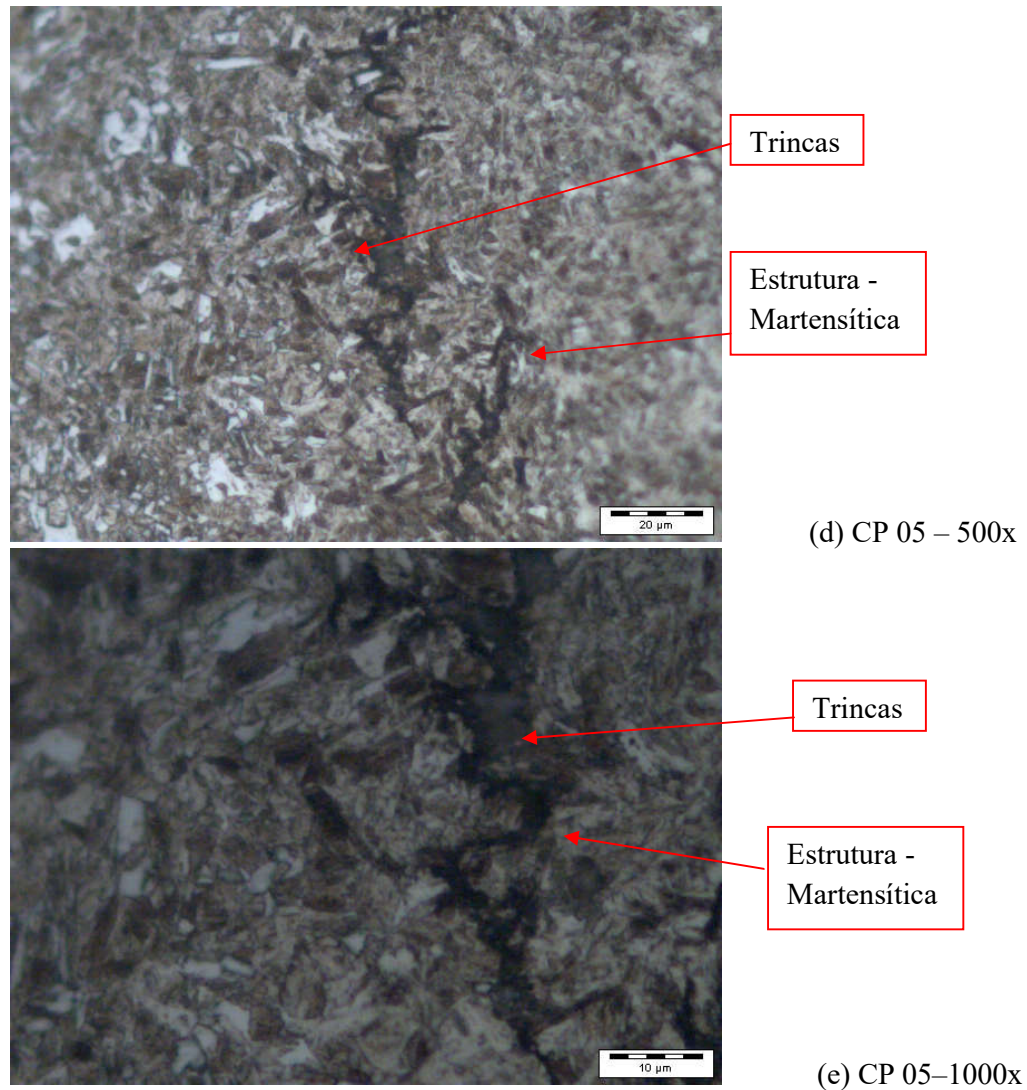
Tem-se em: (a) microestrutura com coloração bem mais escura no centro, (b) microestrutura martensítica e evidência de áreas de transição, que são áreas parcialmente afetadas, ou seja, o aquecimento teria sido maior no centro e foi perdendo força de magnetização devido à impedância magnética do aço, portanto a temperatura não teria sido suficiente em toda a extensão, e, fora desta área, vê-se uma região não afetada, (c) microestrutura martensítica no centro e áreas de ferrita na área não afetada, (d) com maior detalhe da microestrutura martensítica, (e) microestrutura com ferrita evidenciando os contornos de grão, esta micrografia foi feita em área da região não afetada.

Vê-se em todas as ampliações sinais vitais de aquecimento, conforme relatado em (a) vê-se a esfera escura bem no centro onde foi aplicado o Prods, em (b), (c) e (d) vê-se

claramente a formação de microestrutura martensítica, em (e) na região não afetada temos a presença de ferrita indicando também sinais de aquecimento, conforme Colpaert (2008).

Figura 49: Fotomicrografia CP 05 (400 ampères, resfriamento a água). Microscopia óptica, Nital 2% com ampliações de (a) 50X; (b)100X; (c) 200X; (d) 500X e (e) 1000X





Microestrutura obtida com ataque Nital 2% por 15 segundos e com magnetização por Prods por 5 segundos com 400 Ampères, e resfriamento com água no pé do Prods,

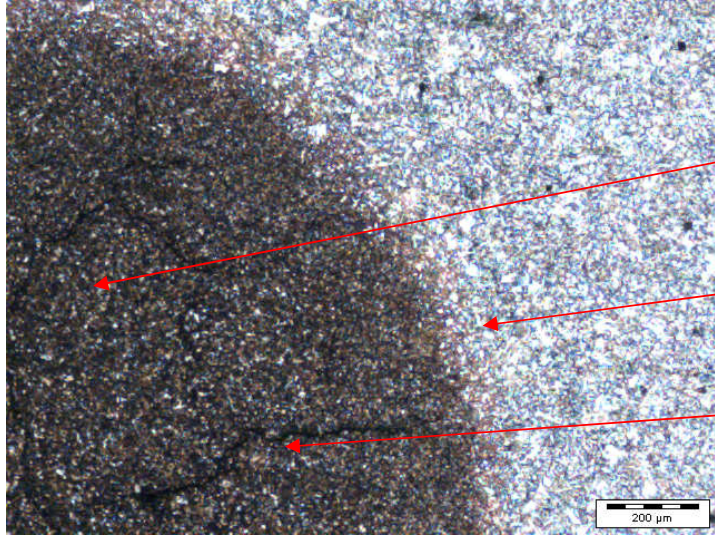
Tem-se em: (a) com microestrutura com aquecimento e trincas no centro do Prods e zona de transição (b) microestrutura martensítica e trincas (c) microestrutura ferrítica fora da área aquecida e microestrutura martensítica na área do Prods (d) microestrutura martensítica e com trincas (e) onde vê-se detalhe das trincas que se propagaram na região de estrutura martensítica.

Vê-se que houve um aquecimento suficiente para austenitizar e devido ao meio de resfriamento ser mais severo, no caso a água, ocorreu à têmpera do material conforme Chiaverini (2008), com posterior formação de trincas.



Vê-se também que as trincas propagaram-se somente na região temperada, ou seja, onde havia microestrutura martensítica com dureza mais elevada e sem a presença da fase ferrítica, que conforme Meyers e Chawla (2009) e Reed Hill (2008) promovem um embotamento da trinca evitando assim a sua propagação, pois a fase ferrítica tem uma tenacidade maior em comparação com a fase martensítica, fazendo com que a fase ferrítica absorva maior energia da trinca em comparação à fase martensítica e com isto sendo necessário uma maior energia à movimentação de discordâncias, Van Vlack (2013).

Figura 50: Fotomicrografia CP 06 (500 ampères, resfriamento a água). Microscopia óptica, Nital 2% com ampliações de (a) 50x; (b)100x; (c) 200x; (d) 500x e (e) 1000x

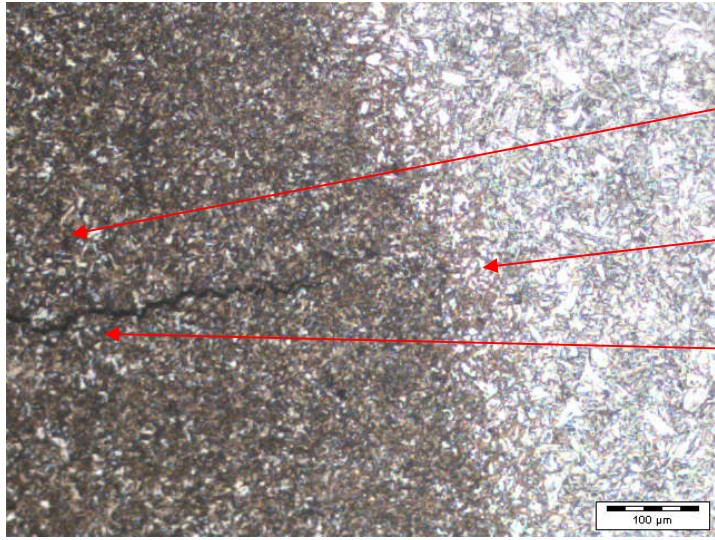


Área centro Prods -  
Martensita

Zona de  
transição

Trincas

(a) CP 06 – 50x

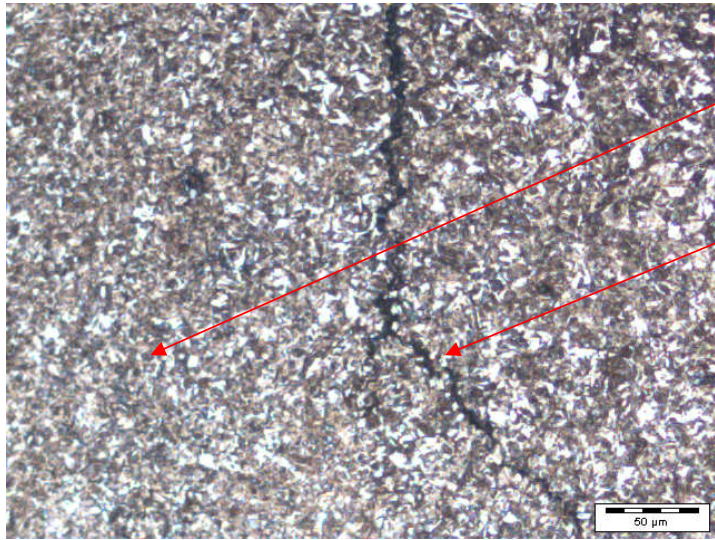


Área centro Prods -  
Martensita

Zona de  
transição

Trincas

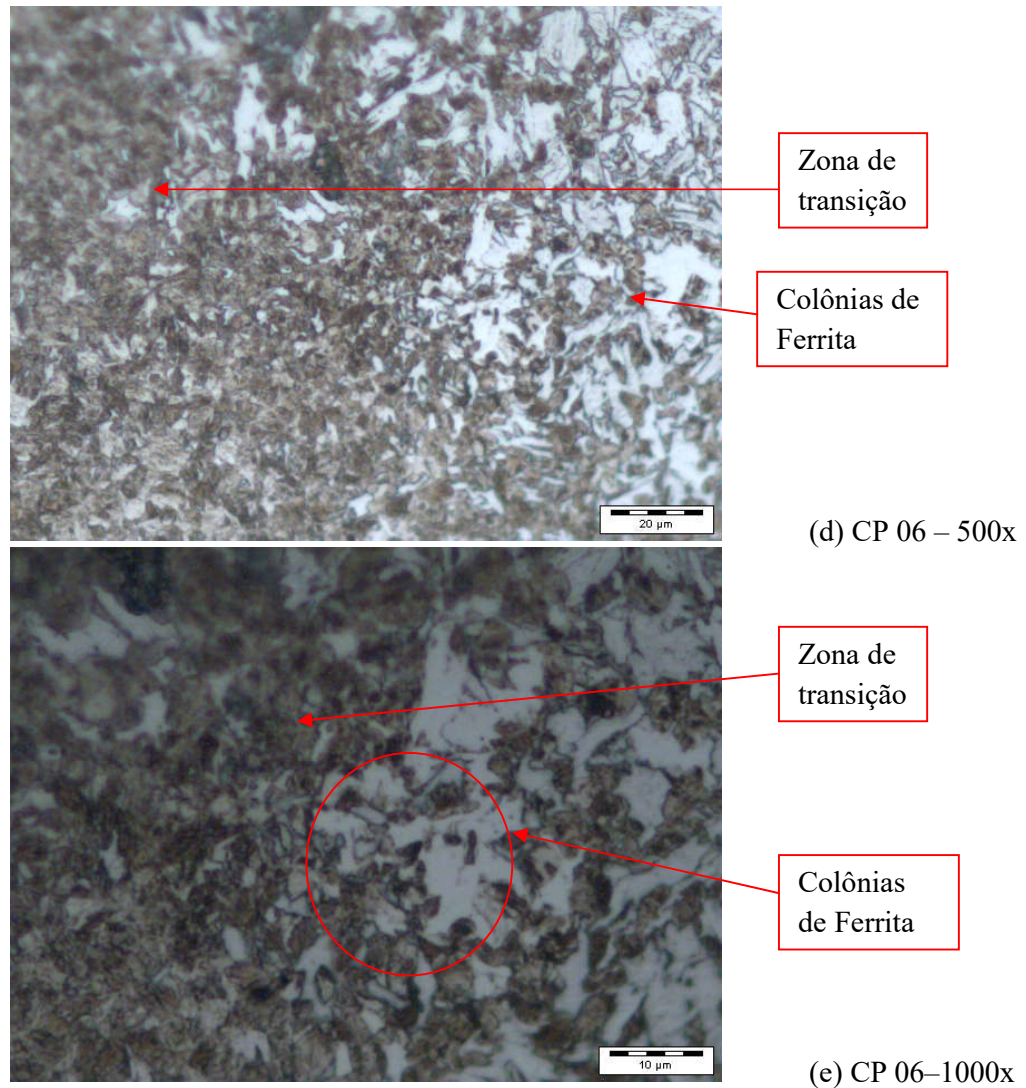
(b) CP 06 – 100x



Zona de  
transição

Trincas

(c) CP 06 – 200x



Microestrutura obtida com ataque Nital 2% por 15 segundos e com magnetização por Prods por 5 segundos com 500 Ampères, e resfriamento com água no pé do Prods.

