

THIAGO BARÃO NEGRETTI

ANÁLISE NUMÉRICA-EXPERIMENTAL DA INTEGRIDADE ESTRUTURAL DO  
SUPORTE DE AÇO DIN EN 10149-1.0971 DO TUBO DE ADMISSÃO DE AR DE  
MOTORES DIESEL DE VEÍCULOS PESADOS

Dissertação de Mestrado apresentada ao  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia  
de Materiais da Universidade Presbiteriana  
Mackenzie, como requisito parcial à obtenção  
do título de Mestre Profissional em Engenharia  
de Materiais.

ORIENTADOR: PROF. DR. ANTÔNIO AUGUSTO COUTO

São Paulo  
2013

THIAGO BARÃO NEGRETTI

ANÁLISE NUMÉRICA-EXPERIMENTAL DA INTEGRIDADE ESTRUTURAL DO  
SUPORTE DE AÇO DIN EN 10149-1.0971 DO TUBO DE ADMISSÃO DE AR DE  
MOTORES DIESEL DE VEÍCULOS PESADOS

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais da Universidade Presbiteriana Mackenzie, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre Profissional em Engenharia de Materiais.

Aprovado em \_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de 201\_.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Antônio Augusto Couto  
Universidade Presbiteriana Mackenzie

---

Prof. Dr. Daniel Benitez Barrios  
Universidade Presbiteriana Mackenzie

---

Prof. Dr. Arnaldo Homobono Paes de Andrade  
Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares

N385a

Negretti, Thiago Barão

Análise numérica-experimental da integridade estrutural do suporte de aço din en 10149-1.0971 do tubo de admissão de ar de motores diesel de veículos pesados. / Thiago Barão Negretti - São Paulo, 2013.

90 f. : il.; 30 cm

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Universidade Presbiteriana Mackenzie - São Paulo, 2013.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Augusto Couto

Bibliografia : p. 86-87

1. Elementos finitos. 2. Integridade Estrutural. 3. Fadiga.  
4. Aço S260NC. 5. Aço S700MC. I. Título.

CDD 620.11

À minha mulher e filho, pelo amor, dedicação, trabalho e incentivo; a meus pais, irmão e todos os familiares, aos amigos, por todo o suporte oferecido durante meus anos acadêmicos que foram fundamentais para a realização desse trabalho.

Não acredite em algo simplesmente porque ouviu. Não acredite em algo simplesmente porque todos falam a respeito. Não acredite em algo simplesmente porque está escrito em seus livros religiosos. Não acredite em algo só porque seus professores e mestres dizem que é verdade. Não acredite em tradições só porque foram passadas de geração em geração. Mas depois de muita análise e observação, se você vê que algo concorda com a razão, e que conduz ao bem e benefício de todos, aceite-o e viva-o. (Buda)

## AGRADECIMENTOS

A Deus por me dar força de vontade para atingir meus objetivos.

À minha falecida avó, pela fé e confiança.

À minha mulher por sempre estar pronta a me ajudar, mesmo com inúmeras obrigações.

Ao meu filho por ser a fonte de inspiração mais valiosa.

Ao meu pai, pela paciência e por toda a ajuda que ofereceu, e principalmente por estar sempre ao meu lado não importa o que aconteça.

À minha mãe por ser fonte de sabedoria e paz, e sempre otimista, fazendo sonhos em comum realizarem-se.

Ao meu irmão por ser fonte inspiradora de garra e força para vencer.

A Helio Kitagawa pela orientação, conselhos, amizade e palavras de motivação.

A Carlos Miletovic pela participação e efetiva contribuição no desenvolvimento deste trabalho.

A Flavio Arcanjo por sua disposição em orientar-me para realizar análises complexas.

A Alex Petruk por sua colaboração e acompanhamento de todo o desenvolvimento.

Ao Dr. Jan Vatauvuk por se dispor a contribuir para o melhor entendimento das fratografias.

Ao Dr. Antonio Augusto Couto, por estar sempre disposto a me orientar e conversar, tornando possível a realização do trabalho.

## RESUMO

O suporte do tubo de admissão de ar dos motores diesel de veículos comerciais tem a importante função estrutural de sustentar o tubo de admissão de ar, fixado no conjunto da turbina e no intercooler pelo tubo de admissão de ar. A falha do tubo ou da turbina impossibilitaria o funcionamento do motor. O suporte tem também a função de reduzir deslocamentos impostos na turbina pelas vibrações do motor, que podem causar danos à estrutura do conjunto mencionado. Neste trabalho é apresentado um estudo da integridade estrutural do suporte por meio de métodos experimentais e numéricos. O método dos elementos finitos é utilizado para análise modal, análises estáticas de pressão e termoelástica e análise dinâmica. São avaliados os pontos concentradores de tensão no suporte para o aço laminado à quente conforme DIN EN 1049-1.0971, conhecido comercialmente como S260NC e utilizado atualmente nos veículos comerciais e do material conforme DIN EN 10149-2 1.8974, conhecido comercialmente como S700MC e proposto para substituir o material atual. O limite de resistência à fadiga e o número de ciclos para vida em fadiga são obtidos analiticamente. Experimentalmente, para caracterização do suporte, são apresentados os resultados dos ensaios de dureza, composição química, microestrutura. Para avaliação do suporte são apresentados fractografia e cálculo da vida em fadiga. O suporte do tubo de admissão de ar não está de acordo com os critérios que foram utilizados para os cálculos, o que confirma a falha que está ocorrendo nos veículos que o utilizam. O suporte, para ambos os materiais apresentou tensões acima do limite de fadiga calculado. O suporte com o material atualmente utilizado apresentou número de ciclos  $6,16 \times 10^4$  ciclos, sugerindo fadiga de baixo ciclo. O suporte fabricado com o material proposto reduziu o limite de fadiga em 29%. A região de onde ocorreu a falha nas amostras dos suportes testados em laboratório é a mesma da falha ocorrida em campo, demonstrando consistência do dispositivo e carregamento cíclico utilizados para o ensaio de fadiga. A tensão limite de fadiga calculada através do número de ciclos obtido experimentalmente é em média de 16% maior em relação ao calculado analiticamente. Uma amostra do material proposto S700MC chegou a  $1,00 \times 10^6$  ciclos, indicando que o mesmo pode ter vida infinita. Os limites de fadiga calculados analiticamente e experimentalmente possuem valores próximos, demonstrando que os métodos utilizados estão consistentes.

Palavras-chave: Elementos finitos; Integridade Estrutural; Fadiga; Aço S260NC; Aço S700MC.

## ABSTRACT

The diesel engine charging air tube support has the important structural function of supporting the charging air tube, fixed on the turbine and the intercooler. The tube or turbine failure precludes the engine operation. The support also has the function of reducing the displacements imposed on the turbine by engine vibrations that may damage the structure of the mentioned assembly. This work presents a study of the structural integrity of the support through experimental and numerical methods. The finite element method is used for modal analysis, pressure and thermoelastic static analyses and dynamic analysis. The stress concentration regions are evaluated in the support for hot-rolled steel according to DIN EN 1049-1.0971, known commercially as S260NC, currently used in the commercial vehicles, and according to DIN EN 10149-2 1.8974, commercially known as S700MC, proposed for replace the current material. The endurance limits and fatigue life are obtained analytically. Experimentally, to the support characterization, the testing results of hardness, chemical composition and microstructure are presents. To the support evaluation, fractography and fatigue life are presented. The support is not according with the criteria used for the calculations, which confirms the support used in the vehicle failure. The support, for both materials, presented stresses above the calculated fatigue limit. The support, for the current material, presented stresses 42% above the fatigue limit, which represents  $6.16 \times 10^4$  cycles and suggests low cycle fatigue failure. The proposed material reduces the stresses in 29%. The laboratory tested samples failure regions are the same occurred on the field, which demonstrates consistency within the device used for the fatigue test. The fatigue limit calculated throughout the experimentally obtained number of cycles averages 16% higher than the analytically fatigue limit calculated. A sample of the proposed material S700MC reached  $1.00 \times 10^6$  cycles, indicating that it may have infinite life. The fatigue limits calculated analytically and experimentally have similar values, demonstrating that the methods used are consistent.

Keywords: Finite elements; Structural Integrity, Fatigue, Steel S260NC; Steel S700MC.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Suporte do tubo de admissão de ar – Modelo Físico. ....	16
Figura 2: Posicionamento da peça no motor diesel. ....	16
Figura 3: Suporte do Tubo de Admissão de Ar – Modelo de Elementos finitos.....	16
Figura 4: Esquema de uma peça circular bi-apoiada com movimento de rotação e carregamento transversal. ....	22
Figura 5: Processo de fratura por fadiga.....	22
Figura 6: Distribuição da Concentração de Tensões. ....	25
Figura 7: Representação esquemática de (a) fratura frágil, (b) fratura muito dúctil e (c) fratura dúctil. ....	36
Figura 8: Elemento finito sólido de oito nós com geometria arbitrária. ....	43
Figura 9: Sistema de coordenadas locais. ....	44
Figura 10: Materiais e peças do conjunto do modelo de elementos finitos.....	52
Figura 11: Condições de contorno para a análise modal. ....	54
Figura 12: Condições de contorno para as análises estáticas. ....	54
Figura 13: Condições de contorno para a análise dinâmica. ....	55
Figura 14: Carregamento de pressão no bocal do tubo de ar frio.....	56
Figura 15: Condições de contorno para a análise termoelástica.....	57
Figura 16: Modelo de elementos finitos para determinar o deslocamento do dispositivo para o ensaio de fadiga. ....	61
Figura 17: Desenho de fabricação e perspectiva ilustrada do suporte superior fabricado para o ensaio de fadiga. ....	61
Figura 18: Desenho de fabricação e perspectiva ilustrada do suporte inferior fabricado para o ensaio de fadiga. ....	62
Figura 19: Desenho e perspectiva ilustrada da montagem do dispositivo para o ensaio de fadiga. ....	62
Figura 20: Dispositivo e suporte montados na máquina de ensaio dinâmico.....	63
Figura 21: Interface gráfica do programa MTS Flextest 60. ....	63
Figura 22: Dispositivo e suporte montados na máquina de ensaio dinâmico.....	66
Figura 23: Resultado da análise modal.....	70
Figura 24: Resultado da análise estática de pressão no bocal do tubo de admissão de ar.....	71
Figura 25: Resultado da análise estática termoelástica. ....	71
Figura 26: Resultado da análise dinâmica. ....	71

Figura 27: Resultado da análise estática de pressão no bocal do tubo de admissão de ar.....	73
Figura 28: Resultado da análise estática termoelástica. ....	73
Figura 29: Resultado da análise dinâmica. ....	73
Figura 30: Região onde ocorre a falha no Suporte. ....	77
Figura 31: Marcas de praia. ....	77
Figura 32: Marcas de catraca. ....	77
Figura 33: Região onde ocorre a falha no suporte com material S260, amostra 1.....	80
Figura 34: Marcas de catraca, material S260NC, amostra 1, região A. ....	80
Figura 35: Marcas de catraca, material S260NC, amostra 1, região B.....	80
Figura 36: Região onde ocorre a falha no suporte com material S260, amostra 2.....	81
Figura 37: Marcas de catraca, material S260NC, amostra 2, região A. ....	81
Figura 38: Marcas de catraca, material S260NC, amostra 2, região B.....	81
Figura 39: Região onde ocorre a falha no suporte com material S260, amostra 3.....	82
Figura 40: Marcas de catraca, material S260NC, amostra 3, região A. ....	82
Figura 41: Marcas de catraca, material S260NC, amostra 3, região B.....	82
Figura 42: Suporte sem falha com material S700MC, amostra 01.....	83
Figura 43: Região onde ocorre a falha no suporte com material S700MC, amostra 2.....	83
Figura 44: Marcas de catraca, material S700MC, amostra 2, região A.....	84
Figura 45: Marcas de catraca, material S700MC, amostra 2, região B. ....	84
Gráfico 1: Função senoidal.....	23
Gráfico 2: Tensão flutuante. ....	24
Gráfico 3: Tensão pulsante. ....	24
Gráfico 4: Tensão totalmente invertida. ....	24
Gráfico 5: Efeito da concentração de tensões na resistência à fadiga em chapas de aço. ....	26
Gráfico 6: Exemplo de diagrama de curva S-N.....	28
Gráfico 7: Sensibilidade ao entalhe, q, para tração e flexão.....	33
Gráfico 8: Sensibilidade ao entalhe, q, para torção .....	33
Gráfico 9: Limites de resistência à fadiga contra o limite de ruptura .....	35
Gráfico 10: Carregamentos dinâmicos na direção “x”. ....	58
Gráfico 11: Carregamentos dinâmicos na direção “y”. ....	59
Gráfico 12: Carregamentos dinâmicos na direção “z”. ....	59

**LISTA DE MICROGRAFIAS**

Micrografia 1: Microestrutura do material S260NC – 100x .....	74
Micrografia 2: Microestrutura do material S260NC – 400x .....	74
Micrografia 3: Microestrutura do material S700MC – 100x.....	75
Micrografia 4: Microestrutura do material S700MC – 400x.....	75

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Fator de acabamento superficial. ....	29
Tabela 2: Influência da temperatura na tensão de ruptura de um aço. ....	31
Tabela 3: Fatores de confiança para 8% de desvio padrão no limite de resistência a fadiga. ....	32
Tabela 4: Composição química de norma dos Aços S260NC e S700MC. ....	51
Tabela 5: Propriedades mecânicas dos materiais utilizados no conjunto analisado. ....	52
Tabela 6: Rigezas consideradas nos coxins do motor e do câmbio. ....	53
Tabela 7: Temperaturas medidas no conjunto do motor na bancada. ....	57
Tabela 8: Resultado da Análise Modal. ....	69
Tabela 9: Resumos dos resultados das análises estáticas e dinâmica. ....	70
Tabela 10: Resumos dos resultados das análises estáticas e dinâmica. ....	72
Tabela 11: Análise da Composição química em laboratório dos Aços S260NC e S700MC. ....	76
Tabela 12: Diferença entre composição química de norma e analisada em laboratório dos Aços S260NC e S700MC. ....	76
Tabela 13: Número de ciclos (Nf) calculado para os materiais S260NC e S700MC. ....	78
Tabela 14: Número de ciclos (Nf), limite de fadiga experimental e diferença em porcentagem dos limites de fadiga calculado e experimental para os materiais S260NC e S700MC. ....	79

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
1.1 OBJETIVO GERAL.....	17
1.2 OBJETIVO ESPECÍFICO.....	17
1.3 JUSTIFICATIVA .....	18
1.4 DESCRIÇÃO DO TRABALHO .....	19
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>21</b>
2.1 CONCEITOS DE TENSÃO E DEFORMAÇÃO .....	21
2.2 CONCEITOS DE FADIGA .....	22
<b>2.2.1 Tensões variáveis .....</b>	<b>23</b>
<b>2.2.2 Métodos para vida em fadiga .....</b>	<b>26</b>
<b>2.2.3 A curva Stress-Life .....</b>	<b>27</b>
<b>2.2.4 Cálculo do limite de resistência a fadiga .....</b>	<b>29</b>
2.2.4.1 Fator acabamento superficial ( $k_a$ ).....	29
2.2.4.2 Fator de escala ( $k_b$ ) .....	30
2.2.4.3 Fator de carga ( $k_c$ ) .....	30
2.2.4.4 Fator de temperatura ( $k_d$ ).....	30
2.2.4.5 Fator de confiança ( $k_e$ ).....	31
2.2.4.6 Fator de efeitos diversos ( $k_f$ ) .....	32
2.2.4.7 Limite de resistência à fadiga $\sigma_{Fad}$ .....	34
<b>2.2.5 Cálculo do número de ciclos .....</b>	<b>35</b>
2.3 MECANISMOS DE FALHA.....	35
2.4 CONCEITOS DE ELEMENTOS FINITOS .....	37
<b>2.4.1 Computer Aided Engineering (CAE) .....</b>	<b>37</b>
<b>2.4.2 Objetivos do método.....</b>	<b>39</b>
<b>2.4.3 Tipos de análise.....</b>	<b>39</b>
<b>2.4.4 Fundamentos do MEF.....</b>	<b>40</b>
<b>2.4.5 Princípio dos trabalhos virtuais .....</b>	<b>41</b>
<b>2.4.6 Elementos sólidos tridimensionais .....</b>	<b>43</b>
2.5 METALOGRAFIA.....	47
<b>2.5.1 Microscopia Ótica.....</b>	<b>50</b>
<b>2.5.2 Macroscopia .....</b>	<b>50</b>
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>51</b>

3.1 MATERIAIS .....	51
3.2 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS .....	53
<b>3.2.1 Ferramentas Computacionais .....</b>	<b>53</b>
<b>3.2.2 Condições de contorno .....</b>	<b>53</b>
<b>3.2.3 Carregamentos utilizados .....</b>	<b>55</b>
<b>3.2.4 Critérios adotados .....</b>	<b>59</b>
3.3 MÉTODOS EXPERIMENTAIS .....	60
<b>3.3.1 Ensaio de Fadiga .....</b>	<b>60</b>
<b>3.3.2 Metalografia Óptica .....</b>	<b>64</b>
<b>3.3.3 Ensaio de Dureza .....</b>	<b>65</b>
<b>3.3.4 Análise química.....</b>	<b>67</b>
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>69</b>
<b>5 CONCLUSÕES.....</b>	<b>85</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>87</b>
<b>APÊNDICES .....</b>	<b>89</b>
APÊNDICE A – Desenho do Suporte Inferior do dispositivo de fadiga fabricado para o ensaio de fadiga. ....	89
APÊNDICE B – Desenho do Suporte Superior do dispositivo de fadiga fabricado para o ensaio de fadiga. ....	90
APÊNDICE C – Desenho do Conjunto do dispositivo de fadiga fabricado para o ensaio de fadiga. ....	91

## 1 INTRODUÇÃO

No processo de desenvolvimento de um motor à diesel, visa-se rendimento, economia e responsabilidade ecológica. Na atual condição econômica e crescimento do país, os fabricantes de caminhões procuram atender a alta demanda com dinamismo e aplicabilidade em um mesmo motor para diferentes potências, alterando-se alguns componentes como turbina, dutos de ar, sistema de arrefecimento do ar de admissão, entre outros.

Entretanto, com a elevação da potência, os carregamentos a que são submetidos os suportes, são amplificados. Isto contribui para a redução da vida útil do suporte. Evitar a falha devido às novas condições de trabalho motiva o estudo dos componentes estruturais.

O suporte do tubo de admissão de ar dos motores diesel de veículos comerciais tem a importante função estrutural de sustentar o tubo de admissão de ar, fixado no conjunto da turbina e no intercooler pelo tubo de admissão de ar. A falha do tubo ou da turbina impossibilitaria o funcionamento do motor. O suporte tem também a função de reduzir deslocamentos impostos na turbina pelas vibrações do motor, que podem causar danos à estrutura do conjunto mencionado.

O material utilizado na fabricação do suporte do tubo de admissão de ar é o aço laminado a quente, conforme norma DIN EN 10149.1.0971. A tensão de escoamento desse aço estrutural é da ordem de 240 [MPa], e possui características semelhantes aos demais aços estruturais, como coeficiente de Poisson igual a 0,30, módulo de elasticidade igual a 208.000 [MPa] e densidade  $7,85 \times 10^{-9}$  [t/mm<sup>3</sup>]. O suporte em questão é composto de duas chapas dobradas de 3 [mm], para que haja um efeito mola, e é fixo por dois parafusos. Um parafuso é fixado na tubulação de água que circula no motor e o outro no próprio tubo de admissão de ar. Movimentos de grandes amplitudes no tubo de admissão de ar podem causar a quebra do mesmo, e num cenário mais agressivo, a quebra do conjunto de turbinas onde o tubo de admissão é conectado. A peça é composta por três regiões distintas: (a) região de fixação no tubo de água, (b) região de fixação do tubo de admissão de ar, e (c) região conformada, conforme apresentado Figura 1. A Figura 2 mostra a representação gráfica do posicionamento do suporte no motor diesel de um veículo comercial. A Figura 3 mostra o modelo em elementos finitos do suporte do tubo de admissão de ar utilizado. Foram utilizados elementos do tipo sólido hexaédrico, com arestas de 1,50 [mm].

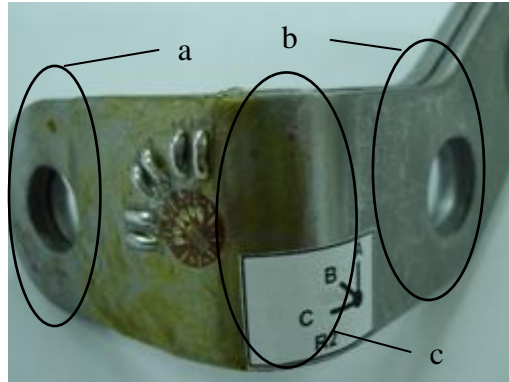


Figura 1: Suporte do tubo de admissão de ar – Modelo Físico.  
Fonte: (O&M Fabricante de Motores Brasil, 2011)

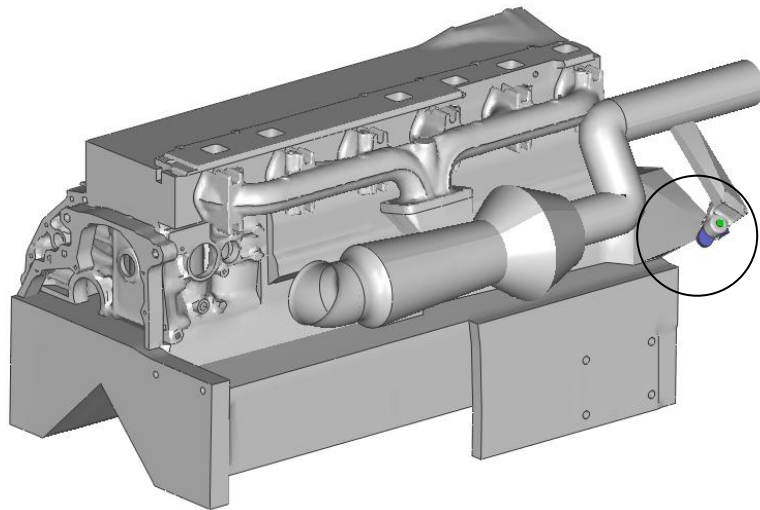


Figura 2: Posicionamento da peça no motor diesel.  
Fonte: (O&M Fabricante de Motores Brasil, 2011)

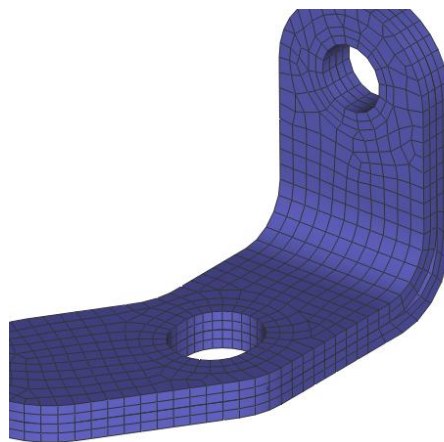


Figura 3: Suporte do Tubo de Admissão de Ar – Modelo de Elementos finitos.  
Fonte: (O&M Fabricante de Motores Brasil, 2011)



A região conformada do suporte em estudo é uma região que apesar de concentradora de tensões, não havia apresentado falhas nos últimos anos, porém, devido às novas condições de trabalho do motor, começou a apresentar falha. Portanto, estudam-se os mecanismos de falha do suporte e uma forma de evitar que a mesma ocorra.

Um estudo de mudança da geometria da peça não é desejável, pois implicaria em alterar outras peças do motor onde o suporte é fixado, o que alterariam os processos de fabricação e montagem do motor. Entendem-se tais modificações como sendo de engenharia e manufatura mais complexas técnica e financeiramente. A sugestão proposta no presente trabalho é alteração do material para outro que possa atender as condições mais agressivas provocadas pelo motor diesel dos veículos comerciais atuais, por exemplo, aços com propriedades mecânicas semelhantes, mas com limites de escoamento superiores, tenacidade e ductilidade superiores, de forma a atender os requisitos de projeto.

## 1.1 OBJETIVO GERAL

Neste trabalho, pretende-se verificar o comportamento mecânico do suporte do tubo de admissão de ar do motor diesel de veículos pesados e avaliar as regiões com concentrações de tensões, por meio de análise modal, análises estáticas de pressão e termoelástica e análise dinâmica pelo método dos elementos finitos, identificando seus mecanismos de falha para o aço laminado a quente atualmente utilizado (S260NC) e para o aço proposto para evitar a falha (S700MC).

## 1.2 OBJETIVO ESPECÍFICO

O objetivo específico deste trabalho é correlacionar os dados obtidos pelo método numérico e mecanismo de falha identificado, com os dados obtidos experimentalmente por meio de ensaios de dureza, composição química, microestrutura, microscopia ótica, fractografia e ensaio de fadiga para comparação do número de ciclos experimental com o analítico.

Como resultado deste trabalho, pretende-se investigar um material que tenha propriedades mecânicas semelhantes, mas com uma composição química em sua liga que resulte em maior tenacidade e ductilidade, de forma a diminuir a concentração de tensões, e evitar a falha no suporte em estudo.

### 1.3 JUSTIFICATIVA

Na indústria moderna é maior a responsabilidade na previsão de falha estrutural. As rígidas normas de segurança do setor automotivo excluem a previsão baseada apenas na experiência de funcionamento. Processos de fabricação mais baratos, substituição ou redução dos materiais utilizados e engenharia são mandatórios para manter-se competitivo nesse mercado.

O estudo dos mecanismos de falha em componentes mecânicos estruturais é uma área muito interessante da engenharia. Muitos trabalhos de pesquisa foram, e ainda são desenvolvidos nessa área de pesquisa. Embora existam métodos bem estabelecidos para o dimensionamento de componentes neste setor, a natureza complexa dos mecanismos de falha dos componentes mecânicos, e insuficientes fundamentos teóricos das hipóteses determina a necessidade de estudos aprofundados para peças de relevância estrutural no veículo (PASTOUKHOV, VOORWALD, 1995).

