



**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS  
UNIDADE ARAXÁ**

**ANA CAROLINA CORREIA DO CARMO**

**ANÁLISE ESTRUTURAL ATRAVÉS DE SIMULAÇÃO  
COMPUTACIONAL DE CAÇAMBAS DE CAMINHÃO  
BASCULANTE NA MINERAÇÃO UTILIZANDO O AÇO  
MICROLIGADO AO NIÓBIO**

**ARAXÁ/MG**

**2017**

**ANA CAROLINA CORREIA DO CARMO**

**ANÁLISE ESTRUTURAL ATRAVÉS DE SIMULAÇÃO  
COMPUTACIONAL DE CAÇAMBAS DE CAMINHÃO  
BASCULANTE NA MINERAÇÃO UTILIZANDO O AÇO  
MICROLIGADO AO NIÓBIO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Minas, do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Minas.

Orientador: Prof<sup>a</sup>. Me. Renata Calciolari  
Coorientador: Prof. Me. Guilherme Henrique Rosa

**ARAXÁ/MG**

**2017**

ANA CAROLINA CORREIA DO CARMO

**ANÁLISE ESTRUTURAL ATRAVÉS DE SIMULAÇÃO  
COMPUTACIONAL DE CAÇAMBAS DE CAMINHÃO BASCULANTE  
NA MINERAÇÃO UTILIZANDO O AÇO MICROLIGADO AO NIÓBIO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Minas do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Minas.

Araxá, dia 23 de junho de 2017

*Renata Calciolari*

\_\_\_\_\_  
**Presidente e Orientador: Prof.ª. Me. Renata Calciolari**  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade Araxá

*Guilherme Henrique Rosa*

\_\_\_\_\_  
**Membro Titular: Prof. Me. Guilherme Henrique Rosa**  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade Araxá

*Francisco de C. Valente Neto*

\_\_\_\_\_  
**Membro Titular: Prof. Esp. Francisco de C. Valente Neto**  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade Araxá

*Marcela Marina Nascimento de Souza Soares*

\_\_\_\_\_  
**Membro Titular: Prof.ª. Dra. Marcela M. N. de Souza Soares**  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade Araxá

## **DEDICATÓRIA**

### **DEDICO ESTE TRABALHO**

*Em primeiro lugar, à Deus por ser essencial na minha vida e me conduzir pelo melhor caminho. À minha família por acreditar em mim e não medir esforços para que eu chegasse até esta etapa da minha vida, aos meus orientadores pela paciência e incentivo que tornaram possível a conclusão deste trabalho. Ao meu amigo Hugo Leandro Rosa pelo incentivo e apoio no desenvolvimento do trabalho e aos meus amigos que direta ou indiretamente contribuíram para as minhas realizações profissionais e pessoais.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus, por se fazer presente em cada passo da minha vida e permitir a concretização dos meus objetivos.

À minha família por todos os ensinamentos dados com muito amor e por acreditarem em meu potencial. Em especial à minha mãe e aos meus irmãos pelo apoio dado durante essa etapa da minha vida.

Ao CEFET-MG, por ter-nos cedido a oportunidade de realizar este Curso.

Aos meus orientadores, Renata Calciolari e Guilherme H. Rosa, que não mediram esforços para o auxílio no desenvolvimento do trabalho.

Ao Engenheiro Mecânico Hugo Leandro Rosa, pela sua prestatividade e gentileza ao me assessorar neste trabalho.

Ao Professor Douglas Magalhães, por toda a assistência a mim cedida.

Ao Professor e Coordenador do Curso Hildor José Seer pela paciência, incentivo e por me proporcionar o conhecimento não apenas racional, mas a manifestação do caráter e afetividade da educação no processo de formação profissional.

Aos meus amigos Michelle Cintra Abud Mariano, Jéssica Lemos Lima, Bruna Starling e Emerson Henrique pela amizade e companheirismo ao longo do curso.

Ao meu amigo Eduardo Beraldo de Souza, pelas oportunidades e conselhos cedidos.

Ao meu amigo Carlos Eduardo Fatobene, pelo auxílio no desenvolvimento do trabalho.

À todos os professores do CEFET-MG que me transmitiram seus conhecimentos e possibilitaram o meu avanço pessoal e profissional.

À todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigada.

## RESUMO

Em trabalhos de lavra de minério é necessário um bom desempenho do caminhão no carregamento e transporte do produto, e uma parte fundamental nesse processo é quanto ao material de que é constituída a caçamba do caminhão, dessa forma, faz-se importante a determinação dos efeitos de cargas sobre estruturas físicas e seus componentes. O presente trabalho tem como intuito expor os benefícios da utilização do aço microligado ao Nióbio, no campo da lavra de minério, ao se fazer uma análise estrutural das caçambas de caminhões basculantes de forma a favorecer o processo de transporte de minério. As técnicas de abordagem serão realizadas por meio da metalografia, permitindo identificar as fases presentes na microestrutura do aço e associá-las com suas propriedades mecânicas, e por simulações efetuadas no software Solidworks para avaliar diversas situações de trabalho da caçamba. Os resultados obtidos foram melhoria na resistência mecânica, dureza, tenacidade e ainda, ganhos em horas de manutenção, redução de custos de transporte e consumo de combustível, além de ganhos ambientais, uma vez que, reduz-se a emissão de gases causadores do efeito estufa decorrentes da produção e transporte de materiais.

**Palavras-chave:** Lavra de minério; Análise estrutural; Caçambas de caminhões; Aço microligado ao Nióbio.

## **ABSTRACT**

In mining operations, a good performance of the truck is required in the loading and in the transportation of the product, and a fundamental part in this process is the material of which the truck's bucket is constituted, thus, it is important to determine the effects of loads on physical structures and their components. The present work aims to expose the benefits of the use of Niobium microalloyed steel, in the field of ore mining, by making a structural analysis of the buckets of dump trucks in order to favor the ore transportation process. The approach techniques will be carried out by means of metallography, allowing the identification of the phases present in the microstructure of the steel and associating them with its mechanical properties, and by simulations performed in the Solidworks software in order to evaluate several bucket work situations. The results obtained were improvement in mechanical resistance, hardness, toughness and also, gains in maintenance hours, reduction of transport costs and fuel consumption, as well as environmental gains, since it reduces the emission of greenhouse gases due to the production and transportation of materials.

**Keywords:** Ore mining; Structural analysis; Truck's bucket; Niobium Microalloyed steel.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 - Rede de elementos finitos bidimensionais.....   | 19 |
| Figura 2 - Vigas de diferentes perfis geométricos.....   | 20 |
| Figura 3 - Vigas de diferentes materiais.....  | 21 |
| Figura 4 - Vigas com diferentes engastes.....  | 21 |
| Figura 5 - Itens de uma caçamba comum.....   | 25 |
| Figura 6 – Informações sobre o sistema de travamento de uma caçamba.....   | 25 |
| Figura 7 - Informações sobre a caixa de carga. ....  | 26 |
| Figura 8 - Informações sobre a tampa traseira de uma caçamba.....  | 27 |
| Figura 9 - Caçamba de caminhão basculante de pedra.....  | 28 |
| Figura 10 - caminhão basculante para materiais granulares e argilas. ....  | 28 |
| Figura 11 - Caçambas com cantos inferiores arredondados.....   | 29 |
| Figura 12 - Caminhão basculante fora de estrada.....   | 30 |
| Figura 13 - Caçamba Meia Cana.....   | 31 |
| Figura 14 - Caçamba Bibloco.....   | 31 |
| Figura 15 - Caçamba Standard.....  | 32 |
| Figura 16 - Desenho esquemático de máquina de ensaio de tração e Curva Esquemática Tensão Versus deformação..... | 37 |
| Figura 17 - Máquina de ensaios universal Wolpert.....  | 37 |
| Figura 18 - Corpo de prova e suas fases durante o ensaio de tração.....  | 38 |
| Figura 19 - Corpo de prova ensaiado com o surgimento do fenômeno de estrição.....                                | 38 |
| Figura 20 - Diagrama de tensão-deformação convencional e real para um material de aço dúctil.....                | 40 |
| Figura 21 - Limite de escoamento definido para aços de baixo C.....  | 40 |
| Figura 22 - Curva de tensão-deformação para alguns tipos de aço.....   | 41 |
| Figura 23 - Teste de dureza Brinell.....   | 42 |
| Figura 24 - Teste de Dureza Rockell.....   | 43 |
| Figura 25 - Medição de dureza Vickers em durômetro do tipo LPM.....  | 44 |
| Figura 26 - Esquema representando a constituição dos aços.....   | 45 |
| Figura 27 - Diagrama de Equilíbrio.....  | 49 |
| Figura 28 - Microestrutura de aços ferríticos (Aço AISI 409).....  | 50 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 29 - Microestrutura de aços martensíticos temperado e revenido.....   | 50 |
| Figura 30 - Microestrutura dos aços inoxidáveis austeníticos.....  | 50 |
| Figura 31 - Máquina de corte a laser .....   | 52 |
| Figura 32 - Prensa de embutimento metalográfico.....   | 53 |
| Figura 33 - Politriz semiautomática.....   | 54 |
| Figura 34 - deposicao do agente polidor .....  | 55 |
| Figura 35 - Imersão do metal no líquido ácido.....   | 56 |
| Figura 36 - Diferenças microestruturais em função dos diferentes teores de Carbono.....  | 57 |
| Figura 37 - Efeito dos elementos de liga na dureza do ferro.....   | 59 |
| Figura 38 - Efeito do Molibdênio na resistência ao revenido da martensita. Curva revenido de aço com 0,1% de C.....                          | 60 |
| Figura 39 -Microestrutura do aço Hardox® 450 .....   | 62 |
| Figura 40 - Aporte de calor recomendado para uma junta soldada de Hardox .....   | 63 |
| Figura 41 - Nível de resistência dos aços Domex formados a frio.....   | 64 |
| Figura 42 - Ataque químico por esfregamento.....   | 69 |
| Figura 43 - Análise da microestrutura do aço microligado ao Níobio por meio do microscópio óptico .....                                      | 70 |
| Figura 44 - A) Foto de um dos corpos de prova antes do ensaio de tração. B) Dimensões do Corpo de Prova reduzido segundo as normas ABNT..... | 70 |
| Figura 45 - Máquina de tração modelo EMIC.....   | 71 |
| Figura 46 - Vista traseira da caçamba - Dimensões básicas em mm.....   | 73 |
| Figura 47 - Vista lateral da caçamba - Dimensões básicas em mm .....   | 74 |
| Figura 48 - Vista isométrica da estrutura.....   | 74 |
| Figura 49 - Espessura das chapas – vista lateral.....  | 75 |
| Figura 50 - Espessura das chapas – vista superior .....  | 76 |
| Figura 51 - Inserção de materiais no banco de dados do programa .....  | 77 |
| Figura 52 - Estudo da análise estática da caçamba.....   | 78 |
| Figura 53 - Seleção de elementos a serem fixados.....  | 79 |
| Figura 54 - Caçamba totalmente apoiada .....   | 80 |
| Figura 55 - Aplicação de cargas na estrutura .....   | 81 |
| Figura 56 - Medidas do caminhão MERCEDEZ 4844 R 8x4.....   | 82 |
| Figura 57 - Medidas da carregadeira Caterpillar 980H .....   | 82 |
| Figura 58 - Altura de impacto do material .....  | 83 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 59 - Criação de malha .....  | 85  |
| Figura 60 - Densidade da malha .....  | 86  |
| Figura 61 - Progresso da geração de malha .....   | 86  |
| Figura 62 - Malha gerada.....   | 87  |
| Figura 63- Micrografia realizada após ataque químico do aço 1020 2mm. Aumento de 200 e 500X .....   | 90  |
| Figura 64 - Microestruturas da amostra de aço microligado ao Nióbio, aumento de 200X(esquerda) e 800X (direita), com ataque de Nital 10% e Bicromato de Potássio, observada através do microscópio óptico. .... | 90  |
| Figura 65 - Micrografia realizada após ataque químico do HARDOX (aço microligado ao Nióbio). Aumento de 200 e 500X. ....  | 91  |
| Figura 66 - Micrografia realizada após ataque químico do DOMEX (aço microligado ao Nióbio). Aumento de 200 e 500X .....   | 92  |
| Figura 67 – Caçamba vazia – Aplicação do aço HARDOX 450 .....   | 96  |
| Figura 68 - Velocidades vertical (Vy) e oblíqua (Vl).....   | 98  |
| Figura 69 - Combinação 2 com HARDOX 450 .....   | 99  |
| Figura 70 - Combinação 2 com DOMEX 700.....   | 100 |

## LISTA DE TABELAS

|   |     |
|---|-----|
| Tabela 1 - Composição química do aço 1020.....                              | 65  |
| Tabela 2 - Composição química da amostra de aço microligado ao Nióbio ..... | 66  |
| Tabela 3 - Composição química do HARDOX 450 .....                           | 66  |
| Tabela 4 - Composição química do DOMEX .....                                | 66  |
| Tabela 5 - Dimensões da parte útil dos corpos de prova .....                | 71  |
| Tabela 6 - Dados para cálculos.....   | 84  |
| Tabela 7 - Condições de trabalho da caçamba .....                           | 87  |
| Tabela 8 - Soldabilidade dos aços .....                                     | 88  |
| Tabela 9 - Resultado dos ensaios de tração .....                            | 93  |
| Tabela 10 - Resultados dos testes de dureza.....                            | 93  |
| Tabela 11 - Propriedades dos materiais aplicados na caçamba .....           | 95  |
| Tabela 12 - Resultados da combinação 1 .....                                | 97  |
| Tabela 13 - Resultados da combinação 2 .....                                | 100 |

## LISTA DE SÍMBOLOS

|                |   |
|----------------|---|
| $\sigma$       | tensão nominal  |
| $\mu$          | deformação  |
| $E$            | módulo de elasticidade do material                      |
| $\epsilon$     | deformação nominal                                      |
| $\delta$       | variação no comprimento de referência do corpo de prova |
| $\sigma_r$     | tensão de resistência à tração                          |
| $\epsilon_f$   | deformação até a fratura                                |
| $\sigma_{adm}$ | tensão admissível                                       |
| $\sigma_{rup}$ | tensão de ruptura                                       |
| $r_{max}$      | resistência máxima                                      |
| $\omega$       | velocidade angular                                      |
| $\Delta\theta$ | variação do espaço angular                              |
| $\Delta t$     | variação do tempo                                       |

## SUMÁRIO

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO .....</b>                                      | <b>15</b> |
| <b>2</b> | <b>REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>                             | <b>17</b> |
| 2.1      | ANÁLISE ESTRUTURAL ATRAVÉS DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL .....  | 17        |
| 2.1.1    | Desenhos paramétricos .....                                  | 17        |
| 2.1.2    | Histórico do método de elementos finitos .....               | 18        |
| 2.1.3    | O Método de Elementos Finitos .....                          | 19        |
| 2.1.4    | A obtenção do modelo experimental .....                      | 22        |
| 2.2      | CAÇAMBAS DE CAMINHÕES PARA A MINERAÇÃO .....                 | 24        |
| 2.3      | AÇO COMUM .....  | 32        |
| 2.3.1    | Tratamentos do Aço .....                                     | 33        |
| 2.4      | OBTENÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS AÇOS .....           | 34        |
| 2.4.1    | Propriedades do aço .....                                    | 34        |
| 2.4.2    | Ensaio mecânicos .....                                       | 36        |
| 2.5      | CLASSIFICAÇÃO DOS AÇOS .....                                 | 45        |
| 2.5.1    | Austeníticos .....   | 48        |
| 2.5.2    | Ferríticos .....   | 48        |
| 2.5.3    | Martensíticos .....  | 48        |
| 2.6      | ANÁLISE METALOGRÁFICA DOS AÇOS .....                         | 51        |
| 2.6.1    | Corte .....  | 51        |
| 2.6.2    | Embutimento .....  | 52        |
| 2.6.3    | Lixamento .....  | 53        |
| 2.6.4    | Polimento .....  | 54        |
| 2.6.5    | Ataque químico .....   | 55        |
| 2.6.6    | Microscopia óptica .....                                     | 56        |
| 2.7      | EFEITO DA ADIÇÃO DE LIGAS NOS AÇOS .....                     | 56        |
| 2.7.1    | Influência do Nióbio como elemento de liga nos aços .....    | 60        |
| 2.8      | AÇOS MICROLIGADOS UTILIZADOS NA CONSTRUÇÃO DE CAÇAMBAS ..... | 61        |

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| 2.8.1    | Hardox 400/450 .....                            | 62         |
| 2.8.2    | Domex .....                                     | 63         |
| <b>3</b> | <b>METODOLOGIA.....</b>                         | <b>65</b>  |
| 3.1      | MATERIAIS .....                                 | 65         |
| 3.2      | MÉTODOS.....                                    | 67         |
| 3.2.1    | Técnicas de Caracterização Microestrutural..... | 67         |
| 3.2.2    | Ensaio mecânicos .....                          | 70         |
| 3.2.3    | Análise Estrutural no Software Solidworks ..... | 72         |
| <b>4</b> | <b>ANÁLISE DE DADOS.....</b>                    | <b>88</b>  |
| 4.1      | ANÁLISE DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA .....             | 88         |
| 4.2      | ANÁLISE METALOGRAFICA.....                      | 90         |
| 4.3      | ENSAIOS FÍSICOS .....                           | 92         |
| 4.3.1    | Ensaio de Tração .....                          | 92         |
| 4.3.2    | Ensaio de Dureza .....                          | 93         |
| 4.4      | ANÁLISE ESTRUTURAL DA CAÇAMBA .....             | 94         |
| 4.4.1    | Combinação 1 - Caçamba vazia .....              | 96         |
| 4.4.2    | Combinação 2 - Carregamento da caçamba .....    | 97         |
| <b>5</b> | <b>CONCLUSÃO.....</b>                           | <b>101</b> |
| <b>6</b> | <b>REFERÊNCIAS .....</b>                        | <b>103</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

O conhecimento sobre o patrimônio mineral brasileiro está sendo muito difundido neste século, devido as necessidades impostas por novas tecnologias e pela alta demanda do mercado por produtos de qualidade. Dessa forma, quando se fala em metais e minerais de alta tecnologia, o Nióbio se faz presente nesse contexto, pois, é um elemento, que associado a ligas metálicas contribui para o aumento de resistência do material, agregando valor a ele, e se apresenta como solução para desafios cada vez mais complexos (COMPANHIA BRASILEIRA DE METALURGIA E MINERAÇÃO, 2016).

O Brasil detém as maiores reservas conhecidas de Nióbio, e uma das empresas mais atuantes no mercado é a Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração (CBMM) fundada em 1955. A CBMM investe em média 2% de suas vendas anuais em projetos de pesquisa e desenvolvimento, realizadas internamente e em parceria com institutos de pesquisa, universidades, clientes e usuários finais. Visto isto, em parceria com a Rosseti a empresa já desenvolveu caçambas altamente resistentes e mais leves que utilizam o aço microligado ao nióbio. Antes do projeto o transporte de minério era feito em caminhões que utilizavam o aço carbono A36 na estrutura das caçambas, porém, devido a sua baixa resistência mecânica, após um determinado número de horas de uso, começavam a ocorrer falhas no sobrechassis e na estrutura das caçambas, provocando paradas de manutenção para reparos de trincas e deformações.

A partir do problema relatado e da demanda por maior eficiência no transporte, vê-se a necessidade de inovações no campo da lavra e transporte de minério. Esse objetivo é atingido com o uso de materiais de elevados níveis de resistência mecânica, dureza e tenacidade, a fim de fazer com que as estruturas se tornem mais leves e ao mesmo tempo mais fortes. Na sede da CBMM em Araxá, já são usadas caçambas construídas com aço microligado ao Nióbio e os resultados são o aumento na capacidade de carregamento e a redução no custo do transporte.

O objetivo do presente estudo é justamente expor os benefícios da utilização do aço microligado ao Nióbio e analisar estruturalmente as caçambas basculantes com o objetivo de favorecer o processo de transporte de minério. E isso será feito com o auxílio de conceitos relacionados a área de metalurgia e lavra de mina, além de simulações que serão realizadas no *software Solidworks*.

O desígnio do projeto é de aprimorar a estrutura de caçambas de caminhões que transportam minério para que se obtenha ganhos em manutenção, redução de custos de transporte e consumo de combustível, além de ganhos ambientais, uma vez que, reduz-se a emissão de gases causadores do efeito estufa decorrentes da produção e transporte de materiais.

Este trabalho de pesquisa parte do seguinte questionamento: “Será possível obter todos os benefícios já relatados por pesquisas e projetos, como o da CBMM, utilizando-se aços microligados ao Nióbio?”, e ademais, com base em modelos de caçambas já estipulados, “Será viável sua análise estrutural com vista numa melhor performance de transporte?”.

Desse modo, neste trabalho, propõe-se a seguinte hipótese de pesquisa: utilizando o aço microligado ao nióbio em materiais tais como as caçambas de caminhões basculantes, então aumenta-se a resistência mecânica, dureza, soldabilidade e vida útil do material, beneficiando as atividades de lavra do minério.

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1 ANÁLISE ESTRUTURAL ATRAVÉS DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL**

Com o avanço da tecnologia, a otimização de produtos e processos através de simulação virtual está sendo muito difundida. Os benefícios são muitos, pois, não são necessários computadores muito sofisticados para se obter as simulações, e além disso a análise é rápida e barata ao se comparar com ensaios experimentais (LOTTI ET AL, 2006).

Á vista disso, a análise estrutural de determinada peça ou componente pode ser feita através de simulação computacional, e para isto, usa-se o método de elementos finitos. Contudo, antes de se fazer a análise de uma estrutura, é preciso realizar a sua modelagem, ou seja, o desenho paramétrico. (LOTTI ET AL, 2006).

#### **2.1.1 Desenhos paramétricos**

Consoante Henriques e Bueno (2010), com o avanço da matemática, da computação e dos programas CAD (Computer-Aided Design) houve também um crescimento de geometrias topológicas. Nos programas CAD, os objetos são definidos em relação a um referencial cartesiano, mas a ideia de desenho paramétrico surgiu das curvas NURBS (Non Uniform Rational BSplines), aonde os pontos das curvas são manipulados e ajustados à forma global da curva por meio de equações matemáticas.

De acordo com Valério et al (2010) os primeiros programas de CAD possuíam apenas algumas funções básicas, os desenhos eram feitos de forma bidimensional, com peças não muito sofisticadas.

Atualmente todos os programas existentes no mercado possuem capacidades de modelação tridimensional de sólidos, obtenção direta dos desenhos bidimensionais para fabricação, montagem de conjuntos e interligações a programas para o estudo cinemático/dinâmico, elementos finitos, maquinação usando CAD/CAM, moldação e estampagem dentre outros (DIAS, 1999).

Um dos primeiros programas paramétricos desenvolvidos foi o CATIA, de custo elevado. Segundo Cruz (2010), é um software de análise e visualização dos graus de liberdade de uma estrutura para a criação de desenho 2D paramétrico, geração de vistas de peças e

montagens, em cortes e interrompidas, cortes parciais, notas de furos, linhas de centro, símbolos de acabamento, soldas, notas e aplicação de balões.

Um dos programas mais utilizados hoje em dia é o Solidworks, um software de modelagem sólida, paramétrica, baseado em recursos ou etapas (*features*) e com total integração com o *Windows*. Pode-se criar modelos totalmente associativos com ou sem relações (*constraints*), enquanto utiliza-se relações automáticas ou definidas pelo usuário para criar a intenção do projeto ou desenho (*design intent*). Além disso, o software juntamente com o pacote *Solidworks Simulation*, permite a aplicação de cargas e simulação de situações impostas às peças por meio do método de elementos finitos com o objetivo de se obter as tensões atuantes no modelo.

### 2.1.2 Histórico do método de elementos finitos

O método de elementos finitos surgiu no século XX e não há atribuição de sua autoria ou uma data precisa de sua origem. (SANCHEZ, 2001). Courant, em 1941, propôs o primeiro método dos elementos finitos conhecido até hoje. O princípio usado foi o de energia potencial estacionário, com interpolação polinomial sobre sub-regiões triangulares para estudar um problema de torsão em seções circulares, chamado de problema torsional de Saint-Venant, que fundamenta-se na teoria da elasticidade. Para a resolução dessa classe de problemas utiliza-se a equação de Laplace que, por sua vez, é solucionada por estratégias numéricas. Porém, nessa época os trabalhos não tiveram eficácia prática devido a inexistência de computadores potentes o suficiente para resolver um grande número de equações algébricas (COOK, 1989).

Em 1960, Ray Clough atribuiu o nome “método dos elementos finitos” (M.E.F) e a partir daí novos elementos para aplicações em análises de tensões foram desenvolvidos. Em 1965 foram publicados trabalhos sobre as aplicações do método em condução térmica e surgiram vários programas que utilizam o método, tais como: ANSYS, NASTRAN, COSMOS, SAP e outros. Cada programa inclui vários tipos de elementos que podem trabalhar com análises estáticas, dinâmicas, troca térmica, escoamento transiente ou estacionário entre outros. São programas rápidos de serem usados e com boa interface com o usuário (COOK, 1989)

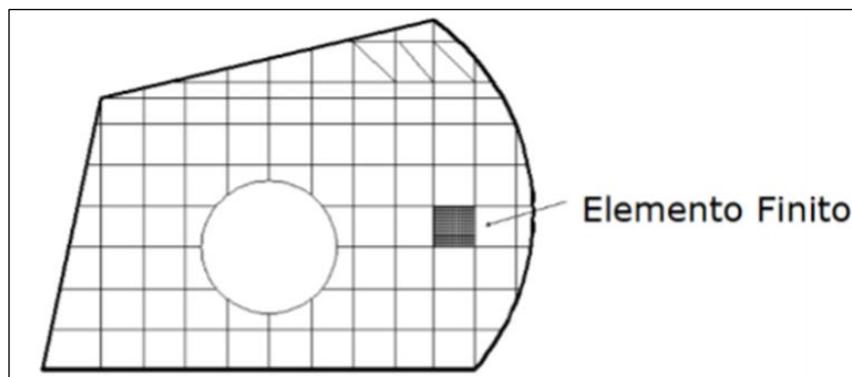
Dessa forma, com a utilização desse método, torna-se possível a aplicação de um sistema de forças em qualquer ponto e/ou direção, gerando informações sobre o deslocamento e o grau de tensão provocado por essas cargas ao tecido analisado.

Antigamente, com os computadores utilizados, só era possível analisar geometrias simples como barras e vigas. Com o desenvolvimento tanto do método como dos computadores as estruturas de geometria arbitrária, constituídas por múltiplos materiais e sujeitas a qualquer tipo de carregamento são passíveis de análise. (AZEVEDO, 2003).

Segundo Silva (2005, p.6), O M.E.F. consiste basicamente na transformação de equações diferenciais parciais que dominam um problema em correspondentes equações integrais, envolvendo apenas valores de contorno. Dessa forma, apenas o contorno será discretizado, ou seja, dividido, permitindo uma redução do tamanho do sistema de equações algébricas.

### 2.1.3 O Método de Elementos Finitos

Segundo Assan (2003), O Método de Elementos Finitos (MEF) foi estabelecido a partir da discretização do meio contínuo (estruturas não reticuladas), de acordo com a Figura 1, de maneira que o sólido seja subdividido em um número finito de partes, chamados de “elementos”, conectados entre si por intermédio de pontos discretos, denominado “nós”. Esse conjunto, formado pelos elementos finitos e os nós é chamado de malha. Os elementos são descritos por equações diferenciais e resolvidos por modelos matemáticos, para que sejam obtidos os resultados desejados. O modo como o MEF é formulado e aplicado depende das propriedades do problema em questão.



**Figura 1 - Rede de elementos finitos bidimensionais**

Fonte: Assan (2003)

O Método dos Elementos Finitos, em termos de Engenharia de Estruturas, pode determinar o estado de tensão e de deformação de um sólido de geometria arbitrária sujeito a

ações exteriores conhecidas. Antes de se fazer a análise de uma estrutura deve-se atentar a alguns aspectos necessários na fase que a antecede (AZEVEDO, 2003).

### Análise Dinâmica e estática

A análise dinâmica considera as forças de inércia associadas às acelerações a que cada um dos seus componentes está sujeito, porém em algumas situações pode considerar desprezáveis as forças de inércia, pois as ações são aplicadas de modo suficientemente lento. Ou seja, a análise dinâmica leva em conta as cargas que variam com o tempo. Já a análise estática fornece ferramentas para analisar as tensões lineares em uma estrutura, tem como resposta a relação de tensão atuante em determinada estrutura (SOLIDWORKS EDUCATION, 2017).

### Análise não linear ou linear

Segundo Adams et al (1999) a maioria das utilizações do método de elementos finitos em engenharia era analisado de forma linear, pois responde muito bem as condições reais das peças em análise. Porém, apesar de ser complexa, em certos problemas faz-se necessário uma aproximação não linear para descrever a situação analisada.

A rigidez é um fator fundamental para a análise linear ou não linear. De acordo com a carga aplicada, a peça poderá responder de diferentes formas dependendo da sua rigidez. A rigidez, por sua vez, é dependente da geometria da peça, do material e do contato entre geometrias. Por exemplo, uma viga de perfil em “I” possui maior rigidez que uma viga de canal interno, conforme mostra a figura 2 (ADAMS ET AL, 1999)



**Figura 2 - Vigas de diferentes perfis geométricos**

Fonte: Adams et al (1999)

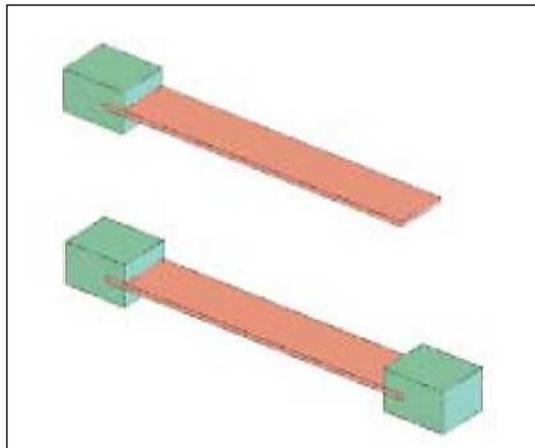
Da mesma forma, quando se tem vigas de materiais diferentes, a rigidez também será. A viga da esquerda, na figura 3, é constituída de um material menos rígido que o aço.



**Figura 3 - Vigas de diferentes materiais**

Fonte: Adams et al (1999)

E por fim, a figura 4 apresenta duas vigas, uma com simples engaste e outra bi-engastada. A primeira possui menor rigidez que a segunda, além de ter uma maior deflexão quando a carga é aplicada.



**Figura 4 - Vigas com diferentes engastes**

Fonte: Adams et al (1999)

Se a viga não apresentou variações em sua rigidez, pode-se assumir que a geometria da peça, bem como suas propriedades, não passaram por grandes deformações. Por outro lado, se houve variações na rigidez, o deslocamento foi suficientemente grande, logo, a geometria da peça apresentou alguma modificação, se houve perda da linearidade, as suas propriedades também mudaram.

Dessa forma, pode-se concluir que, uma análise considerada não linear e geométrica é quando se admite que não existe influência da modificação da geometria da estrutura na distribuição dos esforços e das tensões, todo o estudo é feito com base na geometria inicial

indeformada. Ou seja, as situações provocadas pelas ações exteriores são pequenas comparadas com as dimensões dos componentes da estrutura.

### Tipo de estrutura

As estruturas podem ser classificadas em relação à sua geometria como reticuladas, laminares ou sólidas.

