

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA POLITÉCNICA

ALEXANDRE CAETANO GODOY

**ESTUDO EM DISCO DE FREIO METROFERROVIÁRIO, FABRICADO PELO  
PROCESSO DE FUNDIÇÃO, CUBO FORJADO AÇO A36 E PISTA DE FERRO  
FUNDIDO CINZENTO FC 250 – ENSAIO METALOGRÁFICO**

São Paulo  
2016

ALEXANDRE CAETANO GODOY

**ESTUDO EM DISCO DE FREIO METROFERROVIÁRIO, FABRICADO PELO  
PROCESSO DE FUNDIÇÃO, CUBO FORJADO AÇO A36 E PISTA DE FERRO  
FUNDIDO CINZENTO FC 250 – ENSAIO METALOGRÁFICO**

Monografia apresentada à Escola Politécnica da  
Universidade de São Paulo para obtenção do título  
de Especialista em Tecnologia Metroferroviária.

Área de Concentração: Engenharia Mecânica  
Orientador: Prof. Dr. Gilmar Ferreira Batalha

São Paulo  
2016

#### Catálogo-na-publicação

Godoy, Alexandre Caetano

Estudo em disco de freio metroferroviário, fabricado pelo processo de fundição, cubo forjado aço A 36 e pista de ferro fundido cinzento FC 250 - Ensaio Metalográfico / A. C. Godoy -- São Paulo, 2016.

54 p.

Monografia (Especialização em Tecnologia Metroferroviária) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. PECE – Programa de Educação Continuada em Engenharia.

1.Disco de Freio 2.Ferro Fundido 3.Weibull 4.Dureza 5.Metalografia  
I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. PECE – Programa de Educação Continuada em Engenharia II.t.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Professor Dr. Gilmar Ferreira Batalha, por todo auxílio no desenvolvimento e orientação deste trabalho, agregando conhecimento, experiência e disposição, superando os desafios.

A todos meus amigos pós graduandos pela interação e harmonia durante nosso convívio.

A todos professores do curso, pelas aulas com entusiasmo e pela sapiência na transmissão de conhecimento.

Ao Professor e PhD André Paulo Tschipstchin pelo apoio e disponibilização do Laboratório de Ensaio Metalográfico do PECE.

Ao Mestre e Doutorando Rafael Rocha Maia pelo apoio, ajuda e troca de informações.

Ao Engenheiro Carlos Alberto da Silva do Departamento de Engenharia de Materiais pela ajuda e esclarecimentos.

A minha esposa Vânia e as minhas filhas Letícia e Lavínia que são a razão da minha vida e luta.

A Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, através de seu Programa de Educação Continuada em Engenharia - PECE.

Aos meus familiares, pelo apoio e compreensão em todos os momentos.

As pessoas que direta ou indiretamente nos auxiliaram no decorrer do nosso trabalho.

## **RESUMO**

Em 2007 foram verificadas falhas de preenchimento na região das aletas de ventilação em alguns discos de freio, trincas visíveis e folgas entre pista e o cubo, que nos piores casos poderiam comprometer a região de junção entre cubo e pista. Houve então uma alteração no processo de fabricação, porém em 2009 novos apontamentos de defeitos ocorreram.

O objetivo deste trabalho é avaliar a integridade dos materiais na parte de junção entre o ferro fundido e o aço, de modo a atender aos requisitos básicos de qualidade e desempenho com a finalidade de comprovar o enquadramento nos requisitos básicos, que constituirão sua caracterização.

Avaliação esta que deverá considerar a microestrutura final, propriedades mecânicas e tensões residuais, no intuito de verificar problemas de qualidade decorrentes do processo de fabricação, principalmente nas etapas de fundição e forjamento e ainda inclusões e/ou heterogeneidades de material que venham a comprometer o desempenho e/ou vida útil do componente.

A metodologia visa a garantia de um caldeamento entre pista e cubo, utilizando para isto END (Ensaio Não Destrutivo), visando perdas de materiais que são utilizados através da prática de ensaios destrutivos.

Para o estudo em questão foram retiradas amostras em peças que apresentaram problemas de fratura.

## **ABSTRACT**

In 2007 filling failures were observed in the region of the ventilation flaps in some brake discs, visible cracks and gaps between the track and the hub, which in the worst case could compromise the junction region between hub and track. Then there was a change in the manufacturing process, but in 2009 new notes defects occurred. The objective of this study is to evaluate the integrity of the materials at the junction between the cast iron and steel, in order to meet the basic quality and performance requirements in order to prove the framework in the basic requirements, which will be its characterization.

Rating this you should consider the final microstructure, mechanical properties and residual stresses in order to verify quality problems resulting from the manufacturing process, especially in the stages of casting and forging and also inclusions and / or heterogeneities material that may compromise performance and / or component life. The methodology aims to guarantee a welding between track and hub using for this NDT (Non Destructive Testing), to losses of materials that are used by practicing destructive testing. For the study in question were taken in pieces that showed fracture problems.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Microestrutura da grafita tipo A através de padrões normativos	15
Figura 2 – Representação de um ensaio Brinell	19
Figura 3 – Amassamento das bordas de impressão	22
Figura 4 - Projeção das bordas da calota esférica	22
Figura 5 – Distâncias a serem obedecidas no ensaio Brinell	22
Figura 6: Disco de Freio – Secção Típica	24
Figura 7: Disco de Freio – Junção Cubo/Pista	25
Figura 8 – Processo de fundição do FoFo maleável	33
Figura 9- Diagrama de equilíbrio do aço(cubo) e ferro fundido(pista)	34
Figura 10- Localização das microestruturas da junção	34
Figura 11- Detalhe da microestrutura da região 2 da figura 10	35
Figura 12- Detalhe da região 3 da figura 10	36
Figura 13- Representações esquemáticas dos processos de forjamento: livre e em matriz	38
Figura 14- Durômetro HB	40
Figura 15- Micrografia nº 1- Zona de transição	42
Figura 16- Micrografia nº 2- Zona de transição	42
Figura 17- Micrografia nº 3- Ferro fundido (pista)	43
Figura 18- Micrografia nº 4- Aço(cubo)	43
Figura 19- Micrografia nº 5- Zona de transição	44
Figura 20- Micrografia nº 6- Zona de transição	44
Figura 21- Micrografia nº 7- Ferro fundido (pista)	45
Figura 22- Micrografia nº 8- Aço(cubo)	45
Figura 23- Micrografia nº 9- Zona de transição	46
Figura 24- Micrografia nº 10- Zona de transição	46
Figura 25- Micrografia nº 11- Ferro fundido (pista)	47
Figura 26- Micrografia nº 12- Aço(cubo)	47
Figura 27- Micrografia nº 13- Zona de transição	48
Figura 28- Micrografia nº 14- Zona de transição	48
Figura 29- Micrografia nº 15- Ferro fundido (pista)	49
Figura 30- Micrografia nº 16- Aço(cubo)	49

## **LISTA DE GRÁFICOS**

Gráfico 1 – Gráfico linear da distribuição Weibull

18



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Pista de Frenagem – Composição química	14
Tabela 2 - Certificados – Ensaio Físicos e Químicos	16
Tabela 3 - Relações entre carga aplicada e diâmetro da esfera para serem utilizadas nas durezas Brinell	21
Tabela 4- Composição química do ferro fundido	27
Tabela 5- Relação entre o processamento, microestrutura e propriedades dos aços	30
Tabela 6- Limites de resistência à tração dos ferros fundidos cinzentos	33
Tabela 7- Ensaio realizados com Dureza Brinell	40

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<b>A</b>	Área de Impressão
<b>ABNT</b>	Associação Brasileira de Normas Técnicas
<b>ASTM</b>	American Society for Testing and Materials
<b>CMSP</b>	Companhia do Metropolitano de São Paulo
<b>CP</b>	Corpo de Prova
<b>F</b>	Quociente de Carga Aplicada
<b>FoFo</b>	Ferro Fundido
<b>GLG/LGI/CQM</b>	Gerência de Logística/ Departamento de Inspeção e Engenharia de Materiais/ Centro de Qualidade de Materiais
<b>HB</b>	Dureza Brinell
<b>HB<sub>s</sub></b>	Dureza Brinell para Esfera de Aço
<b>HB<sub>w</sub></b>	Dureza Brinell para Esfera de Tungstênio
<b>HR</b>	Dureza Rockwell
<b>HV</b>	Dureza Vickers
<b>ISO</b>	International Organization for Standardization
<b>LP</b>	Líquido Penetrante
<b>NBR</b>	Norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas
<b>NC</b>	Não Conformidade
<b>ZAC</b>	Zona Afetada pelo Calor

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>C</b>	Carbono
<b>Cr</b>	Cromo
<b>Cu</b>	Cobre
<b>d</b>	Diâmetro
<b>Mn</b>	Manganês
<b>Mo</b>	Molibidênio
<b>Nb</b>	Nióbio
<b>Ni</b>	Niquel
<b>P</b>	Fósforo
<b>p</b>	Profundidade da Calota Esférica
<b>r</b>	Raio
<b>S</b>	Enxofre
<b>Sc</b>	Escândio
<b>Si</b>	Silício
<b>Ti</b>	Titânio
<b>V</b>	Vanádio
<b>W</b>	Tungstênio
$\sigma_u$	Limite de Resistência a Tração
$\alpha$	Constante Experimental que Varia para Cada Material
$\mu\text{m}$	Micrómetro

## **SUMÁRIO**

1. INTRODUÇÃO	13
1.1 Considerações Iniciais	13
1.2 Objetivo do Trabalho	13
2.ESPECIFICAÇÃO DO DISCO DE FREIO	14
2.1 Especificação da Pista de Frenagem	14
2.2 Especificação do cubo	15
2.3 Caracterização dos materiais	16
3 DISTRIBUIÇÃO WEIBULL	17
4 ENSAIO DE DUREZA	19
4.1 Dureza Brinell	19
5 METALURGIA	24
6 CLASSIFICAÇÃO DOS ELEMENTOS QUÍMICOS	26
7 CLASSIFICAÇÃO DOS AÇOS QUANTO À MICROESTRUTURA	28
8 CLASSIFICAÇÃO DOS AÇOS QUANTO AO PROCESSAMENTO	30
9 TÉCNICAS PARA CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL	31
10ELEMENTOS DE LIGA	32
11 FORJAMENTO	38
12 ENSAIOS DE DUREZA	40
13 ENSAIOS METALOGRÁFICOS	41
13.1 PREPARAÇÃO DA AMOSTRA	41
13.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS METALOGRÁFICOS	42
14 CONCLUSÃO	50
15 REFERÊNCIAS	51
16 GLOSSÁRIO	53

## **1 INTRODUÇÃO**

### **1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS**

O disco de freio tem a função de reduzir o movimento giratório das rodas dos metrocarros ao receber o atrito das sapatas de freio e dissipar o calor resultante desse processo (CMSP).

O processo de fabricação deverá combinar as técnicas necessárias para garantir os parâmetros de projeto, sem que haja comprometimento dos requisitos de qualidade e desempenho.

Os discos de freio, deste trabalho, tem como aplicação crítica, sob o aspecto de severidade, os metrocarros destinados às frotas: A, D, E, G, I, J, K e L.

Vários materiais têm sido testados na aplicação de discos de freio como por exemplo: aço, ferro fundido cinzento, ferro fundido nodular, ferro fundido vermicular e materiais compósitos de alumínio e de carbono. Entretanto até hoje, o ferro fundido cinzento, contendo grafita do tipo A e baixos teores de ferrita e carbonetos, tem sido o material mais apropriado e de melhor conjunto de propriedades mecânicas e térmicas, utilizado na fabricação de discos de freio.

### **1.2 OBJETIVO DO TRABALHO**

Estabelecer critérios de inspeção nos discos de freio montados no truque, quanto a estrutura do material e avaliar a integridade dos materiais na parte da junção entre o ferro fundido e o aço de modo a comprovar o enquadramento nos requisitos básicos.

## 2 ESPECIFICAÇÃO DO DISCO DE FREIO

O disco de freio deverá ser composto de uma única peça (monobloco), conforme projeto desenvolvido a partir de desenho básico. A pista do disco de freio deverá ser fundida diretamente sobre o cubo (semiacabado), não sendo aceitável a fixação através de pinos, parafusos, adesivos ou soldagem(CMSP).