O método de estudo do número de ciclos à fadiga mostra-se adequado para prever falhas estruturais em componentes metálicos sujeitos a tensões abaixo do limite de escoamento do material, onde não há plastificação do material. (SHIGLEY, 2006).

Com a crescente disponibilidade de programas computacionais de engenharia e de computadores com alto poder de processamento, é possível se determinar com velocidade, e a preços mais acessíveis que métodos experimentais complexos, o comportamento mecânico das peças. Porém, é necessário que o engenheiro saiba lidar com os cálculos da forma tradicional, para estar preparado para trabalhar com os resultados obtidos computacionalmente. Se um engenheiro não sabe modelar o problema sem o computador, não deve fazê-lo com o computador. (ALVES, 2006).

Partindo dos objetivos propostos, espera-se que as realizações das análises, por meio de modelagens através do método dos elementos finitos, permitam obter o comportamento da peça para um material que se mostre adequado aos carregamentos mecânicos adotados. Correlacionar os dados experimentais com os obtidos numericamente ainda é um desafio a ser vencido no campo de pesquisa da área estrutural. É de interesse da indústria que seja respondida por que a trinca ocasionada por fadiga se inicia, quando a tensão aplicada está abaixo da tensão última do componente (MADDOX, 1991).

## 1.4 DESCRIÇÃO DO TRABALHO

O trabalho é desenvolvido em duas partes. Na primeira é realizada uma revisão bibliográfica em livros, periódicos, anais de congressos, entre outras publicações científicas. Na segunda parte são realizadas as pesquisas experimentais por meio de simulações numéricas e ensaios laboratoriais.

O trabalho é dividido em 5 capítulos. O capítulo 1 apresenta a introdução para posicionamento ao tema, objetivos propostos, relevância e justificativa do estudo, assim a descrição do trabalho.

O capítulo 2 apresenta uma relação de conceitos de tensões e deformações, fratura frágil e dúctil, fadiga, métodos de determinação das tensões e deformações. Descreve os principais fatores que devem ser levados em consideração em um projeto estrutural de um suporte de tubo de ar de motores diesel de veículos pesados, e como estes influenciam o projeto quanto à segurança, custo e vida da peça do estudo e seus possíveis mecanismos de falha. Para isso, é realizado amplo levantamento bibliográfico por meio de consultas em livros, artigos, revistas científicas e sítios da internet, para obtenção de parâmetros, dados teóricos e normas que auxiliam nas análises dos resultados experimentais.

No capítulo 3 são apresentados os materiais e métodos. Nestes, destaca-se a modelagem do suporte do tubo de admissão de ar de motores diesel de veículos pesados, seus componentes adjacentes como tubo de ar, tubo de água, conjunto das turbinas, coxins e demais componentes do motor. São apresentados os carregamentos utilizados nas análises pelo método dos elementos finitos os quais a peça é submetida, como a pressão no bocal do tubo de ar, temperatura e carregamento dinâmico de acelerações, e as condições de contorno do modelo matemático. Apresenta-se os tipos de elementos finitos utilizados para o suporte em estudo, metodologia, ferramentas computacionais e critérios adotados.

São apresentados os ensaios experimentais realizados para os materiais utilizados no estudo de caso, e os procedimentos de realização dos ensaios, como o ensaio de fadiga no suporte do tubo de admissão de ar dos motores diesel de veículos pesados. São apresentados também neste capítulo os ensaios para a caracterização dos materiais para determinação da composição química da liga. As simulações foram realizadas na T-Systems do Brasil Ltda.. Os ensaios de fadiga foram realizados no Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT). Demais ensaios foram realizados nos laboratórios TORC.

O capítulo 4 apresenta os resultados e discussões para o método numérico e dos ensaios experimentais do capítulo 3, relacionando-os e avaliando se as propriedades mecânicas do material proposto serão satisfatórias para atender as condições de trabalho que o suporte está submetido.

Por último, no capítulo 5, são apresentadas as conclusões e recomendações do estudo realizado.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são abordados aspectos gerais sobre conceitos de tensões e deformações, conceitos de fadiga e dos ensaios experimentais realizados neste trabalho. Também serão apresentados os métodos numéricos para determinação de tensões e deformações por meio do método dos elementos finitos e o mecanismo de falha os quais a peça em estudo está sujeita pelos carregamentos considerados.

### 2.1 CONCEITOS DE TENSÃO E DEFORMAÇÃO

BEER e JOHNSTON (1982), introduziram os conceitos de tensões e tensões últimas, assim como tantos outros conceitos de engenharia como torção, flexão pura, análises de tensões e deformações, e explicam dentro das aplicações de engenharia, que a determinação das tensões não é o objetivo final, mas um passo necessário do desenvolvimento de dois importantes estudos:

- A análise de estruturas e máquinas, como o objetivo de prever seu comportamento sob condições de cargas especificadas;
- O projeto de novas máquinas e estruturas, que deverão cumprir determinadas funções de maneira segura e econômica.

Para tanto, deve-se saber como o material será usado e quais as condições de carregamentos ele vai trabalhar. Para cada material podemos preparar corpos de prova de ação e levá-los a máquinas de testes em laboratório. A peça estrutural estudada deverá ser projetada de maneira que a carga de ruptura seja consideravelmente maior que os carregamentos envolvidos.

Os autores ainda explicam que muitos outros fatores devem ser considerados para que o projeto demonstre-se adequado como, por exemplo, as modificações que ocorrem no material. A composição, a resistência e as dimensões do material, estão sujeitas a variações durante o processo de fabricação. Tensões residuais também podem ocorrer, devido a deformações e variações de temperatura.

O número de vezes que a carga é aplicada durante a vida da peça pode levar a um decréscimo da tensão última, é o processo conhecido como fadiga, e também deverá ser levado em conta, ou poderá ocorrer ruptura brusca. Deve-se considerar o tipo de ruptura para o material da peça. Materiais frágeis apresentam ruptura repentina, já os materiais dúcteis como o aço estrutural, apresentam grande deformação, o escoamento, antes de ocorrer a

ruptura. Outro importante fator é a deterioração que irá ocorrer na peça devido à falta de manutenção e pelas intempéries, onde a decomposição do material ou a ferrugem, difíceis de prever devem ser considerados, portanto deve-se usar um coeficiente de segurança alto, dados todos esses fatores de projeto e a importância estrutural da peça.

Os procedimentos de testes descritos pelos autores motivam a estudar de maneira experimental e pelo método de cálculos os materiais utilizados no estudo de caso.

## 2.2 CONCEITOS DE FADIGA

O comportamento de uma peça sujeita a uma solicitação variável é substancialmente diferente de quando sujeita a uma carga estática. Em se tratando de carregamento variável, verifica-se experimentalmente que a resistência da peça decai para valores consideravelmente inferiores à tensão de ruptura e de escoamento ( $\sigma_{rup}$  e  $\sigma_{esc}$ ).

Este fenômeno é chamado de “fadiga do material” e a eventual consequente falha é chamada de “fratura por fadiga”.

O caso mais típico de uma fratura por fadiga é o da falha do componente quando solicitado por uma força transversal constante, que por via do seu movimento de rotação, fica sujeito a fadiga. A Figura 4 apresenta um esquema de uma peça circular bi-apoiada, com movimento de rotação e carregamento de uma força transversal. A Figura 5 apresenta as marcas deixadas por um processo de fratura por fadiga.

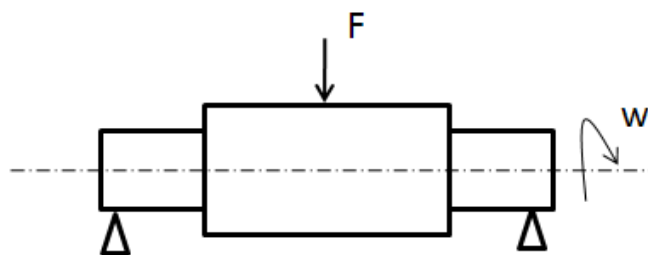


Figura 4: Esquema de uma peça circular bi-apoiada com movimento de rotação e carregamento transversal.

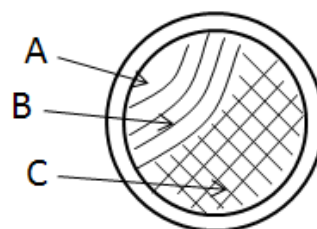


Figura 5: Processo de fratura por fadiga.

Onde:

A – Iniciação – A fratura por fadiga começa com a nucleação de uma pequena fissura microscópica, em regra ocorrida numa zona de concentração de tensões (transição de seções transversais, entalhes e furos).

B – Propagação da trinca – A partir do defeito inicial, a fissura progride gradualmente, ciclo após ciclo de carregamento.

C – Fratura final – Normalmente apresenta-se rugosa.

### 2.2.1 Tensões variáveis

Considera-se por simplicidade uma função sinusoidal. O Gráfico 1 apresenta uma função sinusoidal.

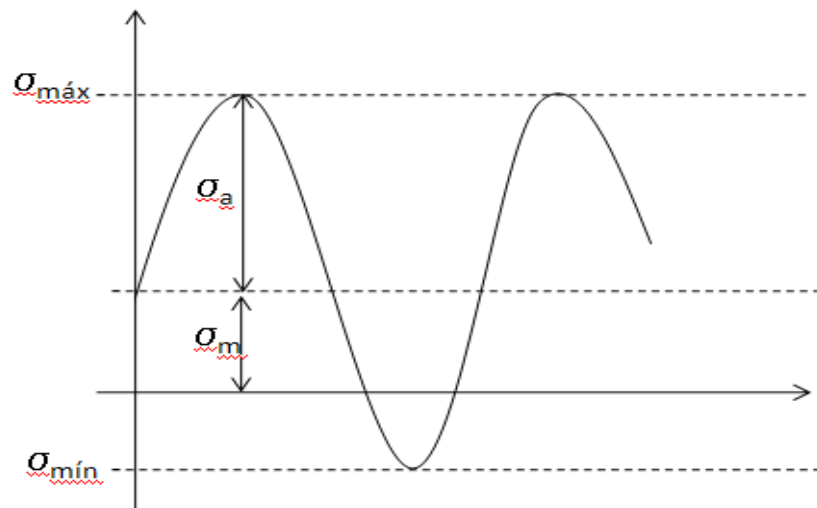


Gráfico 1: Função senoidal.

Onde:

$$\sigma_{\text{máx}} - \text{Tensão Máxima}; \quad (1)$$

$$\sigma_{\text{mín}} - \text{Tensão mínima}; \quad (2)$$

$$\sigma_{\text{máx}} - \sigma_{\text{mín}} - \text{Intervalo de tensões}; \quad (3)$$

$$R = \frac{\sigma_{\text{máx}}}{\sigma_{\text{mín}}} - \text{Razão de tensões}; \quad (4)$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\text{máx}} - \sigma_{\text{mín}}}{2} - \text{Tensão alternada}; \quad (5)$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\text{máx}} + \sigma_{\text{mín}}}{2} - \text{Tensão média}. \quad (6)$$

SHIGLEY (2006), apresenta algumas relações entre tensões alternadas e tempo. A tensão alternada flutuante ocorre quando os sinais de tensão máxima e mínima são ambos positivos ou negativos. A tensão alternada pulsante ocorre quando o sinal de tensão máxima é positivo e o mínimo é igual a zero. A tensão alternada totalmente invertida ocorre quando a diferença entra a tensão máxima e a mínima é nula. O Gráfico 2 apresenta a tensão flutuante, o Gráfico 3 apresenta a tensão pulsante e o Gráfico 4 apresenta a tensão totalmente invertida.

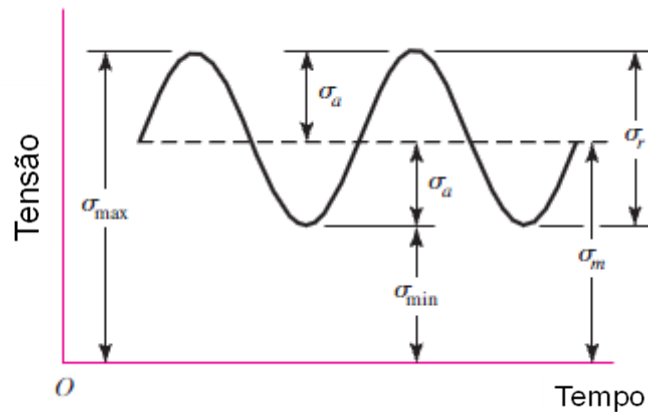


Gráfico 2: Tensão flutuante.  
Fonte: (Shigley, 2006).

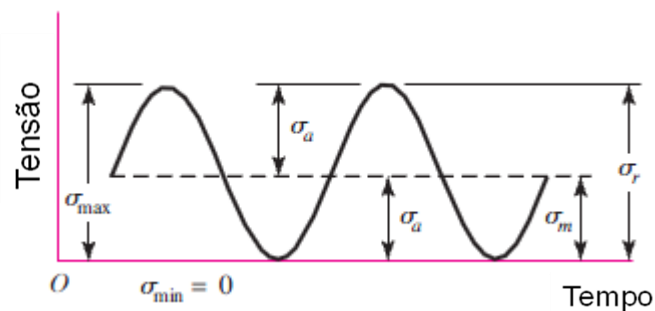


Gráfico 3: Tensão pulsante.  
Fonte: (Shigley, 2006).

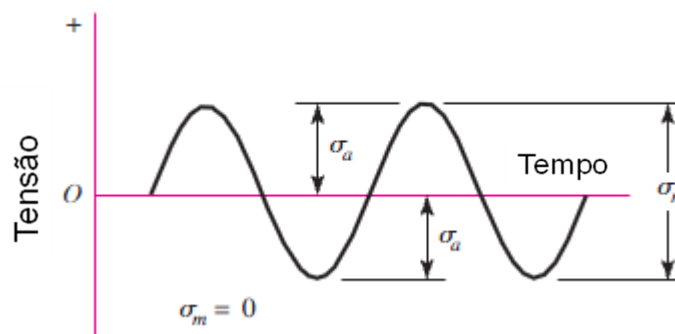


Gráfico 4: Tensão totalmente invertida.  
Fonte: (Shigley, 2006).



MADDOX (1991), apresentou uma questão ainda não respondida sobre porque a trinca ocasionada por fadiga se inicia, quando a tensão aplicada está abaixo da tensão última do componente. A resposta apóia-se na concentração de tensões. Qualquer descontinuidade em uma peça sujeita a tensões apresenta concentração de tensões, na região onde, localmente, as tensões são aumentadas acima de média. Esse efeito pode ser visualizado em termos distribuição e fluxo de tensão, em placas onde haja descontinuidades, um furo, ou um chanfro, conforme apresentado na Figura 6.

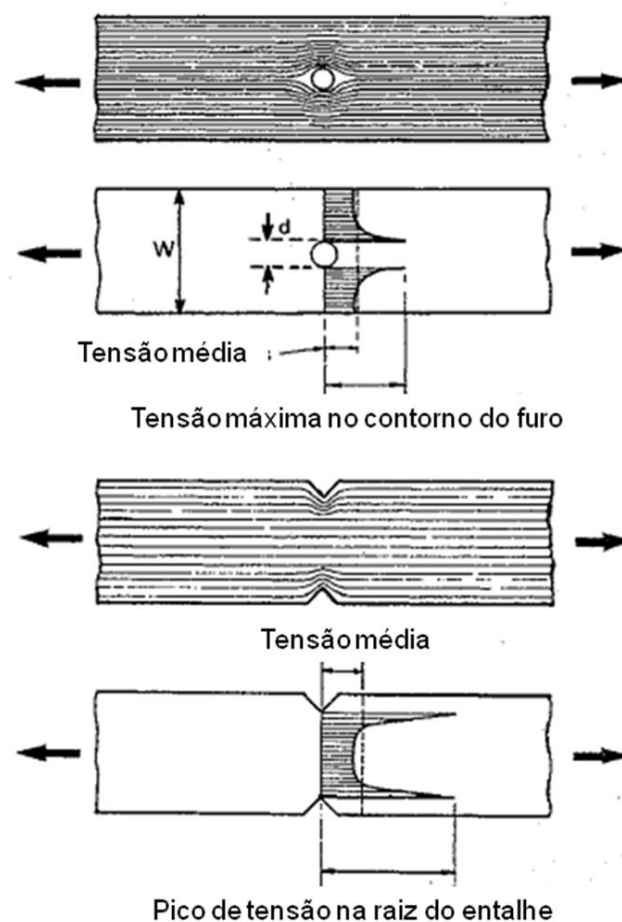


Figura 6: Distribuição da Concentração de Tensões.  
Fonte: (Maddox, 2011).

A Figura 6 mostra que as tensões não são uniformemente distribuídas como nas chapas sem furos ou chanfros. A existência dessa concentração de tensões pode ser demonstrada por cálculos ou experimentalmente. Por exemplo, o pico de tensão no entorno de um furo em uma chapa pode chegar em média a três vezes o valor das tensões da área da seção transversal da chapa (conforme valores de  $W$  e  $d$ ), o que apresenta um fator intensificador de tensões  $K_t=3,0$ .

O efeito desse tipo de concentração de tensões, na resistência a fadiga de chapas de aço é apresentado nas curvas S-N para chapas lisas, com furo, e chanfro em V no Gráfico 5.

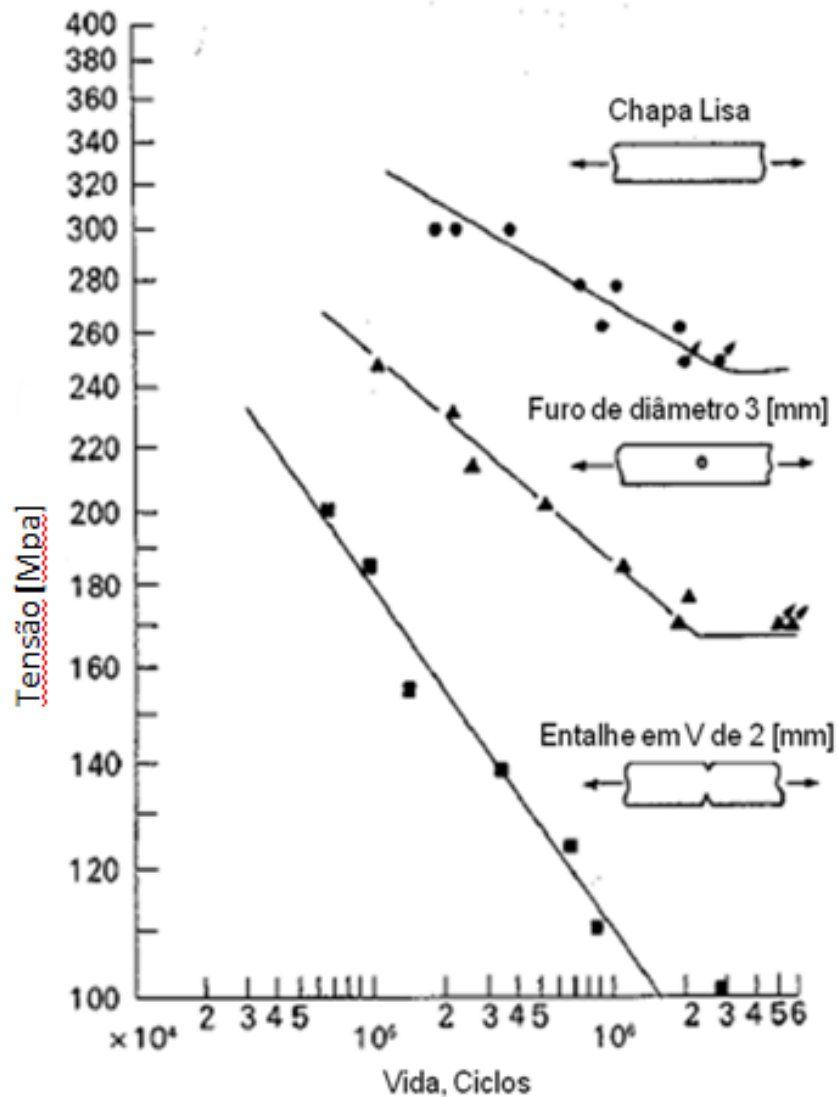


Gráfico 5: Efeito da concentração de tensões na resistência à fadiga em chapas de aço.  
Fonte: (Maddox, 2011).

### 2.2.2 Métodos para vida em fadiga

Os três principais métodos utilizados no projeto e análise de vida em fadiga são o método *stress-life*, o método de *strain-life*, e o método da fratura mecânica linear-elástica. Estes métodos são uma tentativa de prever a vida de um determinado componente em número de ciclos até que a falha ocorra ( $N$ ), para um nível específico de carga. A vida de um componente com  $1 \leq N \leq 10^3$  ciclos é geralmente classificada como fadiga de baixo ciclo, enquanto o alto ciclo é considerado quando  $N > 10^3$  ciclos. O método *stress-life* baseia-se

apenas em níveis de tensão, e é a abordagem menos precisa, especialmente para aplicações de baixo ciclo. No entanto, é o método mais tradicional, uma vez que é mais fácil de implementar para uma ampla gama de aplicações de design, tem um amplo suporte de dados, e representa a vida em fadiga para alto ciclo de forma adequada.

O método *strain-life* envolve a análise mais detalhada da deformação plástica em regiões localizadas onde as tensões e as deformações são consideradas para a estimativa da vida. Este método é especialmente bom para aplicações de ciclo de baixa fadiga. Ao aplicar este método, diversas idealizações devem ser compostas, e, portanto, algumas incertezas existirão nos resultados. Por esta razão, é apenas apresentada por causa do seu valor para compreensão da natureza da fadiga.

O método da mecânica da fratura assume que uma rachadura já está presente e detectada. Esta é então utilizada para prever o crescimento da trinca em relação à intensidade da tensão. É mais prático quando aplicado a grandes estruturas em conjunto com códigos computacionais e uma um programa de inspeção periódico.

### 2.2.3 A curva Stress-Life

A curva Stress-Life, também chamada de curva S-N [S do inglês Stress (Tensão) e N do inglês *number* (Número) para o número de ciclos para a vida em fadiga], é o modo mais rápido para a apresentação dos resultados do ensaio de fadiga. Nessa curva, o número N (ou  $\log N$ ) é colocado no eixo das abscissas. No eixo das ordenadas vai a tensão máxima  $S_{m\acute{a}x}$ , que também pode vir a ser expressa por meio de logaritmo. A escala logarítmica facilita a comparação de dados, pois fornece curvas de vários materiais com a mesma forma, além de diminuir a escala de N.

Conforme SOUZA (1982), as tensões mais comumente aplicadas pelas máquinas de ensaio de fadiga são do tipo flexão rotativa, torção ou tração-compressão. Para tensões conjugadas, poucas determinações foram realizadas. Todas as máquinas de fadiga interrompem seu funcionamento no mesmo instante em que ocorre a ruptura do corpo de prova. O Gráfico 6 apresenta um exemplo de diagrama de curva S-N para um aço normalizado UNS G41300.

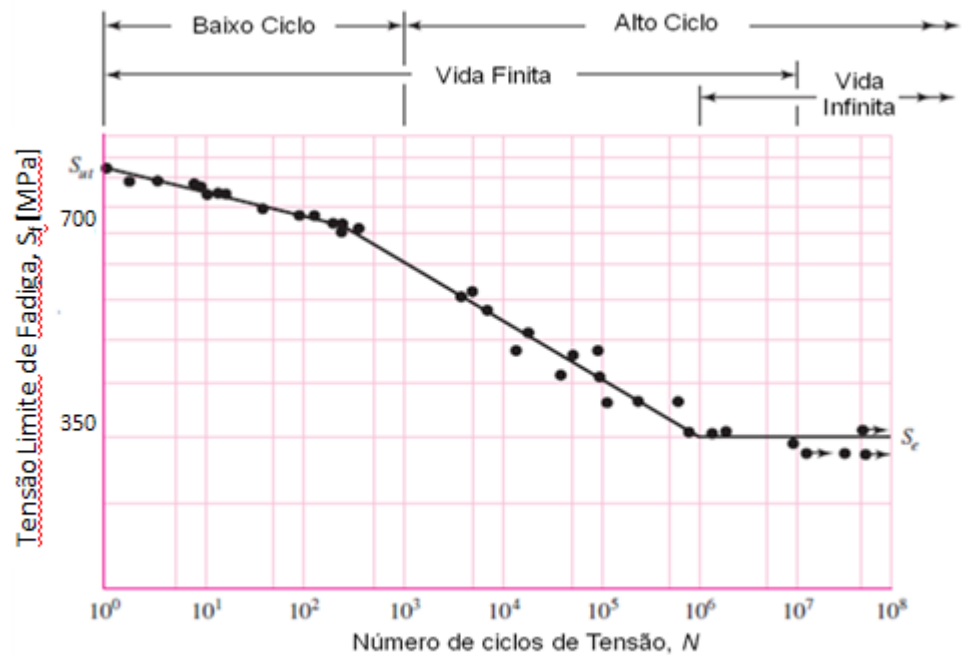


Gráfico 6: Exemplo de diagrama de curva S-N.  
Fonte: (Shigley, 2006).

Como uma ruptura por fadiga depende de inúmeros fatores, e para se traçar um diagrama S-N é necessário uma quantidade muito grande de corpos de prova, a curva S-N pode ser traçada como uma curva média de diversos pontos ou mesmo uma faixa que englobe todos os pontos espalhados. Os pontos são determinados pela tensão máxima aplicada no corpo de prova correspondente e pelo número,  $N$ , de ciclos suportados até a fratura do corpo de prova.

