

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

RUI GUSTAVO LIPPERT SCHWANKE

**FERRO FUNDIDO NODULAR COMO ALTERNATIVA PARA O AÇO FUNDIDO
AAR M-201, UTILIZADO EM TRUQUES FERROVIÁRIOS DE CARGA**

CAXIAS DO SUL

2013

RUI GUSTAVO LIPPERT SCHWANKE

**FERRO FUNDIDO NODULAR COMO ALTERNATIVA PARA O AÇO FUNDIDO
AAR M-201, UTILIZADO EM TRUQUES FERROVIÁRIOS DE CARGA**

Relatório final da disciplina de Estágio II, MEC 0258, apresentado como requisito parcial à conclusão do curso de Engenharia Mecânica, na Universidade de Caxias do Sul.

Supervisor Prof. Dr. Eng. Civil Alexandre Viecelli
Orientador Eng. Afonso Brambilla

CAXIAS DO SUL

2013

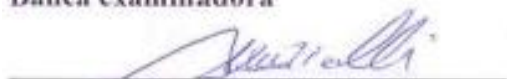
RUI GUSTAVO LIPPERT SCHWANKE

**FERRO FUNDIDO NODULAR COMO ALTERNATIVA PARA O AÇO FUNDIDO
AAR M-201, UTILIZADO EM TRUQUES FERROVIÁRIOS DE CARGA**

Relatório de Estágio II, apresentado como
requisito parcial à conclusão do curso de
Engenharia Mecânica, na Universidade de
Caxias do Sul.
Supervisor: Prof. Alexandre Viecelli
Dr. Eng. Civil

Aprovado em 18 de novembro de 2013

Banca examinadora



Prof. Dr. Alexandre Viecelli
Universidade de Caxias do Sul – UCS



Prof. Dr. Maria Cristina Moré Farias
Universidade de Caxias do Sul – UCS



Prof. PhD. Frank Patrick Missell
Universidade de Caxias do Sul - UCS

Dedico este trabalho aos meus pais e à minha irmã por estarem sempre ao meu lado, mesmo nos momentos mais difíceis.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus e minha família por todo apoio, confiança dedicada a mim e principalmente por serem os responsáveis pela formação de meu caráter;

ao Eng^o Afonso Luis Brambilla pela confiança e ajuda na definição e realização deste trabalho;

ao Prof. Alexandre Viecelli pelo auxílio, orientação e principalmente pelas palavras de tranquilidade nos momentos conturbados;

ao Prof. Frank P. Missell e colegas pelo período de parceria e aprendizagem obtido no Laboratório de Caracterização Magnética, ao qual possibilitou conhecimento para a concretização do trabalho;

aos colegas da Engenharia Ferroviária, Engenharia de Furgões e Siders e Campo de Provas das Empresas Randon pela compreensão e ensinamentos perante ao ambiente fabril.

RESUMO

Este trabalho buscou correlacionar, por meio de diversos ensaios mecânicos e análise de elementos finitos, o aço fundido AAR M-201 grau b+ com uma classe de ferro fundido nodular, para aplicação na travessa central de truques ferroviários de carga, pela empresa Randon Implementos S/A. Inicialmente, realizaram-se ensaios de dureza, resistência à tração, impacto Charpy, resistência à fadiga por flexão rotativa e por fim, análise de elementos finitos. De acordo com os resultados obtidos com os diversos ensaios para o aço, uma criteriosa seleção de possíveis ferros fundidos nodulares foi estabelecida, elencando o material ASTM 80-55-06 como possível substituto. A análise de elementos finitos, assim como os diversos ensaios mecânicos antes realizados para o aço, foram novamente executados para o ferro fundido ASTM 80-55-06. O ferro fundido nodular apresentou dureza e limite de escoamento superior ao aço fundido. Além disso, percebeu-se uma menor ductilidade e tenacidade do ferro fundido nodular, sendo a baixa tenacidade um fator negativo, podendo ser minimizada mediante adição de elementos de liga e alteração do processo de fabricação. Imagina-se que a ductilidade não seja um fator crucial para escolha do material, já que o componente não atingirá a deformação plástica quando em trabalho. A resistência à fadiga para vida infinita apresentou aumento considerável, sendo para o aço, o valor de 150 MPa e o valor de 237 MPa para o ASTM 80-55-06. As análises de elementos finitos obtiveram valores exigidos pela norma (AAR), não apresentando grandes divergências em ambos componentes.

Palavras – chave: Aço fundido AAR M-201 grau b+, ferro fundido nodular ASTM 80-55-06, travessa central do truque ferroviário de carga, ensaios mecânicos, análise de elementos finitos.

ABSTRACT

This thesis aimed to correlate through mechanical testing and finite element analysis, the cast steel AAR M- 201 grade b with a class of ductile iron, in order to use in the middle beam of Randon's freight railway bogies. First, cast steel was tested for hardness, tension strength, Charpy pendulum impact and rotating beam fatigue and then it was done the finite element analysis. According to the results, considering available classes of nodular cast iron, ASTM 80-55-06 was listed as a possible replacement. The finite element analysis, as well as the same mechanical testing conducted to the steel, were also performed to ASTM 80-55-06 ductile iron. Nodular cast iron showed hardness and yield strength greater than cast steel. Furthermore, lower ductility and toughness were found in nodular cast iron. Low toughness is a negative factor and can be minimized by the addition of alloying elements and improvements in manufacturing process. Ductility is not a limiting factor for the choice of material, since the component will not reach the plastic deformation when working, but is indicative of the toughness. Endurance limit showed considerable raise: 150 MPa for steel and 237 MPa for ASTM 80-55-06. From the analysis by finite element method were obtained the values required by the standard AAR, showing no major differences between components.

Keywords: AAR M-201 Grade B+ Cast Steel, ASTM 80-55-06 Nodular Cast Iron, freight railway bogies frame, mechanical tests, finite element analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema de truque de vagão de carga	14
Figura 2 - Matriz com microestrutura de ferrita e perlita	18
Figura 3 – Cristais dendríticos	21
Figura 4 - Faixa de Normalização	22
Figura 5 - Classes de ferros fundidos	23
Figura 6 - Tipos de ferros fundidos nodulares.....	24
Figura 7 - Estágio de propagação das trincas	27
Figura 8 - Curva <i>S-N</i> para aços	28
Figura 9 - Estrutura da malha	29
Figura 10 - Graus de liberdade. a) de um ponto; b) de um corpo rígido.	30
Figura 11 - Corpo de prova para o ensaio de tração.....	34
Figura 12 - Fluxograma para o ensaio de fadiga	35
Figura 13 - Corpo de prova utilizado para o ensaio de fadiga	35
Figura 14 - Máquina de fadiga.....	36
Figura 15 - Corpo de prova utilizado para o ensaio de impacto	38
Figura 16 - Modelo utilizado da travessa central.....	39
Figura 17 - Malha utilizada	40
Figura 18 - Apoios utilizados	40
Figura 19 - Cargas de estudo para tensão	41
Figura 20 - Carga para estudo da deflexão	42
Figura 21 - Estrutura da matriz do aço.....	45
Figura 22 - Curva <i>S-N</i> para o aço.....	47
Figura 23 - Curva <i>Up-And-Down</i> do aço fundido AAR M-201 grau b+.....	48
Figura 24 - Análise da carga isolada.....	49
Figura 25 - Análise de carga combinada	49
Figura 26 - Deflexão máxima.....	50
Figura 27 - Estrutura da matriz do ferro fundido.....	51
Figura 28 - Curva <i>S-N</i> para o ferro fundido ASTM 80-55-06	54
Figura 29 - Curva <i>Up-And-Down</i> do ferro fundido ASTM 80-55-06	55
Figura 30 - Análise da carga isolada para o ferro fundido nodular	56
Figura 31 - Análise de carga combinada para o ferro fundido nodular.....	57

Figura 32 - Deflexão máxima para o ferro fundido nodular.....	57
Figura 33 - Gráfico <i>S-N</i> para o aço AAR M-201 x ASTM 80-55-06	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química do aço AAR M-201 grau B+	33
Tabela 2 - Propriedades mecânicas mínimas para o aço AAR M-201 grau B+	33
Tabela 3 - Cargas aplicadas para análise de carregamento.....	42
Tabela 4 - Cargas aplicadas para análise da deflexão.....	42
Tabela 5 - Composição química do aço	44
Tabela 6 - Resultados do ensaio de dureza do aço	45
Tabela 7 - Resultados do ensaio de tração para o aço	46
Tabela 8 - Resultados ensaio Charpy para o aço	46
Tabela 9 - Resultados das amostras utilizadas no método <i>Up-and-Down</i> para o aço AAR M- 201 grau b+.....	48
Tabela 10 - Composição química do ferro fundido nodular.....	51
Tabela 11 - Resultado do ensaio de dureza para o ferro fundido	52
Tabela 12 - Resultados do ensaio de tração para o ferro fundido	52
Tabela 13 - Resultados ensaio Charpy para o material ASTM 80-55-06.....	53
Tabela 14 - Resultados das amostras utilizadas no método Up-and-Down para o ferro fundido ASTM 80-55-06	55

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Aços para Fundição	19
Quadro 2 - Classificação do Ferro Fundido Nodular segundo ASTM.....	26
Quadro 3 - Família de elementos	30

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	JUSTIFICATIVA	15
1.2	OBJETIVO GERAL	16
1.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
1.4	AMBIENTE DE TRABALHO	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1	AÇOS	18
2.2	PROCESSO DE FUNDIÇÃO	19
2.2.1	Defeitos de Fundição	20
2.3	TRATAMENTOS TÉRMICOS DOS AÇOS FUNDIDOS	21
2.3.1	Normalização	22
2.4	FERROS FUNDIDOS	23
2.4.1	Ferros fundidos Nodulares	24
2.5	TRATAMENTOS TÉRMICOS DOS FERROS FUNDIDOS NODULARES	25
2.6	FADIGA DOS MATERIAIS	27
2.7	ANÁLISE DE ELEMENTOS FINITOS	29
3	MATERIAIS E MÉTODOS	32
3.1	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	32
3.2	MATERIAL AAR M-201 GRAU B+	33
3.4	ENSAIO DE DUREZA BRINELL	34
3.5	ENSAIO DE TRAÇÃO	34
3.6	ENSAIO DE FADIGA	35
3.7	ENSAIO DE IMPACTO	38
3.8	ANÁLISE DE ELEMENTOS FINITOS	39
3.8.1	Carregamento Aplicado	41
3.8.2	Análise de deflexão	42
4	RESULTADOS	44
4.1	RESULTADOS DOS ENSAIOS PARA O AÇO FUNDIDO	44
4.1.2	Ensaio de dureza	45
4.1.3	Ensaio de tração	45
4.1.4	Ensaio de impacto	46
4.1.5	Ensaio de fadiga	47

4.1.6	Análise da tensão máxima utilizando elementos finitos	48
4.1.7	Análise da deflexão máxima utilizando elementos finitos	50
4.2	SELEÇÃO DO FERRO FUNDIDO NODULAR	50
4.3	RESULTADOS DOS ENSAIOS PARA O FERRO FUNDIDO ASTM 80-55-06	51
4.3.1	Microscopia óptica.....	51
4.3.2	Ensaio de dureza.....	52
4.3.3	Ensaio de tração	52
4.3.4	Ensaio de impacto.....	53
4.3.5	Ensaio de fadiga.....	54
4.3.6	Análise da tensão máxima utilizando elementos finitos	56
4.1.7	Análise da deflexão máxima utilizando elementos finitos	57
5	ANÁLISE COMPARATIVA	58
	CONCLUSÕES	60
	BIBLIOGRAFIA	62
	APÊNDICE A – FLUXOGRAMA DE TRABALHO	65
	APÊNDICE B – ENSAIO DE TRAÇÃO PARA O MATERIAL AAR M – 201 ...	66
	APÊNDICE C – ENSAIO DE TRAÇÃO PARA O MATERIAL 80-55-06	67
	APÊNDICE D – ENSAIO DE DUREZA PARA O MATERIAL AAR M – 201....	68
	APÊNDICE E – ENSAIO DE DUREZA PARA O MATERIAL 80-55-06.....	69
	APÊNDICE F – ENSAIO DE IMPACTO MATERIAL AAR M-201.....	70
	APÊNDICE G - ENSAIO DE IMPACTO MATERIAL ASTM 80-55-06	71
	APÊNDICE H – ANÁLISE DE COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO MATERIAL AAR M-201.....	74
	APÊNDICE I – ANÁLISE DE CUSTO	75

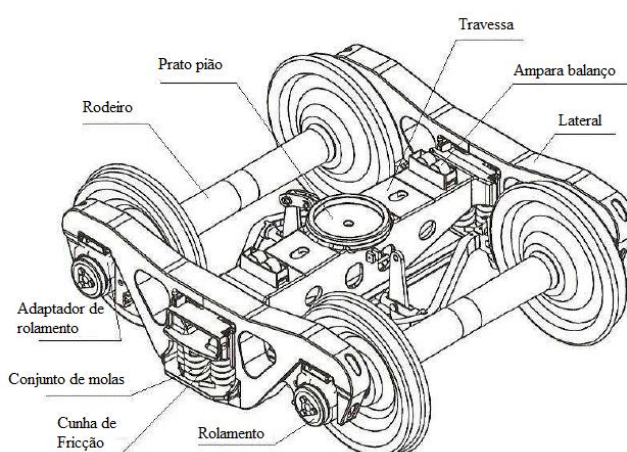
1 INTRODUÇÃO

Sabe-se que, atualmente, uma grande maioria de bens são conduzidos através do transporte rodoviário, liderando investimentos no território nacional (BNDES, 2013). A elevada circulação na malha rodoviária pode acarretar certas adversidades principalmente quando se refere à segurança das estradas brasileiras, à necessidade de agilidade e rapidez nas entregas, bem como à exigência, por parte dos empreendimentos, de transportar a maior quantidade de produto possível (SILVA, 2012). Em nosso país, a infraestrutura modal é, e continuará sendo, o fator decisivo para nosso crescimento e dentre eles destaca-se a ferroviária, possuindo a maior perspectiva de ampliação entre todos os sistemas modais (MRF, 2012).

As indústrias estão em crescente busca de novas tecnologias, objetivando a redução de custos por meio do desenvolvimento de equipamentos e projetos (SILVA et al, 2011).

Com a crescente perspectiva de mercado e expectativa de novas áreas de atuação, a Randon S/A Implementos e Participações, obteve o modelo de utilidade 8400557-2, referente à alteração no material de fundição da travessa central do truque utilizado em vagões ferroviários de carga (Figura 1).

Figura 1 – Esquema de truque de vagão de carga



Fonte: RANDON (2005).

O truque é uma estrutura de treliças e sua função primordial é a sustentação do vagão, transferindo seu peso para o conjunto de rodas (TURNQUIST et al, 2006) de forma uniforme e estável. As rodas são conectadas pelo rodeiro e este fixado nas laterais por meio de

rolamento e adaptador de rolamento (VIGANICO, 2010). A conexão entre as laterais e a travessa central se dá através da cunha de fricção e molas. A travessa central trabalha de forma independente das laterais e é presa ao vagão por meio do prato do pião e dos amparabalanço (RANDON, 2005).

Atualmente, a travessa central é constituída de aço fundido AAR M-201 grau b+, onde, segundo a *Association of American Railroads* (AAR), deve sofrer tratamento térmico de normalização. Este material apresenta média concentração de carbono (0,32%), além de componentes em maiores proporções como o manganês (0,9%) e silício (1,5%), entre outros elementos provenientes do processo de fabricação.

Sabe-se que o aço AAR M-201 apresenta boas propriedades mecânicas como, resistência, elevado alongamento e excelente resistência ao choque (HEMANTH, 2010). No entanto, este material, nestas condições, possui um alto custo de fabricação, possibilitando sua substituição para um componente constituído de ferro fundido nodular (RANDON, 2005).

Durante os próximos 20 anos, a taxa de componentes fabricados deste material (ferro fundido nodular) deverá crescer. Esta ascendência justifica-se pela sua combinação favorável de propriedades mecânicas (FERRO, et al, 2012) como ductilidade, tenacidade e resistência mecânica, onde o limite de escoamento pode ser superior a certos aços-carbono comuns (CHIAVERINI, 2005).

1.1 JUSTIFICATIVA

A patente requerida pela Randon S/A Implementos e Participações, refere-se à substituição do material utilizado na travessa central do truque ferroviário por ferro fundido nodular, com ou sem tratamento térmico.

Há diversas classes de ferros fundidos nodulares, com diferentes matrizes e propriedades mecânicas variadas, no entanto, não se sabe, preliminarmente, qual será o mais adequado para a aplicação.

Portanto, este trabalho se detém na caracterização do material hoje utilizado na travessa, e a partir dos dados obtido pelo mesmo, propor um ferro fundido nodular com matriz característica que possibilite a substituição do aço atualmente utilizado, para o ferro fundido sugerido.

1.2 OBJETIVO GERAL

Estudar as propriedades mecânicas do aço fundido AAR M-201 grau b+, utilizado na travessa central de truques de vagões ferroviários de carga. Avaliar a substituição deste material por um ferro fundido nodular capaz de desempenhar a mesma função.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✓ Selecionar um ferro fundido nodular com uma matriz característica que possibilite a substituição na travessa central do truque ferroviário de carga.
- ✓ Obter as características dos materiais, por meio de ensaios de dureza, tração, impacto e fadiga de flexão rotativa, primeiramente para o aço fundido AAR M-201 grau b+ e, depois de selecionado, para o ferro fundido nodular.
- ✓ Utilizar o método de elementos finitos para encontrar as tensões críticas na travessa, assim como a avaliação da estrutura por meio dos critérios prescritos em norma, promovendo uma correlação entre ambos os materiais.
- ✓ Abdicar ou ratificar a patente requerida pela Randon S/A Implementos e Participações, com base nos dados obtidos.

1.4 AMBIENTE DE TRABALHO

A empresa Randon S/A é a maior fabricante de reboques e semirreboques da América Latina, contendo uma ampla gama de produtos nesta área (RANDON, 2013). Outro campo em que se destaca fica a cargo do segmento ferroviário. A corporação fabrica diversos tipos de vagões ferroviários de carga desde o ano de 2003, entre eles destacam-se, *hopper*, *gôndola*, carga geral e plataforma.