### 2.1 ESPECIFICAÇÃO DA PISTA DE FRENAGEM

A pista de frenagem dos discos de freio deverá ser confeccionada em ferro fundido cinzento, com grafita lamelar, de alta resistência a variações de temperatura e ao desgaste, tomando por base uma liga conforme ABNT FC-250 (DIN1691 GG-25) ou equivalente, modificada a fim de enquadrar-se nas seguintes características de composição química (faixas admissíveis para os elementos químicos relacionados), conforme tabela1:

Elemento Químico	Composição (Nota 1)		Observações
	Mínimo (%)	Máximo (%)	
C	3,10	3,50	
Si	1,90	2,30	
Mn	0,60	0,90	
Mo	0,10	0,50	
Sc	---	0,93	
Ti	0,10	0,28	
Cu + Cr + Mo	0,10	0,90	
P	---	0,10	Impureza
S	---	0,03	Impureza

Tabela 1 – Pista de Frenagem – Composição química(CMSP).

Nota: Ao longo do processo de homologação, caso sejam verificados conflitos entre composição química proposta (participação de cada elemento) e as demais características técnicas requeridas, o Proponente deverá privilegiar a consecução da microestrutura especificada, de acordo com o tópico seguinte.

#### a) Microestrutura

- Grafita: Forma I (lamelar) – Tipo A predominante – Tamanho de 4 a 6, segundo a ABNT NBR 6593;
- Matriz: Perlítica com ferrita (Mínimo de 90% de perlita), isenta de ledeborita, ledeborita e/ou cementita secundária na microestrutura.

Segue abaixo na Figura 1 a microestrutura citada através de padrões normativos

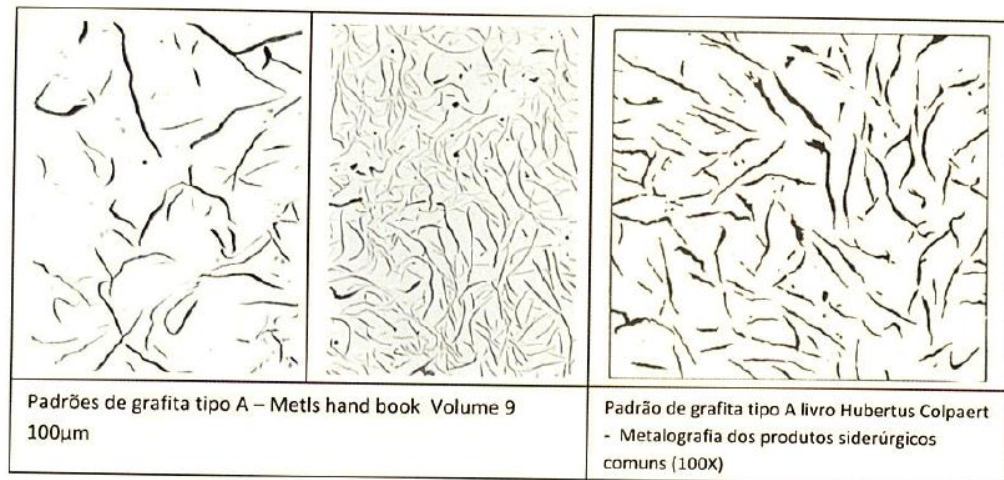


Figura 1 – Microestrutura da grafita tipo A através de padrões normativos (CMSP).

b) Dureza (Produto acabado)

- Superficial – 170 a 217 HB (face de desgaste – superfície usinada);
- Subsuperficial (Núcleo) – 150 a 217 HB (a partir de 6mm abaixo da face de desgaste)

c) Limite de resistência a tração: de 250 a 350 MPa.

## 2.2 ESPECIFICAÇÃO DO CUBO

O cubo dos discos de freio será derivado de uma base em formato circular – “Blank” (que, por sua vez, será obtido a partir do recorte de chapa de aço ASTM A36 ou MR 250 – ABNT 7007), conformado por meio de forjamento à quente e, na sequência, submetido a processo de usinagem, na qual deverá incorporar os entalhes, com caráter preparatório para a etapa de fundição da pista. Resultando num componente com as seguintes características:

- Limite de resistência à tração: de 400 a 550 MPa;
- Dureza: a ser definida ao longo da etapa de caracterização dos materiais, a partir da média das medições obtidas para cada proponente (antes e depois do forjamento).

## 2.3 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Os materiais serão caracterizados conforme certificados comprobatórios das características físicas e químicas dos materiais empregados (tanto do cubo quanto da pista, obtidos através da segregação de amostras e/ou extração de corpos de prova, em meio ao processo de fabricação.

A certificação dos resultados deverão ser conforme tabela 2.

Item	Norma	Descrição	Quantidade (Nota 1)	
			Cubo (Nota 2)	Pista
1	---	Determinação da composição química (análise química)	1	1
2	NBR 8108 e NBR 13284	Determinação da microestrutura (análise metalográfica)	1	1
3	ASTM A 370	Determinação da resistência à tração	1	1
4	ASTM A 370	Determinação do módulo de elasticidade	---	1
5	NM – ISSO 6506	Determinação da dureza “Brinell” (materiais metálicos)	3	5
6	NBR 6002	Ensaio não destrutivo – Ultrassom – Detecção de descontinuidades em chapas metálicas	1	---

Tabela 2 – Certificados – Ensaio Físicos e Químicos (CMSP).

Nota1: Esse quadro indica o número mínimo de medições (no caso da dureza) ou ensaios (nos demais casos) a serem realizados por unidade de disco de freio segregado.

Nota 2: As medições e ensaios destinadas ao cubo dos discos de freio deverão ser realizados em pelo menos dois momentos distintos do processo de fabricação (basicamente antes e depois do forjamento).

O Metrô recomenda a prática de verificações e/ou inspeções intermediárias, ao longo do processo produtivo, as quais deverão respeitar as limitações inerentes a cada etapa.



### 3 DISTRIBUIÇÃO WEIBULL

A distribuição de Weibull foi proposta inicialmente em 1928 por Fisher e Tippet em estudo de valores extremos. Em seguida foi desenvolvida de modo independente por Walodd Weibull em seus estudos sobre a resistência dos materiais em 1939.

A distribuição Weibull foi criada pela necessidade de utilização de modelos probabilísticos que reproduzissem estaticamente os dados analisados de uma maneira compacta.

Através da distribuição weibull podemos:

- Representar falhas típicas de partida (mortalidade infantil), falhas aleatórias e falhas devido ao desgaste;
- Obter parâmetros significativos da configuração de falhas;
- Representação gráfica simples.

A distribuição de weibull tem sido largamente utilizada na engenharia de confiabilidade como modelo de falha para componentes e sistemas elétricos e mecânicos. Também tem sido utilizado para estimar a sobrevivência humana, de animais e insetos.

As análises da distribuição deWeibull são utilizadas para dar a técnica , a importância de distribuições de tamanho de falha. Os parâmetros de Weibull usam conceitos de “volumes equivalentes” para comparar forças obtidas a partir de diferentes configurações de teste .

Uma grande quantidade de informações úteis está disponível através da análise Weibull . Entre as aplicações mais úteis estão a da comparação dos valores de resistência que varia para diferentes configurações de stress.

No gráfico 1 iustraremos os ensaios metalográficos. Tal gráfico foi gerado através do programa Relia Soft, através de resultados obtidos no ensaio de flexão e apresentados no trabalho individual do Engenheiro José Luciano Esterque.

A probabilidade de 50% de falhar em torno de 80 MPa e a 63,2% de 140 MPa,são resultados que experimentalmente atenderiam a um valor de tensão de segurança em serviço, indicado para informações de projeto. Foi obtido neste programa o valor de forma  $\beta = 0,831727$ . Este valor menor que 1, indica a possibilidade de falhas aleatórias e por mortalidade infantil.

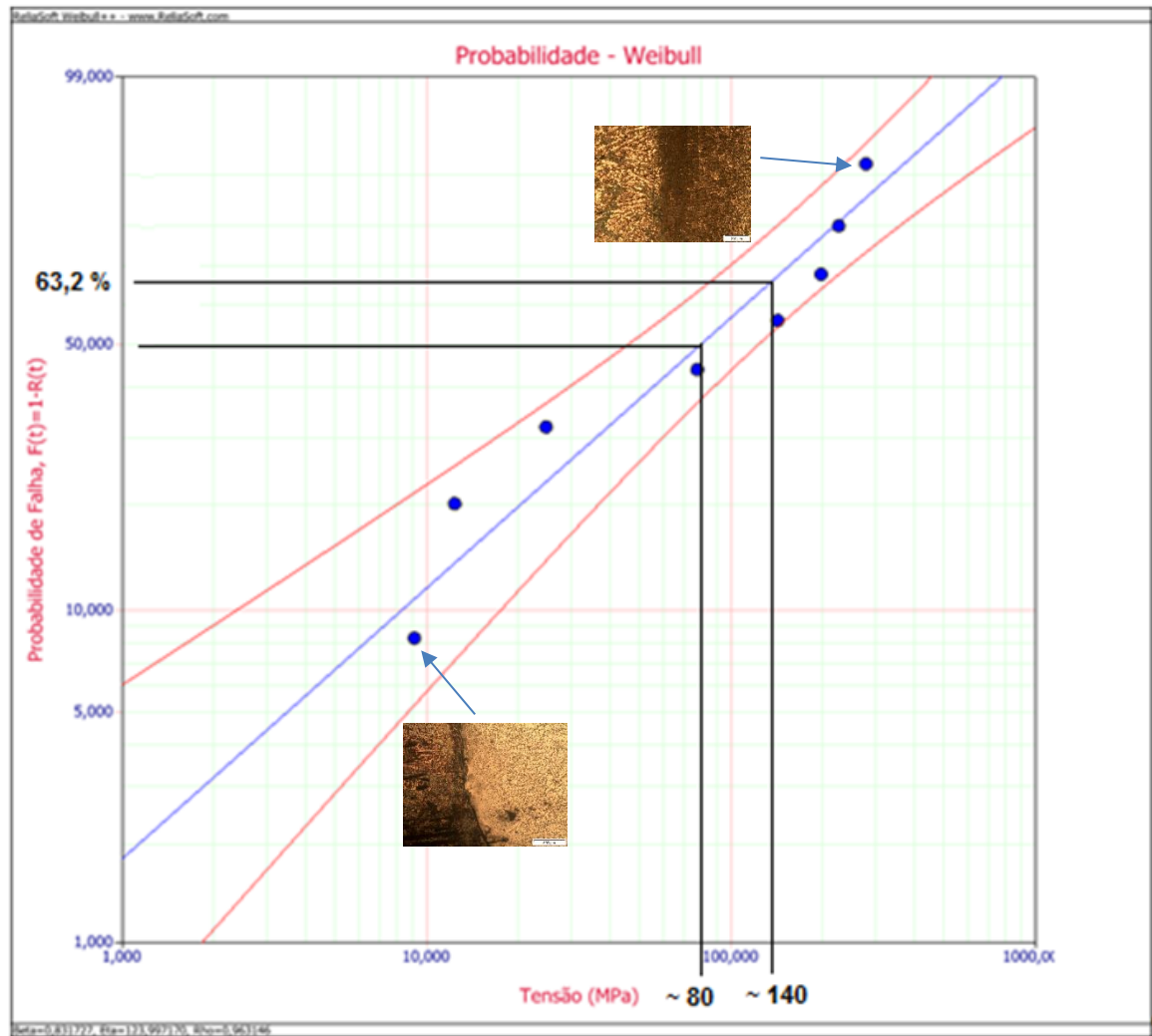


Gráfico 1 – Gráfico linear da distribuição Weibull.

## 4 ENSAIO DE DUREZA

A dureza é a resistência do material à deformação plástica permanente e ao desgaste. Em geral os materiais duros são também frágeis. Pode-se considerar também como dureza sendo a resistência que um material apresenta ao risco ou a formação de uma marca permanente quando pressionado por outro material ou marcadores padronizados.

Os métodos mais utilizados são aqueles em que penetradores com formatos padrão são pressionados em uma superfície do material em condições definidas de pré-carga e carga, causando uma pequena deformação no material, deformação esta que na maioria dos casos não afeta a integridade e funcionalidade do material. Esta penetração inicialmente causa uma deformação elástica seguida de uma deformação plástica.