Uma estrutura laminar, como o próprio nome diz, é como uma lâmina, onde a espessura é bem inferior as outras dimensões. As estruturas reticuladas apresentam-se como barras prismáticas, onde suas dimensões transversais são muito menores do que o comprimento do respectivo eixo. As estruturas sólidas são as mais genéricas e são nomeadas dessa forma por não apresentarem características que as permitam enquadrar no grupo das laminares ou das reticuladas. Há casos particulares que podem não se encaixar em uma dessas três classificações, devendo ser estudadas. (ADAMS ET AL, 1999)

#### **2.1.4 A obtenção do modelo experimental**

De acordo com Lotti et al (2006) para a obtenção de um modelo experimental por meio do MEF, é necessário definir o objeto de pesquisa, que poderá ser qualquer estrutura já citada anteriormente. É preciso, primeiramente, definir a geometria da estrutura que se deseja analisar. A peça é desenhada graficamente em um programa de computador específico, como por exemplo o *SolidWorks*, um software que permite a parametrização de desenhos e ainda, a simulação de diversas situações através do método dos elementos finitos, ou *AutoCAD*, software de desenho auxiliado por computador, utilizado para a elaboração de desenhos em duas dimensões e criação de modelos tridimensionais. Após isso, a estrutura criada é discretizada a partir de um programa específico, como por exemplo o *Solidworks Simulation*. A discretização consiste na peça se subdividir em forma geométrica, em elementos finitos, que representam coordenadas no espaço e em sua extremidade encontram-se os nós, conectados aos elementos finitos, formando uma malha arranjada. Quanto maior o número de elementos mais preciso é o modelo, porém maior é a capacidade de processamento de dados requerida.

Cada nó apresenta um número definido de graus de liberdade, que caracterizam a quantidade de deslocamento possível que a partícula pode realizar em determinada direção ou espaço tridimensional. A direção e o sentido são determinados pelo projetista.

Após a discretização do meio, faz-se necessário determinar as propriedades físicas e mecânicas de cada estrutura constituinte do modelo, pois cada parte responderá à aplicação de forças de uma determinada forma. Dependendo do tipo de material que compõe a peça, o seu comportamento frente a uma deformação poderá ocasionar em fenômenos elásticos não-lineares, fenômenos plásticos, elasto-plásticos, fenômenos viscoelásticos, quando ocorre deformação e sua condição de retorno ao estado inicial depende do tempo e por fim, fenômenos viscoplásticos, também dependente do tempo, mas não ocorre um retorno à condição inicial da peça (LOTTI ET AL, 2006).

Além das propriedades de elasticidade, o material pode ser classificado como isotrópico, anisotrópico ou ortotrópico. Um material é chamado de isotrópico quando as suas propriedades mecânicas são as mesmas em todas as direções, considerando um mesmo ponto do elemento. Já em um material anisotrópico, as propriedades são diferentes em todas as direções, enquanto que, em um material ortotrópico, suas propriedades mecânicas são iguais em duas direções e diferentes em uma terceira. O método também permite determinar o Coeficiente de Poisson e o Módulo de Young (Elasticidade) das estruturas.

Por fim aplica-se as cargas necessárias à peça e analisa os resultados. Cada elemento da peça poderá responder de maneira diferente à carga aplicada e seu comportamento é descrito por meio de equações matemáticas. Os resultados são visualizados por determinadas escalas de cores que dependem do deslocamento ou tensão gerada na estrutura. Dessa forma, pode-se identificar qual região sofre maior deslocamento ou como as tensões são distribuídas pela peça analisada. Além disso, através do método também pode-se descobrir o maior deslocamento de cada ponto em direção às resultantes de deslocamentos totais, esse fenômeno é chamado de deslocamento em magnitude. Há ainda a análise de tensões chamada Von Mises, a qual permite localizar os pontos de maior tensão da estrutura, pois reproduz a média das tensões em todas as direções.

Pode-se ressaltar vantagens e desvantagens do método. Uma das vantagens, segundo Cook (1989), devido ao avanço tecnológico, é a acessibilidade ao método, podendo-se modelar qualquer tipo de estrutura em um computador comum. De acordo com (Lotti et al, 2006), o método permite o controle de qualquer variável relacionada ao experimento, favorecendo a análise dos resultados. Por outro lado, por ser um método numérico, a precisão de seus resultados é limitada. O MEF gera uma solução aproximada ao problema. E além disso, é

preciso uma pessoa capacitada no modelamento e análise das estruturas para se evitar possíveis erros.

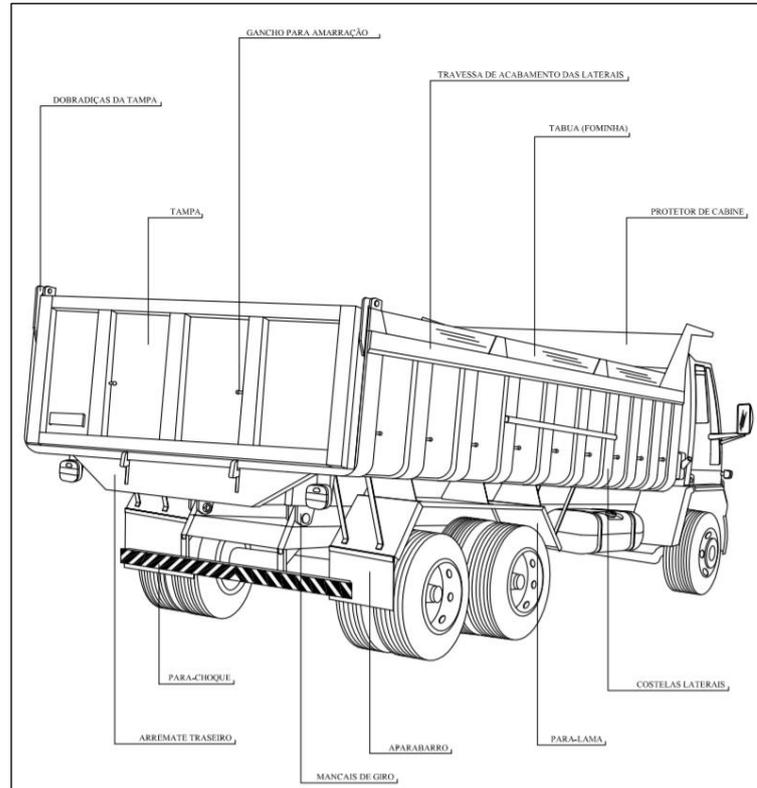
Destaca-se a importância da simulação computacional de estruturas pelo método de elementos finitos, pois, permite o melhor entendimento do comportamento mecânico do componente a ser estudado (ALVES FILHO, 2006).

## 2.2 CAÇAMBAS DE CAMINHÕES PARA A MINERAÇÃO

Caminhões que transportam minério, principalmente os fora-de-estrada, têm o objetivo de remover grandes volumes de material e como são equipamentos de grande porte e custo elevado, precisam ser dimensionados e projetados de forma que se otimize as operações dentro de uma mina.

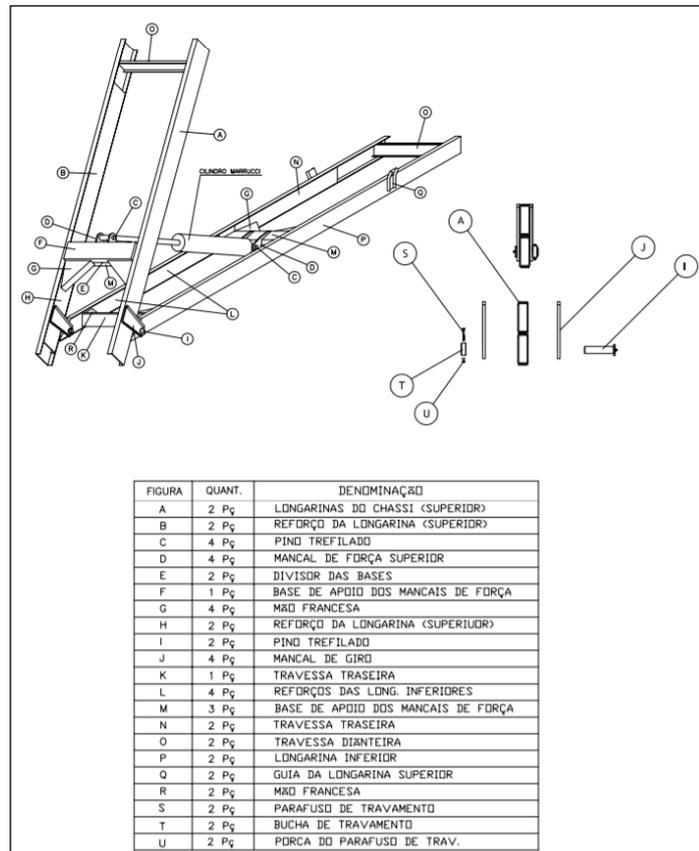
Com o objetivo de transportar maior quantidade de material, visando a segurança tanto do equipamento quanto da operação, faz-se estudos de projetos para caçambas de caminhões, com o intuito de alterar suas dimensões, “de modo a maximizar a capacidade sem ultrapassar o limite máximo de peso para o conjunto carga-caçamba.” (KAIZER ET AL, S.D., P.3).

Para um melhor entendimento, a figura 5 mostra um esquema representativo de componentes de uma caçamba. A figura 6 representa os componentes do sistema de travamento de uma caçamba. Já a figura 7 detalha cada peça que compõe a caixa de carga do caminhão. E por fim, a figura 8 destaca as informações sobre a tampa traseira de uma caçamba.



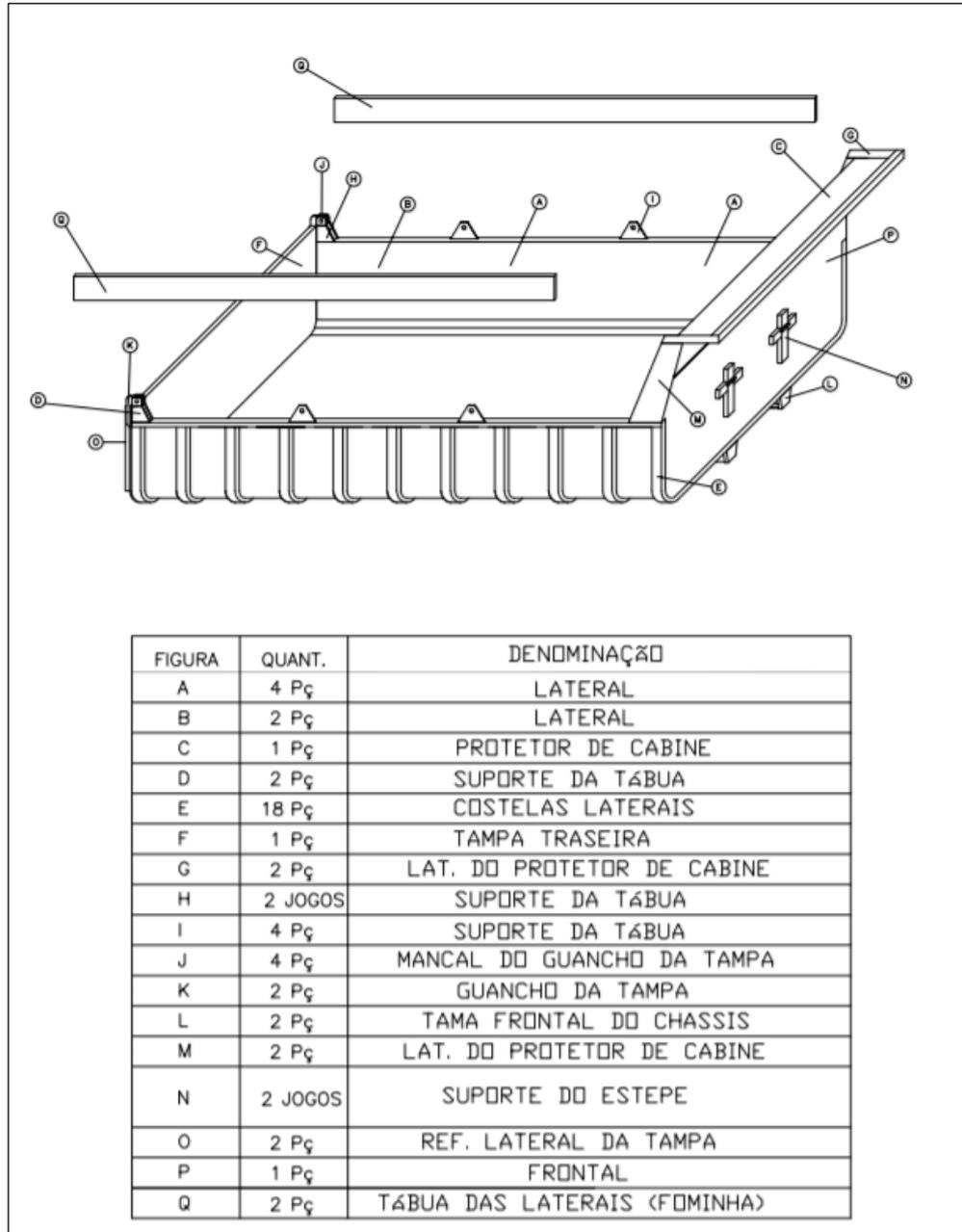
**Figura 5 - Itens de uma caçamba comum**

Fonte: CIMASP - Comércio e Indústria de Equipamentos

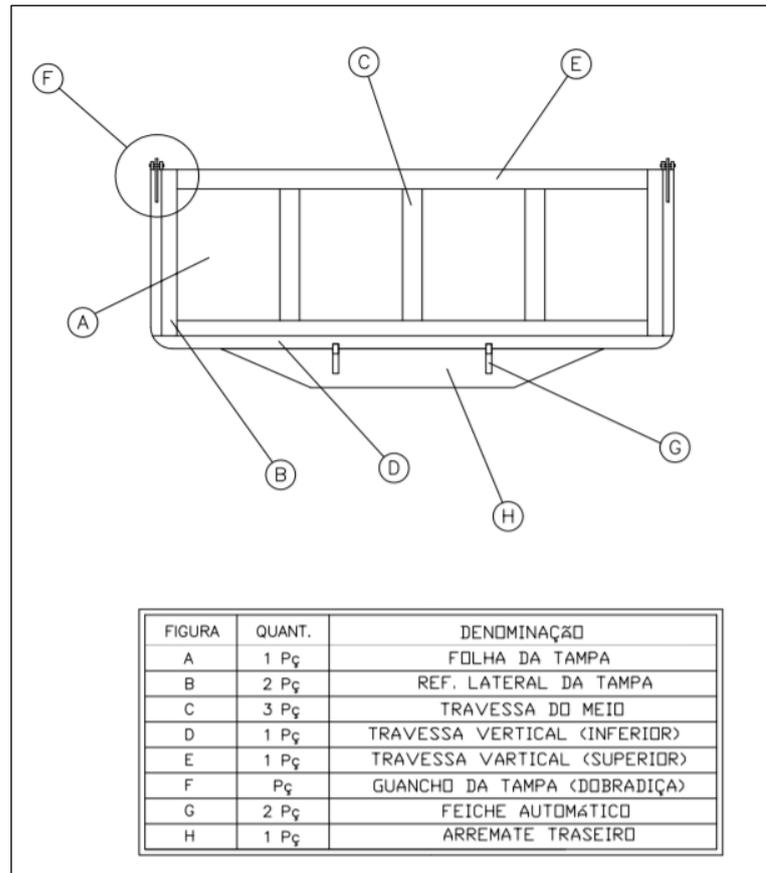


**Figura 6 – Informações sobre o sistema de travamento de uma caçamba.**

Fonte: CIMASP - Comércio e Indústria de Equipamentos



**Figura 7 - Informações sobre a caixa de carga.**  
 Fonte: CIMASP - Comércio e Indústria de Equipamentos

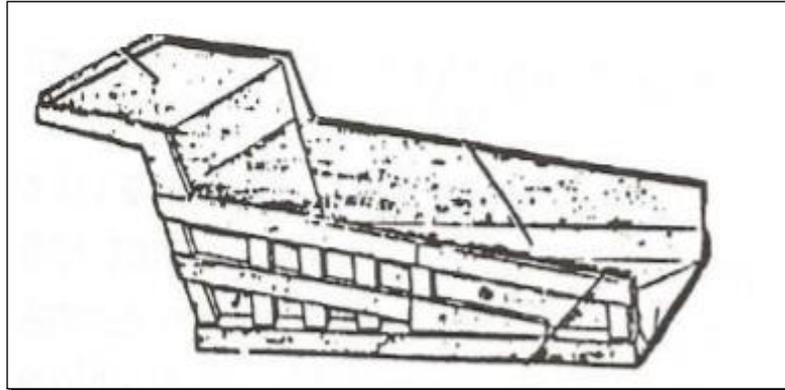


**Figura 8 - Informações sobre a tampa traseira de uma caçamba.**

Fonte: CIMASP - Comércio e Indústria de Equipamentos

É importante ressaltar algumas informações sobre as caçambas de caminhões transportadores, as quais podem se diferenciar de acordo com o tipo de material a ser transportado.

Segundo Jaworski (1997) os caminhões basculantes possuem um chassi mais curto, mais reforçado e uma tomada de força que aciona os êmbolos hidráulicos do sistema de levantamento da caçamba. Esse tipo de caminhão pode ser classificado como basculantes para pedras (figura 9) e basculantes para britas, areias e argilas (figura 10). No primeiro caso as caçambas são feitas com chapas grossas e perfiladas de reforço, e são destituídas de tampa traseira, pois o impacto das pedras poderia danificá-la.

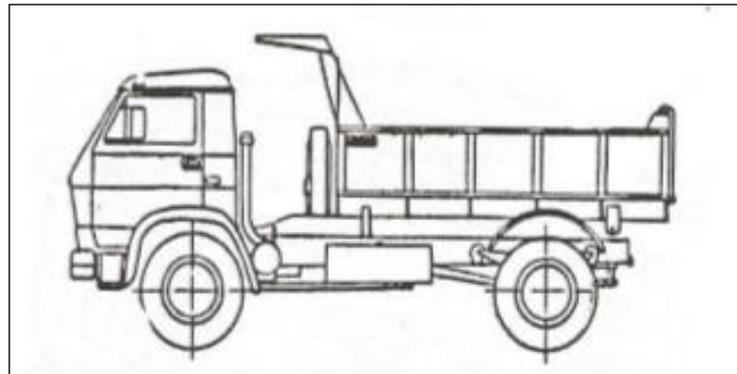


**Figura 9 - Caçamba de caminhão basculante de pedra.**

Fonte: Jaworski (1997)

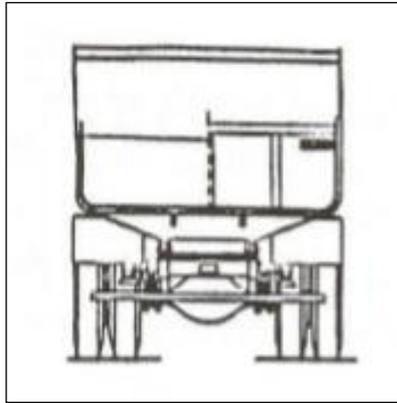
Já as caçambas para basculantes de brita, areia e argila são constituídas de tampa traseira de abertura e fechamento automático, além disso apresentam tábuas, nas suas bordas superiores e laterais, chamadas de sobre-laterais de madeira, as quais tem como funcionalidade absorver os impactos recebidos devido ao carregamento e promover, ao se utilizar materiais de menor densidade, um acréscimo da capacidade volumétrica do caminhão.

Com o intuito de evitar a aglomeração de material argiloso úmido no seu interior, as caçambas possuem os cantos internos arredondados, dessa forma, evita-se a corrosão metálica e o sobrepeso no transporte (figura 11).



**Figura 10 - caminhão basculante para materiais granulares e argilas.**

Fonte: Jaworski (1997)



**Figura 11 - Caçambas com cantos inferiores arredondados.**

Fonte: Jaworski (1997)

Quando o carregamento é feito com pás carregadeiras ou pás mecânicas há dificuldade para o direcionamento do material durante o despejo sobre o caminhão, desse modo, um item passa a ser parte essencial da caçamba, o protetor de cabine, pois, garante a segurança do operador do caminhão que permanece no interior da cabine.

Para os caminhões basculantes são usados dois tipos de sistemas hidráulicos, o de alta pressão ou o de baixa pressão. Aqueles são mais leves que seus similares de baixa pressão, visto uma mesma carga de operação, entretanto, apresentam a desvantagem de vazamento de óleo em suas buchas, caso as hastes dos êmbolos tenham sido riscadas pelo uso. (Jaworski, 1997)

Os caminhões específicos para transporte de minério são chamados de caminhões basculantes fora de estrada (figura 12), como o nome já diz, eles não precisam de estrada para o seu deslocamento pelo fato de possuírem rodas de grande diâmetro e pneus de baixa pressão que propiciam maior área de distribuição das cargas sobre o apoio. Esse tipo de caminhão carrega uma quantidade grande de carga, por isso, dispõe de freios potentes, acionados a ar comprimido e operam com velocidades até 60 km/h.

Como transportam maiores quantidades de material, as caçambas desses caminhões são muito reforçadas e podem apresentar o fundo em forma de “V”, com o objetivo de baixar o centro de gravidade do conjunto carga-caminhão e reduzir o impacto de rochas, durante o carregamento.



**Figura 12 - Caminhão basculante fora de estrada.**

Fonte: Fritz Paes

Faz-se conveniente realçar algumas informações sobre as caçambas de caminhões basculantes, as quais podem ser classificadas, segundo a Rosseti – Equipamentos Rodoviários, como: Meia Cana, Bibloco e Caçamba Standard.

Caçamba Meia Cana (figura 13): É indicada para transporte de material bruto, abrasivo ou aderente, possui articulação extralarga e tampa acionada por corrente ou abertura hidráulica como item opcional. Sistema hidráulico de alta pressão com cilindro telescópico frontal. Sua caixa de carga é arredondada, o que contribui para um melhor escoamento do material, além disso, é construída com aço especial que proporciona alta resistência ao impacto e à abrasão, sem a necessidade de reforços (costelas) e longarinas, tornando o centro de gravidade mais baixo, e conseqüentemente melhorando a estabilidade do veículo. É o produto ideal para serviços brutos e tem capacidade volumétrica de 12 a 25m<sup>3</sup> (ROSSETI – EQUIPAMENTOS RODOVIÁRIOS, 2016).



**Figura 13 - Caçamba Meia Cana.**  
Fonte: Rosseti – Equipamentos Rodoviários

Caçamba Bibloco (figura 14): É utilizada para transporte de minério fino, terraplenagem, construção e outros materiais. Assim como as caçambas Meia Cana, tem sistema hidráulico de alta pressão com cilindro telescópico frontal. A caixa de carga possui estrutura reforçada para serviços severos e centro de gravidade mais baixo. Tem capacidade volumétrica de 12 a 24m<sup>3</sup>. Sua travessa de articulação é com eixo passante e bitola extralarga em chapa estrutural, o que proporciona grande estabilidade de basculamento, dispensando estabilizador (ROSSETI – EQUIPAMENTOS RODOVIÁRIOS, 2016).



**Figura 14 - Caçamba Bibloco.**  
Fonte: Rosseti – Equipamentos Rodoviários

Caçamba Standard (figura 15): Tradicionais para o transporte de areia, brita, terra, asfalto e materiais a granel. Tem capacidade de 3 a 14m<sup>3</sup>. Conta com um sistema hidráulico de baixa pressão acionado por 1 ou 2 cilindros de único estágio e comando pneumático ou a cabo do interior da cabine. É composta de aço estrutural, reforçado por costelas dobradas em perfil "U" (ROSSETI – EQUIPAMENTOS RODOVIÁRIOS, 2016).



**Figura 15 - Caçamba Standard.**  
Fonte: Rosseti – Equipamentos Rodoviários

### 2.3 AÇO COMUM

Segundo FERRAZ (2005), a definição do aço comum deve partir de seu processo de fabricação, o qual utiliza como matéria prima o minério de ferro.

Por meio da siderurgia o minério de ferro é transformado em aço, e isso se dá pelo processo de redução. A origem básica do minério é o óxido de ferro ( $\text{FeO}$ ), o qual é aquecido em alto fornos<sup>1</sup>, que contam com a presença de Carbono, sob a forma de coque ou carvão vegetal, que serve como comburente, e de elementos adicionados para auxiliar a produzir a escória, que, por sua vez, é formada de materiais indesejáveis ao processo de fabricação, esses elementos são chamados de fundentes. Essa primeira etapa em alto forno visa a redução do teor de oxigênio da composição  $\text{FeO}$ . O resultado disso é denominado ferro-gusa, que contém de 3,5 a 4,0% de Carbono em sua estrutura, sendo submetido a uma nova fusão, tem-se o ferro fundido, com teores de Carbono entre 2 e 6,7%. Após uma análise química do ferro, ele é encaminhado à usina siderúrgica, para uma área denominada aciaria, onde, por fim é transformado em aço. A partir da descarbonatação do ferro gusa, onde controla-se o teor de Carbono para no máximo 2%, é produzido o aço.

<sup>1</sup> Alto fornos: São fornos especiais através dos quais se produzem diversos metais, a partir dos seus minérios oxídricos.

Logo, o produto do processo descrito é uma liga metálica constituída basicamente de ferro e Carbono, além de apresentar certos elementos residuais. O teor de Carbono varia de 0,008% até aproximadamente 2,11%, teores os quais estão relacionados à máxima solubilidade no ferro à temperatura ambiente.

A composição química dos aços pode ser alterada por meio da adição de determinados elementos químicos de acordo com sua aplicação final. Pode-se encontrar aços com diferentes graus de resistência mecânica, soldabilidade, ductilidade, resistência à corrosão, entre outros. De um modo geral, os aços apresentam excelentes propriedades mecânicas: resistem bem à tração, à compressão, à flexão, e por ser um material homogêneo, pode ser laminado, forjado, estampado, estriado e ainda serem submetidos a tratamentos térmicos ou químicos para modificar suas propriedades.

### 2.3.1 Tratamentos do Aço

Tratamento térmico, de acordo com Ferraz (2005), é um conjunto de operações bastante utilizadas em aços de alto teor de carbono ou com elementos de liga. Através de operações de aquecimento e resfriamento pode-se aumentar ou diminuir sua dureza, aumentar a resistência mecânica, melhorar a resistência ao desgaste, corrosão, calor, ductibilidade e trabalhabilidade, bem como modificar propriedades elétricas e magnéticas, além de remover tensões internas.

Será abordada as características dos tratamentos térmicos mais comuns, de acordo com Ferraz (2005). São elas:

- **Recozimento:** Tem por objetivo eliminar a dureza de uma peça temperada ou normalizar materiais com tensões internas resultantes do processo de conformação. A primeira fase desse tipo de tratamento consiste no aquecimento, que pode ser entre 500 a 900 °C. Em seguida a temperatura da peça deve ser mantida durante algum tempo para que as modificações sejam feitas de forma uniforme. A terceira fase é o resfriamento que deve ser feito de maneira lenta.
- **Normalização:** Esse tipo é análogo ao anterior, porém, na fase de resfriamento é feito de forma mais rápida. Tem como objetivo refinar a granulação grosseira de da maioria dos produtos siderúrgicos. É também usada como tratamento

preliminar à tempera e ao revenido, com o intuito de produzir uma estrutura mais uniforme e reduzir empenamentos.

- **Têmpera:** Tem por finalidade o aumento de dureza no aço, formando uma estrutura martensítica<sup>2</sup>. Essa operação pode gerar uma redução da maleabilidade e o aparecimento de tensões internas, tornando-o frágil, por isso, depois desse tipo de tratamento o material passa pelo revenido. Uma observação que pode ser ressaltada, segundo Pauli e Uliana (1997, p.9) é a respeito do aquecimento, que deve ser feito de forma lenta para que não provoque defeitos na peça, e além disso, a manutenção da temperatura varia de acordo com a forma da peça, e o tempo deve ser muito bem controlado.
- **Revenido:** é feito em aços que já passaram pelo processo de têmpera, pois além de aliviar ou remover tensões internas, corrige a excessiva dureza e fragilidade do material e aumenta a maleabilidade e a resistência ao choque. O tratamento é feito aquecendo-se a peça temperada até uma certa temperatura resfriando-a em seguida. O aquecimento é executado apoiando-se a peça polida, em um bloco de aço aquecido ao rubro. O calor liberado pelo bloco, aquece lentamente a peça, e esta, por sua vez muda de cor (cor de revenimento), a qual varia à medida em que a temperatura aumenta.

Além das etapas de tratamento, o aço passa por processos de conformação mecânica, como por exemplo a laminação, à quente ou à frio, com o objetivo de se obter as formas adequadas para uso comercial (chapas, perfis, barras).

## 2.4 OBTENÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS AÇOS

### 2.4.1 Propriedades do aço

Através de testes de resistência o aço apresentará deformações, as quais poderão ser analisadas para se chegar a alguns conceitos e propriedades (FERRAZ, 2005).

<sup>2</sup> Estrutura martensítica: transformação de fase no estado sólido ausente de difusão, resultante de um movimento coordenado e/ou cooperativo entre os átomos da fase matriz.

- Elasticidade: é uma das propriedades dos aços que os tornam capazes de voltar a sua forma original quando removida a força externa atuante. Desta forma, de acordo com Ferraz (2005), a deformação obedece a Lei de Hooke, sendo proporcional ao esforço aplicado, conforme equação 1:

$$\sigma = \mu . E (1)$$

Ao ultrapassar o limite de proporcionalidade, maior valor de tensão para o qual vale a Lei de Hooke, ocorrem deformações crescentes mesmo sem a variação da tensão: é o denominado patamar de escoamento, onde surge a fase plástica. Uma observação a ser feita é que materiais frágeis não apresentam o patamar de escoamento, pois não deformam plasticamente antes da ruptura.

- Plasticidade: ao contrário da elasticidade, a plasticidade é a habilidade de o material não voltar à sua forma inicial após a remoção da carga externa, deformando-se permanentemente. Esse tipo de deformação altera a estrutura de um metal, aumentando sua dureza. Este fenômeno é denominado encruamento, alcançado através da laminação à frio.
- Ductilidade: é a capacidade do material de se deformar plasticamente, sob a ação de cargas, sem se romper. É uma propriedade importante, uma vez que é um indício à ruptura final do material, já que corresponde ao alongamento total do material devido a deformação plástica, fator fundamental para prevenir acidentes em uma construção, por exemplo.
- Fragilidade: é o inverso da ductilidade, é a predisposição do material de se romper bruscamente, ou seja, sem aviso prévio, fator responsável por diversos tipos de acidentes ocorridos em pontes e navios.
- Resiliência: é quando o material absorve energia mecânica em regime elástico, ou melhor, é a capacidade de restaurar a energia mecânica absorvida no impacto.
- Dureza: capacidade de resistir ao risco ou abrasão, isto é, a resistência que a superfície do material oferece à penetração de uma peça de maior dureza. É um fator que deve ser analisado ao se utilizar processos de estampagem de chapas de aços.

- **Tenacidade:** é a energia total, plástica ou elástica, que o material pode absorver até a ruptura quando submetido a cargas de impacto. Um aço tenaz não é também duro, como por exemplo, o diamante, só pode ser riscado por outro diamante, porém, com uma martelada pode ser quebrado. Por conseguinte, um material bastante tenaz solicita maior energia para ser rompido.
- **Fluência:** propriedade apresentada quando o metal é submetido a longos períodos de tensões constantes, inferior ao limite de resistência normal, provocando ajustes plásticos nos pontos de tensão ao longo dos contornos dos grãos do material. A fluência pode ser ativada pela temperatura a qual o material está submetido: quanto mais alta, maior ela será, pois facilita o início e fim da deformação plástica. Para os aços, essa deformação é expressiva a temperaturas superiores a 350°C, ou seja, em caso de incêndios. A consequência da fluência é a presença de fissuras no material, o que pode levar à ruptura.
- **Fadiga:** ruptura de um material devido a esforços repetidos, que será sempre uma ruptura frágil, mesmo para materiais dúcteis.