O setor de Negócio Ferroviário da empresa é composto de diversos funcionários, capacitados e habilitados a alterar e desenvolver projetos, totalizando mais de 430 empregados diretos, sendo uma fonte de renda para o município de Caxias do Sul e destaque em âmbito nacional.

Este trabalho será realizado mediante o auxílio da Universidade de Caxias do Sul, por meio de seus laboratórios e equipamentos. Esta entidade, além de ser uma instituição de ensino superior, contribui também com pesquisas e inovações, impulsionando a região no cenário científico e tecnológico.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

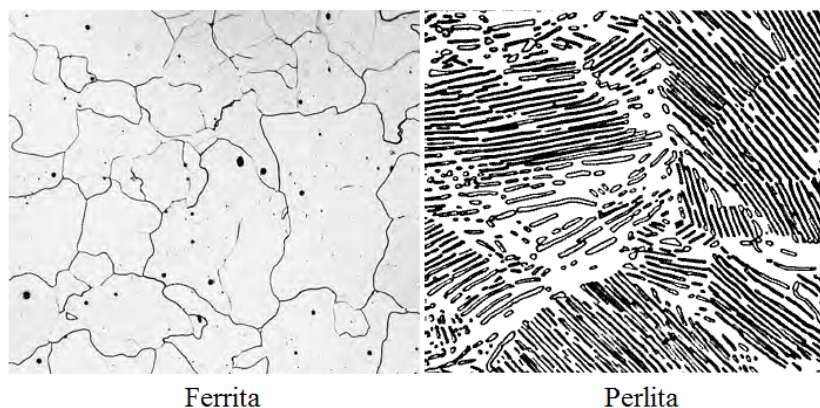
2.1 AÇOS

Aços, um dos materiais mais utilizadas na indústria (BRADESHIA, 2006), contém uma faixa específica de carbono em sua composição, entre 0,008 até aproximadamente 2,11%, ferro, além de outros elementos em pequenas quantidades como manganês, silício, fósforo, enxofre e alumínio, provenientes do processo de fabricação (CHIAVERINI, 2005).

Os aços são divididos em três classes: aços de baixo teor de carbono, quantidade inferior a 0,2%, aços de médio teor de carbono, abrangendo valores entre 0,2 e 0,5%, e alto teor, com a quantidade de carbono sendo superior a 0,5% (CALLISTER, 2012).

O comportamento mecânico de um determinado material é influenciado pela microestrutura presente em sua matriz (CALLISTER, 2012). A microestrutura (Figura 2) encontrada no aço normalizado é constituída de ferrita e perlita. A ferrita, ou ferro α , apresenta uma estrutura cristalina cúbica de corpo centrada (CALLISTER, 2012), possuindo como característica, elevada resistência ao choque e alongamento (CHIAVERINI, 2005). A perlita é uma mistura mecânica de ferrita e cementita (carboneto de ferro), disposta alternadamente em lâminas finas. A perlita apresenta como característica, maior dureza, menor ductilidade e maior resistência mecânica quando comparada a ferrita, já que possui maior teor de carbono em sua constituição (CHIAVERINI, 2005).

Figura 2 - Matriz com microestrutura de ferrita e perlita



Fonte: adaptado de Callister (2012).

As características do material não dependem apenas do teor de ferro e carbono (SHIGLEY et al, 2005). O manganês, por exemplo, é adicionado a todos os aços como um elemento desoxidante (SHIGLEY et al, 2005). Ao se reagir com o oxigênio formará um composto sólido não permitindo o surgimento de bolhas no fundido (CHIAVERINI, 2005).

O Quadro 1 indica os tipos mais frequentes de aços obtidos por fundição, com seus respectivos valores de limite de resistência à tração, escoamento e alongamento.

Quadro 1 - Aços para Fundição

	Norma	Material	Limite de Resistência à Tração (MPa)	Limite de Escoamento (MPa)	Alongamento (% _{min})
Aços baixo carbono	ASTM A 216-77	WCA	415	205	24
		WCB	485	250	22
		WCC	485	275	22
Aços Ligados com baixo teor de carbono	ASTM A 217-80	WC-1	450	240	24
		WC-6	485	275	20
		WC-9	485	275	20
		C-5	620	415	18
		C-12	620	415	18
Aços ligados com médio teor de carbono	ASTM A 352-79	LCA	415	205	24
		LCB	450	240	24
		LCC	485	275	22
		LC-1	450	240	24
		LC-2	485	275	24
		LC2-1	725	550	18
		LC-3	485	275	24
		LC-4	485	275	24

Fonte: adaptado de Villares (1983).

2.2 PROCESSO DE FUNDIÇÃO

É de longa data que o homem domina a arte da fundição (FERREIRA, 2007). Consiste no processo onde o metal, na fase líquida, é vazado para dentro de um molde (SILVA et al, 2011). A forma do molde poderá ser muito próxima da peça definitiva, podendo haver sobremetal suficiente para que possa, posteriormente, ser submetida a um retrabalho (SAIKAIEW, 2012).

Existem diversas formas de se vazarem uma liga metálica, seja por meio da fundição com matriz, seja por meio de cera perdida, no entanto, pode-se destacar o processo de fundição em areia um método eficaz para aços (FERREIRA 2007).

O emprego desta técnica deve-se ao fato de se produzir peças de diferentes formatos, com grande variedade dimensional, razoável resistência mecânica e tenacidade (CHIAVERINI, 2005), sem desperdícios, propiciando consideráveis economias (VILLARES, 1983). No entanto, as propriedades mecânicas de estruturas fundidas estão abaixo das obtidas em componentes conformados (CHIAVERINI, 2005), observando frequentemente defeitos provenientes do processo de fundição (CHIAVERINI, 2005).

2.2.1 Defeitos de Fundição

A não homogeneidade do fundido é um dos defeitos presentes e deve ser minimizada mediante um projeto adequado (CHIAVERINI, 2005).

Os vazios de contração serão um dos fatores interferentes, sendo estes consequentes da elevada variação volumétrica do metal, ou liga metálica, durante sua solidificação (SOUZA, 2001). A contração, muitas vezes localizada na parte interna das peças, é proveniente de três fatores: contração líquida, decorrente do decréscimo da temperatura até o início da solidificação, contração de solidificação, variação do volume do estado líquido para o sólido e contração sólida, variação do volume no estado sólido, compreendendo a temperatura de fim de solidificação até a temperatura ambiente (CHIAVERINI, 1986; TORRE, 2004).

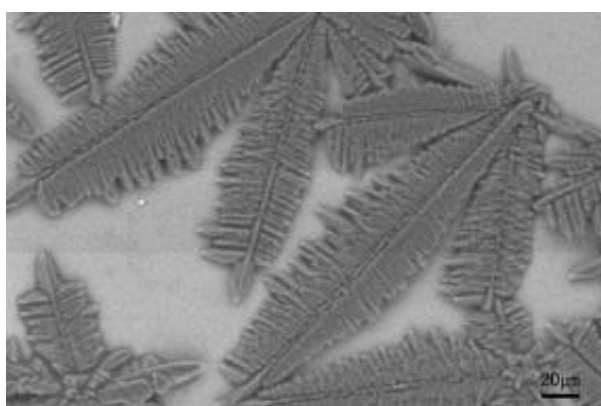
O aparecimento de tensões residuais também interfere significativamente na homogeneidade do fundido (SIEGEL, 1978), sendo este um defeito denominado como trincas a quente. Como característica, aços possuem baixa resistência mecânica em temperaturas logo abaixo da temperatura de início da solidificação (SIEGEL, 1978) e caso, durante a solidificação o material encontrar um obstáculo, como machos e o próprio molde, impedindo-o de contrair, haverá a formação de tensões (SOUZA, 2001), fragilizando e proporcionando o surgimento de trincas no componente.

Outro fenômeno prejudicial são as inclusões de areia, ou seja, presença de impurezas em regiões do fundido quando o mesmo inicia o processo de solidificação (CHIAVERINI, 2005). A localização correta dos canais de alimentação, assegurando um fornecimento adequado do metal líquido no molde (CHIAVERINI, 2005), evitará este tipo de dano ao fundido.

Outros fatores prejudiciais ficam a cargo da granulação grosseira e presença de tensões no componente.

Assim que o metal fundido inicia o resfriamento originam-se as primeiras estruturas cristalográficas, os cristais dendrítico (Figura 3). Esta estrutura de natureza grosseira (CHIAVERINI, 2005) interfere diretamente nas propriedades mecânicas do metal vazado (HEMANTH, 2000), podendo ocasionar quebra de equipamentos quando estes forem submetidos ao trabalho inadequado (CHIAVERINI, 2005).

Figura 3 – Cristais dendríticos



Fonte: XIAO et al, 2012

Por isso, quando se deseja refinar a estrutura do fundido, se faz uso dos tratamentos térmicos.

2.3 TRATAMENTOS TÉRMICOS DOS AÇOS FUNDIDOS

É o conjunto de operações de aquecimento e resfriamento em que são submetidos os aços, tendo como princípio a alteração da microestrutura, em maior ou menor escala, conferindo-lhes alterações das microestruturas e propriedades mecânicas do material (SILVA et al, 2006; ASM INTERNATIONAL, 1991). De acordo com Chiaverini (2005), são alguns dos tratamentos térmicos:

- **Recozimento:** possui a finalidade de diminuir tensões internas do material, conferindo-lhe uma microestrutura bem definida. O tratamento também reduz a dureza e aumenta a usinabilidade.

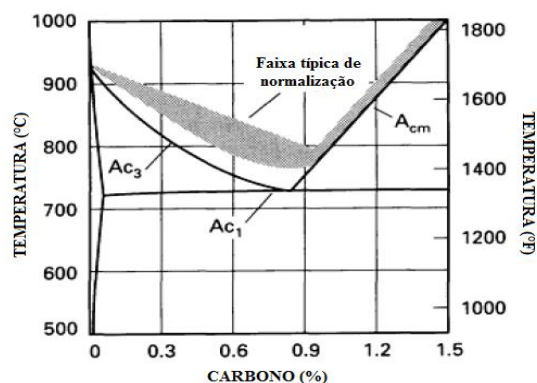
- **Têmpera e Revenimento:** tem intuito de elevar valores de dureza e resistência à tração, no entanto, reduzem-se valores como ductilidade e tenacidade. Outro fenômeno presente em materiais que sofreram o tratamento térmico de têmpera é o surgimento de tensões internas, estas podendo ser minimizadas pelo revenimento, corrigindo a excessiva dureza e fragilidade proveniente da têmpera.

Além destes tratamentos térmicos citados, a normalização é uma das técnicas aplicadas aos aços após o processo de fundição.

2.3.1 Normalização

A normalização possui faixas de temperaturas específicas (Figura 4) de acordo com a quantidade de carbono presente no material, tendo como finalidade o refinamento e homogeneidade da granulometria do aço (CHIAVERINI, 2003; GUESSER, 2009).

Figura 4 - Faixa de Normalização



Fonte: Adaptado de ASM INTERNATIONAL (1998).

Este tratamento térmico consiste primeiramente no aquecimento do material acima de sua zona crítica (reações que ocorrem no estado sólido), representados pela linha Ac₁, sendo que, para os aços hipoeutetóides (concentração de carbono abaixo de 0,77%) a temperatura deverá ser superior à linha Ac₃ (limite da transformação da austenita para ferrita + austenita) e para os aços hipereutetóides (concentração de carbono entra a faixa de 0,77% e 2,11%) deverá ser acima da linha Ac_m (limite da transformação da austenita para austenita + perlita).

Posterior ao aquecimento, o fundido deverá ser resfriado lentamente ao ar livre (CHIAVERINI, 2005), eliminando a estrutura dendrítica e as tensões internas provenientes das diferentes velocidades de resfriamento de cada secção do molde (CHIAVERINI, 2005; SILVA et al, 2006).

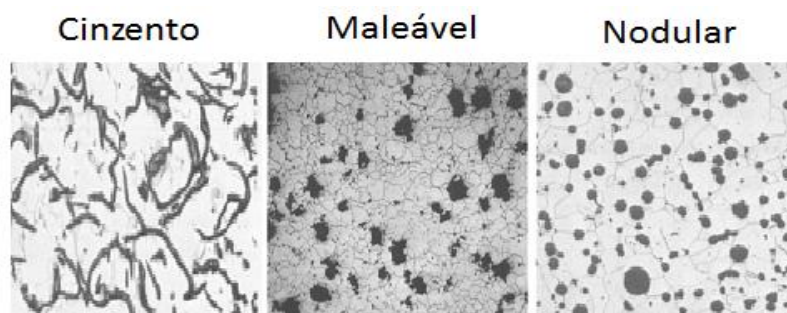
2.4 FERROS FUNDIDOS

Estes materiais são considerados como ligas ternárias de ferro, carbono e silício.

O carbono, adicionado em teores acima de 2,0 %, determina a quantidade de grafita presente, enquanto que o silício é elemento grafitizante. Além destes, o manganês, elemento sempre presente, terá efeito contrário ao silício, estabilizando a cementita (CHIAVERINI, 2005).

Existem diversas classes de ferros fundidos (Figura 5) como, cinzentos, apresentando grafita em forma de veios sendo estes importantes no amortecimento de vibrações, maleáveis, caracterizado por apresentar bons valores de ductilidade, destacando-se o nodular, este aliando boa ductilidade e resistência ao desgaste.

Figura 5 - Classes de ferros fundidos



Fonte: ASM INTERNATIONAL (1991).

O ferro fundido nodular vem ocupando aplicações importantes na engenharia, principalmente na substituição de estruturas de ferros fundidos e aços, devido às favoráveis propriedades mecânicas que possuem (KOERICH et al, 2011; GUESSER, 2009).

2.4.1 Ferros fundidos Nodulares

Esta classe de ferro fundido possui esta denominação devido à forma em que se encontra distribuída a grafita em sua matriz, ou seja, em formato de nódulos decorrentes do processo de fabricação (GUESSER, 2009).

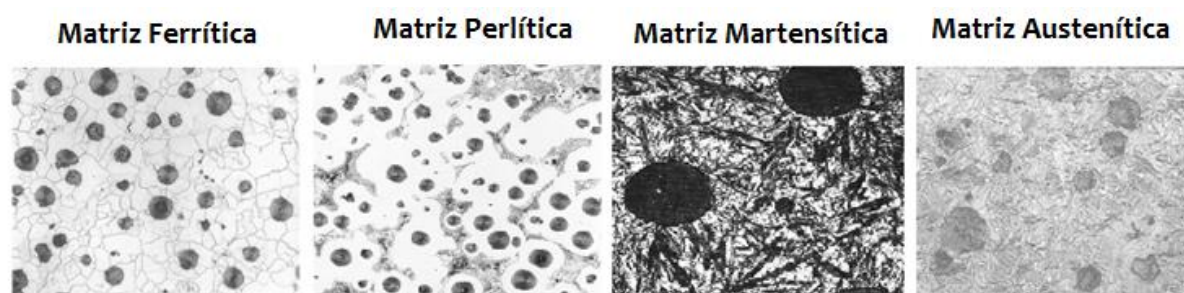
A justificativa para o seu emprego é a combinação favorável de elevada elasticidade, boa resistência ao desgaste e ductilidade (FERRO et al, 2012), sendo usada especialmente em aplicações que exijam força e resistência, combinadas com baixo custo e controle da matriz (SHIRANI et al, 2010 ; COLLINI et al, 2011; KOERICH et al, 2011).

As propriedades do material são influenciadas essencialmente pela microestrutura esferoidal da grafita (GUESSER, 2009). Quanto mais a forma da grafita se desvia da forma esférica ideal, mais baixa é a ductilidade e a resistência da estrutura (FERRO et al, 2012), isso devido ao surgimento de regiões tensionadas em torno dos nódulos.

Esta forma de grafita é obtida mediante adição de elementos de liga no metal, como magnésio e cério. Estes agem como inibidores de curta duração, possuindo como função o retardo da formação inicial de grafita, havendo a solidificação do ferro fundido cinzento, com a formação de cementita. Com o efeito dos inibidores cessados, a cementita se decompõe produzindo a grafita nodular que desenvolve-se igualmente em todas as direções (CHIAVERINI, 2005).

A estrutura normal do ferro fundido nodular é composta de matriz perlítica com grafita esferoidal. Além da matriz perlítica pode-se obter, mediante tratamento térmico, diversas matrizes como ferrítica, martensítica e austenítica (CHIAVERINI, 2005), todas estas mostradas na Figura 6.

Figura 6 - Tipos de ferros fundidos nodulares



Fonte: Fundação Tupy (2013).

2.5 TRATAMENTOS TÉRMICOS DOS FERROS FUNDIDOS NODULARES

Os tratamentos térmicos mais utilizados para garantir propriedades mecânicas satisfatórias são alívio de tensões, recozimento, normalização, têmpera, revenimento, austêmpera e têmpera superficial.

O primeiro tratamento, como a própria designação informa, possui a função de eliminar tensões internas (ASM INTERNATIONAL, 1991). A temperatura, normalmente não ultrapassa os 600°C, durante um tempo de 20 min por centímetro, não havendo qualquer alteração nas propriedades mecânicas do fundido (CHIAVERINI, 2005).

A obtenção da matriz ferrítica ocorre através do aquecimento a 900°C, mantendo o material a esta temperatura, tempo suficiente para que haja a dissolução dos carbonetos. Após, ocorrerá o resfriamento durante uma hora até 700°C, seguido de resfriamento até 650°C com uma variação de 3°C/h, sendo caracterizado como o tratamento térmico de recozimento (CHIAVERINI, 2005).

A normalização possui o intuito de reduzir as tensões internas do material, refinando o grão. Após a austenitização do fundido, com uma temperatura de cerca de 900°C, é resfriado no forno até 785°C e em seguida arrefecido ao ar (ASM INTERNATIONAL, 1991).

A resistência mecânica, dureza e resistência ao desgaste do material são proporcionadas através da têmpera seguida de revenimento. O resfriamento em óleo é utilizado após a austenitização. O revenimento, aliviando as tensões internas provenientes da têmpera, se dá através do reaquecimento do material com temperaturas inferiores às utilizadas no processo de têmpera (CHIAVERINI, 2005).