Formada a área superficial, mede-se a área formada ou a sua profundidade (dependendo do tipo de dureza), estas medidas são correlacionadas com um valor numérico que representa a dureza do material.

Existem vários tipos de ensaios de dureza: dureza por rebote, dureza por risco e dureza por penetração. Trataremos aqui do ensaio por penetração, por ser o ensaio mais utilizado e também ser o ensaio apresentado em nossas amostras.

Neste tipo de ensaio existem diversas modalidades, destacaremos aqui a Dureza Brinell, método a ser utilizado em nosso trabalho.

### 4.1 DUREZA BRINELL

O ensaio consiste em comprimir com uma pressão já definida uma esfera de aço temperado ou de carboneto de tungstênio na superfície do material, gerando uma calota esférica, conforme Figura 2 abaixo.

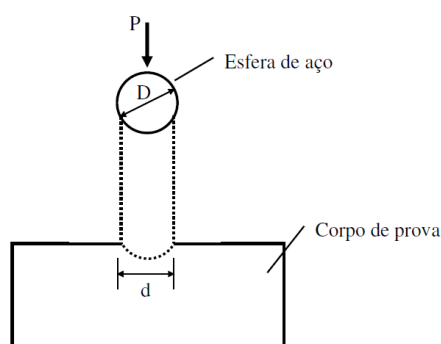


Figura 2 – Representação de um ensaio Brinell .

A dureza Brinell é gerada pela relação que existe entre a carga aplicada em (N) e a área em (mm<sup>2</sup>) da calota esférica impressa.

Assim temos que:

$$HB = 0,102 \cdot \frac{2P}{(\pi \cdot D) (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (1)$$

Onde D é o diâmetro do penetrador e d o diâmetro da impressão.

A dureza Brinell tem como unidade de medida (kgf/mm<sup>2</sup>), porém é usual apenas o número que representa a dureza, seguido do símbolo HB. Também é usual utilizar HB<sub>s</sub> para esfera de aço e HB<sub>w</sub> para esfera de carboneto de tungstênio.

O tempo em que se aplica a carga varia entre 10 e 15 segundos.

A carga e o diâmetro da esfera dependem do material, os quais devem ser adequados ao tamanho, à espessura e à estrutura interna do corpo de prova (geralmente com diâmetros de 10 mm).

Materiais com dureza até 450 HB utilizam carga de 3000 kgf, porém para materiais muito moles utilizam-se cargas entre 500 a 1500 kgf, evitando assim uma impressão muito profunda. Materiais muito duros (entre 450 a 650 HB) utilizam-se esfera de carboneto de tungstênio, evitando assim a deformação da esfera do aço.

Símbolo	Diâmetro da esfera (mm)	$0,102.P/D^2$	Carga $P$ Valor nominal
HBs (HBw) 10/3000	10	30	29,42 kN
HBs (HBw) 10/1500	10	15	14,71 kN
HBs (HBw) 10/1000	10	10	9,807 kN
HBs (HBw) 10/500	10	5	4,903 kN
HBs (HBw) 10/250	10	2,5	2,452 kN
HBs (HBw) 10/125	10	1,25	1,226 kN
HBs (HBw) 10/100	10	1	980,7 N
HBs (HBw) 5/750	5	30	7,355 kN
HBs (HBw) 5/250	5	10	2,452 kN
HBs (HBw) 5/125	5	5	1,226 kN
HBs (HBw) 5/62,5	5	2,5	612,9 N
HBs (HBw) 5/31,25	5	1,25	306,5 N
HBs (HBw) 5/25	5	1	245,2 N
HBs (HBw) 2,5/187,5	2,5	30	1,839 kN
HBs (HBw) 2,5/62,5	2,5	10	612,9 N
HBs (HBw) 2,5/31,25	2,5	5	306,5 N
HBs (HBw) 2,5/15,62	2,5	2,5	153,2 N
HBs (HBw) 2,5/7,82	2,5	1,25	76,61 N
HBs (HBw) 2,5/6,25	2,5	1	61,29 N
HBs (HBw) 2/120	2	30	1,177 kN
HBs (HBw) 2/40	2	10	392,3 N
HBs (HBw) 2/20	2	5	196,1 N
HBs (HBw) 2/10	2	2,5	98,07 N
HBs (HBw) 2/5	2	1,25	49,03 N
HBs (HBw) 2/4	2	1	39,23 N
HBs (HBw) 1/30	1	30	294,2 N
HBs (HBw) 1/10	1	10	98,07 N
HBs (HBw) 1/5	1	5	49,03 N
HBs (HBw) 1/2,5	1	2,5	24,52 N
HBs (HBw) 1/1,25	1	1,25	12,26 N
HBs (HBw) 1/1	1	1	9,807 N

Fonte: ASTM E10-93

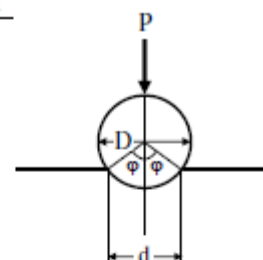


Tabela 3 – Relações entre carga aplicada e diâmetro da esfera para serem utilizadas as durezas Brinell (ASTM E10-93)

O diâmetro da calota é medido através de um microscópio ou lupa graduada, por meio da média aritmética entre duas leituras a 90° uma da outra no intuito de minimizar leituras errôneas e resultados imprecisos. A norma brasileira utilizada é a NBR 6294.

O penetrador deve ser polido e isento de defeitos na superfície e a superfície do corpo de prova isenta de sujeiras (óxidos, poeira, carepas, óleos e outros). A superfície do corpo de prova deverá ser plana, normal ao eixo de aplicação da carga e bem apoiada sobre o suporte para evitar deslocamentos durante o ensaio.

Para materiais que tenham grande capacidade de encruamento, pode-se haver amassamento das bordas de impressão, propiciando uma leitura de diâmetro inferior ao real ( $d' < d_r$ ), conforme Figura 3.

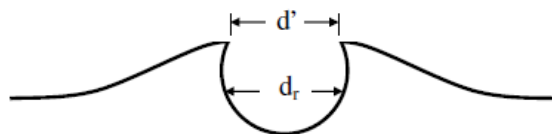


Figura 3 – Amassamento das bordas de impressão

Em metais trabalhados a frio por apresentarem pequena capacidade de encruamento, pode-se ocorrer aderência do metal à esfera, com as bordas da calota formada projetando-se ligeiramente para fora da superfície do corpo de prova, propiciando uma leitura de diâmetro maior que o real ( $d' > d_r$ ), conforme Figura 4.

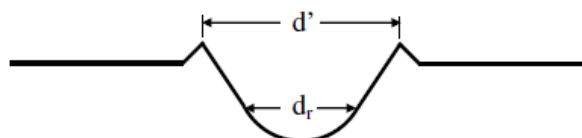


Figura 4 - Projeção das bordas da calota esférica

A modo de inibir interferência de uma impressão para com a outra, da borda ou da profundidade algumas distâncias devem ser obedecidas. Essas distâncias são relacionadas ao diâmetro da calota ( $d$ ). A espessura do corpo de prova não poderá ser inferior a 10 vezes a profundidade ( $p$ ) da calota esférica, conforme Figura 5.

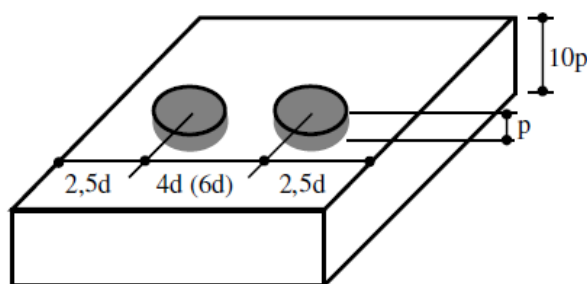


Figura 5 – Distâncias a serem obedecidas no ensaio Brinell.

Apesar de não ser muito precisa, existem relações experimentais que convertem dureza em tensão.

A relação entre dureza Brinell e limite de resistência à tração é bastante utilizada e é dada por:

$$\sigma_u = \alpha \cdot HB \quad (2)$$

Onde  $\sigma_u$  é o limite de resistência à tração em Mpa e  $\alpha$  a constante experimental que varia para cada material. Para o latão encruado 3,45; para o carbono 3,6; para o alumínio e suas ligas 4,00 e para o cobre recozido 5,20.

Por não ser muito preciso o resultado, tanto os valores da dureza quanto o de  $\alpha$  deverão ser indicados quando se utilizar essa relação. A mesma não deve ser utilizada para durezas Brinell maiores que 380, pois neste caso a dureza passa a crescer mais rapidamente do que o limite de resistência à tração.

## 5 METALURGIA

**Metalurgia-** Ciência que estuda e gerencia os metais desde sua extração do subsolo até suas transformações em produtos acabados adequados ao uso.

**Metalografia-** Análise da macroestrutura (aumento até 10 x) e da microestrutura (aumentos maiores que 10x) de matérias metálicas, visando observar trincas, porosidades, segregações, fases, tamanho de grão, defeitos cristalinos, etc.

A análise da secção transversal – Junção entre cubo e pista, é feita através de um disco de freio dividido em 8 partes iguais, as quais são submetidas a ensaios de macro e micrografia (em pelo menos uma das faces resultantes de cada secção), com o objetivo de analisar a qualidade da junção entre o cubo e a pista.

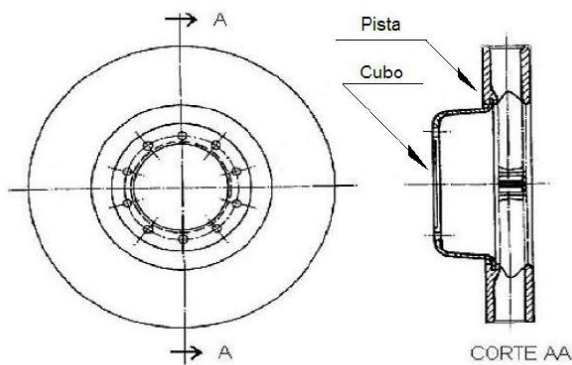


Figura 6: Disco de Freio – Secção Típica (CMSP).

Esta análise será feita a partir da destruição de, pelo menos, uma amostra de disco de freio. Ao longo deste ensaio, a região de junção cubo/disco, de cada uma das secções analisadas, será identificada e mapeada por meio de micrografia, com relação as:

- Zonas de caldeamento – aquelas caracterizadas pela efetiva união entre os dois metais distintos – ferro fundido e aço forjado;
- Zonas de não caldeamento – aquelas em que está descaracterizada a referida união.

Para tanto, deverá ser observado o perímetro da junção ideal (soma das dimensões “B”, “C” e “D” – Figura 8, pertinente ao respectivo projeto), o qual deverá ser comparado a dimensão real, ou seja, ao valor correspondente obtido para cada face da secção.



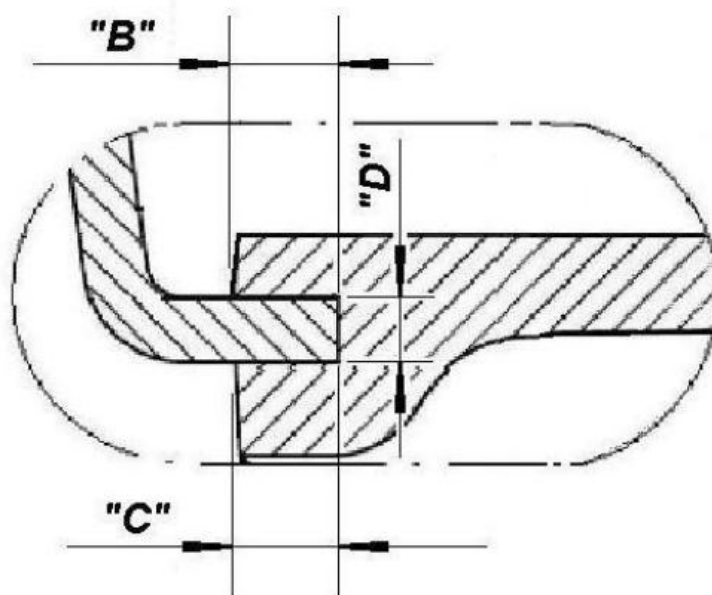


Figura 7: Disco de Freio – Junção Cubo/Pista (CMSP).

