



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA INDUSTRIAL

ELIS APARECIDA RIBEIRO DE LIMA

**EFEITOS DOS TRATAMENTOS TERMOQUÍMICOS SOBRE A
CONFIABILIDADE DO EIXO EM AÇO CARBONO TREFILADO ACOPLADO EM
MOTOR TIPO RABETA UTILIZADO POR COMUNIDADES AMAZÔNICAS**

BELÉM-PA

2019

ELIS APARECIDA RIBEIRO DE LIMA

**EFEITOS DOS TRATAMENTOS TERMOQUÍMICOS SOBRE A
CONFIABILIDADE DO EIXO EM AÇO CARBONO TREFILADO ACOPLADO EM
MOTOR TIPO RABETA UTILIZADO POR COMUNIDADES AMAZÔNICAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial do Instituto de Tecnologia da Universidade Federal do Pará para obtenção do grau de Mestre. Área de Concentração: Materiais e Metalurgia.

Orientador: Prof. Dr. Alessandro de Castro Corrêa.

BELÉM-PA

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

L732e Lima, Elis Aparecida Ribeiro de
EFEITOS DOS TRATAMENTOS TERMOQUÍMICOS
SOBRE A CONFIABILIDADE DO EIXO EM AÇO CARBONO
TREFILADO ACOPLADO EM MOTOR TIPO RABETA
UTILIZADO POR COMUNIDADES AMAZÔNICAS / Elis
Aparecida Ribeiro de Lima. — 2019.
109 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Alessandro de Castro Corrêa
Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Industrial, Instituto de Tecnologia, Universidade
Federal do Pará, Belém, 2019.

1. Aço Carbono. 2. Eixo de Rabeta. 3. Fadiga. 4.
Tratamentos Termoquímicos. 5. Confiabilidade. I. Título.

CDD 620.00452

ELIS APARECIDA RIBEIRO DE LIMA

**EFEITOS DOS TRATAMENTOS TERMOQUÍMICOS SOBRE A
CONFIABILIDADE DO EIXO EM AÇO CARBONO TREFILADO ACOPLADO EM
MOTOR TIPO RABETA UTILIZADO POR COMUNIDADES AMAZÔNICAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial do Instituto de Tecnologia da Universidade Federal do Pará para obtenção do grau de Mestre. Área de Concentração: Materiais e Metalurgia.

Data de Defesa:

Banca examinadora:

_____ - Orientador

Prof. Dr. Alessandro de Castro Corrêa
Universidade Federal do Pará - PPGEI/UFPA

_____ - Membro Interno

Prof. Dra. Elza Monteiro Leão Filha
Universidade Federal do Pará - PPGEI/UFPA

_____ - Membro Externo

Prof. Dra. Marina Yassuco Toma
Universidade Federal do Pará - PPGGP/UFPA

A Deus, meus pais e meu irmão.

AGRADECIMENTOS

Expresso aqui meus sinceros agradecimentos, primeiramente a Deus pelo dom da vida, saúde, capacidade de aprender, por permitir chegar com êxito ao final de mais esta caminhada.

Aos meus Pais Gilberto e Vanilde e ao meu irmão Sávio pelo incentivo no decorrer deste período assim como pela compreensão nos momentos de ausência e falta de atenção em função da dedicação à execução deste trabalho.

Agradeço também à Universidade Federal do Pará – UFPA e ao Instituto Federal do Pará – IFPA por viabilizarem a concretização do sonho de alcançar este grau de educação.

Ao professor Alessandro de Castro Corrêa, por sua paciência e dedicação em realizar minhas orientações para chegar à conclusão deste trabalho assim como em fazer parte do Grupo de Estudos Avançados em Gestão (GEAG/IFPA).

À Professora Elza Monteiro Leão Filha por me sugerir este tema com o qual pude aprimorar conhecimentos da Engenharia aliada à Estatística, por suas orientações essenciais para a conclusão do trabalho aqui apresentado.

Ao professor José Maria do Vale Quaresma, coordenador desse programa de mestrado, quem me oportunizou aulas as quais me auxiliaram a elencar conhecimento no decorrer do curso.

Ao corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial – PPGEI/UFPA pelos inúmeros aprendizados proporcionados ao longo do curso.

Aos meus colegas de mestrado pela cooperação durante as atividades acadêmicas.

Aos professores da coordenação do curso de mecânica do Instituto Federal do Pará (IFPA), por serem tão solícitos e complacentes ao longo desta jornada.

Aos colegas do Grupo de Materiais - GPMAT/UFPA, pelas colaborações durante a realização das atividades deste curso, aos colegas Carlos Vinicius, Clóvis, por suas contribuições que auxiliaram com as ideias de estudos.

As amigas Arlene e a Elciana por todo apoio e incentivo na conclusão de mais essa etapa.

“Não há nada como um sonho para criar o futuro.
O futuro tem muitos nomes.
Para os fracos é o inalcançável.
Para os temerosos, o desconhecido.
Para os valentes é a oportunidade.”