A austêmpera propicia interação entre bons valores de ductilidade aliado a boa resistência mecânica (GUESSER, 2009). Como a zona ferrítica, nesta família de material, é isenta de carbono, para que haja a endurecibilidade, deverá ocorrer suprimento de carbono na ferrita ou na austenita ocorrendo por solução e difusão dos nódulos. Este processo é dependente do tempo, a cerca de duas a quatro horas, e da temperatura de austenitização, ocorrendo a 850° e 925°C (CHIAVERINI, 2005).

Já a têmpera superficial propicia ao material uma microestrutura superficial de elevada resistência ao desgaste aliada com dureza na ordem de 60 HRC. Esta microestrutura

será formada pelo choque térmico da superfície, aquecida até temperaturas na faixa de 900°C seguido de um resfriamento rápido por meio de jato de água (CHIAVERINI, 2005).

De acordo com a norma ASTM, os ferros fundidos de grafita esferoidal podem ser classificados de acordo com os seguintes conjuntos, como mostra o Quadro 2.

Quadro 2 - Classificação do Ferro Fundido Nodular segundo ASTM

Especificação	Classe	Matriz	Resistência à Tração (MPa)	Limite de Escoamento (MPa)	Alongamento em 50 mm (%)
ASTM A 395	60-40-18	Ferrítica	410	270	18
ASTM A 476	80-60-03	Bruto de Fusão	550	410	3
ASTM A 536	65-45-12	Ferrítica	445	305	12
	80-55-06	Ferrítica - Perlítica	550	375	6
	100-70-03	Perlítica	690	480	3
	120-90-02	Martensítica	820	620	2

Fonte: adaptado de Chiaverini (2005).

Componentes de ferro nodular ASTM A 395, cuja microestrutura é predominante matriz ferrítica, apresentarão boa ductilidade e resistência ao impacto. Em muitas aplicações podem ser usados como brutos de fusão (sem aplicação de tratamento térmico posterior), no entanto recomenda-se o recozimento (MALUF, 2002; KOERICH et al, 2011).

A matriz perlítica fornece alta resistência à tração, moderada ductilidade e resistência ao impacto, com respectiva resistência ao desgaste. Esta matriz é caracterizada por uma estrutura nodular chamada de “olho de boi”, podendo ser observada na ASTM A 536 classe 100-70-03 (MALUF, 2002).

Já na classe 80-55-06, onde se requer baixo custo de fabricação com propriedades mecânicas intermediárias às encontradas nas matrizes ferrítica e perlítica, normalmente utiliza-se o estado bruto de fusão com matriz ferrítica – perlítica (MALUF, 2002).

Através de tratamentos térmicos, como a têmpera e revenimento, tem-se o ferro fundido nodular com matriz martensítica. Esta estrutura é caracterizada pela elevada resistência à tração e ao desgaste, no entanto, com baixa ductilidade e tenacidade. Esta estrutura é observada na classe 120-90-02 (MALUF, 2002).

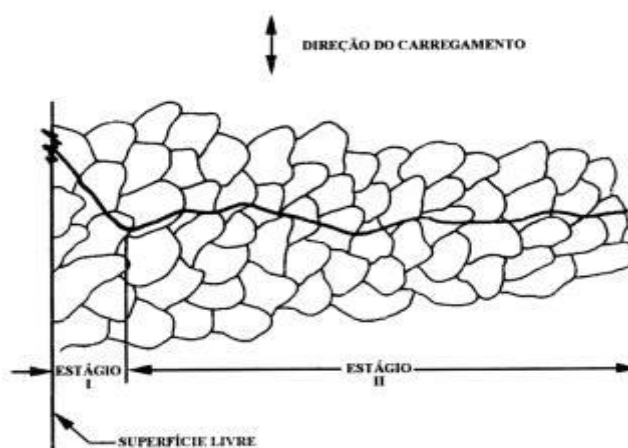
2.6 FADIGA DOS MATERIAIS

A fadiga dos materiais é um dos principais fenômenos que geram falhas em componentes mecânicos (PALMA et al, 2004). Ao contrário das falhas estáticas, a fadiga é súbita e total, tornando-se perigosa (SHIGLEY et al, 2005).

A fadiga é uma degradação gradual, progredindo até eventual falha, ocorrendo sob cargas cíclicas com tensões inferiores as determinadas pelo limite de resistência do material em carga estática (POOK, 2007).

Este dano é caracterizado por dois estágios (Figura 7). O primeiro se dá, através do início e propagação de uma ou mais microtrincas que se formam em algum ponto de alta concentração de tensão (riscos, arranhões, entalhes, amassados, são alguns exemplos). Posteriormente há a propagação destas, orientadas em aproximadamente 45° do eixo de tensão, até encontrar um determinado contorno de grão, em que o comprimento crítico de trinca é atingido, caracteristicamente 0,02 mm, dando-se início ao estágio II (POOK, 2007; CALLISTER, 2012).

Figura 7 - Estágio de propagação das trincas



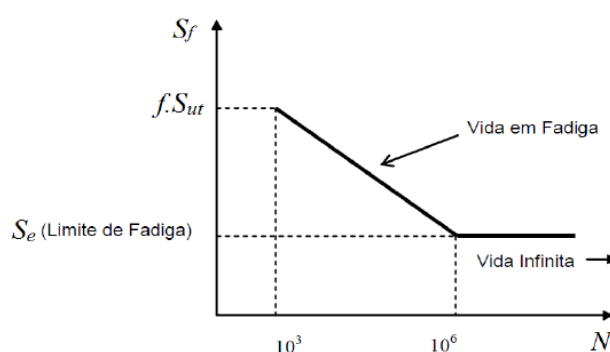
Fonte: Maluf (2002).

Neste segundo estágio o aparecimento das marcas de praia é observada, devido às superfícies fissuradas abrirem e fecharem através da tensão alternante com a elevada frequência (SHIGLEY et al, 2005). Finalmente, a fissura, ao atingir uma dimensão crítica, com qualquer ciclagem adicional, provocará a rápida fratura do componente, caracterizando o último estágio de propagação da trinca (COLLINS, 1992).

Para determinar o número de ciclos até ocorrer a falha de componentes, um dos métodos mais conhecidos e utilizados é da vida sob tensão, determinando a resistência à fadiga de corpos de provas submetidos a cargas variáveis (SHIGLEY et al, 2005).

Esta prática requer uma quantidade expressiva de corpos de prova, onde estes são submetidos a cargas controladas de tensão de flexão sem cisalhamento transversal, até a ruptura total do corpo de prova, possibilitando assim a obtenção do diagrama $S-N$, como observado na Figura 8 (SHIGLEY et al, 2005).

Figura 8 - Curva $S-N$ para aços



Fonte: Selau, 2012.

No gráfico referenciado, o eixo vertical representa a tensão aplicada, enquanto que no eixo horizontal, o número de ciclos submetido até a falha. Na vida infinita, representada no diagrama, não ocorrerá quebra do componente fadigado, correspondendo ao limite de resistência à fadiga (S_e) do material (SHIGLEY et al, 2005).

A não homogeneidade, devido à presença de nódulos de grafita juntamente com possíveis defeitos de fundição no ferro fundido nodular, devem ser levados em conta na avaliação da fratura mecânica dos componentes (ZIBELL et al, 2012; COLLINI et al, 2011).

Além da caracterização do material por meio de ensaios mecânicos, outro importante estudo pode ser realizado, a análise de elementos finitos, prevendo assim, o comportamento da estrutura.

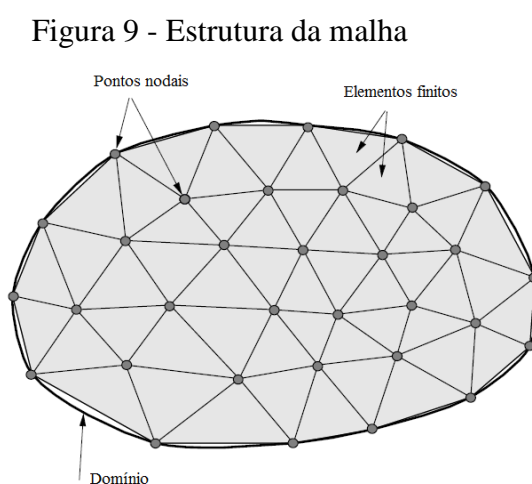
2.7 ANÁLISE DE ELEMENTOS FINITOS

É de fundamental importância, para a análise de componentes, o conhecimento por parte do engenheiro da natureza física do fenômeno, sendo assim, capaz de determinar as hipóteses do comportamento da estrutura (ALVES, 2006).

Cálculos analíticos, em estruturas simplificadas, podem ser utilizados para análises, no entanto se tornam limitados quando esta estrutura é complexa. O método de elementos finitos vem para minimizar esta dificuldade (ALVES, 2006).

Consiste em um método numérico que se emprega equações diferenciais, possibilitando soluções aproximadas de diversos fenômenos físicos por meio de uma superfície de controle (SELAU, 2011). Esta superfície, muitas vezes chamada de variáveis de campo, depende do tipo de problema físico a ser analisado, seja ele deslocamento, temperatura, velocidade do fluido entre outras (HUTTON, 2004).

O método baseia-se em dividir o domínio analisado a elementos infinitesimais de geometria simples (triangular, quadrilateral, cúbico, etc), onde estes se unem através de pontos nodais estabelecendo a malha de elementos finitos (FONSECA, 2002; SOUZA, 2003). Tal malha é observada na Figura 9.



Fonte: Souza, 2003.

Pode-se classificar em três famílias principais de elementos: unidimensional, bidimensional e tridimensional, como ilustrados no Quadro 3.

Quadro 3 - Família de elementos

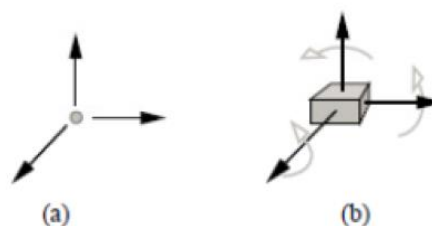
FAMÍLIA	COMPONENTES	REPRESENTAÇÃO BÁSICA
Elementos Unidimensionais	Linhas Arcos	
Elementos Bidimensionais	Triangulares Quadriláteros	
Elementos Tridimensionais	Tetraédricos Pentaédricos Hexaédricos	

Fonte: Formolo, 2012.

Segundo Souza (2003) e Marczak (1995), a precisão do cálculo depende da quantidade de nós e do tamanho de elementos existentes na malha. À medida que o tamanho dos elementos tende a zero, há um crescente aumento do número de nós, convergindo em uma solução mais próxima da exata para o domínio analisado, no entanto, uma maior dificuldade é percebida na geração da malha.

Além dos nós e os elementos existentes na malha, outro importante conceito é fundamental, os graus de liberdade. Os graus de liberdade são os possíveis movimentos que os nós venham a sofrer, interferindo no comportamento dos elementos (SOUZA, 2003).

Figura 10 - Graus de liberdade. a) de um ponto; b) de um corpo rígido.



Fonte: Souza, 2003

Como ilustrado na Figura 10 (a), um ponto possui três possíveis movimentos de translação, apresentando três graus de liberdade, diferentemente de um corpo rígido (Figura 10 (b)), no qual, além dos movimentos de translação, há três movimentos de rotação, totalizando em seis graus (SOUZA, 2003).

Posteriormente a obtenção da malha de um sólido, com as restrições nos diversos graus de liberdade estabelecida, assim como os apoios criados, a análise estrutural pode ser obtida, auxiliando de forma rápida e satisfatória o projeto do engenheiro.

A análise estrutural tem por objetivo a determinação dos deslocamentos, tensões internas ou até mesmo tensões atuantes no sistema, devido à aplicação de cargas. Algumas limitações devem ser tomadas, ou seja, estas análises se baseiam apenas nas deformações elásticas e de magnitude muito pequena (ALVES, 2006), levando em consideração o coeficiente de Poisson, densidade e módulo de elasticidade de cada material.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são demonstrados os ensaios mecânicos utilizados para caracterização do material utilizado em vagões ferroviários de carga. Todos os métodos apresentados foram primeiramente realizados para o aço fundido AAR M-201 grau b+ e posteriormente para o ferro fundido nodular selecionado.

Tais ensaios serão descritos com os respectivos equipamentos usados para as suas medições, estes encontrados no Laboratório de Ensaios Mecânicos da Universidade de Caxias do Sul, local onde foram realizados os procedimentos experimentais.

3.1 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

No Apêndice A está representado o fluxograma seguido, com os procedimentos utilizados.

Primeiramente, obteve-se a composição química do material AAR M-201 grau b+. Posteriormente ensaios de dureza, tração, impacto e fadiga foram realizados para a determinação das propriedades mecânicas, a fim de compará-las com a norma AAR.

Outro estudo foi efetuado, a análise de elementos finitos. Esta análise foi obtida para o aço fundido por meio do modelo fornecido pela empresa Cruzaço, a qual abastece os truques ferroviários para a Randon Implementos. Este estudo possibilitou a aferição dos parâmetros exigidos pela norma para a travessa central utilizada pela empresa.

Posteriormente, faz-se a seleção do ferro fundido, tentando atender as propriedades mecânicas mínimas (dureza, resistência à tração, limite de escoamento, alongamento e resistência ao impacto) exigidas pela norma.

Em seguida, os mesmos ensaios assim como a análise de elementos finitos, propostos anteriormente para o aço, foram novamente efetuados para o ferro fundido nodular selecionado, adquirindo dados suficientes para a verificação e conclusão da possível alteração de material.

3.2 MATERIAL AAR M-201 GRAU B+

A travessa central utilizada em vagões ferroviários de carga são construídas por meio do aço fundido AAR M-201, sendo classificados de acordo com os graus A, B, B+, C, D e, E. O que irá diferenciá-los será o tratamento térmico posterior ao resfriamento do fundido.

De acordo com a norma AAR, a classe estudada, grau b+, deverá passar por um processo de normalização e possuir a composição química mostrada na Tabela 1.

Tabela 1 - Composição química do aço AAR M-201 grau B+

Carbono Máx.(%)	Manganês Máx.(%)	Fósforo Máx.(%)	Enxofre Máx.(%)	Silício Máx.(%)
0,32	0,9	0,04	0,04	1,5

Fonte: Norma AAR.

A normalização do fundido ocorrerá a uma temperatura uniforme de 920°C, em tempo adequado para que haja a austenitização, seguido de um resfriamento ao ar livre, homogeneizando e refinando a estrutura presente no aço.

Através deste tratamento térmico devem ser obtidas as seguintes propriedades mecânicas mínimas (Tabela 2), mencionadas em norma.

Tabela 2 - Propriedades mecânicas mínimas para o aço AAR M-201 grau B+

Propriedade	Valor mínimo requerido
Limite de resistência à tração (MPa)	552
Limite de escoamento (MPa)	345
Alongamento em 50 mm (%)	24
Redução de área (%)	36
Resistência ao impacto (J) (- 7 °C)	20,3
Faixa Admissível para dureza (HB)	137 - 228

Fonte: Norma AAR.

3.3 MÉTODO DE AVALIAÇÃO DO MATERIAL

Para a verificação dos elementos químicos existente no material, a eletroscopia de transmissão atômica foi realizada. Esta análise foi feita por meio da queima superficial de duas amostras, onde os gases são captados e analisados.

Além da composição química, a avaliação visual por microscopia óptica foi efetuada verificando a homogeneidade e estrutura presente na matriz do aço e ferro fundido.

3.4 ENSAIO DE DUREZA BRINELL

De modo a obter uma rápida estimativa indireta da resistência mecânica do material, utilizou-se o ensaio de dureza em uma máquina WPM.

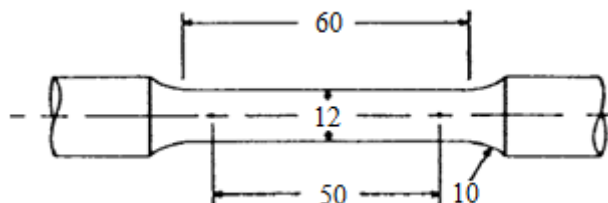
Este ensaio consiste na aplicação, de uma carga (187,5 kgf) perpendicular em relação à superfície plana do corpo de prova. Por meio de um penetrador tipo esfera, de diâmetro 2,5 mm, deixará impressa uma calota esférica com diâmetro específico. Cuidado deve-se tomar em relação à distância de cada penetração e a borda do corpo de prova, sendo, pelo menos, duas vezes e meia o diâmetro da impressão.

3.5 ENSAIO DE TRAÇÃO

Amostras de cada material foram ensaiadas seguindo os procedimentos prescritos na norma ASTM A370. Uma quantidade de 2 a 3 corpos de prova foi suficiente para estabelecer uma média das propriedades mecânicas existentes em ambos os fundidos.

As amostras foram usinadas de acordo com a Figura 11, onde o comprimento da secção a ser reduzida possui 60 mm, diâmetro central de 12 mm, o raio de filete tem 10 mm, e, 50 mm de comprimento útil.

Figura 11 - Corpo de prova para o ensaio de tração



Fonte: ASTM A370.

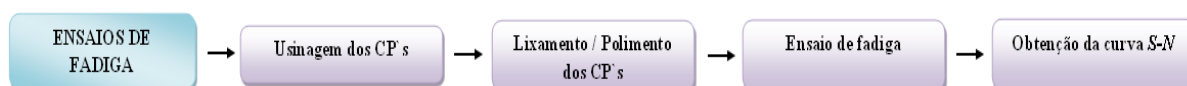
Os ensaios foram realizados em uma máquina EMIC DL 20000 com capacidade de aplicação de 200 kN de força e suas respectivas curvas (tensão - deformação) plotadas pelo próprio equipamento.

3.6 ENSAIO DE FADIGA

Para o estudo do comportamento do material AAR M-201, assim como um guia para a seleção de um ferro fundido nodular que atenda às condições exigidas pelo aço fundido, as curvas $S-N$ foram obtidas.

Os passos requeridos para o ensaio de fadiga rotativa são mostrados no fluxograma da Figura 12.