Paralelamente, fruto de observação macroscópica deverão ser identificados e registrados eventuais defeitos inerentes ao processo produtivo, que não atinjam ou afetem diretamente, a região de junção entre o cubo e a pista.

Serão considerados aprovados os discos de freio, cujas faces de cada uma das oito secções atendam a seguinte condição:

- O perímetro caldeado real (ou seja, descontadas as falhas de caldeamento) deverá ser de no mínimo 70% do perímetro caldeado total .

## 6 CLASSIFICAÇÃO DOS ELEMENTOS QUÍMICOS

A química classifica os elementos químicos em metais, semi-metais, não metais e gases nobres.

**Metais** – Apresentam alta condutividade elétrica e térmica, ductibilidade e maleabilidade. Quando sólidos têm a propriedade de refletir a luz, manifestando brilho característico, perdem facilmente elétrons, dando origem a íons positivos (cátions).

**Não metais** – Apresentam propriedades opostas às dos metais, ou seja, são maus condutores de calor e de eletricidade. Em geral são opacos e não apresentam brilho, não são dúcteis nem maleáveis e têm a tendência a ganhar elétrons, transformando-se em íons negativos (ânions).

**Semi-metais** – Apresentam características intermediárias entre metais e não metais.

**Gases nobres** – Receberam este nome porque se considerou inicialmente que não reagem (gases inertes). Hoje já se consegue sintetizar vários compostos de gases nobres, embora de estabilidade precária.

Os elementos químicos reagem entre si e formam materiais que são utilizados nos produtos. Esses materiais podem ser classificados formando o grupo de materiais metálicos, poliméricos(ou plásticos) e o grupo dos materiais cerâmicos.

Falaremos sobre os materiais metálicos que é a matéria-prima de nosso estudo – Estes materiais são formados de elementos metálicos e podem conter também alguns elementos não metálicos, que são misturados para formar ligas que possuem melhores propriedades mecânicas, térmicas, elétricas, etc. Os metais possuem uma estrutura cristalina, na qual os átomos se dispõem de um modo ordenado. São habitualmente divididos em duas classes: a dos materiais metálicos ferrosos (aço e ferro fundido) e a dos materiais metálicos não ferrosos (alumínio, titânio, cobre, zinco, chumbo e ligas).

**Aço** – É uma liga de ferro e carbono, com teor de carbono até 2%, podendo conter outros elementos de liga, tais como Cr, Mn, Mo, V, Nb, W, Ti, Ni e outros elementos (denominados de residuais, provenientes do processo de fabricação, tais como o P, S, Si).

Os aços são materiais metálicos utilizados na confecção de peças (engrenagens, rolamentos, eixos, parafusos, porcas, etc.), ferramentas (matrizes, punções, pás, martelos, etc.) ou estruturas (pontes, tanques, edifícios).

O ferro é o elemento mais usado mundialmente por ser utilizado em grande escala na fabricação de aços e ferros fundidos.

Tantas aplicações do aço se dá devido ao baixo custo de obtenção, assim como a grande versatilidade de propriedades obtidas a partir de pequenas mudanças na composição química, tratamentos térmicos e no processamento e principalmente da elevada ductilidade aliada a grande tenacidade e elevada dureza.

Ferro fundido- É uma liga de ferro e carbono, com teor de carbono maior do que 2% e menor ou igual a 6,67%.

O ferro fundido pode ser branco, cinzento, grafítico compacto, vermicular, nodular e maleável, sendo suas faixas de composição química dadas conforme a tabela 4 abaixo:

Tipo	C	Si	Mn	P	S
Cinzento	2,5 – 4,0 %	1,0 – 3,0 %	0,2 – 1,0 %	0,002–1,0 %	0,02–0,25 %
Grafítico Compacto	2,5 – 4,0 %	1,0 – 3,0 %	0,2 – 1,0 %	0,01–0,1 %	0,01–0,03 %
Dúctil	3,0 – 4,0 %	1,8 – 2,8 %	0,1 – 1,0 %	0,01–0,1 %	0,01–0,03 %
Branco	1,8 – 3,6 %	0,5 – 1,9 %	0,25 – 0,8 %	0,06–0,2 %	0,06–0,2 %
Maleável	2,2 – 2,9 %	0,9 – 1,9 %	0,15 – 1,2 %	0,02–0,2 %	0,02–0,2 %

Tabela 4 – Composição química do ferro fundido.

Diferente do aço, cuja composição química é usada para fins de designação normalizada, a norma para o ferro fundido apresenta números que se referem a dados correspondentes a suas propriedades: resistência à tração, ao alongamento e limite de escoamento. Esses números foram obtidos através de ensaios ou testes feitos com instrumentos especiais.

## 7 CLASSIFICAÇÃO DOS AÇOS QUANTO À MICROESTRUTURA

Na metalurgia classificamos os aços nos seguintes grupos:

a) Aços encruados

Aços com estruturas predominantemente ferrítica com pouco perlita, resultantes dos processos de deformação a frio. Normalmente aços de baixo teor de carbono (inferior a 0,4%) e com baixa quantidade de elementos de liga.

b) Aços ferríticos- perlíticos

Aços que possuem teor de carbono abaixo de 0,8% (hipoeutetóides) e são resultantes de processos em que houve resfriamento lento tais como materiais trabalhados a quente, recozido ou normalizado.

c) Aços martensíticos

Aços de martensita revenida são geralmente aplicados em situações em que se exige resistência elevada ao longo de toda a seção transversal, tais como eixos e punções.

Aços martensíticos com carbonetos primários são aplicados em situações que exigem resistência ao desgaste elevada, tais como ferramentas de corte e/ou de trabalho a quente. A martensita propicia elevada resistência e os carbonetos primários durezas elevadas.

d) Aços bainíticos

A estrutura bainítica sob determinadas combinações propicia maior tenacidade que a martensítica, tornando tais aços preferíveis em situações em que se necessita resistência associada à tenacidade.

e) Aços austeníticos

A austenita não sendo estável em temperatura ambiente, sua estabilização necessita da presença de elementos de liga, tais como cromo e manganês. A austenita por não ser magnética encontra aplicações onde se necessita minimizar os efeitos com os campos magnéticos, tais como em suportes de bússolas. Além disso a austenita, quando estabilizada pelo manganês, pode se transformar em martensita mediante impacto, possuindo elevada resistência ao impacto e à abrasão, sendo utilizadas em revestimentos de moinhos, britadores ou martelos.

f) Aços dúplex ou bifásicos

Aços onde há duas categorias distintas de estruturas.

Na primeira, do tipo austenítico-ferrítica (delta), encontra-se certos aços inoxidáveis, cuja resistência mecânica e à corrosão é superior àquela obtida nos aços austeníticos.

Na segunda categoria, do tipo ferrítico-martensítica, resultante de têmpera a partir de temperatura de dentro da zona crítica (entre linhas A1 e A3 do diagrama Fe-C). Os aços de baixo carbono com esta estrutura apresentam combinações de resistência e ductilidade mais elevadas que os equivalentes ferríticos-perlíticos.

## 8 CLASSIFICAÇÃO DOS AÇOS QUANTO AO PROCESSAMENTO

Entende-se por processamento o tipo de operação que se executa sobre o aço visando mudar a forma e/ou estrutura.

Os processamentos que impõe formas são a conformação mecânica (a frio ou a quente. Tais como laminação, extrusão, trefilação), a fundição e a consolidação por sinterização (metalurgia do pó).

Os processamentos que visam alterar a estrutura são os tratamentos térmicos, tais como recozimento, normalização, recristalização, coalescimento, têmpera e revenimento.

O processamento altera a microestrutura do aço, afetando as propriedades. A tabela 5 ilustra a relação entre processamento, microestrutura e propriedades.

Processamento	Microestrutura	Propriedades
Trabalhado a frio	Encruada (alta densidade de discordâncias) Grãos alongados (orientados)	Elevada resistência Baixa ductilidade Grande anisotropia
Trabalhado a quente	Recristalizada (baixa densidade de discordâncias) Grãos refinados e equiaxiais Ausência de tensões residuais	Moderada resistência Elevada ductilidade Moderada anisotropia
Fundido	Estrutura dentrítica Grãos colunares equiaxiais Baixa densidade de discordâncias Presença de segregação Presença de tensões residuais Presença de porosidade(em muitos casos)	Baixa resistência Moderada ductilidade Moderada anisotropia
Sinterizado	Recristalizada (baixa densidade de discordâncias) Heterogenidade química Presença de poros	Baixa resistência Baixa ductilidade Moderada anisotropia

Tabela 5- Relação entre o processamento, microestrutura e propriedades dos aços (Senai-2006).

## 9 TÉCNICAS PARA CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL

A microestrutura possui uma forte relação com as propriedades do material e assim o exame metalográfico se faz necessário. O entendimento é de grande importância para a análise e compreensão destas microestruturas. O entendimento do comportamento da fase dual depende muito das técnicas metalográficas, estas são capazes de revelar os microconstituintes presentes no material.

Alguns ataques químicos são utilizados para o estudo do aço. Neste trabalho citaremos a solução de Nital (ácido nítrico com álcool etílico), a mesma não ataca a ferrita nem a cementita, mas delinea os contornos e escurece a perlita. A perlita escurece porque o reativo ataca as interfaces entre a ferrita e a cementita, e como essas linhas são muito próximas, a perlita se apresenta como “hachurada” (COLPAERT, 1974), este reagente mostra a topografia da microestrutura, uma vez que o reagente arranca átomos dos contornos.

O Nital revela microestrutura em branco e preto, onde às vezes a distinção entre uma fase e outra se torna difícil, por exemplo, o ataque em Nital revela a ausferrita, a ferrita circular aparece escura e a austenita aparece branca, porém alguma área que aparece escura pode ser de martensita, mas não é possível distingui-la da ferrita acircular.

É importante citar que as amostras não devem ser atacadas previamente com Nital. Foi observado que se houver vestígio deste ataque após o polimento final, o ataque não delineará a martensita e a bainita em toda a amostra (LEPERA, 1980).

O efeito da microestrutura nas propriedades físicas e mecânicas dos aços faz do exame metalográfico uma necessidade para a perfeita análise e compreensão destas propriedades (GIRAULT, 1998).

Reagente utilizado: Nital 3% - 3ml de  $\text{HNO}_3$  em 97 ml de álcool etílico (97%).

## 10 ELEMENTOS DE LIGA

O acréscimo de determinados componentes causam melhoras significativas nas propriedades dos aços. As características que justificam o emprego de tais elementos são:

- **Carbono:** O mais importante devido à necessidade de haver carbonetos na estrutura para conferir a dureza e a resistência necessária a aplicação. Geralmente o teor de carbono situa-se entre 0,8 e 2%. Quando a tenacidade é um fator importante emprega-se teores de carbono mais baixos, entre 0,5 e 0,7%, tal como nos aços resistentes ao choque.
- **Silício:** Tem função desoxidante na fabricação do aço. Normalmente está na faixa entre 0,1 e 0,3%. Teores muito elevados favorecem a grafitação. Em alguns poucos casos emprega-se o silício em um percentual mais elevado, entre 1 e 2%, para fins de aumento de temperabilidade e aumento da resistência ao revenido.
- **Manganês:** Atua como desoxidante além de dessulfurante. É empregado em teores inferiores a 0,5%. O manganês tem forte efeito na temperabilidade, porém em teores mais altos, em torno de 1,5%, o mesmo forma carbonetos menos estáveis que o ferro, não contribuindo para a resistência ao revenido.
- **Fósforo:** Em teores altos, prejudicam os aços, tornando-os frágeis e quebradiços.
- **Enxofre:** Também é prejudicial, torna o aço frágil, áspero e granuloso, devido aos gases que produz na matriz metálica. Em determinados momentos é conveniente a adição do mesmo em proporções de até 0,3%, pois torna o aço fácil de usar, permitindo aumento da velocidade de corte.

O fator que determina a classificação do ferro em cinzento ou branco é a aparência da fratura do material depois que ele resfriou. E essa aparência, por sua vez, é determinada pela forma como o carbono se apresenta sob duas formas: Cementita ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) ou como grafita, um mineral de carbono usado, por exemplo, na fabricação do lápis.

O carbono no ferro fundido cinzento, apresenta-se sob forma de grafita, em flocos ou lâminas, que dá a cor cinzenta ao material.