Tem-se em: (a) microestrutura martensítica, zona de transição e áreas claras de ferrita, com o aquecimento e trincas no centro do Prods (b) microestrutura martensítica, aquecimento e trincas no centro do Prods (c) microestrutura ferrítica fora da área aquecida e martensítica no centro do Prods (d) microestrutura martensítica (e) microestrutura martensítica e área de transição com colônias de ferrita.

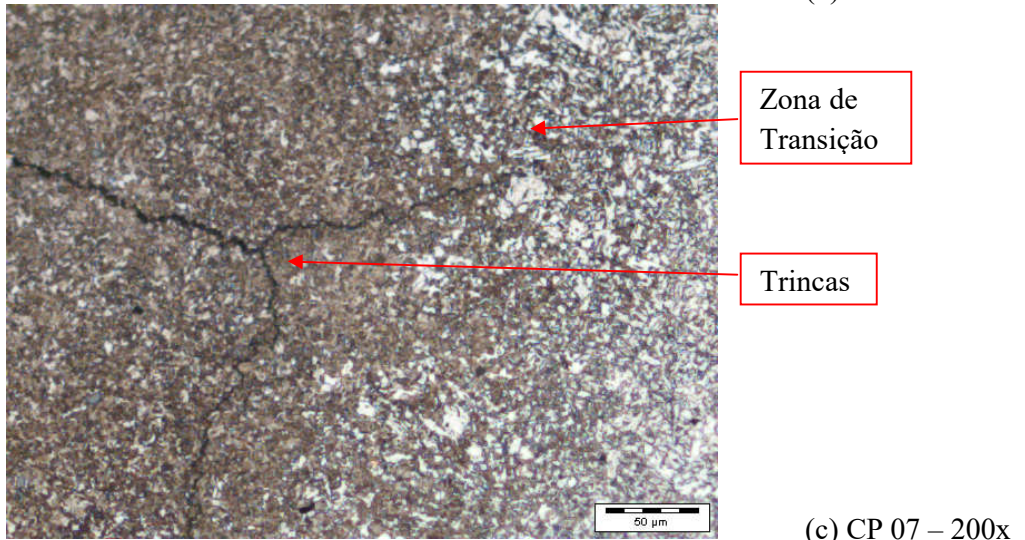
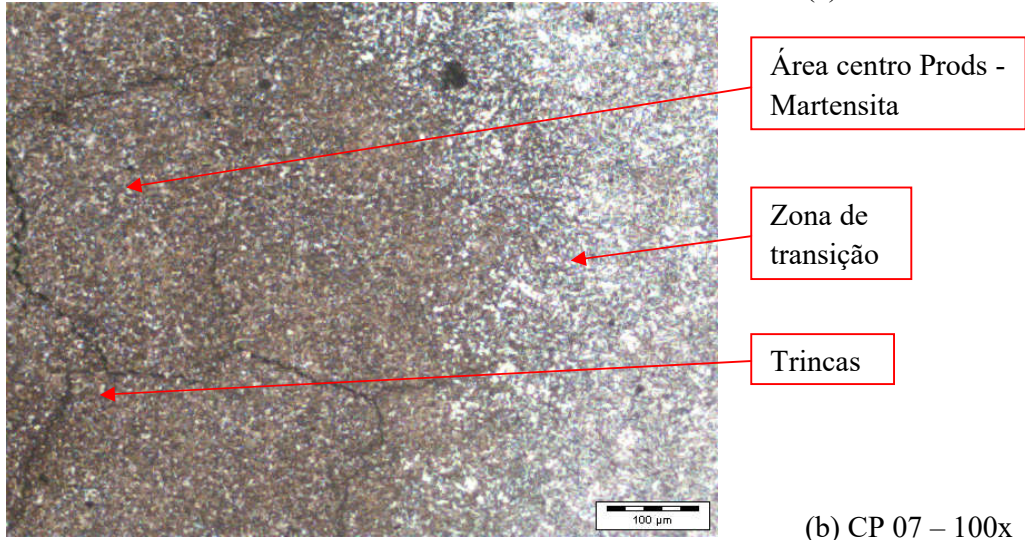
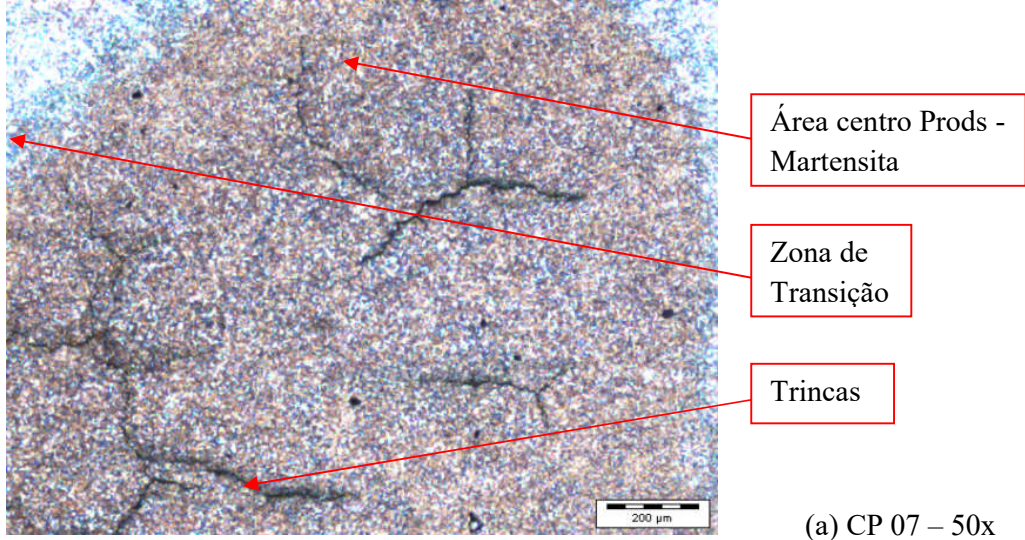
Vê-se que ocorreu a austenitização do material de base e meio severo de resfriamento, conforme Chiaverini (2008).

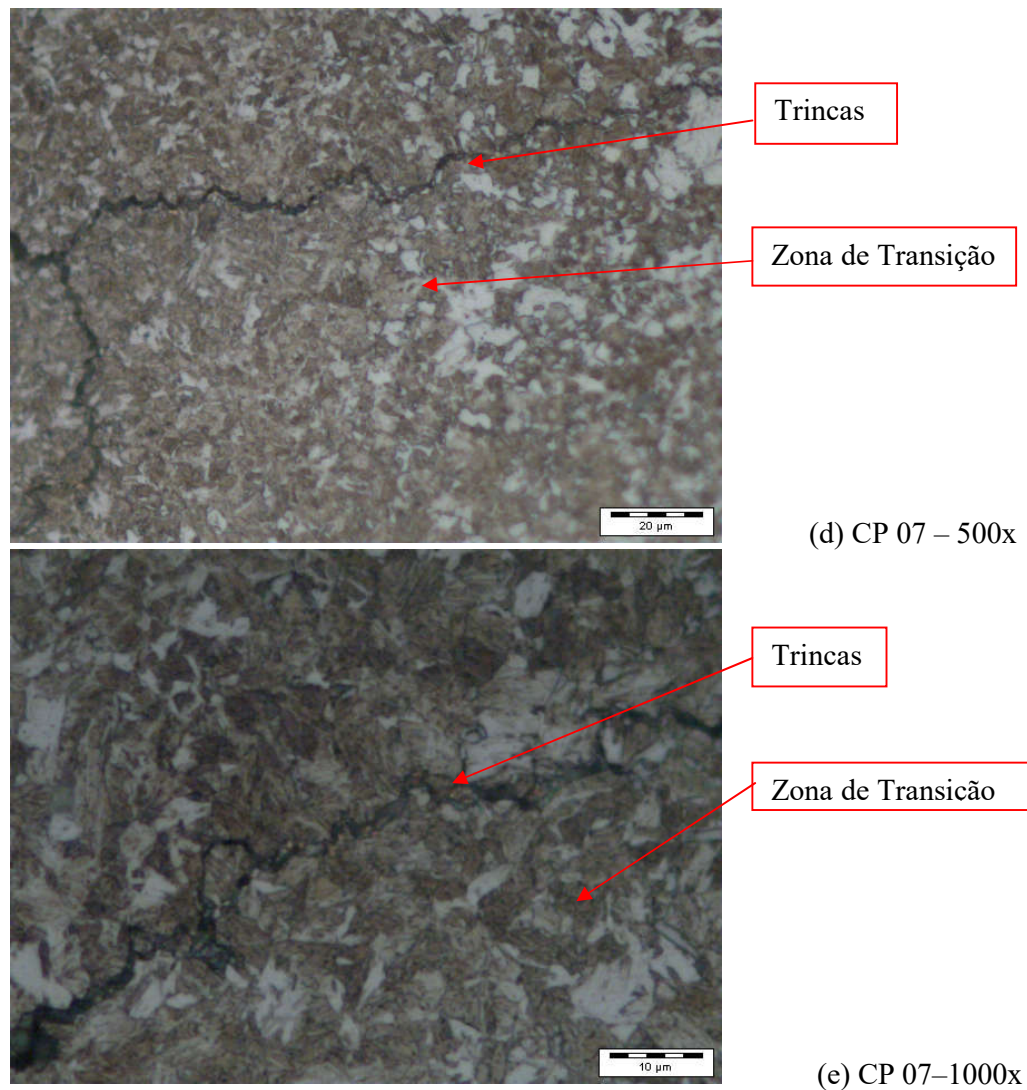
Vê-se também a geração de trincas e que estas propagaram-se somente na área martensítica e as mesmas foram embotadas, conforme Reed Hill (2008), quando encontrado

as colônias de ferrita na zona de transição, devido à absorção da energia da trinca em função da ductilidade da fase ferrítica.

Com a maior amperagem, neste caso de 500 Ampères e meio severo de resfriamento, à água, favoreceu além da transformação o surgimento de trincas e a propagação destas se ocorreram na área de estrutura martensítica.

Figura 51: Fotomicrografia CP 07 (800 ampères, resfriamento a água). Microscopia óptica, Nital 2% com ampliações de (a) 50x; (b)100x; (c) 200x; (d) 500x e (e) 1000x





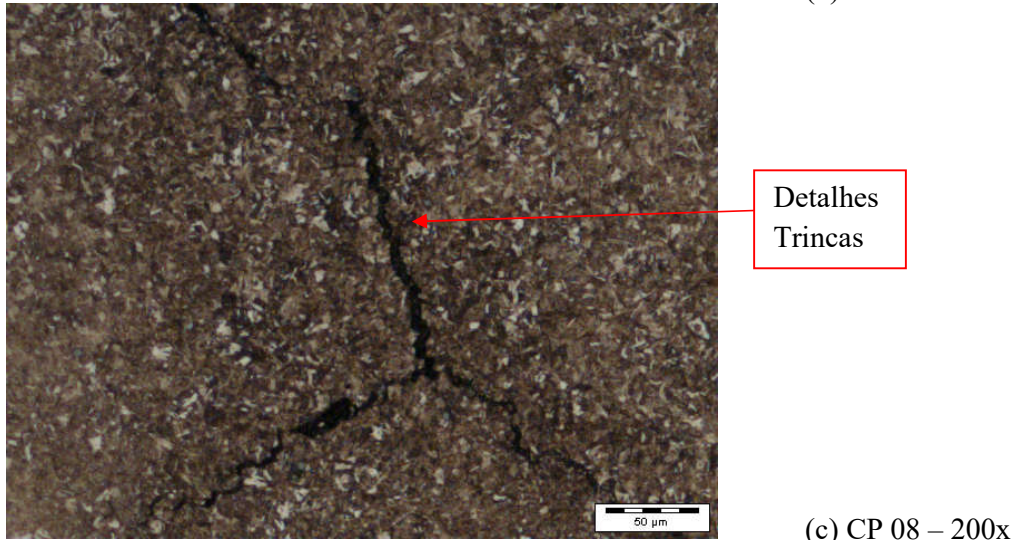
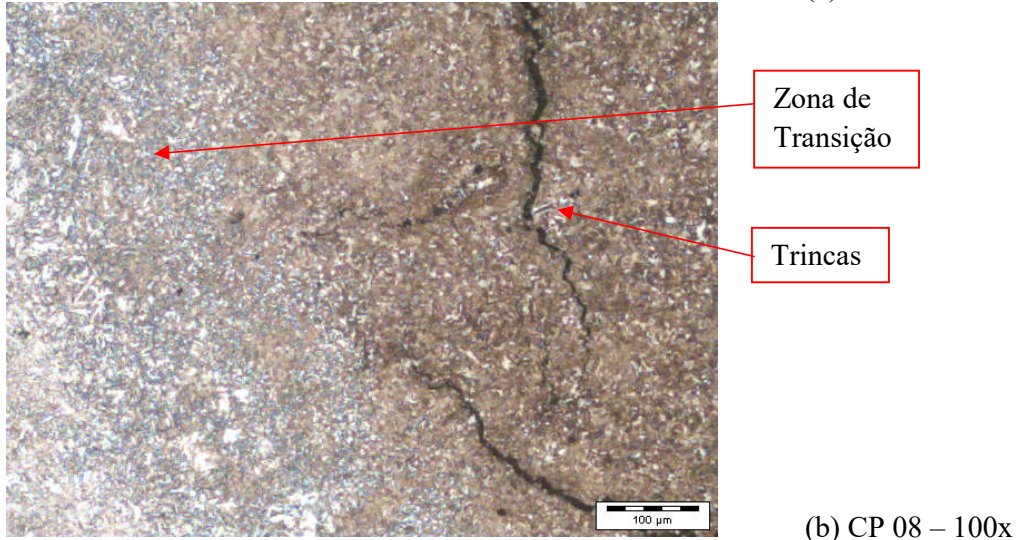
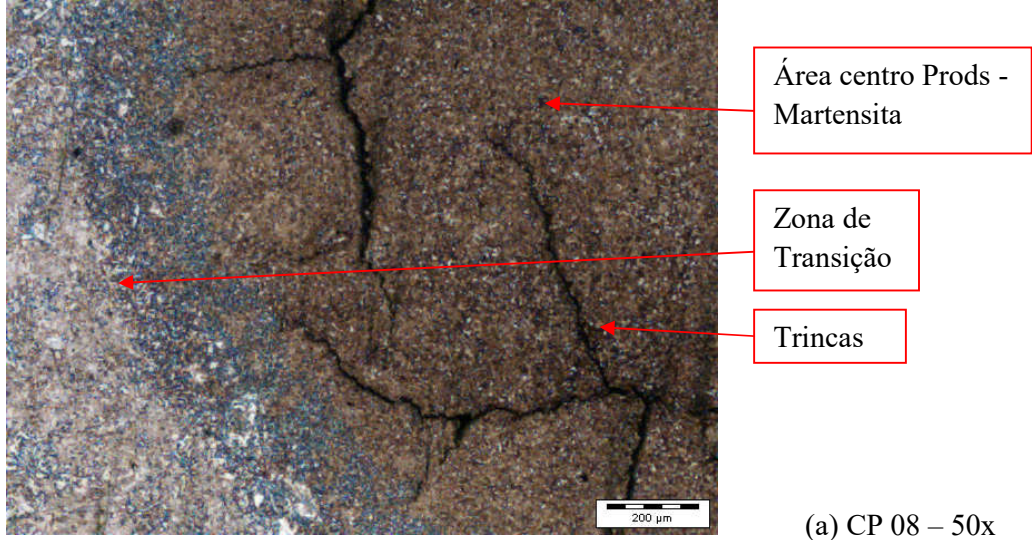
Microestruturas obtidas com ataque Nital 2% por 15 segundos e com magnetização por Prods por 5 segundos com 800 Ampères, e resfriamento com água no pé do Prods.