Figura 12 - Fluxograma para o ensaio de fadiga

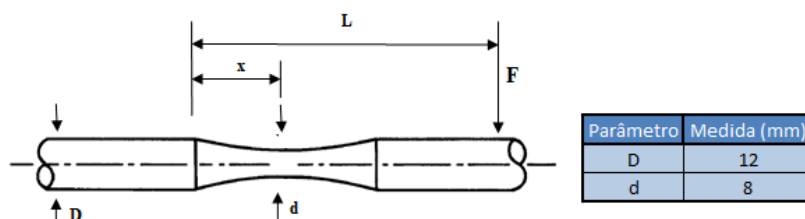


Fonte: do autor.

Para uma curva $S-N$ corretamente caracterizada, se faz necessário uma quantidade elevada de corpos de prova. Por isso, foram usinadas amostras (conforme Figura 13) para cada material de acordo com a norma ASTM E466.

É de fundamental importância que a usinagem seja correta, propiciando a falha da amostra no menor diâmetro (d), caso contrário, dados incorretos no procedimento experimental podem ser constatados.

Figura 13 - Corpo de prova utilizado para o ensaio de fadiga



Fonte: Adaptado de ASTM E466.

Outro fator que poderá interferir negativamente na obtenção dos dados é decorrente do aumento da tensão na superfície, causada pela usinagem. Tal efeito poderá ser minimizado por meio do polimento. Este processo consiste no lixamento radial, com ajuda de um torno

mecânico, posteriormente lixamento longitudinal, eliminando riscos, por consequência tensão superficial. Foram usadas de forma crescente as lixas com granulometria de 50, 150, 240, 320, 400, 600, 1200, além de pasta de diamante com granulometria de 6 μm , 3 μm e por fim, alumina com 1 μm , retirando toda e qualquer imperfeição proveniente do processo de usinagem.

Após o polimento, o menor diâmetro da amostra foi obtido mediante auxílio de um projetor de perfil. Este parâmetro é fundamental para definir a carga requerida pela máquina de fadiga, para a correspondente tensão sofrida pela amostra.

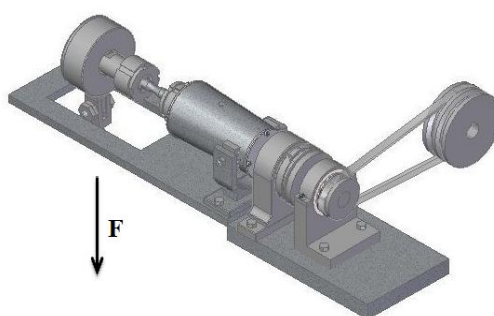
A força imposta pela máquina é calculada por meio da equação 1 (tensão de flexão):

$$F = \frac{\sigma \pi d^3}{(L - x)32} \quad (1)$$

onde, F representa a força imposta pela máquina, σ a tensão aplicada, d se refere ao diâmetro central da amostra obtida por meio do projetor de perfil, L comprimento da borda do mancal da máquina de fadiga até a extremidade onde será aplicada a força e por fim, x a medida do mancal até o menor diâmetro encontrado na amostra.

Após a realização deste processo preliminar, as amostras foram ensaiadas a temperatura e amplitude constante, em uma máquina de fadiga rotativa Veb Werkstoffprüfmaschinen Leipzig modelo UBM 520/70/9 (Figura 14), capaz de ensaiar quatro amostras ao mesmo tempo.

Figura 14 - Máquina de fadiga



Fonte: do autor.

Foram arbitradas quatro tensões, sendo ensaiadas 3 amostras para cada uma delas afim de obter a vida finita dos materiais. Para determinação da vida infinita, estipulada como 2×10^6 ciclos, o restante das amostras foram fadigadas por meio do método *Up-And-Down*.

De acordo com Collins (1992) e Souza (1982), o corpo de prova é ensaiado até que se atinja o número de 2×10^6 ciclos, ou até que ocorra a ruptura do mesmo. Caso o corpo de prova falhe, para o próximo ensaio, o nível de tensão será reduzido para 20 MPa, caso contrário, havendo ciclagem superior a 2×10^6 , a tensão incidente sobre o corpo de prova terá um acréscimo de 20 MPa.

O limite de resistência à fadiga é obtido mediante estimativa realizada por meio de uma tabela de 5 colunas, baseadas somente no evento de menor frequência, ou seja, atingir 2×10^6 ou a falha do componente.

Devem-se apresentar, em cada uma das colunas, os seguintes dados:

- Primeira coluna: Listar a tensão utilizada para cada corpo de prova.
- Segunda coluna: Elencar as tensões em ordem crescente.
- Terceira coluna: Quantidade de vezes que o evento de menor frequência ocorreu em cada uma das tensões.
- Quarta coluna: Multiplicar a segunda e terceira coluna, sendo a soma chamada de “A”.
- Quinta coluna: Multiplicar o quadrado da segunda coluna pela terceira e o resultado de sua soma chamada de “B”.

Posteriormente, calcula-se o limite de fadiga médio ($\overline{S_e}$) por meio da fórmula 2:

$$\overline{S_e} = S_0 + d * \left(\frac{A}{N} \pm 0,5 \right) \quad (2)$$

Onde “ S_0 ” é o valor da menor tensão do evento de menor frequência, “ d ” é o incremento fixo de 20 MPa utilizado e por fim, “ N ” a quantidade de corpos de prova utilizados para o método *Up-and-Down*. Quando o evento de maior frequência for à fratura dos componentes, utiliza-se o sinal negativo, caso contrário se faz uso do sinal positivo.

O desvio padrão também pode ser obtido mediante a equação 3:

$$\delta = 1,620 * d * (C + 0,029) \quad (3)$$

$$\text{Sendo } C = \frac{N*B - A^2}{N^2}.$$

Caso “ C ” for menor que 0,3 utilizar $C = 0,53 * d$.

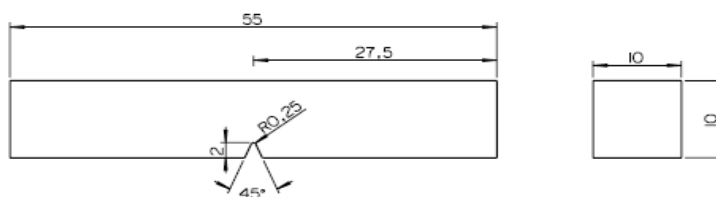
O resultado deste método é a obtenção de um limite de resistência à fadiga confiável para vida infinita estipulada com desvio padrão conhecido.

3.7 ENSAIO DE IMPACTO

Para a verificação, de como o material se comporta perante uma carga súbita de impacto, efetuou-se o ensaio de impacto Charpy.

Este tipo de ensaio é caracterizado por ser uma técnica dinâmica, onde um pêndulo deverá atingir a amostra entalhada fraturando-a em um único golpe. O corpo de prova (Figura 15) atende a norma ASTM A370, possuindo um entalhe de 0,25 mm de raio produzindo um estado triaxial de tensão, a fim de causar uma fratura de característica frágil.

Figura 15 - Corpo de prova utilizado para o ensaio de impacto



Fonte: Adaptado da norma ASTM A370.

O experimento foi realizado em uma máquina WPM com capacidade máxima de 294 J, sendo que a energia requerida para a deformação e rompimento é obtida do próprio instrumento.

De acordo com a norma AAR, o ensaio de impacto deverá ser efetuado em 3 corpos de prova para cada tipo de material, à temperatura de -7°C , onde os corpos de prova deverão permanecer por cerca de 5 minutos em meio líquido. O operador deverá levar as amostras em menos de 5 s para a máquina, posicioná-las e efetuar o ensaio, atingindo o martelo no centro do entalhe fraturando-a.

3.8 ANÁLISE DE ELEMENTOS FINITOS

Para análise de como o componente se comporta com a aplicação de cargas, utiliza-se o estudo de elementos finitos.

O modelo (Figura 16) utilizado para estudo foi desenvolvido a partir da geometria fornecida pela empresa Cruzaço, a qual abastece as travessas centrais dos truques ferroviários de carga utilizados pela Randon. O *software* CAE escolhido para a realização da análise estrutural foi o ABAQUS, *software* este adquirido pela empresa.

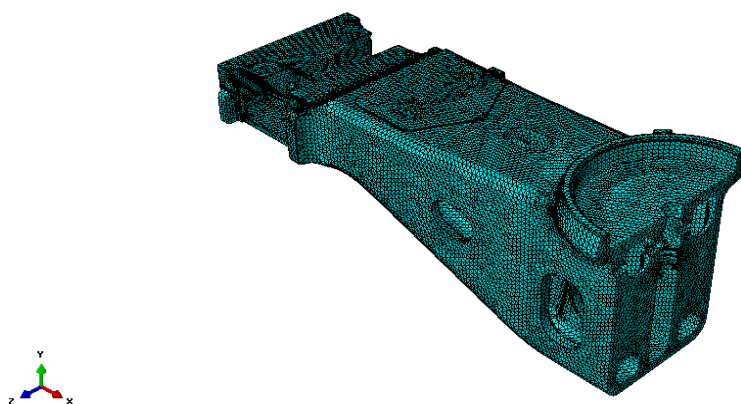
Figura 16 - Modelo utilizado da travessa central



Fonte: do autor.

A malha utilizada está ilustrada na Figura 17, sendo construída com elementos sólidos 3D do tipo tetraedro de 4 nós, espaçados em 12 mm, originando um total de 300.000 elementos.

Figura 17 - Malha utilizada

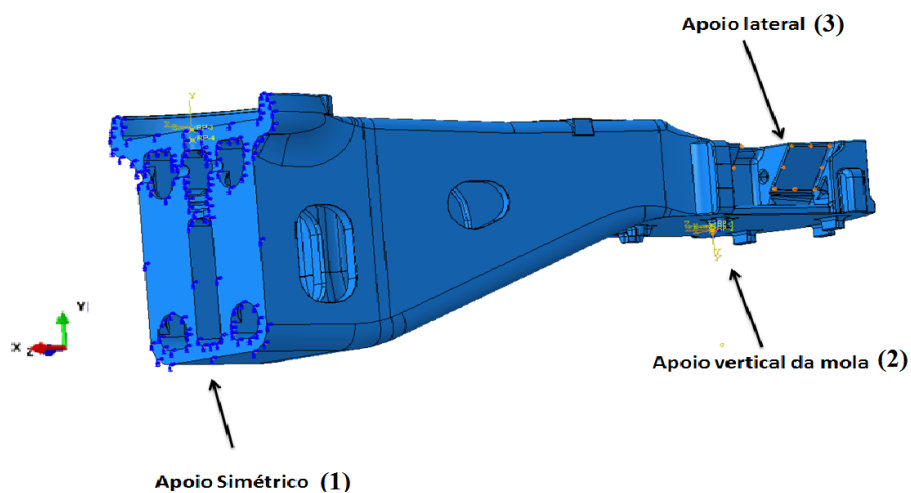


Fonte: do autor.

Os apoios (Figura 18) utilizados para a análise, segundo a norma, foi à simetria, representando o lado espelhado da travessa, e o apoio lateral, simulando a condição de contato entre a cunha de fricção e a travessa.

Um terceiro apoio é representado no estudo, referindo-se à união entre a travessa central e lateral. Esta junção é simulada por meio de um conjunto de molas, onde estas são representadas como um único apoio de mola com coeficiente de 8.713 N/mm.

Figura 18 - Apoios utilizados



	X	Y	Z	XR1	YR2	ZR3
1	0	Livre	Livre	Livre	0	0
2	Livre	Mola	Livre	Livre	Livre	Livre
3	Livre	Mola	0	Livre	Livre	Livre

Fonte: do autor.

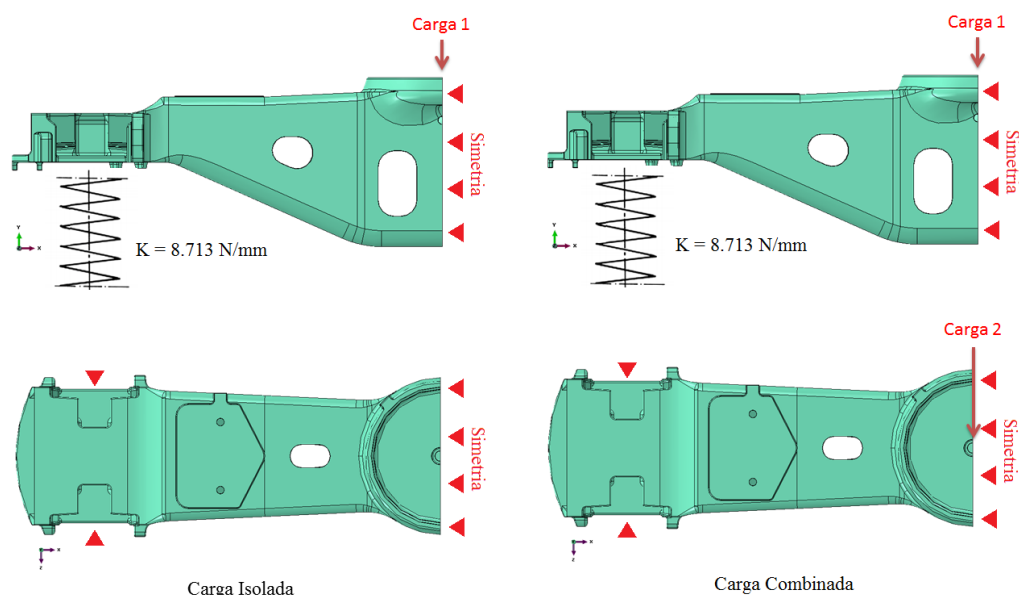
Na Figura 18 está incluso um quadro com os graus de liberdade de cada apoio. No caso do apoio de simetria, ou Apoio Simétrico (1), a restrição será em relação ao eixo x e as rotações de y e z. No apoio das molas, não haverá restrições nos eixos e rotações dos mesmos. Já no terceiro apoio, representando a cunha de fricção, a restrição apenas ocorrerá no eixo z.

Utilizando como referência a norma AAR, a análise foi realizada por meio de dois estudos, possibilitando a verificação das tensões e a deflexão máxima. Estes valores são obtidos por meio da utilização da densidade, módulo de elasticidade (medida referente à rigidez do material) e coeficiente de Poisson (relaciona a deformação transversal à deformação lateral) para cada material.

3.8.1 Carregamento Aplicado

A análise para o primeiro estudo foi subdividida em carga isolada e carga combinada (Figura 19).

Figura 19 - Cargas de estudo para tensão



Fonte: do autor.

Os valores de cada carga estão demonstrados na Tabela 3.

Tabela 3 - Cargas aplicadas para análise de carregamento

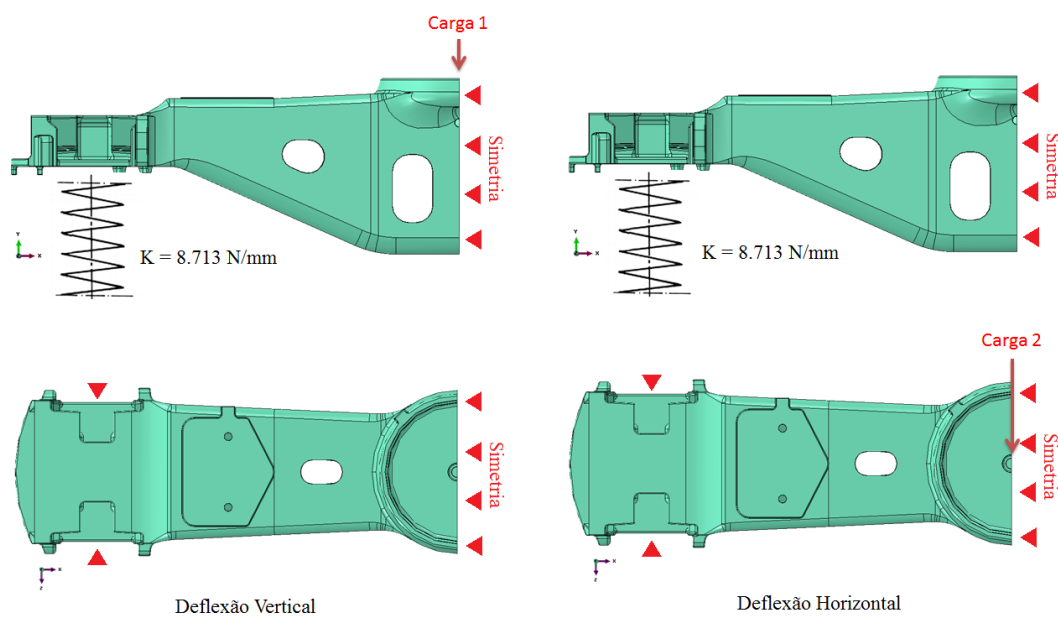
Carregamento	Carga 1 (N)	Carga 2 (N)
Carga Isolada	649.440	-
Carga Combinada	649.440	162.360

Fonte: do autor.

3.8.2 Análise de deflexão

Para a análise da deflexão encontrada na travessa central, o estudo foi subdividido em deflexão vertical e horizontal (Figura 20).

Figura 20 - Carga para estudo da deflexão



Fonte: do autor.

Os valores das cargas aplicadas nos dois estudos estão demonstrados na Tabela 4.

Tabela 4 - Cargas aplicadas para análise da deflexão

Carregamento	Carga 1 (N)	Carga 2 (N)
Deflexão Vertical	928.700	-
Deflexão Horizontal	-	616.968

Fonte: do autor.

Além do carregamento e deflexão da estrutura, outro estudo, utilizando a análise de elementos finitos, é sugerido pela norma AAR. Este se refere ao comportamento da travessa central com a aplicação de cargas transversais. Esta carga transversal é subdividida em:

- Longitudinal: cargas provenientes do impacto e frenagens do truque.
- Transversal: cargas provenientes da oscilação do componente perante os trilhos.

Em seguida, um protótipo fundido deverá ser submetido ao carregamento cíclico em bancada, para avaliação de resistência à fadiga segundo a norma.

Este último estudo, assim como o ensaio de fadiga utilizando a travessa em bancada, não foram abordados no trabalho, no entanto, deverão ser feitos para posterior homologação do componente de ferro fundido nodular.

4 RESULTADOS

Neste capítulo são mostrados os resultados dos ensaios aplicados nos corpos de prova (CP's) além da análise de elementos finitos, primeiramente para o aço e posteriormente para o ferro fundido nodular selecionado.