Inicialmente, escolhe-se uma tensão máxima ( $\sigma_{\text{máx}}$ ) alta, onde se espera que a fratura do corpo de prova aconteça num número de ciclos  $N$  baixo. Geralmente, para os aços, essa tensão é  $2/3$  do limite de resistência do material à tração. Diminui-se progressivamente para os demais corpos de prova, sempre usando a mesma velocidade de rotação até que se atinja um  $\sigma_{\text{máx}}$  onde não haja a ruptura do corpo de prova depois de atingir um número  $N$  especificado conforme o material. Conseguida essa tensão máxima sem ruptura, aumenta-se a tensão gradativamente nos demais corpos de prova até conseguir a máxima tensão correspondente ao patamar, que será o limite de fadiga  $S_n$  do material. Os corpos de prova deverão ser todos os mais idênticos possíveis e a sua quantidade é variável para a determinação de  $S_n$ , mesmo porque, o ensaio deve ser repetido sempre que o resultado for duvidoso, ou para se ter uma média do valor do limite de fadiga. Em geral, deve-se fornecer também os valores de tensão média  $\sigma_m$  e de tensão mínima  $\sigma_{\text{mín}}$ .

### 2.2.4 Cálculo do limite de resistência a fadiga

A curva S-N dos materiais, refere-se a ensaios controlados feitos em laboratório, e consideram condições específicas. A real resistência a fadiga de um material, deve ser calculada, levando em consideração as condições específicas a que estão sujeitas. O limite de fadiga do material pode ser calculado segundo a equação e os fatores de modificação para o limite de resistência de um aço, conforme MARIN (1962).

$$\sigma_{\text{Fad}} = k_a \cdot k_b \cdot k_c \cdot k_d \cdot k_e \cdot k_f \cdot (\sigma_{\text{Esc}} \times 0,5) \quad (7)$$

Equação de Marin para o limite de fadiga de um aço.

Onde:

$k_a$  = fator de acabamento superficial;

$k_b$  = fator de escala;

$k_c$  = fator de carregamento;

$k_d$  = fator de temperatura;

$k_e$  = fator de confiança;

$k_f$  = fator de efeitos diversos;

$\sigma_{\text{Fad}}$  = Limite de fadiga em uma região crítica de uma peça mecânica para determinada geometria e condição de uso.

#### 2.2.4.1 Fator acabamento superficial ( $k_a$ )

Este fator leva em consideração o acabamento superficial e o nível de resistência da peça em estudo, ou seja, sua tensão limite de ruptura ( $\sigma_{\text{Rup}}$ ). A equação apresentada por SHIGLEY (2006) para o cálculo deste fator é:

$$k_a = a \cdot \sigma_{\text{Rup}}^b \quad (8)$$

A Tabela 1 apresenta o fator de acabamento superficial para diferentes tipos de superfície.

Tabela 1: Fator de acabamento superficial.

Tipo de Superfície	Fator a [MPa]	Expoente b
Retificada	1,58	-0,085
Usinada/Laminada a Frio	4,51	-0,265
Laminado a quente	57,7	-0,718
Forjada	272	-0,995

#### 2.2.4.2 Fator de escala ( $k_b$ )

O fator de escala leva em consideração as dimensões da peça analisada, caso esteja sujeita a carregamentos de flexão e de torção. Neste caso o fator pode ser expresso por:

- $k_b = 1,24 d^{-0.107}$  para peças com diâmetro ( $d$ ) entre:  $2,79 \leq d \leq 51,00$  [mm];
- $k_b = 1,51 d^{-0.157}$  para peças com diâmetro ( $d$ ) entre:  $51 < d \leq 254$  mm;

Para peças sujeitas a carregamentos axiais, o fator de escala não é considerado:

- $k_b = 1,00$  e deve-se observar  $k_c$ .

#### 2.2.4.3 Fator de carga ( $k_c$ )

O fator de carga leva em consideração o tipo de carregamento o qual a peça está sujeita:

- $k_c = 1,00$  - para peças sujeitas a carregamento de flexão;
- $k_c = 0,85$  - para peças sujeitas a carregamento axial;
- $k_c = 0,59$  - para peças sujeitas a carregamento de torção.

#### 2.2.4.4 Fator de temperatura ( $k_d$ )

Quando a temperatura de operação está abaixo da temperatura ambiente, há a possibilidade de fratura frágil, esta deve ser investigada em primeiro lugar. Quando a temperatura de operação é mais elevada que a temperatura ambiente, o escoamento deve ser investigado em primeiro lugar, pois a tensão de escoamento do material reduz drasticamente com o aumento da temperatura e qualquer tensão pode levar o material a sofrer fluência a altas temperaturas.

SHIGLEY (2006), afirma que pode ser verdade que não há nenhum limite de fadiga para materiais que operam a temperaturas elevadas. Devido à resistência à fadiga reduzida, o processo falha é, até certo ponto, dependente do tempo. A quantidade limitada de dados disponíveis mostra que o limite de resistência para o aço aumenta ligeiramente à medida que a temperatura sobe, e depois começa a cair na faixa de 200 a 400 [°C]. Por esta razão é provavelmente verdade que o limite de resistência à fadiga está relacionado com resistência de ruptura à tração a temperaturas elevadas da mesma maneira como à temperatura

ambiente. Parece bastante lógico, portanto, empregar as mesmas relações de prever limite de resistência à fadiga a temperaturas elevadas com as utilizadas à temperatura ambiente, pelo menos até que os dados mais abrangentes se tornem disponíveis. Esta prática ao menos fornece um padrão útil contra o qual o desempenho de vários materiais podem ser comparados.

O fator  $k_d$  pode ser expresso pela equação:

$$k_d = \sigma_T / \sigma_{RT} \quad (9)$$

Onde:

$\sigma_T$  = Tensão de ruptura a temperatura de operação;

$\sigma_{RT}$  = Tensão de ruptura a temperatura ambiente.

A Tabela 2 apresenta a influência da temperatura na tensão de ruptura de um aço.

Tabela 2: Influência da temperatura na tensão de ruptura de um aço.

Temperatura [°C]	$\sigma_T / \sigma_{RT}$
20	1,000
50	1,010
100	1,020
150	1,025
200	1,020
250	1,000
300	0,975
350	0,943
400	0,900
450	0,843
500	0,768
550	0,672
600	0,549

#### 2.2.4.5 Fator de confiança ( $k_e$ )

Os dados apresentados por desvios HAUGEN e WIRCHING (1975) mostram que o desvio padrão do limite de resistência a fadiga são de 8%. Assim, o fator de confiança pode ser escrita como:

$$k_e = 1 - 0,08 z_a \quad (10)$$

Onde  $z_a$  representa variáveis de transformação Gaussiana. Essa equação permite determinar valores para o fator de confiabilidade conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3: Fatores de confiança para 8% de desvio padrão no limite de resistência a fadiga.

Confiabilidade [%]	Variável de transformação $z_a$	Fator de confiança $k_e$
50	0	1,000
90	1,288	0,897
95	1,645	0,868
99	2,326	0,814
99,9	3,091	0,753
99,99	3,719	0,702
99,999	4,265	0,659
99,9999	4,753	0,620

#### 2.2.4.6 Fator de efeitos diversos ( $k_f$ )

Embora o fator de  $k_f$  leve em conta o fator de concentração de tensões para a redução do limite de resistência à fadiga, deve-se lembrar que diversos efeitos como corrosão e tensões residuais devem ser contabilizados, pois os valores reais de  $k_f$  nem sempre estão disponíveis.

O fator de concentração de tensões ( $k_t$ ) usado para o cálculo de fadiga não é só função da geometria do entalhe, mas é também função do próprio material.

Para fazer bom uso das informações sobre  $k_t$ 's existentes na literatura é vantajoso arranjar-se uma relação entre  $k_t$  e  $k_f$ , por meio da consideração da sensibilidade ao entalhe de cada material e que permita, precisamente, calcular  $k_f$  para uma determinada geometria e para um determinado material, sem recurso constante à experimentação.

Tal relação faz-se por meio do fator de sensibilidade ao entalhe, o qual num determinado material, definido por:

$$k_f = q(k_t - 1) \quad (11)$$

Onde “q” é a sensibilidade ao entalhe. Portanto, para:

$q = 0 \rightarrow$  Ausência de sensibilidade  $\rightarrow k_f = 1$ , e;

$q = 1 \rightarrow$  Plena sensibilidade  $\rightarrow k_f = k_t$ ;



A sensibilidade ao entalhe não é só função do material, mas também da dimensão característica do entalhe. O Gráfico 7 apresenta a sensibilidade ao entalhe,  $q$ , para tração e flexão. O Gráfico 8 apresenta a sensibilidade ao entalhe,  $q$ , para torção.

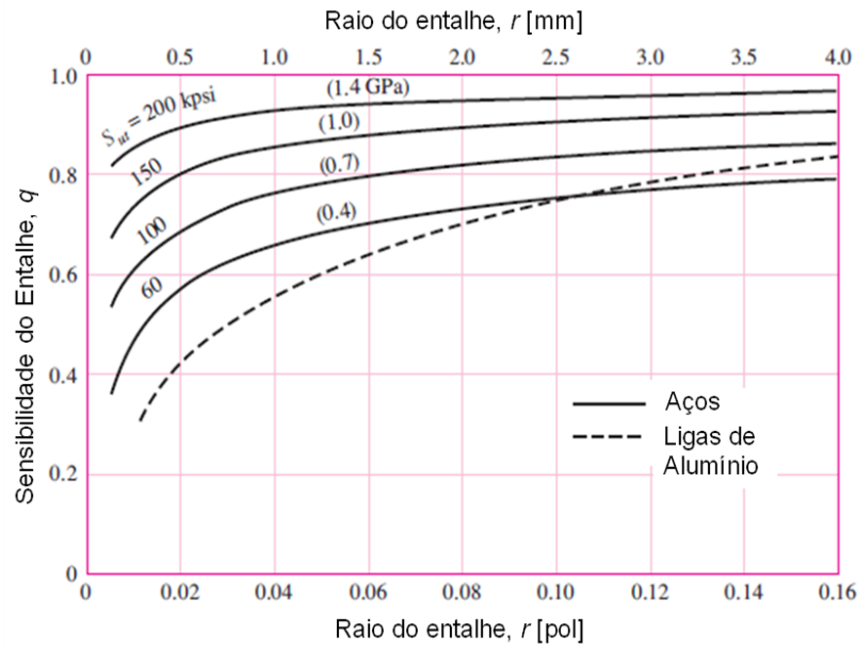


Gráfico 7: Sensibilidade ao entalhe,  $q$ , para tração e flexão  
Fonte: (Shigley, 2006).

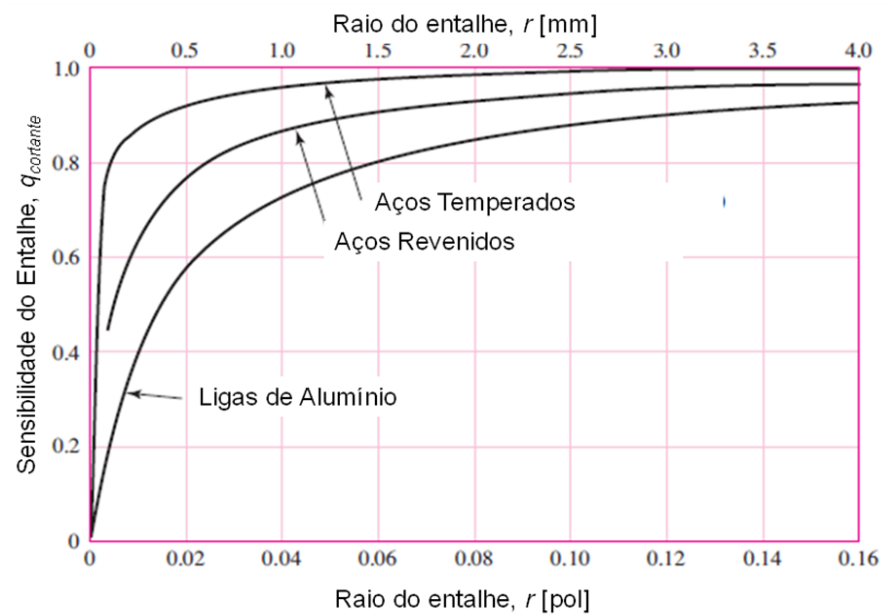


Gráfico 8: Sensibilidade ao entalhe,  $q$ , para torção  
Fonte: (Shigley, 2008).

Pode-se notar que quanto menor o raio, menor é o valor de  $q$ , o que não deve ser entendido como vantajoso optar-se por pequenos raios, pois os valores do coeficiente de concentrações estático  $k_t$  seriam drasticamente maiores.

Caso haja dúvida quanto à sensibilidade devido ao entalhe de um determinado material, deve-se optar por  $q = 1$  (i.e., 100% de influência devido ao entalhe).

#### 2.2.4.7 Limite de resistência à fadiga $\sigma_{Fad}$

A determinação do limite de resistência à fadiga, atualmente, já é uma atividade rotineira, embora seja uma tarefa que requer um procedimento extenso. Geralmente, ensaios de tensão são preferíveis aos de deformação para determinação dos limites de resistência à fadiga.

Para aços, simplificado o método utilizado por SHIGLEY (2008) estima-se o limite de resistência à fadiga da seguinte forma:

$$\sigma_{Fad} = 0,504 \sigma_{rup} \text{ para } \sigma_{rup} \leq 1400[\text{MPa}], \text{ e};$$

$$\sigma_{Fad} = 700 [\text{MPa}] \text{ para } \sigma_{rup} > 1400[\text{MPa}].$$

Onde  $\sigma_{rup}$  é a mínima tensão que o material à ruptura.

Aços tratados para apresentar microestruturas diferenciadas, têm diferentes razões  $\sigma_{Fad} / \sigma_{rup}$ . Microestruturas mais dúcteis tendem a apresentar uma razão  $\sigma_{Fad} / \sigma_{rup}$  maior. A martensita tem uma natureza muito frágil e é altamente sensível a trincas induzidas por fadiga, assim, a razão  $\sigma_{Fad} / \sigma_{rup}$  é baixa. Quando projetos incluem detalhados tratamentos térmicos especificados para obter determinadas microestruturas, é possível utilizar uma estimativa para o limite de resistência à fadiga, baseado em dados de testes, para a microestrutura particular. Tais estimativas são mais confiáveis e devem ser utilizadas.

O Gráfico 9 apresenta limites de resistência à fadiga contra o limite de ruptura a partir dos resultados de testes reais para diferentes tipos de aço e ferro forjado.

Os limites de resistência à fadiga de diversas classes de ferros fundidos podem ser encontrados tabelados na literatura.

As ligas de alumínio em geral não apresentam limite de resistência à fadiga. Algumas ligas de alumínio possuem limite de resistência à fadiga em  $5 \times 10^8$  ciclos e também podem ser encontrados na literatura.

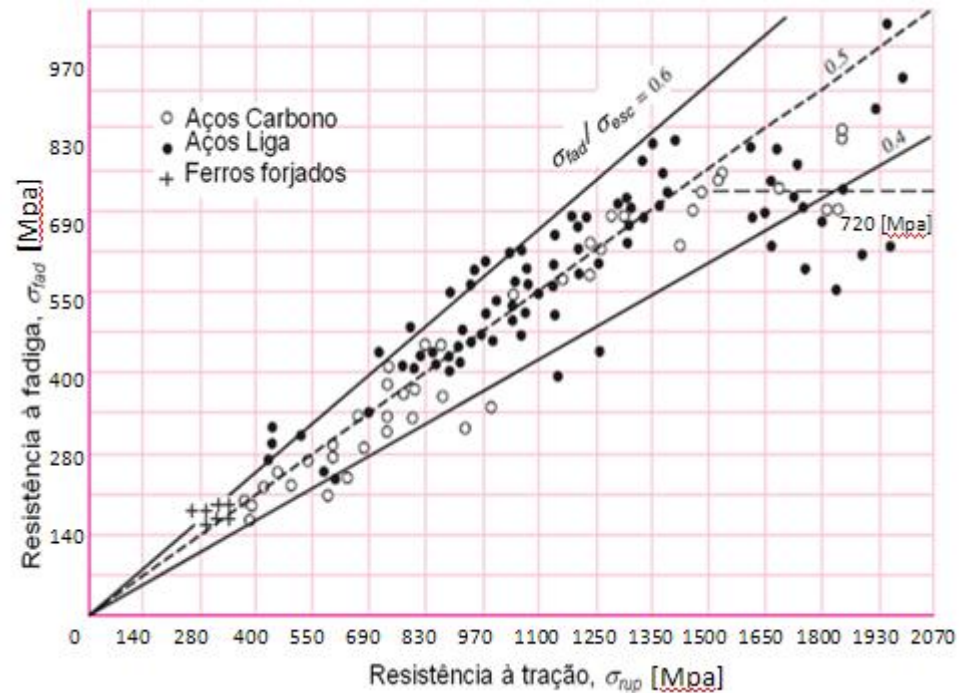


Gráfico 9: Limites de resistência à fadiga contra o limite de ruptura  
Fonte: (Shigley, 2008).

### 2.2.5 Cálculo do número de ciclos

O número de ciclos até a falha de uma peça mecânica ( $N_f$ ) pode ser calculado por meio do procedimento utilizado por SHIGLEY (2008):

$$N_f = 10^6 * (\sigma_{Max} / \sigma_{Fad})^{1/b} \quad (12)$$

Equação para o cálculo do número de ciclos até a falha de uma peça mecânica.

Onde:

$\sigma_{Max}$  = Tensão máxima calculada atuando no sistema devido ao carregamento de pressão no bocal do tubo de admissão de ar;

$\sigma_{Fad}$  = Limite de fadiga em uma região crítica de uma peça mecânica para determinada geometria e condição de uso;

$$b = 1/3 (\log (0,9 * \sigma_{Rup} / \sigma_{Fad})). \quad (13)$$

### 2.3 MECANISMOS DE FALHA

SOUZA (1982), classifica os tipos de fratura ocorridos em corpos de prova ensaiados sob tração de maneira restrita aos campos de ensaios mecânicos comuns. Macroscopicamente, a fratura pode ser classificada como dúctil, fibrosa, e frágil ou cristalina, conforme seja grande ou pequena a intensidade de deformação plástica que acompanha a fratura. Microscopicamente, pode-se verificar que a fratura pode tomar duas direções dentro

do cristal: entre os grãos do metal policristalino, chama fratura intergranular, ou ela se propaga por meio dos grãos, chamada fratura transgranular. Os mecanismos de falha por fratura nesses casos são os seguintes: fratura plástica, onde estão incluídas fratura por deformação plástica ininterrupta e fratura via formação de microcavidades; fratura por clivagem, onde há o avanço simultâneo de várias trincas em planos cristalográficos paralelos; fratura por quase-clivagem, que se distingue do anterior apenas por meio de fenômenos microscópicos na superfície da fratura, e finalmente, fratura por fadiga.

O mesmo autor apresenta as características de fratura dúctil e frágil para os diferentes tipos de metal, assim como o efeito da temperatura nos limites de resistência e de escoamento. Um metal com boa ductilidade, quando rompido por tração apresenta as características principais da fratura dúctil, ou seja, a zona fibrosa no centro do corpo de prova denominada taça, a zona radial adjacente e a zona de cisalhamento nas bordas denominada cone. Quanto menos dúctil for o metal, menor será o tamanho da zona fibrosa, até se tornar macroscopicamente nula, podendo ser então considerada frágil. A Figura 7 apresenta esquematicamente as fraturas frágil e dúctil.

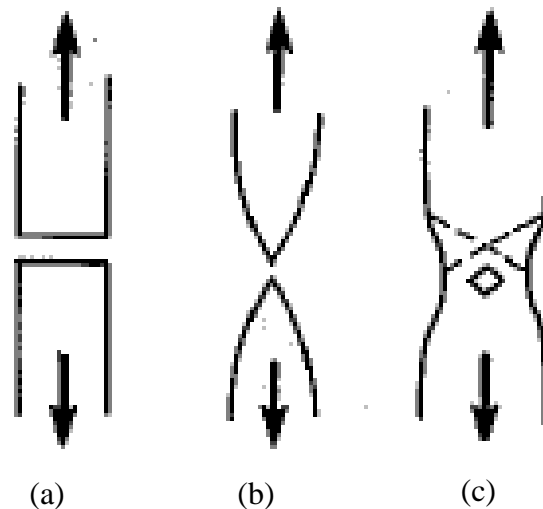


Figura 7: Representação esquemática de (a) fratura frágil, (b) fratura muito dúctil e (c) fratura dúctil.  
Fonte: (Maddox, 2011)

Os diversos tipos de ensaios apresentados, descritos em detalhes pelo mesmo autor, como por exemplo, ensaios de tração, de impacto, de queda de peso, dureza, de compressão e de fadiga, motivam o estudo experimental dos materiais utilizados no estudo de caso, pois se aplicam diretamente nas características do aço laminado.

## 2.4 CONCEITOS DE ELEMENTOS FINITOS

BATHE (1976) e ALVES (2002), apresentam formulação matemática de elementos finitos bidimensionais e tridimensionais, bem como sua aplicação em problemas de engenharia estrutural. Os mesmos autores apresentam informações relevantes na escolha dos tipos de elementos que serão utilizados na realização das análises das peças do estudo de caso. Foram utilizados elementos de barra, de casca, de mola e elementos de sólidos para a realização dos cálculos. Em particular, para o suporte estudado, foram utilizados elementos sólidos do tipo hexaédrico.

### 2.4.1 Computer Aided Engineering (CAE)

Utilizar CAE torna o produto em desenvolvimento mais competitivo. O CAE passou a fazer parte do conceito de qualidade no desenvolvimento do produto. O Método dos Elementos Finitos permite prever, já na fase de projeto, antes da construção do protótipo, o comportamento do produto, evitando-se falhas indesejáveis e, em consequência, *recalls* (retorno ao fabricante para substituição total ou parcial do produto). Por outro lado, o mercado passou a ser muito mais exigente quanto aos requisitos técnicos que devem ser satisfeitos pelos produtos a serem fabricados. O CAE está presente na interpretação e correção das falhas em campo, nos programas de redução de custos e no desenvolvimento do produto.

Segundo Avelino Alves (2002), o ciclo de desenvolvimento de um produto era muito mais extenso. A constatação de que o produto desenvolvido, a partir de uma linha de base definida nas etapas preliminares, atendia aos testes de certificação em um laboratório ou campo de provas, só era obtida nos testes finais. Muitos protótipos eram utilizados, muitos custos desnecessários eram gerados, prazos nem sempre eram cumpridos e, muitas vezes, as estruturas eram superdimensionadas. Embora existam atualmente muitas empresas que enxergam a necessidade de obter ganhos com o desenvolvimento de um produto otimizado, de um produto com qualidade, esse cenário ainda não constitui um conceito amplamente firmado. É realmente importante desenvolver o produto sem gastos desnecessários, da maneira mais racional possível. Da mesma forma podem-se introduzir procedimentos para economizar durante o processo produtivo, além de introduzir outros procedimentos que permitam lucrar mais, ganhar mercado com um produto melhor, evitando *recalls* que sempre representam custos para as empresas.

Conforme mencionado em Alves (2002), a Tecnologia CAE está inserida dentro deste conceito. Escolher entre diversas alternativas de projeto aquela que melhor atenda aos requisitos estabelecidos, para posterior otimização, detalhamento e produção, é fundamental para o aumento do lucro da empresa. Não há software de controle que substitua esta tarefa, logo, controlar um mau produto, um produto não otimizado, desenvolver um detalhamento de projeto tomando como princípio a linha de base de projeto, é certamente um mau negócio. Esta é uma questão de tecnologia. As empresas que hoje tiram proveito dos recursos da tecnologia CAE, praticando efetivamente o conceito de engenharia preditiva, procuram dentro deste cenário, utilizar esta ferramenta da forma mais racional possível.

O mesmo autor ainda destaca que a estratégia de uso do CAE permite definir o uso da ferramenta computacional em níveis de detalhes diferentes, tanto no âmbito do projeto preliminar, como no âmbito da definição final do produto que será testado em campo. O ideal é que o protótipo físico que deva atender aos testes de certificação seja construído apenas para a certificação do produto, e não para se efetuar ciclos de avaliação de diversas concepções diferentes por tentativas e erros. Fazer estudos gastando em material e ferramental não é um bom negócio, pois além do custo extremamente alto, os prazos envolvidos na construção e avaliação dos diversos protótipos gerados penalizam a participação do fornecedor no processo comercial. Considerando que o uso da tecnologia CAE seja prática normal no desenvolvimento dos produtos de uma dada empresa, alguns procedimentos podem ser adotados para se obter o maior retorno possível. A idéia é utilizar o recurso CAE já no âmbito do projeto preliminar, obtendo-se respostas rápidas para o estudo das diversas configurações de projeto de um dado sistema ou componente. E a partir deste estudo preliminar, obter informações mais refinadas para se proceder às análises mais detalhadas dos componentes, usando a tecnologia CAE. O que os *softwares* CAE podem simular (fadiga, térmica, estrutural) diminuindo assim o número de protótipos feitos.

Desenvolvimento virtual de produto é a coordenação e a aplicação eficiente das diferentes tecnologias já disponíveis (*CAD-Computer Aided Design /CAM-Computer Aided Manufacturing*) visando aperfeiçoar o processo de desenvolvimento de produtos de qualquer empresa que participe do processo de fabricação de sistemas mecânicos tais como aviões, automóveis, trens, navios, máquinas, eletrodomésticos, dispositivos médicos, entre outros. A integração eficiente dessas diferentes tecnologias confere às empresas que as utilizam, forma organizada e sistemática a habilidade de tomar decisões mais adequadas em todas as fases do ciclo de desenvolvimento de seus produtos, fundamentadas em protótipos virtuais multifuncionais.