Tem-se em: (a) microestrutura martensítica com aquecimento e geração de trincas no centro do Prods (b) microestrutura martensítica e aquecimento localizado e trincas nesta região (c) microestrutura martensítica e vê-se a zona de transição e trincas propagando até as colônias de ferrita (d) com maior detalhe da mesma área indicada anteriormente, mostrando o ponto exato de ancoragem da trinca, (e) onde vê-se detalhe da estrutura martensítica, e áreas de ferrita e detalhe da trinca.

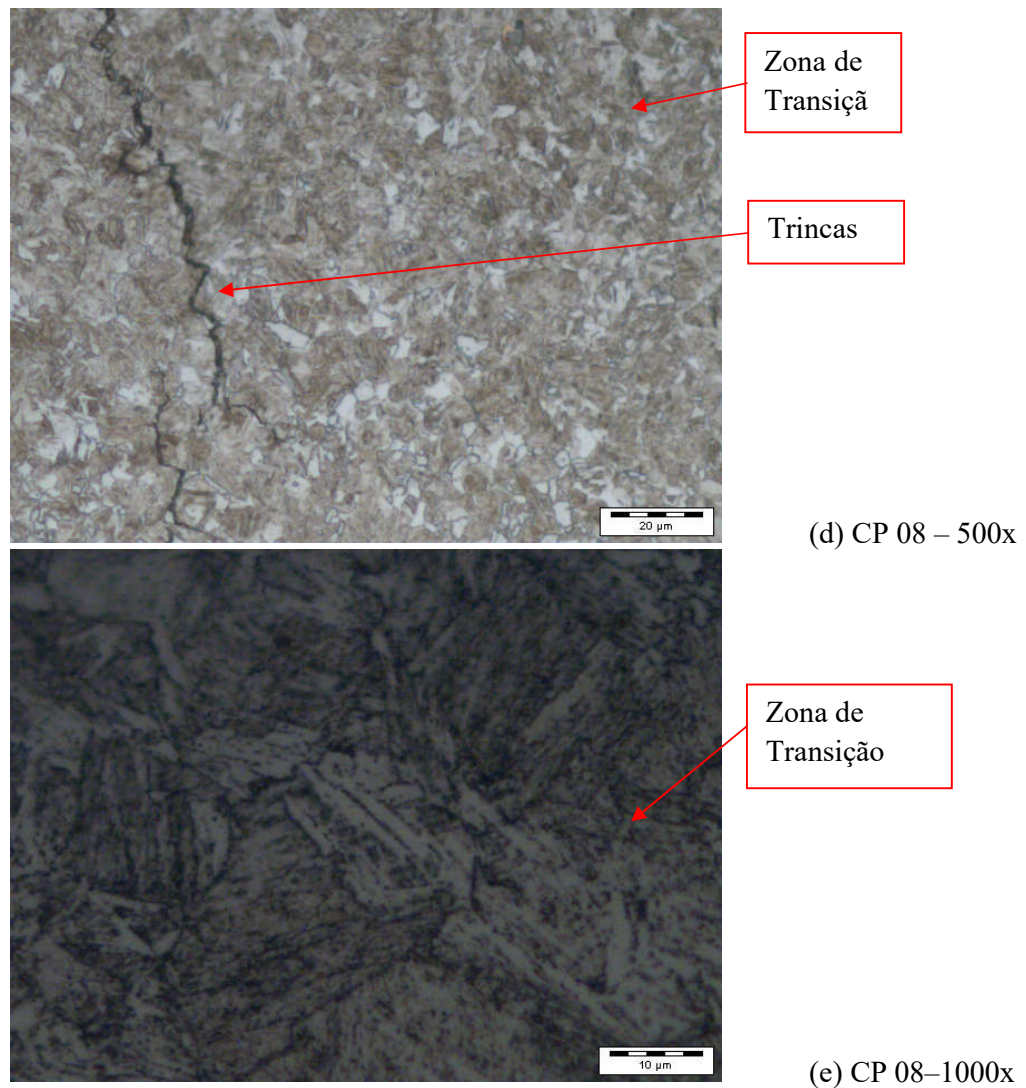
Vê-se uma microestrutura martensítica, com presença de trincas e estas propagaram somente nas áreas com martensita e foram embotadas, conforme Reed Hill (2008) ao tentar atravessar a área de transição, que são as áreas com maior número de colônias de ferrita, devido à maior distância do centro do Prods, e conseqüentemente, menor temperatura

alcançada do material para promover a tempera, as trincas, portanto necessitam de maior energia ao encontrar a microestrutura ferrítica, devido à maior ductilidade da ferrita a qual absorve a energia da trinca, fazendo com que necessite de maior energia para que ela se propague, conforme Chawla (2009).

Figura 52: Fotomicrografia CP 08 (1000 ampères, resfriamento a água). Microscopia óptica, Nital 2% com ampliações de (a) 50x; (b)100x; (c) 200x; (d) 500x e (e) 1000x







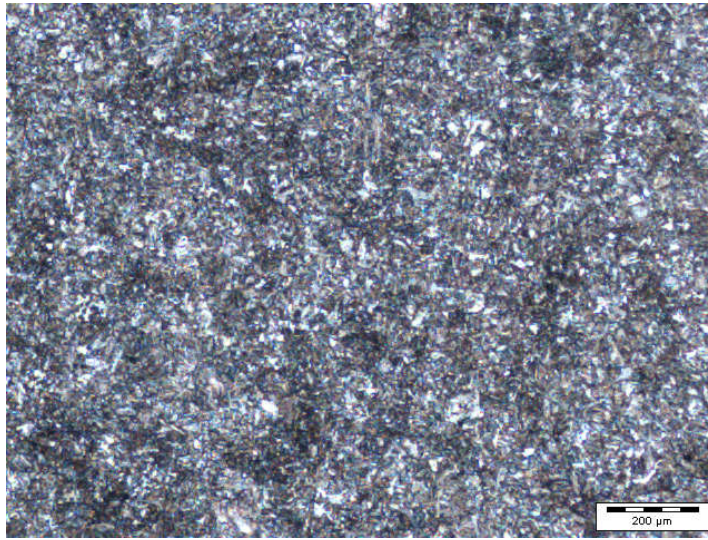
Microestruturas obtidas com ataque Nital 2% por 15 segundos e com magnetização por Prods por 5 segundos com 1000 Ampères, e resfriamento com água no pé do Prods.

Tem-se em: (a) microestrutura martensítica com aquecimento e geração de trincas no centro do Prods (b) microestrutura martensítica e aquecimento localizado e trincas nesta região (c) microestrutura martensítica na área do Prods, (d) microestrutura da base martensítica.

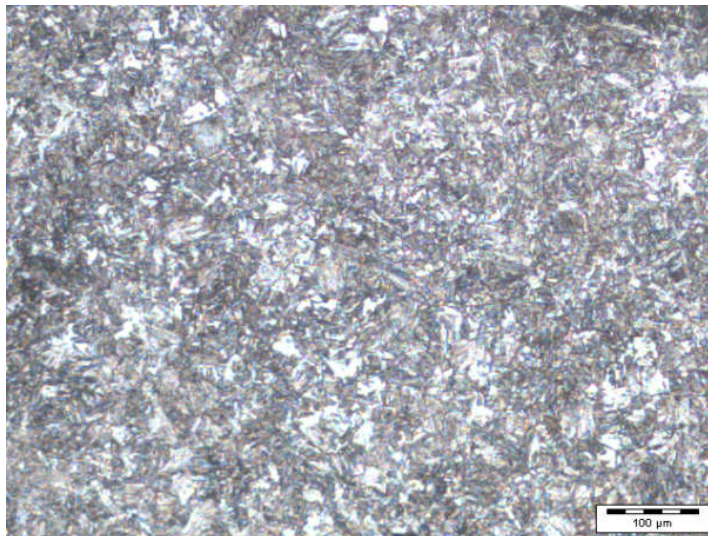
Vê-se uma microestrutura martensítica e trincas, estas propagaram-se somente nas áreas com martensita e foram embotadas ao tentar atravessar a área de transição, conforme Reed Hill (2008), ao encontrar a microestrutura ferrítica, devido à maior ductilidade da ferrita a qual absorve a energia da trinca, fazendo com que necessite de maior energia para que ela se propague de acordo com Chawla (2009).

Vê-se inclusive o contorno da trinca em sentido radial dentro da área temperada e sugere-se possível coalescimento de trincas nesta área.

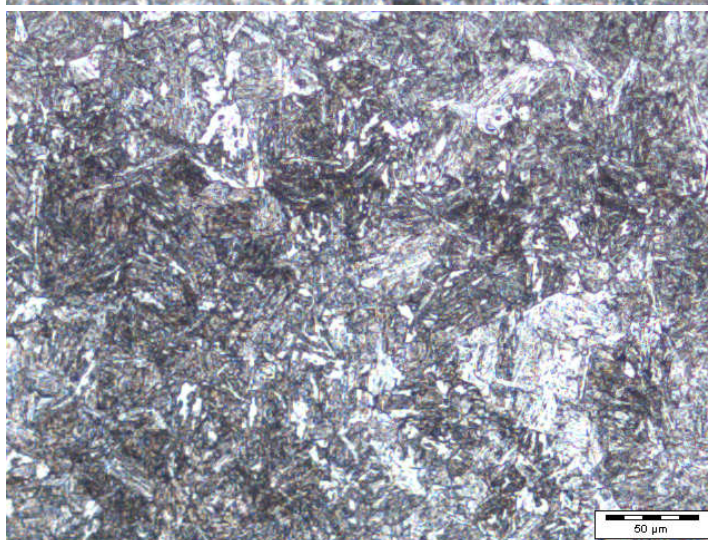
Figura 53: Fotomicrografia CP 09 (100 ampères, resfriamento ao ar forçado).  
Microscopia óptica, Nital 2% com ampliações de (a) 50x; (b)100x; (c) 200x; (d) 500x e (e)  
1000x