Victor Hugo

RESUMO

Os constantes relatos de ribeirinhos sobre durabilidade dos eixos das embarcações tipo rabeta, assim como a pouca realização de estudos a respeito da navegação ribeirinha deram início à motivação desta pesquisa, a qual tem como objetivo avaliar a confiabilidade do eixos de rabeta a partir dos tratamentos termoquímicos, uma vez que pretende modificar as suas propriedades mecânicas. Os tratamentos têm o intuito de promover o aumento da vida útil dos eixos fabricados e comercializados no mercado de Belém, e por conseguinte compará-los com corpos de prova que não receberam tratamento para verificar se os tratamentos surtiram efeito e promoveram melhora da confiabilidade. Para realização deste trabalho, foram adquiridos três eixos de aço carbono comercializados como aço carbono SAE 1045 trefilado, no mercado de Belém. Foi realizado o processo de usinagem conforme as dimensões padrões para fabricação dos corpos de prova, em seguida foram separados em três grupos: Sem Tratamento (ST), Normalizado e Cementado (NC) e Normalizado, Cementado e Revenido (NCTR). A análise de fluorescência possibilitou saber a composição química do material e foi observada a heterogeneidade de seus constituintes. O M.E.V. e o E.D.S. mostraram as microestruturas ferrítica e perlítica, o percentual dos componentes químicos, assim como revelaram a presença de porosidade, fibrose, marcas de praia e pontos de inclusão. Além disso, foram realizados outros testes como fractografia que permitiu analisar a ocorrência tanto de fratura dúctil devido a irregulares da borda, quanto a deformação plástica do corpo de prova. A rugosidade do material se mostrou semelhante em todos os grupos. O teste de dureza apresentou resultado do grupo NC com menor dureza tanto na seção transversal como na superfície, já a maior dureza na seção transversal foi do grupo ST e na superfície foi o grupo NCTR. O ensaio de tração mostrou que o corpo de prova ST teve maior tensão de escoamento, já o maior limite de resistência à tração foram encontrados em uma amostra do grupo ST e no grupo NCTR, e a maior deformação foi no grupo NCTR. O ensaio de fadiga possibilitou realizar a distribuição de Weibull e o teste de Van der Waerden para testar a confiabilidade, os quais detectaram que o tratamento NC obteve melhores resultados em relação aos demais. Dessa forma, conclui-se que o eixo tem teor de carbono menor que o informado SAE 1045, também pôde-se verificar que os tratamentos propostos surtiram efeitos positivos, pois conseguiram alterar as propriedades mecânicas do aço carbono e elevar a vida útil de maneira a proporcionar a melhora da confiabilidade.

Palavras-chave: Aço Carbono. Eixo de Rabeta. Fadiga. Tratamentos Termoquímicos. Confiabilidade.

ABSTRACT

The constant reports of riverine people about the damage of the spindle-type boat axes, as well as the lack of studies and respect to the riverside navigation, started the motivation of this research, which was evaluated as an objective to evaluate the spine itineraries from the climatic terms, since you want to modify as your mechanical properties. The controls are intended to increase the service life of axles manufactured and marketed in the Belém market, and by comparison with untreated test specimens to verify that the tests have taken effect and promoted use. To perform this work, three carbon steel shafts sold as SAE 1045 carbon steel, without market in Belém, were purchased. The machining process was carried out according to the standards for the manufacture of specimens, followed separately in three groups: Untreated (ST), Normalized and Cemented (NC) and Normalized, Cemented and Tempered (NCTR). A fluorescence analysis made it possible to know the chemical composition of the material and the heterogeneity of its constituents was observed. M.E.V. and the E.D.S. shown as ferritic and perlitic microstructures, or percentages of chemical components, as well as the presence of porosity, fibrosis, beach marks and inclusion points. In addition, other tests were performed, such as the fracture test that analyzed the occurrence of double fracture due to edge irregularities, regarding the plastic formation of the specimen. The roughness of the material was shown in all groups. The duration test shows the result of the NC group with the shortest duration in the cross section as surface, while the longest duration in the cross section was in the ST group and on the surface was in the NCTR group. The tensile test showed that the ST specimen had higher yield strength, the highest tensile strength limit were found in a sample of the ST group and the NCTR group and the largest strain was in the NCTR group. The fatigue test made it possible to perform the Weibull distribution and the Van der Waerden test to test reliability, which detected that the NC treatment had better results compared to the others. Thus, it is concluded that the axis has carbon content found in this axis is lower than the informed SAE 1045, it was also possible to verify that the proposed treatments had positive effects, since they managed to change the mechanical properties of carbon steel and increase the life. useful for improved reliability.

Keywords: Carbon Steel. Rabet Shaft. Fatigue. Thermochemical Treatments. Reliability.