#### 2.4.2 Ensaio mecânicos

Os ensaios mecânicos são realizados para determinar a resistência do material a cada esforço de tração, compressão, flexão, torção, cisalhamento, e pressão interna, além disso, serve para avaliar a grosso modo a história prévia de um material desconhecido, sem a necessidade de um exame metalográfico demorado.

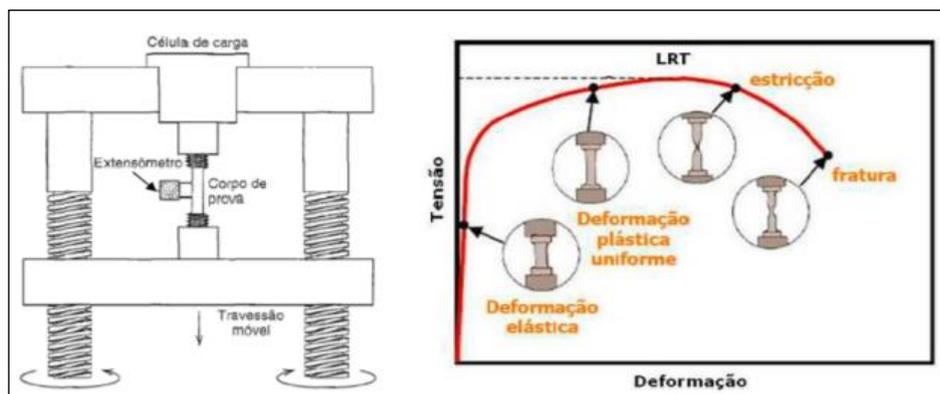
##### 2.4.2.1 Ensaio de tração

As principais propriedades mecânicas dos materiais são obtidas pelo ensaio de tração, que consta do alongamento dos corpos de prova por uma força de tração uniaxial, até sua ruptura, e então mede-se a tensão e deformação correspondente.

De acordo com Neto (2013), esse tipo de ensaio pode ser considerado como um dos melhores devido ao custo-benefício, já que o seu custo efetivo, tomadas as devidas condições e exigências, pode ser muito menor que outros ensaios de mesmo feitio. A figura 16

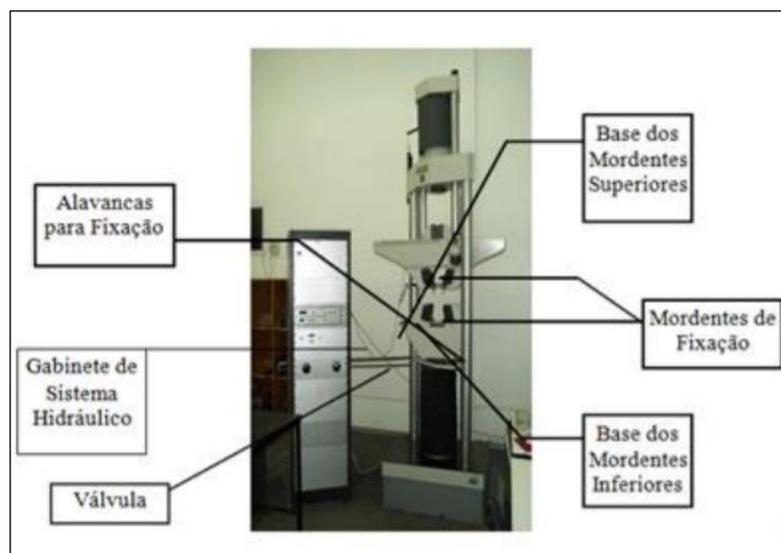
esquematiza a máquina de tração e a curva característica do corpo de prova, e a figura 17 representa a máquina de ensaios universal Wolpert.

Pode-se reconhecer que as deformações são uniformemente distribuídas ao longo de todo um corpo de prova específico até a sua ruptura, consoante Souza (1989). A uniformidade da deformação permite obter medições precisas da variação dessa deformação em função da força aplicada, conforme mostra a figura 18. Assim sendo, por meio de uma reta dada determina-se a curva tensão versus deformação do material. É visto que, ao se alcançar o ponto de tensão máxima suportada pelo material, a uniformidade na deformação cessa em virtude do aparecimento de estricção, ou contração da seção do corpo de prova, para metais com certa ductilidade (figura 19). Caso defeitos internos não provoquem a ruptura em algum ponto do material, ela ocorre em sua faixa estreita.



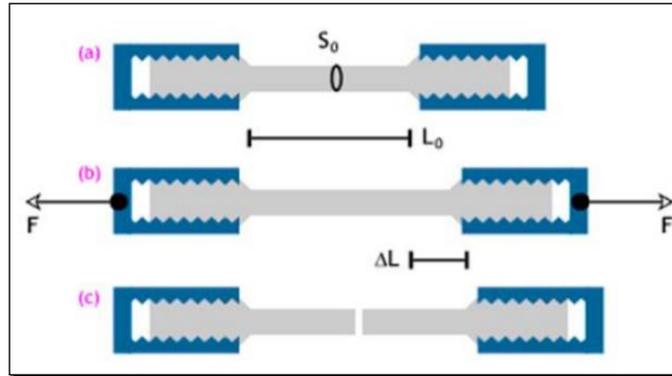
**Figura 16 - Desenho esquemático de máquina de ensaio de tração e Curva Esquemática Tensão Versus deformação.**

Fonte: Adaptado de Bertoldi (2014)



**Figura 17 - Máquina de ensaios universal Wolpert.**

Fonte: Bertoldi (2014)



**Figura 18 - Corpo de prova e suas fases durante o ensaio de tração.**

Fonte: Bertoldi (2014)



**Figura 19 - Corpo de prova ensaiado com o surgimento do fenômeno de estricção.**

Fonte: Adaptado de Bertoldi (2014)

Para se determinar a tensão nominal  $\sigma$ , divide-se a carga aplicada  $P$  pela área original da seção transversal do corpo de prova,  $A_0$ , de acordo com a equação 2. Considera-se a tensão constante na seção transversal e em toda a região entre os pontos de calibragem.

$$\sigma = \frac{P}{A_0} \quad (2)$$

Já a deformação nominal  $\epsilon$ , é obtida pela leitura da deformação no extensômetro, ou dividindo a variação  $\delta$  no comprimento de referência do corpo de prova pelo comprimento de referência original do corpo de prova,  $L_0$ . Considera-se que a deformação é constante em toda a região entre os pontos de calibragem. Dessa forma, tem-se a equação 3.

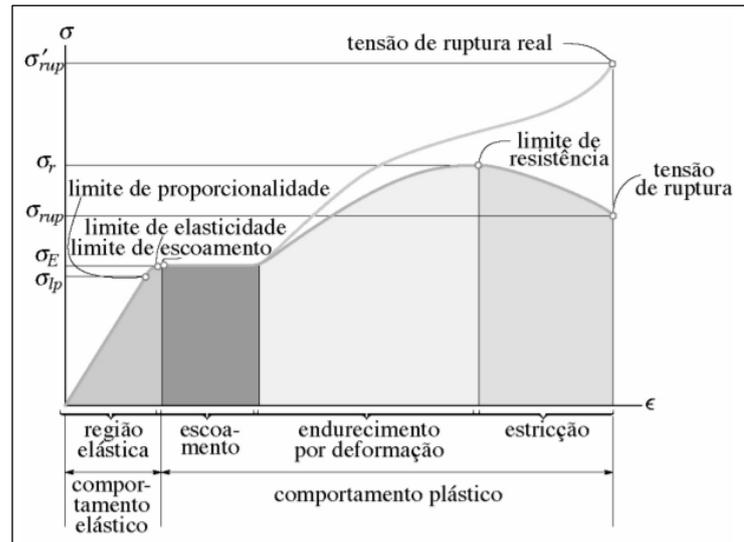
$$\epsilon = \frac{\delta}{L_0} \quad (3)$$

A curva resultante dos valores de tensão e deformação nominal marcados em um gráfico é denominada tensão-deformação convencional.

A figura 20 representa a curva tensão/deformação do aço, de acordo com Buffoni (2016). A região elástica condiz com o comportamento elástico do material, onde a deformação é diretamente proporcional à carga aplicada, obedecendo a lei de Hooke. Ao aliviar a tensão sobre o material nesta região, ele tem a capacidade de voltar ao seu estado inicial. O símbolo “ $\sigma_p$ ” representa o limite de proporcionalidade, o valor limite para o qual o material obedece a lei de Hooke. O símbolo “ $\sigma_E$ ” indica o limite de escoamento, a partir desse ponto, as deformações aumentam com pouco ou nenhum acréscimo de carga, é o ponto aonde se inicia o regime elasto-plástico do material. Então, após o escoamento, a estrutura interna no material é rearranjada e o material passa pelo encruamento, inicia-se a zona de deformação plástica, na qual o material exhibe deformação permanente após ter sido aplicada uma carga sobre ele. O ponto representado por “ $\sigma_r$ ” indica o limite de tensão, expressa a máxima tensão atingida no ensaio de tração. E por fim, o ponto “ $\sigma_{rup}$ ” é aquele aonde o corpo de prova se rompe, indica a tensão de ruptura do material.

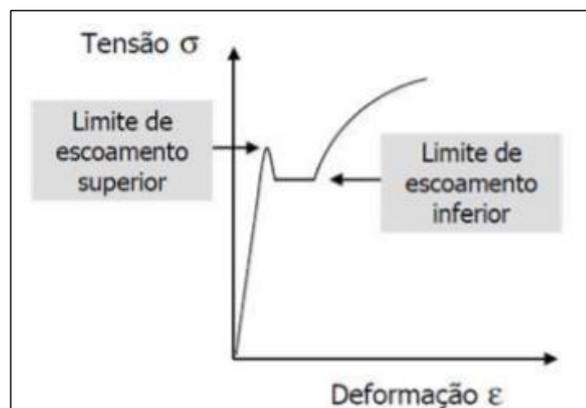
Observa-se que, o limite de resistência é maior que a tensão de ruptura, isso é causado pelo fato de que a tensão sofrida é função da força aplicada, pela área do objeto, dessa forma, no final da curva, o diâmetro do corpo de prova é menor (fenômeno chamado de estricção, o evento é devido aos planos deslizantes formados no interior do material e à tensão de cisalhamento atuante), então, uma diminuição da carga aplicada é suficiente para manter a deformação até a ruptura. Ou seja, nesse momento há uma diminuição rápida da área transversal do corpo, isto posto, a carga necessária para continuar a deformação do corpo de prova, também decresce. E além disso, quando se chega ao limite de resistência, pequenas fissuras começam a aparecer, fragilizando o material, até que todas as trincas percorram os seus contornos e provoquem a fratura do corpo de prova.

Ressalta-se no mesmo gráfico, a tensão de ruptura real, a qual leva em conta o comprimento de referência do material, que é diferente do comprimento original. Em outras palavras, quando se trata de grandes deformações deve-se considerar a área real do material no instante em que a força está atuando. Sendo assim, a curva tensão-deformação cresceria até a fratura do material.



**Figura 20 - Diagrama de tensão-deformação convencional e real para um material de aço dúctil.**  
 Fonte: Salete Souza De Oliveira Buffoni (2016)

A figura 21 mostra o comportamento elástico para aços com baixo teor de Carbono ou laminados a quente.



**Figura 21 - Limite de escoamento definido para aços de baixo C.**  
 Fonte: Melconian (1999)

O ponto de escoamento é distinguido por dois valores, o ponto de escoamento superior e o inferior, o primeiro ocorre antes e é seguido por uma redução repentina na capacidade de suportar carga até se chegar ao segundo. Ao se alcançar o ponto de escoamento, o corpo de prova continuará a alongar-se sem qualquer aumento na carga, como é mostrado na figura 36.

#### 2.4.2.1.1 Módulo de Elasticidade (E)

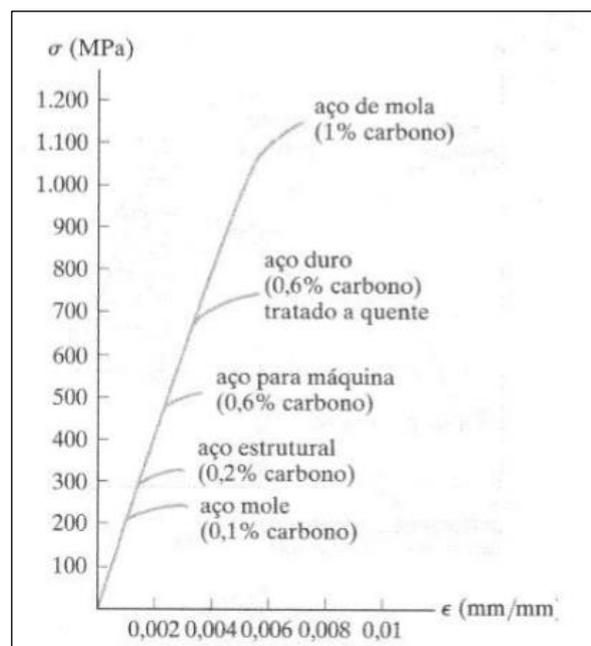
Conforme já visto, o diagrama tensão-deformação aborda parâmetros dentro da região elástica, portanto, faz-se necessário o estudo do módulo de elasticidade. Robert Hooke, em 1676, descobriu que, um aumento na tensão gera um aumento proporcional na deformação, fato

conhecido como a lei de Hooke, que de acordo com Finotti (2015), pode ser expresso matematicamente pela equação 4, que relaciona a tensão “ $\sigma$ ” e a deformação específica “ $\epsilon$ ”.

$$\sigma = E \times \epsilon \quad (4)$$

Nesta fórmula, ‘E’ corresponde a constante de proporcionalidade, designada módulo de elasticidade ou módulo de Young, cujo nome se dedica a Thomas Young, quem publicou, em 1807, uma explicação sobre o módulo.

Aplica-se algumas condições para o uso do módulo de elasticidade; só é usual se um material tiver comportamento linear elástico e se a tensão no material não ultrapassar o limite de proporcionalidade, pois, caso isso ocorra, o diagrama tensão-deformação deixa de ser uma linha reta, impedindo a aplicação da equação. A figura 22 representa a curva de tensão-deformação para alguns tipos de aço.



**Figura 22 - Curva de tensão-deformação para alguns tipos de aço.**  
Fonte: Hibbeler (2010)

O limite de proporcionalidade para um tipo determinado de aço depende dos elementos que o compõe, de acordo com a figura 10. No entanto, para maioria dos aços, é aceito um módulo de elasticidade  $E_{aço} = 200\text{GPa}$ .

#### 2.4.2.1.2 Tenacidade

Para Chiaverini (1996) a tenacidade é um termo mecânico que se refere a aptidão de um material em absorver a energia até sua ruptura. Alguns fatores devem ser levados em conta na

determinação da tenacidade, os quais são, a geometria do corpo-de-prova e a carga aplicada. A equação 5 mostra como a tenacidade pode ser determinada.

$$U_t = \sigma_r \cdot \epsilon_f \quad (5)$$

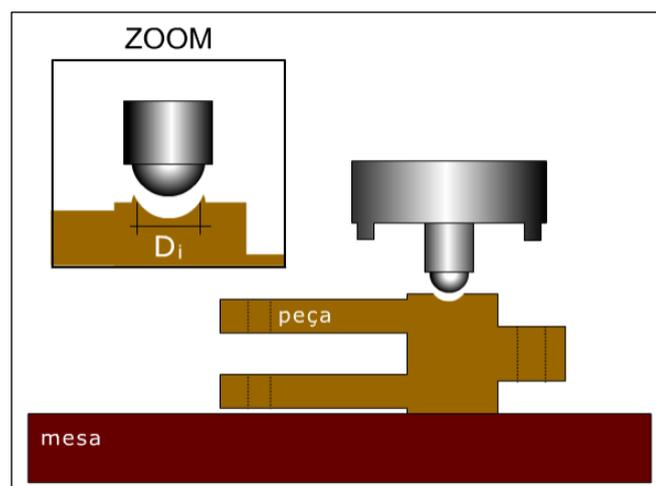
Onde  $\sigma_r$  é a tensão de resistência à tração,  $\epsilon_f$  é a deformação até a fratura. No caso de materiais frágeis o módulo de tenacidade é determinado pela equação 6.

$$U_t = (2/3\sigma_r) \cdot \epsilon_f \quad (6)$$

#### 2.4.2.2 Ensaios de Dureza

Além do ensaio de tração, tem-se o ensaio de dureza com o intuito de determinar a dureza de um material, propriedade importante para aços com aplicações estruturais ou servem de aporte para materiais abrasivos. O teste se dá com a aplicação de uma carga na superfície do metal mediante um penetrador. A máquina responsável pelo ensaio é denominada durômetro.

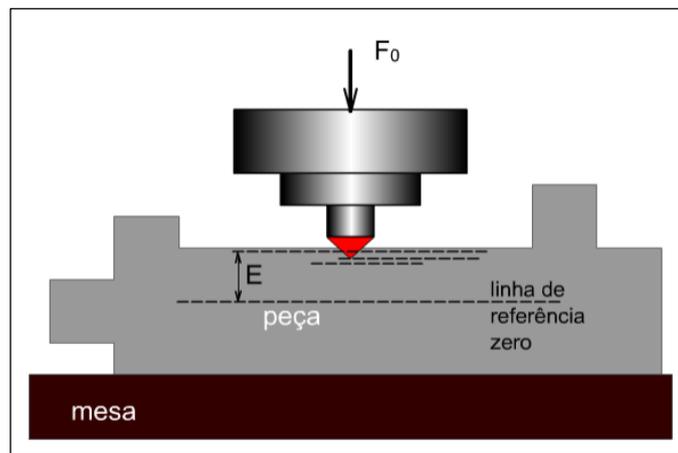
Segundo Chiaverini (1996), são aplicados dois tipos mais conhecidos de ensaios de dureza: ensaio de dureza Brinell e ensaio de dureza Rockwell. O primeiro funciona da seguinte forma; penetra-se no material uma esfera de aço ou de liga de diâmetro  $D$ , por meio da aplicação de uma carga  $P$ , o que resulta numa impressão, em forma de calota esférica, de diâmetro  $D_i$ , pela qual se determina um número correspondente ao valor da dureza Brinell. A figura 23 mostra como o teste é executado.



**Figura 23 - Teste de dureza Brinell.**

Fonte: CIMM - [http://www.cimm.com.br/portal/material\\_didatico/6558-teste-de-dureza-brinell#.WB4ITPkrJPZ](http://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/6558-teste-de-dureza-brinell#.WB4ITPkrJPZ)

O teste Rockwell é similar ao anterior, força-se, o indentedor contra a superfície do corpo de prova mediante a aplicação de uma carga preestabelecida, conforme mostra a figura 24.



**Figura 24 - Teste de Dureza Rockwell.**

Fonte: CIMM - [http://www.cimm.com.br/portal/material\\_didatico/6558-teste-de-dureza-brinell#.WB4ITPkrJPZ](http://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/6558-teste-de-dureza-brinell#.WB4ITPkrJPZ)

Esse teste tem como vantagem a agilidade, facilidade de execução, isenção de erros pessoais, capacidade de distinção das pequenas durezas em aço temperado e ainda, não provoca danos sensíveis a superfície, já que as impressões obtidas apresentam pequenas dimensões, podendo-se assim, aproveitar o material em outros ensaios.

O teste Brinell tem como benefício uma endentação mais profunda e mais extensa, a consequência disso é que a dureza medida no teste abrange uma porção maior de material, gerando uma medição mais precisa.

Além desses dois tipos de testes, pode-se citar também o teste de dureza *Vickers*, amplamente utilizado. De acordo com Fredel; Ortega e Bastos (s.d), esse teste foi introduzido em 1925 por Smith e Standland, sendo a Companhia Vickers-Armstrong Ltda. O penetrador é uma pirâmide de diamante de base quadrada, com um ângulo de  $136^\circ$  entre as faces opostas.

A dureza Vickers (HV) é independente da carga, pois o penetrador é de diamante, praticamente indeformável. Ser independente da carga significa que o valor de dureza alcançado é o mesmo para qualquer que seja a carga utilizada, isto para materiais homogêneos. Então, todas as impressões acabam por serem iguais entre si, não importando o seu tamanho. Mas é visto que, a mudança da carga se faz necessária, para que se tenha uma impressão regular, sem deformação do visor da máquina; isso depende, naturalmente, da dureza do material que se está ensaiando.

Para que a área seja medida com precisão, pode existir um microscópio acoplado à máquina para a determinação das diagonais,  $L$ , com maior exatidão, cerca de 1 micrão. A aplicação da carga funciona da seguinte maneira: é aplicada de forma moderada na superfície plana da amostra, por meio de um pistão movido por uma alavanca e é mantida durante cerca de 20 segundos, após esse tempo é retirada e o microscópio é movido manualmente até que se focalize a impressão (figura 25).

Algumas vantagens desse tipo de teste são: grande precisão de medida, deformação nula do penetrador, aplicação para toda a gama de durezas encontradas nos diversos materiais e aplicação em qualquer espessura de material, podendo, portanto, medir também durezas superficiais. Porém, apresenta algumas desvantagens, as quais são: podem ocasionar erros, quando as impressões não apresentam seus lados retos, assim como no teste *Brinell*, pode ocorrer em metais muito moles ou encruados; em metais com grande anisotropia obtêm-se impressões de formato de losango irregular, provocando diferenças entre lados, fazendo-se necessário tomar a média desses valores, logo, o valor encontrado será aproximado.



**Figura 25 - Medição de dureza Vickers em durômetro do tipo LPM**

Fonte: Fredel; Ortega e Bastos (s.d)

Faz-se importante ressaltar que, no contexto da engenharia, a determinação de tensões não é o objetivo final, mas um passo necessário no desenvolvimento de cálculos para estimar tensões admissíveis, as quais são importantes em projetos ou estudo estrutural de elementos. Portanto, o engenheiro responsável por projetos deve restringir a tensão do material a um nível seguro ou admissível.

Segundo Baêta e Sartor (1999), o coeficiente de segurança depende de alguns fatores, tais como, consistência da qualidade e durabilidade do material, comportamento elástico, espécie de carga e de sollicitação, dentre outros. Dessa forma, é apresentado alguns coeficientes de segurança utilizados de acordo com o tipo de material. Para o coeficiente do aço, por exemplo, os autores estabelecem um intervalo de 1,5 a 2,0. Para o ferro fundido seria de 4 a 8, no caso da madeira de 2,5 a 7,5 e por fim, materiais de alvenaria, de 5 a 20.

O cálculo da tensão admissível leva em consideração a resistência máxima ou a tensão de ruptura do material e o coeficiente de segurança estipulado (equação 7), com o objetivo de se obter um valor seguro e prevenir o aparecimento de grandes deformações ou até mesmo o rompimento da estrutura.

$$\sigma_{adm} = \frac{r_{max \text{ ou } \sigma_{rup}}}{coef \text{ segurança}} \quad (7)$$

## 2.5 CLASSIFICAÇÃO DOS AÇOS

É fundamental ressaltar as características dos tipos de aços existentes. Segundo Scheid (2010) os aços são caracterizados como ligas Ferro-Carbono-Manganês (figura 26), com teor de Carbono de até 2,1%, perfazendo ainda elementos residuais como o Enxofre e Fósforo.



**Figura 26 - Esquema representando a constituição dos aços.**

Fonte: Scheid (2010, p. 45).

Os aços estruturais são aqueles de ampla aplicação, apropriados para o uso em elementos que suportam cargas, dessa forma, de acordo com Ferraz (2005) há alguns requisitos para os aços com propósito de aplicação estrutural, os quais são, elevada tensão de escoamento

e tenacidade, visando a prevenção de deformação plástica generalizada e prevenção de fratura rápida, respectivamente; além de terem boa soldabilidade com o objetivo de minimizar alterações na junta material e solda.

Os aços podem ser subdivididos em três grupos conforme a tensão de escoamento mínima especificada.

- Aços carbono: em torno de 195 a 260 MPa;
- Aços de alta resistência e baixa liga (ARBL): aproximadamente de 290 a 345 MPa;
- Aços liga tratados termicamente: por volta de 630 a 700 MPa.

Os aços carbono são os mais consumidos devido ao baixo custo e suas propriedades à medida em que há variação do carbono em sua composição. São classificados em aços de baixo, médio e alto teor de carbono. Aqueles de baixo teor de carbono têm características tais como, boa soldabilidade (evita a formação de martensita) e alta ductilidade, dessa forma, são aplicados em chapas para estampagem, tubos e fios para arames lisos e farpados. Quando combinados a elementos de ligas podem ser aplicados como ferramentas de impacto, por exemplo, eixos, engrenagens e pinos, pois apresentam propriedades de resistência ao desgaste e tenacidade. No caso dos aços com teor médio de carbono (entre 0,3 e 0,5%) possuem alta ductilidade a quente e média resistência a frio, portanto, são aplicados em produtos forjados. Ao se adicionar elementos de liga apresentam alta resistência (mediante têmpera e revenido) e são aplicados em eixos e engrenagens de caminhão. Por fim, os aços de alto teor de carbono são utilizados para molas e vergalhões de concreto, já que apresentam alto limite de escoamento, ou seja, o material trabalha em regime elástico. O intuito da adição de elementos de liga é obter elevada dureza para aplicação em aços ferramenta (FERRAZ, 2005).

Os aços liga também são divididos em três grupos, aços de baixa, média e alta liga. Os aços de baixa liga (teor inferior a 5%) tem por objetivo aumentar a temperabilidade e resistência ao revenido, isto é, evitar o amolecimento entre 300 e 550 °C. Os elementos de liga predominantes nestes aços são: Cromo, Níquel, Molibdênio, Vanádio. Os aços de média liga (de 5 a 10%) são aplicados a situações em que se deseja elevada resistência mecânica em altas temperaturas, ou ainda elevada resistência ao impacto associada a alta dureza, dessa forma, podem ser aplicáveis a matrizes de recorte, estampagem e lâminas de tesouras. Por último, os aços com quantidade de elementos de liga maior que 10% podem ser empregados em diversas áreas devido a suas características de elevada resistência a oxidação, alta resistência mecânica e ao desgaste, dureza a quente e habilidade de endurecer mediante impacto (aços austeníticos

que se transformam em martensíticos), esta capacidade se reflete em moinhos e martelos para britagem de rochas (FERRAZ, 2005).

No caso dos aços de alta resistência e baixa liga, conforme Silva e Mei (1988) são utilizados em aços estruturais, para embutimento, tubulações, vasos de pressão, entre outros, devido ao elevado limite de resistência, boa tenacidade a baixas temperaturas, boa conformabilidade e soldabilidade. São resultantes de processos que visam o endurecimento por precipitação, refino do grão e adição de elementos microligantes.

Faz-se importante ressaltar algumas diferenças entre os aços carbono e aços ligados, para Silva e Mei (1988) a maior diferença é na temperabilidade, superior nos aços ligados. Neste tipo, quando temperados a mesma dureza, conservam as mesmas propriedades de tração. Além disso, há contrastes entre a relação de redução de área e resistência a tração ao se comparar os dois tipos de aços. Os aços ligados exibem redução de área superior para a mesma resistência, porém apresentam maior resistência ao amolecimento pelo processo de revenimento, isso quer dizer que, devem ser revenidos a temperaturas elevadas para obter melhor alívio de tensões. Ou seja, em termos de correção de dureza e fragilidade, os aços carbono respondem melhor ao processo. Quanto a usinagem, dentre os aços ligados, aqueles que contém níquel e molibdênio são os mais usináveis.

Tem-se ainda os chamados aços patináveis ou aclimáveis, os quais combinam características de resistência mecânica e a corrosão atmosférica, devido a presença de determinados elementos de liga. Comercialmente, são chamados de “CORTEN”, e são utilizados nos mais diversos campos, principalmente na construção civil. Sua resistência mecânica está na faixa de 500 MPa. Ademais, tem-se ainda os aços inoxidáveis, os quais possuem teores de cromo acima de 12% e apresentam alta resistência à corrosão, impacto, abrasão e durabilidade. A diferença do aço inox com os aços patináveis é que, estes formam uma camada protetora, devido a reação do cromo com o oxigênio atmosférico, e têm a habilidade de se recompor imediatamente, desde que haja oxigênio disponível para a formação do óxido protetor (SILVA E MEI, 1988).

Os aços inoxidáveis apresentam três tipos de composição química, podendo ser classificados como: austeníticos, ferríticos e martensíticos (figura 27). Consoante Silva e Mei (1988) são apresentadas suas características.

### 2.5.1 Austeníticos

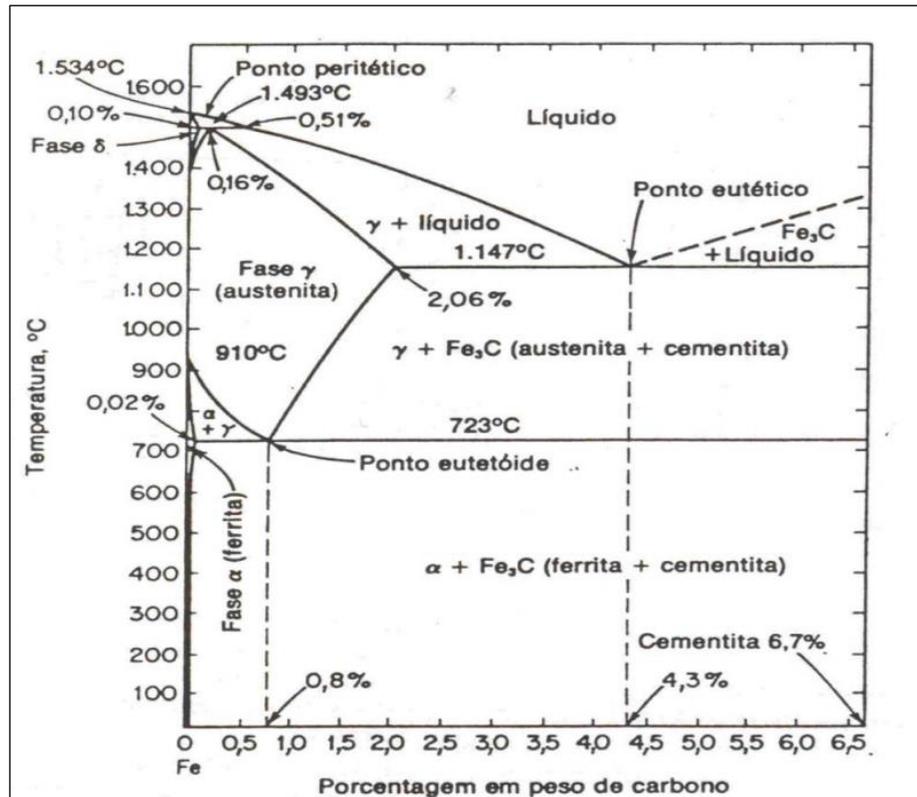
Compostos por ligas de ferro, cromo e níquel, que não respondem ao tratamento térmico de têmpera. Parte do níquel pode ser substituído por manganês ou nitrogênio, com intuito de diminuir custos. Podem ser classificados em austeníticos estáveis e metaestáveis, aqueles são capazes de conservar estrutura austenítica mesmo após significativa deformação a frio e estes, por sua vez, transformam a estrutura para martensítica, quando submetidos a deformação a frio. Esses tipos de aços têm alta plasticidade e capacidade de encruamento, além disso, apresentam as melhores propriedades de resistência à altas temperaturas (SILVA E MEI, 1988).