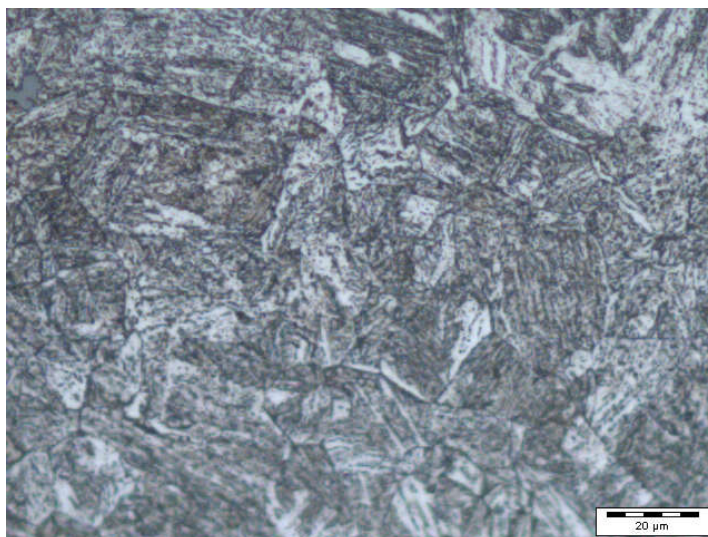
(a) CP 09 – 50x



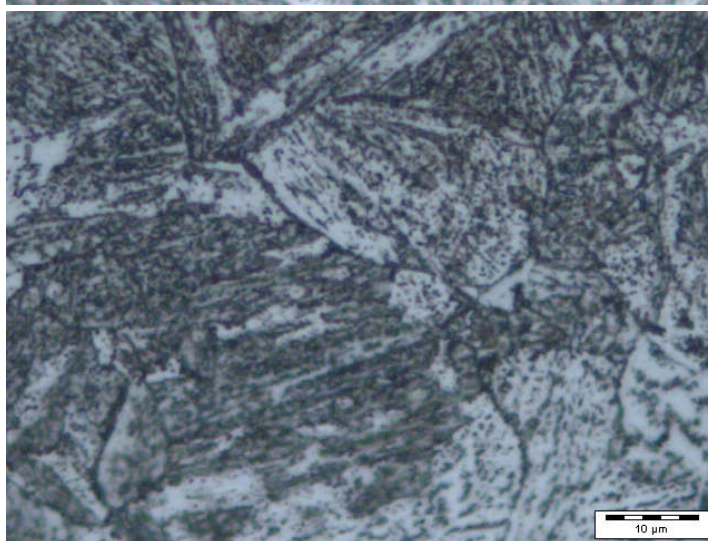
(b) CP 09 – 100x



(c) CP 09 – 200x



(d) CP 09 – 500x



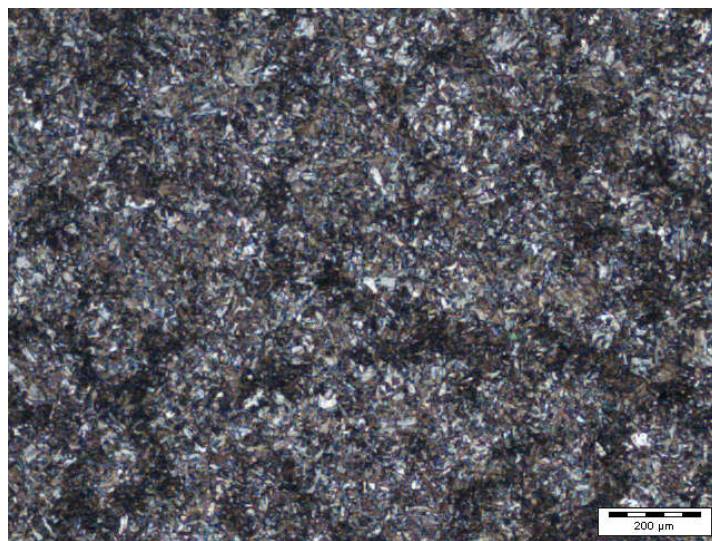
(e) CP 09–1000x

Microestruturas obtidas com ataque Nital 2% por 15 segundos e com magnetização por Prods por 5 segundos com 100 Ampères, e resfriamento ao ar no pé do Prods.

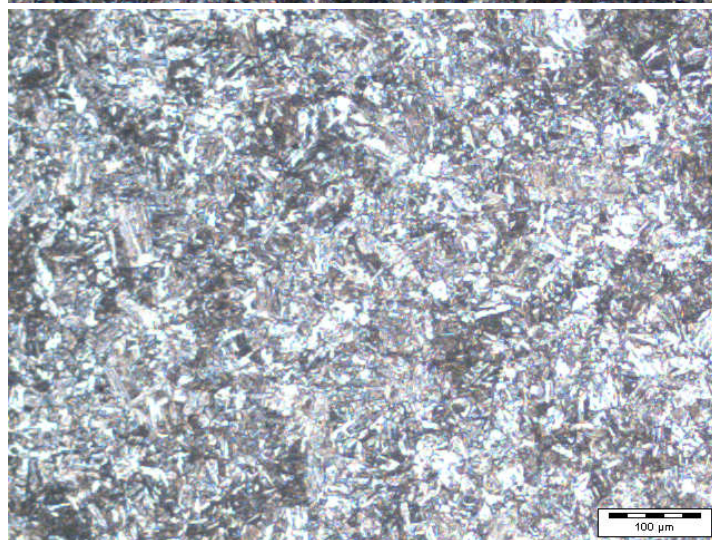
Tem-se em: (a) microestrutura sem sinais de aquecimento localizado na região magnetizada (b) microestrutura sem alteração microestrutural ou aquecimento localizado, (c) detalhe da presença de estrutura ferrítica (d) com microestrutura de ferrita (e) onde vê-se os contornos de grão e estrutura de ferrita.

Vê-se uma estrutura de ferrita, que conforme Colpaert (2008), indica que houve superaquecimento, de forma a ter-se a ferrita, mas insuficiente para promover a tempera e transformação martensítica do material, devido à baixa amperagem aplicada.

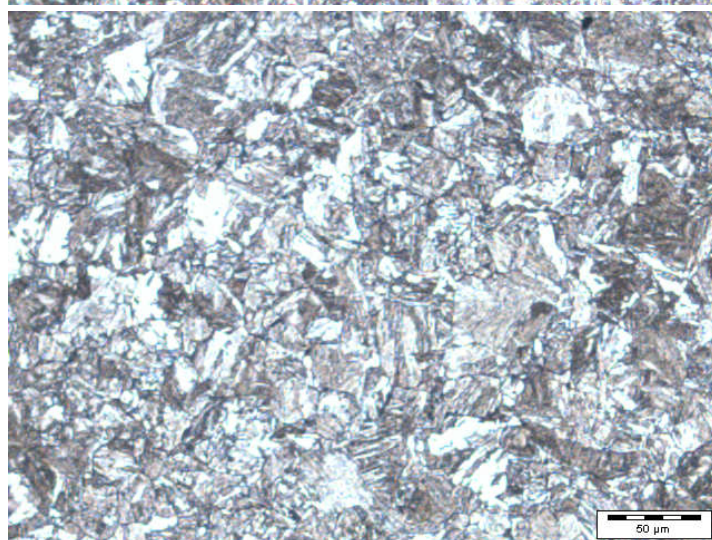
Figura 54: Fotomicrografia CP 10 (200 ampères, resfriamento ao ar forçado). Microscopia óptica, Nital 2% com ampliações de (a) 50x; (b)100x; (c) 200x; (d) 500x e (e) 1000x



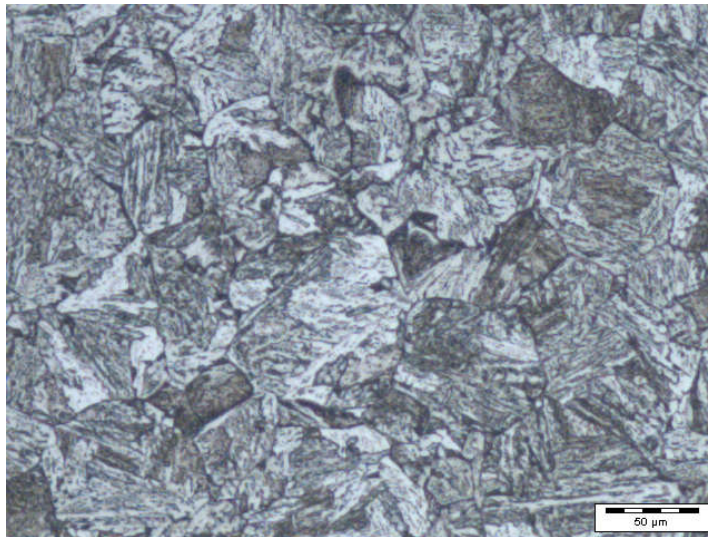
(a) CP 10 – 50x



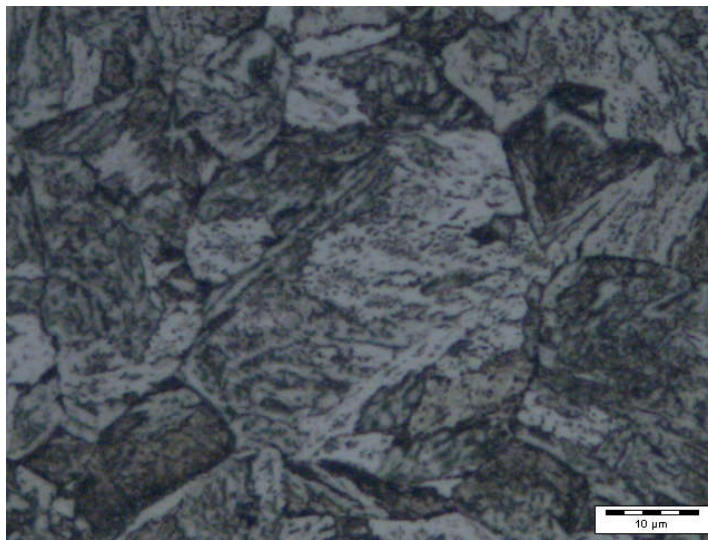
(b) CP 10 – 100x



(c) CP 10 – 200x



(d) CP 10 – 500x



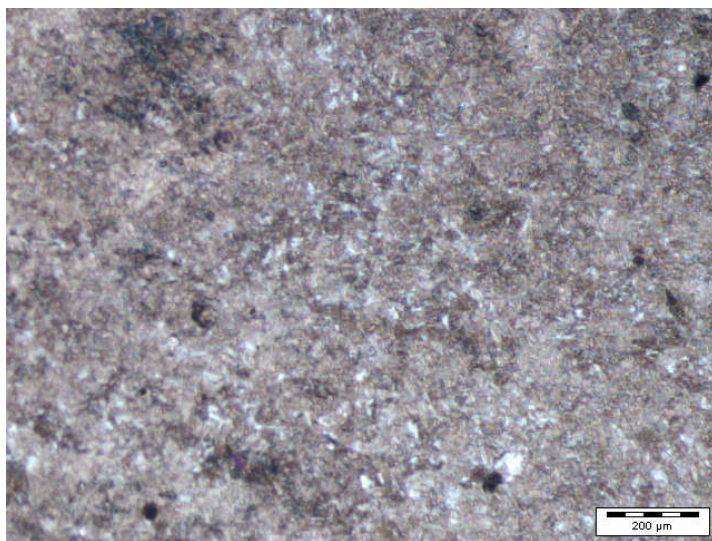
(e) CP 10–1000x

Microestruturas obtidas com ataque Nital 2% por 15 segundos e com magnetização por Prods por 5 segundos com 200 Ampères, e resfriamento ao ar no pé do Prods.

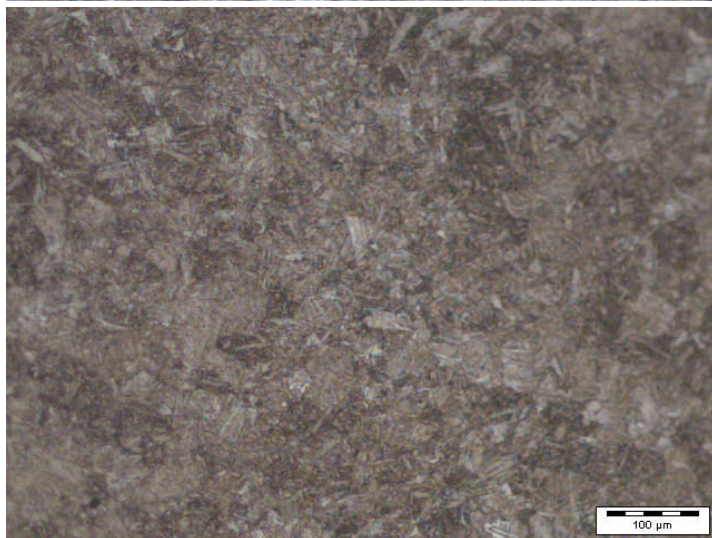
Tem-se em: (a) microestrutura sem sinais de aquecimento localizado na região magnetizada (b) microestrutura sem alteração microestrutural ou aquecimento localizado, (c) detalhe da presença de estrutura ferrítica (d) microestrutura de ferrita (e) onde vê-se os contornos de grão e estrutura de ferrita.

No CP 10, assim como no CP 09 vê-se uma estrutura de ferrita, que conforme Colpaert (2008), indica que houve superaquecimento, de forma a ter-se a ferrita, mas insuficiente para promover a tempera e transformação martensítica do material, devido à baixa amperagem aplicada.