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 - Composição química do aço carbono SAE/AISI | 24 |
| Tabela 2 - Valores do ensaio de tração no aço 1020 | 34 |
| Tabela 3 - Valores de Rugosidade Ra | 39 |
| Tabela 4 - Escala de Dureza Rockwell normal e suas aplicações | 40 |
| Tabela 5 - Valores de Dureza Brinell para o aço carbono 1045 | 41 |
| Tabela 6 - Disposição de corpos de prova para realização de ensaios | 49 |
| Tabela 7 - Características de rugosidade (Ra) | 57 |
| Tabela 8 - Concentração em ppm dos elementos silício, cálcio, cromo, manganês e ferro, analisados quantitativamente por meio da técnica da fluorescência de raios X | 61 |
| Tabela 9 - Dados obtidos do ensaio de tração com a velocidade de 2,00 mm/min, em aço carbono com material sem tratamento e com diferentes tipos de tratamentos | 62 |
| Tabela 10 - Rugosidade dos corpos de prova de fadiga ST | 64 |
| Tabela 11 - Rugosidade dos corpos de prova de fadiga com tratamento NC | 64 |
| Tabela 12 - Rugosidade dos corpos de prova de fadiga com tratamento NCTR | 64 |
| Tabela 13 - Médias da seção transversal dos corpos de prova ST | 65 |
| Tabela 14 - Médias da seção de superfície dos corpos ST | 65 |
| Tabela 15 - Médias da seção transversal dos corpos de prova NC | 66 |
| Tabela 16 - Médias da seção de superfície dos corpos de prova NC. | 66 |
| Tabela 17 - Médias da seção transversal dos corpos de prova NCTR | 67 |
| Tabela 18 - Médias da seção de superfície dos corpos de prova com tratamento de normalização, cementação têmpera e revenimento | 67 |
| Tabela 19 - Dados da Distribuição de Weibull | 89 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Eixo de rabeta | 18 |
| Figura 2 - Ribeirinhos..... | 21 |
| Figura 3 - Diagrama Tensão x Deformação | 26 |
| Figura 4 - Fratura do tipo taça e cone (a), Fratura frágil (b)..... | 28 |
| Figura 5 - Diagrama TTT (Transformação Temperatura Tempo)..... | 29 |
| Figura 6 - Diagrama Esquemático Representativo da Operação de Normalização..... | 30 |
| Figura 7 - Tempo de Cementação x Profundidade de Camada | 31 |
| Figura 8 - Diagrama esquemático representativo das operações de têmpera e revenimento ... | 32 |
| Figura 9 - Valores do ensaio de tração no aço 1020..... | 35 |
| Figura 10 - Resistência à fadiga x Número de Ciclos | 36 |
| Figura 11 - Curva da Banheira. | 45 |
| Figura 12 - Fluxograma de Atividades | 48 |
| Figura 13 - Eixos de aço carbono utilizados em rabetas adquiridos no mercado local..... | 49 |
| Figura 14 - Dimensões do corpo de prova para ensaio de tração | 50 |
| Figura 15 - Corpo de prova para ensaio de fadiga..... | 50 |
| Figura 16 - Usinagem do Corpo de Prova | 51 |
| Figura 17 - Corpo de Prova trefilado para ensaio de tração | 51 |
| Figura 18 - Corpo de Prova trefilado para o ensaio de Fadiga | 51 |
| Figura 19 - Forno utilizado para realização dos tratamentos térmicos e químicos | 52 |
| Figura 20 - Corpo de Prova Para Ensaio de Tração Normalizados | 52 |
| Figura 21 - Corpos de Prova para Ensaio de Fadiga Normalizado | 52 |
| Figura 22 - Caixa com Carbono para Tratamento de Cementação | 53 |
| Figura 23 - Corpos de Prova para Ensaio de Tração Normalizado e Cementado | 53 |
| Figura 24 - Corpos de Prova para Ensaio de Fadiga Normalizado e Cementado | 53 |
| Figura 25 - Meio de arrefecimento após tratamento térmico de têmpera com óleo mineral.... | 54 |
| Figura 26 - Corpos de prova para ensaio de tração normalizado, cementado, temperado e revenido | 54 |
| Figura 27 - Corpos de prova para ensaio de fadiga normalizado, cementado, temperado e revenido | 54 |
| Figura 28 - Máquina de ensaio de tração do IFPA..... | 55 |
| Figura 29 - Máquina de Fadiga por Flexão Rotativa do IFPA | 56 |
| Figura 30 - Durômetro Rockwell | 56 |

| | |
|---|----|
| Figura 31 - Rugosímetro Digital..... | 57 |
| Figura 32 - Microscópio de Varredura Eletrônica..... | 59 |
| Figura 33 - Estereoscópio..... | 60 |
| Figura 34 - Ensaio de tração dos corpos de prova ST 1, ST 2 e ST 3, com velocidade de ensaio de 2 mm/min..... | 62 |
| Figura 35 - Ensaio de tração do corpo de prova NC 1 e NC 2 com velocidade de ensaio de 2 mm/min..... | 63 |
| Figura 36 - Ensaio de tração do corpo de prova NCTR, com velocidade de ensaio de 2 mm/min. | 63 |
| Figura 37 - Amostra do Corpo de Prova Trefilado (ST) | 67 |
| Figura 38 - Amostra do Corpo de Prova (NC) | 67 |
| Figura 39 - Amostra do Corpo de Prova NCTR..... | 67 |
| Figura 40 - Comparação de Dureza Brinell na Seção Transversal dos Materiais | 68 |
| Figura 41 - Comparação de Dureza Brinell na Superfície dos Materiais | 68 |
| Figura 42 - Corpo de prova ST 1 (a), Corpo de prova ST 2 (b) | 69 |
| Figura 43 - Corpo de prova NC 1 (a), Corpo de prova NC 2 (b) | 70 |
| Figura 44 - Corpo de prova NCTR 1 (a), Corpo de prova NCTR 2 (b) | 70 |
| Figura 45 - Evolução do Aumento na Microestrutura do Aço Carbono Trefilado sem Tratamento Térmico com aumento de 100x, 200x, 500x e 1000x | 71 |
| Figura 46 - Apresenta a microestrutura do aço carbono utilizado na pesquisa normalizado, formado por ferrita (regiões claras) e perlita (regiões escuras) com aumento de 100x, 200x, 500x e 1000x | 72 |
| Figura 47 - Apresenta as microestruturas da borda do aço na condição NC nos aumentos (a) borda 200x, (b) borda 500x e (c) centro 1000x | 72 |
| Figura 48 - Apresenta as microestruturas da borda do aço na condição NCTR nos aumentos 200x, 500x e 1000x | 73 |
| Figura 49 - Apresenta as microestruturas do centro do aço na condição NCTR nos aumentos 200x, 500x e 1000x. | 73 |
| Figura 50 - Micrografia observada em MEV do aço carbono trefilada sem tratamento térmico com aumento de 1000 e 5000 vezes. Matriz ferrita com grãos de perlita no centro do corpo de prova..... | 75 |
| Figura 51 - Micrografia observada em MEV do aço carbono trefilada ST com aumento de 1000 e 5000 vezes. Matriz ferrita com grãos de perlita na borda do corpo de prova..... | 75 |
| Figura 52 - Micrografia do EDS do aço carbono trefilada ST com aumento de 5000 vezes, no | |