### 2.5.2 Ferríticos

São ligas de ferro e cromo e apresentam efeito estabilizador pelo carbono. A transformação desse tipo de aço ocorre durante o resfriamento, onde a austenita transforma-se em martensita de forma que, sua estrutura bruta forjada constitua-se de uma mistura de martensita e ferrita. Somente aços compostos com mais de 11% de cromo tem estrutura essencialmente ferrítica. Demonstram característica de baixa resistência ao impacto e problemas de soldabilidade. Apresentam menor custo por conterem teores reduzidos de elementos liga (SILVA E MEI, 1988)

### 2.5.3 Martensíticos

Constituídos por ligas de ferro e cromo (alto teor), são endurecidos por tratamento térmico de têmpera. São de ampla aplicação devido a elevada resistência ao amolecimento no revenimento; fator responsável por isso é o alto teor de cromo, e boa resistência a corrosão. A elevada temperabilidade implica em limitação da soldabilidade dos aços martensíticos (SILVA E MEI, 1988).



**Figura 27 - Diagrama de Equilíbrio**

Fonte: Durferrit do Brasil química LTDA - [http://www.durferrit.com.br/downloads/13\\_Diagrama%20Ferro-Carbono.pdf](http://www.durferrit.com.br/downloads/13_Diagrama%20Ferro-Carbono.pdf)

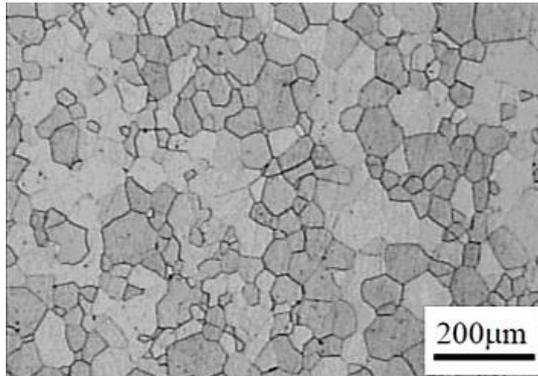
O estudo do diagrama de equilíbrio do ferro-carbono é importante para compreender as variações do teor de carbono nos aços que resultam na obtenção de diferentes propriedades, e dessa forma, entender sua grande aplicabilidade.

A análise do diagrama pode ser feita em duas faixas de porcentagem de carbono, “a faixa correspondente aos aços, de 0,008% até 2,11% de C, e a faixa correspondente aos ferros fundidos, com porcentagens de carbono acima de 2,11%. Os aços com porcentagem de carbono acima de 0,8% (composição eutetóide) são denominados aços hipereutetóides, enquanto que os aços com porcentagem de carbono inferior a 0,8% são denominados aços hipoeutetóides. Analogamente, os ferros fundidos com porcentagem de carbono acima de 4,3% (composição eutética) são denominados ferros fundidos hipereutéticos, e os ferros fundidos com porcentagem de carbono inferior a 4,3% são denominados ferros fundidos hipoeutéticos” (DURFERRIT DO BRASIL QUÍMICA LTDA, 2016).

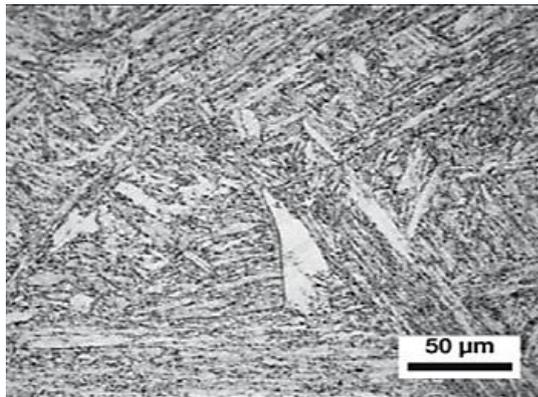
“Ressalva-se que, o ponto eutetóide é aquele correspondente à composição de carbono de 0,8%. Ligas dessa composição, elevadas até o campo austenítico (fase  $\gamma$ ) e em seguida resfriadas lentamente, atravessam a reação eutetóide, reação onde a austenita transforma-se em perlita, microestrutura constituída de lamelas de cementita ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) envoltas em uma matriz

ferrítica (fase  $\alpha$ ). Já o Ponto eutético corresponde à composição de carbono de 4,3%. Trata-se do ponto de mais baixa temperatura de fusão ou solidificação, 1147°C. Ligas dessa composição são denominadas ligas eutéticas” (DURFERRIT DO BRASIL QUÍMICA LTDA, 2016).

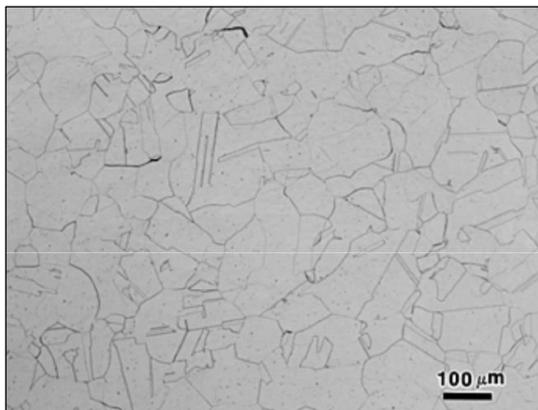
As figuras 28, 29 e 30 mostram as microestruturas dos aços ferríticos, martensíticos e austeníticos respectivamente.



**Figura 28 - Microestrutura de aços ferríticos (Aço AISI 409)**  
Fonte: Lopes, 2009



**Figura 29 - Microestrutura de aços martensíticos temperado e revenido.**  
Fonte: Colpaert, 2008



**Figura 30 - Microestrutura dos aços inoxidáveis austeníticos.**  
Fonte: Tschiptschin; Pinedo (2010)

## 2.6 ANÁLISE METALOGRÁFICA DOS AÇOS

Para que as propriedades dos aços e sua microestrutura possam ser estudadas, é necessário a execução de alguns procedimentos, os quais são descritos pela metalografia.

O ensaio metalográfico, de acordo com Rohde (2010) tem como intuito relacionar a estrutura íntima do material com suas propriedades físicas; pode ser feito ensaios macrográficos ou micrográficos. O primeiro é realizado a olho nu, ou seja, examina-se o aspecto do material com pouca ampliação no campo visual. Já o segundo é feito com o auxílio do microscópio, o qual identifica as fases presentes e permite a observação do tamanho dos grãos, o teor aproximado de carbono no aço, a natureza, a forma, a quantidade, e a distribuição de elementos e inclusões no material.

A observação e análise do material é realizada após a sua preparação, que consiste no corte, embutimento, lixamento, polimento e ataque químico de sua superfície.

### 2.6.1 Corte

Dependendo do tipo de amostra do corpo de prova é necessário a sua partição para a análise metalográfica. Dessa forma, consoante Rohde (2010), tem-se operações mecânicas tais como o torneamento, aplainamento que podem cortar o material, porém são procedimentos que provocam severas mudanças microestruturas no material, por serem trabalhados a frio. O corte abrasivo é a melhor opção para este seccionamento, já que molda a estrutura a temperaturas maiores, conferindo superfícies planas com baixa rugosidade, de modo rápido e seguro. O corte abrasivo é feito com discos abrasivos finos, de silicato e alumínio, geralmente. A escolha da seção de corte é dependente da forma da peça, em geral, faz-se cortes longitudinais ou transversais. A figura 31 representa uma máquina para corte à laser.



**Figura 31 - Máquina de corte a laser**  
Fonte: Adaptado de Worldcut (2017)

### 2.6.2 Embutimento

Esse procedimento consiste em circundar o corpo de prova com um material adequado, formando um corpo homogêneo. É utilizado para conferir um melhor manuseio da peça, evitar a danificação da lixa ou do pano de polimento e abaulamento da superfície, para que o observador consiga avaliar corretamente o material estudado. O embutimento pode ser realizado a quente ou a frio. Quando a frio se usam resinas sintéticas de polimerização rápida, formando um líquido viscoso em volta do material. É uma operação extremamente exotérmica e usa-se um catalisador para diminuir o tempo de endurecimento da substância. Já o embutimento a quente utiliza-se prensas para efetuar a polimerização. “O método consiste em colocar o corpo de prova com a face que se quer analisar em contato com o êmbolo inferior da máquina de embutimento. Após apertar o êmbolo, coloca-se a resina na câmara de embutimento pressionando-a por um determinado tempo” (ROHDE, 2010 p. 12). A figura 32 mostra uma máquina utilizada para o embutimento metalográfico.



**Figura 32 - Prensa de embutimento metalográfico**  
Fonte: Enila equipamentos (2017)

### 2.6.3 Lixamento

O lixamento é uma das etapas mais demoradas de um processo de preparação de amostras devido ao grau de perfeição que a peça deve estar para ser analisada. Tem como objetivo eliminar riscos e marcas mais profundas da superfície, preparando-a para o polimento.

A técnica pode ser realizada manualmente ou por meio de máquinas. A primeira técnica fundamenta-se no lixamento sucessivo da amostra, com lixas de granulometria cada vez menor, mudando-se de direção ( $90^\circ$ ) em cada lixa subsequente até que os traços da lixa anterior tenham desaparecidos. Deve-se ter cuidado e técnica nesse procedimento, pois, a pressão de trabalho e a velocidade de lixamento, podem provocar deformações plásticas em toda a superfície da amostra. Segundo Borges (2006), deve-se limpar a superfície do corpo de prova após o término do lixamento em cada lixa para que se possa observar o acabamento superficial antes de passar para a lixa seguinte.

Um dos lixamentos utilizados é o lixamento mecânico rotativo, na politriz, que prepara rapidamente o corpo de prova (figura 33). A maior razão de corte na politriz é obtida próximo a periferia do prato e não nas partes internas do disco. A lixa é colocada sobre o disco e o corpo de prova posicionado sobre a lixa, deve-se segurá-lo com pressão moderada.

A pressão usada deve ser moderada e firme. Se a pressão aplicada for muito elevada irá provocar a aderência de partículas de SiC (carbeto de silício). A técnica de preparação solicita fluxo de água maior do que

aquele empregado no processo manual, porém o suficiente para remover o pó, haja vista que se for colocada água em excesso, corre-se o risco da lixa descolar do prato (BORGES, 2006, p. 28).



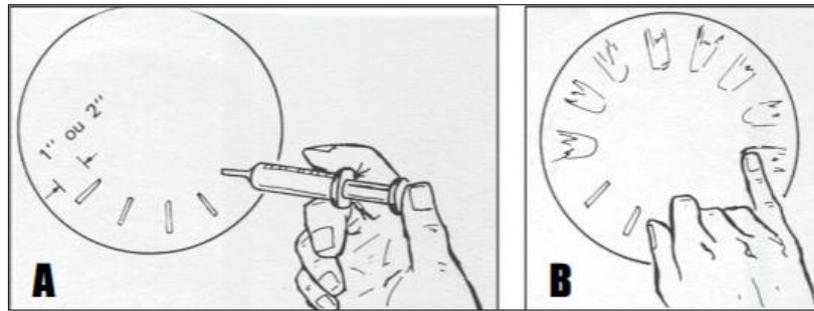
**Figura 33 - Politriz semiautomática**

Fonte: Rohde, 2010

#### 2.6.4 Polimento

Após o lixamento é realizado o polimento, com o objetivo de alcançar uma superfície polida, isenta de marcas ou riscos. Antes de iniciá-lo, recomenda-se a limpeza do material com água ou algum líquido de baixo ponto de ebulição (álcool etílico, fréon líquido, etc). Utiliza-se nesse procedimento substâncias abrasivas como pasta de diamante e/ou alumina.

O abrasivo de diamante é o preferido para o polimento grosseiro devido a sua propriedade de dureza, apesar de ser mais caro que os outros polidores, quando se trata de metais duros, o resultado obtido é melhor. A deposição da pasta de diamante no pano de polimento deve ser moderada, pois, a quantidade excessiva além de representar um gasto inútil, provoca a redução de sua eficiência de corte, assim sendo, afeta a qualidade da superfície polida. A figura 34 representa a forma correta de deposição da pasta no pano de polimento.



**Figura 34 - deposicao do agente polidor**

Fonte: Borges (2006)

A alumina, segundo Borges (2006) é utilizada em seu estado levigado, ou seja, é tratada e decantada com água cristalina, sendo o produto um finíssimo pó de alta qualidade. Alguns metalografista utilizam uma combinação dessas substancias para o polimento, pois são comercializadas com diferentes granulometrias e como a alumina é mais barata, o procedimento pode ser iniciado com ela e finalizado com diamante.

O polimento pode ser mecânico, utilizando-se uma politriz ou por processos semiautomáticos, como por exemplo o processo eletrolítico, através da dissolução anódina de um metal em um eletrólito, obtendo-se uma superfície plana e polida. Pode-se ter também um processo mecânico – eletrolítico, que consiste nos processos de deposição eletrolítica e mecânico simultaneamente. Este método é indicado para materiais de difícil polimento. E por fim, tem-se o polimento mecânico – químico, utilizando-se de técnicas mecânicas e químicas na superfície do material. (ROHDE, 2010)

#### 2.6.5 Ataque químico

Essa técnica permite a visualização dos contornos dos grãos e as diferentes fases que constituem o metal. Um reagente ácido é colocado em contato com a superfície da peça por certo tempo, geralmente é feito por esfregamento de um algodão ou por imersão da peça no líquido ácido (figura 35). O reagente causará a corrosão da área aplicada, e ao observar o material no microscópio pode-se notar sua microestrutura (ferrítica, perlítica, martensítica ou austenítica). Os reagentes são escolhidos em função do material e dos constituintes macroestruturais que se deseja contrastar na análise metalográfica. Ao atacar o metal com o ácido, alguns grãos e fases serão mais atacados do que outros, o que provoca a reflexão de luzes com diferentes tonalidades, realçando o contorno dos grãos.



**Figura 35 - Imersão do metal no líquido ácido**  
Fonte: Borges (2006)

### 2.6.6 Microscopia óptica

Atualmente existem numerosas ferramentas para a análise micrográfica de materiais. Porém, segundo Borges (2006), o microscópio óptico continua sendo a melhor opção, para o estudo metalográfico. O microscópio eletrônico de transmissão (MET) e o microscópio eletrônico de varredura (MEV) são ferramentas muito importante, consoante Matsukuma (2017), pois oferecem um grau detalhado de caracterizações estruturais, espectroscópicas, composicionais e cristalográficas, em diferentes materiais. A diferença destes com o microscópio óptico é que a fonte de iluminação deles é por feixes de elétrons e não por luz visível.

As limitações do MET e do MEV são os pontos fortes do microscópio óptico e vice-versa, logo os microscópios óptico e eletrônico são técnicas complementares ao invés de competitivas (BORGES, 2006, p. 43).

Com o uso do microscópio óptico obtém-se as fases estruturais presentes e a constituição do material. Tais observações são relevantes, pois influenciam no comportamento e propriedades físicas do material. Na análise metalográfica, a superfície de um material corretamente preparado é examinada antes ou depois do ataque, ou em ambas as condições.

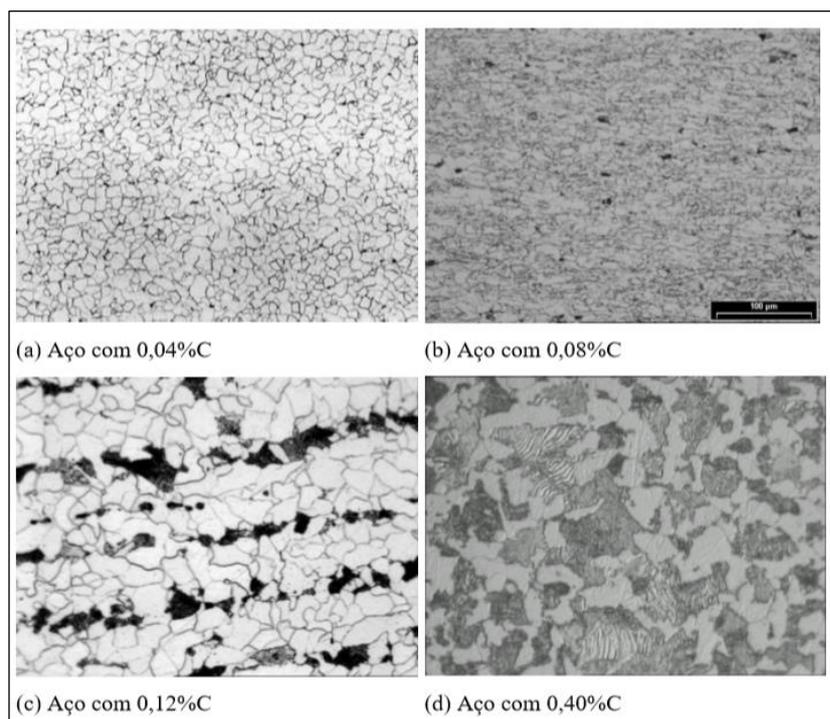
## 2.7 EFEITO DA ADIÇÃO DE LIGAS NOS AÇOS

Considerando-se a liga Fe-C, pode-se observar outros tipos de elementos, além do carbono, oriundos do próprio processo, os quais podem alterar as características do aço. E com

intuito de melhorar, otimizar as propriedades dos aços, são adicionados elementos ligantes em sua composição. Desse modo, os efeitos dos elementos de liga nos aços envolvem não apenas as propriedades mecânicas, mas também podem provocar alterações nas fases ou constituintes presentes em equilíbrio, bem como na velocidade com que estas fases se formam (SHEID, 2010).

De acordo com Scheid (2010), deve se analisar, primeiramente o efeito da adição de Carbono sobre as propriedades dos aços. Um dos seus efeitos é induzir a elevação da dureza e resistência mecânica e reduzir a ductilidade, além disso permitir a formação de carbonetos com o Ferro e elementos de liga ( $\text{Fe}_3\text{C}$  /  $[\text{Nb},\text{Ti},\text{V}]\text{C},\text{N}$  /  $\text{BN}$  / outras).

Pode-se notar as diferenças microestruturais que variam em função do teor de Carbono em um mesmo aço, submetido a diferentes tratamentos termomecânicos, conforme figura 36.



**Figura 36 - Diferenças microestruturais em função dos diferentes teores de Carbono.**

Fonte: Scheid (2010, p. 49)

As diferenças microestruturais influenciam nos patamares de resistência mecânica e propriedade mecânica dos aços.

Conforme mencionado, alguns elementos constituintes da liga Fe-C, são provenientes do próprio processo de fabricação do aço, e podem conferir características peculiares ao material, influenciar tanto na estrutura, como nas propriedades do aço. Consoante Scheid (2010) o fósforo, por exemplo, em teores elevados, torna o aço frágil e quebradiço. O enxofre, além de

torna-lo frágil, deixa-o áspero e granuloso. Em pequenas quantidades, o enxofre pode tornar o material mais fácil de usinar. Já o silício tem a função de desoxidante, além de poder ser usado para a aumentar a temperabilidade e resistência ao revenido. O elemento manganês atua como desoxidante e dessulfurante, mas em teores elevados forma carbonetos menos estáveis que o ferro, prejudicando a resistência ao revenido.

O cromo é um componente adicionado com o intuito de elevar a temperabilidade, bem como formar carbonetos endurecedores, e por fim, pode ainda, elevar a resistência a quente do material. O cromo pode ser utilizado em produtos para indústria química, talheres, válvulas, peças para fornos e ferramentas de corte, além de ser utilizado em aço-ferramenta e inox (SHEID, 2010).

O vanádio é um forte desoxidante e quando dissolvido na austenita tem grande efeito sobre a temperabilidade e evita o crescimento dos grãos, servindo então como estabilizador de grãos. É utilizado em ferramentas de corte (SHEID, 2010).

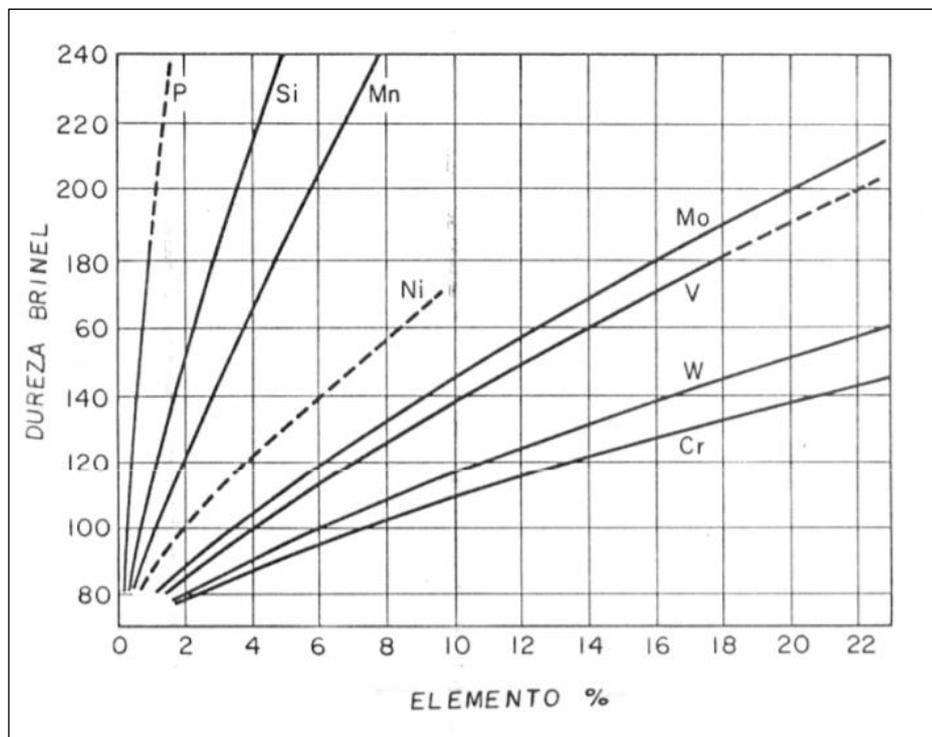
O elemento tungstênio é adicionado com o objetivo de favorecer um pico de dureza secundário no processo de revenimento; e com o aumento do seu teor há uma elevação da resistência ao desgaste. O tungstênio pode ser substituído pelo molibdênio, apesar de ter um custo mais elevado, usa-se este componente em menor quantidade (SHEID, 2010).

A adição de cobalto pode aumentar a dureza a quente dos aços rápidos (usados em corte de metais em alta velocidade), porém não é endurecedor, mas em contrapartida, esse elemento atua na dissolução de carbonetos, isso é, eleva a dissolução de outros elementos, a consequência disso é o aumento da dureza no estado temperado, esse fato ocorre devido a possibilidade de empregar temperaturas mais elevadas na austenitização na têmpera (SHEID, 2010).

O Nióbio (Nb) é considerado um formador de carbonitretos, aspecto fundamental para o processo de endurecimento por dispersão (causado por contornos entre diferentes fases do aço), além disso é o principal refinador do grão ferrítico dos aços microligados. Para Souza (2012), o Nióbio pode substituir o Vanádio (ou até mesmo outros elementos de liga) em aços de baixa liga. A vantagem dessa substituição, além do menor custo, é devido a maior eficiência do Nb, dado que, para se conseguir a mesma resistência com o Vanádio, seria necessário um teor de Vanádio quatro vezes maior que o de Nióbio.

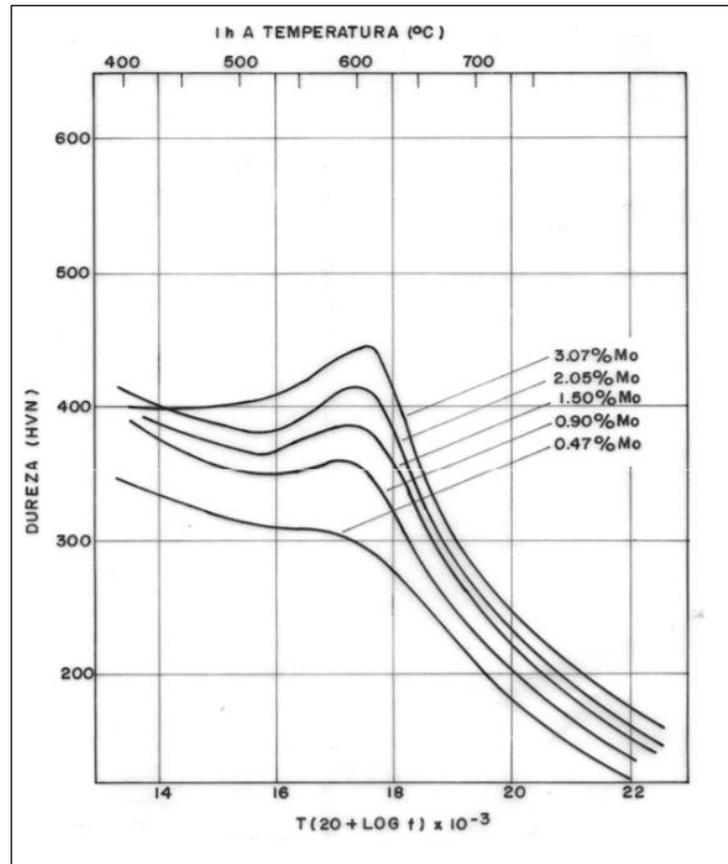
Pode-se citar também algumas vantagens da incorporação do alumínio, que, assim como o silício é desoxidante, e pode ser utilizado nos aços a serem nitretados devido a sua afinidade com o nitrogênio.

O boro, por sua vez, melhora a temperabilidade e resistência a fadiga, e por fim, o chumbo, em pequenas quantidades melhora a usinabilidade, sem prejudicar as propriedades mecânicas do aço. A figura 37 representa o efeito de elementos de liga na dureza do ferro, percebe-se que, ao se aumentar a porcentagem de elementos, a dureza do material também aumenta. Já a figura 38 faz relação da dureza com a temperatura de adição do elemento de liga. Observa-se que há uma temperatura ótima para determinada quantidade de molibdênio adicionada. Essa temperatura, como se percebe, é bastante similar em todos os casos.



**Figura 37 - Efeito dos elementos de liga na dureza do ferro.**

Fonte: Fonte: Tschiptschin; Pinedo (2010)



**Figura 38 - Efeito do Molibdênio na resistência ao revenido da martensita. Curva revenido de aço com 0,1% de C.**

Fonte: Tschiptschin; Pinedo (2010)

É importante evidenciar também o efeito das adições múltiplas de elementos nos aços microligados, como por exemplo, o Nióbio e Vanádio usados em conjunto nos aços obtidos por laminação controlada. O primeiro componente apresenta a vantagem de um breve aumento de resistência e melhoria da tenacidade; já os carbonitretos de Vanádio, fornecem um aumento de resistência adicional, porém com um decréscimo de tenacidade. O resultado do material associado ao Nióbio e Vanádio é um aumento no seu nível de resistência mecânica com valores aceitáveis de tenacidade. É essencial esclarecer que o efeito de adições múltiplas pode ocasionar diversas interações, e em alguns casos, a eficiência individual de cada elemento pode ser limitada. (SIWECKI, 1992).

### 2.7.1 Influência do Nióbio como elemento de liga nos aços

O nióbio é um elemento que, adicionado em quantidades de 0,01 a 0,10% em aços de baixo carbono, de acordo com Mekkawy et al (1991), colabora na melhoria da resistência ao crescimento de grão durante o reaquecimento do material devido aos carbonitretos de Nióbio,

presentes em altas temperaturas. Além disso, com a adição de Nióbio promove-se um substancial refino de grão, durante o tratamento termomecânico do aço.

Segundo Lee et al (1992) o Nióbio tem influência nas propriedades mecânicas e no retardo da recristalização da austenita, esse fato é valoroso, pois irá permitir uma granulometria mais fina do material, e o refino do grão é um mecanismo de endurecimento oportuno para aumentar a resistência mecânica do material e sua tenacidade. Consoante o disposto por Prates (2011) o mecanismo de precipitação da austenita é muito lento utilizando-se temperaturas e tempos normais de trabalho a quente, contudo, usando-se deformação a quente, facilita-se o endurecimento por precipitação, pois, as discordâncias e contornos de grão trabalham como sítios de precipitação de carbonetos e nitretos e isso impede a recristalização da austenita, contribuindo para um aumento na taxa de nucleação da ferrita, durante a transformação, refinando os grãos.

No caso de aços com teor superior a 0,15%, diante ao exposto por Heisterkamp e Tadeu (2001), o nióbio pode apresentar uma desvantagem. A adição desse elemento pode criar áreas com microestruturas aciculares de baixa tenacidade, fator que poderá restringir a aplicação do Nióbio em casos que necessitem de alta tenacidade.

A atuação do Nióbio nos aços tem como características o refino do grão austenítico, o endurecimento da ferrita por precipitação e o atraso na recuperação e recristalização da austenita, fatores relacionados com o elemento dissolvido na austenita, na forma de carbonitreto. Alguns elementos adicionados junto ao Nióbio podem alterar sua solubilidade, por exemplo, a incorporação de Manganês, Cromo e Níquel contribui com o aumento da solubilidade do carboneto de Nióbio na austenita e a adição de Silício colabora na queda desta solubilidade (HEISTERKAMP E TADEU, 2001).

## 2.8 AÇOS MICROLIGADOS UTILIZADOS NA CONSTRUÇÃO DE CAÇAMBAS

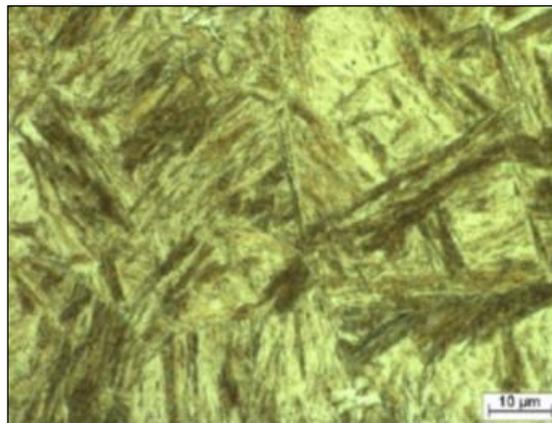
De acordo com Rodrigues (2012), os aços de alta resistência combinam elementos de liga, os quais atribuem maior resistência mecânica às estruturas, através de propriedades, tais como: Limite de Ruptura, Limite de escoamento, Módulo de Elasticidade, etc. Tais aços são utilizados em muitas áreas, e uma das mais solicitadas é a de implementos rodoviários devido

a demanda por parte desses equipamentos e às propriedades que os aços microligados podem fornecer nestas áreas.

### 2.8.1 Hardox 400/450

Consoante SSAB (2015), o Hardox 450 é uma chapa de alta resistência com dureza em Brinell na faixa dos 450 kgf /mm<sup>2</sup> e limite de escoamento variando entre 1.100 a 1.300 MPa. Devido à combinação consistente entre alta dureza, elevada resistência mecânica e excelente resistência ao impacto, o Hardox tem sido utilizado em caçambas de caminhão basculante, permitindo construções mais simples e mais leves e ao mesmo tempo suportando altas cargas.

Conforme mostrado por Ulewicz, Mazur e Bokůvka (2014, p. 113), as análises executadas em chapas de aço Hardox 400 e Hardox 450 obtiveram estruturas martensíticas aciculares, como mostrado na Figura 39.