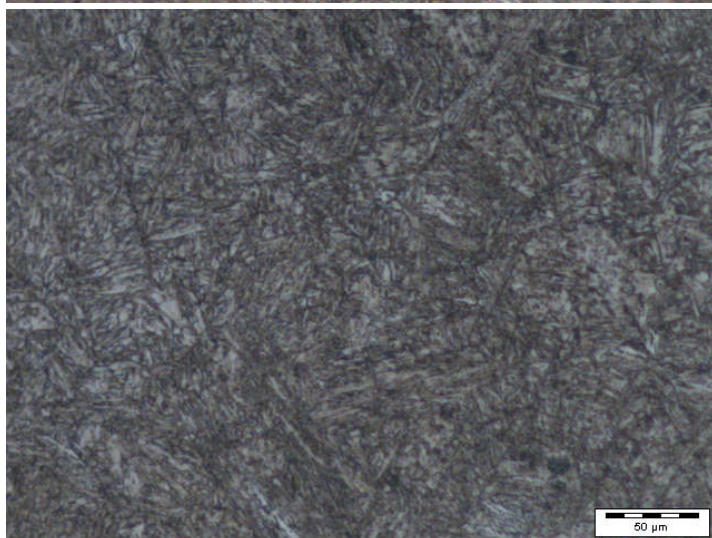
Figura 55: Fotomicrografia CP 11 (300 ampères, resfriamento ao ar forçado). Microscopia óptica, Nital 2% com ampliações de (a) 50x; (b)100x; (c) 200x; (d) 500x e (e) 1000x



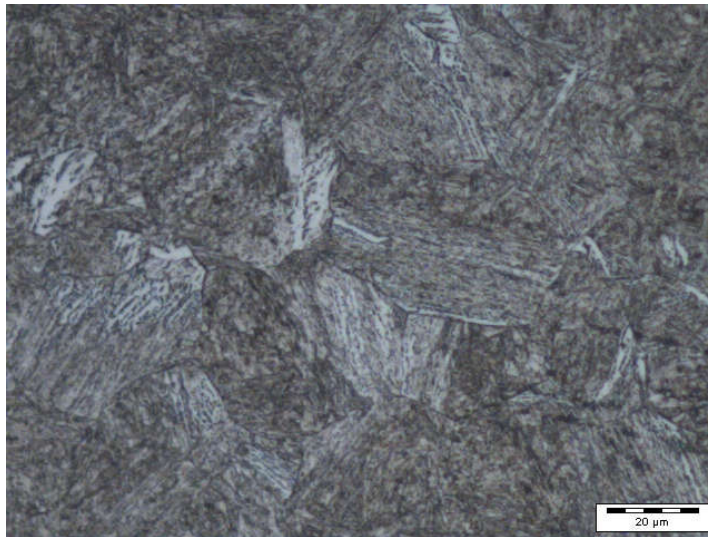
(a) CP 11 – 50x



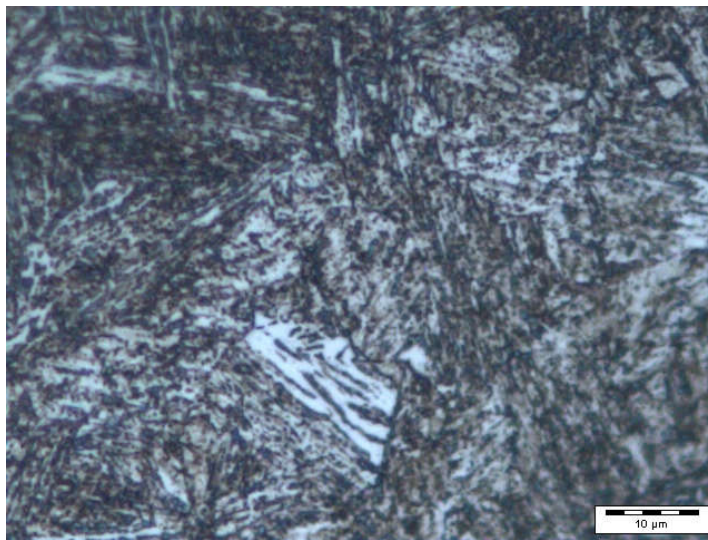
(b) CP 11 – 100x



(c) CP 11 – 200x



(d) CP 11 – 500x



(e) CP 11– 000x

Microestruturas obtidas com ataque Nital 2% por 15 segundos e com magnetização por Prods por 5 segundos com 300 Ampères, e resfriamento ao ar no pé do Prods.

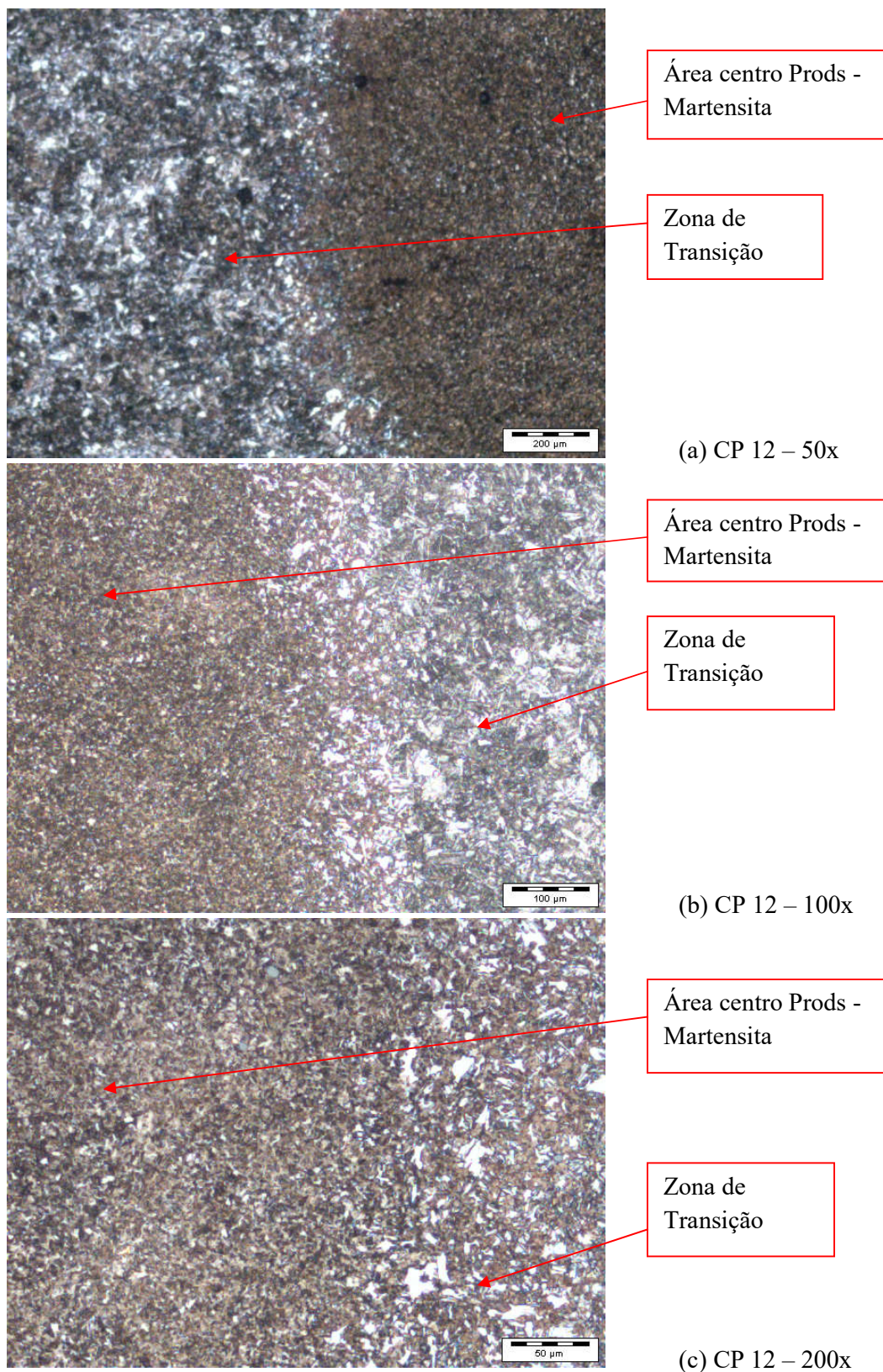
Tem-se em: (a) microestrutura sem sinais de aquecimento localizado na região magnetizada (b) microestrutura sem alteração microestrutural ou aquecimento localizado, (c) detalhe da microestrutura com presença de estrutura ferrítica (d) com microestrutura de ferrita (e) onde vê-se os contornos de grão e estrutura de ferrita.

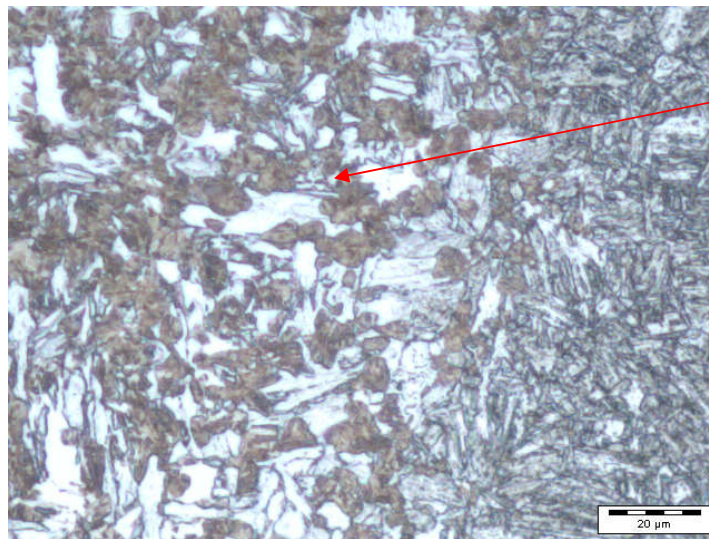
Vê-se uma estrutura de ferrita, que conforme Colpaert (2008) indica que houve superaquecimento, de forma a ter-se esta ferrita, mas insuficiente para promover a tempera e transformação martensítica do material.



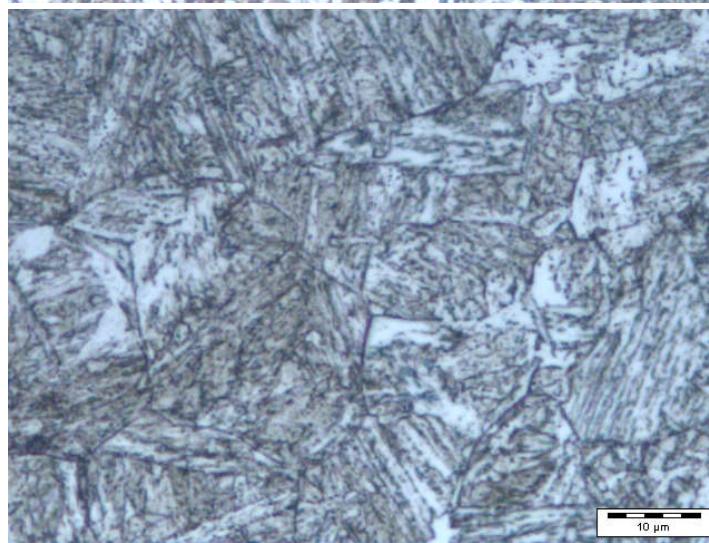
Vê-se um escurecimento maior e uma ferrita mais densa e fechada quando comparada com as dos CP 09 e CP 10, sugerindo um maior aquecimento da microestrutura, inclusive com tamanho de grão maior, se comparado com os mesmos CP para uma mesma ampliação.

Figura 56: Fotomicrografia CP 12 (500 ampères, resfriamento ao ar forçado). Microscopia óptica, Nital 2% com ampliações de (a) 50x; (b) 100x; (c) 200x; (d) 500x e (e) 1000x





(d) CP 12 – 500x



(e) CP 12–1000x

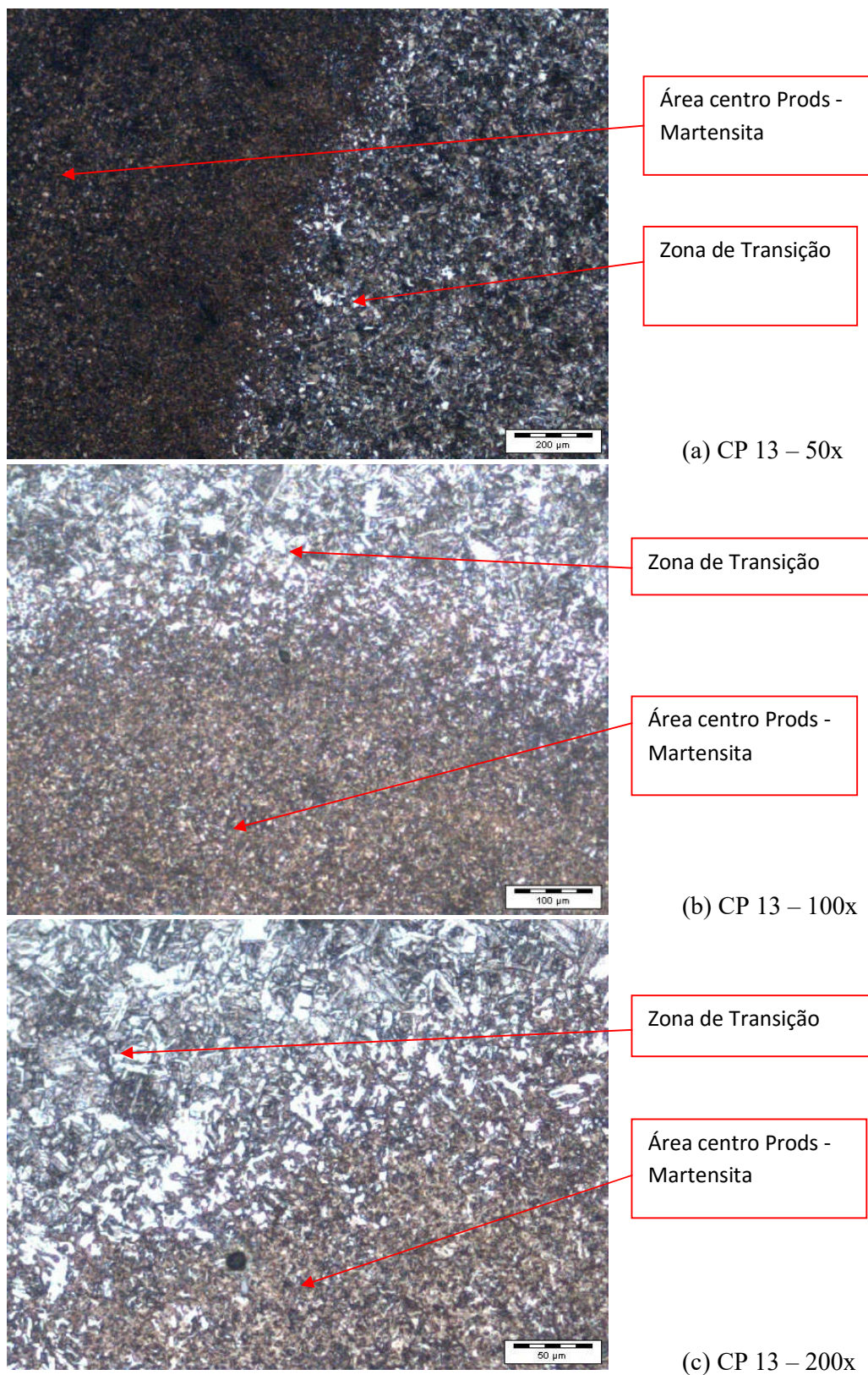
Microestruturas obtidas com ataque Nital 2% por 15 segundos e com magnetização por Prods por 5 segundos com 500 Ampères, e resfriamento ao ar no pé do Prods.