| | |
|---|----|
| centro mostrando os pontos definidos de varredura | 76 |
| Figura 53 - Mapa do EDS do aço carbono trefilado ST com aumento de 5000 vezes, mostrando os mapas dos pontos 1, 2, 3, 4, 5 e 6 com seus elementos | 76 |
| Figura 54 - Micrografia observada em MEV do aço carbono NC com aumento de 1000 e 5000 vezes (a) e (B) centro, (c) e (d) borda..... | 77 |
| Figura 55 - Micrografia do EDS do aço carbono NC com aumento de 1000 vezes, mostrando os pontos de varredura no centro do corpo de prova..... | 78 |
| Figura 56 - Mapa do EDS do aço carbono NC com aumento de 1000 vezes, mostrando os mapas dos pontos 1, 2, 3 e 4 com seus elementos presentes | 78 |
| Figura 57 - Micrografia do EDS do aço carbono NC com aumento de 1000 vezes, mostrando os pontos de varredura na borda do corpo de prova..... | 79 |
| Figura 58 - Mapa do EDS do aço carbono NC com aumento de 5000 vezes, mostrando os mapas dos pontos 1, 2 e 3 com seus elementos presentes | 79 |
| Figura 59 - Micrografia observada em MEV do aço carbono NCTR com aumento de 1000 e 5000 vezes (a) e (b) centro e (c) e (d) borda..... | 80 |
| Figura 60 - Micrografia do EDS do aço carbono NCTR com aumento de 1000 vezes, mostrando os pontos de varredura no centro | 81 |
| Figura 61 - Mapa do EDS do aço carbono NCTR com aumento de 1000 vezes, mostrando os mapas dos pontos 1, 2, 3 e 4 com seus elementos | 81 |
| Figura 62 - Micrografia do EDS do aço carbono NCTR com aumento de 5000 vezes, mostrando os pontos de varredura no centro..... | 82 |
| Figura 63 - Mapa do EDS do aço carbono NCTR com aumento de 5000 vezes, mostrando os mapas dos pontos 1, 2, 3 e 4 com seus elementos | 82 |
| Figura 64 - Imagem com uso do M.E.V. do corpo de prova trefilado ampliado 2000 vezes... 83 | 83 |
| Figura 65 - Imagem com uso do M.E.V do corpo de prova NC ampliado 2000 vezes..... | 83 |
| Figura 66 - Imagem com uso do M.E.V. do corpo de prova NCTR ampliado 2000 vezes..... | 83 |
| Figura 67 - Caracterização por meio da espectroscopia por energia dispersiva do aço carbono trefilado ST..... | 85 |
| Figura 68 - Quantitativo dos elementos químicos que compõe o aço carbono trefilado ST ... | 85 |
| Figura 69 - Caracterização por meio da espectroscopia por energia dispersiva do aço carbono NC..... | 86 |
| Figura 70 - Quantitativo dos elementos químicos que compõe o aço carbono NC..... | 87 |
| Figura 71 - Caracterização por meio da espectroscopia por energia dispersiva do corpo de Prova NCTR | 87 |

| | |
|--|----|
| Figura 72 - Caracterização por meio da espectroscopia por energia dispersiva do aço carbono NCTR | 88 |
| Figura 73 - Comportamento do corpo de prova em aço carbono trefilado ST na tensão de 446 MPa, de acordo com a distribuição de Weibull..... | 91 |
| Figura 74 - Comportamento do corpo de prova em aço carbono NC na tensão de 129 MPa, de acordo com a distribuição de Weibull | 92 |
| Figura 75 - Comportamento do corpo de prova em aço carbono NCTR na tensão de 352 MPa, segundo a distribuição de Weibull..... | 92 |
| Figura 76 - Valores do Teste de Van der Waerden | 94 |
| Figura 77 - Comparação entre tratamentos entre grupos ST, NC e NCTR x Ciclos..... | 94 |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|---------------|---------------------|
| α | Parâmetro de Escala |
| β | Parâmetro de Forma |
| μm | Microns |
| σ | Tensão |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|------|---|
| ANA | Agência Nacional de Águas |
| ASTM | American Society for Testing and Materials |
| CP | Corpo de Prova |
| HB | Dureza Brinell |
| HRB | Dureza Rockwell B |
| ISO | International Organization for Standardization |
| Ka | Fator de acabamento superficial |
| Kb | Fator de tamanho ou dimensão |
| Kc | Fator de confiabilidade |
| Kd | Fator de temperatura |
| Ke | Fator de concentração de tensões |
| Kf | Fator de modificação de efeitos variados |
| LRT | Limite de Resistência à Tração |
| SAE | Society of Automotive Engineers |
| Se | Limite de resistência à fadiga do elemento de máquina |
| S'e | Limite de resistência à fadiga do corpo de prova (ensaio) |