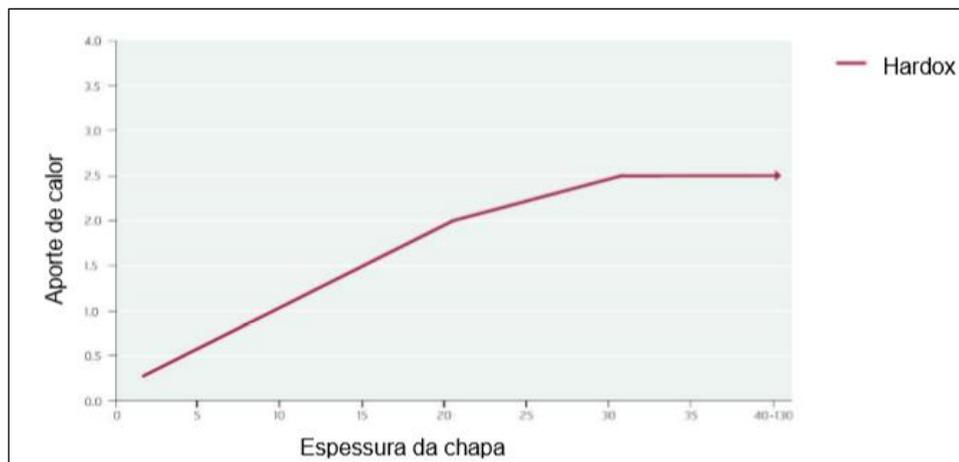


**Figura 39 -Microestrutura do aço Hardox® 450**  
Fonte: ULEWICZ, MAZUR E BOKŮVKA (2014)

Segundo a companhia ESAB (2005), ao se submeter o material ao processo de soldagem, verifica-se uma diminuição da resistência mecânica do mesmo na zona termicamente afetada (ZTA); e o que provoca a fragilização da ZTA é a presença elevada de átomos de hidrogênio devido ao resfriamento rápido que ocorre, provocando pressões internas no material, que por sua vez, gera trincas a frio.

O que possibilita a minimização desse efeito, de acordo com SSAB (2011, p. 4) é diminuir o teor de hidrogênio na junta preparada e ao seu redor através de utilização de temperatura de pré-aquecimento e manter impurezas afastadas da área de soldagem.

Uma segunda forma de minimizar as distorções provocadas pela soldagem, de acordo com Vetturazi (2013), seria reduzir a magnitude do calor real de entrada da soldagem. As propriedades mecânicas do aço são afetadas pelo calor gerado no processo de soldagem. Há um aporte de calor recomendado para determinada espessura de chapa a ser soldada como mostra a figura 40.



**Figura 40 - Aporte de calor recomendado para uma junta soldada de Hardox**

Fonte: SSAB, 2011

Desta forma, conclui-se que, o Hardox é um aço de ótima resistência e dureza, e ainda, boa conformabilidade em virtude de sua estrutura martensítica. É um aço de boa soldabilidade, comparado ao aço comum; apesar de apresentar valores menores de dureza em algumas regiões ao se aplicar a solda, há condições de contorno para minimizar esse problema.

### 2.8.2 Domex

Os aços Domex são conformados a frio e processados termo mecanicamente (processos de aquecimento, laminagem e arrefecimento são cuidadosamente controlados). Os elementos adicionados como o Nióbio, Titânio e Vanádio favorecem o refinamento do grão. (SSAB, 2003)

Esse tipo de aço é aplicado em chassis de caminhões, guindastes e máquinas de terraplanagem por ter alta resistência e proporcionar redução de peso ao conjunto a ser aplicado.

Segundo a SSAB (2013), o Domex propicia soldagem com os métodos convencionais, sem necessitar de pré aquecimento, devido ao baixo teor de carbono, fósforo e enxofre. Porém, assim como o Hardox, há uma zona termicamente afetada pelo calor, mas sua propriedade não é significativamente alterada.

Os aços Domex podem ser aplicados em diversas áreas pois apresentam ótimas propriedades de acordo com seu destino. Consoante a SSAB (2013) o *Domex Wear* é um aço resistente à abrasão e ao desgaste, permitindo uma redução no peso e vida útil prolongada aos materiais, além disso é mais fácil de se soldar e dobrar do que muitos outros aços resistentes ao desgaste. Já o *Domex Weather Resistant* é um aço resistente à corrosão e também é caracterizado por boa conformabilidade, soldabilidade e força de impacto. Tem-se também o *Domex Protect* possui uma dureza que confere à chapa boas propriedades de proteção balística e de penetração. O *Domex Pole sheet* tem alta resistência e propriedades magnéticas que o torna adequado para perfuração automática e corte a laser, esse tipo de aço é utilizado para anéis de rotor e pólos de geradores.

Os aços de formação a frio de alta resistência Domex MC possuem excelente conformabilidade em relação à sua alta resistência, boa soldabilidade devido ao seu baixo conteúdo de elementos de liga e boa resistência ao impacto a baixas temperaturas, por isso, é adequado para galvanização por imersão a quente devido a sua composição química. A figura 41 expõe a escala de resistência de acordo com o tipo de aço Domex. Nota-se que, o tipo de aço de maior tensão de escoamento é o Domex 900.

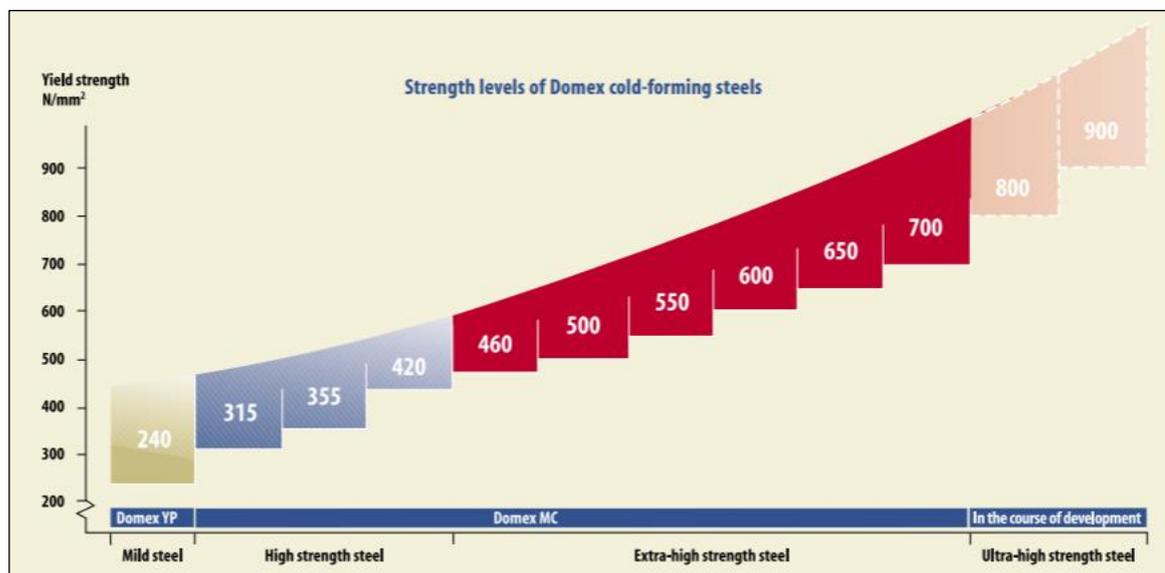


Figura 41 - Nível de resistência dos aços Domex formados a frio

Fonte: SSAB (2013)

### 3 METODOLOGIA

Este projeto em questão contemplou inicialmente a pesquisa bibliográfica de conceitos correlacionados às áreas de metalurgia e lavra de minério, e tem como intuito expor os benefícios da utilização do aço microligado ao Nióbio no campo da lavra de minério ao se realizar uma análise estrutural das caçambas de caminhões basculantes, e assim favorecer o processo de transporte do produto. A pesquisa foi executada em livros, publicações, artigos, catálogos e sites técnicos.

O estudo abrangeu a investigação sobre o uso do aço microligado ao Nióbio para a construção de caçambas mais leves e resistentes, desse modo, propõe-se a utilização de técnicas metalográficas, ou seja, um estudo das características estruturais ou da constituição dos metais e suas ligas, para relacioná-los com suas propriedades físicas, químicas e mecânicas, bem como ensaios mecânicos para se obter valores de resistência e dureza dos materiais. E por fim, efetuar a análise estrutural da caçamba por meio do software *Solidworks*, com o objetivo de testar o efeito de cargas nas estruturas físicas e componentes da mesma.

#### 3.1 MATERIAIS

Os materiais utilizados contemplam um aço comum 1020, doado pelo CEFET – MG, uma amostra com baixo teor de Carbono microligado ao Nióbio, fornecido pela Pesquisadora e Doutora Andersan dos Santos Paula, Universidade Federal Fluminense, e dois aços microligados ao Nióbio da marca HARDOX 450 e DOMEX, cedidos pela CBMM.

A tabela 1 representa a composição química da amostra de aço 1020 fornecida pela CBMM.

**Tabela 1 - Composição química do aço 1020**

| <b>(p/p)% de elementos químicos</b> |           |           |          |          |           |           |           |           |           |
|-------------------------------------|-----------|-----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| <b>C</b>                            | <b>Si</b> | <b>Mn</b> | <b>P</b> | <b>S</b> | <b>Ni</b> | <b>Mo</b> | <b>Cu</b> | <b>Al</b> | <b>Nb</b> |
| 0,054                               | 0,010     | 0,236     | 0,021    | 0,014    | 0,004     | 0,004     | 0,003     | 0,031     | 0,001     |

A tabela 2 mostra a composição química típica da amostra do material microligado ao nióbio.

Tabela 2 - Composição química da amostra de aço microligado ao Nióbio

| <b>(p/p)% de elementos químicos</b> |           |           |          |          |           |           |           |          |           |
|-------------------------------------|-----------|-----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|----------|-----------|
| <b>C</b>                            | <b>Si</b> | <b>Mn</b> | <b>P</b> | <b>S</b> | <b>Ni</b> | <b>Cr</b> | <b>Al</b> | <b>N</b> | <b>Nb</b> |
| 0,082                               | 0,005     | 1,606     | 0,016    | 0,008    | 0,009     | 0,020     | 0,028     | 0,006    | 0,014     |

A tabela 3 apresenta a composição química do aço microligado HARDOX 450, amostra fornecida pela CBMM.

Tabela 3 - Composição química do HARDOX 450

| <b>(p/p)% de elementos químicos</b> |           |           |          |           |           |           |           |           |          |           |           |
|-------------------------------------|-----------|-----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|-----------|-----------|
| <b>C</b>                            | <b>Si</b> | <b>Mn</b> | <b>P</b> | <b>Cr</b> | <b>Ni</b> | <b>Mo</b> | <b>Cu</b> | <b>Al</b> | <b>V</b> | <b>Ti</b> | <b>Nb</b> |
| 0,167                               | 0,216     | 1,369     | 0,011    | 0,152     | 0,088     | 0,024     | 0,154     | 0,046     | 0,006    | 0,011     | 0,012     |

Observação: W, Pb, Sn e B tem porcentagens abaixo 0,001.

E por fim, a tabela 4 mostra a composição química do aço microligado DOMEX, amostra fornecida pela CBMM.

Tabela 4 - Composição química do DOMEX

| <b>(p/p)% de elementos químicos</b> |           |           |          |          |           |           |           |           |           |          |           |           |
|-------------------------------------|-----------|-----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|-----------|-----------|
| <b>C</b>                            | <b>Si</b> | <b>Mn</b> | <b>P</b> | <b>S</b> | <b>Cr</b> | <b>Ni</b> | <b>Mo</b> | <b>Cu</b> | <b>Al</b> | <b>V</b> | <b>Ti</b> | <b>Nb</b> |
| 0,063                               | 0,062     | 1,790     | 0,017    | 0,003    | 0,007     | 0,043     | 0,005     | 0,005     | 0,024     | 0,011    | 0,102     | 0,056     |

Observação: Pb tem porcentagem abaixo de 0,002.

As análises químicas das amostras de aço comum 1020, HARDOX e DOMEX foram realizadas com o Espectrômetro de Emissão Ótica da CBMM e como procedimento adotou-se as Normas ASTM A 751:2008, Norma ASTM E 1086:2008 e Norma ASTM 415:2008.

A soldabilidade de um aço depende, principalmente, do teor de carbono presente, e pode ser estimada através da utilização de uma das expressões desenvolvidas para essa finalidade. Uma das mais conhecidas é a equação do carbono equivalente, equação 8.

$$\%C_{eq} = \left( C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{+Cu}{15} \right) \quad (8)$$

Assim, quanto maior for o Carbono equivalente, menor será a soldabilidade do aço, e mais lentamente deverá ser feito o resfriamento do conjunto.

## 3.2 MÉTODOS

Para alcançar os objetivos propostos para este trabalho foi realizada uma caracterização micro estrutural, a fim de identificar as fases estruturais presentes nos aços estudados, relacionando cada uma delas às propriedades mecânicas obtidas através de ensaios mecânicos de tração e dureza. Logo após, por meio de um software de desenho mecânico, uma caçamba de um caminhão utilizado na mineração foi desenhada para que com ela fossem realizadas simulações em algumas condições de trabalho a fim de verificar o desempenho dos aços em cada uma delas.

### 3.2.1 Técnicas de Caracterização Microestrutural

As técnicas de caracterização microestrutural tem como intuito verificar a microestrutura, ou seja, as fases presentes nos aços (ferrita, perlita, austenita e martensita) e permitir relacioná-las com as propriedades mecânicas através dos ensaios mecânicos (tração e dureza).

Primeiramente, fez-se a preparação metalográfica, que consiste em deixar as amostras planas e polidas para que possam ser nitidamente observadas ao microscópio. Em seguida, utilizou-se do ataque químico das amostras, por meio de reagentes, para realçar a microestrutura, ou seja, para permitir a investigação dos defeitos existentes e mais importante,

destacar as fases presentes. E por fim, a caracterização e análise das amostras foram feitas através de microscopia óptica, utilizando-se a técnica de metalografia.

### 3.2.1.1 Preparação Metalográfica

A princípio, faz-se necessário preparar as amostras. A preparação metalográfica consistiu basicamente em duas etapas: primeiro, o lixamento e polimento das amostras; e segundo, o ataque químico com uma solução de Nital 10% e Bicromato de Potássio. O Nital 10% foi preparado utilizando-se 90 ml de álcool etílico e 10 ml de ácido nítrico concentrado.

#### 3.2.1.1.1 Lixamento e Polimento

A primeira etapa foi feita em uma lixadeira manual da marca Arotec, utilizou-se lixas de carbeto de Silício nas seguintes granulometrias: 80,120, 180, 320, 500, 800, 1200 e 4000 mesh e água como lubrificante/refrigerante. Quanto ao polimento, foi executado em duas etapas, sendo a primeira em uma politriz manual (marca Arotec), com a seguinte sequência de abrasivos e tempos de permanência: uma solução aquosa de óxido de alumínio de 1, 0,3 e 0,05  $\mu\text{m}$  durante 30 minutos cada granulometria; a segunda etapa do polimento foi realizada pela mesma politriz, com a seguinte sequência de abrasivos e tempos de permanência: pasta de diamante de 6, 3 e 1  $\mu\text{m}$  durante 40 minutos para cada granulometria, e foi usado lubrificante para materiais ferrosos como líquido lubrificante/refrigerante.

#### 1.1.1.1.1 Ataque Químico

Para a segunda etapa da metalografia, as amostras foram atacadas com uma solução de Nital 10% e Bicromato de Potássio durante 5 segundos por esfregamento, com o objetivo de tornar-se visível a microestrutura do material (figura 42).



**Figura 42 - Ataque químico por esfregamento**

Fonte: Elaborada pelo autor

### 3.2.1.2 Caracterização e Análise das amostras

Após a preparação e ataque químico, fez-se a caracterização e análises das amostras por meio da metalografia, utilizando-se o microscópio óptico.

#### 3.2.1.2.1 Metalografia

Após o ataque químico, as interfaces dos diferentes constituintes das amostras foram reveladas, permitindo então a visualização das fases (ferrita, perlita, austenita e martensita) dos aços por meio da microscopia ótica.

O microscópio óptico utilizado para a análise metalográfica possui um sistema de aquisição de imagens digital com auxílio de uma câmera, conectada ao mesmo, pertencentes ao laboratório de Metalografia do Centro Federal de Educações Tecnológicas de Minas Gerais (CEFET-MG), Campus Araxá.

As imagens da microestrutura com ataque químico, foram realizadas conforme figura 43.

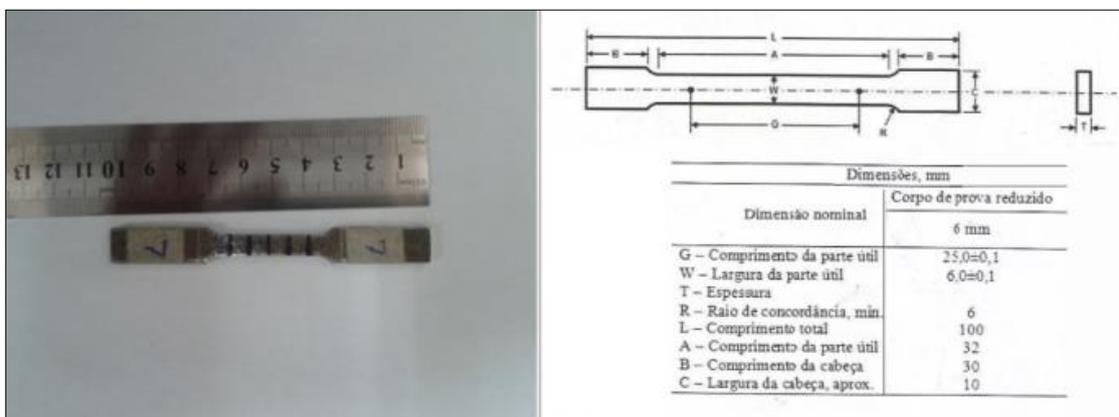


**Figura 43 - Análise da microestrutura do aço microligado ao Nióbio por meio do microscópio óptico**  
 Fonte: Elaborada pelo autor

### 3.2.2 Ensaios mecânicos

No que se refere aos ensaios mecânicos (tração e dureza), alguns procedimentos foram realizados no CEFET – MG (campus I) e outros na CBMM. O ensaio de tração gerou informações tais como, o limite de resistência a tração, limite de escoamento e o alongamento da amostra durante o ensaio. Já o ensaio de dureza, forneceu informações sobre o quanto o material pôde resistir à formação de uma marca, ou seja, a resistência do aço frente a deformações permanentes.

A figura 44 mostra as dimensões em milímetros de um dos corpos de prova utilizado para realizar o ensaio.



**Figura 44 - A) Foto de um dos corpos de prova antes do ensaio de tração. B) Dimensões do Corpo de Prova reduzido segundo as normas ABNT.**

Fonte: ALVES (2015)

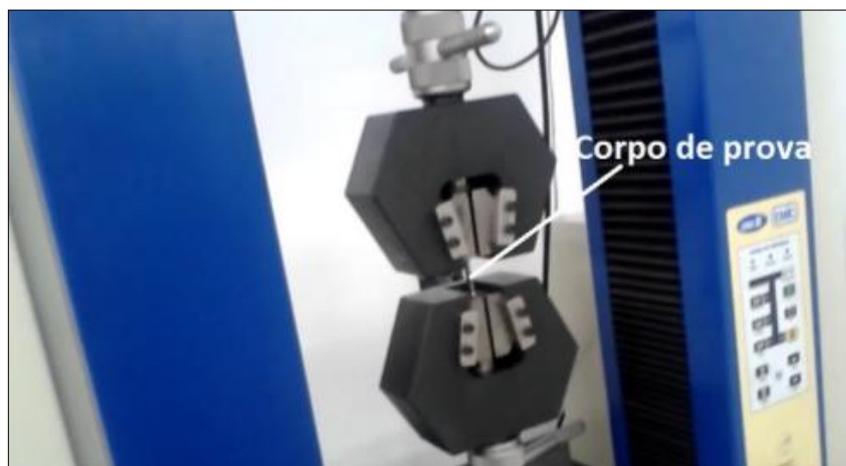
Foram realizados 10 corpos de prova, conforme mostra a tabela 5, indicando as dimensões das suas partes úteis.

**Tabela 5 - Dimensões da parte útil dos corpos de prova**

| <b>Corpo de prova</b> | <b>Comprimento da parte útil – G (mm)</b> | <b>Largura da parte útil – w (mm)</b> | <b>Espessura – T (mm)</b> | <b>Área – W x T (mm)</b> |
|-----------------------|---|---------------------------------------|---------------------------|--------------------------|
| <b>1</b>              | 25,25                                     | 6,38                                  | 3,24                      | 20,6712                  |
| <b>2</b>              | 25,29                                     | 6,29                                  | 3,38                      | 21,2602                  |
| <b>3</b>              | 26,08                                     | 6,39                                  | 3,36                      | 21,4704                  |
| <b>4</b>              | 26,61                                     | 5,9                                   | 3,29                      | 19,411                   |
| <b>5</b>              | 25,86                                     | 6,09                                  | 3,39                      | 20,6451                  |
| <b>6</b>              | 25,91                                     | 6,32                                  | 3,32                      | 20,9824                  |
| <b>7</b>              | 25,77                                     | 6,04                                  | 3,35                      | 20,234                   |
| <b>8</b>              | 25,89                                     | 6,35                                  | 3,41                      | 21,6535                  |
| <b>9</b>              | 26,11                                     | 5,93                                  | 3,37                      | 19,9841                  |
| <b>10</b>             | 25,8                                      | 6,22                                  | 3,27                      | 20,3394                  |

### 3.2.2.1 Ensaio de Tração

As amostras de aço foram confeccionadas segundo a norma da ABNT. Os corpos de prova foram encaixados nas garras, como mostra a figura 45. O teste foi iniciado com uma pré-carga de 40Kgf e os resultados de limite de resistência à tração, limite de escoamento e alongamento total foram fornecidos através de um software adequado à máquina de tração de modelo EMIC.



**Figura 45 - Máquina de tração modelo EMIC**  
Fonte: ALVES (2015)

### 3.2.2.2 Ensaio de Dureza

Os ensaios de dureza Vickers foram executados em um microdurômetro da marca Shimadzu, modelo HVM-2T, no caso da amostra de aço microligado ao Nióbio. As endentações foram distribuídas de forma a mapear a área que envolveu toda a superfície das amostras. A carga aplicada foi de 0,1Kgf, o tempo de permanência de 20 segundos. Já para as amostras de aço comum 1020, HARDOX e DOMEX, foi utilizado o microdurômetro LBM – 275, aplicando-se o procedimento de ensaio ASTM – E384 – 2011E.

### 3.2.3 Análise Estrutural no Software Solidworks

Finalmente, com o intuito de avaliar o desempenho da caçamba, a partir da aplicação dos aços estudados, fez-se o desenho paramétrico da caçamba no software *Solidworks*, a partir das dimensões e pontos de carga levantados em campo. Esse programa foi escolhido devido a familiaridade da equipe de pesquisa e por ser um software com características que suprem a necessidade do Projeto. Em seguida, através do *Solidworks Simulation* pôde-se realizar os testes de carregamento. Esses testes embasaram-se em situações recorrentes de trabalho de um caminhão basculante utilizado na mineração. Para isso, foram empregadas duas combinações, caçamba vazia (1) e sendo carregada (2).

O desenho foi baseado no caminhão MERCEDEZ 4844R 8x4, com capacidade de 42 toneladas. A pá carregadeira considerada para realizar a alimentação da caçamba foi a CAT 980H.

Após o desenho da caçamba fez-se considerações de alguns requisitos para dar prosseguimento à análise estrutural, tais como, as propriedades dos materiais a serem adicionados e a espessura das chapas que compõem a caçamba. Após essa etapa adicionou-se à estrutura o tipo de material que se desejou simular. O programa já tem em sua base de dados alguns materiais, porém, os aços utilizados no trabalho precisaram ser adicionados à sua biblioteca mediante a introdução de informações sobre as suas propriedades. Após isso, iniciou-se o estudo indicando o seu tipo (estático, dinâmico, temperatura, fadiga, entre outros), nesse caso, selecionou-se o estático, pois esse tipo de estudo oferece ferramentas para análise de tensão linear de peças e montagens submetidas a cargas estáticas. Em seguida, introduziu-se cargas (carregamentos) ao objeto, para isso, o usuário indica o valor, o plano e a direção da

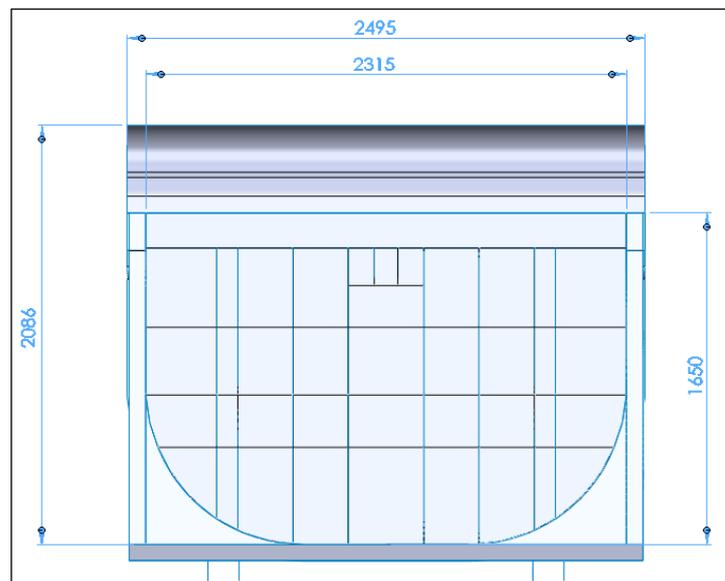
força. O próximo passo foi a criação da malha, bastou clicar no ícone e o programa, automaticamente a gerou. E por último, após lançar todos os dados (material, fixação, carga e criação de malha) executou-se o estudo para o programa gerar os resultados. Ao clicar em tensão, o software forneceu a tensão de Von Mises (média das tensões) das partes onde se aplicou a carga.

Com todos os procedimentos concluídos, pôde-se avaliar os benefícios dos aços microligados ao Nióbio e dessa forma tentar estabelecer uma aplicação destes em caçambas de caminhões basculantes.

### 3.2.3.1 Modelagem da Caçamba

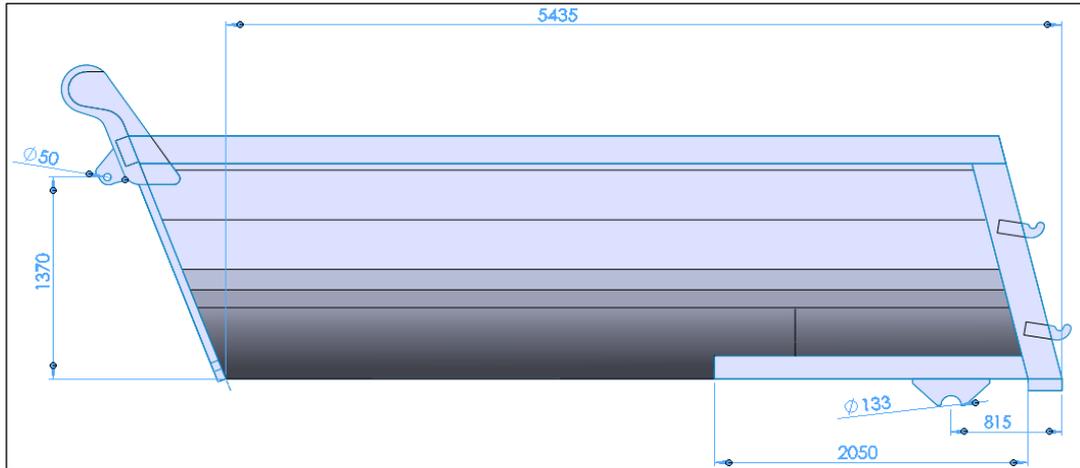
Primeiramente, fez-se a modelagem da caçamba no software de acordo com parâmetros observados em campo, ou seja, foi realizado um levantamento de campo de todas as medidas estruturais da mesma.

As dimensões da caçamba são mostradas nas figuras 46 e 47.



**Figura 46 - Vista traseira da caçamba - Dimensões básicas em mm**

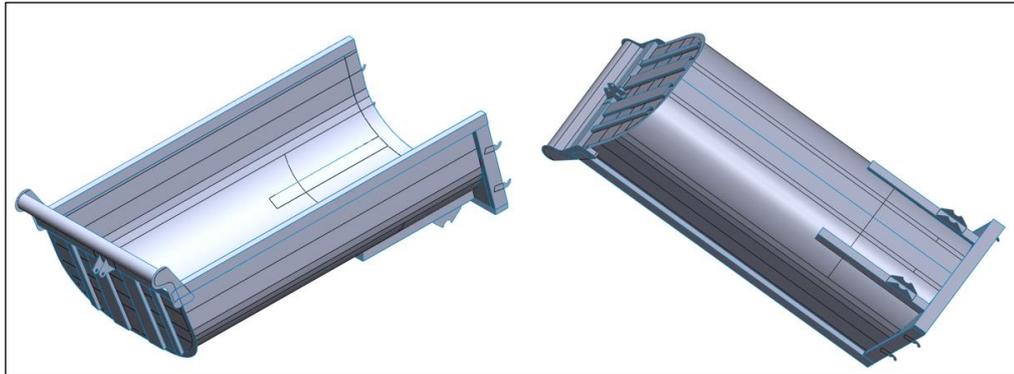
Fonte: Elaborada pelo autor



**Figura 47 - Vista lateral da caçamba - Dimensões básicas em mm**

Fonte: Elaborada pelo autor

Para melhor visualização, a figura 48 representa a vista isométrica da caçamba.



**Figura 48 - Vista isométrica da estrutura**

Fonte: Elaborada pelo autor

### 3.2.3.2 Considerações de Cálculo

Após a modelagem da caçamba, partiu-se para os cálculos nas situações de carregamento estipuladas, utilizando-se o *Solidworks simulation*. Antes das simulações foi preciso levar em consideração alguns requisitos.

#### 3.2.3.2.1 Propriedades dos materiais

Consoante Baêta e Sartor (1999), para um projeto de engenharia, faz-se necessário assumir uma fração das resistências máximas ou de ruptura do material, chamada de tensão admissível. Esse valor assegura ao material melhores condições de utilização, pois a estrutura deverá trabalhar com um valor mínimo aceitável de carregamento, o qual não provoque trincas ou deformações no material. À vista disto, efetuou-se o cálculo da tensão admissível para cada

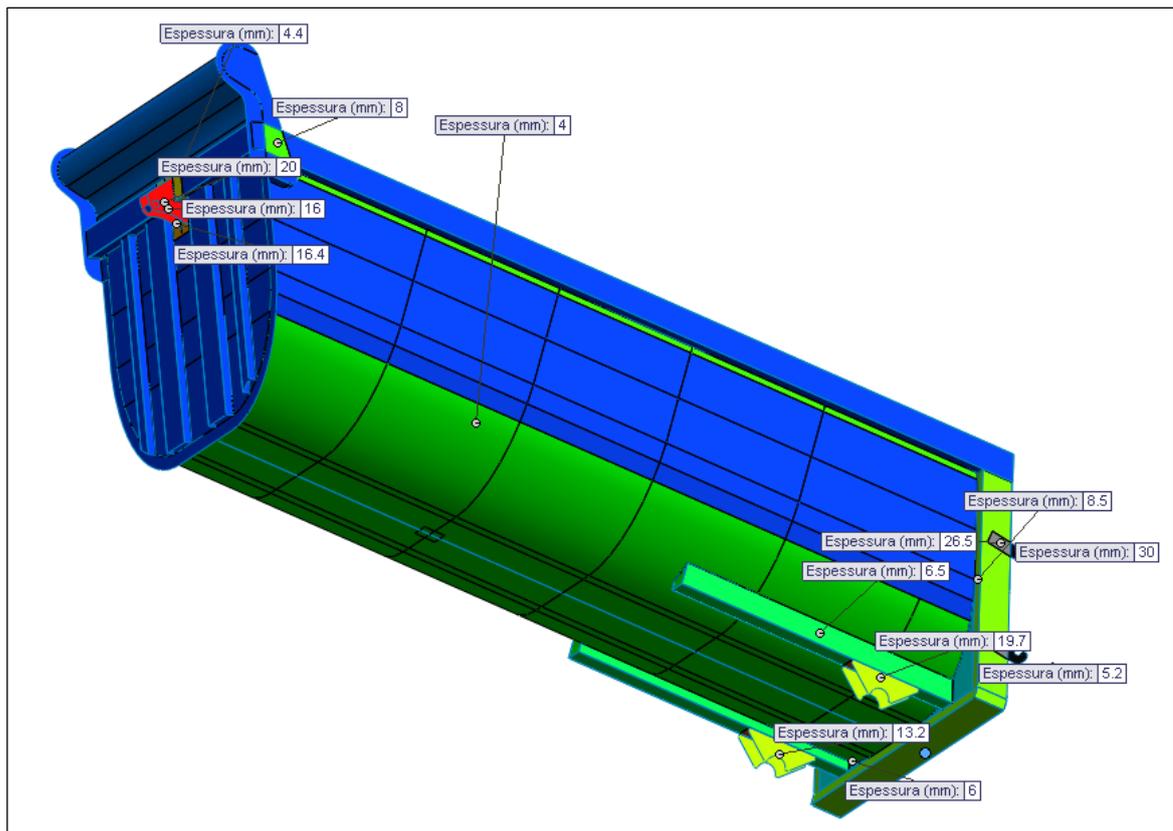
aço, considerando a equação 8, e o intervalo do coeficiente de segurança de 1,5 a 2,0, conforme o referencial teórico.

$$\sigma_{adm} = \frac{r_{max}}{coef\ seguran\ ca} \quad (8)$$

Através do teste de tração, obteve-se a resistência máxima de cada aço, valor utilizado para o cálculo da tensão admissível.