## 2.4.2 Objetivos do método

O Método dos Elementos Finitos (MEF) tem como objetivo a determinação do estado de tensão e de deformação de um sólido de geometria arbitrária sujeito a ações exteriores. Este tipo de cálculo tem a designação genérica de análise de estruturas e surge, por exemplo, no estudo de edifícios, pontes, barragens, entre outros. Quando existe a necessidade de projetar uma estrutura, é habitual proceder-se a uma sucessão de análises e modificações das suas características, com o objetivo de se alcançar uma solução satisfatória, quer em termos económicos, quer na verificação dos pré-requisitos funcionais e regulamentares.

## 2.4.3 Tipos de análise

Segundo AZEVEDO (2003), quando surge a necessidade de resolver um problema de análise de uma estrutura, a primeira questão que se coloca é a sua classificação quanto à geometria, modelo do material constituinte e ações aplicadas. O modo como o MEF é formulado e aplicado depende, em parte, das simplificações inerentes a cada tipo de problema. Referem-se em seguida alguns aspectos que é necessário ter em consideração na fase que antecede a análise de uma estrutura.

- Análise dinâmica ou estática

As ações sobre as estruturas são em geral dinâmicas, devendo ser consideradas as forças de inércia associadas às acelerações a que cada um dos seus componentes fica sujeito. Por este motivo, seria de esperar que a análise de uma estrutura tivesse obrigatoriamente de ter em consideração os efeitos dinâmicos. Contudo, em muitas situações é razoável considerar que as ações são aplicadas de um modo suficientemente lento, tornando desprezáveis as forças de inércia. Nestes casos a análise designa-se estática. Nesta publicação apenas são considerados problemas em que se supõem válidas as simplificações inerentes a uma análise estática.

- Análise não linear ou linear

Na análise de uma estrutura sólida, é habitual considerar que os deslocamentos provocados pelas ações exteriores são muito pequenos quando comparados com as dimensões dos componentes da estrutura. Nestas circunstâncias, admite-se que não existe influência da modificação da geometria da estrutura na distribuição dos esforços e das tensões, i.e., todo o estudo é feito com base na geometria inicial não deformada. Se esta hipótese não for considerada, a análise é designada não linear geométrica. É também frequente considerar que,

ao nível do material que constitui a estrutura, a relação entre tensões e deformações é linear. Nos casos em que esta simplificação não é considerada, é necessário recorrer a algoritmos específicos de análise não linear material.

Neste trabalho serão abordados apenas o caso da análise linear (geométrica e material) e dinâmica.

- Tipo de estrutura

As estruturas podem ser classificadas quanto à sua geometria como reticuladas, laminares ou sólidas. Estas últimas são as mais genéricas, sendo classificadas como sólidas as que não apresentem características que as permitam enquadrar no grupo das laminares ou das reticuladas.

As estruturas laminares são as que se desenvolvem para ambos os lados de uma superfície média, mantendo-se na sua vizinhança. É o caso de uma lâmina cuja espessura é muito inferior às restantes dimensões. Quando a superfície média é plana, a estrutura laminar pode ser classificada como parede, laje ou casca plana. Uma parede apenas se encontra sujeita as ações paralelas ao seu plano médio. Uma laje pode ter aplicadas forças perpendiculares ao plano médio e momentos cujo vetor está contido no plano médio. Uma estrutura laminar plana sujeita a outros tipos de ações é designada casca plana. Quando a superfície média não é plana, tem-se uma casca tridimensional.

As estruturas reticuladas são as constituídas por barras prismáticas, cujas dimensões transversais são muito menores do que o comprimento do respectivo eixo. Neste tipo de estruturas é habitual distinguir os pórticos das treliças, conforme é ou não considerada a compatibilidade de rotações nas extremidades de barras adjacentes.

É possível tratar com grande eficiência uma classe de problemas de análise de estruturas designados axissimétricos. Estes ocorrem quando a estrutura é um sólido de revolução e as ações são todas axissimétricas em relação ao mesmo eixo. Neste tipo de problemas é ainda possível distinguir o caso do sólido de revolução do caso da lâmina de revolução.

#### **2.4.4 Fundamentos do MEF**

A formulação do MEF requer a existência de uma equação integral, de modo que seja possível substituir o integral sobre um domínio complexo (de volume  $V$ ) por um somatório de integrais estendidos a subdomínios de geometria simples (de volume  $V_i$ ).



Esta técnica é ilustrada através de equações, que correspondem à integral de volume de uma função :

$$\int_v f dV = \sum_{i=1}^n \int_{v_i} f dV \quad (14)$$

Desta equação pressupõe-se que:

$$V = \sum_{i=1}^n V_i \quad (15)$$

Se for possível calcular todos os integrais estendidos aos subdomínios  $V_i$ , basta efetuar o somatório correspondente ao segundo membro de (14) para se obter a integral estendida a todo o domínio. Cada subdomínio  $V_i$  corresponde a um elemento finito de geometria simples (*e.g.*, segmento de reta, triângulo, quadrilátero, tetraedro, paralelepípedo). A somatória indicada na Equação 14 vai dar origem à operação designada *assemblagem*, que apresenta muitas semelhanças com a que é efetuada nas estruturas reticuladas.

De acordo com ZIENKIEWICZ e TAYLOR (1988), a equação integral referida no início desta seção é proveniente da aplicação do método dos resíduos pesados ou de um princípio variacional. No caso da aplicação do MEF à análise de estruturas, a formulação mais intuitiva é a que se baseia no Princípio dos Trabalhos Virtuais (PTV). O Princípio dos Trabalhos Virtuais estabelece o equilíbrio de um sistema em termos de seus possíveis deslocamentos.

#### 2.4.5 Princípio dos trabalhos virtuais

Considere-se um corpo sujeito a um conjunto de forças de volume e de superfície que lhe provocam uma deformação. Com base no seu estado de equilíbrio estático, a configuração do corpo é modificada por um conjunto de deslocamentos muito pequenos e compatíveis com as condições fronteira, que se designam deslocamentos virtuais. O princípio dos trabalhos virtuais ou princípio dos deslocamentos virtuais estabelece que o trabalho realizado pelas tensões internas na deformação virtual do corpo é igual ao trabalho realizado pelas forças exteriores nos deslocamentos virtuais dos seus pontos de aplicação. De um modo mais simplista é comum afirmar que o trabalho interno de deformação é igual ao trabalho externo das forças aplicadas.

Considere-se um estado plano de tensão constituído por um elemento finito. Supondo que apenas existam ações distribuídas por unidade de comprimento na periferia do elemento finito, do Princípio dos Trabalhos Virtuais (PTV), resulta a Equação 16:

$$\int_V \delta \underline{\underline{\varepsilon}}^T \underline{\underline{\sigma}} dV = \int_L \delta \underline{\underline{u}}^T \underline{\underline{p}} dL \quad (16)$$

Na equação (16), o vetor ( $\delta \underline{\underline{\varepsilon}}$ ) apresenta componentes do campo de deformações no estado plano de tensão definido pela equação (17) e de um modo mais compacto pela equação (18). O campo de deslocamentos é definido em ( $\delta \underline{\underline{u}}$ ), e a ação exterior é definido por ( $\underline{\underline{p}}$ ).

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x_1} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial x_2} \\ \frac{\partial}{\partial x_2} & \frac{\partial}{\partial x_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$\begin{matrix} \underline{\underline{\varepsilon}} & = & \underline{\underline{L}} & \underline{\underline{u}} \\ (q \times 1) & & (q \times m) & (m \times 1) \end{matrix} \quad (18)$$

Na Equação (18), ( $q$ ) é o número de componentes do vetor  $\underline{\underline{\varepsilon}}$ , e ( $L$ ) é o seguinte operador diferencial dos deslocamentos conforme apresentado em (19):

$$\underline{\underline{L}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x_1} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial x_2} \\ \frac{\partial}{\partial x_2} & \frac{\partial}{\partial x_1} \end{bmatrix} \quad (19)$$

O vetor de tensões ( $\underline{\underline{\sigma}}$ ) da equação (16), do Princípio dos Trabalhos Virtuais, corresponde à equação (20), onde  $\sigma_x$  são tensões normais e  $\tau_{xy}$  é a tensão tangencial:

$$\underline{\underline{\sigma}} = \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \quad (20)$$

### 2.4.6 Elementos sólidos tridimensionais

No desenvolvimento de elementos sólidos do tipo hexaédrico, é considerada uma formulação genérica com três graus de liberdade do tipo deslocamento. A exposição aqui apresentada baseia-se num elemento finito sólido com oito nós, vide Figura 8. O número de graus de liberdade deste elemento é  $p = 8 \times 3 = 24$ .

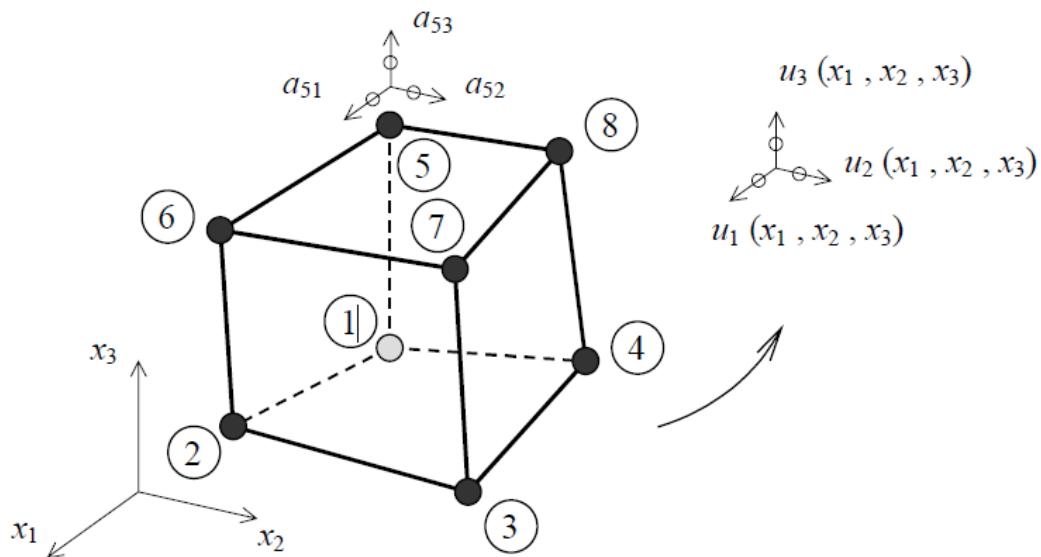


Figura 8: Elemento finito sólido de oito nós com geometria arbitrária.  
Fonte: (Azevedo, 2003)

Os vetores dos deslocamentos nodais e das forças nodais equivalentes às ações exteriores são os seguintes:

$$\underset{(p \times 1)}{\underline{a}} = \begin{bmatrix} a_{11} \\ a_{12} \\ a_{13} \\ a_{21} \\ a_{22} \\ a_{23} \\ \vdots \\ a_{81} \\ a_{82} \\ a_{83} \end{bmatrix} \quad \underset{(p \times 1)}{\underline{F}} = \begin{bmatrix} F_{11} \\ F_{12} \\ F_{13} \\ F_{21} \\ F_{22} \\ F_{23} \\ \vdots \\ F_{81} \\ F_{82} \\ F_{83} \end{bmatrix} \quad (21)$$

A matriz de rigidez do elemento ( $K$ ) é uma matriz  $p \times p = 24 \times 24$ .

No referencial geral, a matriz das coordenadas cartesianas dos nós do elemento é a seguinte:

$$\underline{\bar{x}}_{(n \times m)} = \begin{bmatrix} \bar{x}_{11} & \bar{x}_{12} & \bar{x}_{13} \\ \bar{x}_{21} & \bar{x}_{22} & \bar{x}_{23} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \bar{x}_{81} & \bar{x}_{82} & \bar{x}_{83} \end{bmatrix} \quad (22)$$

É conveniente, matematicamente, fazer a seguinte substituição de variáveis:

$$\begin{cases} x_1 \rightarrow x_1(s_1, s_2, s_3) \\ x_2 \rightarrow x_2(s_1, s_2, s_3) \\ x_3 \rightarrow x_3(s_1, s_2, s_3) \end{cases} \quad (23)$$

A Figura 9 apresenta o sistema de coordenadas locais e o novo domínio de integração para as funções de forma.

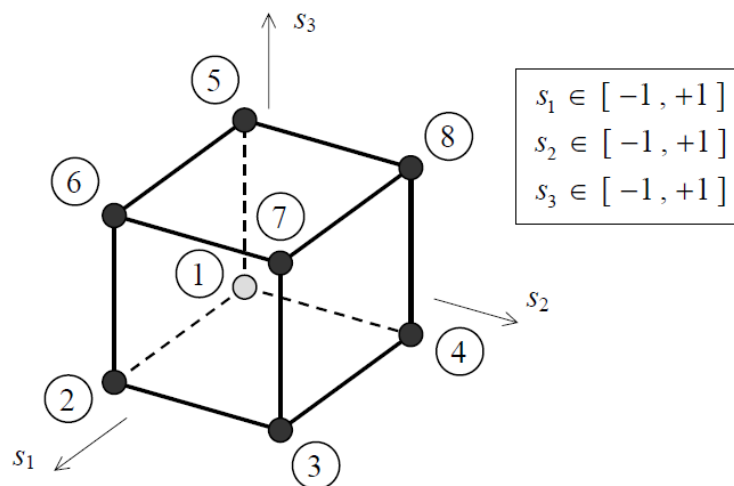


Figura 9: Sistema de coordenadas locais.  
Fonte: (Azevedo, 2003)

Portanto, os valores nodais das coordenadas  $s_1$ ,  $s_2$  e  $s_3$  são os seguintes:

$$\bar{\underline{S}}_{(n \times m)} = \begin{bmatrix} \bar{S}_{11} & \bar{S}_{12} & \bar{S}_{13} \\ \bar{S}_{21} & \bar{S}_{22} & \bar{S}_{23} \\ \bar{S}_{31} & \bar{S}_{32} & \bar{S}_{33} \\ \bar{S}_{41} & \bar{S}_{42} & \bar{S}_{43} \\ \bar{S}_{51} & \bar{S}_{52} & \bar{S}_{53} \\ \bar{S}_{61} & \bar{S}_{62} & \bar{S}_{63} \\ \bar{S}_{71} & \bar{S}_{72} & \bar{S}_{73} \\ \bar{S}_{81} & \bar{S}_{82} & \bar{S}_{83} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ +1 & -1 & -1 \\ +1 & +1 & -1 \\ -1 & +1 & -1 \\ -1 & -1 & +1 \\ +1 & -1 & +1 \\ +1 & +1 & +1 \\ -1 & +1 & +1 \end{bmatrix} \quad (24)$$

As funções de forma apresentadas por AZEVEDO (2003), para o elemento finito hexaédrico são as seguintes:

$$\begin{cases} N_1(s_1, s_2, s_3) = (1-s_1)(1-s_2)(1-s_3)/8 \\ N_2(s_1, s_2, s_3) = (1+s_1)(1-s_2)(1-s_3)/8 \\ N_3(s_1, s_2, s_3) = (1+s_1)(1+s_2)(1-s_3)/8 \\ N_4(s_1, s_2, s_3) = (1-s_1)(1+s_2)(1-s_3)/8 \\ N_5(s_1, s_2, s_3) = (1-s_1)(1-s_2)(1+s_3)/8 \\ N_6(s_1, s_2, s_3) = (1+s_1)(1-s_2)(1+s_3)/8 \\ N_7(s_1, s_2, s_3) = (1+s_1)(1+s_2)(1+s_3)/8 \\ N_8(s_1, s_2, s_3) = (1-s_1)(1+s_2)(1+s_3)/8 \end{cases} \quad (25)$$

A interpolação das coordenadas cartesianas é efetuada com a seguinte expressão:

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{x}_{11} & \bar{x}_{21} & \cdots & \bar{x}_{81} \\ \bar{x}_{12} & \bar{x}_{22} & \cdots & \bar{x}_{82} \\ \bar{x}_{13} & \bar{x}_{23} & \cdots & \bar{x}_{83} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N_1 \\ N_2 \\ \vdots \\ N_8 \end{bmatrix} \quad (26)$$

Que corresponde a:

$$\underset{(m \times 1)}{\underline{x}} = \underset{(m \times n)}{\bar{\underline{x}}^T} \underset{(n \times 1)}{\underline{N}_V} \quad (27)$$

Como a matriz de rigidez genérica de um elemento finito é representada por:

$$\underline{K} = \int_V \underline{B}^T \underline{D} \underline{B} dV \quad (28)$$

Onde:

- $\underline{K}$  é a matriz de rigidez;
- $\underline{B}^T$  é a transposta da matriz de deformação;
- $\underline{D}$  é a matriz de elasticidade ( $\underline{\sigma} = \underline{D} \cdot \underline{\varepsilon}$ ), e;
- $\underline{B}$  é a matriz de deformação.

Substituindo-se as variáveis de (26) em (28), temos que:

$$\underline{K} = \int_{-1}^{+1} \int_{-1}^{+1} \int_{-1}^{+1} \underline{B}^T \underline{D} \underline{B} J \, ds_1 \, ds_2 \, ds_3 \quad (29)$$

Onde J é determinante da matriz Jacobiana, neste caso, tridimensional, representado por:

$$\underline{J} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x_1}{\partial s_1} & \frac{\partial x_1}{\partial s_2} & \frac{\partial x_1}{\partial s_3} \\ \frac{\partial x_2}{\partial s_1} & \frac{\partial x_2}{\partial s_2} & \frac{\partial x_2}{\partial s_3} \\ \frac{\partial x_3}{\partial s_1} & \frac{\partial x_3}{\partial s_2} & \frac{\partial x_3}{\partial s_3} \end{bmatrix} \quad (30)$$

No caso dos materiais isotrópicos, a relação entre tensões e deformações se dá conforme a equação (31):

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_1 & C_2 & C_2 & 0 & 0 & 0 \\ C_2 & C_1 & C_2 & 0 & 0 & 0 \\ C_2 & C_2 & C_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (31)$$

Onde:

$$C_1 = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}$$

$$C_2 = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}$$

$$C_3 = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

(32)

Em (31) o número de componentes de  $\underline{\sigma}$  e  $\underline{\varepsilon}(q)$  é seis, podendo escrever-se de um modo mais compacto por:

$$\begin{matrix} \underline{\sigma} \\ (q \times 1) \end{matrix} = \begin{matrix} \underline{D} \\ (q \times q) \end{matrix} \begin{matrix} \underline{\varepsilon} \\ (q \times 1) \end{matrix} \quad (33)$$

A matriz de elasticidade  $\underline{D}$  depende do módulo de Young (E) e do coeficiente de Poisson ( $\nu$ ). Uma vez que todos os componentes da função integrando de (29) se encontram definidos em função de  $s_1$ ,  $s_2$  e  $s_3$ , já é possível calcular o integral triplo recorrendo à quadratura de Gauss. Depois de resolvido o sistema de equações referentes à totalidade dos graus de liberdade da estrutura, é possível calcular o estado de tensão e deformação em qualquer ponto de qualquer elemento.

A descrição das formulações foi efetuada de um modo sucinto, supondo-se que haja conhecimento da formulação do estado plano de tensão. Os elementos sólidos tridimensionais (hexaédricos) são os que, aparentemente, permitem modelar qualquer geometria, sendo recomendada sua utilização em análise de geometrias complexas ou de chapas com grandes espessuras. No entanto, apresentam os inconvenientes de necessitarem de uma preparação dos dados mais trabalhosa, consome muito tempo na modelagem, e requerem maior tempo computacional que elementos com menos graus de liberdade.

## 2.5 METALOGRAFIA

Segundo BAPTÍSTA (1999), a estrutura de uma liga é, invariavelmente, constituída de unidades denominadas elementos estruturais ou microconstituintes. O ramo da tecnologia que estuda e interpreta essas estruturas é chamado metalografia, processo que, além das informações sobre o comportamento da estrutura íntima da liga metálica, fornece subsídios complementares, indicando a linha de direção de muitas das características importantes orientando, assim, sobre as condições de aplicação tecnológica do produto. A compreensão e interpretação da estrutura de um material exigem uma gama muito grande de conhecimentos teóricos e práticos. O estudo da estrutura interna dos metais e suas ligas é uma valiosa ferramenta. Tanto para o trabalho de pesquisa como para o industrial, faz com que a implantação de um sistema de controle metalográfico racional e organizado, ou seja, a perfeita interação analista/metodologia analítico - estrutural, traga grandes benefícios de ordem técnica e comercial. Isso ocorre devido à sua versatilidade, rapidez e economia de execução.

A metalografia é um ensaio realizado nos materiais metálicos, abordando a sua textura que em geral é realizado em uma seção previamente preparada e atacada adequadamente por um reagente químico. Consiste, unicamente, na análise e interpretação do aspecto da seção. A precisão do resultado está condicionada não só ao conhecimento da microestrutura, como também a uma boa técnica no preparo e no ataque do corpo de prova.

O preparo do corpo de prova deve ser realizado com todo cuidado para a exata execução do ensaio e evitar a introdução de defeitos que dificultariam a correta interpretação. Apesar da realização relativamente simples, requer muita prática e habilidade, pois muitas dificuldades podem aparecer durante a manipulação. Assim o preparo de uma micrografia segue uma sequência de operações como: escolha e localização da seção de estudo; execução do corte da seção plana, embutimento, lixamento e polimento; lavagem, secagem, ataque e observação ao microscópio.

A superfície metálica polida, exposta e sob a ação de um reativo, pode apresentar, quase sempre, aspectos diversos em virtude das heterogeneidades reagirem diferentemente e dos defeitos serem atacados. Assim, as diferenças cristalinas e mecânicas, são evidenciadas em virtude da dissolução seletiva, ou da coloração seletiva do ataque, ou da deposição seletiva dos produtos das reações. O reativo, também, põe em evidência, por corrosão, defeitos que eram imperceptíveis.

O aspecto da textura é devido então às diferentes intensidades de reflexão da luz, pois as regiões menos afetadas pelo reativo refletem a luz sobre o olho do observador com maior intensidade do que as outras, coloridas ou recobertas de produtos das reações ou menos corroídas, que dispersam ou absorvem em maior ou menor intensidade. A maior nitidez é alcançada para um determinado ângulo incidente da luz.

O perfeito ataque é o que acarreta uma nítida microtextura, intrinsecamente característica do corpo de prova.

O ensaio microscópico, usando aumentos adequados, fornece informações particulares sobre a natureza, tamanho, forma, quantidade e distribuição dos constituintes, fases e inclusões, granulação e defeitos, que induzem, a tirar conclusões sobre as características, causas prováveis da fratura e utilização dos materiais.

No ataque colorido uma fase em particular é determinada por uma cor definida. A identificação direta de microconstituintes por meios de diferenciação de cores torna-se então possível.

Há duas categorias gerais dentro do uso de cores na metalografia: 1 – Realce de contraste, em que uma cor particular usualmente não tem nenhuma relação intrínseca com o



material (a cor é útil aqui porque o olho pode distinguir milhares de matizações de cores, mas poucas tonalidades de cinza, incluindo o preto e o branco). 2 – A cor como um indicador de composição, em que cores específicas indicam elementos ou fases. A mais recente categoria inclui o uso de certos reagentes coloridos.

Qualquer tipo de ataque colorido vai produzir um filme que resultará na cor observada. O agente químico de coloração é uma substância formada na superfície da amostra, após a imersão da mesma na solução de ataque agente de coloração é usado a temperatura ambiente, mas não precisa necessariamente sê-lo, corrente elétrica, altas temperaturas de oxidação, ou evaporação a vácuo não são usados na produção da coloração da amostra.

Os reagentes podem ser divididos em dois grupos: São reagentes anódicos, em que um filme de sulfeto é precipitado nas áreas de ação anódicas (matriz ferrítica e austenítica), e reagentes catódicos em que um complexo óxido de molibdato ou filmes de selênio elementar são precipitados nos microcátodos (carbonetos, nitretos, etc.) pelo processo de redução dos mesmos. O efeito de cor nos filmes anódicos ocorre devido aos fenômenos de interferência e está interligado com a espessura do filme. A espessura deste filme varia de grão para grão e também em função da orientação de cristalográfica (diferença na energia de superfície). Os vários reagentes causam a coloração de diferentes fases, de modo que é possível, pela escolha correta do reagente, colorir de forma distinta uma ou outra fase (qualquer fase) à vontade.

A base para a aplicação dos agentes de coloração é a criação de filmes de interferência cuja espessura é função da composição. No uso de qualquer ataque colorido uma quantidade razoável de experimentações iniciais é necessária para estabelecer condições ótimas de reprodução das cores resultantes. Então a composição do reagente e as condições de ataque devem ser mantidas constantes para melhor reprodutibilidade.

Na grande maioria dos ataques químicos convencionais, a mesma fase pode funcionar como superfície catódica ou anódica. O ataque colorido geralmente colore tanto as fases catódicas quanto as anódicas. As cores são desenvolvidas por interferência sempre do mesmo modo por uma mesma fase, portanto somente uma cor é desenvolvida por uma fase ou potencial específico.

Para a realização da análise, o plano de interesse da amostra é cortado, lixado, polido e atacado com reagente químico, de modo a revelar as interfaces entre os diferentes constituintes que compõe o metal. Quanto ao tipo de observação, está subdividida, basicamente em duas classes: microscópica e macroscópica. (COLPAERT, 2008)

### **2.5.1 Microscopia Ótica**

A microscopia ótica trata-se de uma análise feita em um microscópio com aumentos que normalmente são 50, 100, 200, 500, 1000, 1500 e 2500 vezes.

Este tipo de análise é realizado em microscópios específicos, conhecidos como "microscópios metalográficos" ou "microscópios metalúrgicos". Este tipo de microscópio possui baixo campo focal, permitindo apenas a observação de superfícies perfeitamente planas e polidas. Em razão disto, a preparação metalográfica tem grande importância na qualidade de uma análise. Estes microscópios, em geral, possuem sistemas de fotografia integrados, que permitem o registro das análises realizadas.