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO | 17 |
| 1.1 Justificativa..... | 17 |
| 1.2 Objetivos..... | 19 |
| 1.2.1 Objetivo geral..... | 19 |
| 1.2.2 Objetivos específicos..... | 19 |
| 2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS | 20 |
| 2.1 Ribeirinhos..... | 20 |
| 2.2 Aço..... | 22 |
| 2.3 Diagrama tensão x deformação..... | 24 |
| 2.4 Fadiga..... | 26 |
| 2.5 Fratura..... | 27 |
| 2.6 Tratamentos Termoquímicos..... | 28 |
| 2.6.1 Cementação..... | 30 |
| 2.6.2 Têmpera..... | 31 |
| 2.6.3 Revenimento..... | 32 |
| 2.7.1 Ensaio de Tração..... | 34 |
| 2.7.2 Ensaio de Fadiga..... | 35 |
| 2.7.2.1 Fatores influenciadores de fadiga..... | 36 |
| 2.7.2.2 Rugosidade..... | 38 |
| 2.7.3 Ensaio de Dureza Rockwell..... | 39 |
| 2.8 Confiabilidade..... | 41 |
| 2.9 Distribuição de Weibull..... | 42 |
| 2.9.1 Parâmetro de escala ou vida característica (α)..... | 44 |
| 2.9.2 Parâmetro de forma (β)..... | 44 |
| 2.10 Teste de Van der Waerden..... | 46 |
| 3 MATERIAIS E MÉTODOS | 48 |
| 3.1.1 Elemento do estudo de caso..... | 49 |
| 3.2 Metodologia Experimental..... | 50 |
| 3.2.1 Corpos de Prova..... | 50 |
| 3.2.2 Usinagem..... | 50 |
| 3.2.3 Normalização..... | 52 |
| 3.2.4 Normalização, Cementação, Têmpera e Revenimento (NCTR)..... | 54 |

| | |
|---|----|
| 3.2.5 Ensaio de Tração | 55 |
| 3.2.7 Ensaio de dureza Rockwell | 56 |
| 3.2.8 Rugosidade..... | 56 |
| 3.2.9 Distribuição de Weibull | 58 |
| 3.2.9.1 <i>Análise da Distribuição de Dados por Weibull</i> | 58 |
| 3.2.10 Teste de Van der Waerden..... | 59 |
| 3.2.11 Microscopia de Varredura Eletrônica (M.E.V.)..... | 59 |
| 3.2.12 Análise da Espectroscopia por Energia Dispersiva (E.D.S.)..... | 60 |
| 3.2.13 Fractografia | 60 |
| 3.2.14 Análise de Fluorescência de Raio X | 60 |
| 4.1 Análise de Fluorescência de Raio X | 61 |
| 4.2 Ensaio de Tração | 61 |
| 4.3 Rugosidade..... | 64 |
| 4.4 Análise da Dureza Rockwell/Brinell | 65 |
| 4.5 Resultados da Análise Fractográfica..... | 69 |
| 4.6 Caracterizações Morfológicas | 70 |
| 4.6.1 Microscopia Óptica | 71 |
| 4.6.2 Microscopia Eletrônica de Varredura e EDS | 73 |
| 4.6.3 Análise da Espectroscopia por Energia Dispersiva (E.D.S.) | 84 |
| 4.7 Resultados da Distribuição de Weibull | 89 |
| 4.8 Teste de Van der Waerden | 93 |
| 5 CONCLUSÃO | 96 |
| 6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS..... | 98 |
| REFERÊNCIAS | 99 |

1 INTRODUÇÃO

1.1 Justificativa

A bacia Amazônica é constituída em torno de 6 milhões de km² e engloba o Brasil e outros países da América do Sul. A bacia hídrica amazônica se restringe à área brasileira. Possui uma malha vasta de rios com aproximadamente 3.870 mil km². A ocupação do território tem 9.700.00 milhões de habitantes, desses 27% vivem fora do espaço urbano. A densidade demográfica dessa região ainda é considerada baixíssima, pois tem 2,51 hab/ km², em relação ao restante do país que conta com 22,4 hab/ km² (ANA, 2015).