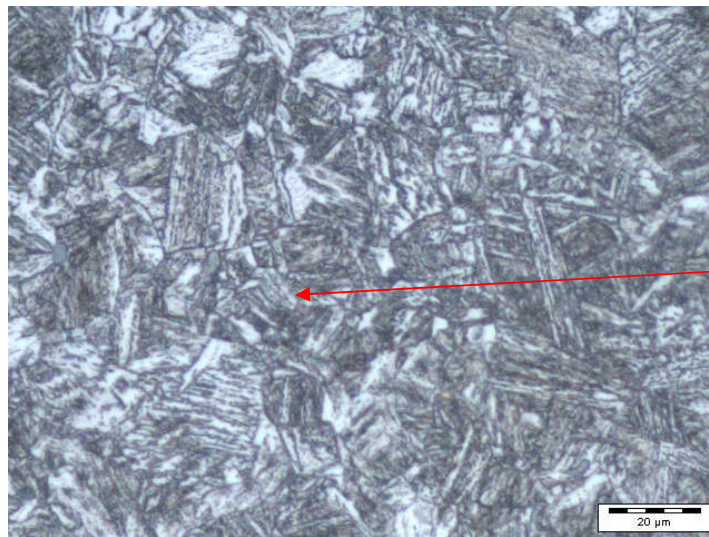
Tem-se em: (a) pode-se ver microestrutura martensítica com sinal de aquecimento no centro do Prods (b) microestrutura martensítica e aquecimento localizado do lado esquerdo e também a região de transição do lado direito (c) onde vê-se melhor a presença de microestrutura martensítica no centro e áreas de ferrita do lado direito da micrografia (d) microestrutura martensítica no lado direito e área de transição do lado esquerdo da micrografia (e) onde vê-se os contornos de grão e uma estrutura de ferrita a região fora da zona de transição oposta ao centro.

Vê-se sinal de aquecimento na região magnetizada, formando uma esfera de coloração bem mais escura no centro do Prods com estrutura martensítica e área de transição com áreas claras com colônias de ferrita e em ampliações maiores como em (e) fora da área magnetizada

vê-se uma ferrita sugerindo o superaquecimento do material conforme já discutido anteriormente, porém não se observou trincas no material devido ao meio de resfriamento ao ar forçado ser menos severo que a água, conforme Chiaverini (2008), utilizada nos corpos de prova anteriores.

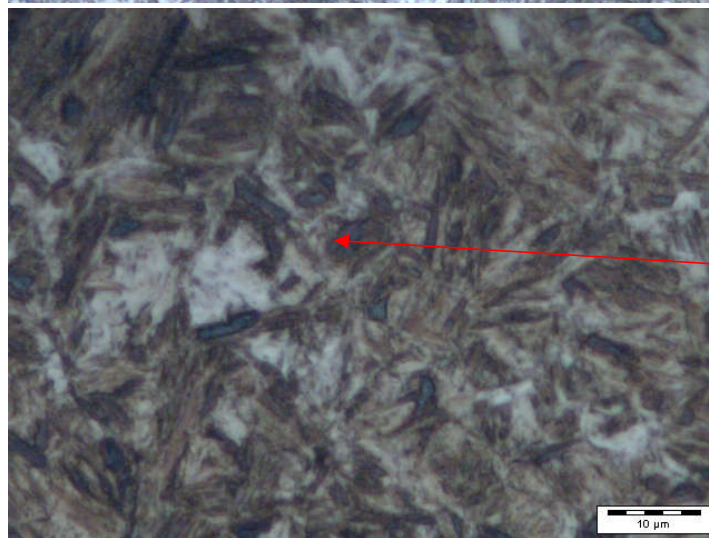
Figura 57: Fotomicrografia CP 13 (900 ampères, resfriamento ao ar forçado). Microscopia óptica, Nital 2% com ampliações de (a) 50x; (b)100x; (c) 200x; (d) 500x e (e) 1000x





Microestrutura  
Martensítica

(d) CP 13 – 500x



Microestutura  
Martensítica

(e) CP 13–1000x

Microestruturas obtidas com ataque Nital 2% por 15 segundos e com magnetização por Prods por 5 segundos com 900 Ampères, e resfriamento ao ar no pé do Prods.

Tem-se em: (a) microestrutura Martensítica e com aquecimento na região magnetizada na parte inferior da micrografia e área de transição na parte superior da micrografia, com áreas claras de colônias de ferrita (b) microestrutura martensítica com aquecimento localizado na parte inferior e também a região de transição na parte superior (c) microestrutura martensítica no centro e áreas de ferrita do lado direito (d) microestrutura martensítica, que a estrutura martensítica do lado direito e área de transição do lado esquerdo do CP (e) microestrutura martensítica acicular.

Vê-se uma estrutura martensítica e com aquecimento no centro do Prods, permitindo ocorrer a austenitização e resfriamento do material, porém assim como no CP 12 o meio de resfriamento ao ar forçado não foi suficiente para promover o aparecimento de trincas,

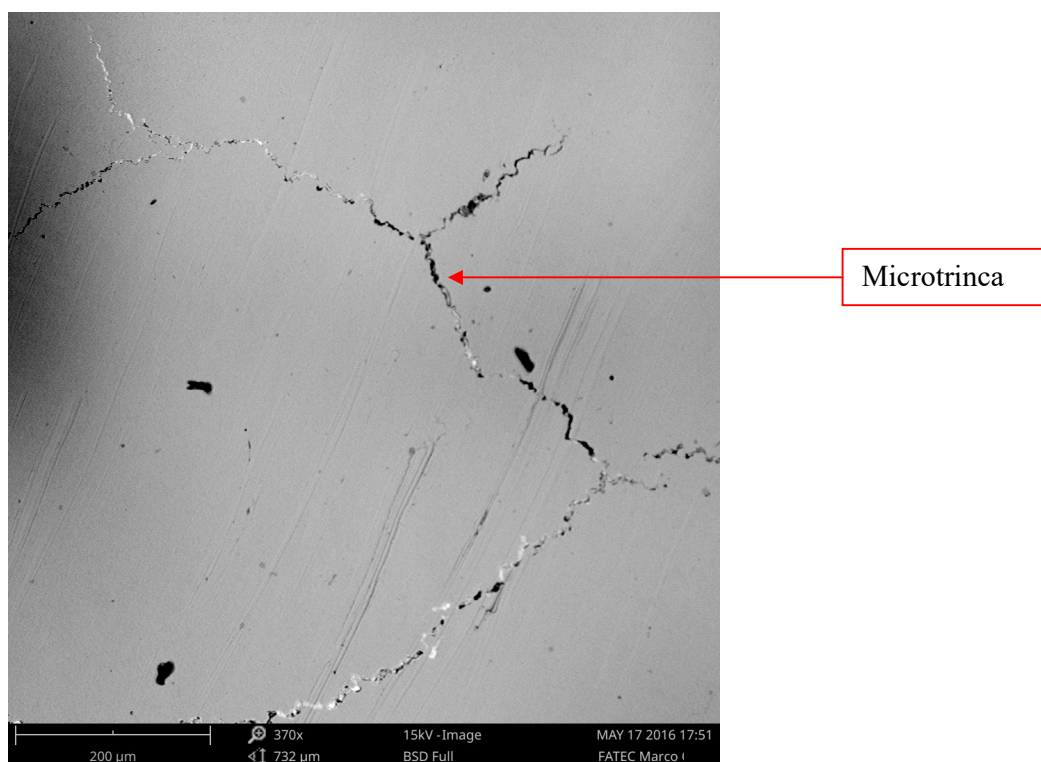
sugerindo que houve cinética de reação favorável a movimentação de discordâncias com o resfriamento ao ar forçado, conforme Chiaverini (2008), evitando a geração de trincas.

Em (e) podemos comparar facilmente esta microestrutura com a microestrutura da Figura 05, que apesar de ser uma estrutura bainítica sabe-se a dificuldade de diferenciar estas em microscopia óptica.

#### 4.3. RESULTADOS DA MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

O uso de microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi usado, complementarmente, à microscopia óptica convencional, o CP 08 foi escolhido por ter sido este magnetizado com 1000 ampères, e resfriamento com água no pé do Prods e também o mesmo ter apresentado maior nível de trincas.

Figura 58: Imagem 1 CP 08 – ampliação de 370x e técnica EBSD com 15 kV aplicado a imagem, mostrando as trincas em detalhe.



No CP 08, pode ser observado que as trincas ocorreram de forma intergranular devido à maior ductilidade de fase ferrítica, que impede que a mesma se propague nesta fase e sim preferencialmente na fase martensítica, ou seja, delineando os contornos de grãos.

Na figura 59, vê-se o resultado da análise química realizada no microscópio eletrônico de varredura acoplado a uma micro sonda EDS de raios-X e que difere da análise química



realizada por Espectrometria indicada no item 4 desta dissertação, onde o Mn foi de 1,8% encontrado no MEV e 1,6% para a espectrometria, já para o Si, foi de 0,8% encontrado no MEV e 0,5% para a espectrometria, em ambos os casos foi superior em 0,2 a 0,3%, porém, conforme norma ASTM E-350 (2012), é esperado tais diferenças entre análises químicas por métodos diferentes, inclusive a norma trata de erros em reprodutibilidade e repetibilidade em uma mesma amostra e mesmo equipamento.

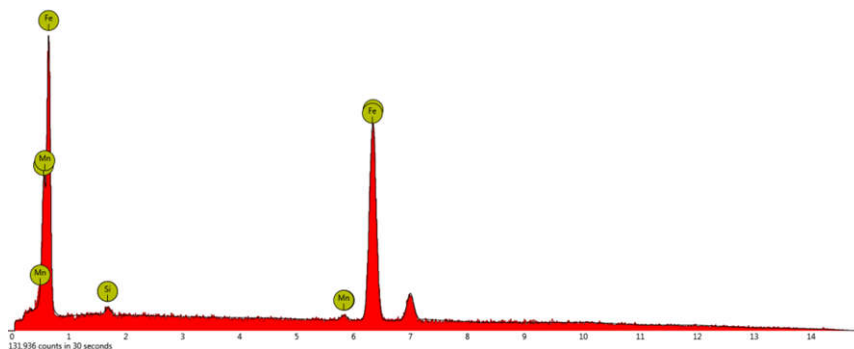
Resultados da análise EDS por raios-X :

Fe 97,3% incerteza (0,99)

Mn 1,8% incerteza (0,89)

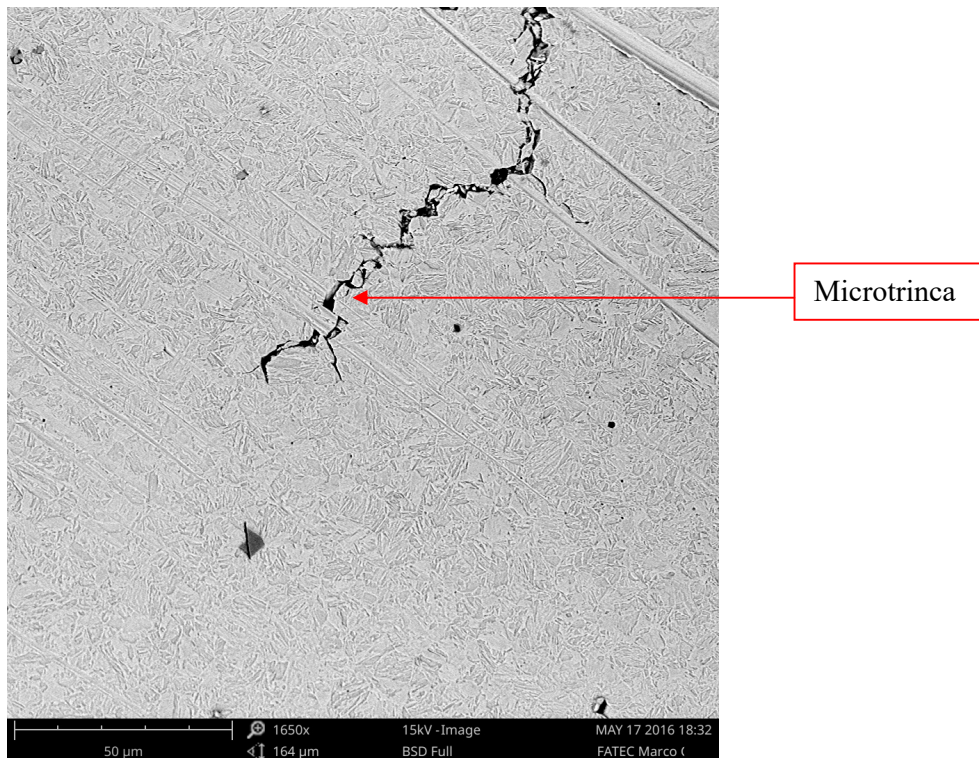
Si 0,8% incerteza (0,88)

Figura 59: Análise Química realizada por microscópio eletrônico de varredura acoplado a uma micro sonda EDS de raios-X.