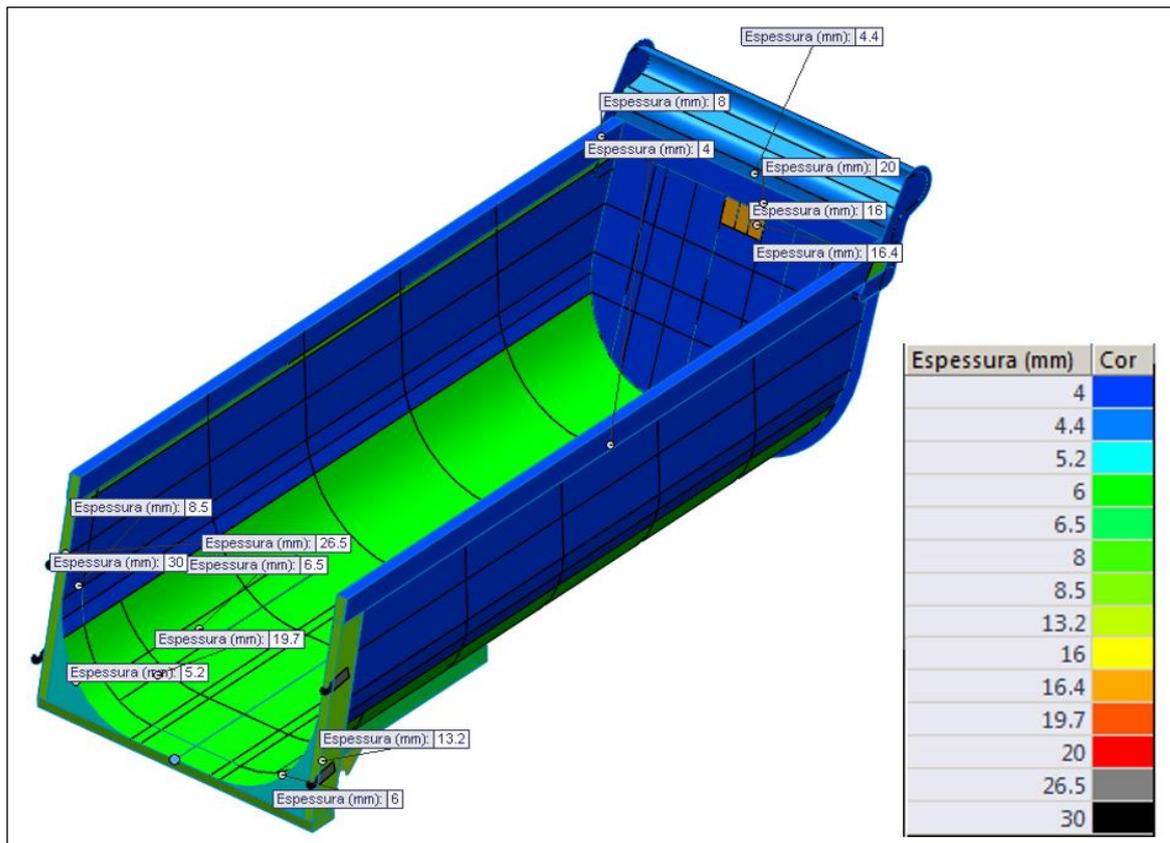
### 3.2.3.2.2 Espessura das chapas

A distribuição de deformações também depende da espessura das chapas aplicadas no modelo, dessa forma, foi preciso ressaltar esse item antes de se fazer a simulação. A figura 49 mostra as espessuras em vista lateral da caçamba, e a figura 50 em vista superior.



**Figura 49 - Espessura das chapas – vista lateral**

Fonte: Elaborada pelo autor

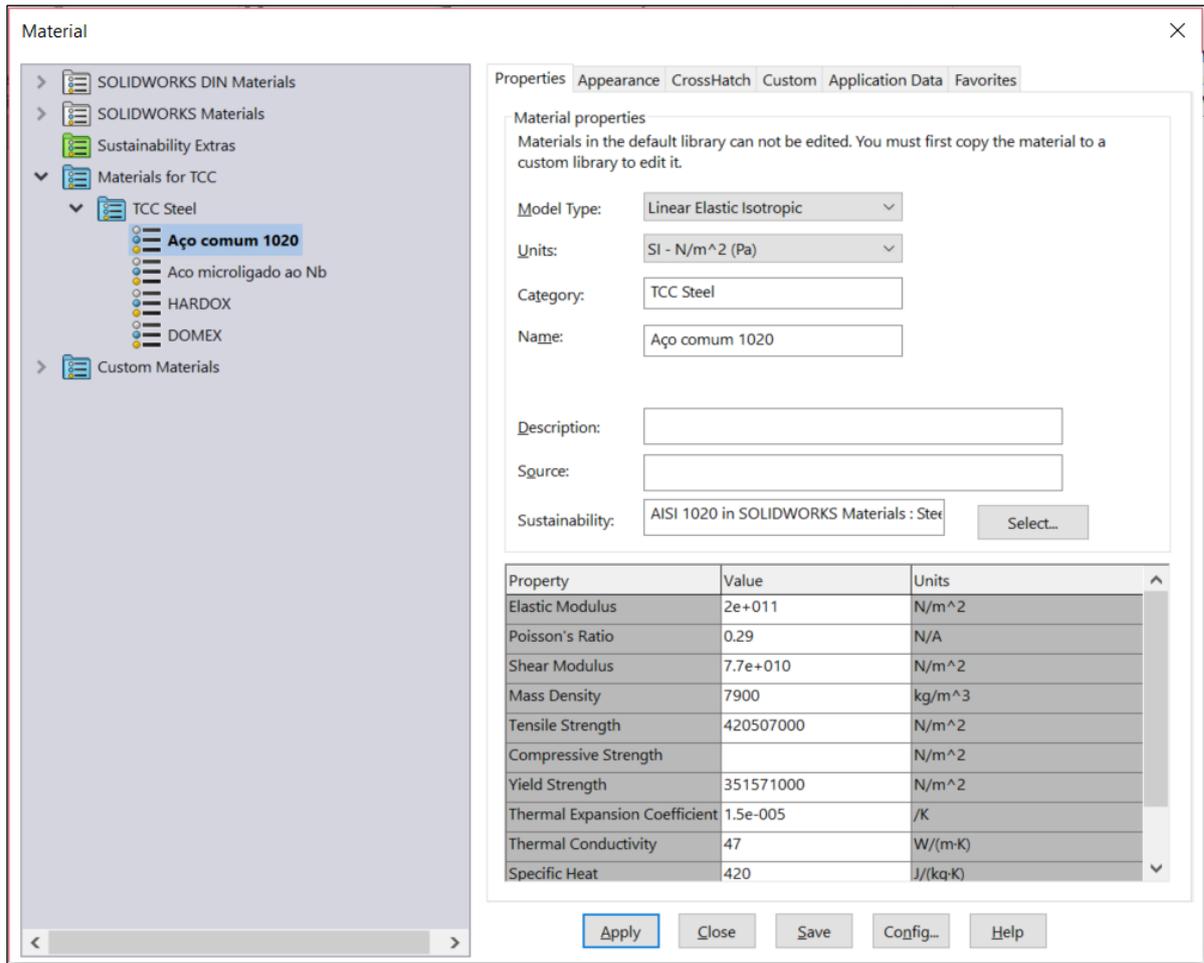


**Figura 50 - Espessura das chapas – vista superior**

Fonte: Elaborada pelo autor

### 3.2.3.3 Inserção de Materiais no Banco de Dados do Programa e Início de Estudo

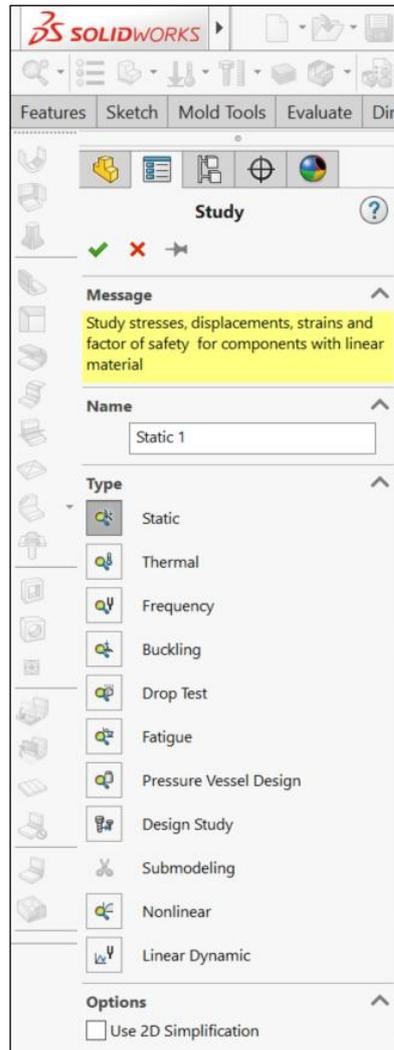
Conforme dito, o programa já dispõe de diversos tipos de materiais para aplicação em estruturas. Porém, não estão inclusos os aços estudados nesse trabalho, dessa forma, fez-se necessário a inserção desses tipos de materiais no banco de dados do software. Para isso, o programa solicita diversas informações sobre os materiais a serem adicionados, como por exemplo, o módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, a tensão de escoamento, dentre outras informações, de acordo com a figura 51.



**Figura 51 - Inserção de materiais no banco de dados do programa**

Fonte: Elaborada pelo autor

Após isso, iniciou-se o estudo da análise estática da caçamba, conforme figura 52.



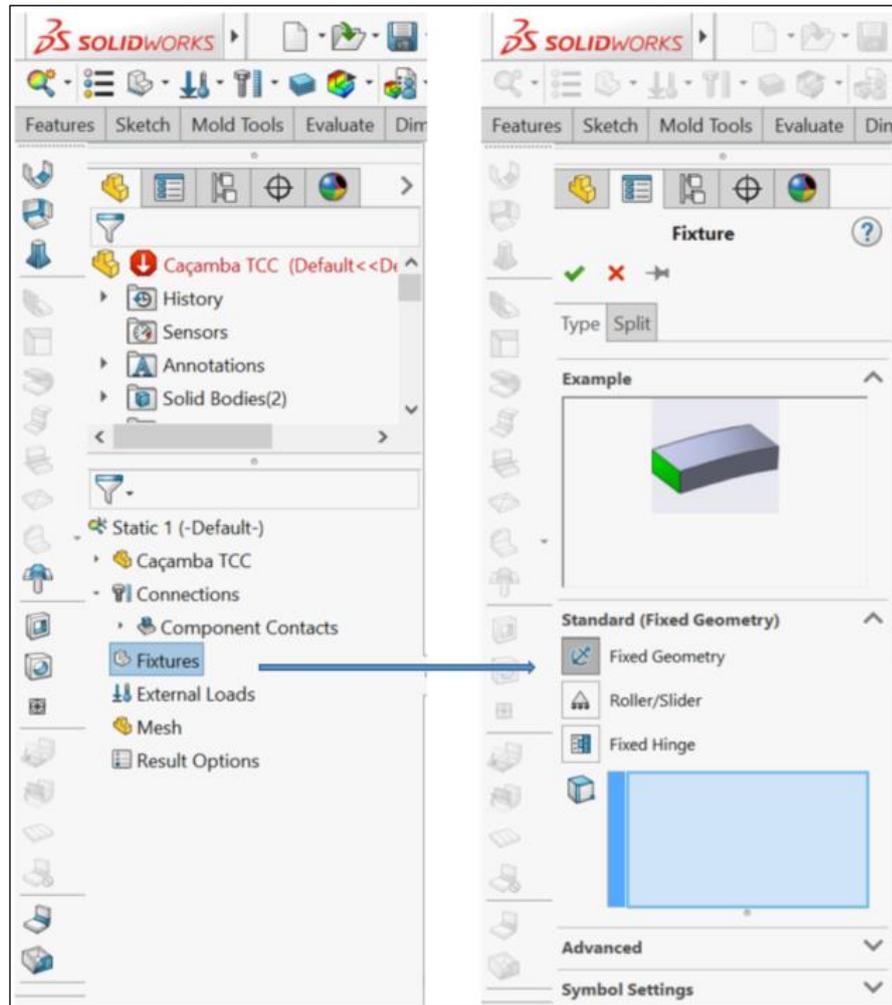
**Figura 52 - Estudo da análise estática da caçamba**

Fonte: Elaborada pelo autor

#### 3.2.3.4 Condições de Contorno

Após a etapa de seleção do tipo de estudo, é necessário ressaltar as condições de contorno, que dizem respeito às premissas aplicadas ao programa para que a simulação ocorra.

Cada elemento de uma junta tem uma resistência mecânica, e para calcular a força suportada por determinada estrutura, é preciso a fixação de uma geometria. No *Solidworks*, quando se trabalha com modelos sólidos, para que a estrutura se torne estável é necessário a fixação de uma face, por exemplo, ou 3 vértices. A figura 53, mostra como aplicar a opção para fixar uma geometria.



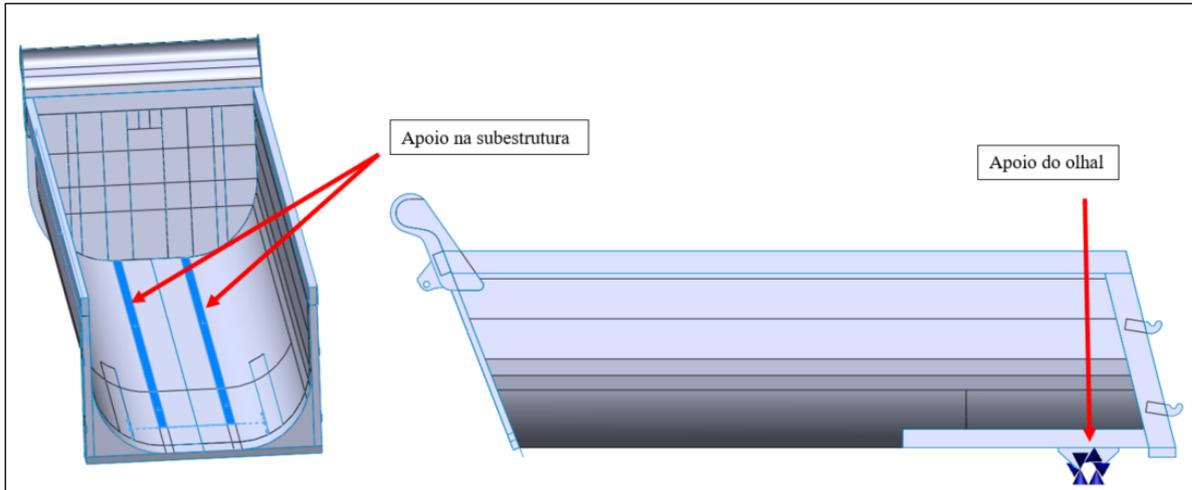
**Figura 53 - Seleção de elementos a serem fixados**

Fonte: Elaborada pelo autor

#### 3.2.3.4.1 Caçamba totalmente apoiada (tipo 1)

Em qualquer tipo de simulação o programa solicita que o usuário selecione ou uma geometria fixa (apoio, engaste), rolagem/deslizamento ou uma articulação fixa. A primeira opção usa-se quando uma face plana pode se movimentar livremente no plano, mas que não pode se mover na direção normal ao seu plano. Isso quer dizer que, a face pode se contrair ou se expandir sob carregamento. No caso da articulação fixa, é usada para especificar que uma face cilíndrica pode girar somente em torno do próprio eixo. Isto é, sob condições de carregamento, o raio e o comprimento da face cilíndrica permanecem constantes.

Para o trabalho foi selecionado uma geometria fixa. Nesse caso, o apoio do tipo 1 considera a caçamba totalmente apoiada na subestrutura e também no olhal traseiro, conforme figura 54.



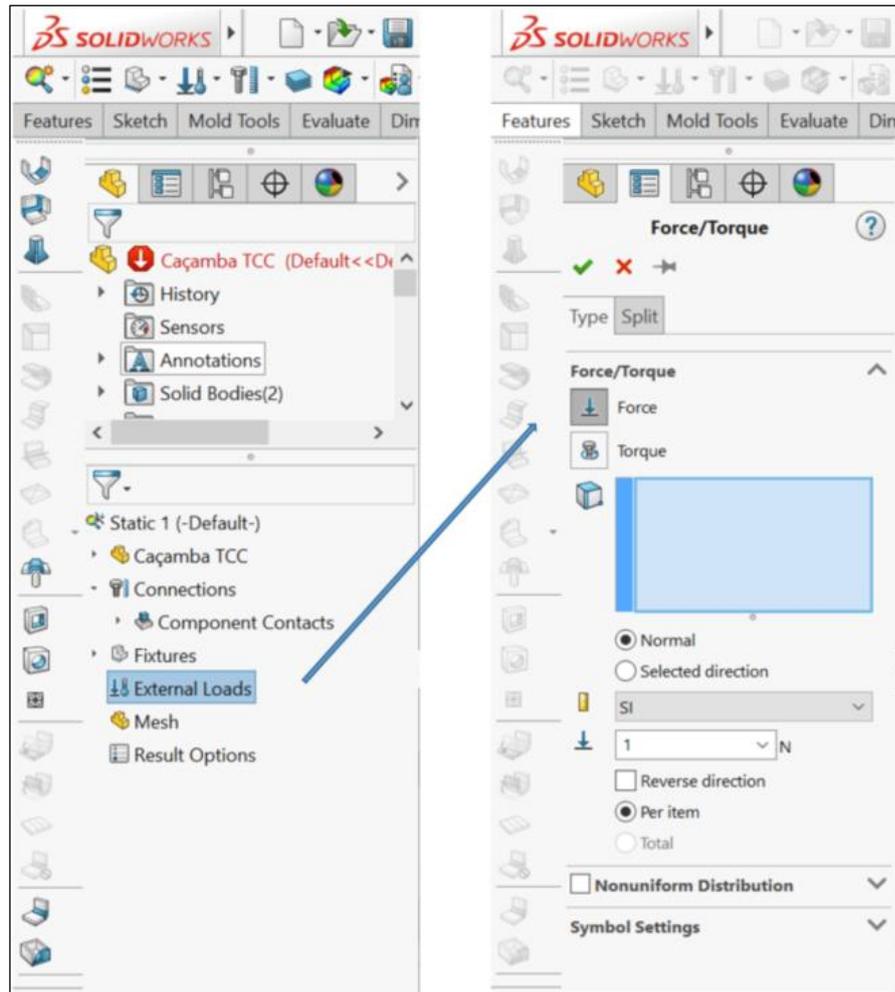
**Figura 54 - Caçamba totalmente apoiada**

Fonte: Elaborada pelo autor

Para título de conhecimento, os olhais servem para movimentação ou elevação de veículos pesados. Na subestrutura, sobre o chassi, consoante Taiss (2013), está localizada a chamada longarina longitudinal, interligada por travessas, é responsável por grande parte da força que sustenta a estrutura.

### 3.2.3.5 Carregamentos

Feito a fixação de elementos, aplica-se os carregamentos (passo descrito pela figura 55), os quais são as forças sofridas pelo objeto, estipuladas pelo usuário e simuladas pelo programa.



**Figura 55 - Aplicação de cargas na estrutura**

Fonte: Elaborada pelo autor

Foram determinadas algumas situações de carregamento para se fazer as simulações. São elas:

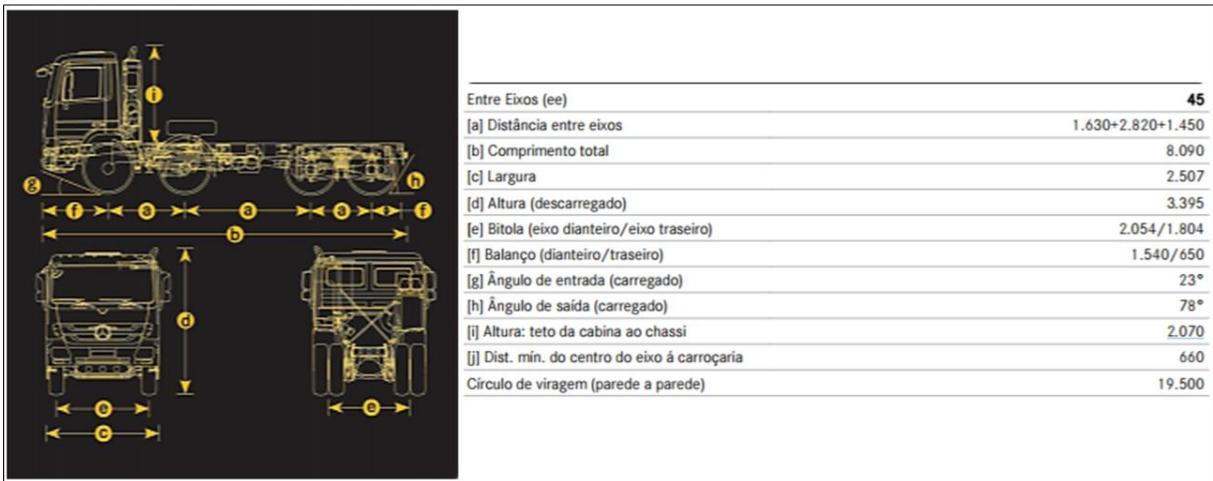
#### 3.2.3.5.1 Peso próprio (P.P.)

O peso próprio é gerado automaticamente pelo programa a partir da modelagem feita, ou seja, leva em consideração o peso das estruturas da caçamba e o peso dos materiais que a compõe.

#### 3.2.3.5.2 Impacto de material (IMP)

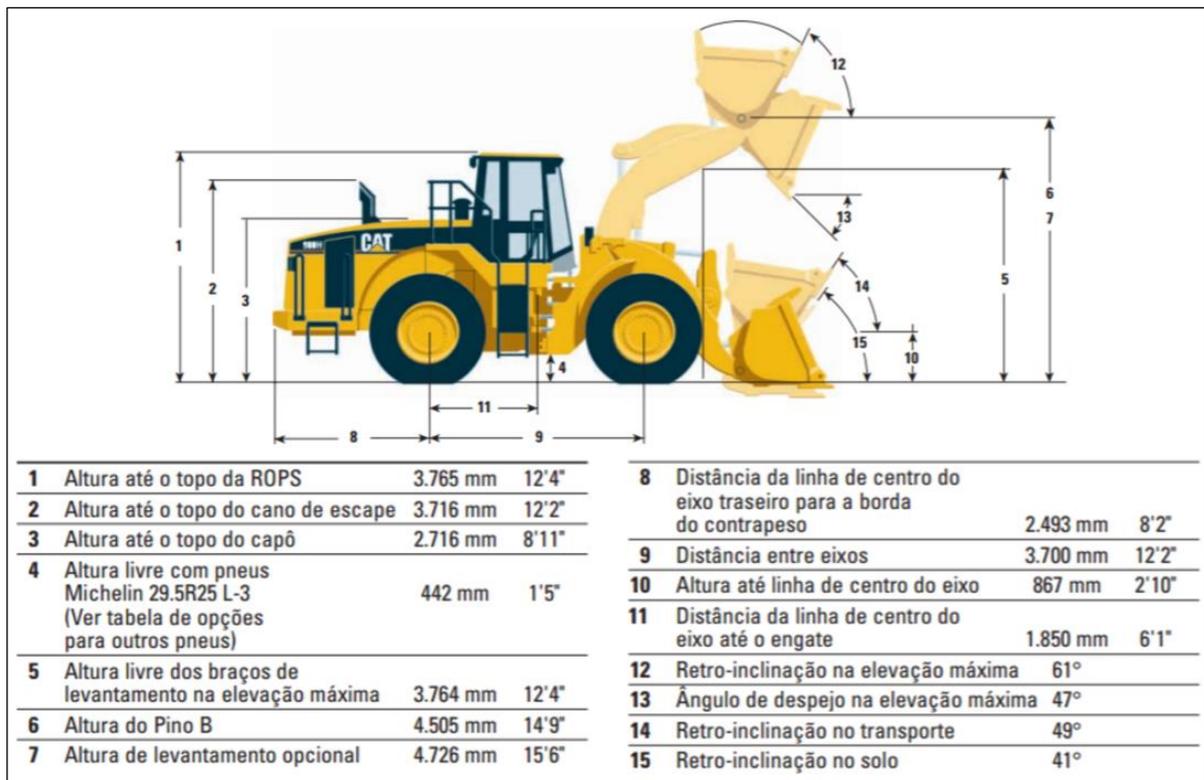
Quando o material está sendo carregado na caixa de carga, provoca uma força de impacto na mesma, a qual leva em consideração a altura de queda do material da pá carregadeira na caçamba. Foram simuladas, em campo, as condições de projeto para que se pudesse obter a área de impacto, a altura de queda do material e o tempo total de descarregamento. Utilizou-se

também, para os cálculos, dados fornecidos pelos fabricantes dos equipamentos, conforme figura 56 e 57.



**Figura 56 - Medidas do caminhão MERCEDEZ 4844 R 8x4**

Fonte: Mercedes-benz Actros 4844 8x4



**Figura 57 - Medidas da carregadeira Caterpillar 980H**

Fonte: Scene7 – Caterpillar carregadeira de rodas 980 H

A altura de queda do material é aquela entre a pá carregadeira e o início da descarga do material. A figura 58 representa essa situação.



**Figura 58 - Altura de impacto do material**  
 Fonte: vídeo youtube Pá carregadeira Caterpillar 924Hz

Todos os dados obtidos estão representados na tabela 6, e a partir deles foi realizado o cálculo da força de impacto na estrutura.

Sabe-se que a pá carregadeira faz um movimento circular uniforme no momento de basculação, dessa forma, utilizou-se a equação 9, de acordo com Coelho (2015), para o cálculo da velocidade angular média e a partir disso, fez-se o cálculo da velocidade de lançamento do material ( $V_l$ ), pela equação 10. Essa velocidade é oblíqua à velocidade de queda do material, e esta, por sua vez, foi obtida por meio da equação 11. Considerando-se a equação 12, de Torricelli, chegou-se à velocidade final de queda do material, e o seu respectivo tempo de queda ( $T_q$ ) (equação 13) onde  $g$  é a aceleração da gravidade. O tempo de acomodação do material foi aquele restante do total. Finalmente, sabendo-se que, de acordo com Corradi et. al (2010), a quantidade de movimento é igual ao impulso, que por sua vez, é igual à força, calculou-se a força média de impacto do material na caçamba (equação 14).

$$\omega(m) = \frac{\Delta\theta}{\Delta t} \quad (9)$$

$$V_l = \omega \times r \quad (10)$$

$$V_y = V_l \times \cos\alpha \quad (11)$$

$$V_f^2 = V_i^2 + 2 \times a \times h \quad (12)$$

$$Tq = \frac{vf-vi}{g} (13)$$

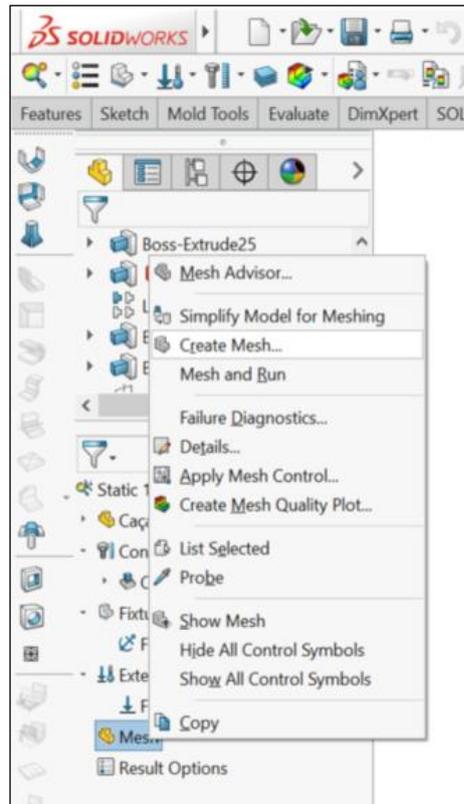
$$F = \frac{(m.v)}{\Delta t} (14)$$

**Tabela 6 - Dados para cálculos**

| Dados de material e equipamentos                     |                        |
|--|------------------------|
| Densidade específica do minério úmido                | 2200 kg/m <sup>3</sup> |
| Massa de material por despejo (m)                    | 9900 kg                |
| Altura de queda de material (h)                      | 1.67 m                 |
| Tempo total de descarga (t)                          | 2,67 s                 |
| Raio da pá carregadeira (r)                          | 1,5 m                  |
| Área de impacto do material                          | 3.33 m <sup>2</sup>    |
| Tempo de basculamento da carregadeira ( $\Delta t$ ) | 1,9 s                  |
| Ângulo de basculamento ( $\Delta\Theta$ )            | 108° (1,88 rad)        |
| Ângulo de despejo na elevação máxima ( $\alpha$ )    | 47°                    |

### 3.2.3.6 Malha

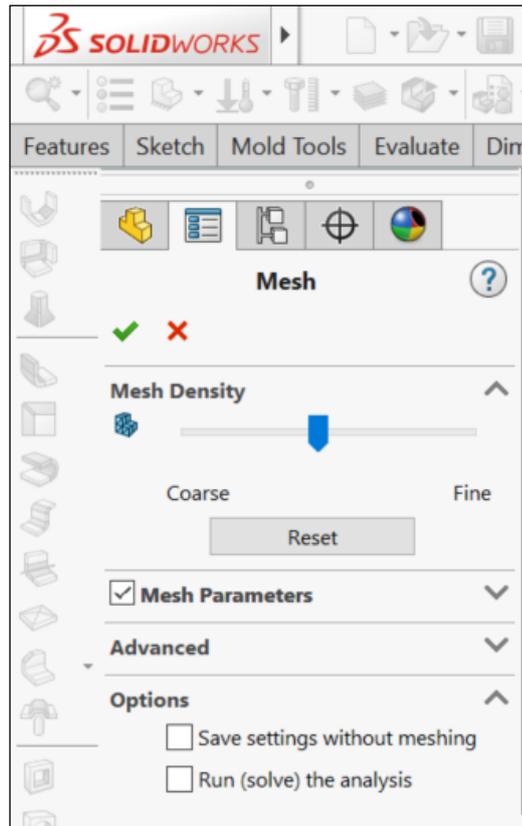
O programa fez a análise da peça subdividindo o modelo em partes pequenas de formas simples (elementos) que são conectadas em pontos comuns (nós). De acordo com isso, o software gerou automaticamente uma malha, com base em seu volume, área de superfície e outros detalhes geométricos. O tamanho da malha gerada (número de nós e elementos) depende da geometria e dimensões do modelo. O controle de malha permite especificar diferentes tamanhos de elemento para componentes, faces, arestas e vértices. É interessante saber que, quanto menor é a especificação do tamanho de elemento, mais precisa é a solução do programa. A especificação do controle de malha pode ser feita clicando no ícone “malha” e em seguida selecionar “aplicar controle de malha”, escolher as entidades e definir as configurações desejadas. A malha foi gerada clicando na opção “mesh”, “create mesh” conforme mostra a figura 59.