Como o silício favorece a decomposição da cementita em ferro e grafita, esse tipo de liga ferrosa apresenta um teor maior de silício (até 2,8%). Outro fator que auxilia na formação da grafita é o resfriamento lento.

Os ferros fundidos cinzentos apresentam boa usinabilidade e capacidade de amortecer vibrações.

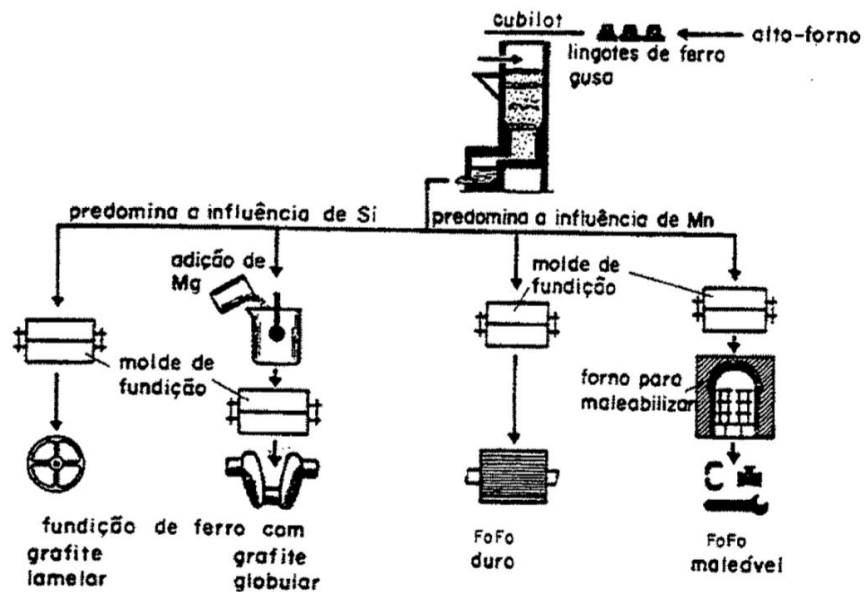


Figura 8 – Processo de fundição do FoFo maleável (Senai - 2006).

Assim, os ferros fundidos cinzentos são classificados pela norma NBR 6589, de acordo com seus limites de resistência à tração. A classificação é codificada por duas letras e um número de três dígitos: FC – XXX. Nela, as letras FC indicam o ferro cinzento e o número indica a resistência à tração em MPa (0,1 kgf/mm<sup>2</sup>). Veja tabela 12 abaixo:

Tipos	MPa
FC - 100	100
FC - 150	150
FC - 200	200
FC - 250	250
FC - 300	300
FC - 400	400

Tabela 6 – Limites de resistência à tração dos ferros fundidos cinzentos (Senai - 2006).

## Composição dos materiais em estudo e morfologia da junção

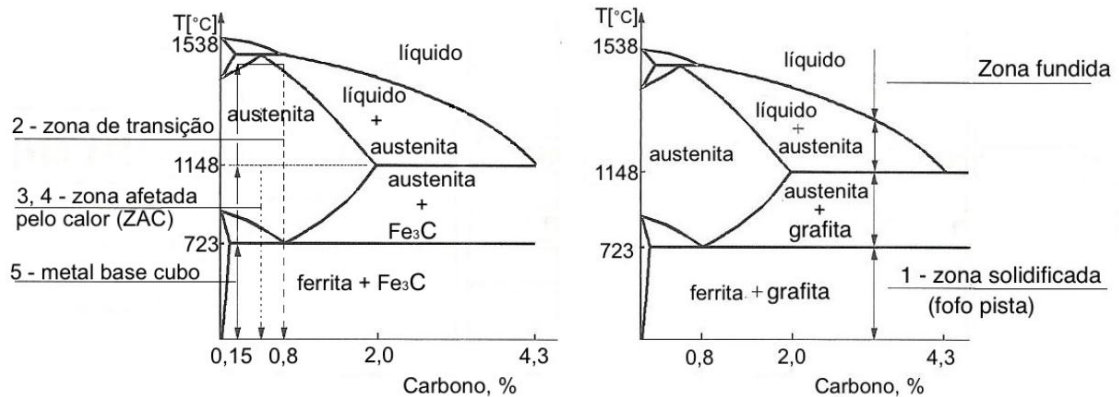


Figura 9 – Diagrama de equilíbrio do aço (cubo) e ferro fundido (pista) (Nucci, Péricles – 2012).

No diagrama de equilíbrio da Figura 10 acima, é possível verificar as fases presentes em cada um dos materiais de junção, sendo o material do cubo um aço com concentração de carbono ao redor de 0,15% e o material da pista um ferro fundido com carbono entre 3,1 a 3,5% (CMSP, 2015).

O ferro fundido líquido é aquecido até uma temperatura adequada, para que quando vazado ao molde, permaneça em estado líquido até que preencha toda a cavidade. No encontro com a superfície do “rabo de andorinha” inicia-se a troca de temperatura com o material do cubo, aumentando localmente a temperatura até certo nível que propicia o início da fusão. Este cenário vai definir as características da junção a ser analisada em forma de comparação.

Pode-se dividir as regiões de acordo com suas morfologias: Metal base pista (ferro fundido), zona de ligação, zona afetada pelo calor do material do cubo e o metal base do cubo(aço).



Figura 10 – Localização das microestruturas da junção (Nital 5%) (Nucci,Péricles-2002).

Na figura 10, observamos a localização das microestruturas das regiões definidas a seguir:

- 1- Zona fundida (ferro fundido - pista);
- 2- Zona de transição sólido-líquido ou parcialmente fundida;
- 3- Zona de crescimento/engrossamento da microestrutura (cubo);
- 4- Zona de recristalização(cubo);
- 5- Metal base não afetado (cubo).

Esta divisão foi resultado da temperatura alcançada e da taxa de resfriamento em cada uma delas.

A região 1 representa a área a partir da qual se tem o ferro fundido com estrutura de dentritas de perlita (80%) com ferrita (20%).

A região 2 é a zona de transição sólido-líquido ou parcialmente fundida, onde ocorre localmente uma fusão do metal do cubo, que se combina com o metal fundido da pista e a primeira a se solidificar. Existe a formação de uma linha bem definida que separa esta região da número 3. Hipoteticamente esta linha seria o limite da área onde houve a fusão de materiais. A microestrutura desta região apresenta grão volumosos de perlita fina.

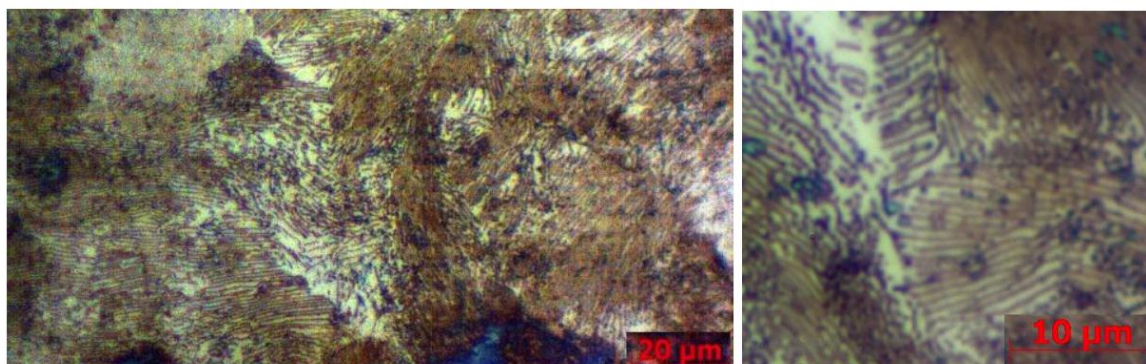


Figura 11 – Detalhe da microestrutura da região 2 da figura 10 – perlita fina (Nital 2%)  
(Nucci,Péricles -2012).

A presença quase exclusiva de perlita fina na região 2 conduz a idéia de que o aço com cerca de 0,15% de carbono, conforme certificado da peça “cubo” foi cementado até certo ponto pelo ferro fundido líquido – a fonte do carbono, que se difundiu no aço até atingir aproximadamente a concentração do eutético (aproximadamente 0,8% de carbono), pois praticamente não há outra fase presente nesta faixa (Colpaert,2008).

Não há formação de estruturas frágeis nesta região, pois a taxa de resfriamento é pequena, propiciando maior tempo de resfriamento para que a austenita se transforme paulatinamente de volta em ferrita.

A região 3 fica adjacente à zona onde houve fusão dos materiais, porém as temperaturas ficam abaixo do ponto de fusão do metal do cubo e em conjunto com a região 4, forma o que se pode batizar de Zona Afetada pelo Calor (ZAC). Nestas duas regiões (3 e 4) é que se processam alterações microestruturais do metal do cubo. As temperaturas excederam à da transformação eutetóide ( $723^{\circ}\text{C}$ ), ocorrendo transformação para austenita com os carbonetos existentes se dissolvendo nesta fase, dependendo da concentração de seus formadores e da temperatura em cada local. (Nucci,Péricles -2012)

No resfriamento de volta, a primeira fase a se precipitar da austenita é a ferrita, ocorrendo comumente nos contornos dos grãos (detalhe na figura 13)

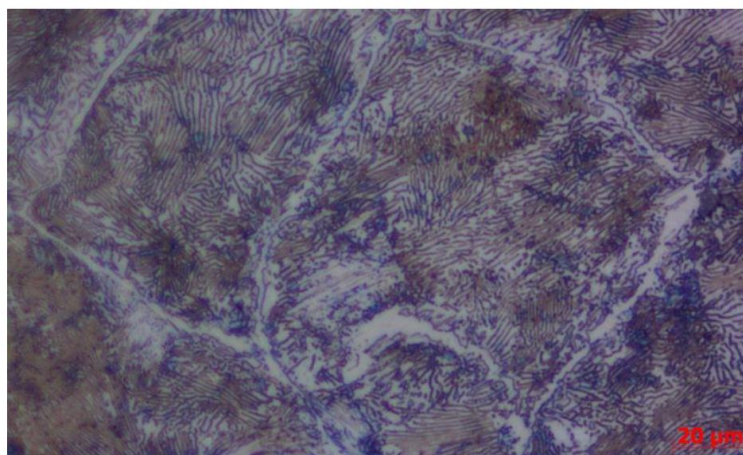


Figura 12- detalhe da região 3 da figura 10- perlita mais grosseira com ferrita no contorno (Nital 5%)  
(Nucci,Péricles – 2012).

A austenita remanescente se transforma em perlita, devido à difusão do carbono proveniente do ferro fundido. No caso da baixa taxa de resfriamento característica deste processo, na região 3, há tendência de haver maior separação entre as lamelas de cementita e ferrita, resultando numa perlita mais grosseira que a da região 2.

Na região 4 ocorre recristalização, aliviando as tensões. Nesta região o carbono proveniente do ferro fundido não chega a se difundir muito e a ferrita começa a ser mais presente, circundando os grãos de perlita, numa fase de transição entre as regiões 3 e 5.

A região 5 é o material base do cubo que permanece com estrutura praticamente inalterada pois não excedeu ou nem chegou a temperaturas da faixa eutetóide, não entrando portanto na ZAC – matriz de ferrita envolvendo as ilhas de perlita alinhadas devido à conformação do cubo, não havendo a chegada do carbono por difusão.

## 11 FORJAMENTO

Processo de conformação no qual se obtém a geometria desejada da peça por aplicação gradativa de pressão ou martelamento em uma peça. Na maioria de suas operações o forjamento é aplicado a quente embora certos metais possam ser forjados a frio. (Batalha, Gilmar Ferreira-2011)

Os forjamentos são aplicados de duas maneiras:

- Por martelos: Os martelos provocam deformação do metal por impacto
- Por prensas: As prensas exercem sobre o metal uma força de compressão em baixa velocidade.

O processo de forjamento subdivide-se em duas categorias: Forjamento livre ou em matriz.

No forjamento livre (Figura 13) o material é deformado em ferramentas planas ou de formato simples. A deformação é aplicada por compressão direta e o material escoar perpendicularmente à direção da força aplicada, caminho este onde há menor atrito. Processo geralmente usado em peças grandes ou em pré-conformação para um forjamento em matriz.