### **2.5.2 Macroscopia**

A macroscopia trata-se de análise feita a olho nu, lupa ou com utilização de microscópios estéreos (que favorecem a profundidade de foco e dão, portanto, visão tridimensional da área observada) com aumentos que podem variar de 5 a 64 vezes.

Por meio das análises macrográficas e das análises micrográficas é possível a determinação de diversas características do material, inclusive a determinação das causas de fraturas, desgastes prematuros e outros tipos de falhas.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 MATERIAIS

A matéria prima que será utilizada nos testes computacionais e nos ensaios experimentais é o aço conforme a norma européia DIN EN 10149-3 1.0971, de 1995. Seu nome comercial é S260NC. O material sugerido para substituição do atual é o aço de nome comercial S700MC conforme a norma européia DIN EN 10149-2 1.8974, de 1995.

As respectivas composições químicas de norma dos materiais, atual e sugerido, são apresentadas na Tabela 4. Valores em máxima porcentagem permitida.

Tabela 4: Composição química de norma dos Aços S260NC e S700MC.

<b>Material</b>	<b>C</b>	<b>Mn</b>	<b>Si</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Al</b>	<b>Nb</b>	<b>V</b>	<b>Ti</b>	<b>Mo</b>	<b>B</b>	<b>Cr</b>	<b>Ni</b>
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
S260NC	0,16	1,20	0,50	0,025	0,020	0,015	0,09	0,10	0,15	-	-	-	-
S700MC	0,12	2,10	0,60	0,025	0,015	0,015	0,09	0,20	0,22	0,50	0,005	-	-

A Tabela 5 apresenta as propriedades mecânicas dos materiais utilizados no conjunto analisado pelo método dos elementos finitos. E é o modulo de elasticidade,  $\nu$  é o coeficiente de Poisson,  $\rho$  é a densidade,  $\sigma_{Rup}$  é o limite de ruptura,  $\sigma_{Esc}$  é o limite de escoamento e  $\sigma_{Fad}$  é o limite de fadiga. As propriedades mecânicas do material foram obtidas através de normas e através do fabricante.

O limite de fadiga do material foi calculado segundo a equação e os fatores de modificação para o limite de resistência de um aço conforme MARIN (1962).

$$\sigma_{Fad} = k_a \cdot k_b \cdot k_c \cdot k_d \cdot k_e \cdot k_f \cdot (\sigma_{Esc} \times 0,5) \quad (34)$$

Equação de Marin para o limite de fadiga de um aço.

Onde:

$k_a$  = fator de acabamento superficial;

$k_b$  = fator de escala;

$k_c$  = fator de carregamento;

$k_d$  = fator de temperatura;

$k_e$  = fator de confiança;

$k_f$  = fator de efeitos diversos;

$\sigma_{\text{Fad}}$  = Limite de fadiga em uma região crítica de uma peça mecânica para determinada geometria e condição de uso.

Tabela 5: Propriedades mecânicas dos materiais utilizados no conjunto analisado.

Material	E [MPa]	$\nu$	$\rho$ [ton/mm <sup>3</sup> ]	$\sigma_{\text{Rup}}$ [MPa]	$\sigma_{\text{Esc}}$ [MPa]	$\sigma_{\text{Fad}}$ [MPa]
Alumínio	75000	0,33	2,70x10 <sup>-9</sup>	-	-	-
Fofo A	170000	0,28	7,20x10 <sup>-9</sup>	-	-	-
Aço	208000	0,30	7,85x10 <sup>-9</sup>	-	-	-
Fofo B	110000	0,30	7,20x10 <sup>-9</sup>	-	-	-
SiMo	143000	0,30	7,27x10 <sup>-9</sup>	-	-	-
S260NC	208000	0,30	7,85x10 <sup>-9</sup>	340	240	127
Fofo C	170000	0,28	7,20x10 <sup>-9</sup>	-	-	-
Elastômero	0.7	0,45	9,10 x10 <sup>-9</sup>	-	-	-
S700MC	208000	0,30	7,85x10 <sup>-9</sup>	750	700	159

A Figura 10 apresenta as peças do conjunto e seus respectivos materiais utilizados nas análises pelo método dos elementos finitos.

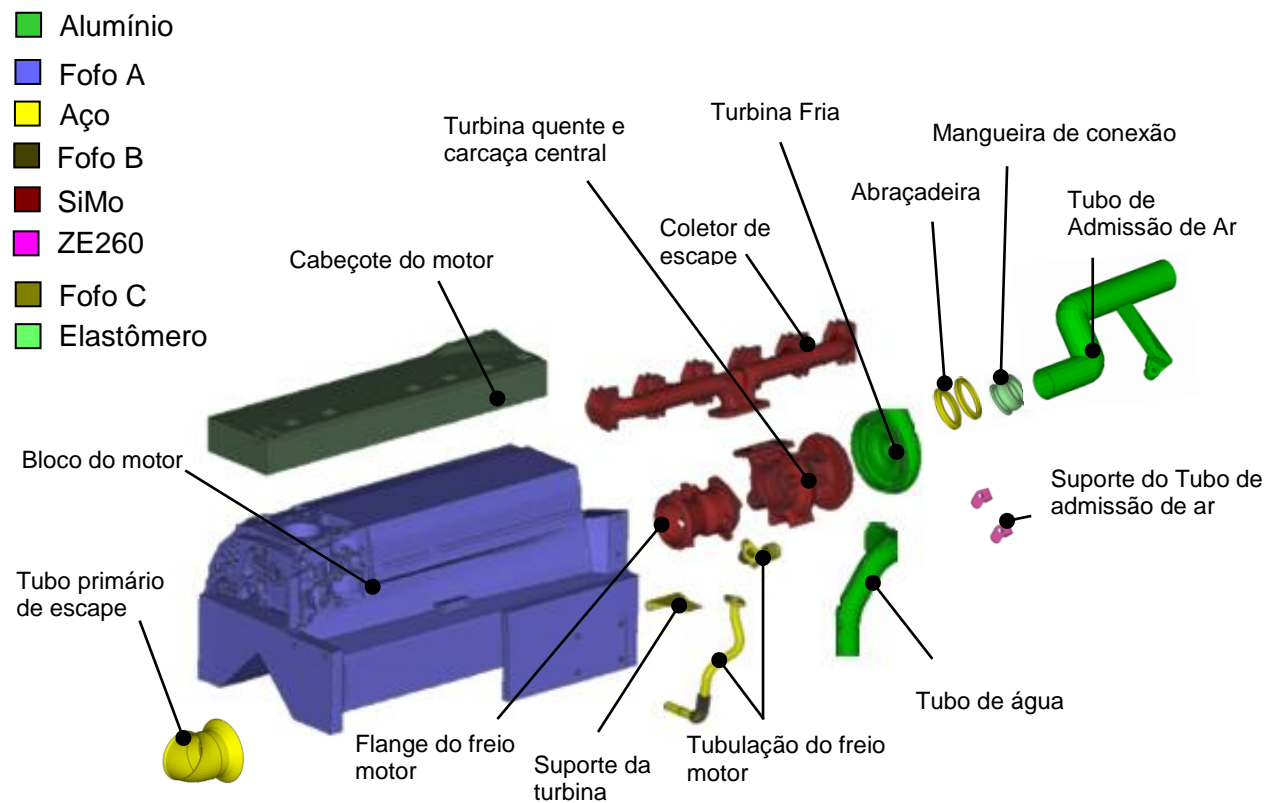


Figura 10: Materiais e peças do conjunto do modelo de elementos finitos.  
Fonte: (O&M Fabricante de Motores Brasil, 2011)

Para a verificação da integridade estrutural do suporte do tubo de admissão de ar, foram realizadas análise modal, análises estáticas de pressão no bocal do tubo de ar e termoelástica e análise dinâmica, por meio do método dos elementos finitos.

### 3.2 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Para realização das análises por meio do método dos elementos finitos, as geometrias das peças do conjunto do motor e o suporte do tubo de admissão de ar foram modelados com os tipos de elementos adequados para as análises realizadas.

A geometria do suporte do tubo de admissão de ar em estudo é modelada com elementos sólidos do tipo hexaédrico. O tubo de escape, o conjunto de escape e o suporte da turbina são modelados com elementos de casca. Os parafusos são modelados com elementos de barra. Para as análises estáticas de pressão no bocal do tubo de ar e termoelástica, foram consideradas as rigezas dos coxins do motor e do câmbio conforme a Tabela 6.

Tabela 6: Rigezas consideradas nos coxins do motor e do câmbio

Coxim	$k_x$ [N/mm]	$k_y$ [N/mm]	$k_z$ [N/mm]
Motor	400	400	400
Transmissão	900	200	300

#### 3.2.1 Ferramentas Computacionais

Para realizar as análises pelo método dos elementos finitos, são utilizadas as seguintes ferramentas computacionais:

- *Medina Pre-processor* - versão 8.2, para modelagem;
- *MD.NASTRAN Solver* - versão 2010.0 R3, para os cálculos;
- *Medina Pos-processor* - version 8.2, para a análise dos resultados.

#### 3.2.2 Condições de contorno

O modelo de elementos finitos analisado leva em consideração as peças estruturais do motor indicadas no capítulo anterior. As densidades dos materiais do conjunto da turbina, do bloco do motor, do cabeçote, tubulação de água, suporte do coxim do motor e suporte do alternador foram calibradas para representarem com maior fidelidade as massas das peças.

Na análise modal, o bloco do motor foi considerado engastado nos quatro pontos de fixação do motor no veículo para evitar os modos naturais de vibrar do conjunto do motor. A Figura 11 apresenta as condições de contorno para a análise modal. Sendo:

- Engaste: Restrições nas translações e rotações nas direções x, y e z.
- Peças não analisadas
- Suporte analisado

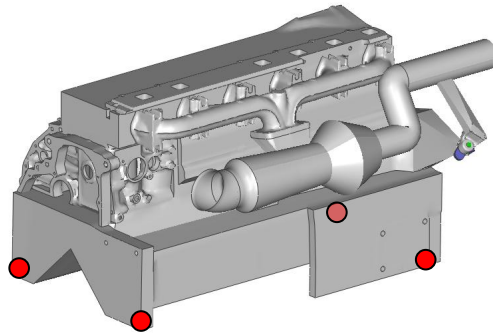


Figura 11: Condições de contorno para a análise modal.  
Fonte: (O&M Fabricante de Motores Brasil, 2011)

Nas análises estáticas de pressão e termo-elástica, são considerados os coxins do motor nos pontos de fixação no veículo. As demais considerações são as mesmas da análise modal. A Figura 12 apresenta as condições de contorno para as análises estáticas. Sendo:

Sendo:

- Engaste: Restrições nas translações e rotações nas direções x, y e z.
- Peças não analisadas
- Suporte analisado
- ~ Coxins

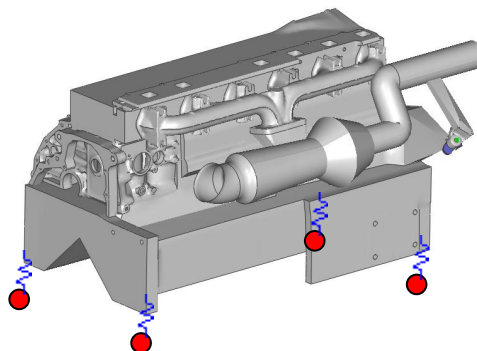


Figura 12: Condições de contorno para as análises estáticas.  
Fonte: (O&M Fabricante de Motores Brasil, 2011)

Para a análise dinâmica a condição de contorno utilizada foi uma ligação totalmente rígida entre a base do bloco do motor e um ponto no espaço onde há um elemento

de massa de ordem maior que o conjunto do motor. Nesse ponto serão aplicados os carregamentos dinâmicos de acelerações obtidos a partir de um veículo instrumentado. Esta condição de contorno da análise dinâmica é conhecida como método *large mass*. A Figura 13 apresenta as condições de contorno para a análise dinâmica. Sendo:

- Massa concentrada onde os carregamentos de acelerações medidos foram aplicados
- Ligação totalmente rígida
- Peças não analisadas
- Suporte analisado

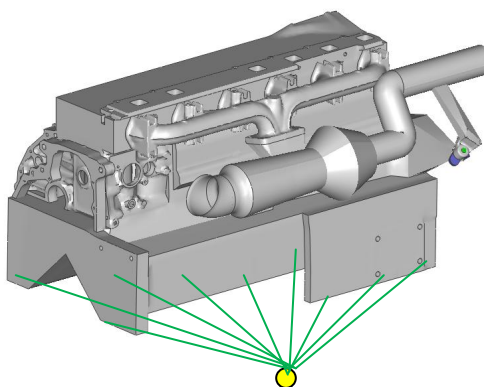


Figura 13: Condições de contorno para a análise dinâmica.  
Fonte: (O&M Fabricante de Motores Brasil, 2011)

### 3.2.3 Carregamentos utilizados

Os carregamentos utilizados foram estipulados conforme indicação da área de desenvolvimento de produto do fabricante do veículo, de acordo com diretrizes e procedimentos de engenharia interna, além de medições feitas em laboratório e em campo no veículo.

Para a análise modal, o modelo foi analisado para uma faixa de frequência que onde estejam inclusas as frequências mais críticas de ressonância como as de pista, a dos eixos, do quadro e do motor do veículo.

Para a análise estática de pressão do tubo de admissão de ar do motor, o carregamento de pressão utilizado é a pressão de pico medida na bancada de testes do motor do veículo. Foi feita uma correlação por meio da equação de pressão entre a pressão interna no tubo de admissão de ar e a área no bocal de admissão de ar que vem do resfriador de ar “*intercooler*” podendo assim ser calculado a força de reação no bocal de 1400[N], que foi utilizada como carregamento para a análise estática.

$$P = \frac{F}{A} \quad (35)$$

Equação da pressão

Onde:

- P é a pressão expressa em [MPa];
- F é a força expressa em Newton, e;
- A é a área da seção transversal do bocal do tubo de admissão de ar expresso em milímetros quadrados.

A Figura 14 apresenta como o carregamento foi aplicado no modelo de elementos finitos. Sendo:

- ➔ Direção e sentido da força aplicada no bocal do tubo de admissão de ar
- ▣ Peças não analisadas
- ▣ Suporte do tubo de admissão de ar

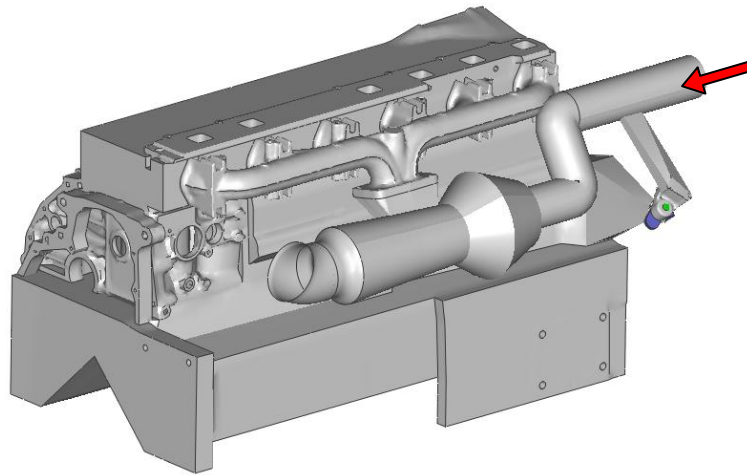














Figura 14: Carregamento de pressão no bocal do tubo de ar frio.  
Fonte: (O&M Fabricante de Motores Brasil, 2011)

Para a análise estática termoelástica, foram medidas as temperaturas do conjunto do motor na bancada de testes, utilizando termômetro a laser. As regiões e os respectivos valores de gradiente de temperatura utilizados como carregamento para as análises termoelásticas são apresentados na Tabela 7 e na Figura 15.



Tabela 7: Temperaturas medidas no conjunto do motor na bancada

Região	Peça	Temperatura	
		Inicial [°C]	Final [°C]
	Freio motor	26,5	470,9
	Coletor de escape	26,5	459,3
	Carcaça da turbina (quente e central), suporte da turbina, tubos de escape	26,5	232,1
	Conjunto do escape	26,5	195,0
	Carcaça da turbina fria	26,5	174,0
	Tubo de admissão de ar	26,5	124,6
	Cabeçote do motor	26,5	120,5
	Tubo de admissão de ar	26,5	114,6
	Suporte em L	26,5	100,0
	Tubo de admissão de ar	26,5	99,1
	Bloco, suporte do alternador e do coxim do motor	26,5	97,3
	Tubulação de água	26,5	93,9

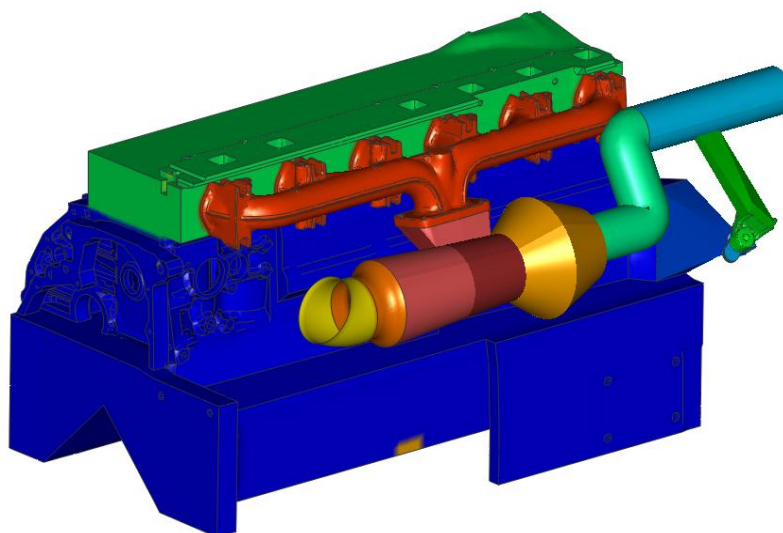


Figura 15: Condições de contorno para a análise termoelástica.  
 Fonte: (O&M Fabricante de Motores Brasil, 2011)

Para a análise dinâmica foram medidos os carregamentos de acelerações no tempo nas direções X, Y e Z em pontos distintos do motor como bloco, tubo de admissão de ar em ambas as extremidades e na turbina fria no veículo em teste.

As medições foram realizadas em faixas de rotação críticas do motor, que são as menores rotações em que ocorreram deslocamentos devido às vibrações provenientes da rotação do motor. Para o motor estudado, a faixa de rotação crítica em que surgiram tais deslocamentos é a faixa de 1531 a 1547 [rpm].

Os carregamentos obtidos no bloco do motor foram utilizados como dados de entrada e aplicados na base com uma grande massa conforme as condições de contorno apresentadas no item 3.2.2. Os carregamentos de acelerações obtidos nos demais pontos foram utilizados para calibrar o modelo de elementos finitos com o motor medido em laboratório.

As máximas acelerações obtidas na medição são da ordem de 0,5 [g] positivo e 1,0 [g] negativo na direção x; 2,5 [g] positivo e 1,5 [g] negativo na direção y; e 1,0 [g] positivo e 1,8 [g] negativo na direção z. Os carregamentos dinâmicos aplicados de Acelerações x Tempo, na direção “x” estão apresentados no Gráfico 10. Os carregamentos dinâmicos aplicados de Acelerações x Tempo, na direção “y” estão apresentados no Gráfico 11. Os carregamentos dinâmicos aplicados de Acelerações x Tempo, na direção “z” estão apresentados no Gráfico 12.

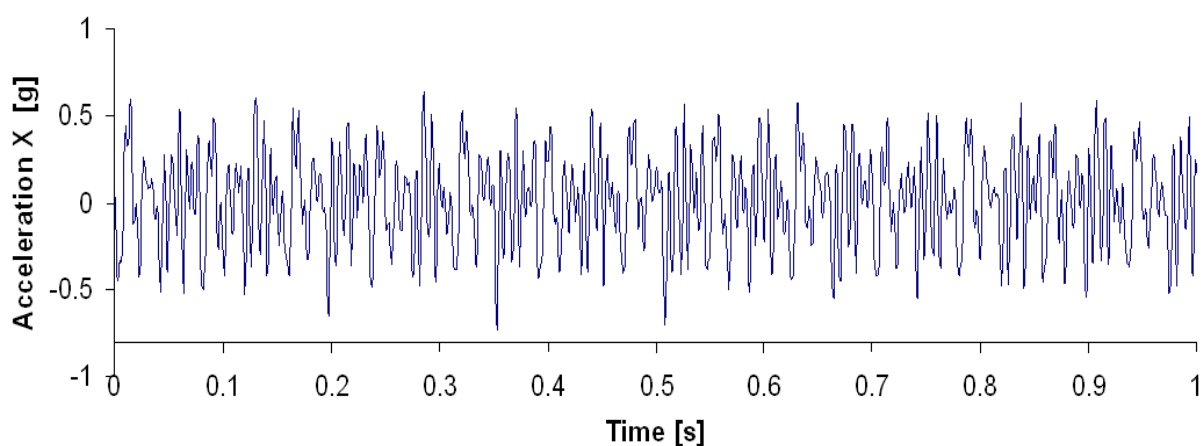


Gráfico 10: Carregamentos dinâmicos na direção “x”.

Fonte: (O&M Fabricante de Motores Brasil, 2011)

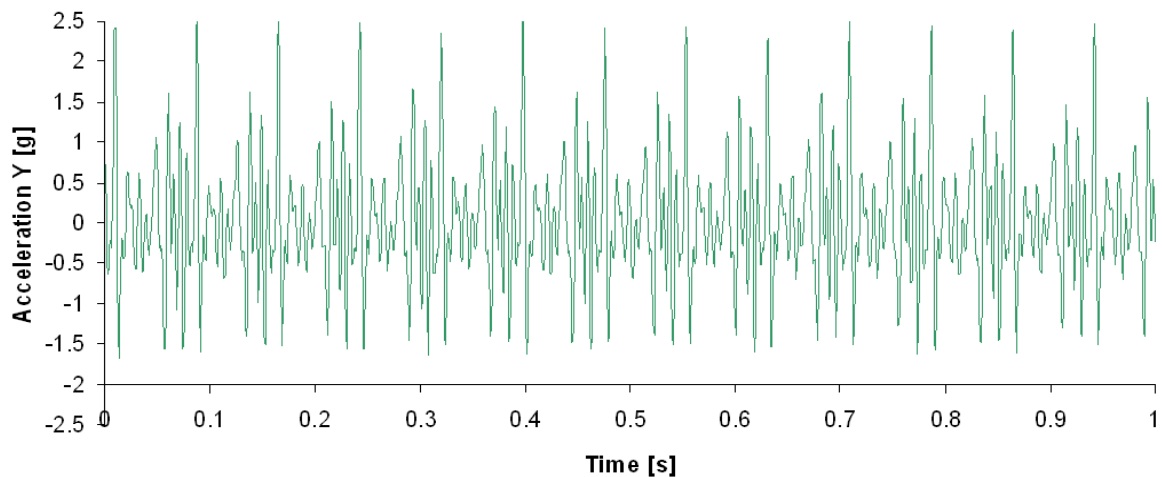


Gráfico 11: Carregamentos dinâmicos na direção “y”.  
Fonte: (O&M Fabricante de Motores Brasil, 2011)

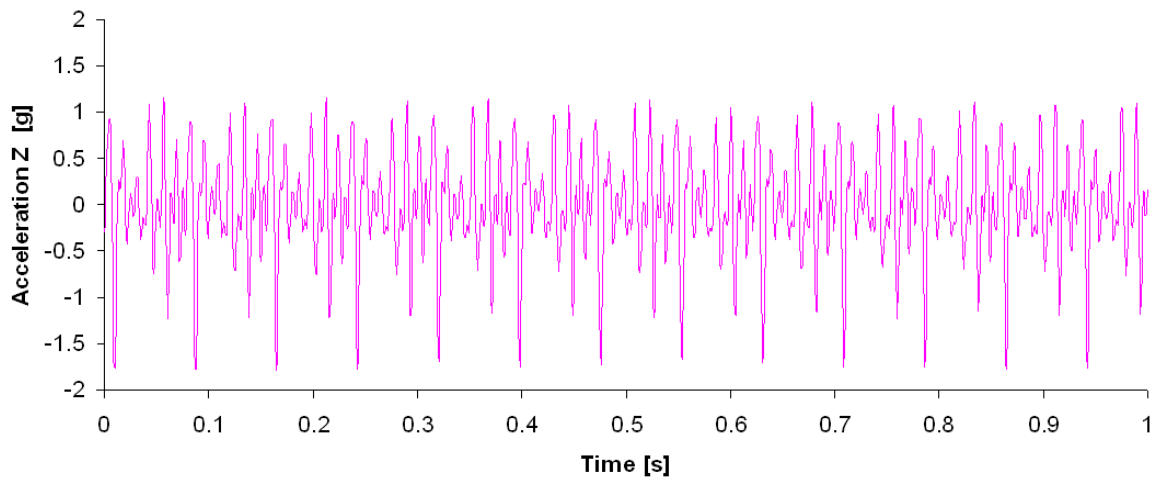


Gráfico 12: Carregamentos dinâmicos na direção “z”.  
Fonte: (O&M Fabricante de Motores Brasil, 2011)

### 3.2.4 Critérios adotados

Na análise modal, a primeira frequência natural do conjunto deve ser igual ou maior do que 182,00 [Hz]. O valor da frequência é calculado em função da rotação máxima, número de cilindros do motor, utilizando-se fator de segurança, conforme o diagrama de Campbell.

Devido à ductilidade dos materiais analisados e do estado plano de tensões, serão estudados os resultados de tensões de *von Mises*. Nas análises estáticas de pressão no bocal do tubo e termoelástica, as máximas tensões de *von Mises* no suporte estudado não devem exceder o limite de fadiga calculado do seu material.

Na análise dinâmica, as máximas tensões de *von Mises* no suporte estudado não devem exceder o limite de fadiga calculado do seu material.