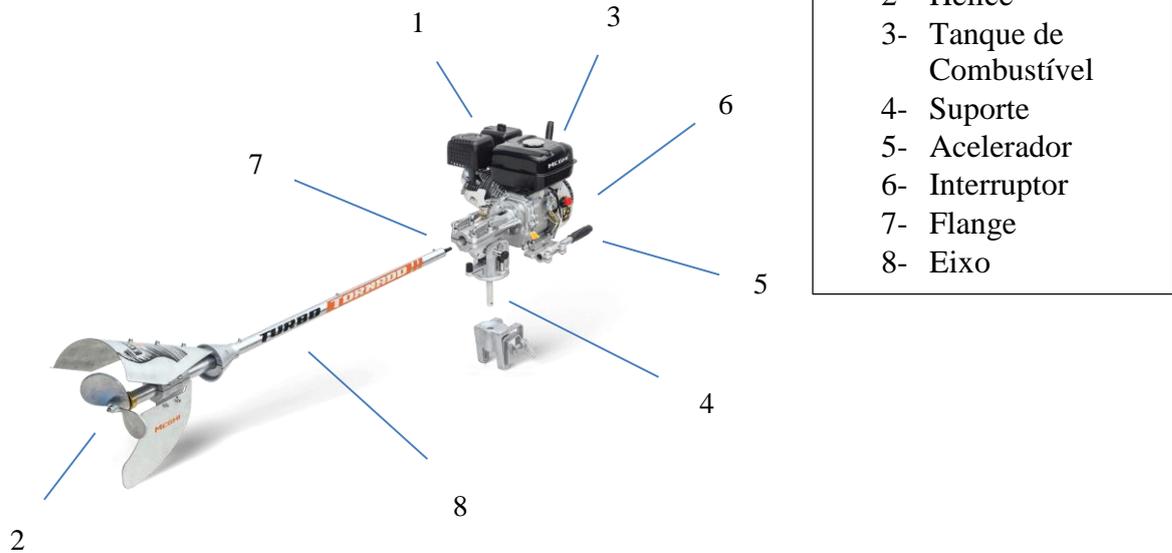
Os ribeirinhos são moradores da região Amazônica que vivem em contato com a natureza formado por rios e florestas. Sua formação é oriunda de nordestinos que, em meados do século XIX, vieram trabalhar como seringueiros (NEVES, 2008).

Neto e Furtado (2015) conceituam o ribeirinho como um grupo de caboclos que vivem no entorno das águas fluviais, os quais têm suas peculiaridades no modo de vida, de extrair seus alimentos e na relação com a natureza.

As moradias dos ribeirinhos são de madeiras sobrepostas ao rio, também chamadas de palafitas, desta forma essas populações têm pouco ou nenhum acesso às políticas públicas de saúde e assistência social (SANTOS; TREIN, 2010).

Um dos tipos de transporte mais utilizados por essas populações são as embarcações com motor centro rabeta, devido ao seu custo ser menor que os convencionais, dispondo de fabricantes da zona franca de Manaus assim como marcas chinesas. Além disso, o que torna essa embarcação mais viável ainda para os ribeirinhos é o seu pouco calado, distância vertical entre a superfície da água e a parte mais baixa da quilha de uma embarcação (Figura 1), o que facilita seu manuseio independentemente do nível do rio (OLIVEIRA, 2014).

A montagem e a inserção desse motor normalmente são realizadas pelo dono da embarcação ou algum profissional da região. Os tipos de motores mais utilizados são de centro ou de popa com rabeta, inseridos na parte de trás da embarcação junto ao eixo e à hélice que ficam na parte externa do transporte (OLIVEIRA, 2014). O motor repassa energia para a hélice por meio do eixo, conforme assinalado na Figura 1.

Figura 1 - Eixo de rabeta

Fonte: MEGHI INDÚSTRIA, 2018, p. 1

A falha no motor dessas embarcações acarreta muitos problemas aos ribeirinhos, como questões econômicas e até a exposição ao risco de morte, caso venha afundar a embarcação enquanto se navega em áreas com maior agitação das águas. Dentre as falhas mais destacadas pelos ribeirinhos, as mais citadas são a falta de lubrificação do motor e de manutenção adequada em tempo hábil (CARVALHO, ESPÍRITO SANTO, 2014).

Em relação aos eixos de rabeta, pode ocorrer a falha por fadiga devido ao desgaste que sofre por aplicação de carga cíclica (MORGADO; BRANCO; INFANTE, 2007). Também é possível ocorrer desgaste por corrosão ao oxigênio, ou por corrosão bacteriana. Essas perdas progressivas causam falhas que podem levar à pane de forma prematura do material e, conseqüentemente, à realização de improviso na sua utilização, acarretando a possibilidade de acidentes.

Outro relato importante sobre o improviso na navegação foi realizado por Fachine (2007) em comunidades que estão fora de atendimento da prefeitura, nas quais estudantes trafegam em embarcações que não dispõem de coletes salva vidas, ressaltando as más condições em que navegam e o perigo a que estão expostos.

Um problema recorrente mencionado por ribeirinhos é a pouca durabilidade dos eixos de rabeta que são fabricados e adquiridos no mercado de Belém. Devido a estes serem possivelmente de qualidade inferior em relação ao de marcas mais conceituadas, este material sobressalente tem como características o menor custo de aquisição bem como o desgaste prematuro, uma vez que as falhas inesperadas afetam negativamente a confiabilidade. Assim, é

comum a ocorrência da quebra do eixo, visto que realiza movimentos contínuos de tração, torção e flexão, que repetidamente provocam falha por fadiga.