No forjamento em matriz (Figura 13) há a deformação do material sob alta pressão entre duas metades de matrizes, formando uma cavidade fechada. Através deste processo é obtido peças forjadas com tolerâncias dimensionais mais estreitas. Este processo só é justificado quando há uma grande produção, pois as matrizes tem um custo elevado.

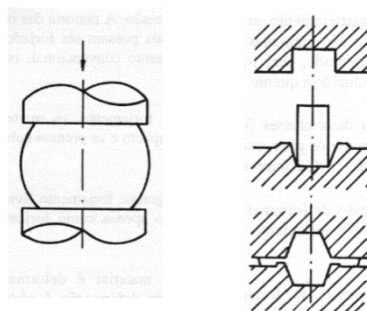


Figura 13 – Representações esquemáticas dos processos de forjamento: livre e em matriz  
(Batalha, Gilmar Ferreira 2011).

No forjamento em matriz utiliza-se um ligeiro excesso de material, de modo que preencha por completo a cavidade da matriz. O excedente do material sai por uma cavidade da matriz chamada “bacia de rebarba”.

Pode-se conseguir através da deformação plástica ocorrida pelo forjamento, dois efeitos: forma desejada e melhoria das propriedades mecânicas do material devido a modificação e distribuição de seus constituinte e refino do grão.

Geralmente as formas iniciais ao forjamento são o metal laminado e o fundido. O metal laminado possui uma estrutura mais homogênea, sendo portanto o mais indicado.

Posteriormente ao forjamento as peças são submetidas a tratamentos térmicos com a finalidade da remoção das tensões internas ocasionadas pelo forjamento, resfriamento do forjado, homogeneização da estrutura da peça, melhoria de sua usinabilidade e propriedades mecânicas.

Geralmente o recozimento e a normalização são os tratamentos térmicos utilizados nos materiais forjados.

O recozimento consiste no aquecimento do aço a uma temperatura de 750 a 900 °C, temperatura esta que depende de seu teor de carbono, seguido de um lento resfriamento.

O recozimento possibilita o refino do grão obtido no forjamento a altas temperaturas, a remoção das tensões internas provocadas pelo trabalho a quente e provoca certo amolecimento. Devido a estas modificações as propriedades mecânicas e usinabilidade são melhoradas.

A normalização também consiste no aquecimento do aço forjado em um forno com resfriamento ao ar livre. Neste processo obtém-se uma estrutura refinada em melhor grau que a obtida pelo recozimento. As propriedades mecânicas também são melhoradas e suas tensões internas são removidas.



## 12 ENSAIOS DE DUREZA

Foram realizados ensaios de dureza em 4 CP's (corpos de prova), ensaios de Dureza Brinell (conforme o especificado) , feitos no durômetro HB( Figura 14) em nosso laboratório na GLG/LGI/CQM -Bloco H- Pátio Jabaquara.

Medidas estas efetuadas subsuperficialmente, ou seja, no núcleo ( a partir de 6 mm abaixo da face de desgaste).

As medidas encontradas foram:

Ensaio de Dureza			
Pista		Cubo	
CP	HB (Dureza Brinell)	CP	HB (Dureza Brinell)
CP1	152	CP1	179
CP2	157	CP2	181
CP3	153	CP3	183
CP4	156	CP4	182

Tabela 7 - Ensaios realizados com Dureza Brinell.



Figura 14 – Durômetro HB.



## 13 ENSAIOS METALGRÁFICOS

### 13.1 PREPARAÇÃO DA AMOSTRA

Devido ao grau de perfeição o lixamento requerido em uma amostra metalográfica idealmente preparada, é essencial que cada etapa da preparação seja executada cautelosamente.

A operação que tem por objetivo eliminar riscos e marcas mais profundas da superfície dando um acabamento a esta superfície, preparando-a para o polimento.

A técnica de lixamento manual consiste em se lixar a amostra sucessivamente com lixas de granulometria cada vez menor, mudando-se de direção (90°) em cada lixa subsequente até desaparecerem os traços da lixa anterior.

A superfície deve estar rigorosamente limpa, isenta de líquidos e graxas que possam provocar reações químicas na superfície.

Após o lixamento há o polimento que visa um acabamento superficial polido isento de marcas, utiliza para este fim abrasivos como pasta de diamante ou alumina.

Antes de realizar o polimento deve-se fazer uma limpeza na superfície da amostra, de modo a deixá-la isenta de traços abrasivos, solventes, poeiras e outros.

A operação de limpeza pode ser feita simplesmente por lavagem com água, porém, aconselha-se usar líquidos de baixo ponto de ebulição (álcool etílico, fréon líquido, etc.) para que a secagem seja rápida.

Após o polimento há o ataque químico (neste caso com Nital 3%), cujo objetivo é permitir a identificação (visualização) dos contornos de grão e as diferentes fases na microestrutura.

O Nital 3% é colocado em contato com a superfície da peça por aproximadamente 10 segundos, causando a corrosão da superfície.

Antes de a amostra sofrer o ataque por imersão, a mesma deve estar perfeitamente limpa e seca, por isso utilizam-se líquidos de baixo ponto de ebulição como o álcool, éter, etc., os quais são posteriormente secados rapidamente através de um jato de ar quente fornecido por uma ventoinha elétrica ou secador.

## 13.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS METALOGRAFICOS

### AMOSTRA 1 – CONSIDERADA BOA

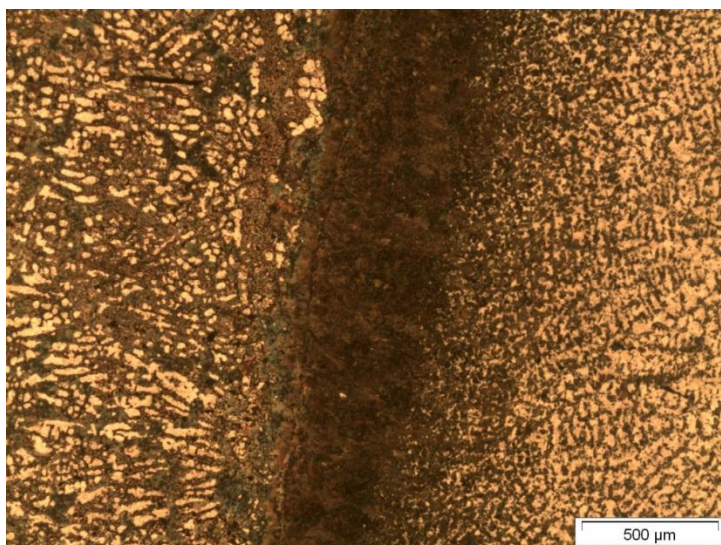


Figura 15 – Micrografia nº 1 – Zona de Transição.

Nota-se na linha de fusão caldeamento completo, não observando descontinuidades na região analisada. À esquerda microestrutura do ferro fundido cinzento composta de matriz ferrítica com regiões de perlita e lamelas de grafita. À direita microestrutura do aço composta de matriz ferrítica com pequenos grãos de perlita. Ataque Nital 3%. Microscopia ótica. Ampliação 50X.

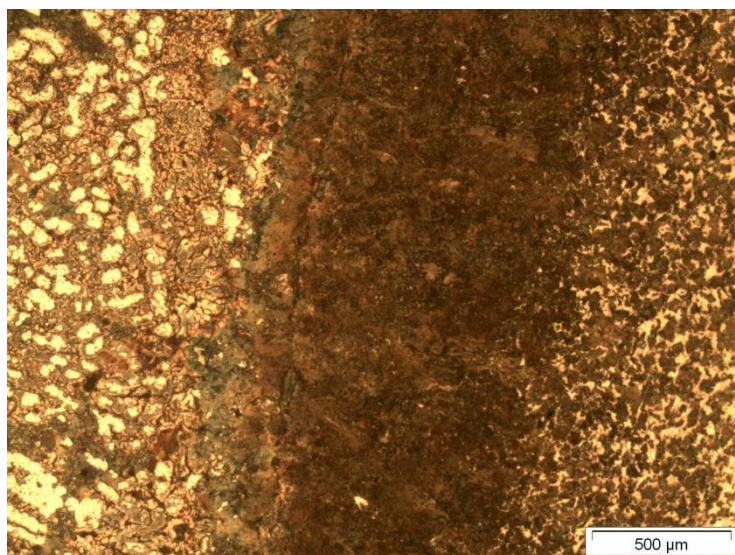


Figura 16 – Micrografia nº 2 – Zona de Transição.

Mesma região da micrografia nº 1. A linha de fusão apresenta caldeamento completo e carbonetação com profundidade de 0,6mm, provavelmente devido à difusão do elemento carbono do ferro fundido cinzento no momento do vazamento e resfriamento da pista. Ataque Nital 3%. Microscopia ótica. Ampliação 100X.

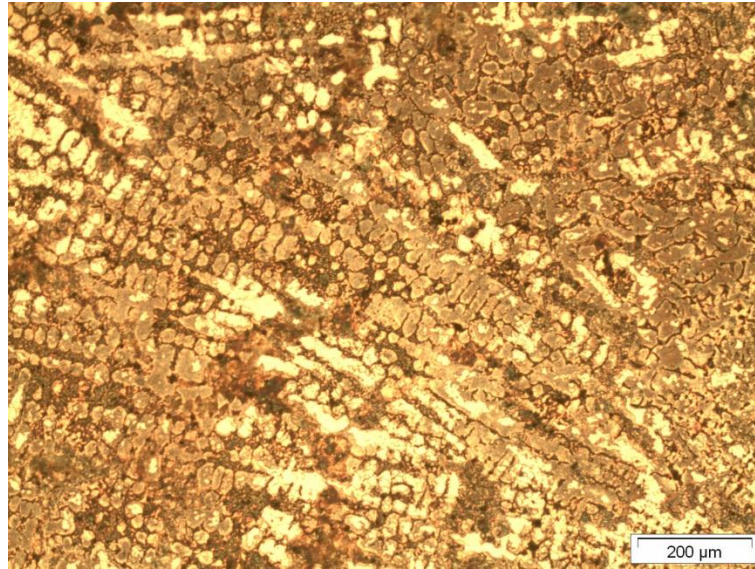


Figura 17 – Micrografia nº 3 – Ferro Fundido (Pista).

Estrutura: Matriz composta de perlita e ferrita, com lamelas de grafita. Apresenta aspecto interdendrítico típico de estrutura bruta de solidificação. Ataque Nital 3%. Microscopia ótica. Ampliação 100X.

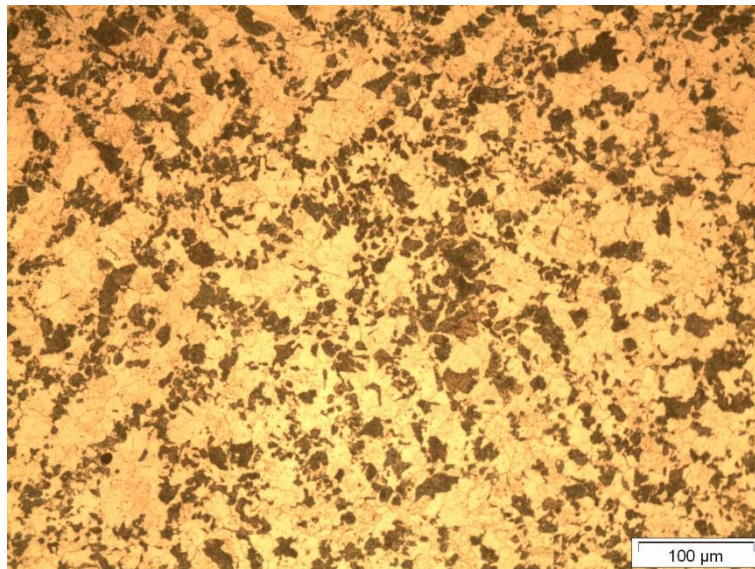


Figura 18 – Micrografia nº 4 – Aço (Cubo).

Estrutura: Matriz ferrítica com grãos de perlita. Ataque Nital 3%. Microscopia ótica. Ampliação 200X.



## AMOSTRA 2 – CONSIDERADA BOA



Figura 19 – Micrografia nº 5 – Zona de Transição.

Nota-se na linha de fusão caldeamento completo, não observando descontinuidades na região analisada. À esquerda microestrutura do ferro fundido cinzento composta de matriz ferrítica com regiões de perlita e lamelas de grafita. À direita microestrutura do aço composta de matriz ferrítica com pequenos grãos de perlita. Ataque Nital 3%. Microscopia ótica. Ampliação 50X.