### 3.3 MÉTODOS EXPERIMENTAIS

#### 3.3.1 Ensaio de Fadiga

O limite de resistência determinado pelo ensaio de tração é função da carga máxima atingida durante o teste, após o qual ocorre a ruptura do material. Ficou então estabelecido que o material não se rompa com uma carga menor que aquela, quando submetido a esforços estáticos. Entretanto, quando são aplicados esforços dinâmicos a um material metálico, o mesmo pode romper-se com uma carga bem inferior à carga máxima atingida na tração ou na compressão. Neste caso, tem-se a chamada ruptura por fadiga do material.

O ensaio de fadiga realizado consiste em colocar valores de resistência à fadiga do material para um determinado número de ciclos de tensões axiais. Para tanto, foi desenvolvido um dispositivo para simular o comportamento do suporte do tubo de admissão de ar no conjunto do motor de um veículo comercial.

Para determinar os esforços de tração e compressão no suporte, foi desenvolvido um modelo de elementos finitos a partir da geometria desenvolvida para o dispositivo que será utilizado no ensaio dinâmico. Foram aplicadas as mesmas condições de contorno do ensaio, mantendo a base do dispositivo engastada, considerando o contato do suporte analisado com as demais peças do dispositivo, parafusos e porcas. A malha de elementos finitos do suporte é a mesma utilizada nas demais simulações. Para as demais peças foram utilizados elementos sólidos hexaédricos. O material utilizado para a simulação do dispositivo tem as características de um aço genérico. Como carregamento estático, aplicou-se uma carga axial unitária. Com o resultado de máxima tensão de *von Mises* para o carregamento unitário, pode-se determinar o deslocamento necessário do cilindro servo-hidráulico do ensaio, para atingir o mesmo valor de tensão utilizado para calcular o número de ciclos pelo procedimento de Shigley.

A Figura 16 apresenta o modelo de elementos finitos utilizado para determinar o deslocamento necessário no dispositivo para que a tensão máxima obtida seja a mesma do modelo completo do motor para a análise estática de pressão no bocal do tubo de admissão de ar. Pela ordem, (a) malha hexaédrica, carregamento unitário e condições de contorno; (b) deslocamento necessário no dispositivo para que a tensão máxima apresentada em (c) seja igual a do modelo completo do motor. As regiões em contato do suporte com o dispositivo representam o contato das regiões do suporte com o modelo real.

As Figuras 17 e 18 apresentam os desenhos de fabricação e perspectivas ilustradas das peças que foram fabricadas, suporte superior e inferior, respectivamente. A Figura 19 apresenta o desenho e a perspectiva ilustrada do conjunto que foi montado para realizar o ensaio de fadiga.

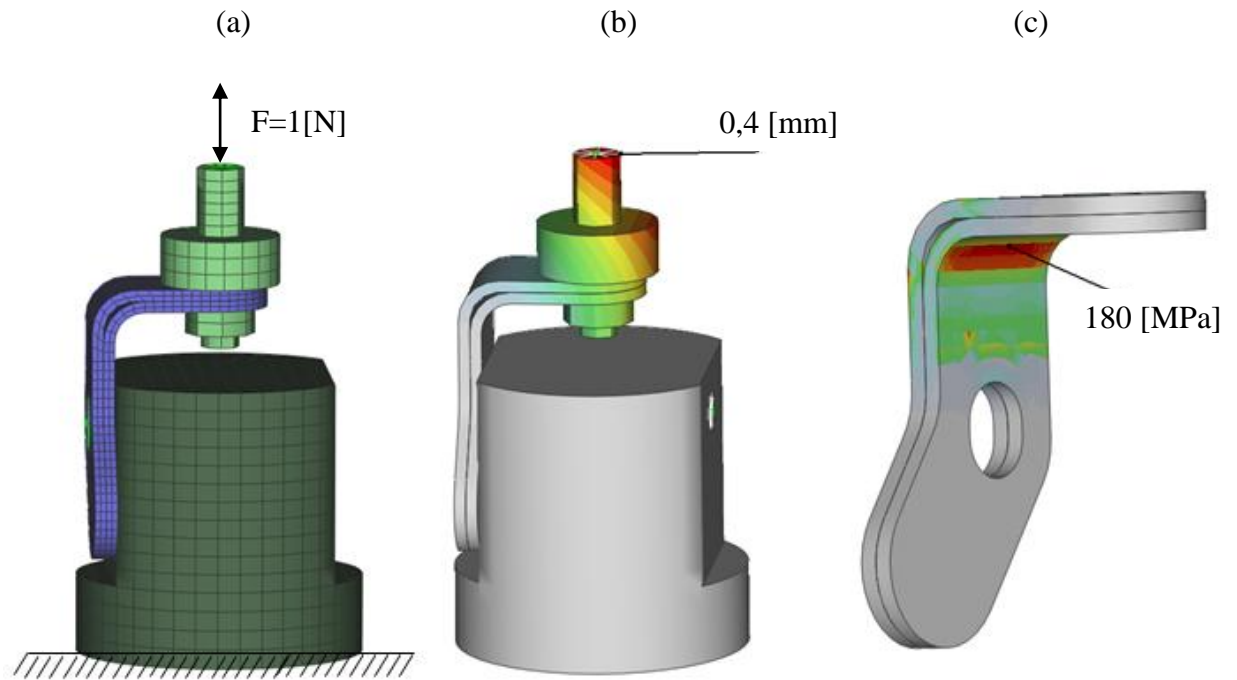


Figura 16: Modelo de elementos finitos para determinar o deslocamento do dispositivo para o ensaio de fadiga.

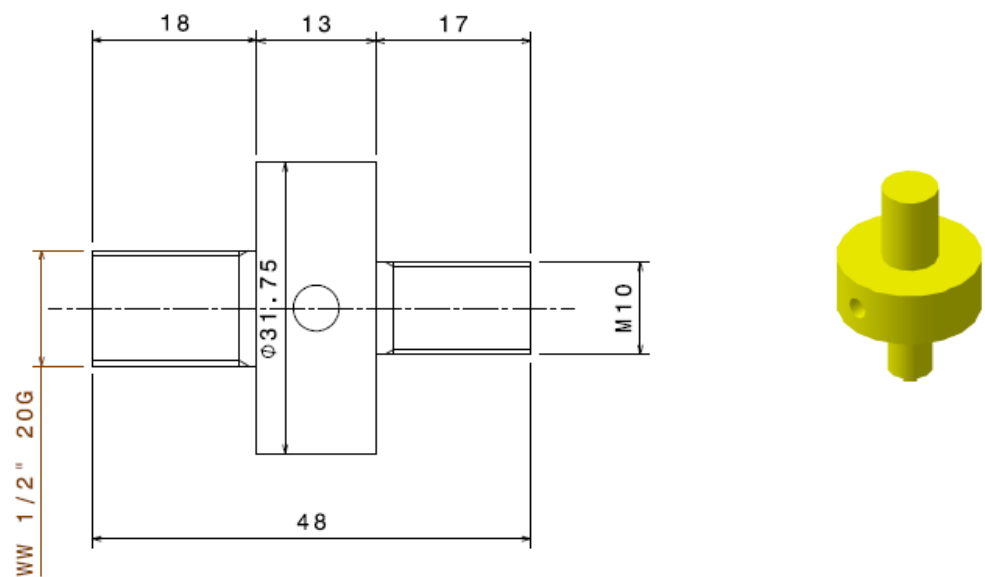


Figura 17: Desenho de fabricação e perspectiva ilustrada do suporte superior fabricado para o ensaio de fadiga.

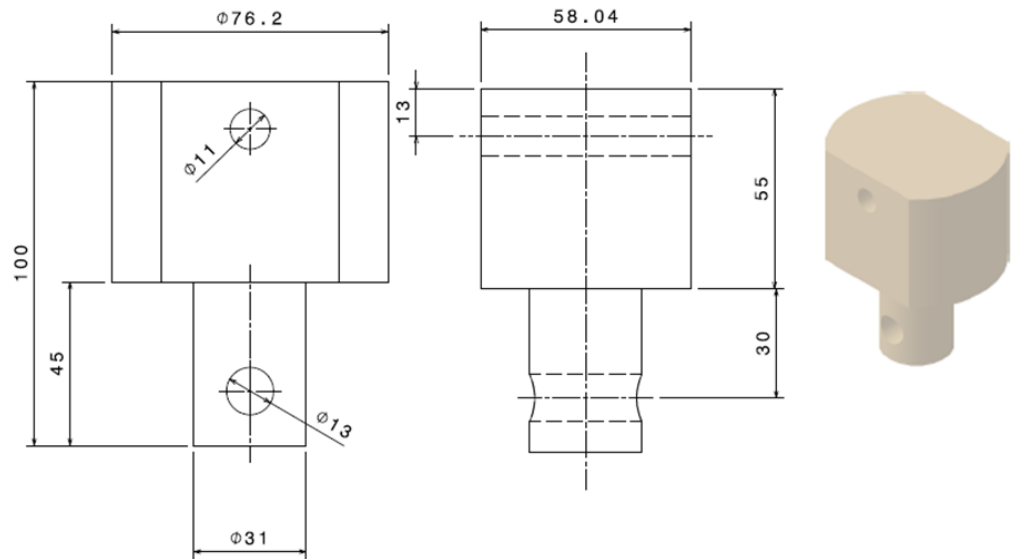


Figura 18: Desenho de fabricação e perspectiva ilustrada do suporte inferior fabricado para o ensaio de fadiga.

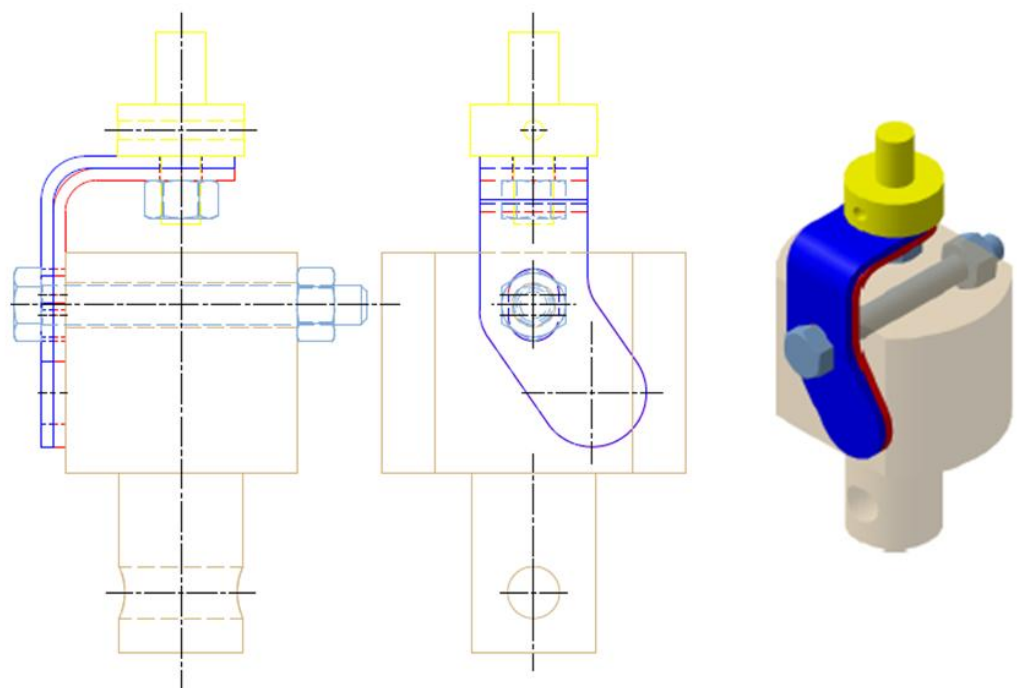


Figura 19: Desenho e perspectiva ilustrada da montagem do dispositivo para o ensaio de fadiga.

Na parte superior (em amarelo) do suporte deve ser aplicado o carregamento calculado. Na parte inferior será fixa na base da máquina de ensaio de fadiga.

Os resultados são comparados com os obtidos por meio do método dos elementos finitos.

A Figura 20 apresenta o dispositivo fabricado, montado com o suporte, na máquina de ensaio dinâmico MTS, modelo 830.

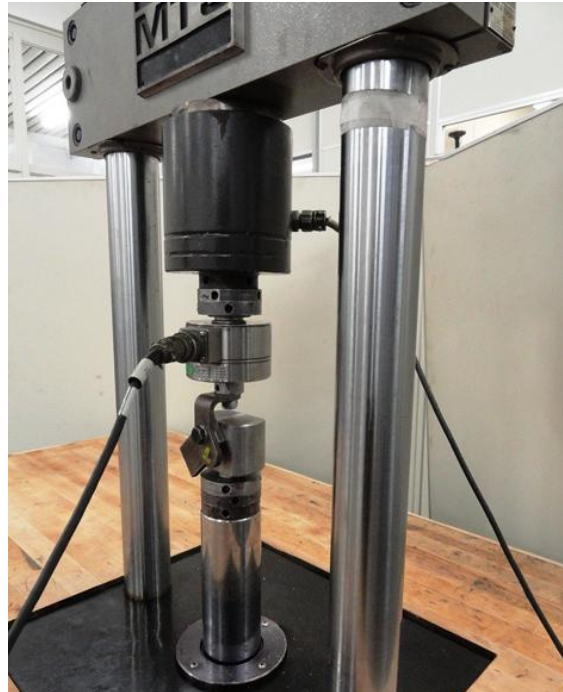


Figura 20: Dispositivo e suporte montados na máquina de ensaio dinâmico.

O programa computacional utilizado como interface com o dispositivo de ensaio foi o MTS Flextest 60. A Figura 21 apresenta a interface gráfica com as configurações de formato de onda senoidal, frequência de 18 [Hz] e carregamento de 0,4 [mm] positivo e negativo, determinado no modelo de elementos finitos e utilizado no ensaio.

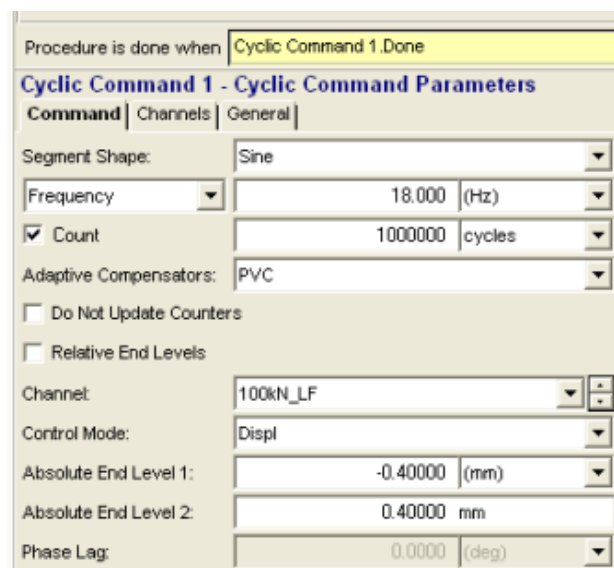


Figura 21: Interface gráfica do programa MTS Flextest 60.

### 3.3.2 Metalografia Óptica

Foram realizadas análises metalográficas com o objetivo de comparar as microestruturas dos materiais S260NC atual e do S700MC proposto, e também de relacionar com os resultados dos cálculos. As seguintes etapas para preparação da amostra foram utilizadas: ASTM E3 ed.11, E7-03 R09 e E407. A seguir apresenta-se um resumo das etapas para a realização dos ensaios metalográficos:

- Corte: a amostra a ser analisada deve ser cortada de forma a não sofrer alterações pelo método de corte. Usa-se o método a frio, com serras, para o corte primário, ou seja, para se separar a porção aproximada que é analisada. Na sequência, usa-se um equipamento denominado *Cut-Off* que faz um corte mais preciso, utilizando-se de um fino disco abrasivo e farta refrigeração, a fim de não provocar alterações por calor na amostra.
- Embutimento metalográfico: o processo de embutimento metalográfico pode ser dividido em dois grupos, embutimento a quente no qual é utilizado baquelite e uma embutidora metalográfica e o embutimento a frio que são utilizados dois produtos, resina e catalisador, ambos os métodos visam obter a amostra embutida para conseguir um bom resultado na preparação metalográfica.
- Lixamento: são utilizadas lixas do tipo "Lixa d'água", fixadas em discos rotativos. Normalmente inicia-se o lixamento com a lixa de granulometria 220, seguida pelas lixas 320, 400 e 600. Em alguns casos usa-se lixas mais finas que a lixa 600, chegando-se a 1000 ou 1200. Todo o processo de lixamento é feito sob refrigeração com água.
- Polimento: a etapa do polimento é executada em geral com panos especiais, colados em pratos giratórios, sobre os quais são depositadas pequenas quantidades de abrasivos. Estes abrasivos variam em função do tipo de metal que está sendo preparado. Os mais comuns são, o óxido de alumínio (alumina) e a pasta de diamante.
- Ataque químico: há uma enorme variedade de ataques químicos para diferentes tipos de metais e situações. Em geral, o ataque é feito por imersão da amostra, durante um período de aproximadamente 20 segundos, assim a microestrutura é revelada. Um dos reagentes mais usados é o NITAL (ácido nítrico e álcool), que funciona para a grande maioria dos metais ferrosos.



### 3.3.3 Ensaio de Dureza

Para efeito comparativo entre os materiais atual e proposto, S260NC e S700MC respectivamente, assim como para fazer a verificação da dureza conforme a norma dos materiais, foram realizados ensaios de dureza.

Para a determinação da dureza foi utilizado um durômetro *Wolpert*, identificação 1028 com escala 445 [N]. Este durômetro pertence aos Laboratórios TORK, é certificado pela RBC/*Holtermann* 13.981/11 válido até 01/2013. Os ensaios de dureza foram realizados conforme a norma ASTM E18, Ed. 08b.

SOUZA (1982) descreve que a propriedade mecânica denominada dureza é largamente utilizada na especificação de materiais, nos estudos e pesquisas mecânicas e metalúrgicas e na comparação de diversos materiais. Para um metalurgista, dureza significa resistência à deformação plástica permanente. Um engenheiro mecânico define dureza como resistência a penetração de um material duro no outro. Para um projetista, a dureza é considerada uma base de medida para o conhecimento da resistência e do tratamento térmico ou mecânico de um metal e de sua resistência ao desgaste. Para um técnico de usinagem de metais, a dureza fornece uma medida de resistência ao corte do metal. Para um mineralogista, a dureza tem um significado diferente, utilizado para medir a resistência a um risco que um material pode fazer no outro.

Assim, não é possível encontrar uma definição de dureza que englobe todos os significados mencionados, mesmo porque, existem diferentes tipos de medidas adequados. Sob esse ponto de vista, dividi-se o ensaio de dureza em três tipos principais, que dependem da maneira como o ensaio é conduzido. O ensaio pode ser feito por penetração, por choque e por risco. A dureza por penetração é a mais utilizada no campo da metalurgia e mecânica.

O ensaio de dureza Rockwell é simples e rápido. O valor da dureza do material é lido diretamente no equipamento. A dureza é inversamente proporcional à profundidade de penetração obtida pela aplicação da carga. O ensaio de dureza realizado neste trabalho é baseado na profundidade de penetração de uma ponta, subtraída da recuperação elástica devida à retirada de uma carga maior e da profundidade causada pela aplicação de uma carga menor. Os penetradores utilizados na dureza Rockwell são do tipo esférico (esfera de aço temperado) ou cônico (cone de diamante).

Com qualquer desses penetradores, a carga menor é então aplicada para fixar bem o corpo de prova, ou seja, para garantir o contato firme com a superfície do corpo de prova.

Depois de aplicada e retirada a carga maior, a profundidade de impressão é dada diretamente no mostrador da máquina, em forma de um número de dureza, após voltar a carga ao valor menor. A leitura deve ser feita numa escala apropriada ao penetrador e à carga utilizada. A escala utilizada foi a escala B, onde o penetrador é uma esfera de 1,59 [mm], a carga maior utilizada é de 100 [Kgf], utilizada para aplicações como ligas de cobre, aços, ligas de alumínio e ferro maleável.

A Figura 22 apresenta a sequência de operações para a realização do ensaio de dureza Rockwell. Pela ordem, (a) aplica-se a pré-carga, relógio em 0; (b) a carga total é aplicada; (c) retira-se a carga para a leitura possa ser feita.

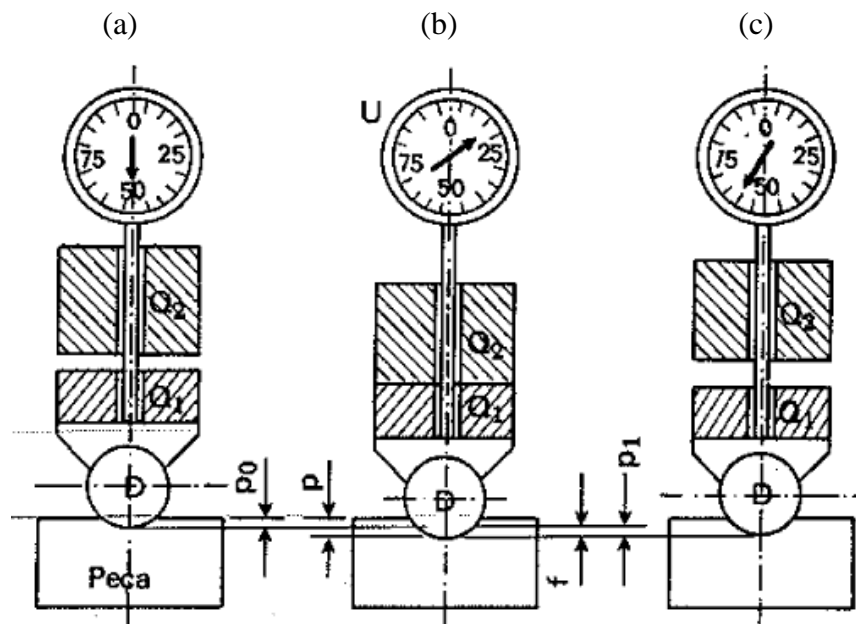


Figura 22: Dispositivo e suporte montados na máquina de ensaio dinâmico.

### 3.3.4 Análise química

Para efeito comparativo da composição química dos materiais atual e proposto, S260NC e S700MC respectivamente, assim como para fazer a verificação da liga conforme a norma dos materiais, foram realizados ensaios para análise química.

Para a determinação da composição química foram realizadas análises nos Laboratórios TORK conforme procedimentos internos do laboratório. Procedimentos TORK utilizados: P-103, P-501, P-502, P-503, P-504, P-507, P-508, P-514, P-515, séries P-200 e P-300.

A análise química é o conjunto de técnicas de laboratório utilizadas na identificação das espécies químicas envolvidas em uma reação, como também a quantidade dessas espécies. As análises químicas podem ser realizadas de três diferentes formas: quantitativamente, qualitativamente ou apenas imediata.

A análise imediata consiste em isolar as espécies que constituem o material, esse isolamento pode ser feito manualmente. Por exemplo, se queremos analisar uma amostra sólida e esta estiver inserida em um meio líquido, é preciso retirar este sólido do meio aquoso.

A análise qualitativa é uma etapa que identifica a composição do material. É preciso instrumentos apropriados para executar este procedimento. O resultado neste caso pode ser obtido pela mistura de outro componente à mistura.

A análise quantitativa é a análise mais criteriosa, pois além de saber do que se trata o material ainda é preciso saber a quantidade do componente em questão dentro da amostra.

Tais procedimentos podem ser descritos conforme metodologia de análise química pelo método de emissão óptica. A técnica de espectrometria de emissão óptica utiliza uma faísca de alta energia criada através de uma abertura de argônio, preenchida entre um eletrodo e uma amostra do material a ser analisado. A faísca emite radiação a partir da excitação da superfície da amostra, que possui comprimentos de onda característicos da composição elementar. O espectro da radiação é separado em linhas de elementos distintos e a intensidade de cada linha é medida. Finalmente, o espectro é precisamente convertido em valores de concentração para cada elemento químico presente na composição do corpo de prova.

As aplicações típicas envolvem a determinação do teor de liga de ferro e de aço, alumínio, cobre, níquel, zinco, chumbo e muitos outros metais e ligas. A espectrometria de emissão óptica continua a ser a técnica de referência para a análise química direta de

amostras de sólidos metálicos. A combinação inigualável de precisão, alta velocidade, precisão, estabilidade e confiabilidade tornaram uma ferramenta indispensável para a produção e verificação da qualidade de produtos metalúrgicos.

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Inicialmente foi necessário determinar o limite de fadiga dos materiais analisados, utilizados como critério de projeto. O cálculo foi feito segundo a equação e os fatores de modificação para o limite de resistência de um aço conforme MARIN (1962).

$$\sigma_{\text{Fad}} = k_a \cdot k_b \cdot k_c \cdot k_d \cdot k_e \cdot k_f \cdot (\sigma_{\text{Esc}} \times 0,5) \quad (36)$$

Equação de Marin para o limite de fadiga de um aço.

Onde:

$k_a = 0,88$  para aços laminados - fator de modificação de condição de superfície;

$k_b = 0,85$  para a espessura de 3,00 [mm] da peça estudada - fator de modificação de forma;

$k_c = 1,00$  para o carregamento de flexão o qual a peça está sujeita - fator de modificação de carregamento;

$k_d = 1,02$  para a temperatura de trabalho da peça (100° [C]) - fator de modificação da temperatura;

$k_e = 1,00$  - fator de confiança;

$k_f = 1,00$  - fatores de modificações diversas;

$\sigma_{\text{Esc}} = 240$  [MPa] para o material atual S260NC e 700 [MPa] para o material proposto S700MC – Tensão limite de escoamento.

$\sigma_{\text{Fad}} = 127$  [MPa] para o material atual S260NC e 159 [MPa] para o material proposto S700MC - Limites de fadiga calculado e utilizado como critério de avaliação.