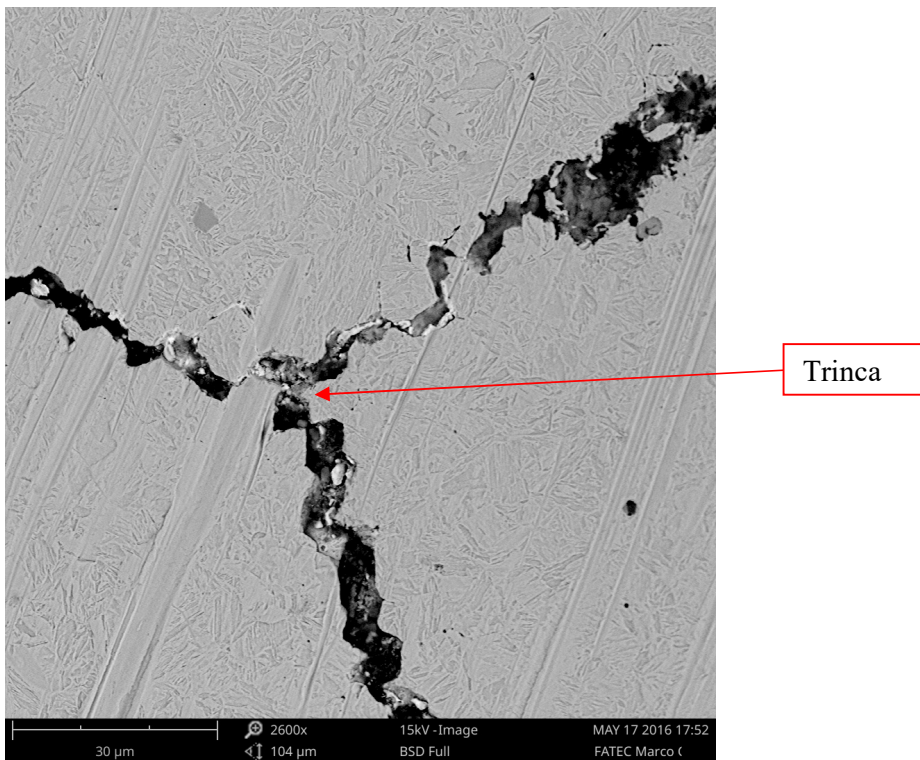
A análise realizada no microscópio eletrônico de varredura acoplado a uma micro sonda EDS de raios-X foi feita em apenas um corpo de prova, que foi o CP 08. Fez-se a análise tomando como base esta amostra por se tratar da faixa de amperagem e resfriamento mais usada pelas indústrias fabricantes de fundidos ferroviários. Escolheu-se um nível de ampliação para as fotos em MEV que pudessem representar tanto a microestrutura quanto as trincas e propagação das mesmas.

Figura 60: Imagem 2 – CP 08 ampliação de 1650x e técnica EBSD com 15 kV



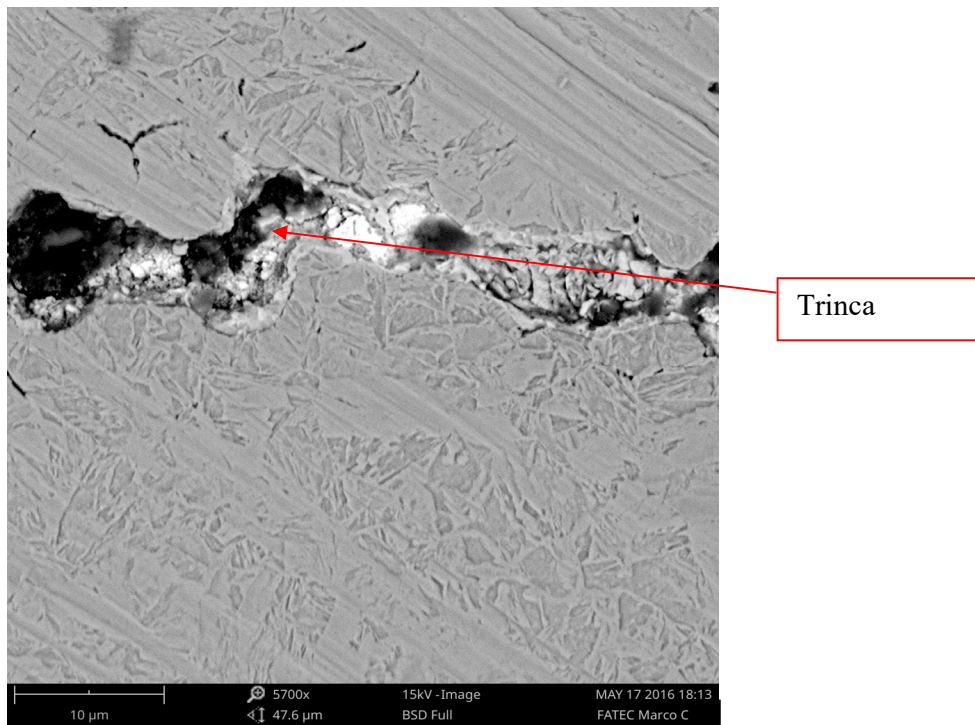
Microestrutura martensítica, conferindo com a microestrutura do CP 08 também relatada em microscopia óptica e a microtrinca em detalhe.

Figura 61: Imagem 3 – CP 08 ampliação de 2600x e técnica EBSD com 15 kV.



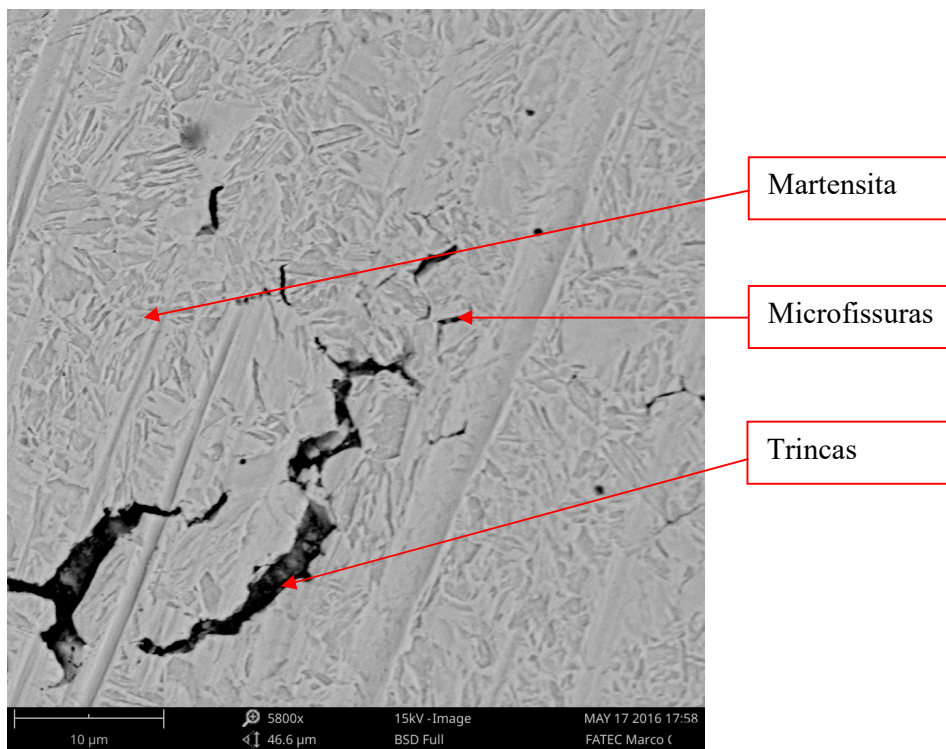
Nesta ampliação, vê-se as trincas com maior definição e a mesma propagando em base martensítica.

Figura 62: Imagem 4 – CP 08 ampliação de 5700x e técnica EBSD com 15 kV



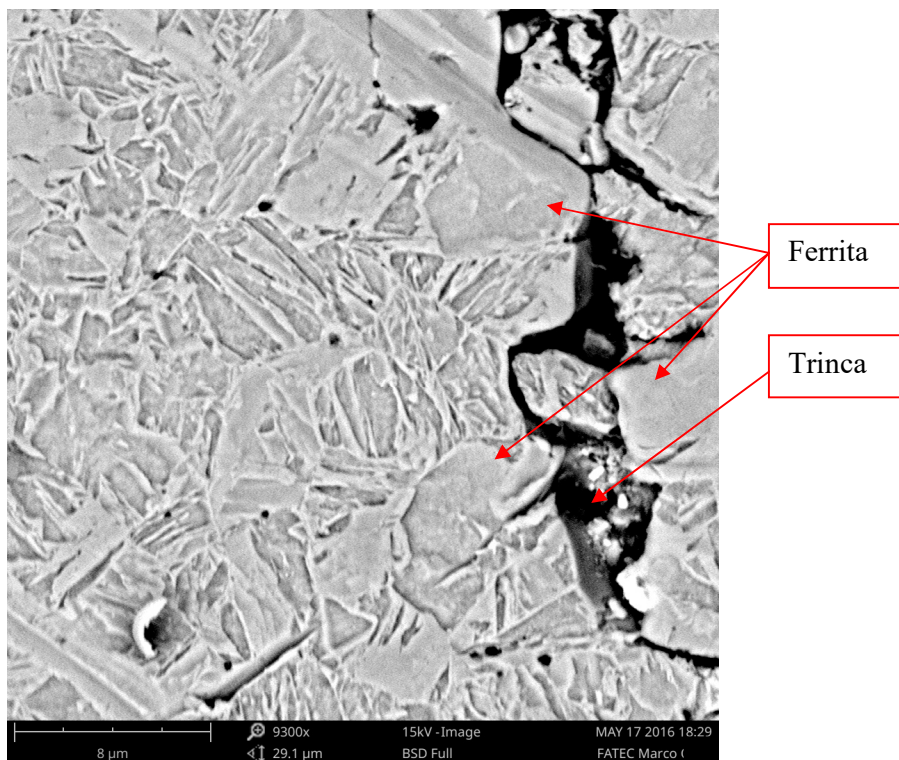
Com esta micrografia vê-se o arrancamento de material, em que ocorreu a trinca em base martensítica.

Figura 63: Imagem 5 – CP 08 ampliação de 5800x e técnica EBSD com 15 kV.



Nesta micrografia, vê-se as trincas em detalhe e várias microfissuras que surgem na extremidade da trinca.

Figura 64: Imagem 6 – CP 08 ampliação de 9300x e técnica EBSD com 15 kV.



Com o maior nível de ampliação utilizado, vê-se com clareza as trincas em detalhe contornando a fase ferrítica em base martensítica.

A microestrutura é predominantemente ferrítica na superfície, e onde se fez a aplicação do Prods, verifica-se a presença de estrutura martensítica, porém uma martensita não revenida, pois não houve tratamento térmico ou aquecimento posterior, conforme é mostrado nos CPs 04, 05, 06, 07, 08, 12 e 13.

A presença de martensita não revenida no local onde foram magnetizados os CPs leva a afirmar que a microestrutura foi alterada do seu estado original em função da aplicação do Prods e pela passagem de corrente elétrica alternada para valores de amperagem de 300 a 1000 Ampères. Cada uma dessas amostras foram preparadas e atacadas superficialmente com Nital 2%, por um tempo de 15 segundos, pode-se observar com distintos aumentos (50x a 1000x).

## 5. CONCLUSÃO

Conforme as análises efetuadas nos CPs e demonstradas através das micrografias reportadas, existem transformações da microestrutura no material, aço AAR M-201 Grau E, após ensaio de partículas magnéticas onde ocorre a magnetização por Prods.

Na faixa de amperagem de 300 a 1000 ampères, aplicada por Prods no aço AAR M 201 grau E, ocorrem transformações microestruturais passando de ferrita para martensita e geração de trincas.

A influência do meio de resfriamento com água à temperatura ambiente ou mesmo o ar forçado gerou as transformações microestruturais, porém para os CPs resfriados com água no pé do Prods após a magnetização, verificou-se maior incidência de trincas, conforme CPs 04, 05, 06, 07 e 08. Para os CPs 12 e 13 apesar de ter-se a transformação microestrutural para a fase martensítica, não se observou a geração de trincas, e isto se deve à maior cinética de reação pelo fato de ter-se um resfriamento mais lento.

Com a utilização da microscopia eletrônica de varredura (MEV), aplicada no CP 08 de forma a complementar a microscopia óptica, pode-se verificar o mecanismo de propagação das trincas, cujas mesmas em ampliações de 9300X na Figura 64 evidencia o contorno das trincas em fases ferríticas, fazendo com que a mesma pudesse propagar somente na região de transformação martensítica.

A contribuição que este trabalho traz, é que tanto os fabricantes quanto as oficinas de manutenção devem utilizar menor amperagem e, conseqüentemente, menor espaçamento entre Prods, ou ainda substituir o ensaio de partículas magnéticas com Prods, por ensaios de partículas magnéticas com Yokes, ou outros que possam não gerar os mesmos danos.

## 6. SUGESTÕES

Como sugestões para futuros trabalhos pode-se propor:

- Utilização de Yokes e verificação de microestrutura e propriedades mecânicas após magnetização.
- Aplicação de ensaios de líquido penetrante e ultrassom em áreas críticas como alternativa ao uso de Prods.
- Realização de ensaios mecânicos como tração e tenacidade à fratura tipo K1C de forma a avaliar o impacto da magnetização em corpos de prova de aço.
- Instrumentar engates em campo em comum acordo com a ferrovia de forma a avaliar a tensão trativa e o comportamento em engates magnetizados, ou mesmo outros fundidos de grande porte como laterais e travessas ferroviárias.
- Realizar tratamento térmico posterior à magnetização por Prods, de forma a avaliar a microestrutura e propriedades mecânicas, comparando com o material de base antes do ensaio.



## 7. REFERENCIAS

ASKELAND, Donald R. **Ciência e Engenharia dos Materiais**. 2008

AAR. *Manual of Standards and Recommended Practices Specification M 201*. AAR:EUA, 2011

AAR *Manual of Standards and Recommended Practices Wheels and Axles Specification M-107/M-208*. 2011

AAR. *Manual of Standards and Recommended Manufacture of Couplers and Draft Components*. AAR:EUA, 2015

AAR. *Manual of Standards and Recommended Practices Field Manual*. AAR:EUA, 2016

ALVES, Luiz Henrique Dias. **Utilização do método de Taguchi na modelagem e otimização de vazios relacionados à solidificação em processo de fundição de aço ABNT 1030**. 2009

ANDREUCCI, M. **Ensaio de Partículas Magnéticas**. São Paulo: ABENDE, 2014.