4.1 RESULTADOS DOS ENSAIOS PARA O AÇO FUNDIDO

4.1.1 Análise de composição química e microscopia óptica

O aço fundido, nas duas amostras analisadas quimicamente, atende aos índices exigidos pela norma, possuindo a composição química indicada na Tabela 5.

Tabela 5 - Composição química do aço

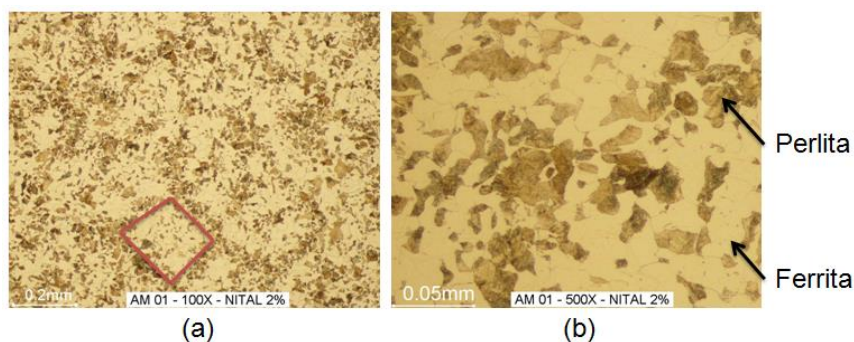
CP's	C (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Si (%)
1	0,2374	1,074	0,0286	0,0108	0,541
2	0,2319	1,067	0,0313	0,0102	0,557
Média	0,2346	1,0705	0,0299	0,0105	0,549

Fonte: do autor.

Percebe-se que os teores de manganês são mais elevados que os especificados. No entanto, a norma permite uma concentração superior deste elemento com o decréscimo da quantidade de carbono máxima exigida. Para cada redução de 0,01 % de carbono, um aumento de 0,04 % de manganês será permitido, possuindo uma tolerância de no máximo 1,2 % deste elemento.

Como observado na Figura 21, à microestrutura presente no aço é constituída basicamente de duas fases, ferrita e perlita, distribuídas em colônias (a), arranjo este comumente encontrado em aços fundidos.

Figura 21 - Estrutura da matriz do aço



Fonte: do autor.

4.1.2 Ensaios de dureza

O ensaio de dureza Brinell, consistiu em cinco leituras obtidas em dois corpos de prova. Tais medidas, assim como a respectiva dureza estão informadas na Tabela 6.

Tabela 6 - Resultados do ensaio de dureza do aço

CP's	Dureza (HB) com carga de 187,5 kgf e esfera de \varnothing 2,5 mm					Média (HB)	Desvio padrão (HB)
	1° ponto	2° ponto	3° ponto	4° ponto	5° ponto		
1	164	160	157	163	163	161	2,88
2	163	163	164	163	164	163	0,55

Fonte: do autor.

De acordo com a norma AAR, a dureza admissível, obrigatoriamente deverá constar entre a faixa de 137 a 228 HB. Portanto as amostras obtiveram dados de dureza aceitáveis, correspondendo à norma.

4.1.3 Ensaio de tração

Os resultados do ensaio de tração, realizados em dois corpos de prova, estão informados na Tabela 7. Por meio das medidas diretas da carga em relação à deformação, pode-se constatar que o limite elástico, para os dois corpos de prova, coincidiram com o exigido pela norma assim como o limite de resistência à tração.

O material analisado, como a própria literatura informa se comporta ductilmente, ou seja, seus valores de escoamento são elevados, assim como sua tenacidade, a qual corresponde à energia absorvida no ensaio de tração até a ruptura do componente.

Tabela 7 - Resultados do ensaio de tração para o aço

CP's	Escoamento (MPa)	L. R. Tração (MPa)	Redução da área (%)	Alongamento (%)
1	347	579	40	24
2	356	584	43	26
Média	352	582	42	25
Desvio padrão	6,36	3,54	2,12	1,41

Fonte: do autor.

4.1.4 Ensaio de impacto

O ensaio de impacto Charpy, realizado em 3 amostras similares, a uma mesma temperatura, nos cientificam os seguintes dados encontrados na Tabela 8.

Tabela 8 - Resultados ensaio Charpy para o aço

CP's	Área (cm ²)	Energia Absorvida (J)	Resistência ao Impacto (J/cm ²)
1	0,807	27,5	34
2	0,797	33,3	41,8
3	0,801	41,2	51,4
	Média	34	42,4
	Desvio padrão	6,88	8,72

Fonte: do autor.

Os valores obtidos, a uma temperatura sub-zero, nos demonstram elevada resistência ao impacto, característica esta correspondente com a literatura para aços fundidos de média concentração de carbono, material analisado no momento.

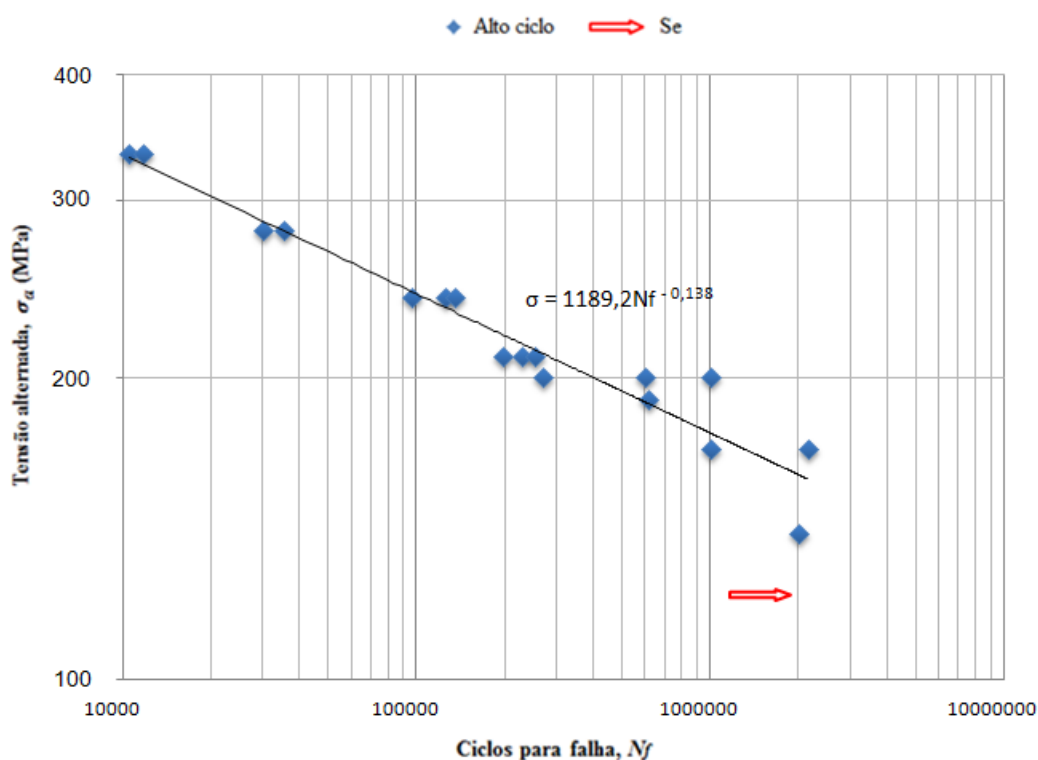
4.1.5 Ensaio de fadiga

O ensaio de fadiga de flexão rotativa para o aço fundido consistiu em um total de 17 amostras fadigadas. Esta amostragem foi suficiente para que a obtenção da curva $S-N$, do tipo log-log (Figura 22), ocorresse.

O gráfico, obtido pelo método dos mínimos quadrados, teve um ajuste potencial da linha de tendência para a região de alto ciclo, possibilitando a caracterização da equação da curva. A equação é elemento importante para a definição da tensão máxima (σ) aplicada no corpo de prova para um correspondente número de ciclos (N_f). Tal equação é definida como:

$$\sigma = 1189,2N_f^{-0,138}$$

Figura 22 - Curva $S-N$ para o aço



Fonte: do autor.

Para a determinação do limite de resistência à fadiga para 2×10^6 ciclos, as tensões utilizadas, assim como os resultados obtidos para cada uma delas, podem ser vistos na Tabela 9. Utilizou-se um total de 5 corpos de prova, sendo que 1 deles rompeu e 4 resistiram. De acordo com as equações explicitadas no capítulo 3, obtém-se o

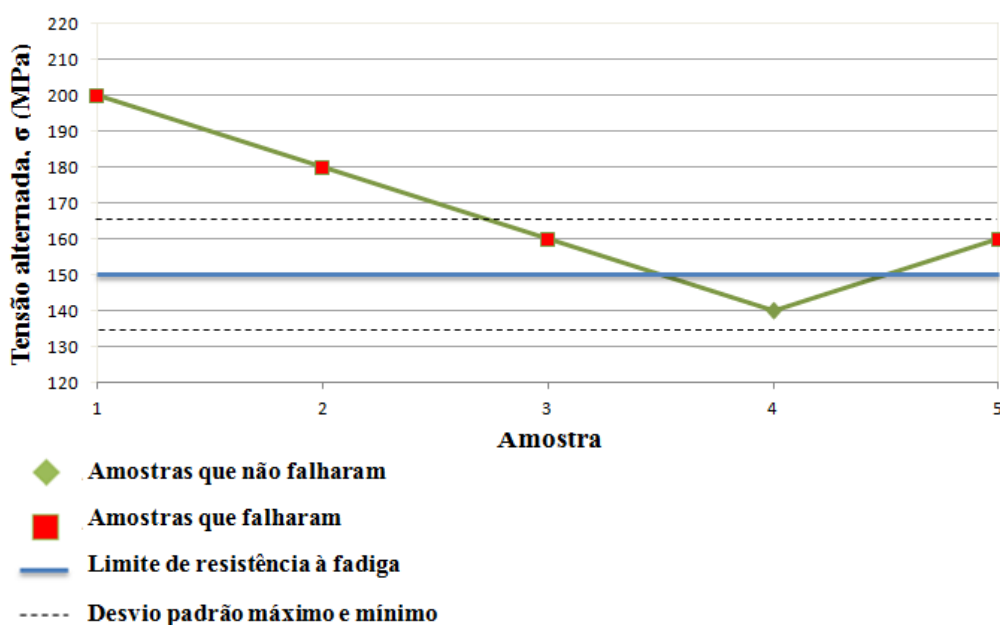
valor do limite de resistência à fadiga de 150 MPa, com desvio padrão de $\pm 10,6$ MPa. O gráfico alcançado pelo método *Up-and-Down* para o aço pode ser observado na Figura 23.

Tabela 9 - Resultados das amostras utilizadas no método *Up-and-Down* para o aço AAR M-201 grau b+

Amostra	Tensão (Mpa)	Ocorreu falha?
1	200	Sim
2	180	Sim
3	160	Sim
4	140	Não
5	160	Sim

Fonte: do autor.

Figura 23 - Curva *Up-And-Down* do aço fundido AAR M-201 grau b+



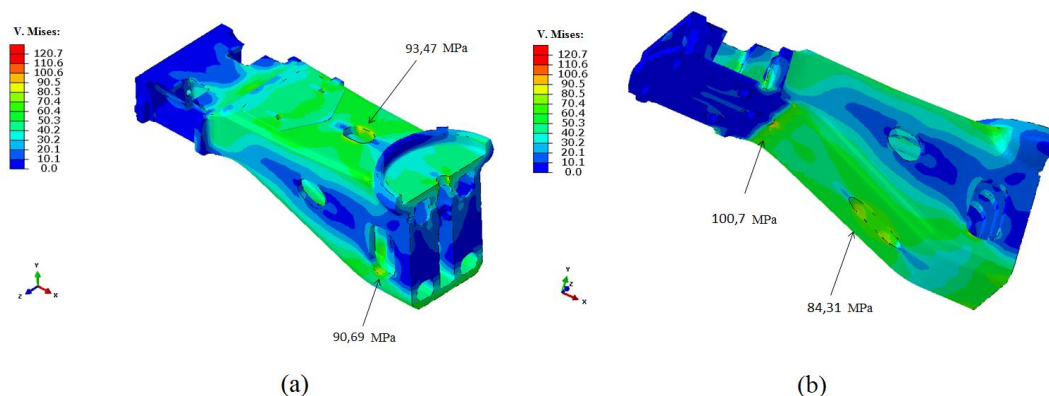
Fonte: do autor.

4.1.6 Análise da tensão máxima utilizando elementos finitos

O objetivo da análise por meio de elementos finitos é a verificação dos pontos de máxima tensão na travessa central, sendo comparados com a norma vigente. Os pontos de concentração de tensão podem ser observados na Figura 24.

Os dados de entrada foram o módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson e densidade com os valores de 200 GPa, 0,32 e 7,85 g/cm³, respectivamente.

Figura 24 - Análise da carga isolada

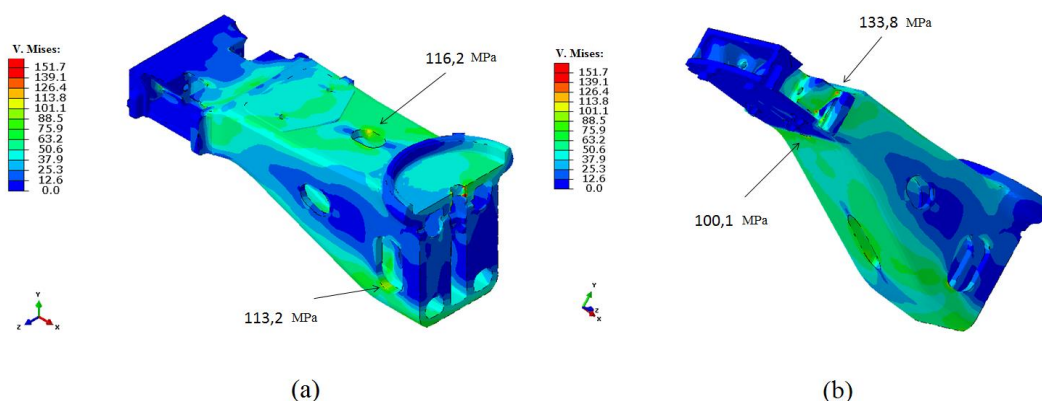


Fonte: do autor.

A máxima tensão observada, quando aplicada uma carga isolada foi de 100,7 MPa. Esta tensão permaneceu dentro dos parâmetros exigidos pela norma, já que ela admite uma tensão na faixa de 120,7 MPa.

A Figura 25 demonstra o comportamento da travessa quando uma carga combinada incide sobre a mesma. Esta combinação de cargas imprime uma tensão máxima no fundido de 133,8 MPa.

Figura 25 - Análise de carga combinada



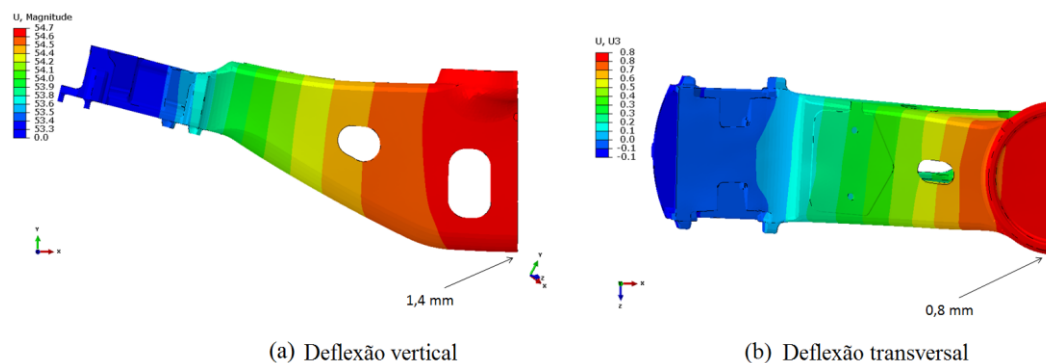
Fonte: do autor.

Assim como no estudo da carga isolada, a carga combinada também esteve dentro da faixa admissível pela norma. Segundo a AAR, a tensão máxima não poderá exceder o valor de 151,7 MPa.

4.1.7 Análise da deflexão máxima utilizando elementos finitos

Por meio da aplicação da carga vertical e perpendicular sobre o fundido, o comportamento da estrutura é mostrada na Figura 26.

Figura 26 - Deflexão máxima



Fonte: do autor.

Neste estudo, a deflexão vertical foi de 1,4 mm enquanto a transversal de 0,8 mm. Segundo a AAR, as deflexões não poderão exceder os valores de 2,31 mm e 1,52 mm, respectivamente.

4.2 SELEÇÃO DO FERRO FUNDIDO NODULAR

Como objetivo do trabalho, uma classe de ferro fundido nodular deverá ser selecionada, possibilitando a viabilidade de construção de uma travessa com este material.

Como observado nos ensaios mecânicos, o aço apresenta elevados valores de ductilidade e tenacidade, sendo estas características dificilmente obtidas por meio dos ferros fundidos.

Por isso, a solução tomada foi a utilização de um material que admita bons valores de ductilidade e resistência mecânica mínima que a encontrada no aço.

O ferro fundido nodular ASTM 80-55-06 foi tomado como possível componente a ser empregado. A escolha é devido ao material possuir propriedades mecânicas similares às encontradas em aços com média concentração de carbono, sendo utilizado em engrenagens, eixos, haste de pistão, etc.

Para a verificação da possibilidade de substituição da travessa ferroviária por este material, os mesmos ensaios mecânicos e análises de elementos finitos antes utilizados para caracterização do aço fundido AAR M-201 grau b+, foram novamente necessárias para o ferro fundido.

4.3 RESULTADOS DOS ENSAIOS PARA O FERRO FUNDIDO ASTM 80-55-06

O ferro fundido nodular, de acordo com o fabricante, possui uma composição química como ilustrado na Tabela 10. Esta composição é obtida na retirada do ferro líquido, podendo apresentar certas variações caso a análise for feita posteriormente a sua solidificação.