Uma alternativa para melhorar a confiabilidade dos eixos é aprimorar as propriedades físicas e mecânicas por meio de tratamentos termoquímicos, os quais vêm sendo realizados no âmbito do Programa de Pós Graduação de Engenharia Industrial da UFPA, nomeadamente, os tratamentos de normalização e cementação assim como normalização, cementação, têmpera e revenimento, de forma que o problema levantado é: **os tratamentos termoquímicos são capazes de melhorar a confiabilidade do eixo fabricado aço carbono trefilado para ser acoplado em rabetas?**

Ressalta-se que o presente estudo trata de aspectos voltados para a engenharia de confiabilidade, a qual propõe aumentar a vida útil do eixo, e se justifica por agregar conhecimentos de modo a contribuir com a importância social, uma vez que visa assistir a navegação da população ribeirinha na Amazônia, haja vista as embarcações com eixo acoplado tipo rabetas serem um transporte muito comum na região amazônica, utilizadas tanto no período de enchente como de vazante, e demandarem recursos financeiros da população para aquisição e manutenção de seus equipamentos.

Menciona-se ainda que este trabalho faz parte desse conjunto de projetos e avaliará a eficácia dos tratamentos em termos da resistência mecânica dos eixos por meio, principalmente, dos métodos estatísticos Distribuição de Weibull e Teste de Van Waerden.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Avaliar o efeito dos tratamentos termoquímicos sobre a confiabilidade dos eixos em aço carbono trefilado acoplado em rabetas, fabricados e comercializados no mercado de Belém.

1.2.2 Objetivos específicos

- Estimar o efeito dos tratamentos termoquímicos sobre a vida útil dos eixos;
- Comparar o desempenho dos materiais sem tratamento com os que receberam tratamento termoquímicos.

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 Ribeirinhos

A formação dos povos amazônicos tem sua origem a partir do refúgio da Cabanagem. Migrantes vieram para a Amazônia já na metade do século XIX e tiveram como atrativo o mercado de trabalho onde realizariam a exploração madeireira e a extração do látex, por isso muito conhecidos como soldados da borracha. Posteriormente, transformaram-se em seringueiros, entretanto enfrentavam muitos desafios para realização desta atividade devido ao não conhecimento da área de mata, pois muitos eram originários do Nordeste, e às relações de trabalho árduas e dificultosas com os seringalistas (NEVES, 2008; AMARAL et al., 2009; LIMA; ANDRADE, 2010).

Uma denominação muito comum para os moradores da região amazônica é ribeirinho, pois residem na beira do rio, ou em sua proximidade, em casas emergidas sobre ele, classificadas como palafitas (CRUZ, 2007).

Há uma grande ligação do ribeirinho com a natureza, visto que os rios são um dos principais símbolos de sua cultura, seja para a navegação, para a pesca ou para morada na área de várzea; além disso, a cultura desse povo é voltada para a simplicidade e mutualidade entre os moradores (SERRA, 2001; NETO; FURTADO, 2015).

Essas comunidades têm sua vida voltada para a natureza. Os rios e as florestas oferecem as principais formas de sobrevivência: a pesca, a caça, o extrativismo de frutos e ervas nativas da região amazônica, os quais são consumidos e comercializados (GAMA et al., 2018).

O cenário geográfico, econômico e social demonstra as adversidades enfrentadas por eles. A logística para se locomover de uma região para outra é, muitas vezes, dificultosa devido a suas moradias serem estabelecidas em regiões mais afastadas do centro urbano, muitas delas em ilhas, envoltas da floresta e rodeadas pela extensão dos rios. Essas características geram uma complexidade de inserção nas políticas públicas, assim como de acesso aos meios que possam favorecer mais qualidade de vida, seja na educação, seja na saúde e saneamento. Devido a essas condições peculiares, a inserção social destes grupos se torna restrita (MORIM, 2014).

Com o intuito de promover o desenvolvimento sustentável dos Povos e Comunidades Tradicionais e preservar aspectos culturais, ambientais, econômicos, entre outros, em fevereiro de 2007, foi promulgado o Decreto nº 6.040, o qual consolidou os direitos dos povos tradicionais, entre eles os ribeirinhos, de forma que foi criada a Política Nacional de Desenvolvimento dos Povos e Comunidades Tradicionais (PNPCT) (PLANALTO, 2007).

Segundo o IBGE (2010), a distribuição de ribeirinhos no território brasileiro mostra alta

heterogeneidade em relação a áreas em que há pouca densidade. Por outro lado, observa-se que essa ocupação ocorre de forma linear ao redor dos rios na região ocidental da região Norte.

O Instituto Joshua Project (2019), em suas pesquisas sobre os mais diversos povos existentes, relata que as comunidades de ribeirinhos ao redor do rio Amazonas no Brasil somam em torno de 7.049.000 pessoas.

Como se observa na Figura 2, esses indivíduos residem em casas (palafitas) construídas com madeira e palhas, as quais têm piso de acesso elevado de 3 a 4 metros do terreno natural para emergirem em períodos de inundações (NETO; FURTADO, 2015).

Figura 2 - Ribeirinhos



Fonte: COSTA (2011, p. 1).

A locomoção nessas comunidades acontece por meio de embarcações, geralmente fabricados a partir de madeira, alumínio e fibra de vidro, as quais são manejadas a remo ou com motor acoplado com eixo tipo rabeta, ou barco com motor de popa, haja vista, muitas vezes, necessitarem ir à sede do município para ter acesso a serviços e recursos que não existem em sua região (GAMA et al., 2018).