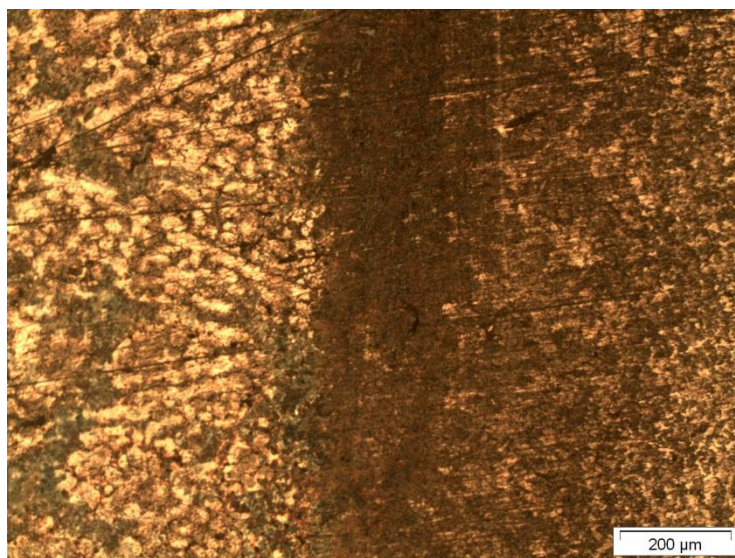


Figura 20– Micrografia nº 6– Zona de Transição.

Mesma região da micrografia nº 5. A linha de fusão apresenta caldeamento completo e carbonetação com profundidade de 0,5mm, provavelmente devido à difusão do elemento carbono do ferro fundido cinzento no momento do vazamento e resfriamento da pista. Ataque Nital 3%. Microscopia ótica. Ampliação 100X.

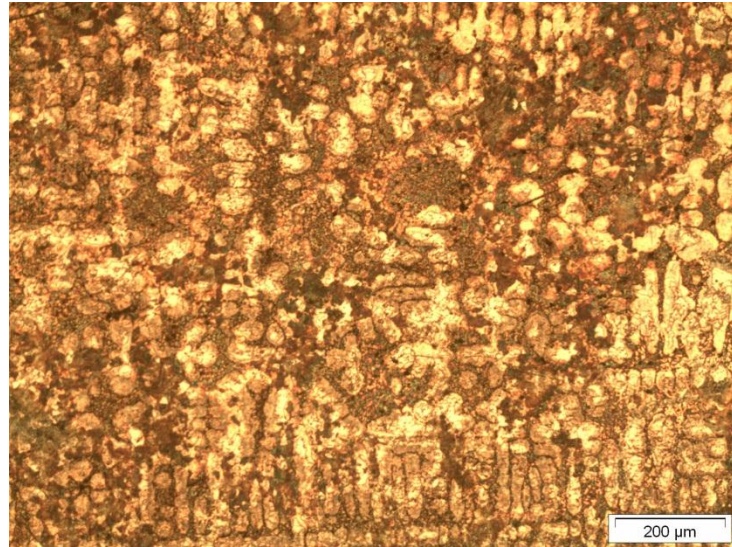


Figura 22– Micrografia nº 7 – Ferro Fundido (Pista).

Estrutura: Matriz composta de perlita e ferrita, com lamelas de grafita. Apresenta aspecto interdendrítico típico de estrutura bruta de solidificação. Ataque Nital 3%. Microscopia ótica. Ampliação 100X.

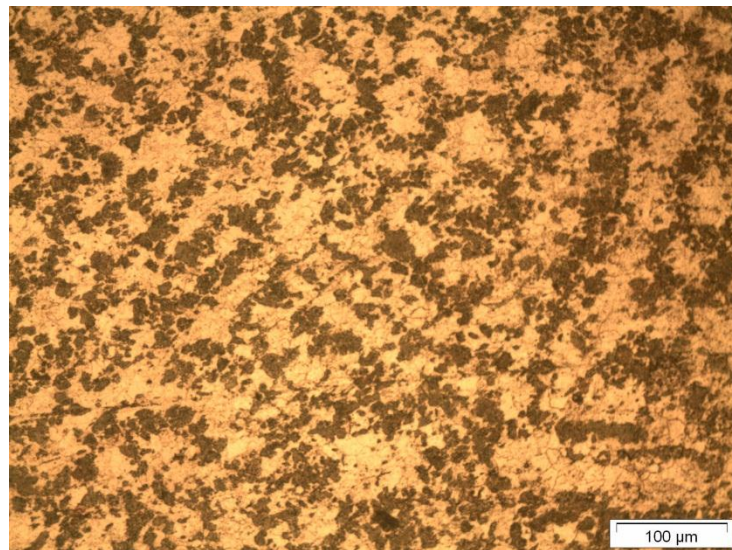


Figura 23 – Micrografia nº 8 – Aço (Cubo).

Estrutura: Matriz ferrítica com grãos de perlita. Ataque Nital 3%. Microscopia ótica. Ampliação 200X.



## AMOSTRA 3 – CONSIDERADA RUIM



Figura 23 – Micrografia nº 9 – Zona de Transição.

Nota-se na linha de fusão caldeamento incompleto, com presença de vazios e óxidos oriundos provavelmente de falta de preparo e sujidades na superfície. À esquerda microestrutura do ferro fundido cinzento composta de matriz ferrítica com regiões de perlita e lamelas de grafita. À direita microestrutura do aço composta de matriz ferrítica com pequenos grãos de perlita. Ataque Nital 3%. Microscopia ótica. Ampliação 50X.

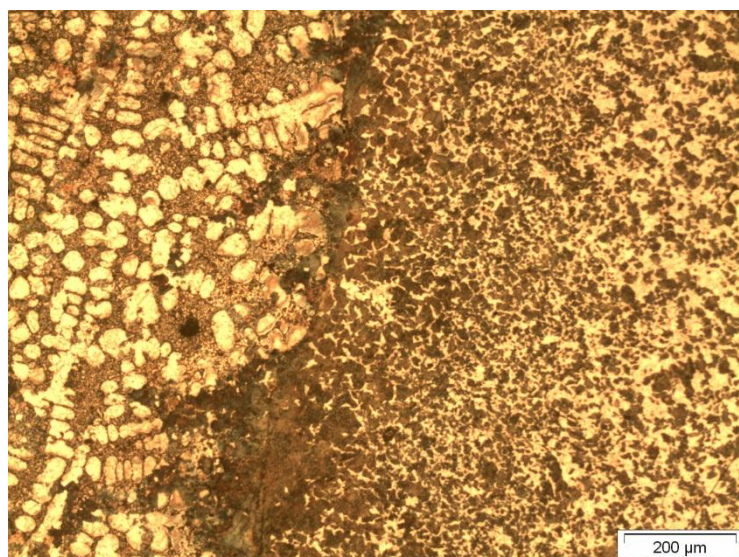


Figura 24 – Micrografia nº 10 – Zona de Transição.

Mesma região da micrografia nº 9. A linha de fusão apresenta vazios e óxidos. Observa-se carbonetação com profundidade de 0,3mm, provavelmente devido à difusão do elemento carbono do ferro fundido cinzento no momento do vazamento e resfriamento da pista. Ataque Nital 3%. Microscopia ótica. Ampliação 100X.

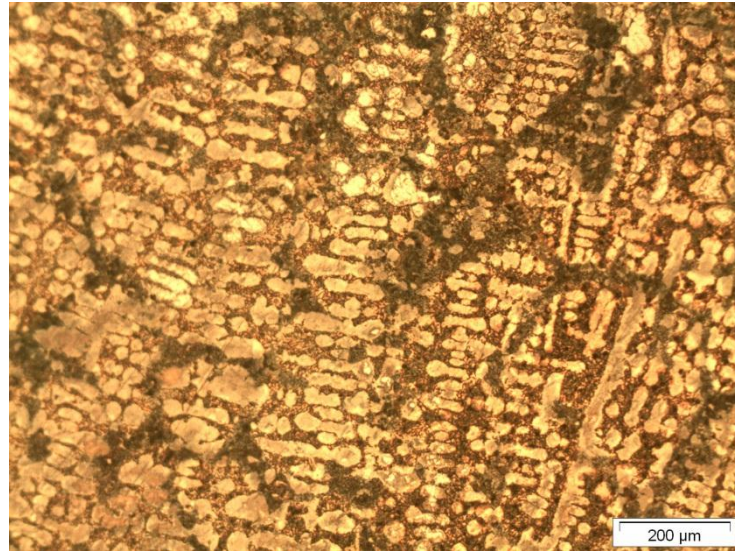


Figura 25 – Micrografia nº 11 – Ferro Fundido (Pista).

Estrutura: Matriz composta de perlita e ferrita, com lamelas de grafita. Apresenta aspecto interdendrítico típico de estrutura bruta de solidificação. Ataque Nital 3%. Microscopia ótica. Ampliação 100X.

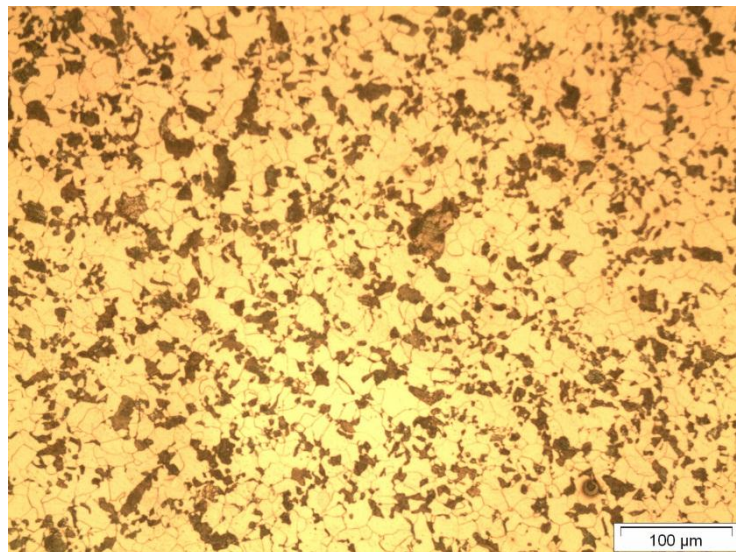


Figura 26 – Micrografia nº 12 – Aço (Cubo).

Estrutura: Matriz ferrítica com grãos de perlita. Ataque Nital 3%. Microscopia ótica. Ampliação 200X.



## AMOSTRA 4 – CONSIDERADA RUIM

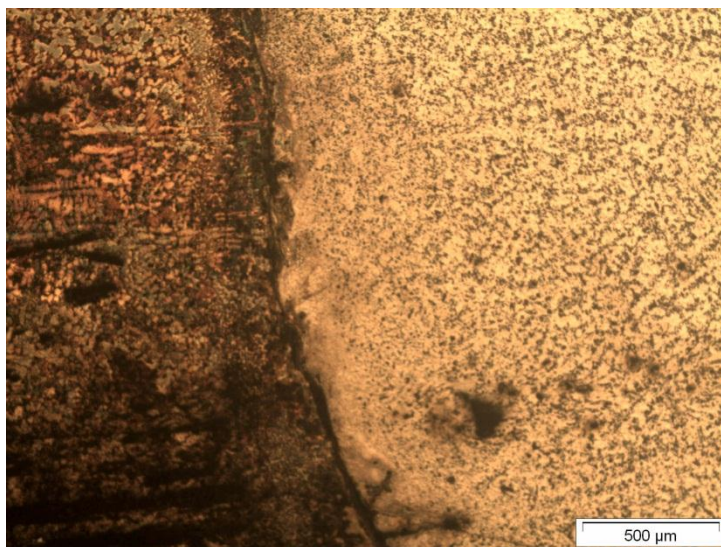


Figura 27 – Micrografia nº 13 – Zona de Transição.

Nota-se na linha de fusão caldeamento incompleto, com presença de vazios, regiões sem caldeamento e óxidos oriundos provavelmente de falta de preparo e sujidades na superfície. À esquerda microestrutura do ferro fundido cinzento composta de matriz ferrítica com regiões de perlita e lamelas de grafita. À direita microestrutura do aço composta de matriz ferrítica com pequenos grãos de perlita. Ataque Nital 3%. Microscopia ótica. Ampliação 50X.