**Figura 59 - Criação de malha**

Fonte: Elaborada pelo autor

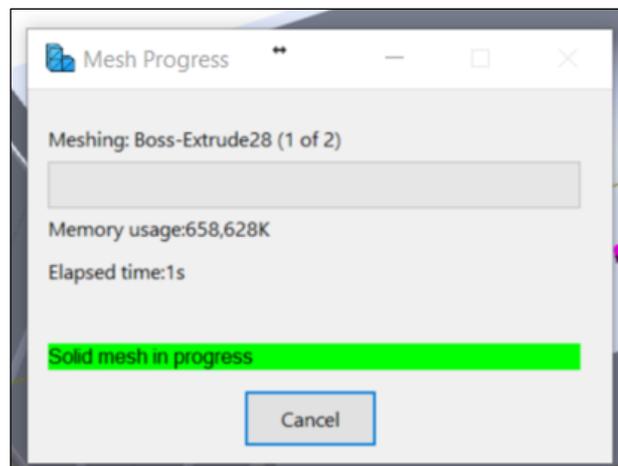
A figura 60 mostra a opção de escolher a densidade da malha, ou seja, é a opção onde se aumenta ou diminui os pontos na malha, o que afeta diretamente a precisão da simulação.



**Figura 60 - Densidade da malha**

Fonte: Elaborada pelo autor

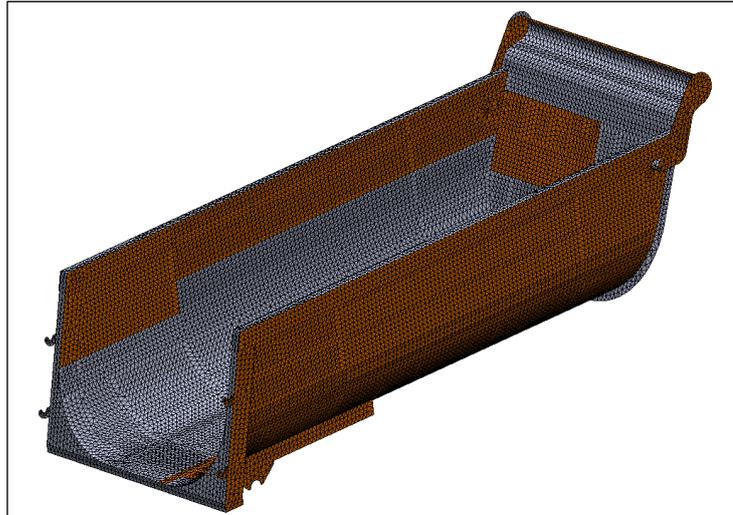
A malha é então gerada pelo programa de acordo com a figura 61.



**Figura 61 - Progresso da geração de malha**

Fonte: Elaborada pelo autor

A figura 62 mostra a malha pronta.



**Figura 62 - Malha gerada**  
 Fonte: Elaborada pelo autor

### 3.2.3.7 Combinações Feitas

A tabela 7 reproduz as combinações feitas nos testes de carregamento da caçamba.

**Tabela 7 - Condições de trabalho da caçamba**

| <b>Combinação</b> | <b>Condição</b> | <b>Apoio</b> | <b>P.P.</b> | <b>IMP</b> |
|-------------------|-----------------|--------------|-------------|------------|
| <b>1</b>          | Vazia           | Tipo 1       | x           |            |
| <b>2</b>          | Carregamento    | Tipo 1       | x           | x          |

## 4 ANÁLISE DE DADOS

### 4.1 ANÁLISE DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA

De acordo com a composição química dos aços estudados, diferem-se em relação ao teor de ligas adicionado. As ligas adicionadas podem conferir boas propriedades aos aços, contudo, deve-se avaliar o teor de elementos que possam prejudicar alguma propriedade dos mesmos.

Usando-se a equação 7, calculou-se a soldabilidade a partir da composição química dos aços em questão, os valores estão representados na tabela 8.

$$\begin{aligned} \%C \text{ eq aço comum} &= 0,54 + \left(\frac{0,236}{6}\right) + \left(+\frac{0,004}{5}\right) + \left(+\frac{0,004 + 0,003}{15}\right) \\ &= 0,054 + 0,039 + 0,0008 + 0,00047 = 0,094 = 9,40\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \%C \text{ eq aço microligado ao Nb} &= 0,082 + \left(\frac{1,606}{6}\right) + \left(\frac{0,02}{5}\right) + \left(\frac{0,009}{15}\right) \\ &= 0,082 + 0,268 + 0,004 + 0,0006 = 35\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \%C \text{ eq Domex} &= 0,063 + \left(\frac{1,790}{6}\right) + \left(0,007 + 0,005 + \frac{0,011}{5}\right) + \left(0,043 + \frac{0,005}{15}\right) \\ &= 0,063 + 0,298 + 0,0046 + 0,0032 = 36,88\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \%C \text{ eq Hardox} &= 0,167 + \left(\frac{1,369}{6}\right) + \left(\frac{0,152 + 0,0240,006}{5}\right) + \left(\frac{0,088 + 0,154}{15}\right) \\ &= 0,167 + 0,228 + 0,0364 + 0,016 = 44,75\% \end{aligned}$$

Tabela 8 - Soldabilidade dos aços

| Tipo de Aço               | Carbono Equivalente (%) |
|---------------------------|-------------------------|
| Aço Comum 1020            | 9,40                    |
| Aço Microligado ao Nióbio | 35                      |
| DOMEX                     | 36,88                   |
| HARDOX                    | 44,75                   |

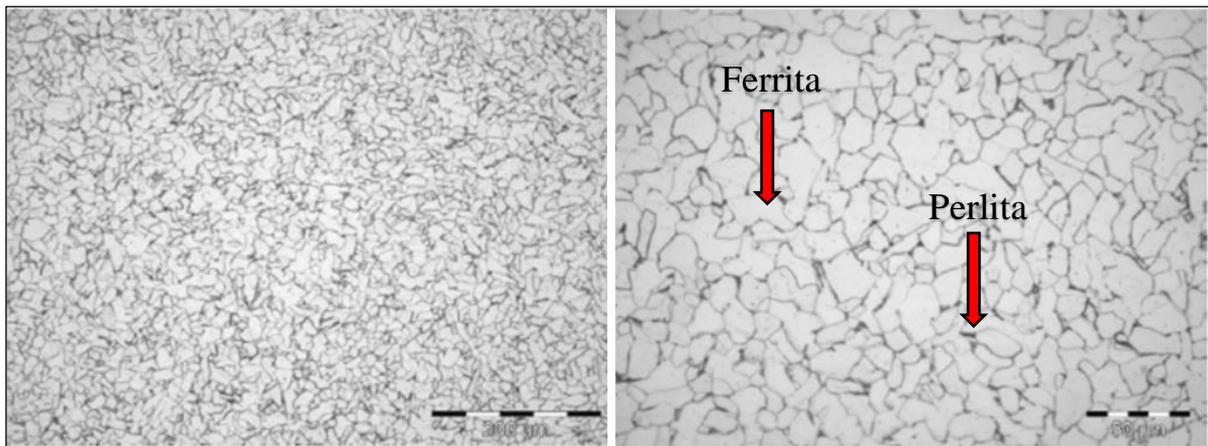
Segundo PANNONI (s.d) um aço baixo carbono que possui uma quantidade de Carbono equivalente de até 40% possui uma boa soldabilidade, dessa forma, pode-se perceber que, o aço de melhor soldabilidade é o aço comum 1020, seguido pelo microligado ao Nióbio e DOMEX. O HARDOX apresentou maior valor de carbono equivalente por conter maior quantidade de carbono, cromo, níquel e cobre em sua composição química. Esse tipo de aço, conforme será visto adiante, possui maior resistência e dureza, e o fato de conter maior quantidade de carbono contribui para isso.

Comparando-se o teor de Nióbio adicionado percebe-se que, o HARDOX 450 e a amostra cedida pela Doutora Anderson dos Santos Paula, o aço microligado ao Nióbio, apresentam-se praticamente similares. Em contrapartida, o DOMEX tem um teor de Nióbio 4 vezes maior do que os anteriores, fator benéfico para a resistência, porém, em termos de usinabilidade não é interessante, já que, consoante TESSLER (1993), os elementos ligantes podem também formar partículas duras e abrasivas, prejudicando a usinabilidade do aço. Ressalta-se também o teor de enxofre encontrado nos aços 1020 e o microligado ao nióbio, aumentando a fragilização do aço, embora melhore a sua usinabilidade. O Titânio, por sua vez, conforme referencial teórico, inibe o crescimento dos grãos, tornando-os mais refinados, e como consequência gera uma melhor propriedade de resistência sem afetar a ductibilidade do aço. Já o Vanádio é importante para a formação da fase austenítica. E por fim, o Nióbio colabora para o endurecimento por dispersão e retarda a recristalização da austenita.

A adição de ligas corrobora para a resistência dos aços pois, em sua microestrutura pode haver vários tipos de defeitos cristalinos, tais como os defeitos puntiformes, que são lacunas (vazios) e átomos intersticiais (causam uma grande distorção do reticulado cristalino a sua volta), os defeitos unidimensionais, que compreendem as discordâncias, bem como os defeitos bidimensionais que fazem referência à fronteiras entre duas regiões com diferentes estruturas cristalinas ou diferentes orientações cristalográficas, e entre outros tipos de defeitos. Quando há a propagação de trincas, os contornos dos grãos da microestrutura dos aços servem de obstáculos para a trinca percorrer todo o material, dessa forma, se houver grãos grosseiros na microestrutura, a trinca se propagará mais facilmente, por outro lado, uma estrutura com maior área de contorno de grãos, ou seja, grãos mais refinados e homogêneos, apresenta-se como um longo caminho para a trinca percorrer, então, esse material necessitará da aplicação de uma força maior para atingir o patamar de ruptura. Portanto, um material desse tipo tem um maior valor de resistência.

## 4.2 ANÁLISE METALGRÁFICA

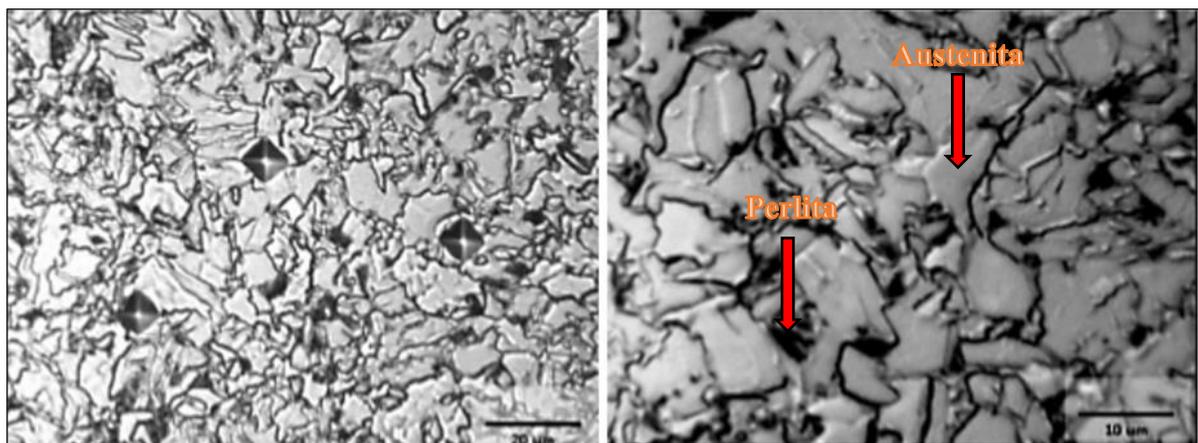
Através dos procedimentos experimentais obteve-se os resultados qualitativos de metalografia das amostras de aços. A figura 63 mostra a análise metalográfica do aço 1020.



**Figura 63-** Micrografia realizada após ataque químico do aço 1020 2mm. Aumento de 200 e 500X  
 Fonte: Elaborada pelo autor

Pode-se observar no aço 1020, microconstituintes com grãos de Ferrita ( $\alpha$ ) de contorno de grão (fase clara, predominante) e grãos de Perlita (fase escura). Uma maior quantidade de carbono auxilia a formação de perlita no material, como essa amostra tem menor quantidade de carbono, a fase escura não é predominante. A ferrita, conforme pode-se perceber, é irregular, está localizada no contorno dos grãos escuros, é comumente chamada de ferrita pro-eutetóide, pois, formou-se acima da temperatura eutetóide, na qual a austenita transforma-se em perlita.

A figura 64 representa a análise metalográfica da amostra de aço microligado ao Nióbio.



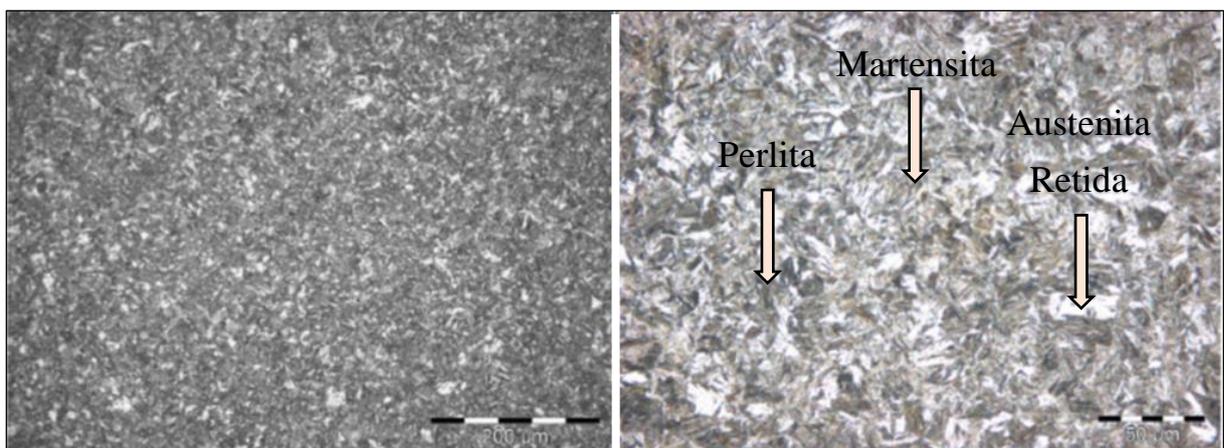
**Figura 64 -** Microestruturas da amostra de aço microligado ao Nióbio, aumento de 200X(esquerda) e 800X (direita), com ataque de Nital 10% e Bicromato de Potássio, observada através do microscópio óptico.

Fonte: Elaborada pelo autor

Nota-se, na figura 64, que a estrutura contém grãos de diferentes tamanhos. Possuem como fases estruturais a austenita (grãos claros cúbicos e irregulares) e pequena porcentagem de perlita (parte escura). Esse fato faz com que a resistência mecânica do material seja maior. Dessa forma, a microadição de Nióbio nos aços com baixo teor de carbono propicia a formação da fase austenítica, permitindo o refinamento dos grãos e o consequente aumento de resistência e tenacidade.

Confirmando os resultados da análise, Lee et al (1992) diz que a reação de Nióbio - Carbono provoca a redução proporcional do grão de austenita recristalizada, em função da quantidade de Nióbio disponível em solução; os contornos dos carbonitretos de Nióbio grosseiros preexistentes na austenita, agem como locais preferenciais para a nucleação da ferrita; a atividade do Carbono é reduzida pela solução de Nióbio em decorrência da forte interação entre o Nióbio e o Carbono; o Nióbio solubilizado apresenta uma forte tendência a segregar-se nos contornos da fase austenítica ( $\gamma$ ) e ferrítica ( $\alpha$ ) e reduzir a cinética de crescimento da ferrita em temperaturas intermediárias de transformação.

A figura 65 representa a micrografia do aço HARDOX. Pode-se notar que é um aço martensítico devido a sua estrutura tetragonal e formato de agulhas ou ripas, com menor presença da fase perlítica e austenítica. Apresenta elevado teor de cromo, típico de estruturas como essa. Além disso, tem grande quantidade de manganês, o que contribui para diminuir a temperatura de transformação da martensita.

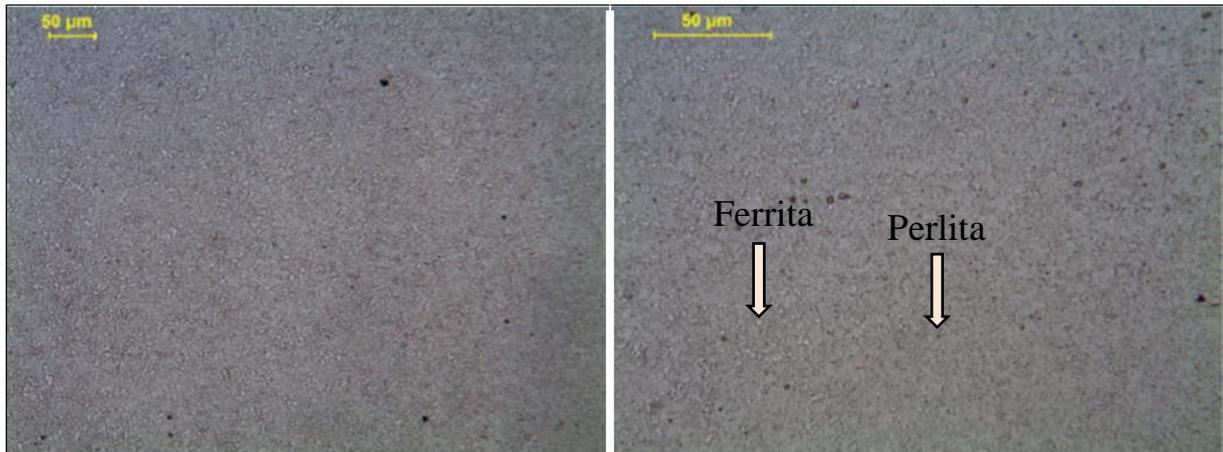


**Figura 65 - Micrografia realizada após ataque químico do HARDOX (aço microligado ao Nióbio). Aumento de 200 e 500X.**

Fonte: Elaborada pelo autor

De acordo com Baptista et al (1997), uma estrutura mais homogênea e refinada, menores são as fronteiras intergranulares e maiores são os contatos de natureza química e eletrostática, favorecendo o comportamento do aço perante as solicitações mecânicas impostas a ele.

A figura 66 mostra a micrografia do aço DOMEX. Observa-se uma matriz ferrítica-perlítica em sua estrutura.



**Figura 66 - Micrografia realizada após ataque químico do DOMEX (aço microligado ao Nióbio). Aumento de 200 e 500X**

Fonte: Elaborada pelo autor

Esta microestrutura é composta basicamente por precipitados e por grãos irregulares finos de ferrita (clara) e perlita (escura). A microestrutura encontrada nesse aço é típica do material com baixa liga e alta resistência mecânica, com baixo teor de carbono e elevado teor de manganês.

### 4.3 ENSAIOS FÍSICOS

#### 4.3.1 Ensaio de Tração

O ensaio de tração gerou como resultado os dados de resistência à tração, limite de escoamento e alongamento total através de um software adequado à máquina de tração durante a realização do ensaio, conforme é mostrado na tabela 9.

**Tabela 9 - Resultado dos ensaios de tração**

| <b>Amostra de aço</b>        | <b>Resistência (Mpa)</b> | <b>Escoamento (Mpa)</b> | <b>Alongamento (%)</b> |
|------------------------------|--------------------------|-------------------------|------------------------|
| <b>Aço 1020</b>              | 368                      | 284                     | 34                     |
| <b>Aço microligado ao Nb</b> | 572                      | 484                     | 31                     |
| <b>Hardox 450</b>            | 1444                     | 1270                    | 15                     |
| <b>Domex 700</b>             | 808                      | 768                     | 19                     |

De acordo com Pannoni (s.d), os aços microligados, que apresentam alta resistência mecânica, permitem que se eleve a relação do limite de escoamento para o limite de resistência à tração sem apreciável perda da ductilidade. Além disso, esses tipos de aços são úteis quando se quer melhorar a resistência ao choque e o limite de fadiga, bem como tornar possível uma diminuição proporcional da seção, em outras palavras, devido à sua alta resistência mecânica, é possível o emprego de seções mais finas em estruturas. Esses tipos de aços são representados nesse trabalho pelo HARDOX 450 e DOMEX 700.

Percebe-se que, o aço HARDOX 450 apresentou resultados de tração (resistência e escoamento) superiores aos outros aços. Ou seja, esse tipo de aço sofrerá uma deformação significativa quando aplicada uma carga maior que 1270MPa. Do mesmo modo, o aço continuará sofrendo uma deformação, porém uniforme em sua seção, até 1444Mpa, após este ponto, começa a se formar uma estrição, e depois de um tempo, ocorrerá ruptura nessa região.

#### 4.3.2 Ensaio de Dureza

A tabela 10 representa os resultados dos ensaios de dureza.

**Tabela 10 - Resultados dos testes de dureza**

| <b>Amostra de aço</b>        | <b>Ponto 1 (Hv)</b> | <b>Ponto 2 (Hv)</b> | <b>Ponto 3 (Hv)</b> | <b>Média (Hv)</b> |
|------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|-------------------|
| <b>Aço 1020</b>              | 106                 | 102                 | 105                 | 104               |
| <b>Aço microligado ao Nb</b> | 172                 | 201                 | 175                 | 183               |
| <b>Hardox 450</b>            | 423                 | 434                 | 423                 | 427               |
| <b>Domex 700</b>             | 273                 | 272                 | 279                 | 275               |

Conforme é visto na tabela 10, os aços HARDOX, DOMEX e microligado ao nióbio apresentaram as maiores médias de dureza. Com isso, conclui-se que, estes índices alcançados são provenientes das fases austenita e perlita no caso do DOMEX e amostra de aço microligado ao Nióbio; e fase martensita no caso do HARDOX 450, fases essas, formadas durante o resfriamento, devido à adição de Nióbio em aços com baixo teor de Carbono.

O Nióbio causa o endurecimento por dispersão, um dos mais importantes processos de endurecimento do aço, devido ao fato de ser um formador de carbonitretos, partículas que quando distribuídas finamente na matriz é capaz de endurecer o aço. Conclui-se então, que, o Nióbio, adicionado na medida correta, faz o refinamento do grão através do controle de crescimento do grão austenítico, assim como, é capaz de promover o endurecimento por precipitação, aumentando a dureza dos materiais.

Faz-se interessante ressaltar que, segundo Chiaverini (1996), valores altos para a dureza significam dificuldades de usinagem, ao passo que valores médios e baixos se associam com boas propriedades de usinabilidade, mas que as medidas de dureza não serviriam de um modo absoluto como guia para determinação de verdadeira usinabilidade de um aço.

#### 4.4 ANÁLISE ESTRUTURAL DA CAÇAMBA

A partir do modelo geométrico da caçamba e de todas as condições de contorno e cargas aplicadas, estipulou-se as combinações das condições de trabalho e os resultados foram analisados.

Os materiais foram avaliados de acordo com cada situação em que a caçamba estava submetida, e como em qualquer projeto estrutural, deve-se considerar que a carga limite do material seja maior que o carregamento que este irá suportar em condições normais de utilização. Dessa forma, utilizou-se as tensões admissíveis de cada material para a análise do projeto, já que, essa tensão é a limite para que um material resista ao esforço aplicado.

Através da equação 8, obteve-se o intervalo de tensão admissível dos aços estudados.

$$\sigma_{adm} \text{ aço comum} = \frac{368}{1,5} = 245,3 \text{ Mpa}$$

$$\sigma_{adm} \text{ aço comum} = \frac{368}{2,0} = 184 \text{ Mpa}$$

$$\sigma_{adm} \text{ aço microligado} = \frac{572}{1,5} = 381,3 \text{ Mpa}$$

$$\sigma_{adm} \text{ aço microligado} = \frac{572}{2,0} = 286 \text{ Mpa}$$

$$\sigma_{adm} \text{ Domex} = \frac{808}{1,5} = 538,7 \text{ Mpa}$$

$$\sigma_{adm} \text{ Domex} = \frac{808}{2,0} = 404 \text{ Mpa}$$

$$\sigma_{adm} \text{ Hardox} = \frac{1444}{1,5} = 962,7 \text{ Mpa}$$

$$\sigma_{adm} \text{ Hardox} = \frac{1444}{2,0} = 722 \text{ Mpa}$$

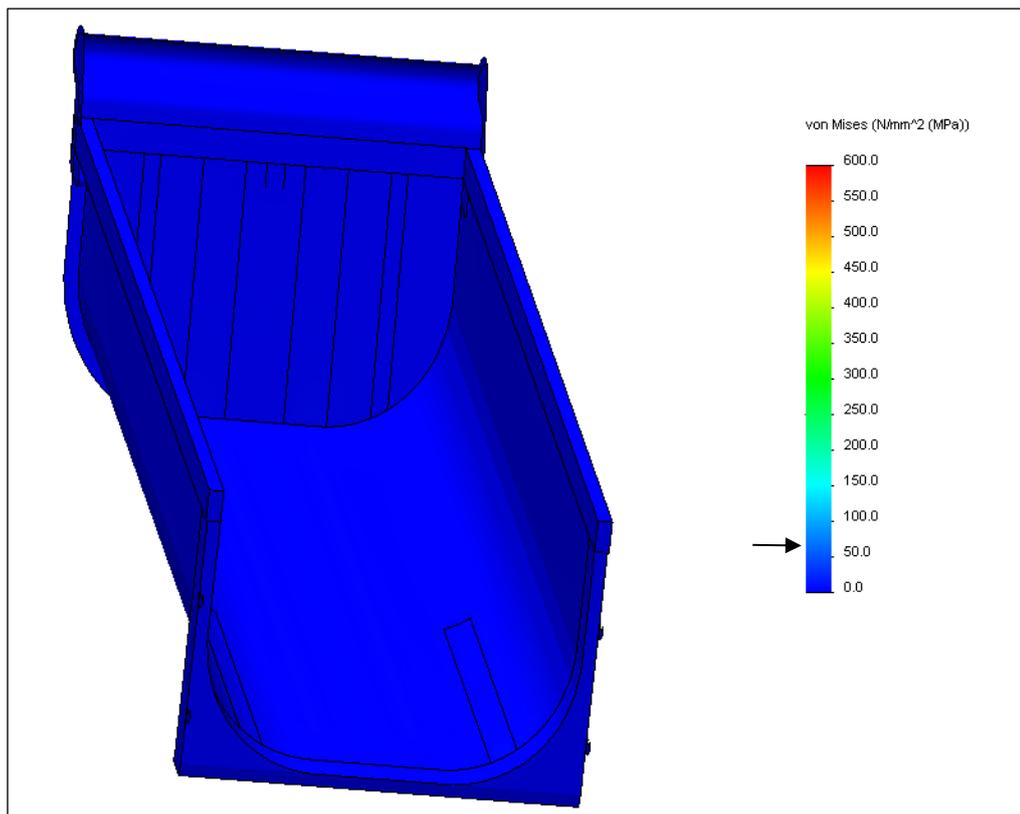
A tabela 11 representa os valores de resistência máxima, bem como os intervalos obtidos de tensão admissível.

**Tabela 11 - Propriedades dos materiais aplicados na caçamba**

| <b>Material</b>                       | <b>Limite de Resistência<br/>(<math>\sigma_r</math>) Mpa</b> | <b>Intervalo de<br/>Tensão Admissível<br/>(<math>\sigma_{adm}</math>) Mpa</b> |
|---------------------------------------|--|---|
| <b>Aço Comum 1020</b>                 | 368  | 184 – 245,3   |
| <b>Amostra de Aço<br/>Microligado</b> | 572  | 286 – 381,3   |
| <b>DOMEX</b>                          | 808  | 404 – 538,7   |
| <b>HARDOX 450</b>                     | 1444   | 722 – 962,7   |

#### 4.4.1 Combinação 1 - Caçamba vazia

A combinação 1 representa a caçamba vazia. As forças atuantes nessa situação dizem respeito somente ao peso próprio (PP) da estrutura. Na primeira simulação aplicou-se o aço de maior tensão admissível, o HARDOX 450 (Figura 67).



**Figura 67 – Caçamba vazia – Aplicação do aço HARDOX 450**

Fonte: Elaborada pelo autor

O software estipula a distribuição de tensões segundo o critério de Von Mises, o qual de acordo com Timoshenko e Gere (1984), é correntemente empregado para materiais que podem ser considerados dúcteis, homogêneos e isotrópicos. Muitos materiais têm colapso quando a tensão de Von Mises ultrapassa um determinado valor. Sabe-se que a tensão admissível adotada para o HARDOX 450 está num intervalo entre 722 – 962,7 MPa, e a tensão atuante na simulação foi de apenas 7 MPa. Dessa forma, este material e todos os outros, aço 1020, aço microligado ao nióbio e DOMEX podem ser empregados nessa situação de carregamento, sem nenhuma restrição. A tabela 12 resume os resultados da combinação 1.

Tabela 12 - Resultados da combinação 1

| Combinação 1          |                            |                         |             |
|-----------------------|----------------------------|-------------------------|-------------|
| Material              | Tensão admissível<br>(Mpa) | Tensão Atuante<br>(Mpa) | Verificação |
| Aço 1020              | 184 – 245,3                | 7                       | ok          |
| Aço microligado ao Nb | 286 – 381,3                | 7                       | ok          |
| DOMEX 700 MC          | 404 – 538,7                | 7                       | ok          |
| HARDOX 450            | 722 – 962,7                | 7                       | ok          |

#### 4.4.2 Combinação 2 - Carregamento da caçamba

Na combinação 2 considerou-se o peso de material (P.P) e o impacto de material (IMP) na caçamba. Para a situação de impacto do material foram necessários alguns cálculos para se chegar à força de impacto aplicada à estrutura.

O primeiro dos cálculos foi de acordo com a equação 9, onde se determinou a velocidade angular da pá carregadeira:

$$\omega = \frac{1,88(rad)}{1,9(s)}(s)$$

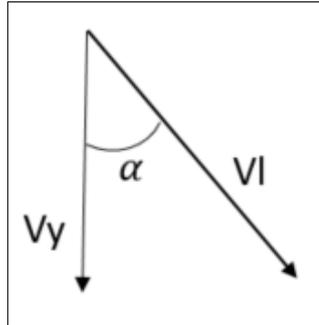
$$\omega = 0,99 \frac{rad}{s}$$

Com esse resultado, determinou-se a velocidade inicial de lançamento do minério (Vl), por meio da equação 10. Considerou-se metade do raio da pá carregadeira, já que o material não está somente na borda da estrutura, mas sim distribuído por toda a face da pá.

$$Vl = 0,99 \left( \frac{rad}{s} \right) \times 0,75(m)$$

$$Vl = 0,74 \frac{m}{s}$$

A partir disso, calculou-se a velocidade de queda do material (Vy) (Equação 11). A figura 68 ilustra as velocidades levadas em consideração.