Para o material atual, S260NC, o suporte do tubo de admissão de ar em estudo, apresentou seu primeiro modo natural de vibrar no conjunto do motor na frequência de 157,21 [Hz]. A Tabela 8 e a Figura 23 apresentam os resultados da análise modal.

Tabela 8: Resultado da Análise Modal

Análise Modal	Frequência Natural [Hz]	Versor de deslocamento		
		x	y	Z
1º Modo	157,21	-0,67	-0,59	-0,44

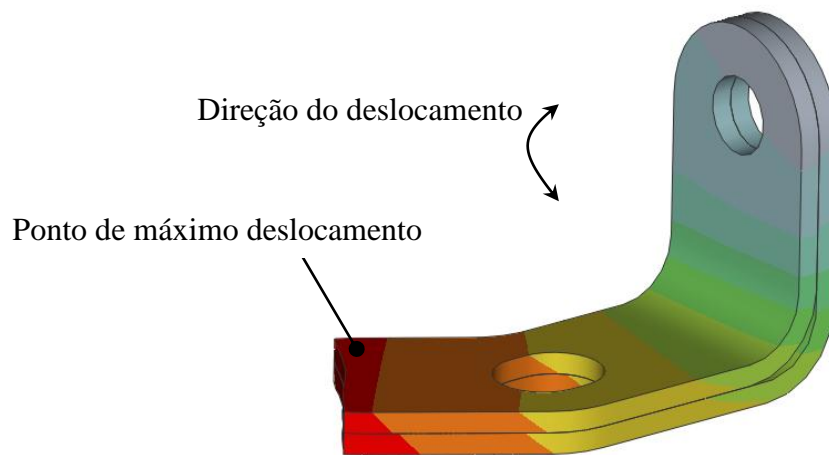


Figura 23: Resultado da análise modal.

Os resultados das análises estáticas de pressão no bocal do tubo de admissão de ar e termoelástica e da análise dinâmica são apresentadas respectivamente nas Figuras 24, 25 e 26. A Tabela 9 apresenta um resumo dos resultados obtidos nas análises estáticas e análise dinâmica realizadas.

As tensões de *von Mises* são apresentadas em porcentagem do limite de fadiga do material calculado e utilizado como critério de avaliação. Os valores com um quadro vermelho nas Figuras 24, 25 e 26 e destacados em vermelho na Tabela 9 apresentaram as tensões de *von Mises* acima do limite de fadiga.

Tabela 9: Resumos dos resultados das análises estáticas e dinâmica.

Análises	Suporte do Tubo de admissão de Ar $\sigma_{\text{Fad}} = 127 \text{ [MPa]}$
Pressão no bocal do tubo de admissão de ar	142%
Termoelástica	55%
Dinâmica	98%

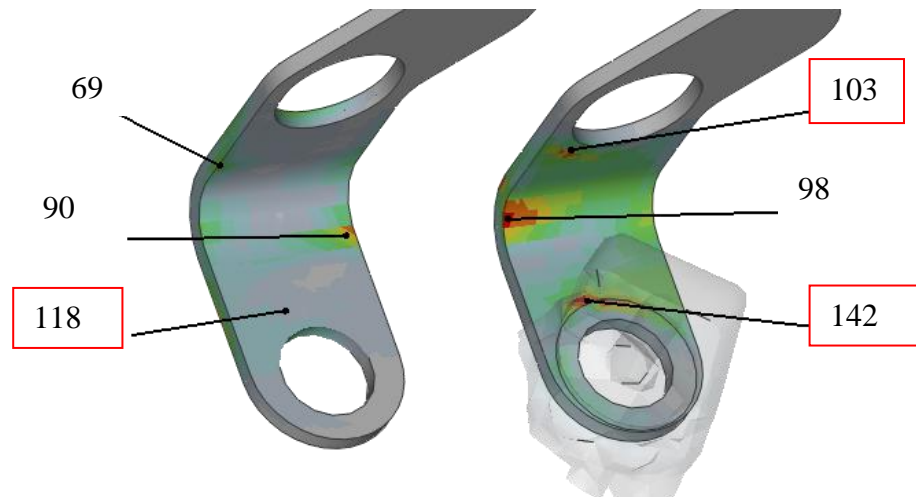


Figura 24: Resultado da análise estática de pressão no bocal do tubo de admissão de ar.

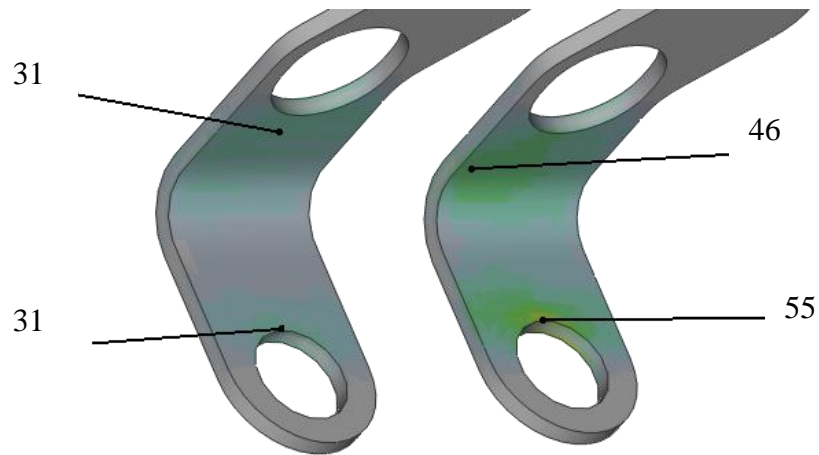


Figura 25: Resultado da análise estática termoelástica.

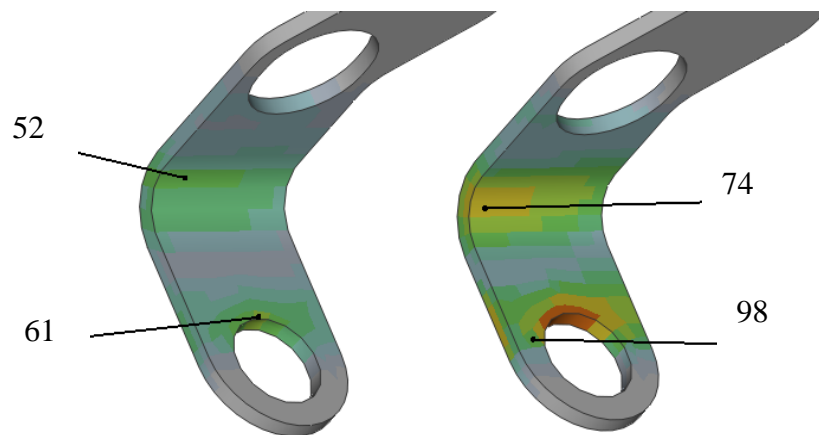


Figura 26: Resultado da análise dinâmica.

Para o material proposto, S700MC, o suporte do tubo de admissão de ar em estudo, apresentou resultados idênticos ao do material atual, pois os dados de entrada do material proposto utilizados via elementos finitos são os mesmos (módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson e densidade). Logo, seu primeiro modo natural de vibrar no conjunto do motor na frequência também é de 157,21 [Hz]. A Tabela 8 e a Figura 23 apresentam os resultados da análise modal.

Os resultados das análises estáticas de pressão no bocal do tubo de admissão de ar e termoelástica e da análise dinâmica para o material proposto S700MC são apresentadas respectivamente nas Figuras 27, 28 e 29. A Tabela 10 apresenta um resumo dos resultados obtidos nas análises estáticas e análise dinâmica realizadas.

As tensões de *von Mises* são apresentadas em porcentagem do limite de fadiga do material calculado e utilizado como critério de avaliação. Os valores com um quadro vermelho nas Figuras 27, 28 e 29 e destacados em vermelho na Tabela 10 apresentaram as tensões de *von Mises* acima do limite de fadiga.

Tabela 10: Resumos dos resultados das análises estáticas e dinâmica.

Análises	Suporte do Tubo de admissão de Ar $\sigma_{\text{Fad}} = 159$ [MPa]
Pressão no bocal do tubo de admissão de ar	113%
Termoelástica	44%
Dinâmica	78%



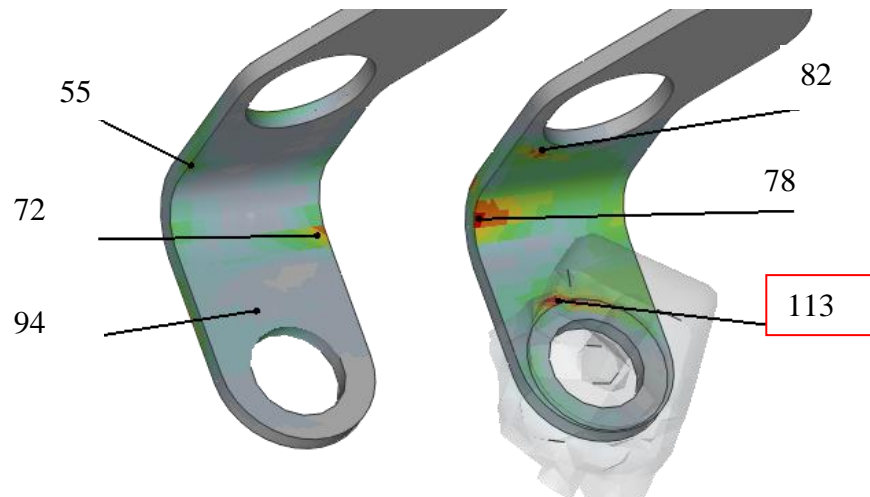


Figura 27: Resultado da análise estática de pressão no bocal do tubo de admissão de ar.

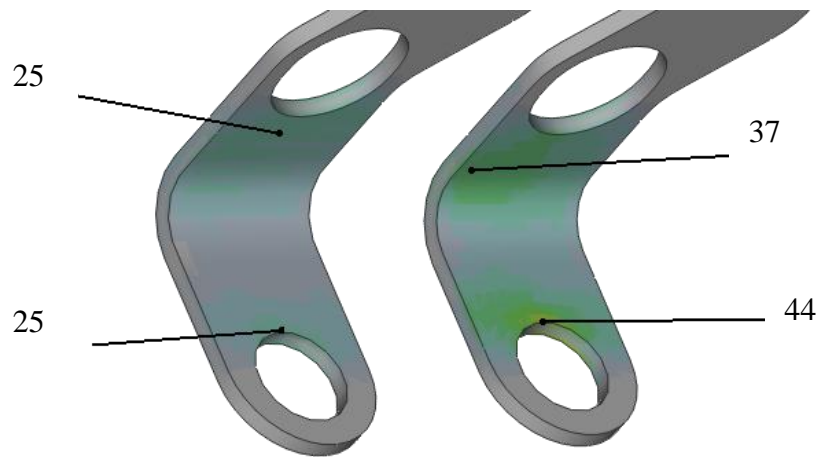


Figura 28: Resultado da análise estática termoelástica.

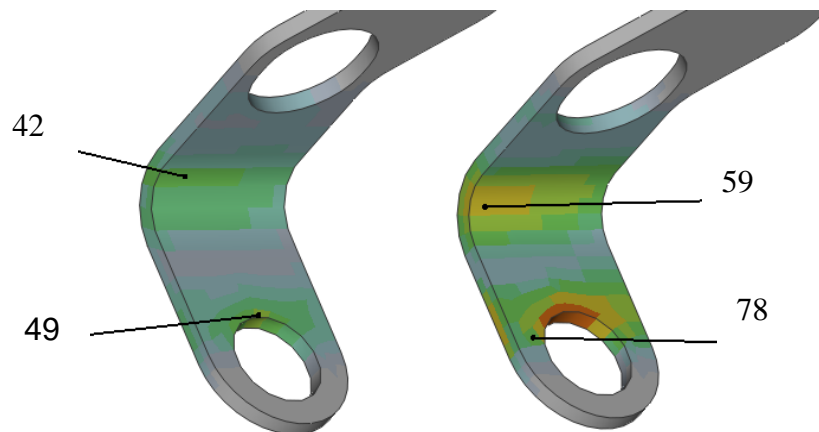
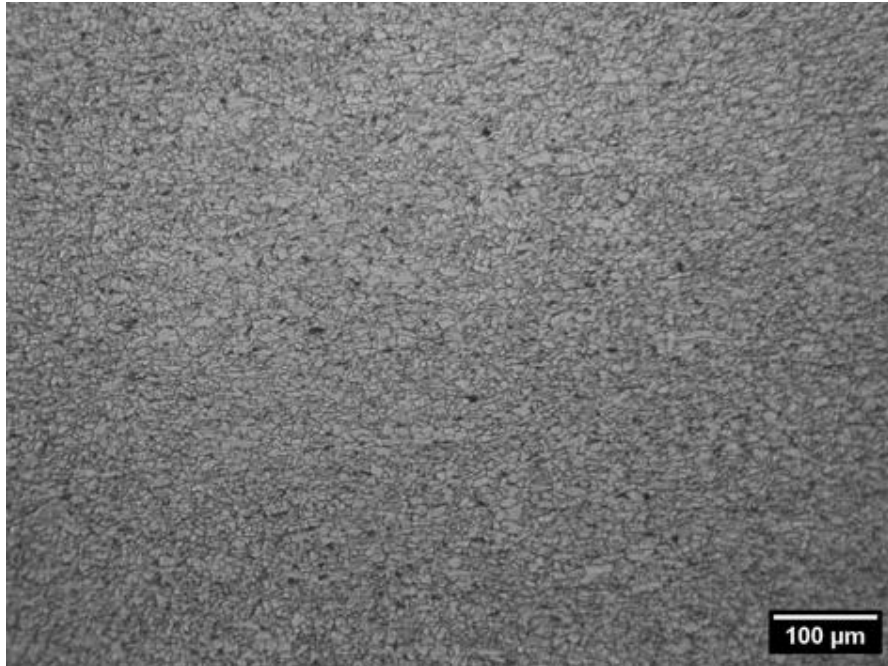
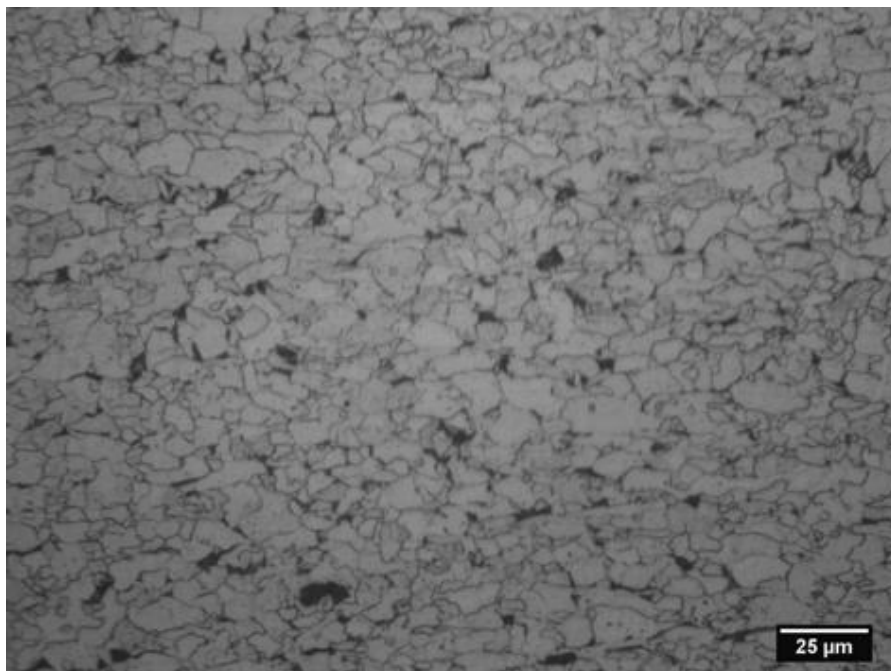


Figura 29: Resultado da análise dinâmica.

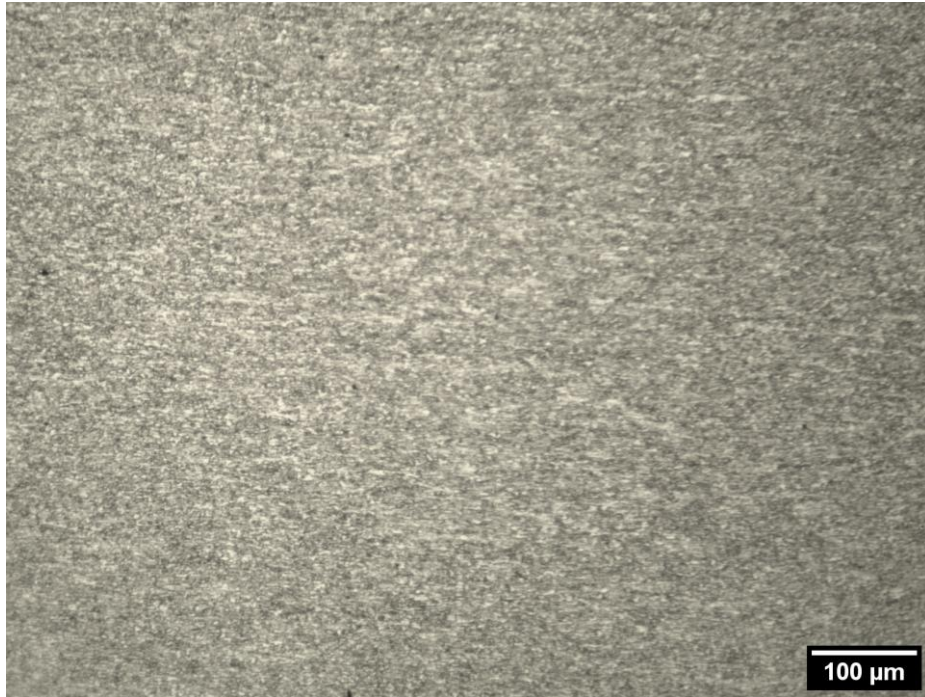
As microestruturas dos materiais S260NC (atual) e S700MC (proposto) foram verificadas. Nota-se que para o material S260NC, a microestrutura é ferrítica com ilhas dispersas de perlita, conforme apresentado nas Micrografias 1 e 2. Para o material S700MC, nota-se uma microestrutura constituída por grãos ferríticos encruados, com grãos alongados conforme Micrografias 3 e 4, o que justifica os valores encontrados nos ensaios dureza. O refino de grão é benéfico, aumentando o limite de resistência à fadiga.



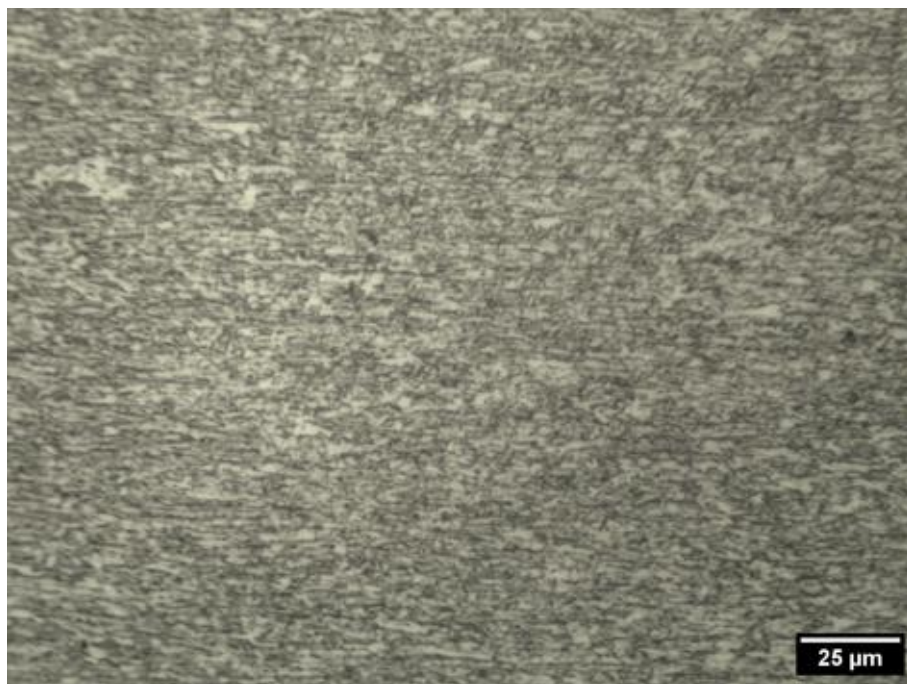
Micrografia 1: Microestrutura do material S260NC – 100x



Micrografia 2: Microestrutura do material S260NC – 400x



Micrografia 3: Microestrutura do material S700MC – 100x



Micrografia 4: Microestrutura do material S700MC – 400x

Os resultados da análise química em laboratório são apresentados na Tabela 11. A Tabela 12 apresenta a diferença entre a máxima porcentagem permitida pela norma e a porcentagem encontrada na análise química feita em laboratório. Valores destacados na cor vermelha estão indicando que a porcentagem química do elemento está acima do permitido pela norma.

Tabela 11: Análise da Composição química em laboratório dos Aços S260NC e S700MC.

<b>Mat.</b>	<b>C</b>	<b>Mn</b>	<b>Si</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Al</b>	<b>Nb</b>	<b>V</b>	<b>Ti</b>	<b>Mo</b>	<b>B</b>	<b>Cr</b>	<b>Ni</b>
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
S260NC	0,06	0,34	0,01	0,014	0,003	0,021	-	-	-	0,01	-	0,03	0,03
S700MC	0,09	1,45	0,03	0,024	0,003	0,034	-	-	-	0,01	-	0,52	0,02

Tabela 12: Diferença entre composição química de norma e analisada em laboratório dos Aços S260NC e S700MC.

<b>Mat.</b>	<b>C</b>	<b>Mn</b>	<b>Si</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Al</b>	<b>Nb</b>	<b>V</b>	<b>Ti</b>	<b>Mo</b>	<b>B</b>	<b>Cr</b>	<b>Ni</b>
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
S260NC	0,10	0,86	0,49	0,011	0,017	0,006	0,09	0,10	0,15	0,01	0,000	0,03	0,03
S700MC	0,03	0,65	0,00	0,001	0,012	0,019	0,09	0,20	0,22	0,49	0,005	0,52	0,02

A dureza obtida para os materiais S260NC atual e S700MC proposto são de 78 ROCKWELL B HRB e de 100 ROCKWELL B HRB respectivamente. A presença dos grãos ferríticos encruados assim como maior porcentagem de Manganês e Cromo na liga justificam a maior dureza do material proposto.

Para uma investigação mais detalhada da peça onde ocorreu a falha, foi realizada um fractografia. O objetivo foi examinar a origem da trinca e revelar a causa do que a iniciou. O suporte que falhou é fabricado com o material S260NC e o início da trinca ocorreu no mesmo ponto onde aparecem as máximas tensões de *von Mises* no modelo de elementos finitos. Este fato indica que o a modelagem matemática está consistentemente modelada.

A Figura 30 apresenta a região onde ocorre a falha no suporte em estudo. A Figura 31 mostra as marcas de praia que sugerem falha por fadiga. A Figura 32 apresenta as “marcas de catraca” que sugerem onde ocorre o início da trinca e evidencia a consistência do modelo matemático com a falha corrida no suporte.



Figura 30: Região onde ocorre a falha no Suporte.

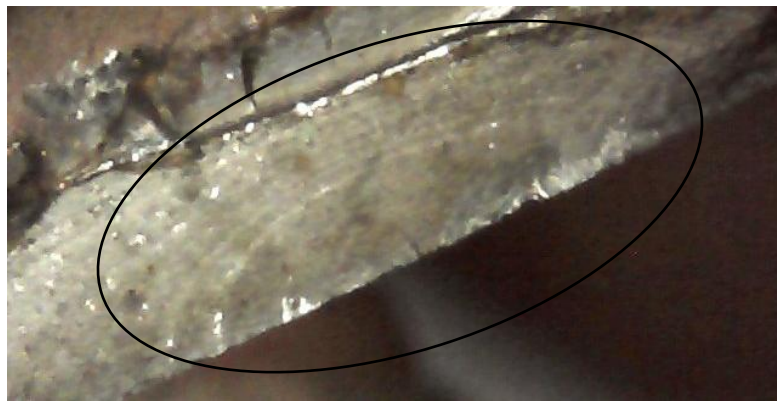


Figura 31: Marcas de praia.



Figura 32: Marcas de catraca.

O número de ciclos até a falha do suporte (Nf) foi calculado por meio do procedimento de Shigley (2008):

$$N_f = 10^6 * (\sigma_{Max} / \sigma_{Fad})^{1/b} \quad (37)$$

Equação para o cálculo do número de ciclos até a falha de uma peça mecânica.

Onde:

$\sigma_{Max}$  = Tensão máxima calculada atuando no sistema devido ao carregamento de pressão no bocal do tubo de admissão de ar;

$\sigma_{Fad}$  = Limite de fadiga em uma região crítica de uma peça mecânica para determinada geometria e condição de uso;

$$b = 1/3 (\log (0,9 * \sigma_{Rup} / \sigma_{Fad})). \quad (38)$$

Para a determinação do número de ciclos até a falha foram consideradas as tensões de ruptura, as máximas tensões de *von Mises* obtidas no cálculo de pressão no bocal do tubo de admissão de ar e as tensões limite de fadiga utilizadas como critério, para os materiais S260NC utilizado atualmente ( $\sigma_{Rup} = 340$  [MPa];  $\sigma_{Fad} = 127$  [MPa];  $\sigma_{Max} = 180$  [MPa]) e S700MC proposto para evitar a falha ( $\sigma_{Rup} = 750$  [MPa];  $\sigma_{Fad} = 159$  [MPa];  $\sigma_{Max} = 180$  [MPa]).

A Tabela 13 apresenta o número de ciclos calculado para o suporte em estudo atual e para a versão proposta. Valores das tensões *von Mises* apresentados em porcentagem do limite de fadiga calculado dos materiais.