Tabela 10 - Composição química do ferro fundido nodular

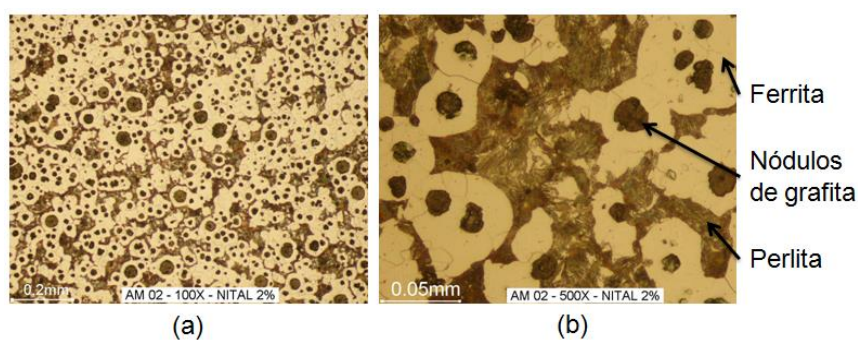
Elemento	C	Si	Mn	S	P	Mg
%	3,3 - 4,00	2,40 - 3,10	0,20 máx	0,020 máx	0,10 máx	0,03 - 0,05

Fonte: Tupy.

4.3.1 Microscopia óptica

Na Figura 27 está expressa a microestrutura presente nos corpos de prova. Por meio destas imagens pode-se verificar a presença dos nódulos de grafita e regiões contemplando ferrita e perlita, como mencionado na literatura.

Figura 27 - Estrutura da matriz do ferro fundido



Fonte: do autor.

4.3.2 Ensaio de dureza

Da mesma maneira como realizado no aço, a dureza do ferro fundido nodular foi obtida mediante a leitura de cinco pontos em dois corpos de prova diferentes. As durezas para cada uma das leituras estão expressas na Tabela 11.

Tabela 11 - Resultado do ensaio de dureza para o ferro fundido

CP's	Dureza (HB) com carga de 187,5 kgf e esfera de \varnothing 2,5 mm					Média (HB)	Desvio padrão (HB)
	1° ponto	2° ponto	3° ponto	4° ponto	5° ponto		
1	244	239	229	239	234	237	5,70
2	234	229	229	229	229	230	2,24

Fonte: do autor.

Pode-se observar que a dureza do material ASTM 80-55-06 foi superior ao encontrado no aço fundido e cerca de 2% superior ao mínimo especificado por norma.

4.3.3 Ensaio de tração

O ensaio de tração consistiu em três corpos de prova, sendo que os dados obtidos estão inclusos na Tabela 12.

Tabela 12 - Resultados do ensaio de tração para o ferro fundido

CP's	Escoamento (MPa)	L. R. Tração (MPa)	Redução da área (%)	Alongamento (%)
1	481	532	3	2
2	471	526	2	2
3	468	527	3	2
Média	473	528	3	2
Desvio padrão	6,81	3,21	0,58	0,00

Fonte: do autor.

O material ASTM 80-55-06 revelou maiores valores de escoamento, com baixa ductilidade devido ao seu baixo alongamento.

Pode-se enfatizar que o material se comportou de forma semelhante nos três ensaios, sendo que a média dos valores de escoamento ficou dentro dos exigidos pela norma, condição

contrária aos valores referentes ao alongamento, sendo estes muito abaixo que o especificado pela AAR.

4.3.4 Ensaio de impacto

Da mesma maneira como efetuado para o aço, foram utilizados 3 corpos de prova para a obtenção de valores confiáveis da resistência ao impacto absorvida pelo material ASTM 80-55-06 na temperatura de $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Percebeu-se que os valores encontrados no ensaio de impacto Charpy para o material em questão foi baixo, podendo haver, na temperatura de $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$, uma transição dúctil – frágil. Tal efeito não é constatado, já que os valores são similares quando o ensaio é efetuado a uma temperatura ambiente (Tabela 13).

Tabela 13 - Resultados ensaio Charpy para o material ASTM 80-55-06

	CP's	Área (cm ²)	Energia Absorvida (J)	Resistência ao Impacto (J/cm ²)
Com entalhe a $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$	1	0,794	2,94	3,71
	2	0,774	1,96	2,53
	3	0,792	2,94	3,72
	Média	0,787	2,61	3,32
	Desvio padrão	0,01	0,57	0,68
Com entalhe a $21\text{ }^{\circ}\text{C}$	1	0,794	2,94	3,70
	2	0,800	2,94	3,68
	3	0,795	2,94	3,70
	Média	0,796	2,94	3,69
	Desvio padrão	0,00	0,00	0,01
Sem entalhe a $21\text{ }^{\circ}\text{C}$	1	0,989	9,81	9,92
	2	0,996	10,79	10,83
	3	0,995	9,81	9,86
	Média	0,993	10,14	10,20
	Desvio padrão	0,00	0,57	0,54

Fonte: do autor.

Valores referentes à resistência ao impacto foram inferiores aos encontrados para o aço fundido AAR M-201. Esta redução interfere significativamente na fragilidade da estrutura estudada.

4.3.5 Ensaio de fadiga

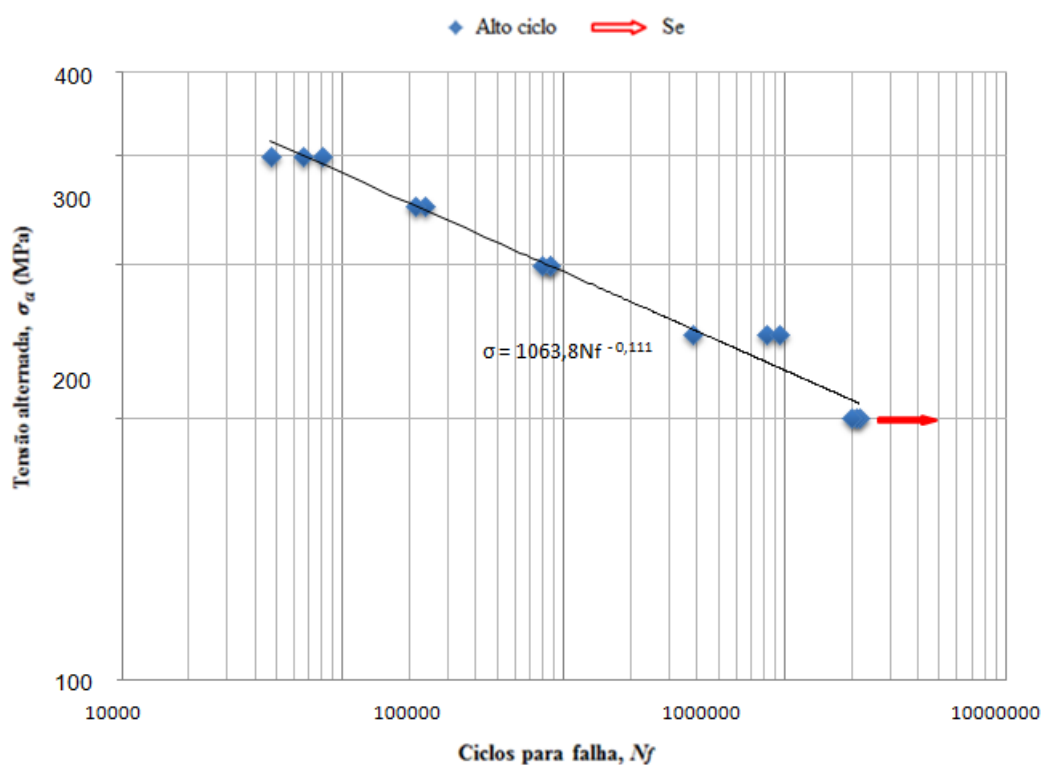
Os dados obtidos por meio de 27 amostras ensaiadas à fadiga do material ASTM 80-55-06 possibilitaram a determinação da curva $S-N$ log-log (Figura 28) e o limite de resistência à fadiga (Figura 29).

Da mesma forma que a curva $S-N$ foi conseguida para o aço, o ferro fundido apresentou por meio do método dos mínimos quadrados com ajuste potencial de tendência para a região de alto ciclo, a seguinte equação:

$$\sigma = 1063,8N_f^{-0,111}$$

A equação acima permite a determinação do número de ciclos (N_f) do material, quando o mesmo for submetido a uma tensão superior (σ) ao seu limite de resistência à fadiga.

Figura 28 - Curva $S-N$ para o ferro fundido ASTM 80-55-06



Fonte: do autor.

Como realizado para o aço, o método *Up-and-Down* também foi empregado na determinação da resistência mecânica do ASTM 80-55-06. Como observado na Tabela 14, foram utilizados um total de 10 amostras, sendo que 6 delas não falharam e 4 romperam. O

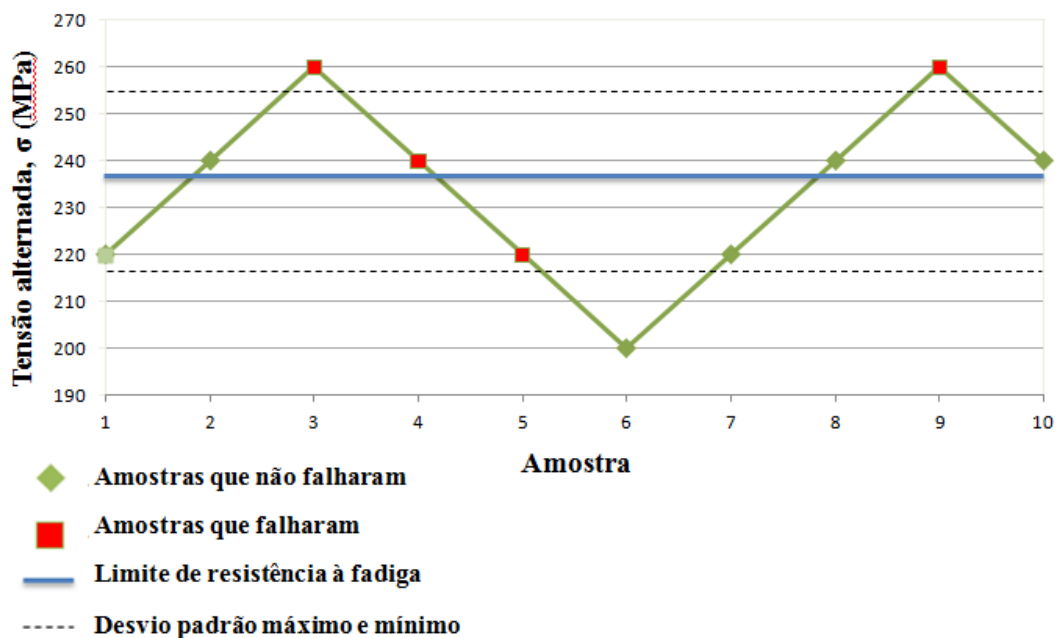
limite de resistência à fadiga obtido, assim como o desvio padrão, foi de 237 MPa e ± 19 MPa respectivamente. Pode-se observar a curva *Up-and-Down* na Figura 29.

Tabela 14 - Resultados das amostras utilizadas no método *Up-and-Down* para o ferro fundido ASTM 80-55-06

Amostra	Tensão (Mpa)	Ocorreu falha?
1	220	Não
2	240	Não
3	260	Sim
4	240	Sim
5	220	Sim
6	200	Não
7	220	Não
8	240	Não
9	260	Sim
10	240	Não

Fonte: do autor.

Figura 29 - Curva *Up-And-Down* do ferro fundido ASTM 80-55-06



Fonte: do autor.

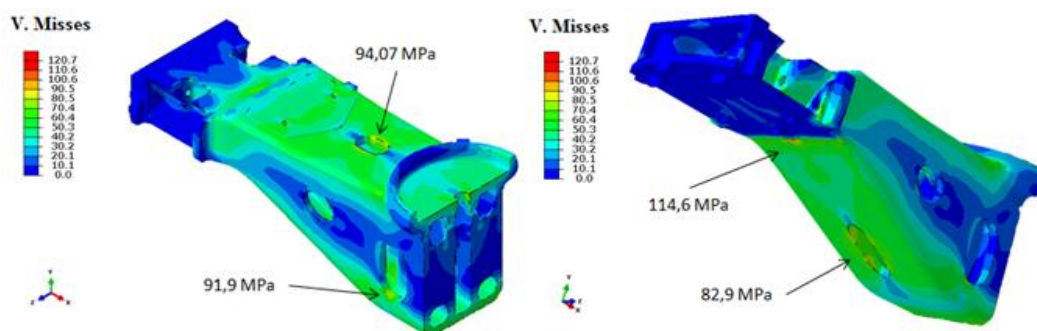
4.3.6 Análise da tensão máxima utilizando elementos finitos

A análise de elementos finitos para o ferro fundido selecionado foi obtida como forma comparativa entre este material e o aço fundido utilizado atualmente. Esta análise também será útil na averiguação dos pontos de elevada tensão, conferindo se condiz com os critérios exigidos por norma.

Os dados de entrada, de acordo com Guesser (2009) e o fabricante do material (Tupy), foram o módulo de elasticidade de 172 GPa, coeficiente de Poisson de 0,275 e densidade com valor de 7,25 g/cm³.

Os pontos que apresentaram maiores tensões podem ser observados na Figura 30.

Figura 30 - Análise da carga isolada para o ferro fundido nodular

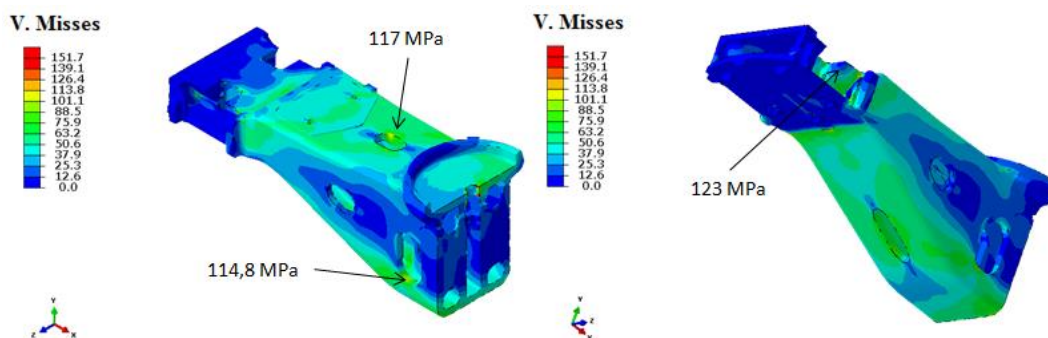


Fonte: do autor.

A máxima tensão obtida, quando aplicada uma carga isolada, foi de 114,6 MPa. Esta tensão permaneceu dentro dos parâmetros exigidos pela norma.

A Figura 31 explica o comportamento da travessa quando uma carga combinada incide sobre a mesma. Estas cargas imprimem uma tensão máxima no fundido de 123 MPa. Assim como no estudo da carga isolada, a carga combinada também esteve dentro da faixa admissível por norma.

Figura 31 - Análise de carga combinada para o ferro fundido nodular

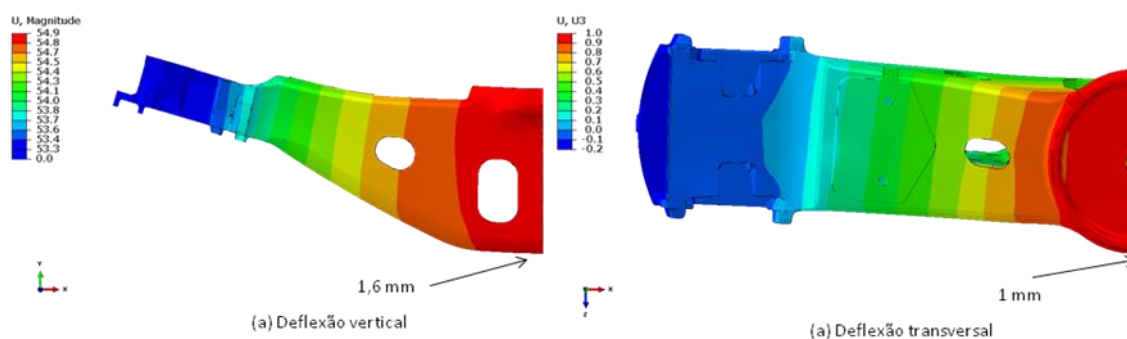


Fonte: do autor.

4.1.7 Análise da deflexão máxima utilizando elementos finitos

Por meio da aplicação da carga vertical e perpendicular sobre o fundido, na Figura 32 o comportamento da estrutura é evidenciado.

Figura 32 - Deflexão máxima para o ferro fundido nodular



Fonte: do autor.

Neste estudo, a deflexão vertical foi de 1,6 mm enquanto a transversal de 1 mm. Segundo a AAR, as deflexões não poderão exceder os valores de 2,31 mm e 1,52 mm, respectivamente, portanto, ficando dentro do exigido.

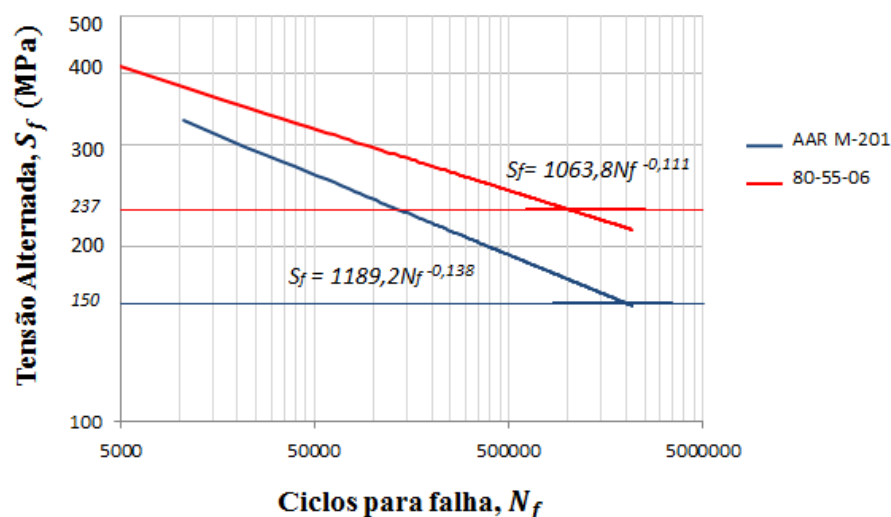
5 ANÁLISE COMPARATIVA

A dureza do ferro fundido nodular apresentou-se aproximadamente 40% superior aos valores encontrados nos corpos de prova ensaiados do aço AAR M-201.