ASM Handbook, Volume 1: *Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys* . EUA: ASM, 1993.

ASME. *American Society of Mechanical Engineers - ASME Boiler and Pressure Vessel Code* , Section V, 2011

ASTM, *American Society For Testing and Material – ASTM Standard Test Methods for Chemical Analysis of Carbon Steel, Low-Alloy Steel, Silicon*

*Electrical Steel, Ingot Iron, and Wrought Iron. E 350. Editorial changes were made in November 2012.*

ASTM, American Society For Testing and Material – ASTM, *Standard Guide for Magnetic Particle testing. E709-15*. Pensilvânia: West Conshohocken, 2015

ASTM, American Society For Testing and Material – ASTM, *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials ASTM E8/E8M – 15*. Pensilvânia : West Conshohocken, 2015

ASTM, American Society For Testing and Material – ASTM. *Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials - E10 - 15*. Pensilvânia: West Conshohocken, 2015.

BAPTISTELLA, Marco A. **Ensaio Partículas Magnéticas**. São Paulo: QualyEng, 2014.

BERTOSSI, Marcos. **Engates: modelos e protótipos**. 1991.

BOELENA, R et Al. *One Car coupler performance at BHP-Billiton iron ore engineering failure*. EUA: ANALYSIS, 2004.

BOTTREL COUTINHO, C. **Materiais Metálicos para Engenharia**. Belo Horizonte. 1992

BRIGGS Charles W, *Steel Casting Handbook*. EUA: SFS, 2009.

CALLISTER, W. D. *Materials Science and Engineering - An Introduction*. In W. D. Callister, *Materials Science and Engineering - An Introduction*. New York: John Wiley & Sons, 2014.

CHIAVERINI, Vicente. **Tratamento térmico das ligas metálicas**. Associação Brasileira de Metais 2008.

CHUNDURU, S.P. et Al. *Cliff Mirman failure analysis of railroad couplers of AAR type E engineering failure*. EUA: ANALYSIS, 2011.

COLPAERT, Hubertus. **Metalografia dos produtos comuns**. 4. Ed. Blucher. 2008.

DIAS, Terezinha Maria da Silva. COSTA, Frederico Augusto. CASSEMIRO, Sergio. MARTELLI, Danilo. MACHADO, Bruno. GUIMARÃES, Gabriela Vitorino. **Manutenção Centrada na Confiabilidade em ferrovias de cargas em área urbana**. Instituto Militar de Engenharia, Mestrado em Transportes. 2015.

FRANCISCO, Wagner de Cerqueira e. **Transporte Ferroviário: A idéia da criação do transporte ferroviário se espalhou rapidamente pelo mundo, já que foi um meio de transporte inovador para aquela época**. 2016. Disponível em <<http://mundoeducacao.bol.uol.com.br/geografia/transporte-ferroviario.htm>> Acesso em 14/06/2016

GARCIA, Amauri; SPIM, Jaime Alvares; SANTOS, Carlos Alexandre. **Ensaio dos materiais**. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

GENERAL DYNAMICS, *Classroom Training Handbook : Nondestructive Testing, California*, EUA: 1967.

GOMES, Rafael Et Al. **Avaliação da dispersão do fluxo magnético para ensaios não destrutivos** São Paulo: END, 2010.

LANDGRAF, F. J. G.. **Propriedades Magnéticas de aços para fins elétricos**. In: Ivani Bott; Paulo Rios; Ronaldo Paranhos. (Org.). *Aços: perspectivas para os próximos 10 anos*. Rio de Janeiro, 2002.

HUANG, Jin. *Case Studies in Engineering Failure Analysis*. EUA: Elsevier, 2013.

HUMPREYS, F.J. et al. *Recrystallization and related annealing phenomena*. Australia: Elsevier, 2004.

INFANTE, C et al. **Um estudo de análise de falha em engate de aço fundido**. São Paulo: IAL, 2003.

MORAWIEC, A. *On Abnormal Growth of Goss Grains in Grain Oriented Silicon Steel*. Poland: Scripta Materialia, 2011.

MEYERS. Marc A. CHAWLA, Krishan K. **Princípios de Metalurgia Mecânica**. Editora E. Blücher 2009

MINICUCCI, D. J.; MILAGRES, M. R.; VILLAS BÔAS, R. L., *Fracture toughness test in railroad wheels*. In: *Proc. of 16th International Wheelset Congress*, Cidade do Cabo, África do Sul, p. 01-10, 2010.

NUNES, Rafael Menezes et al. *ASM metals handbook: nondestructive evaluation and quality control*. Estados Unidos: ASM International, 2012.

OLIVEIRA, Luiz Gustavo. **Determinação da taxa de propagação de trinca por fadiga dos aços SAE-1050 e SAE-4130 empregados na fabricação de eixos ferroviários**. 2008.

OLIVEIRA, Luiz Gustavo. **Influência do processo de fabricação no comportamento mecânico de rodas ferroviárias.** 2013

PADILHA, A. F. **Materiais de Engenharia.** In A. F. Padilha, *Materiais de Engenharia.* São Paulo: Hemus, 2007.

PANNONI, Fabio Domingos. M. Sc. , Ph.D. **Aços Estruturais.** (2016). Disponível em <<http://www.denversa.com.br/site/files/produtos/c23a48ee67ec5dae06e47cb718647c7b.pdf>> Acesso em 14/05/2016.

RANDON, Raul. Disponível em <[www.randonimplementos.com.br/products/list/fagoes-ferroviarios](http://www.randonimplementos.com.br/products/list/fagoes-ferroviarios)> Acesso em 04/05/2016.

REED-HILL, Robert E. ***Physical Metallurgy Principles.*** 3rd Ed. 2008.

Revista Acta Brazilian Science. São Luiz: Ed. **Centro de Ensino Atenas Maranhense.** 2014. Ano 1. Vol. 1, 4º trimestre. Disponível em <<http://www.actabrazilianscience.com.br/arquivos/revista4especial.pdf>> Acesso em 13/06/2016.

RIBEIRO, Carlos Barbosa. **Projeto de experimentos em rodas ferroviárias fundidas em aço, com o uso da técnica de Taguchi.** 2008.

SAE J - 442. ***Test Strip, holder and gage for shot peening.*** 2013.

SAE J – 443. ***Procedures for using standart shot peening almen strip.*** 2010.

SALOMÃO, Marcelo de Carvalho. Ensaios não destrutivos engenharia em soldagem. **Inspeção por partículas magnéticas com yoke**. 2016. Disponível em: <<http://www.poliend.com.br/2011/blog/?p=644>> Acesso em 30 de julho de 2015.

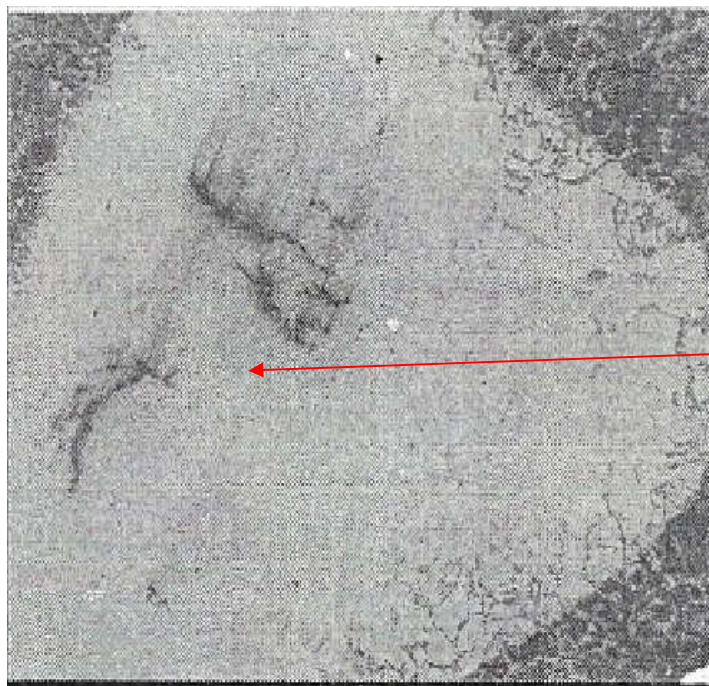
TOLLER Gerson. **Rupturas de trens relacionadas a componentes do sistema choque tração**. Revista Ferroviária. São Paulo 2008.

VAN VLACK. Lawrence Hall. **Princípios de ciência dos materiais**. 2013.

YUDONG, Zahang. NATHALIE, Gey. CHANGSHU, He. XIANG, Zhao, LIANG, Zuo. ***High temperature tempering behaviors in a structural steel under high magnetic field***. 2008.

**ANEXO 1**

Aço AAR M-201 Grau "E" magnetizado por Prods a 800 ampères em ensaio de Partículas Magnéticas, com ampliação 50X Relatório de Laboratório Metalúrgico – São Paulo. 2004.

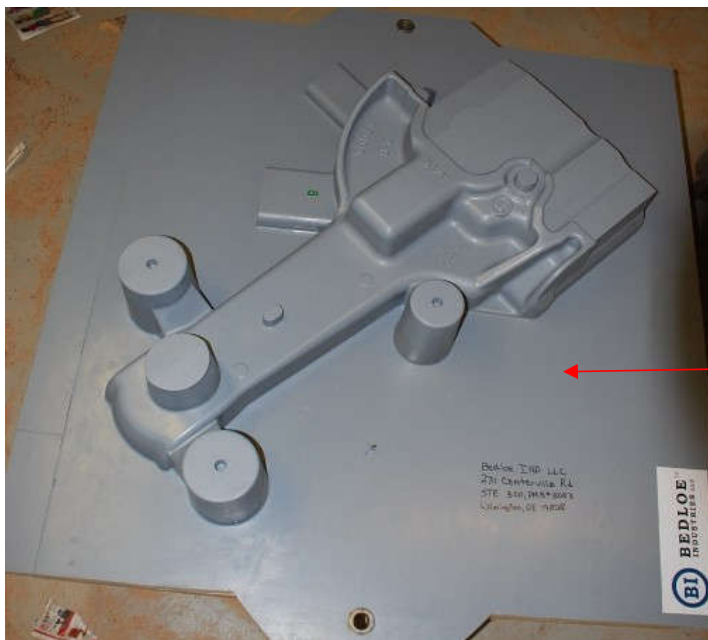


Trincas

## ANEXO 2

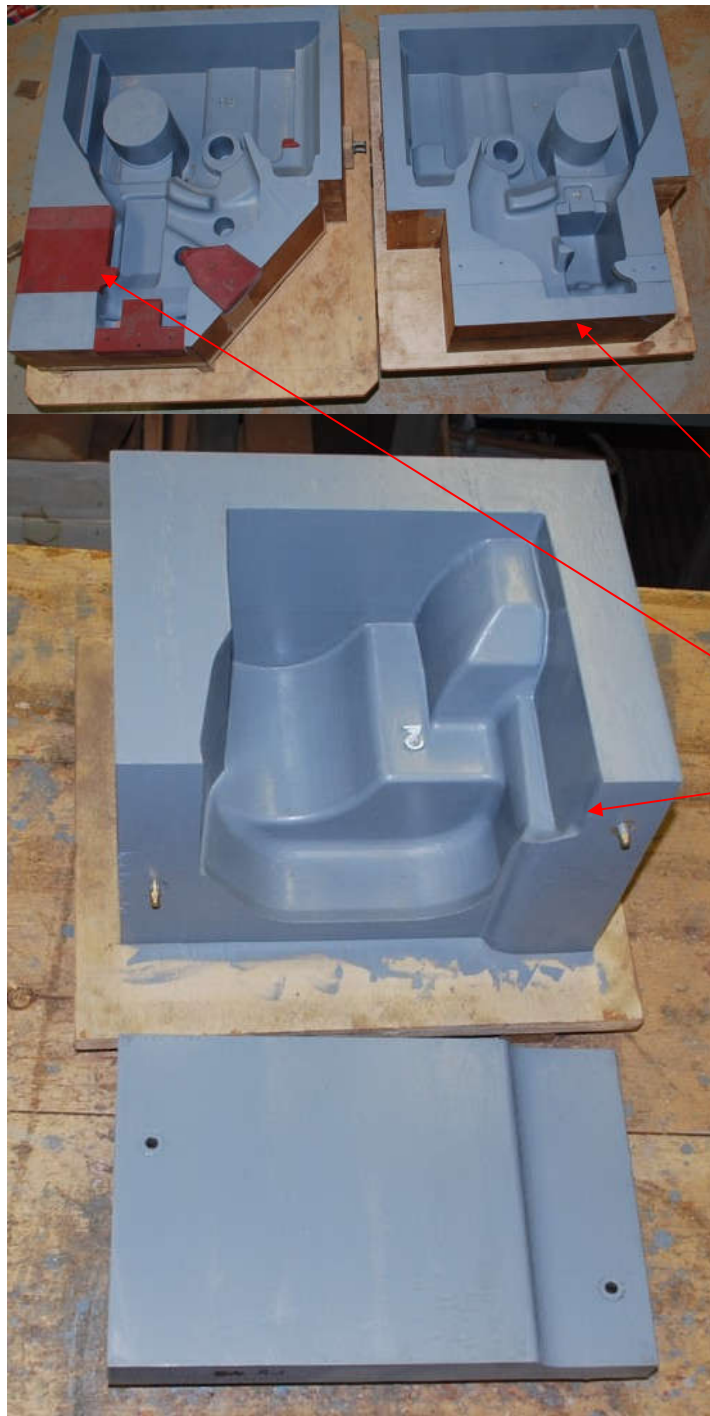


Modelo em madeira



Modelo em madeira





Caixas de macho



Caixas de macho



Caixas de macho