Tabela 13: Número de ciclos (Nf) calculado para os materiais S260NC e S700MC.

Peça	Material	Tensões de <i>von Mises</i>	Vida em fadiga Nf [ciclos]
Suporte do tubo de admissão de ar	S260NC	142%	6,16 x e04
	S700MC	113%	5,32 x e05

Para o ensaio dinâmico, o carregamento de tração e compressão calculado a partir da simulação do dispositivo de ensaio pelo método dos elementos finitos, com carregamento unitário, para obter-se a mesma tensão utilizada para o cálculo do número de ciclos, é de 0,4 [mm] de deslocamento. Este carregamento foi utilizado como dado de entrada

no ensaio dinâmico, para comparar os resultados dos números de ciclos calculados, com os obtidos experimentalmente. Foram utilizadas seis amostras, sendo três do material S260NC atual e três do material S700MC proposto.

Em função do número de ciclos obtidos experimentalmente, da tensão de ruptura de norma do material e da máxima tensão calculada pelo método dos elementos finitos, pode-se obter através da equação de Shigley a tensão de fadiga experimental. Esse resultado de tensão de fadiga experimental nos permite comparar com a tensão de fadiga calculada pela equação de Marin, e dessa forma, verificar em porcentagem, o quanto o critério foi conservador para a peça estudada.

A Tabela 14 apresenta o número de ciclos obtido experimentalmente, a tensão limite de fadiga obtida em função no número de ciclos experimental e a diferença em porcentagem do limite de fadiga calculado com o experimental para o suporte estudado versão atual e para a versão proposta.

Tabela 14: Número de ciclos (Nf), limite de fadiga experimental e diferença em porcentagem dos limites de fadiga calculado e experimental para os materiais S260NC e S700MC.

Peça	Material	Amostra	Vida em fadiga Nf [ciclos]	$\sigma_{Fad}$ Experimental [MPa];	% [ $\sigma_{Fad}/\sigma_{Fad\ Experimental}$ ]
Suporte do tubo de admissão de ar	S260NC $\sigma_{Fad} = 127$ [MPa]	1	2,50e5	157	24%
		2	3,00e5	161	27%
		3	1,26e5	143	13%
	S700MC $\sigma_{Fad} = 159$ [MPa]	1	>1,00e6	180	13%
		2	7,00e5	168	6%
					Média

Para uma investigação mais detalhada das amostras testadas em laboratório onde ocorreram falhas, foi realizada fractografia. O objetivo foi examinar a origem da trinca e comparar com a falha ocorrida em campo. A região onde a falha ocorreu é a mesma região da falha ocorrida em campo. Pode-se notar “marcas de catraca” semelhantes às ocorridas em campo, e início da trinca em um dos pontos de maior tensão de *von Mises* calculados, indicando consistência do experimento com o modelo matemático e com a falha ocorrida em campo.

A Figura 33 apresenta a região onde ocorreu falha no ensaio de fadiga para o suporte com material S260NC, amostra 1. A Figura 34 mostra as “marcas de catraca” da região A da amostra 1 do material S260NC, que sugerem onde ocorre o início da trinca e evidencia a consistência do experimento com o modelo matemático e com a falha ocorrida em campo. Marcas de praia não podem ser notadas, pois a falha correu por fadiga em laboratório. A Figura 35 mostra as marcas de catraca na região B da amostra 1, material S260NC.

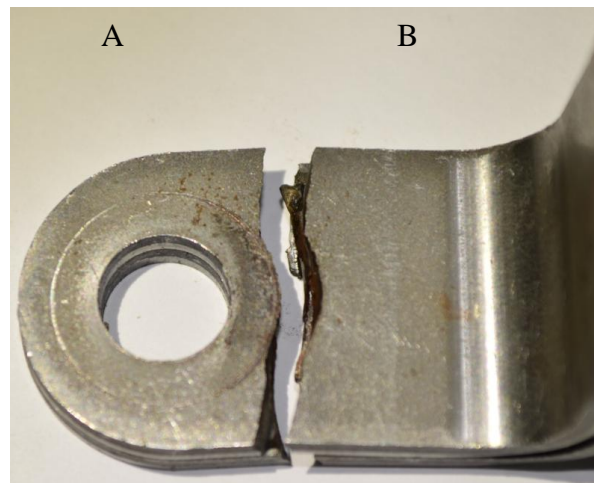


Figura 33: Região onde ocorre a falha no suporte com material S260, amostra 1.



Figura 34: Marcas de catraca, material S260NC, amostra 1, região A.



Figura 35: Marcas de catraca, material S260NC, amostra 1, região B.



A Figura 36 apresenta a região onde ocorreu falha no ensaio de fadiga para o suporte com material S260NC, amostra 2. A Figura 37 mostra as “marcas de catraca” da Região A da amostra 2 do material S260NC. A Figura 38 mostra as marcas de catraca na região B da amostra 2, material S260NC.

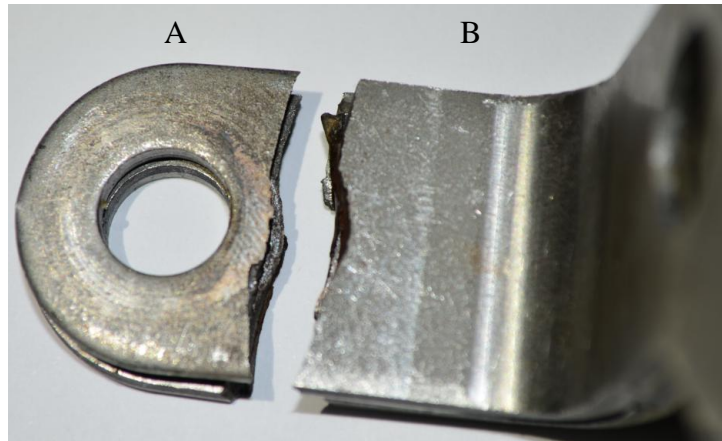


Figura 36: Região onde ocorre a falha no suporte com material S260, amostra 2.

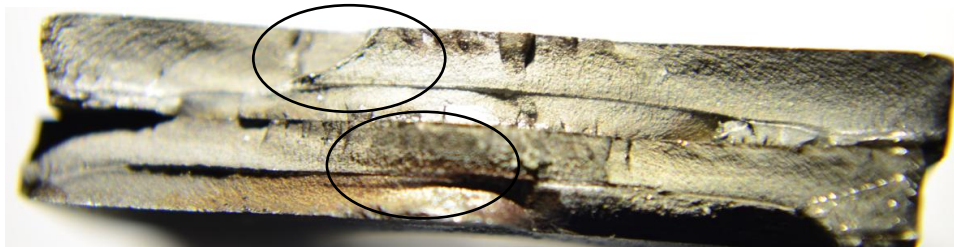


Figura 37: Marcas de catraca, material S260NC, amostra 2, região A.



Figura 38: Marcas de catraca, material S260NC, amostra 2, região B.

A Figura 39 apresenta a região onde ocorreu falha no ensaio de fadiga para o suporte com material S260NC, amostra 3. A Figura 40 mostra as “marcas de catraca” da Região A da amostra 3 do material S260NC. A Figura 41 mostra as marcas de catraca na região B da amostra 3, material S260NC.

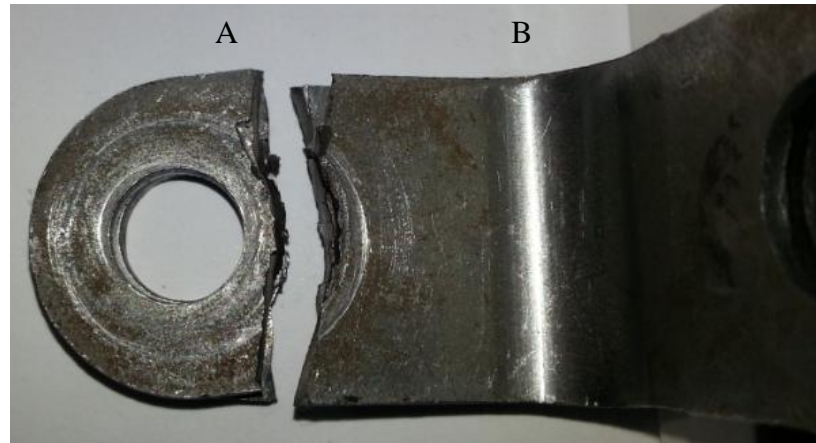


Figura 39: Região onde ocorre a falha no suporte com material S260, amostra 3.



Figura 40: Marcas de catraca, material S260NC, amostra 3, região A.



Figura 41: Marcas de catraca, material S260NC, amostra 3, região B.

A Figura 42 apresenta a amostra 1 do material S700MC que não ocorreu falha até  $1,00 \times 10^6$  ciclos.



Figura 42: Suporte sem falha com material S700MC, amostra 01.

A Figura 43 apresenta a região onde ocorreu falha no ensaio de fadiga para o suporte com material S700MC, amostra 2. A Figura 44 mostra as “marcas de catraca” da Região A da amostra 2 do material S700MC. A Figura 45 mostra as marcas de catraca na região B da amostra 2, material S700MC.

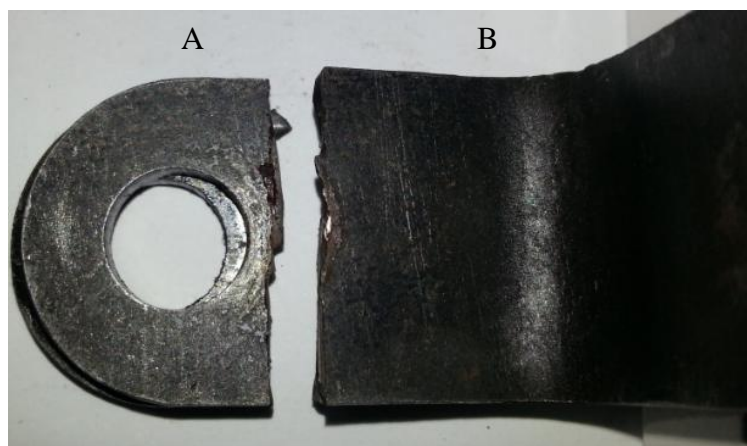


Figura 43: Região onde ocorre a falha no suporte com material S700MC, amostra 2.



Figura 44: Marcas de catraca, material S700MC, amostra 2, região A.



Figura 45: Marcas de catraca, material S700MC, amostra 2, região B.

## 5 CONCLUSÕES

As análises computacionais pelo método dos elementos finitos e os ensaios realizados em laboratório evidenciaram as seguintes conclusões:

Para análise modal, o primeiro modo de vibrar do suporte aparece na frequência de 157,21 [Hz]. Embora o suporte estudado seja excitado em uma frequência de motores diesel de seis cilindros que não atende o critério estabelecido, as tensões de *von Mises* apresentadas na análise dinâmica no suporte estão abaixo dos limites dos materiais atual e proposto, sugerindo que vibração não é a causa da falha do suporte.

Para a análise termoelástica, o suporte apresentou tensões de *von Mises* abaixo do limite de fadiga do material, sugerindo que a dilatação térmica não está causando a falha do componente.

A pressão no bocal do tubo de admissão de ar demonstrou ser a sollicitação crítica no suporte, visto que para este carregamento, os resultados de tensão de *von Mises* no suporte apresentaram-se acima do limite de fadiga, tanto para o material atual, quanto para o material proposto.

O suporte do tubo de admissão de ar não está, portanto de acordo com os critérios que foram utilizados para os cálculos, o que confirma a falha que está ocorrendo nos veículos que o utilizam.

Devido ao suporte, para ambos os materiais, versão atual onde ocorre a falha e para a versão com o material que está sendo proposto, apresentarem tensões acima do limite de fadiga calculado, os números de ciclos até que falhas ocorram foram calculados.

O suporte com o material S260NC atualmente utilizado, para uma tensão de 42% acima do limite de fadiga calculado, apresentou número de ciclos de fadiga de baixo ciclo em  $6,16 \times 10^4$  ciclos, confirmando a falha ocorrida nos veículos que o utilizam.

O suporte fabricado com o material que está sendo proposto S700MC, por ter um limite de fadiga superior, reduziu o valor em porcentagem do limite de fadiga em 29%, apresentando tensões de 13% acima do limite de fadiga, e melhorando a vida em fadiga em  $4,70 \times 10^5$  ciclos, ou meia vida de um componente dimensionado para  $1,00 \times 10^6$  ciclos.

A região de onde ocorreu a falha nas amostras dos suportes testados em laboratório é a mesma da falha ocorrida em campo, demonstrando consistência do dispositivo e carregamento cíclico utilizados para o ensaio de fadiga.

A tensão limite de fadiga obtida através do número de ciclos obtido experimentalmente variou de 13% a 27% para o material S260NC e de 4% a 13% para o

material S700MC, uma média de 16% em relação ao limite de fadiga calculado analiticamente.

Uma amostra do material proposto S700MC chegou a  $1,00 \times 10^6$  ciclos, o que pelo critério utilizado, indica que o mesmo pode ter vida infinita.

Os resultados do ensaio de fadiga indicam que o limite de fadiga utilizado como critério para o cálculo através do método dos elementos finitos foi conservador, apesar dos limites de fadiga calculados analiticamente e experimentalmente possuírem valores próximos, e demonstra que os métodos utilizados estão consistentes.

## REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6152: *Materiais Metálicos – determinação das propriedades mecânicas à tração*, 1992.
- ALVES, Avelino. *Elementos Finitos*. Editora Erica, 2ª ed., 2002.
- AZEVEDO, Álvaro F.M. Método dos Elementos Finitos. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1ª ed., 2003.
- BATHE, Klaus-Jürgen. *Numerical Methods in Finite Element*. Prentice Hall, 1976.
- BAPTÍSTA, A. L. B. et all – *A Metalografia Colorida de Aços*. 54º Congresso da ABM, 25 a 29 de Julho de 1999, São Paulo – SP.
- BEER Ferdinand .P. e JOHNSTON E..Russel, Jr., *Resistência dos Materiais*,.Editora McGraw-Hill, São Paulo, 1982.
- BEER Ferdinand .P. e JOHNSTON E..Russel, Jr., *Mecânica Vetorial para Engenheiros. Estática, Cinemática e Dinâmica*, Volumes I e II, Revisada, Editora Makron Books, 5ª Edição, São Paulo, 1994.
- BENITEZ, Daniel B. *Tensões residuais devido a carregamento mecânico excessivo e sua influência no comportamento à fratura*. Tese de Doutorado em Engenharia, EPUSP, São Paulo, 2001.
- CALLISTER, W. D. JR., *Fundamento da Ciência e Engenharia de Materiais*,Rio de Janeiro, 2ª edição, 2006
- CAMPBELL, W., *The Protection of Steam Turbine Disk Wheels from Axial Vibration*, Trans. ASME, Vol. 1924.
- COLPAERT. Hubertus. - *Metalografia dos produtos comuns* - revista e atualizada por COSTA E SILVA, André Luiz V. São Paulo: Editora Blucher, 4ª. ed 2008.
- HIBBELER, Russell C., *Resistência dos Materiais*. Editora LTC- Livros Técnicos e Científicos, 3ª Ed, 1997.
- INSTITUTO ALEMÃO PARA NORMATIZAÇÃO. DIN EN 1563: *Spheroidal Graphite Cast Iron*.1997.
- INSTITUTO ALEMÃO PARA NORMATIZAÇÃO. DIN 17 100: *Steels for General Purpose*.1997.
- MADDOX S. J., *Fatigue Stenght of Welded Structures*., Abington Publishing, 2ª Edição, 1991.
- MARIN, J., *Mechanical Behavior of Engineering Materials*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1962, p. 224.

NEGRETTI, T.B., *Structural Analysis Report N1004-465: P2 Charging Air Tube and Supports*, T-Systems do Brasil, 2011.

NORMA EUROPÉIA, *Produtos laminados à quente feitos de aços com alta tensão de escoamento para conformação à frio. DIN EN 10149-3 1.0971*, 1995.

NORMA EUROPÉIA, *Produtos laminados à quente feitos de aços com alta tensão de escoamento para conformação à frio. DIN EN 10149-2 1.8974*, 1995.

PASTOUKHOV, Victor A. e VOORWALD, Herman J. C. *Introdução a Mecânica da Integridade Estrutural*. Editora da Universidade Estadual Paulista, São Paulo, 1995.

SHIGLEY J. E., *Shigley's Mechanical Engineering Design, Eighth Edition*, McGraw-Hill Primis, 2008.

SOUZA, Sergio A. *Ensaaios Mecânicos de Materiais metálicos – Fundamentos teóricos e práticos*. Editora Edgard Blücher Ltda, 5ª Edição, 1982.

TIMOSHENKO S.P. e GERE J.E., *Mecânica dos Sólidos, Volumes I e II*, Editora Livros Técnicos Científicos, Rio de Janeiro, 1984.

Tork, Controle Tecnológico de Materiais Ltda., Rua Cruzeiro, 415 à 423, Barra Funda - São Paulo – SP, *Material Test Report num.:12015029MCSP*, 2012.

Tork, Controle Tecnológico de Materiais Ltda., Rua Cruzeiro, 415 à 423, Barra Funda - São Paulo – SP, *Material Test Report num.:12067016MCSP*, 2012.

Tork, Controle Tecnológico de Materiais Ltda., Rua Cruzeiro, 415 à 423, Barra Funda - São Paulo – SP, *Material Test Report num.:12067700MCSP*, 2012.

Tork, Controle Tecnológico de Materiais Ltda., Rua Cruzeiro, 415 à 423, Barra Funda - São Paulo – SP, *Procedimentos: P-103, P-501, P-502, P-503, P-504, P-507, P-508, P-514, P-515, séries P-200 e P-300*, 2012.

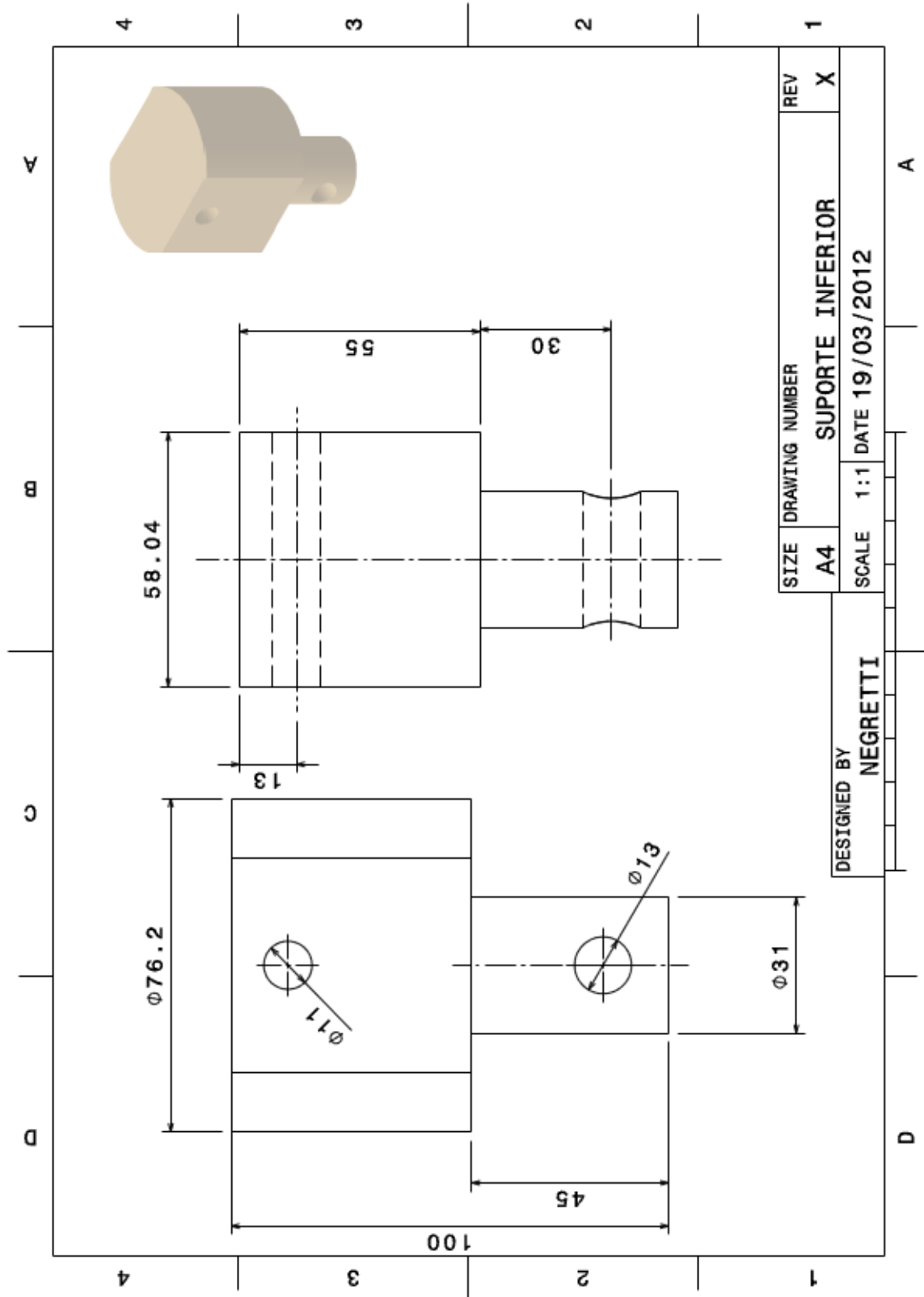
YOUNG, C Warren; BUDYNAS, Richard. *Roark's Formulas for Stress and Strain*. Editora McGraw-Hill Professional, 7ª ed., 2001

ZIENKIEWICZ O. C.; TAYLOR R. L. - *The Finite Element Method*, McGraw-Hill, 4ª Ed., 1988.

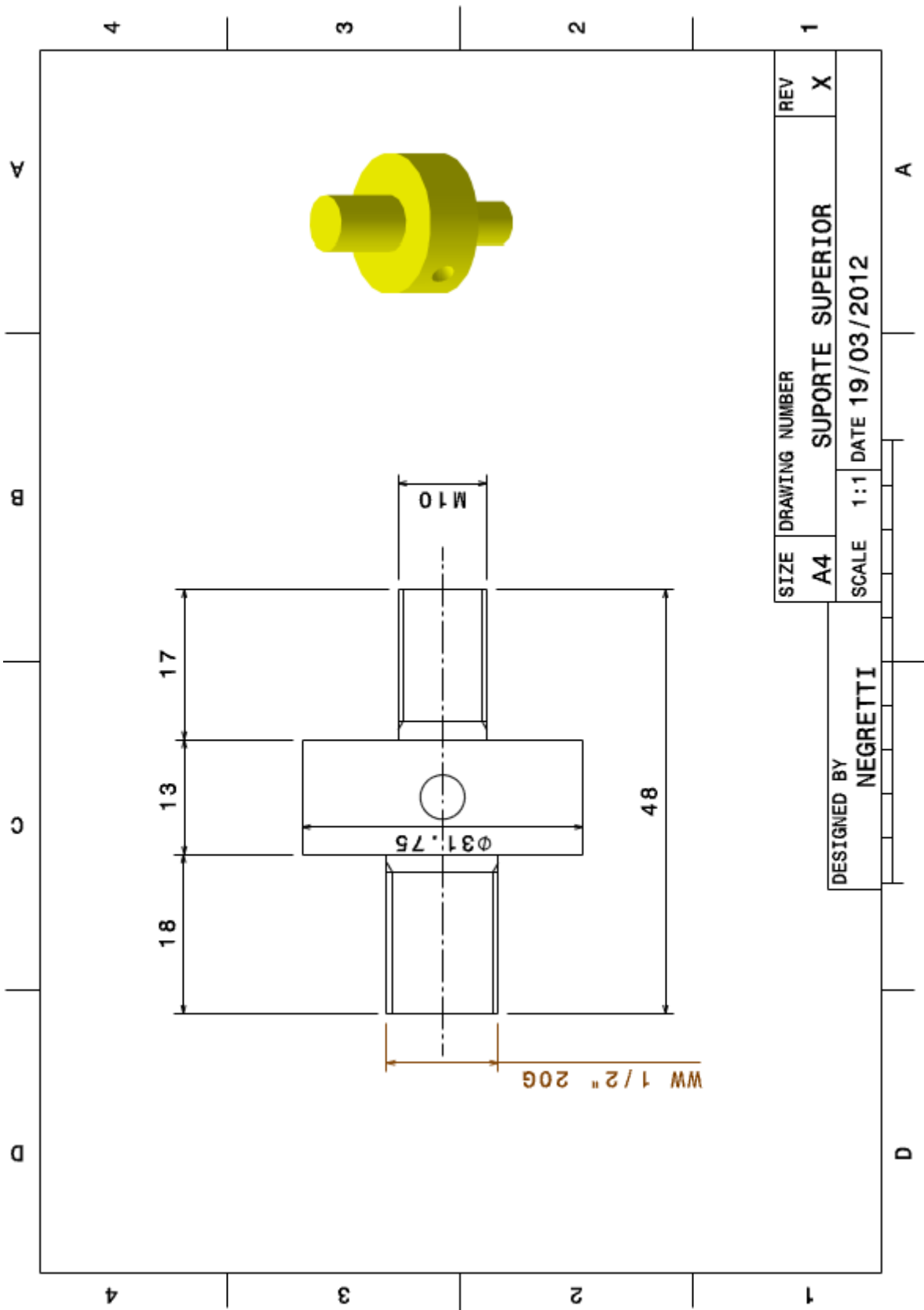


APÊNDICES

APÊNDICE A – Desenho do Suporte Inferior do dispositivo de fadiga fabricado para o ensaio de fadiga.



APÊNDICE B – Desenho do Suporte Superior do dispositivo de fadiga fabricado para o ensaio de fadiga.



APÊNDICE C – Desenho do Conjunto do dispositivo de fadiga fabricado para o ensaio de fadiga.