**Figura 68 - Velocidades vertical (Vy) e oblíqua (VI)**  
Fonte: Elaborada pelo autor

$$V_y = 0,74 \times \cos 47^\circ$$

$$V_y = 0,506 \frac{m}{s}$$

A velocidade final foi calculada por meio da equação 12.

$$V^2 = 0,506^2 + 2 \cdot 9,8 \cdot 1,67$$

$$V = 5,74 \frac{m}{s}$$

A equação 13 permitiu estipular o tempo de queda livre do material (T), considerando  $g = 9,8 \text{ m/s}^2$ :

$$T = \frac{(5,74 - 0,506)}{9,8}$$

$$T = 0,534s$$

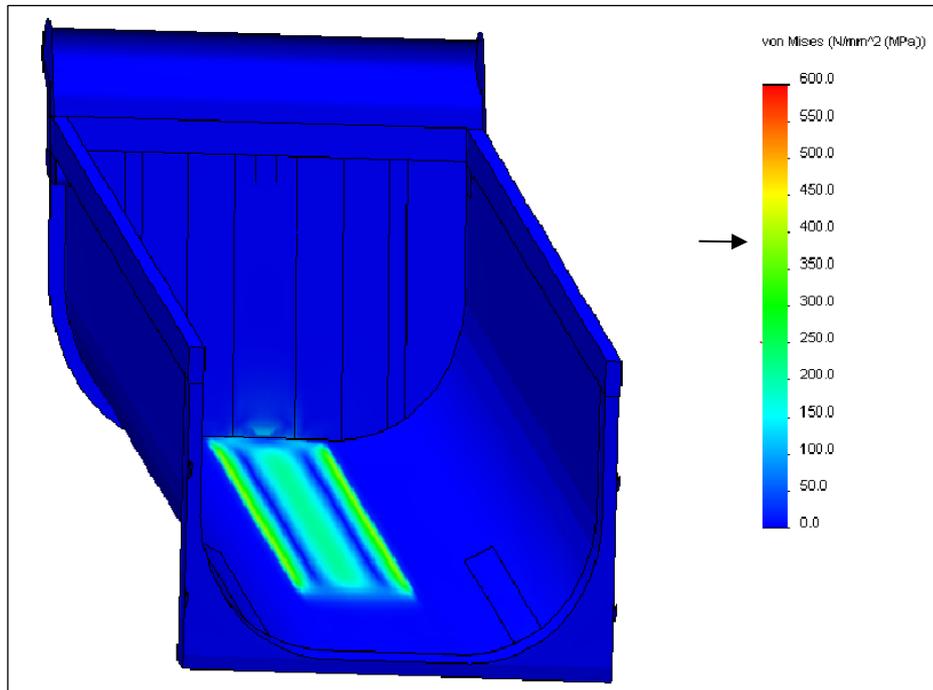
Sabe-se que o tempo total é de 2,67 segundos, sendo parte desse tempo contabilizado no descarregamento da pá (1,90 segundos), no tempo de queda (0,534 s) e no tempo de acomodação do material, que resta então, em 0,236 segundos.

Por fim, calculou-se a força de impacto através da equação 14.

$$F = \frac{(9900(kg) \times 5,74(m/s))}{0,236s}$$

$$F = 240788,14N \text{ ou } F = 24570kgf$$

A figura 69 representa a distribuição de tensões na estrutura usando-se o HARDOX 450.



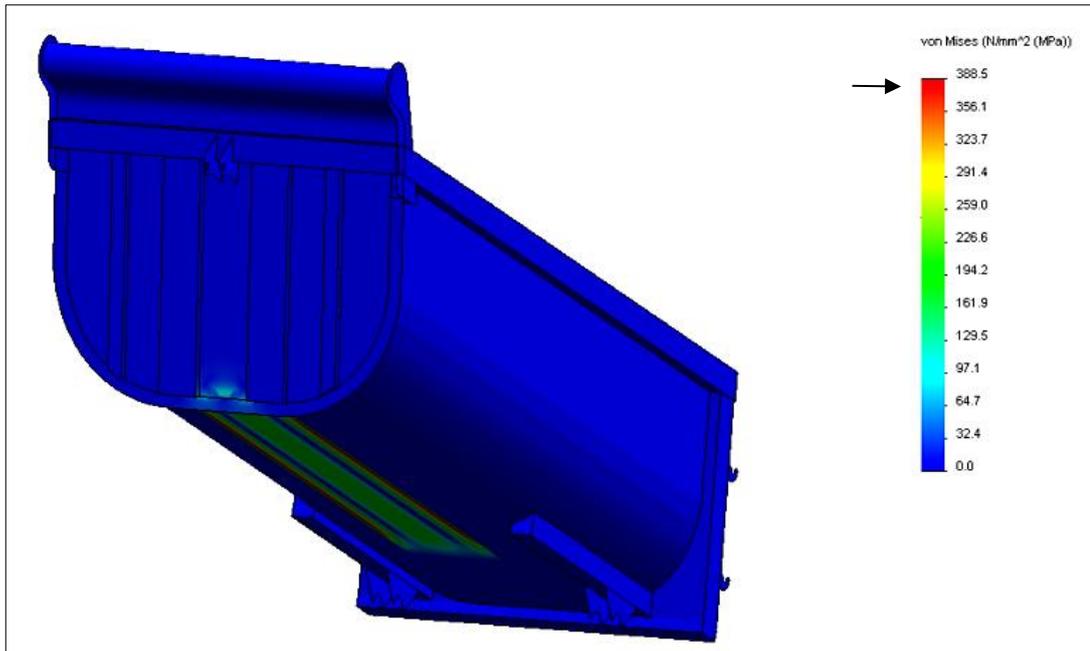
**Figura 69 - Combinação 2 com HARDOX 450**

Fonte: Elaborada pelo autor

Nota-se que, devido ao impacto imposto pelo material à caçamba, a tensão atuante aumentou, agora é de 388 Mpa. Sendo assim, pode-se descartar tanto o aço comum 1020 como o aço microligado ao Nióbio nesse tipo de situação. Entretanto, para o HARDOX 450 e DOMEX 700 (figura 70) a verificação atende aos requisitos.

Faz-se importante ressaltar informações a respeito de estudos, como por exemplo o de Costa (2014, p. 60-61) no qual percebeu, em amostras de HARDOX 450, um perfil de dureza menor na zona afetada pelo calor (ZTA), ao submeter o aço ao processo de solda. Assim como Dudziński, Konat e Pękalski (2008, p. 26), os quais notaram desintegração da estrutura martensítica inicial do aço, prejudicando a dureza da zona termicamente afetada e queda na resistência ao desgaste. Isso significa que esse tipo de aço não é muito adequado para locais de solda. Porém, conforme já citado por SSAB (2011, p. 4), existem condições de contorno que minimizam esse efeito negativo do processo de soldagem.

Em contrapartida, o DOMEX propicia soldagem com os métodos convencionais, sem necessitar de pré-aquecimento, devido ao baixo teor de carbono, fósforo e enxofre. Porém, assim como o HARDOX, há uma zona termicamente afetada pelo calor, mas sua propriedade não é significativamente alterada. Dessa forma, o seu uso em locais de solda seria mais adequado.



**Figura 70 - Combinação 2 com DOMEX 700**

Fonte: Elaborada pelo autor

Pode-se perceber que, no caso do DOMEX 700, algumas partes se apresentaram próximas à tensão mínima admissível do material, mas como a solicitação de maior tensão não foi numa área muito grande, e há possibilidades de revestir o material, e ainda, a sua tensão de escoamento é maior que 760 Mpa, ou seja, o material passa a entrar no regime plástico a partir de uma tensão maior do que a tensão atuante, assim sendo, a sua verificação foi aceita.

A tabela 13 descreve a combinação 2.

**Tabela 13 - Resultados da combinação 2**

| <b>Combinação 2</b>   |                                |                                   |                    |
|-----------------------|--------------------------------|-----------------------------------|--------------------|
| <b>Material</b>       | <b>Tensão admissível (Mpa)</b> | <b>Maior Tensão Atuante (Mpa)</b> | <b>Verificação</b> |
| Aço 1020              | 184 – 245,3                    | 388                               | Falha              |
| Aço microligado ao Nb | 286 – 381,3                    | 388                               | Falha              |
| DOMEX 700 MC          | 404 – 538,7                    | 388                               | ok                 |
| HARDOX 450            | 722 – 962,7                    | 388                               | ok                 |

## 5 CONCLUSÃO

Em virtude dos aspectos analisados ao longo do trabalho, tipos de aços microligados ao nióbio, podem ser constituintes de caçambas de caminhões transportadores de minério. Através de amostras cedidas pelo Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET – MG) e pela Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração (CBMM) fez-se ensaios a fim de determinar as características dos aços a serem avaliados e posteriormente aplicados em simulações para a análise estrutural da caçamba basculante. Logo, os objetivos do trabalho foram perfeitamente alcançados.

A análise metalográfica foi de muita importância para o estudo devido à observação da microestrutura dos aços, de suas fases constituintes, para que pudesse relacioná-las com as composições e propriedades mecânicas dos materiais. Verificou-se que, as composições químicas dos materiais influenciam na formação de determinada fase nos aços, e, por conseguinte, as fases austenita e martensita presentes nos aços microligados contribuem para o refinamento dos grãos, comprovado nos testes metalográficos, e conseqüentemente, para a melhora das propriedades de resistência e dureza dos aços. Foi visto que, o aço comum 1020, em comparação com os outros, deixa a desejar no quesito resistência e dureza, porém contribui com a ductibilidade, usinabilidade e soldabilidade, conforme visto na literatura. Em contrapartida, os aços HARDOX 450 e a amostra de aço microligada ao nióbio, além de apresentarem ótimas propriedades de resistência e dureza, possuem valores aceitáveis de soldabilidade. Os aços DOMEX 700 MC e HARDOX 450, além de possuírem ótimos valores de resistência e dureza, seus fabricantes garantem também bons valores de tenacidade e conformabilidade.

A partir dos dados físicos avaliados, fez-se a análise estrutural da caçamba basculante em algumas condições de trabalho e obteve-se a conclusão de que, dentre os materiais estudados, o HARDOX 450 seria o mais adequado para se constituir o fundo da estrutura, já que atingiu os melhores resultados de resistência e dureza e suportou todas as tensões atuantes. O DOMEX 700 MC ao ser solicitado, apresentou bons resultados, dessa forma, recomenda-se o seu uso nas paredes das caçambas e em regiões de solda, já que apresentou uma boa soldabilidade. Segundo o seu fabricante, baixos teores de carbono, fósforo e enxofre permitem que todos os métodos convencionais de soldagem sejam facilmente utilizados para DOMEX.

Esse estudo foi de grande importância para o campo de lavra de minério, pois, o carregamento e transporte são fatores dispendiosos, e por isso, tem-se procurado otimizar esse processo. Para isso, levou-se em conta o material de que é constituída a caçamba do caminhão, e através das propriedades dos materiais escolhidos, percebeu-se a contribuição destes em horas de manutenção (evitar trincas de fadiga) e vida útil dos equipamentos. E além disso, com a utilização de aços microligados ao Nióbio, pode-se reduzir a espessura das estruturas, e dessa forma, diminuir o peso do caminhão, colaborando para o transporte de mais material.

Conclui-se que, foi possível obter os benefícios já relatados por pesquisas e projetos, como o da CBMM, utilizando-se aços microligados ao Nióbio. E ademais, foi viável a análise estrutural da caçamba de caminhão transportador de minério e estabelecido os materiais adequados com vista numa melhor performance de transporte.

## 6 REFERÊNCIAS

A. A. GORNI, **Resfriamento Acelerado De Chapas Grossas: O Futuro Chegou**. Caderno Técnico da Revista Metalurgia e Materiais 63:564, (2006), p 103.

ADAMS, Vince, Askenazi, Abraham. – **Building Better Products with Finite Element Analysis**. Santa Fé, 1999.

A. L. C. SILVA, P. R. MEI, **Aços e Ligas Especiais**. 2ª ed. Editora Edgard Blücher. 2006.

ADAMIAK, M.; GÓRKA, J.; KIK, T. **Comparison of abrasion resistance of selected constructional materials**. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, v. 37, n. 2, p. 375-380, 2009.

ALENCAR, F.S, et al. **Análise numérica de tubos de aço reforçados com fibra de Carbono**, 2006.

ALVES, J. V. D. S. **A influência do Nióbio em Aços com baixo teor de Carbono Laminados a Quente**, Araxá, 2015. 68.

ASSAN, A. E. **Método dos Elementos Finitos - Primeiros Passos**. 2ª edição, São Paulo: Unicamp, 2003.

AZEVEDO, A. F. M. **Método dos Elementos Finitos**, 1ª ed. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. 2003.

AZEVEDO, L. G. **Aplicação da técnica da dupla camada na soldagem do aço ABNT 1045**. 2002. 102 f. Dissertação em Engenharia e Ciência de Materiais - Universidade Federal do Ceará. Ceará. 2002.

BAÊTA, Fernando da Costa; SARTOR, Valmir. **Resistência dos materiais e dimensionamento de estruturas para construções rurais**. Universidade Federal de Viçosa. 1999.

BAPTÍSTA, A. L. B. et al. **Melhoria das propriedades mecânicas e usinabilidade de ligas de alumínio centrifugadas**. Projeto EEIMVR/ETPC, Volta Redonda, 1997.

BECKER, D. **Transformação de Fases em metais**. Joinville: Udesc. Disponível em <[http://www.joinville.udesc.br/portal/professores/daniela/materiais/Aula7a\\_\\_\\_tratamento\\_t\\_rmico.pdf](http://www.joinville.udesc.br/portal/professores/daniela/materiais/Aula7a___tratamento_t_rmico.pdf)>. Acesso em 20 de junho de 2017.

BERTOLDI, E. Análise de ensaios de tração em corpo de prova de aço sae 1020. **4ª semana internacional de engenharia e economia FAHOR**, Horizontina, 5 a 7 Novembro 2014. 10 p.

BORBA, A. A. **Apostila: CAD Mecânico 3D SolidWorks Edit**. Editora Petromec/Jung Systems. 2000. 19 p.

BORGES, J. N. **Preparação de amostras para análise microestrutural**. Universidade Federal de Santa Catarina. 2006. Disponível em: <<http://pavanati.com.br/doc/Apostila%20Ana%20Maliska%20-%20Preparacao%20Microestrutural.pdf>>. Acesso em 12 de junho de 2017.

BUFFONI, S. S. D. O. **Propriedades Mecânicas dos Materiais**. Universidade Federal Fluminense. Disponível em: <<http://www.cartografica.ufpr.br/home/wp-content/uploads/2015/09/Propriedades-Mecanicas-dos-Materiais.pdf>>. Acesso em: 20 Outubro 2016.

CATERPILLAR. **CATERPILLAR**, 2017. Disponível em: <<http://www.caterpillar.com/pt.html>>. Acesso em: 10 Maio 2017.

CARBONI M. C. **Novos Materiais para a Redução de Peso dos Veículos**. 12 de dezembro de 2012. <http://www.frotasefretesverdes.com.br/2012/palestras/Marcelo%20Carboni.pdf> Acesso em 25 de Setembro de 2016.

CHIAVERINI V. **Aços e Ferros Fundidos**. 7ª ed. Editora ABM. 1996.

CHIAVERINI V. **Tecnologia Mecânica**. São Paulo. v. 2. Editora McGraw-Hill Ltda.

CIMASP. **Caçamba Basculante: Manual do Proprietário**. Disponível em: <[http://www.cimasp.com.br/cimasp/manuais/manual\\_cbc.pdf](http://www.cimasp.com.br/cimasp/manuais/manual_cbc.pdf)>. Acesso em: 10 Novembro 2016.

CIMM, G. S. Teste de dureza Brinell. Disponível em: <[http://www.cimm.com.br/portal/material\\_didatico/6558-teste-de-dureza-brinell#.WB4kh\\_krJPY](http://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/6558-teste-de-dureza-brinell#.WB4kh_krJPY)>. Acesso em: 20 Outubro 2016.

CLOUGH, R.W. **The finite finite element method in plane stress analysis**. Proceedings, 2nd Conference on Eletronic Computation, ASCE, Pittsburg, PA. 1960.

COELHO, F. **Física**. Juíz de Fora: Universidade Federal de Juiz de Fora, 2014.

COLPAERT, Hubertus. Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns. 4 ed. São Paulo: Edgard Blucher LTDA, 2008.

COELHO, F. Cursinho pré universitário popular, Juiz de fora, 2015. Disponível em: <<http://www.ufjf.br/cursinho/files/2015/06/FISICA-1-filipe-coelho1.pdf>>. Acesso em: 10 Maio 2017.

COMERCIAL GERDAU. Aços ao Carbono: Caracterização química e controle da qualidade de materiais metálicos. 2013. Disponível em: <[http://www.ipt.br/solucoes/29caracterizacao\\_quimica\\_e\\_controle\\_da\\_qualidade\\_d\\_e\\_materiais\\_metalicos.htm](http://www.ipt.br/solucoes/29caracterizacao_quimica_e_controle_da_qualidade_d_e_materiais_metalicos.htm)>. Acesso em 08 junho de 2016.

COMPANHIA BRASILEIRA DE METALURGIA E MINERAÇÃO. Disponível em: <<http://www.cbmm.com.br/pt/Paginas/Niobium-Microalloyed-Construction-Steels.aspx>>. Acesso em: 10 Novembro 2016.

COMPORTAMENTO mecânico dos materiais. Disponível em: <<http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/EME717/comportamento%20mecanico%20dos%20metais.pdf>>. Acessado em 10 de junho de 2017.

COOK, R. D., Malkus, D. S., Plesha, M. E. **Concepts and Applications of Finite Element Analisis**. 3<sup>a</sup> ed. University of Wisconsin, 1989.

CORRADI, W. et al. **Fundamentos de Física I**. Belo Horizonte: UFMG , 2010.

COUTINHO, C. B. **Materiais Metálicos para Engenharia**, Editora Fundação Christiano Ottoni, Belo Horizonte, p. 311-360, 1992.

CRUZ, M. D. **CATIA V5R20 - Modelagem, Montagem e Detalhamento - 2D e 3D - Para Windows.** 2010. Disponível em:

<<http://www.juliobattisti.com.br/loja/detalheproduto.asp?CodigoLivro=CAD0000017>>.

Acesso em 16 de junho de 2017.

DESSAULT Systemes. Help solidworks. Disponível em:

<[http://help.solidworks.com/2016/Portuguese-](http://help.solidworks.com/2016/Portuguese-brazilian/SolidWorks/Cworks/c_Preventing_Rigid_Body_Motion.htm)

[brazilian/SolidWorks/Cworks/c\\_Preventing\\_Rigid\\_Body\\_Motion.htm](http://help.solidworks.com/2016/Portuguese-brazilian/SolidWorks/Cworks/c_Preventing_Rigid_Body_Motion.htm)>. Acesso em: 10 Maio 2017.

DIAS, J. M. P. **Desenho Assistido Por Computador Com Modelação De Sólidos A 3D.**

Instituto Superior Técnico de Portugal. 1999.

DURFERRIT. Diagrama de Equilíbrio. Disponível em:

<[http://www.durferrit.com.br/downloads/13\\_Diagrama%20Ferro-Carbono.pdf](http://www.durferrit.com.br/downloads/13_Diagrama%20Ferro-Carbono.pdf)>. Acessado em

10 de junho de 2016.

EDUCATION, S. Uma introdução a aplicações de análise de tensão com o SolidWorks Simulation, Manual do Instrutor. Solidworks, Massachusetts. Disponível em:

<[https://www.solidworks.com/sw/docs/Motion\\_Sim\\_Instructor\\_WB\\_2011\\_PTBR.pdf](https://www.solidworks.com/sw/docs/Motion_Sim_Instructor_WB_2011_PTBR.pdf)>. Acesso

em: 15 Novembro 2016.

ENILA. Enila Equipamentos. Disponível em:

<[http://www.enilaequipamentos.com.br/site/metalografia-prensa-de-embutimento-](http://www.enilaequipamentos.com.br/site/metalografia-prensa-de-embutimento-metalografico.php)

[metalografico.php](http://www.enilaequipamentos.com.br/site/metalografia-prensa-de-embutimento-metalografico.php)>. Acesso em: 25 de Junho de 2017.

FERRAZ, H. **O Aço na Construção Civil.** 2003. Artigo - Revista Eletrônica de Ciências, nº22, São Carlos, domingo, 6 de março de 2005.

FILHO, A. A. **Elementos Finitos: a base da tecnologia CAE Análise matricial.** 4ª ed. Editora Érica. 2006

FILHO E. B. et al. **Conformação plástica dos metais.** 1ª ed. dig. São Paulo: EPUSP, 2011.

FILHO, E. B. et al. **Conformação Plástica dos Metais.** 6ª ed (primeira digital). Campinas: Editora da Unicamp, 2011.

FINOTTI, G. Resistencia dos materiais I. Disponível em: <<http://www.fisup.com.br/arqanderson/resist.mat1/RESIST%C3%80NCIA%20DOS%20MATERIAIS-1.R64.pdf>>. Acesso em 10 de março de 2017.

FORTES, Cléber. **Apostila de Eletrodos Revestidos**. Editora ESAB. 2005.

FREDEL, M. C.; ORTEGA, P.; BASTOS, E. **Propriedades Mecânicas: Ensaio Fundamentais**. [S.l: s.n]: Cermat - Universidade Federal de Santa Catarina, v. 1. 147 p.

HENRIQUES, C. G.; BUENO, E. **Geometrias Complexas e Desenho Paramétrico**. Disponível em: <<http://www.vitruvius.com.br/revistas/read/drops/10.030/2109>>. Acesso em 16 de junho de 2017.

HIBBELER R. C. **Resistência dos materiais**. São Paulo. 7<sup>a</sup> ed. Editora Pearson Prentice Hall. 2010.

HIRATA, M. K. Centro de massa. Disponível em: <[http://www.ifi.unicamp.br/~lunazzi/F530\\_F590\\_F690\\_F809\\_F895/F809/F809\\_sem1\\_2005/MiguelK-Rigitano\\_RF.pdf](http://www.ifi.unicamp.br/~lunazzi/F530_F590_F690_F809_F895/F809/F809_sem1_2005/MiguelK-Rigitano_RF.pdf)>. Acesso em: 10 Novembro 2016.

HEISTERKAMP F; TADEU C. Niobium: Future possibilities – Technology and the market place. **International Conference Niobium**. 2001.

JAWORSKI, T. **Equipamentos Para Escavação: Compactação e Transporte**. Curitiba: 124 p. 1997.

KAIZER, M. D; BARBIERI, R.; BARBIERI, N. **Otimização de Caçamba para caminhão fora de estrada**. s.d.: 16 p.

KLAUS, H, FRIEDRICH, H. **Low Carbon Structural Steels: The key to economic constructions**. International Symposiums on Low Carbon Steels for the 90's, Editora by Asfahan, R, and Tither, G, The Minerals, Metals & materials Society, Pittsburg, p. 211218, 1993.

LEE, K. J, et al. **Mathematical modeling of transformation in Nb microalloyed steels**, ISIJ International, v. 32, n. 3, p. 326-334, 1992.

LOPES, W. Estudo do encruamento dos aços AISI 304 e AISI 409 com uso da técnica de cisalhamento planar simples. Belo Horizonte: Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, 2009. 186p. (Tese, Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas)

LOTTI R. S. et al. Aplicabilidade científica do método dos elementos finitos. Rev. Dent. Press Ortodon. Ortop. Facial [online]. 2006, v.11, n.2, pp.35-43. ISSN 1980-5500. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S1415-54192006000200006>>. Acesso em 09 de novembro de 2016.

MARINHO JUNIOR, A. Ensaios Mecânicos - Dureza. 2013. Disponível em:<http://www.fat.uerj.br/intranet/disciplinas/Ensaio%20de%20Materiais/EM05.pdf>. Acesso em 08 jun. 2013.

MATSUKUMA, A. Y. Microscopia Eletrônica de Varredura e Transmissão: MEV e MET. Disponível em: <[http://ca.iq.usp.br/novo/paginas\\_view.php?idPagina=16](http://ca.iq.usp.br/novo/paginas_view.php?idPagina=16)>. Acesso em 12 de junho de 2017.

MEKKAWY, M. F. et al. **Effect of interrupted accelerated cooling on mechanical properties and structure of vanadium and titanium microalloyed steels bars.** v. 7, p. 28-36. Janeiro de 1991.

MELCONIAN S. Mecânica Técnica e Resistência dos Materiais. 17ª edição. Editora Érica.  
MERCEDEZ-BENZ. Mercedes-Benz. Disponível em: <<https://www.mercedes-benz.com.br/caminhoes/actros/actros-4844-8x4-basculante-fora-de-estrada>>. Acesso em: 10 Maio 2017.

NETO, R. M. L. **Ensaio de Tração.** IEM-Instituto de Engenharia Mecânica, LEN-Laboratório de Ensaios Destrutivos e Não-Destrutivos, Universidade Federal de Itajubá. 2013

PANNONI, F. D. Aços estruturais. Ph.D. Especialista em Engenharia de Proteção Estrutural da Gerdau Açominas S.A. Disponível em: <<https://www.gerdau.com.br/arquivos-tecnicos/12.brasil.es-ES.force.axd>>. Acesso em 10/03/17.

PAULI, E. A; ULIANA, F. S. Mecânica: Tratamentos Térmicos. Espírito Santo: 16 p, 1997.  
RESEARCH GATE. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/273140203\\_Caracterizacao\\_Mecanica\\_e\\_Metalurgica\\_de\\_Juntas\\_Dissimilares\\_de\\_Metals\\_Alta\\_Resistencia\\_e\\_Baixa\\_Liga](https://www.researchgate.net/publication/273140203_Caracterizacao_Mecanica_e_Metalurgica_de_Juntas_Dissimilares_de_Metals_Alta_Resistencia_e_Baixa_Liga)> Acesso em 5 de maio de 2017.

PRATES, M. B. **Influência do resfriamento na laminação termomeânica de um aço microligado ao nióbio em fio máquina para a fabricação de parafusos da classe 8.8.** Trabalho de Diplomação, Porto Alegre, Novembro 2011.

RIGUEIRA, G. I. et al. **Evolução microestrutural e alteração de dureza na bainita e na perlita em aços 2,25Cr1Mo após tratamento de envelhecimento.** Scielo, Rio de Janeiro, 2011.

RODOVIÁRIOS, R. - Rosseti - Equipamentos Rodoviários. Disponível em: <<http://www.rossetti.com.br/produtos.php>>. Acesso em: 17 junho 2017.

RODRIGUES, S. M. **Estudo do Comportamento em Fadiga de Juntas Soldadas de Aços Bifásicos de Alta Resistência Mecânica.** Porto Alegre: UFRGS, 2012.

ROHDE, R. A. Metalografia preparação de amostras. 2010. Disponível em: <<http://www.freewebs.com/profpaulofj/apostilas/metalografia-%20URISAN.pdf>>. Acesso em 12 de junho de 2017.

SCHEID, A. Curso básico de aços. Curitiba, 2010. Disponível em: <<http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM343/A%C7OS.pdf>>. Acesso em 16 de março de 2017.

SANCHEZ, C. A. A. **Estudo de Impacto Usando Elementos Finitos e Análise não Linear.** Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2001.

SILVA, A.L.V.C; Mei, P.R. **Aços e Ligas Especiais**, Eletrometal Metais Especiais S.A., Sumaré, SP, 1988, 528 pp.

SILVA, H. F. **Formulação do problema da torção uniforme em barras de seção transversal maciça.** Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

SILVA, I. F. D. **Apostila de Solidworks.** [S.l.]. Agosto, 2009.

SILVA, Ubirajara Marques de Carvalho e. **Técnicas e procedimentos na metalografia prática: preparação de corpos de prova para exames metalográficos.** São Bernardo do Campo, SP, I. Rossi, 1977.

SIWECKI, T. Modelling of microstructure evolution during recrystallization controlled rolling. ISIJ International, v. 32, n. 3, p. 368-76, 1992.

SOLID EDGE Part Versão 16 MT01413 - 160 – Manual do Curso Básico. Edit. UGS Corporation. 2005. 482 p.

SOLID EDGE Surfacing MT01418 - V17 – Student Guide. Editora UGS Corporation. 2005. 272 p.

SOLIDWORKS Office Premium 2008 – Manual: Essencial Peças e Montagens. Edit. SolidWorks Corporation. 2007. 482 p.

SOLIDWORKS Office Premium 2008 – Manual: Modelagem Avançadas de Peças. Edit. SolidWorks Corporation. 2007. 366 p.

SOUZA S. A. **Composição Química dos Aços**. 4ª ed. Editora Blucher, 2012.

SOUZA, Sérgio Augusto de. **Composição Química dos Aços**. São Paulo: Edgard Blucher, 1989. 134 p.

SSAB. Data sheet 168en Hardox 450. 2013. Disponível em: <<http://www.ssab.com>>. Acesso em: 17 setembro 2016.

SSAB. Domex range of hot-rolled high strength sheet steel. S.d. Disponível em: <[http://www.winfo.sk/pdf/domex\\_eng.pdf](http://www.winfo.sk/pdf/domex_eng.pdf)>. Acesso em 15 de abril 2017.

SSAB. General product information Weldox, Hardox, Armox and Toolox. v. 11, 2011. Disponível em: <<http://www.ssab.com.br/products>>. Acesso em: 17 de maio de 2017.

SSAB. Hardox 450. Data sheet. Sweden. Disponível em: <<http://www.ssab.com.br/products/brands/hardox/products/hardox-450>> Acesso em 09 de novembro de 2016.

SSAB. Hardox: quarry and open pit mine 2016. Disponível em: <<http://www.ssab.com>>. Acesso em 17 de setembro 2016.

TAISS, ED JUAREZ MENDES. **Redução de Peso em Veículos Comerciais A Contribuição dos Aços de Alta Resistência Micro ligados ao Nióbio: Conceitos e Estudo de Caso**. Doc Player. 10 de dezembro de 2013.

TESSLER , M. B., BARBOSA , C. A. **A usinabilidade dos aços inoxidáveis: Metalurgia e Materiais**, v. 49, n. 413, p. 32-41, janeiro de 1993.

TIMOSHENKO, S.P., GERE, J.E. **Mecânica dos Sólidos**. v. 1 e 2. Editora Livros Técnicos Científicos, Rio de Janeiro, 1984.

TSCIPTSCHINI, A. P.; PINEDO, C. E. Estrutura e propriedades do aço inoxidável austenítico AISI 316L Grau ASTM F138 nitretado sob plasma à baixa temperatura. **Scielo**, Ouro Preto, 2010.

TSCIPTSCHIN, A.P.; SINATORA, A.; GOLDENSTEIN, H. **Efeito dos elementos de liga nos aços**. Disponível em: <<http://www.pmt.usp.br/pmt2402/Capitulo8.pdf>>. Acessado em 17 de setembro de 2016.

ULEWICZ, R.; MAZUR, M.; BOKŮVKA, O. **Structure and mechanical properties of finegrained steels**. Periodica Polytechnica Transportation Engineering, v. 41, n. 2, p. 111-115, 2014.

VALÉRIO R.C.; BRITO J.N.; SOUZA G. R. Geração Automática de Desenhos na Plataforma CAD Solid Works a Partir de Células Paramétricas Desenvolvidas em Ambiente Visual Basic. 2010. **Nono Simpósio de Mecânica Computacional Universidade Federal de São João Del-Rei MG ABMEC 3 finitos, maquinação usando CAD/CAM**. Disponível em: <<http://www.ufsj.edu.br/simmec2010/pagina/desdesoft/DES-05.pdf>>. Acesso em: 16 de junho de 2017.

VETTURAZI, R. **Deformações em estruturas soldadas: avaliação comparativa entre o método de elementos finitos e análise real aplicado ao aço de baixo carbono e aço de alta resistência**. Trabalho de conclusão de curso (graduação). Universidade de Caxias do Sul (UCS)/Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Caxias do Sul, 2013.

WORLD CUT. **Lasercutter**. Disponível em: <<http://lasercutter.com.pt/1-2-brand-new-metal-laser-cutting-machine.html>>. Acesso em: 25 de Junho de 2017.