Por meio dos dados alcançados no ensaio de tração, uma prévia conclusão poderia ser tomada, de que os dois materiais, por apresentarem limites de resistências à tração próximos, também mostrariam similariedade nos valores de limite de resistência à fadiga, já que esta propriedade influi diretamente sobre a fadiga de flexão rotativa, o que não é evidenciado nos resultados (Figura 33). Este fato se explica basicamente por dois fatores:

- O material utilizado de ferro fundido nodular foi um perfil fundido FUCO, proveniente de um processo de fundição contínuo, reduzindo consideravelmente muitos dos defeitos típicos do processo de fundição convencional, como bolhas de gás, rechupes, inclusões, entre outros.
- A grafita em forma de nódulos, de acordo com a literatura, age bloqueando frequentemente as microtrincas que propaga-se durante o teste, aumentando a resistência à fadiga do respectivo componente (Guessser, 2009).

Figura 33 - Gráfico $S-N$ para o aço AAR M-201 x ASTM 80-55-06



Fonte: do autor.

O material 80-55-06 obteve valores muito inferiores ao aço fundido no que diz respeito ao ensaio de impacto. Este efeito é principalmente devido à concentração superior de

carbono no ferro fundido quando comparado com o aço fragilizando-o e por consequência, afetando a tenacidade.

Os valores obtidos na análise de elementos finitos, para ambos os materiais, ficaram de acordo com a norma. Isso se deve principalmente pelo fato de que somente são levadas em conta as deformações elásticas, sendo muito semelhantes entre os componentes.

CONCLUSÕES

A comparação entre os dois materiais revelou que o aço apresentou um limite de resistência mecânica superior ao encontrado no ferro fundido ASTM 80-55-06, sendo que este último material não adquiriu valores mínimos exigidos por norma (AAR). A alternativa cabível, para se elevar o valor de limite de resistência, é por meio da têmpera seguida de revenimento.

No que diz respeito ao limite de escoamento, o ferro fundido nodular teve valor 37% superior ao exigido por norma, não havendo restrições aplicadas por parte dela.

Valores de alongamento e impacto foram muito inferiores aos presentes no aço. Tais diferenças eram esperadas, já que o ferro fundido apresenta uma concentração maior de carbono, prejudicando a ductilidade e a tenacidade do componente.

Imagina-se que o baixo alongamento constatado para o ferro fundido nodular não seja parâmetro crítico, já que a travessa central não pode atingir a deformação plástica quando estiver em trabalho, caso contrário, qualquer falha presente no componente possibilitaria a quebra abrupta do mesmo. Por este motivo o coeficiente de segurança deverá ser elevado, o que é constatado, sendo para o aço 2,9 e 3,9 para o ferro fundido ASTM 80-55-06. O acréscimo perceptível do coeficiente é devido a diferença de tensão de escoamento entre ambos os materiais.

Materiais que apresentam valores de tenacidade baixa podem sofrer facilmente a ruptura, já que o componente não poderá sofrer carga súbita de impacto, condição difícil em um truque ferroviário. Segundo Chiaverini (1996) e Guesser (2009), algumas alternativas podem ser tomadas para amenizar a baixa tenacidade, embora á perda de resistência mecânica:

- Aumento da quantidade de ferrita na matriz por intermédio de tratamento térmico de recozimento, ou
- Diminuição da quantidade de perlita com o aumento da inoculação, acréscimo da quantidade de Si e diminuição de resíduos (manganês e cobre).
- Aumento da nodularização, visto que os nódulos não apresentam esferoidização perfeita, o que facilita a nucleação de trincas.

- Diminuição do número de nódulos, o que diminui a distância entre as partículas de grafita.

Nos ensaios de fadiga por flexão rotativa, o material ASTM 80-55-06 apresentou um limite de resistência superior ao aço. No que tange os corpos de prova de ferro fundido nodular, deve-se ressaltar que os mesmos foram submetidos ao ensaio de fadiga por flexão rotativa sem passarem pelo processo de polimento, no entanto, ficaram com rugosidade exigida por norma (0,2 μm).

Pelo fato de que os dois materiais apresentam praticamente os mesmos valores de densidade, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson, não foram perceptíveis grandes alterações estruturais perante as análises de elementos finitos.

Portanto, pode-se concluir que o objetivo do trabalho em correlacionar o aço fundido AAR M-201 grau b+ a um ferro fundido nodular, foi parcialmente atingido. Esta afirmação pode ser feita por meio dos dados obtidos de acordo com os diversos ensaios realizados.

Referente ao custo pago ao material selecionado (APÊNDICE I), este foi inferior ao custo atual do aço AAR M-201 grau b+ pago pela Randon Implementos. Um valor que, com o montante de produtos faturados nos próximos projetos, proporcionará uma redução de custo significativa, sendo este um dado satisfatório para prosseguimento de futuros estudos para validação do produto.

Recomenda-se o estudo da classe ASTM 65-45-12 de ferro fundido nodular capaz de ser empregado na travessa central do truque ferroviário de carga, o qual possui uma maior ductilidade e tenacidade quando comparado com o material ASTM 80-55-06.

Julga-se necessário o acréscimo do teor de silício para o material 80-55-06 a fim de diminuir a quantidade de perlita elevando a tenacidade.

Sugere-se a verificação do comportamento do material 80-55-06 perante tratamentos térmicos que possibilitem o aumento da tenacidade do componente.

É necessário ainda, o estudo do comportamento da viga central sob aplicação de cargas transversais e ensaio de fadiga sob bancada, verificando a necessidade dos elevados valores de tenacidade e ductilidade exigidos por norma.

BIBLIOGRAFIA

- AAR, **Chapter XI section C part II**, Washington, D.C, EUA, 2007.
- AAR, **section S**, Washington, D.C, EUA, 2007.
- ALVES, Avelino. **Elementos Finitos: A Base da Tecnologia CAE**. 4a ed., São Paulo, SP: editora Érica Ltda, 2006.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM A370**: Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products. West Conshohocken, PA, USA. 2013.
- _____. **ASTM E466**: Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials. West Conshohocken, PA, USA. 2013.
- ASM INTERNATIONAL, Heat Treating. In: **ASM Handbooks**. ASM International, v. 4, 1991.
- BANCO NACIONAL DO DESENVOLVIMENTOS – BNDES. **Transportes terrestres lideram desembolsos do BNDES e atinge R\$ 12,1 bilhões (91%)**. Disponível em: http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/bndes/system/modules/br.gov.bndes.prototipo/template/s/tmp_resultado_busca.jsp. Acesso em: 04 mar. 2013.
- BHADESHIA, H. K. D. H; HONEYCOMBE, R. W. K; **Steels: Microstructure and Properties**, 3ed. Oxford:butterworth-Heinemann, 2006.
- CALLISTER, W. D., **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 8.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.
- CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos: características gerais, tratamentos térmicos, principais tipos**. 7.ed. São Paulo: ABM, 2005.
- CHIAVERINI, V. **Tecnologia mecânica**. 2.ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1986.
- CHIAVERINI, V. **Tratamento térmico das ligas metálicas**. São Paulo: ABM, 2003.
- COLLINI, L.; PIRONDI, A.; BIANCHI, R.; COVA, M.; MILELLA, P. P., Influence of casting defects on fatigue crack initiation and fatigue limit of ductile cast iron. **Engineering Procedia**, v. 10, 2011.
- COLLINS, J. A. **Failure of Materials in Mechanical Design: Analysis, Prediction, Prevention**. 2 ed. New York: John Wiley & Sons, 1993.
- FERREIRA, J. M. G. C. **Tecnologia da Fundição**, 2.ed. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 2007.
- FERRO, P.; LAZZARIN, P.; BERTO, F., Fatigue properties of ductile cast iron containing chunky graphite. **Materials Science and Engineering A**, v. 554, Sep, 2012.
- FONSECA, Jun. **Apostila Ferramentas de Simulação em Mecânica: Elementos Finitos**.2002.
- GUESSER, W. L. **Propriedades Mecânicas dos Ferros Fundidos**. São Paulo: Editora Blucher, 2009.

HEMANTH, J., Effect of cooling rate on dendrite arm spacing (DAS), eutectic cell count (ECC) and ultimate tensile strength (UTS) of austempered chilled ductile iron. **Materials and Design**, v, 21,2000.

HEMANTH, J., Microstructure, mechanical properties and wear behavior of metallic, nonmetallic and deep cryogenically chilled ASTM A216 WCB steel. **Journal of Alloys and Compounds**. v. 506, n.2, Set, 2010.

HUTTON, David V. **Fundamentals of finite element analysis**. Pullman, WA, USA: McGraw-Hill, 2004.

KOERICH, A. L.; MENDES, M. M.; WARMLING, G.; AL-RUBAIE, K. S., Efeito do antimônio na matriz e propriedades mecânicas do ferro fundido nodular. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, 6, 2011. Caxias do Sul. **Trabalhos**. Caxias do Sul: Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas, 2011. Disponível em: <

<http://alvarestech.com/temp/cobef2011/grima.ufsc.br/cobef2011/media/trabalhos/COF11-0017.pdf>.> Acessado em: 29 mai. 2013.

MALUF, O. **Influência do rolamento no comportamento em fadiga de um ferro fundido nodular perlítico**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Área Interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais, da EESC, IFSC e IQSC, Curso de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia dos Materiais da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

MRF. **O mais completo guia do setor ferroviário brasileiro**. São Paulo, 2012.

PALMA, E. S.; MANSUR, T. R.; FERREIRA SILVA Jr, S.; ALVARENGA Jr, A., Fatigue damage assessment in AISI steel using Barkhausen noise. **International Journal of Fatigue**, v. 27, Nov, 2005.

POOK, L. **Metal Fatigue: What It Is, Why It Matters**. 1ed. Dordrecht: Springer, 2007.

RANDON S/A IMPLEMENTOS E PARTICIPAÇÕES (Caxias do Sul, RS). Erino Tonon. **Disposição construtiva aplicada a truque de vagão ferroviário**. BR n. UM 8400557-2, 21 mai. 2004, 27 dez. 2005.

RANDON S/A IMPLEMENTOS E PARTICIPAÇÕES. **Empresa: Perfil**. Disponível em: <http://www.randonimplementos.com.br/pt/enterprise>. Acesso em: 15 fev. 2013.

SAIKAEW, C.; WIENGWISSET, S., Optimization of molding sand composition for quality improvement of iron castings. **Applied Clay Science**, v, 67-68, 2012.

SHIGLEY, J. E; MISCHKE, C. R; BUDYNAS, R. G. **Projeto De Engenharia Mecânica**. 7 ed. Porto Alegre: Bookman, 2005.

SHIRANI, M.; HARKEGARD, G., Fatigue life distribution and size effect in ductile cast iron for wind turbine components. **Engineering Failure Analysis**, v. 18, Jan, 2011.

SIEGEL, M. **Fundição**, 10.ed. São Paulo: ABM, 1978.

SILVA, A. L. C.; MEI, P. R.; **Aços e ligas especiais**. 2 ed. São Paulo: Editora Blucher, 2006.

SILVA, A. S. C.; BRAGA, D. U.; NEVES, F. O.; GONÇALVES, F. E. V., Metodologia baseada na técnica de projeto voltado para modelagem de peças fundidas em areia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, 6, 2011. Caxias do Sul. **Trabalhos**. Caxias do Sul: Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas, 2011. Disponível em:

<<http://alvarestech.com/temp/cobef2011/grima.ufsc.br/cobef2011/media/trabalhos/COF11-0107.pdf>> Acessado em: 29 mai. 2013.

SILVA, André S. Análise de Vida em Fadiga e Ensaio de Validação de Rodas de Caminhões Rodoviários, 2012 – 92 f. Trabalho de conclusão de curso de Engenharia Mecânica, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2012.

SOUZA, Prof. Remo Magalhães. **O Método dos Elementos Finitos Aplicado ao Problema de Condução de Calor**. Belém: Universidade Federal do Pará, 2003. Disponível em: **78** <<http://www.inf.ufes.br/~luciac/fem/livros-fem/ApostilaElementosFinitosNiCAE.pdf>>. Acesso em: 25 ago. 2013.

SOUZA, S. A. **Ensaio Mecânico de Materiais Metálicos: Fundamentos teóricos e práticos**. 5^o ed. São Paulo: Blucher, 1982.

SOUZA, T. N. F. **Aços fundidos**. Belo Horizonte: FIEMG, 2001.

TORRE, J. **Manual prático de fundição: e elementos de prevenção de corrosão**. São Paulo: Hemus, 2004.

TURNQUIST, D.; SCHMIDT, F.; DANKO, M., Techniques Used in the Failure Analysis of Railcar Bolsters. **Microscopy and Microanalysis**. v. 12, Aug, 2006.

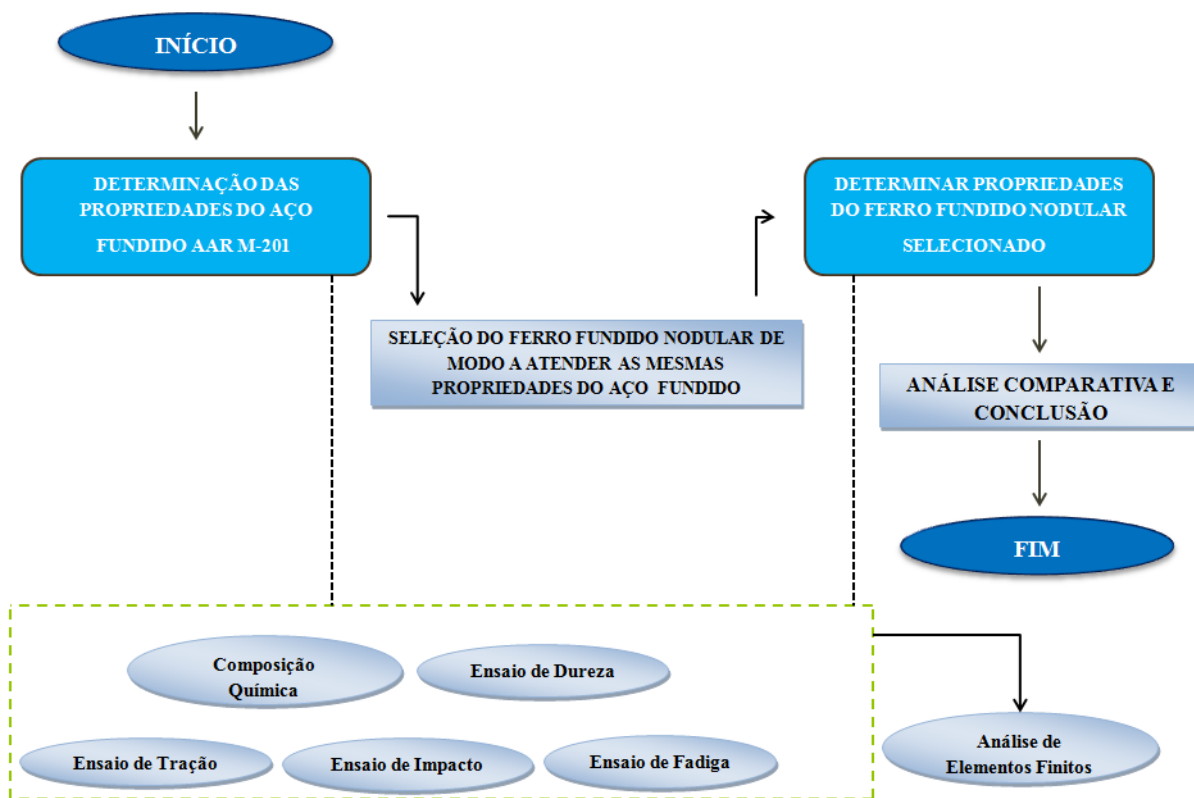
VIGANICO, C. E. H. **Avaliação dinâmica de veículos ferroviários através de um sistema multicorpos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFRGS, Porto Alegre, 2010.

VILLARES; **Aços para fundição: aços carbono e aços ligados**. 2.ed. Villares Indústria de Base SA, 1983.

XIAO, H. D.; CHENG, J. L.; YU, L. Q.; YONG, Z.; FU, D. N.; CHONG, H. P.; JIE, C. Dendrite growth of energetic material RDX. **Journal of Crystal Growth**, v. 351, Jul, 2012.

ZYBELL, L.; CHAVES, H.; KUNA, M.; MOTTITSCHKA, T.; PUSCH, G.; BIERMANN, H., Optical in situ investigations of overload effects during fatigue crack growth in nodular cast iron. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 95, Nov, 2012.

APÊNDICE A – FLUXOGRAMA DE TRABALHO



Fonte: do autor.