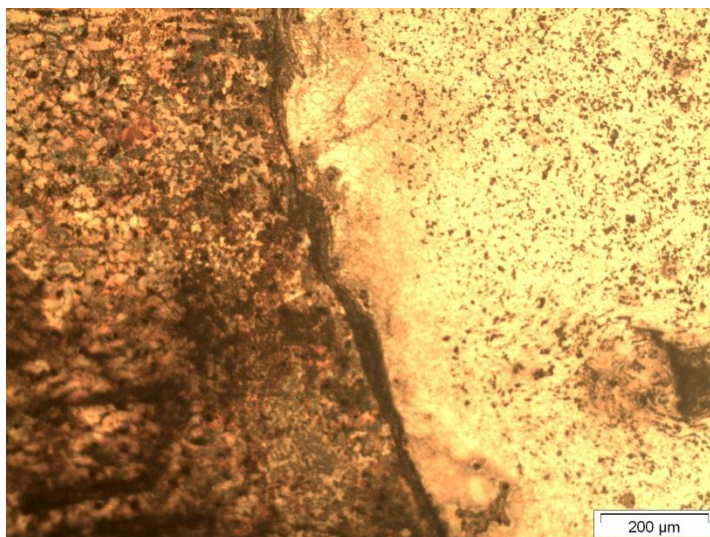


Figura 28 – Micrografia nº 14 – Zona de Transição.

Mesma região da micrografia nº 13. A linha de fusão apresenta vazios, falta de caldeamento e óxidos. Ataque Nital 3%. Microscopia ótica. Ampliação 100X.



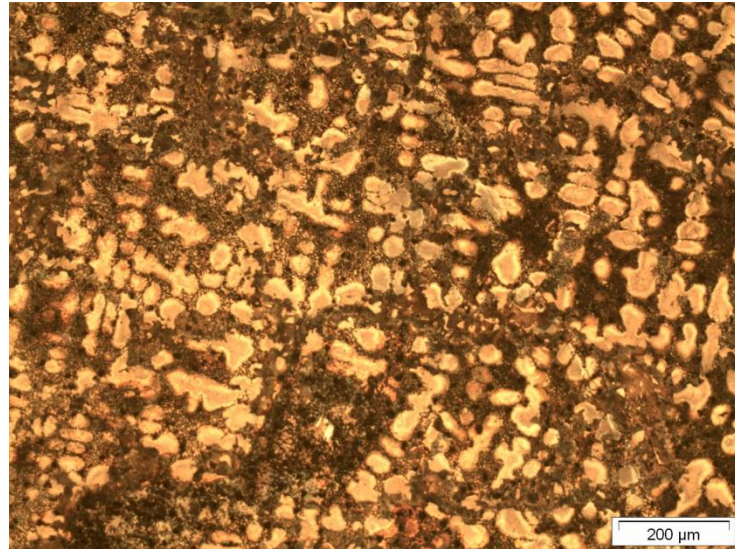


Figura 29 – Micrografia nº 15 – Ferro Fundido (Pista).

Estrutura: Matriz composta de perlita e ferrita, com lamelas de grafita. Apresenta aspecto interdendrítico típico de estrutura bruta de solidificação. Ataque Nital 3%. Microscopia ótica. Ampliação 100X.

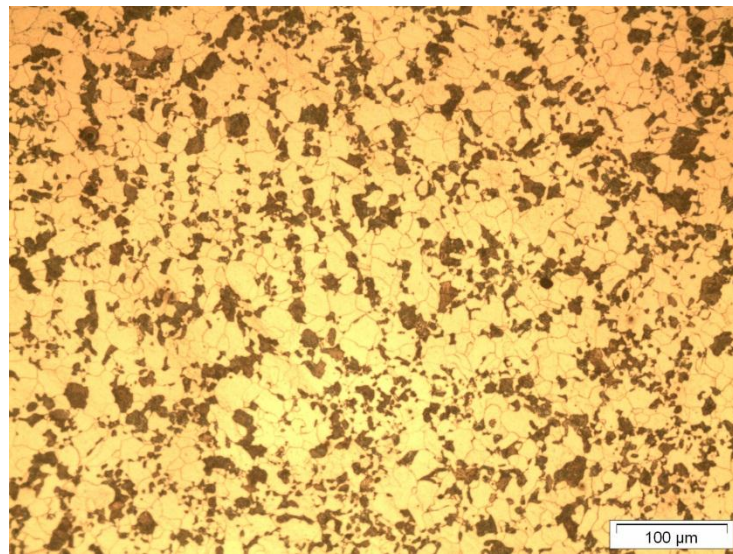


Figura 30 – Micrografia nº 16 – Aço (Cubo).

Estrutura: Matriz ferrítica com grãos de perlita. Ataque Nital 3%. Microscopia ótica. Ampliação 200X.

## 14 CONCLUSÃO

Conclui-se pelo ensaio metalográfico e pelo de ensaio de dureza que tanto os materiais rejeitados quanto os materiais aprovados estão com qualidade (dureza e estrutura) de acordo com a especificação.

Pela micrografia conclui-se que a qualidade é melhor alcançada com um melhor controle e acompanhamento do processo.

Houve algumas NC's (não conformidades) durante o caldeamento, entre elas: falta de fusão, caracterizando necessidade de um melhor acompanhamento durante esta etapa, assim como justificando uma análise complementar, como no caso, o ensaio de LP (Líquido Penetrante).

Peças com defeitos no caldeamento apresentaram menos de 70% do perímetro total caldeado, confirmando a necessidade do ensaio de LP.

A distribuição Weibull tem uma base teórica forte e pode ser de grande valor nos ensaios, por causa das limitações de quantidades e tamanhos de amostra de teste e pela utilização de configurações de testes diferentes.

Materiais frágeis são suscetíveis a falha. Falha esta difícil de prever, pois tal fratura raramente é precedida de aviso.

## 15 REFERÊNCIAS

COLPAERT, H. **Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns**. São Paulo: Edgard Blucher, 2008. 652 p.

CMSP. Especificação Técnica de Material EM-9.86.01.33/730-001 Rev.B - **Disco de Freio dos Metrocarros : critérios para Homologação e Fornecimentos** . São Paulo, 2015.31p.

CHIAVERINI, V. **Tecnologia Mecânica - Processos de Fabricação e Tratamento** – Vol. 2, 2º Edição. São Paulo: Editora McGraw-Hill, 1986.315p.

CMSP. Instrução Complementar IC-9.86.01.33/730-001 Rev 0 - **Discos de Freio dos Metrocarros :Diretivas para Projeto e Fabricação**. São Paulo, 2015.

XAVIER, MARCOS,;SILVA, MARCELO. **Metalurgia1**, Versão V.01, Senai. São Paulo, 2003

ARAÚJO, LUIZ ANTONO DE. **Manual de Siderurgia**, Volume 1. São Paulo. Editora Arte & Ciência, 1997.

BRANDÃO, SERGIO MATEUS. **Construção de um dinamômetro para analisar o desempenho de ferros fundidos cinzentos utilizados em sistema de frenagem de veículos leves**. 2014. 102p.

GIRAULT, E; JACQUES, P.; HARLET, P.; MOIS, K.; HUMBEECK, J.V.; AEMOULDT, E.; DELANNAY, F. **Metallographic methods for revealing the multiphase microstructure of Tripe – assisted steels**. *Materials Characterization*, v. 40, 1998.

ROWLEY, MERVIN T. **international atlas of casting defects**. Des Plaines: AFS, 1993.

KARSAY, STEPHEN ISTAN. **The practical foundryman's guide to feeding and running grey – CG and SG iron castings**. Transvaal: Ferrous Casting Centre, 1985.153p.

CHIAVERINI, V. **Tecnologia Mecânica - Processos de Fabricação e Tratamento** – Vol. 2, 2º Edição. São Paulo: Editora McGraw-Hill, 1986.

SILVA, CARLOS ROBERTO DIAS da; LIMA, ELIAS LOPES; SEIDEL, CARLOS ELVESER; NOGUEIRA, INGÁCIA M. S. **Projetos de Fundição**, 1984.75p.

MARIOTTO, CLAUDIO LUIZ; FUOCO, RICARDO; ALBERTIN, EDUARDO. **Sistemas de enchimento e alimentação de peças fundidas**. São Paulo: ABM, 1987.134p.

Senai – **Curso Técnico em Metalurgia – Metalurgia 1**. São Paulo.2006. 197p.

ROHDE, REGIS ALMIR. **Metalografia Preparação de Amostras**, 2010. 30p.

<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAAeQwAE/apostila-metalografia-dos-tratamentos-termicos>. Acessado em março de 2016.

[http://www.fatecpompeia.edu.br/arquivos/arquivos/roteiro\\_5\\_-\\_ensaio\\_de\\_dureza\\_rockwell.pdf](http://www.fatecpompeia.edu.br/arquivos/arquivos/roteiro_5_-_ensaio_de_dureza_rockwell.pdf) . Acessado em março de 2016.

<https://jorgeteofilo.files.wordpress.com/2010/08/epm-apostila-capitulo09-ensaios-mod1.pdf> . Acessado em março de 2016.

[http://www.abende.org.br/info\\_end\\_oquesao.php](http://www.abende.org.br/info_end_oquesao.php)>. Acessado em maio 2012.

## 16 GLOSSÁRIO

**Grafita-** Forma alotrópica do Carbono, fase sólida do diagrama de equilíbrio Fe-C, estável abaixo de 1148 °C, principalmente na presença de elementos de liga (Silício por exemplo), constituída de carbono em vários formatos (lamelas, glóbulos, flocos, veios, etc.), frágil.

**Perlita-** Constituinte formado da mistura lamelar de ferrita mais cementita, resultante do resfriamento lento (em equilíbrio), com difusão do Carbono. Propriedades mecânicas intermediárias entre ferrita e cementita.

**Ferrita-** Fase sólida do diagrama de equilíbrio Fe-C, estável na temperatura ambiente formada no resfriamento da austenita, com baixíssima solubilidade de carbono (0,002 % max), estrutura Cúbica de Corpo Centrado. Macio dúctil. Ferromagnético até 768° C.

**Steadita-** Constituinte de natureza eutética, compreendendo partículas de fosfeto de ferro e carboneto de ferro, com baixo ponto de fusão. Ocorre em áreas interdendríticas formando uma segregação, pois são as áreas que solidificam por último. Esta ocorre quando a quantidade de fósforo presente é superior a 0,15%.

**Ledeborita-** Constituinte formado de pequenos glóbulos de perlita sobre um fundo de cementita, apresentando elevada dureza.

**Cementita-** Carboneto de Ferro ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) com concentração 6,67% de carbono, com estrutura ortorrômbica. Dura e frágil. Fase metaestável, que na ausência de elementos de liga (Cromo por exemplo), pode dissociar em ferrita e grafita.

**Dendritas-** Formações ocorridas na solidificação dos aços e ferros fundidos com ramificações secundárias até terciárias dos grãos colunares.

**Eutética-** Mistura eutética se comportam como se fossem substâncias puras no processo de fusão e são facilmente fundidas.

**Austenita –** Solução sólida de Carbono em ferro gama, estável acima de 723°C, com teor de Carbono de até 2%, estrutura Cúbica de Face Centrada, amagnética.

**Blank-** Peça inacabada de metal que foi forjada a partir de um grande pedaço de material. O blank requer modelação posterior por ferramentas ou máquinas para ser transformado em diversos objetos, como serras, chaves, placas ou peças de automóveis.

**Forjamento-** Processo de conformação plástica através do qual se obtém a forma desejada da peça ou objeto por martelamento ou aplicação gradativa de uma pressão.

**Carbonetação-** Introdução de carbono na superfície do aço de modo que quando depois de temperado tenha uma superfície mais dura.

**Ductibilidade-** É a capacidade que alguns materiais possuem antes da ruptura, quando sujeitos a tensões muito elevadas. Quanto mais dúctil o aço, maior é a redução da área ou alongamento antes da ruptura. A ductilidade pode ser medida a partir da deformação ou estrição.

**Carepas-** Película de óxido de ferro que se forma na superfície do aço laminado a quente.

**Tenacidade-** Característica correspondente à capacidade do material de absorver energia até sua ruptura

**Dessulfurante-** Processo de remoção de enxofre a partir de algum dispositivo para evitar a contaminação.