APÊNDICE B – ENSAIO DE TRAÇÃO PARA O MATERIAL AAR M – 201

UCS - Laboratório de Ensaios Mecânicos
REGISTRO DE ENSAIO LAMEC - FE102 REVISÃO - 00 (SET/2007)

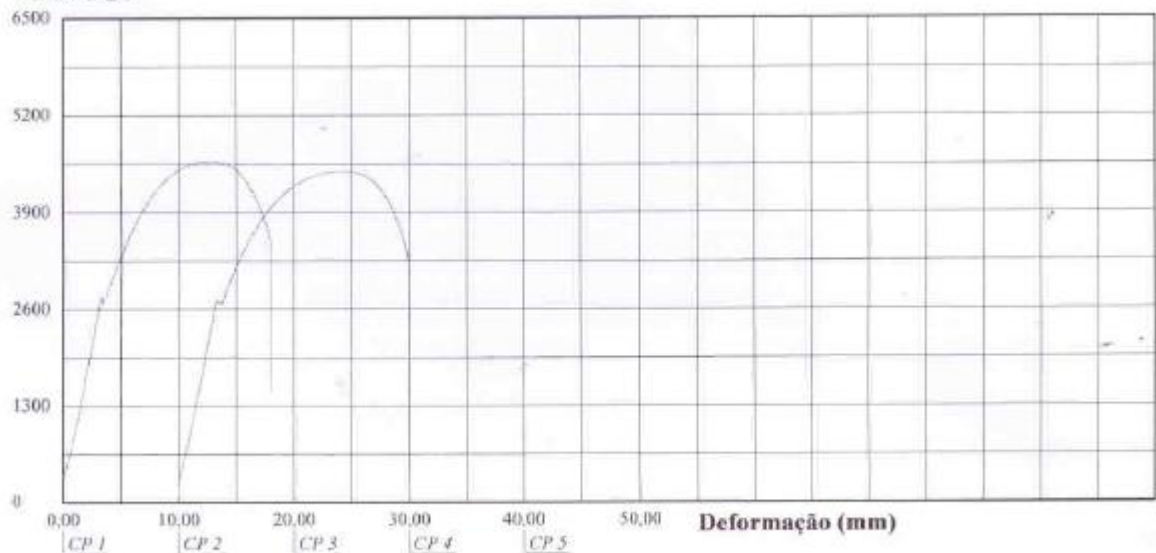
Relatório de Ensaio

Máquina: **Emic DL20000** Célula: **Trd 12** Extensômetro: - Data: **11/03/2013** Hora: **15:09:36** Trabalho n° **1807**
Programa: **Tesc versão 3.01** Método de Ensaio: **20T_TRAÇÃO CILINDRICO**
Ident. Amostra: >>>>>>>>>> Cliente: **TCC Schwanke** Temp.(°C): **22,6** - Ident. n°: **01 e 02** S.S.: **Teste - Folha: 02 de 02**

Corpo de Prova	Identif n°	Diâmetro (mm)	Velocidade de ensaio (mm/min)	Força *Escoam. (kgf)	Força Maxima (kgf)	Comp. Inicial (Lo) (mm)	Comp. Final (Lf) (Medido) (mm)	Estricção Medida (mm)
CP 1	01	9,96	8	2753	4597	50	61,97	6,32
CP 2	02	9,76	8	2715	4453	50	63,16	6,37

*Escoam. - ponto da curva correspondente ao escoamento convencional: 0,2% 0
Método de ensaio segundo norma NBR ISO 6892:02 0
Paquímetro utilizado P(): 7
: 0
Segmento X Y: 0,00
Segmento Y Z: 0,00
Segmento Y Z': 0,00
Segmento Y Z'': 0,00

Força (kgf)



Observação:

☐☐ IDENTIFICAÇÃO DO CLIENTE: 02 corpos de prova aço AAR M-201 grau B+; código: 1000000094587; cliente: Randon; identificados por: 01 e 02

APÊNCIDE C – ENSAIO DE TRAÇÃO PARA O MATERIAL 80-55-06

UCS - Laboratório de Ensaios Mecânicos
REGISTRO DE ENSAIO LAMEC - FE102 REVISÃO - 00 (SET/2007)

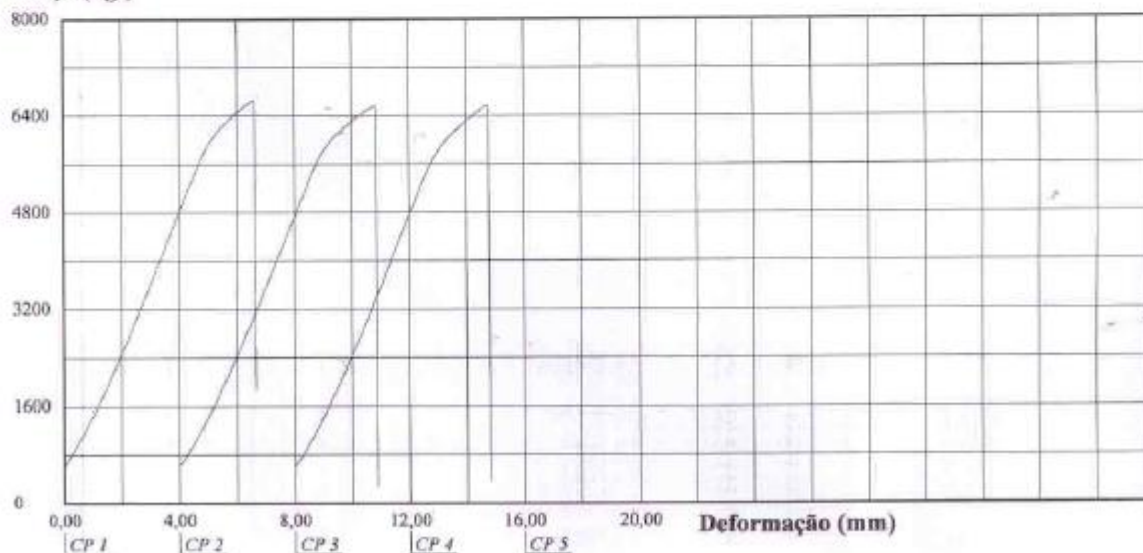
Relatório de Ensaio

Máquina: **Emic DL20000** Célula: **Trd 12** Extensômetro: - Data: **04/10/2013** Hora: **16:50:31** Trabalho n° **0116**
 Programa: **Tese versão 3.01** Método de Ensaio: **20T_TRAÇÃO CILINDRICO**
 Ident. Amostra: > Cliente: **TCC Rui Schwanke** Temp.(°C): **20,1** Identif. n°: **01, 02 e 03** S.S.: **257218** Folha: **02 de 02**

Corpo de Prova	Identif n°:	Diâmetro (mm)	Velocidade de ensaio (mm/min)	Força *Escoam. (kgf)	Força Máxima (kgf)	Comp. Inicial (Lo) (mm)	Comp. Final (Lf) (Medido) (mm)	Estricção Medida (mm)
CP 1	01	12,49	8	6013	6651	60	61,24	12,29
CP 2	02	12,48	8	5878	6557	60	61,20	12,37
CP 3	03	12,47	8	5823	6568	60	61,33	12,31

*Escoam. - ponto da curva correspondente ao escoamento convencional: 0,2%: 0
 Método de ensaio segundo norma NBR ISO 6892:02: 0
 Paquímetro utilizado P(): 0
 : 0
 Segmento X Y: 0,00
 Segmento Y Z: 0,00
 Segmento Y Z': 0,00
 Segmento Y Z'': 0,00


Força (kgf)



Observação:

IDENTIFICAÇÃO DO CLIENTE: 03 corpo de prova de ferro fundido nodular para TCC Rui Schwanke (Estágio II)

APÊNDICE D – ENSAIO DE DUREZA PARA O MATERIAL AAR M – 201

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL LAMEC – LABORATÓRIO DE ENSAIO MECÂNICOS				Identificação: LAMEC - FE 101	
REGISTRO DE ENSAIO				Revisão 02	
				Agosto/2011	
Cliente: <u>TCC Rui Schwonke</u> Nº SS: <u>255622</u> Temp.: <u>216</u> °C Data: <u>10/05/2013</u>					
Identificação do cliente: <u>02 CORROS DE PROVA DE AÇO FUNDIDO MATERIAL AAR M-201, IDENTIFICADOS POR: 01e02</u>					
RESULTADOS:					
<u>IDENTIFICAÇÃO</u>	<u>DUREZA</u>	<u>HB 187,5</u>	<u>ESFERA 2,5mm</u>		
<u>AMOSTRA 01</u>	<u>164 160</u>	<u>157 163</u>	<u>163</u>		
<u>AMOSTRA 02</u>	<u>163 163</u>	<u>164 163</u>	<u>164</u>		
OBSERVAÇÕES:					
<u>EQUIPAMENTO USADO PARA APLICAÇÃO DE CARGA: WPM 076741</u>					
<u>EQUIPAMENTO USADO NA LEITURA DAS IMPRESSÕES: WPM 005432</u>					
Executor: 				Visto: _____	

APÊNDICE E – ENSAIO DE DUREZA PARA O MATERIAL 80-55-06

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL LAMEC – LABORATÓRIO DE ENSAIO MECÂNICOS		Identificação: LAMEC - FE 101		
REGISTRO DE ENSAIO		Revisão 02		
		Agosto/2011		
Cliente: <u>TCC Rui SCHWANKE</u> Nº SS: <u>257218</u> Temp.: <u>224</u> °C Data: <u>15/10/2013</u> Identificação do cliente: <u>02 CORPO DE PROVA DE FERRO FUNDIDO NODULAR (80-55-06) IDENTIFICADOS POR: 01 e 02</u>				
RESULTADOS:				
IDENTIFICAÇÃO	DUREZA		HB 189,5	ESFERA 2,5MM
AMOSTRA 01	244	239	229	239
AMOSTRA 02	234	229	229	229
OBSERVAÇÕES:				
EQUIPAMENTO USADO PARA APLICAÇÃO DE CARGA: WPM 016441 EQUIPAMENTO USADO NA LEITURA DAS IMPRESSÕES: WPM 005132				
Executor:			Visto:	

APÊNDICE F – ENSAIO DE IMPACTO MATERIAL AAR M-201



Relatório de Ensaio
LAMEC - (FG 205 rev 01)
 Laboratório de Ensaios Mecânicos de Caxias do Sul
 Telefone/Fax: (54) 3218.2168



Cliente: Randon S/A Implementos e Participações Endereço: Av. Abramo Randon, 770 – Interlagos Cidade: Caxias do Sul – RS	Nº 0471/13
Natureza do trabalho: ENSAIO DE IMPACTO	Data do ensaio: 10/06/13 Temperatura: 18,3°C
Identificação do cliente: 03 corpos de prova de 01 amostra de material AAR M-201 grau B+; identificados por: 01, 02 e 03.	Fl: 1/1

Procedimento:

- Energia máxima do pêndulo utilizado: 294 Joules
- Perda por atrito avaliado: 0,76 Joules
- Raio do cutelo: 8 mm
- Entalhe tipo: V2 x 10
- Temperatura de ensaio: -7 °C.
- O ensaio foi realizado de acordo com o procedimento interno PE 005 rev 05, em atendendo à norma ASTM E 23 - 12c

Equipamentos utilizados:

- Máquina de impacto, marca: Webstoffprüfmachine, nº série: 423; Certificação: IPT nº 113791-101, validade: 07/12/2013
- P/ Largura: - Paquímetro – P7 (0-200) mm, marca: Mitutoyo – Certificado de calibração nº 27024/2012; válido até 12/09/13.
- P/ Entalhe: - Paquímetro – P6 (0-200) mm, marca: Mitutoyo – Certificado de calibração nº 27023/2012; válido até 12/09/13.
- Termopar GULTerm 200 – PT100-1, certificado de calibração nº J016895/2013, validade: 28/04/15.

A incerteza expandida de medição relatada "U" é declarada como incerteza padrão de medição multiplicada pelo fator de abrangência k, o qual para uma distribuição t com graus de liberdade efetivos [Veff] corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%. A incerteza padrão de medição foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02 [1999]. Os valores de k estão apresentados na tabela de resultados.

RESULTADOS:

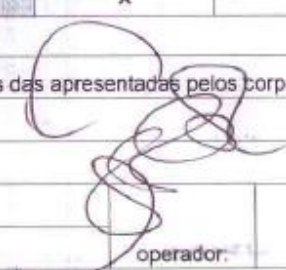
Identificação nº	Área (cm²)	Energia Absorvida (J)	Resistência ao Impacto (J/cm²)	U máx. (%)	k	[Veff]
01	0,807	27,5	34,0	2,1	2,00	Infinito
02	0,797	33,3	41,8	1,7	2,00	Infinito
03	0,801	41,2	51,4	1,4	2,00	Infinito

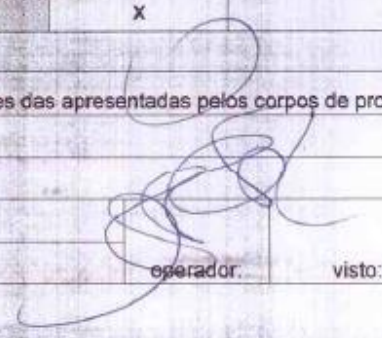
Observação: Gravidade local = 9,79017 m/s²

- Os resultados têm significação restrita às amostras ensaiadas, não sendo autorizado reprodução parcial deste documento.
- O critério de amostragem adotado foi determinado pelo cliente sobre o qual assume a responsabilidade.


 Eng. Albano Luiz Weber
 Sign. Aut. - CREA RS65914

APÊNDICE G - ENSAIO DE IMPACTO MATERIAL ASTM 80-55-06

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL LABORATÓRIO DE ENSAIOS MECÂNICOS				Identificação FE 111		
FORMULÁRIO GERAL REGISTRO DE ENSAIO				Revisão 04		
				Abril/13		
Cliente: Tcc R. Schwanke		S.S. N°: 257237		Data do ensaio: 22/10/13		
Natureza do trabalho: Ensaio de IMPACTO				Temperatura: 21,9 °C		
Identificação do cliente: 03 corpos de prova ferro fundido nodular 80-55-06; identificados por: 01, 02 e 03						
Temperatura de Ensaio: -7 °C Energia máxima do pêndulo utilizado: 294 JOULES Perda máxima de energia do pêndulo por atrito: 0,76 JOULES Raio do Martelo: (8) mm , R = 8 Método de ensaio segundo norma: ASTM E 23/12c Entalhe tipo: 2Vx10 Paquímetro: largura P3 Paquímetro: entalhe P2						
Resultados: Acondicionamento dos corpos de prova min. de 5 minutos: S ou N S						
Identif.	Dimensões (mm x mm)	Energia absorvida (Kgf x m)		Identif.	Dimensões (mm x mm)	Energia absorvida (Kgf x m)
01	9,98 x 7,96	0,3			x	
02	9,97 x 7,98	0,2			x	
03	9,96 x 7,95	0,3			x	
	x				x	
	x				x	
	x				x	
	x				x	
	x				x	
	x				x	
() As tolerâncias dimensionais especificadas pela norma são diferentes das apresentadas pelos corpos de prova						
				 operador: visto:		

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL LABORATÓRIO DE ENSAIOS MECÂNICOS			Identificação FE 111		
FORMULÁRIO GERAL REGISTRO DE ENSAIO			Revisão 04		
			Abril/13		
Cliente: Tcc Rui Schwanke	S.S. Nº: 257218	Data do ensaio: 28/10/13	Temperatura: 21 °C		
Natureza do trabalho: Ensaio de IMPACTO					
Identificação do cliente: 03 corpos de prova de ferro fundido nodular FF 80-55-06; identificados por: 01, 02 e 03					
Temperatura de Ensaio: 21,0 °C Energia máxima do pêndulo utilizado: 294 JOULES Perda máxima de energia do pêndulo por atrito: 0,76 JOULES Raio do Martelo: (8) mm , R = 8 Método de ensaio segundo norma: ASTM E 23/12c Entalhe tipo: sem entalhe Paquímetro: largura P3 Paquímetro: entalhe P2					
Resultados: Acondicionamento dos corpos de prova mín. de 5 minutos: S ou N n					
Identif.	Dimensões (mm x mm)	Energia absorvida (Kgf x m)	Identif.	Dimensões (mm x mm)	Energia absorvida (Kgf x m)
01	9,95 x 9,94	1,0		x	
02	9,96 x 10,01	1,1		x	
03	9,94 x 10,02	1,0		x	
	x			x	
	x			x	
	x			x	
	x			x	
	x			x	
	x			x	
() As tolerâncias dimensionais especificadas pela norma são diferentes das apresentadas pelos corpos de prova					
			 operador: visto:		

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL LABORATÓRIO DE ENSAIOS MECÂNICOS		Identificação FE 111			
FORMULÁRIO GERAL REGISTRO DE ENSAIO		Revisão 04			
		Abril/13			
Cliente: Tcc Rui Schwanke	S.S. Nº: 257218	Data do ensaio: 28/10/13			
Natureza do trabalho: Ensaio de IMPACTO		Temperatura: 21 °C			
Identificação do cliente: 03 corpos de prova de ferro fundido nodular FF 80-55-06; identificados por: 01, 02 e 03					
Temperatura de Ensaio: 21,0 °C Energia máxima do pêndulo utilizado: 294 JOULES Perda máxima de energia do pêndulo por atrito: 0,76 JOULES Raio do Martelo: (8) mm , R = 8 Método de ensaio segundo norma: ASTM E 23/12c Entalhe tipo: V2x10 Paquímetro: largura P3 Paquímetro: entalhe P2					
Resultados: Acondicionamento dos corpos de prova min. de 5 minutos: S ou N n					
Identif.	Dimensões (mm x mm)	Energia absorvida (Kgf x m)	Identif.	Dimensões (mm x mm)	Energia absorvida (Kgf x m)
01	7,95 x 9,99	0,3		x	
02	8,00 x 10,00	0,3		x	
03	7,99 x 9,95	0,3		x	
	x			x	
	x			x	
	x			x	
	x			x	
	x			x	
	x			x	
() As tolerâncias dimensionais especificadas pela norma são diferentes das apresentadas pelos corpos de prova					
		operador:		visto:	

APÊNDICE H – ANÁLISE DE COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO MATERIAL AAR M-201

Programa: FE-10

10/05/2013 11:23:43

Comentário: Aço Baixa Liga - CARBONOX - 12172/00

Singulares

Elementos: Concentrações

N°SOLICITAÇÃO: XXXXXXXXXXXXX

LIGA: 407/2

CLIENTE: Rui

AMOSTRA: CP

OPERADOR: José

No	C %	Si %	Mn %	P %	S %	Cr %	Mo %
1	0.2374	0.541	1.074	0.0286	0.0108	0.4268	0.0599
2	0.2319	0.557	1.067	0.0313	0.0102	0.4233	0.0589
No	Ni %	Al %	Co %	Cu %	Nb %	Ti %	V %
1	0.0996	0.0349	<0.0500	0.0415	0.0142	0.0161	<0.0050
2	0.0989	0.0327	<0.0500	0.0454	0.0129	0.0157	<0.0050
No	W %	Sn %	Fe %				
1	<0.0500	0.0121	97.40				
2	<0.0500	0.0110	97.40				

APÊNDICE I – ANÁLISE DE CUSTO

Travessa Central do Truque (7x12)			
Aço AAR M201	Custo	R\$	10.050,00
	Peso (kg)		960
	Custo/kg	R\$	8,58
	Custo fundidos por truque	R\$	10.050,00
	Custo fundidos por vagão	R\$	20.100,00
Ferro fundido nodular	Custo	R\$	6.624,00
	Peso (kg)		960
	Custo/kg	R\$	6,90
	Custo fundidos por truque	R\$	6.624,00
	Custo fundidos por vagão	R\$	13.248,00

Ganhos Estimados Aço AAR M201 x Ferro Fundido Nodular	
Fundido por truque:	R\$ 3.426,00
Fundido por vagão:	R\$ 6.852,00