Boa parte dos habitantes tem embarcações próprias e tiram seu sustento desse meio de transporte, alguns chamados de rabudos, canoas com o motor de polpa que eleva a proa durante a navegação; outros são as rabetas, pequenas embarcações com motor e um eixo acoplado; as lanchas são mais raras de se ver, pois pertencem a pessoas com mais recursos financeiros. Porém, os que não possuem sua condução própria realizam compra de passagem com valor entre R\$ 1,50 a R\$ 7,00 reais dependendo da localidade para onde será realizada a viagem (FERREIRA, 2013; FERREIRA; VACA, 2017).

As canoas com motores de popa são adequadas para deslocamentos em áreas mais densas dos rios; já as embarcações com motores de eixo rabeta acoplado servem para facilitar a navegação em áreas menos densas (AMARAL et al., 2009).

Também é comum encontrar embarcações que realizam fretes para transportar pesca e

gêneros alimentícios obtidos por meio do extrativismo que serão comercializados em outras cidades. Esse percurso pode levar horas ou dias conforme a distância e o período do ano, de cheia ou seca (GAMA et al., 2018).

As embarcações movidas com motor centro rabeta fornecem aos ribeirinhos liberdade de navegabilidade, permite interação para acordos comerciais entre fabricantes e vendedores de motor e de negociação de combustível (PEREIRA, 2014).

Nesse contexto, a presente pesquisa visa contribuir para a melhoria da navegação ribeirinha, ao estudar a resistência mecânica do eixo rabeta e ao tentar minimizar o impacto social relativo ao custo de sua manutenção, implementando técnicas que poderão aumentar a durabilidade deste equipamento.

2.2 Aço

As primeiras utilizações de ferro ocorreram em torno de 8000 anos atrás, pelos povos do Egito, Babilônia e Índia. Estes faziam uso desse elemento para a produção de peças decorativas em suas construções e também para materiais bélicos. A partir do século XIX, com a Revolução Industrial, o ferro teve diversas aplicações como em construções de pontes, palácios, equipamentos, entre outros (PRAVIA; DREHMER, 2004).

O aço é constituído principalmente por ligas de ferro e carbono. A variabilidade dos tipos de aço é direcionada conforme sua aplicação; alguns são chamados de doces, com menor concentração de carbono e podem ser empregados em estampagem profunda, outros são chamados de aços duros e tenazes, com maior concentração de carbono, que podem ser aplicados em engrenagens. Sua resistência deve-se a sua constituição de carbono (VAN VLACK, 2000; GERDAU, 2003).

O aço é produzido, basicamente, a partir de minério de ferro, carvão e cal. A fabricação do aço pode ser dividida nas seguintes etapas de acordo com a fabricante Aço Brasil (2015):

- Redução: esse processo provoca a liberação do oxigênio que se desprende da molécula de ferro por meio da submissão à temperatura elevada no interior do forno. Assim, ocorre a liquefação do ferro, que passa a ser chamado de ferro gusa.
- Refino: essa etapa ocorre por meio da unidade de usina siderúrgica (aciaria), na qual o ferro gusa, em estado líquido, é convertido em aço.
- Laminação: após o refino, o aço passa pela solidificação, processo que permite alteração mecânica para fabricação de materiais na indústria.

Em relação à concentração de carbono, alguns autores adotam a seguinte classificação para o aço: baixo carbono se sua composição tiver até 0,30%, médio carbono se tiver de 0,30% a 0,60% e alto carbono de 0,60% a 1,00%. Outros elementos também podem estar presentes, entre eles, o manganês, o silício e o fósforo, os quais contribuem para a resistência do aço (CALLISTER, 2012; QUALINOX, 2018).

A fabricante Qualinox apresenta algumas características e aplicações para cada tipo de aço:

Baixo carbono: possui baixa resistência e dureza e alta tenacidade e ductilidade. É usinável e soldável, além de apresentar baixo custo de produção. Geralmente, este tipo de aço não é tratado termicamente. Aplicações: chapas automobilísticas, perfis estruturais, placas para produção de tubos, construção civil, pontes e latas de folhas de flandres.

Médio carbono: possui maior resistência e dureza e menor tenacidade e ductilidade do que o baixo carbono. Apresentam quantidade de carbono suficiente para receber tratamento térmico de têmpera e revenimento, embora o tratamento, para ser efetivo, exija taxas de resfriamento elevadas e em seções finas. Aplicações: rodas e equipamentos ferroviários, engrenagens, virabrequins e outras peças de máquinas, que necessitem de elevadas resistências mecânica e ao desgaste e tenacidade.

Alto carbono: é o de maior resistência e dureza. Porém, apresentam menor ductilidade entre os aços carbono. Geralmente, são utilizados temperados ou revenidos, possuindo características de manutenção de um bom fio de corte. Aplicações: talhadeiras, folhas de serrote, martelos e facas (QUALINOX, 2018, p. 1).

Dos elementos componentes do aço, alguns são adicionados para realizar o beneficiamento do material, como resistência, tenacidade, dureza, a exemplo do manganês, cromo, níquel; enquanto outros podem causar danos na estrutura, como enxofre e fósforo, caso sejam utilizados em quantidade acima do estabelecido (Tabela 1), pois alteram as características do material e o fragilizam, o que pode torná-lo quebradiço (AZZOLINI, 2017).

Para reconhecimento dos tipos de aço utilizados na indústria, a SAE (Society of Automotive Engineers - EUA) e o AISI (American Iron and Steel Institute) classificam os aços conforme o sistema de codificação, utilizando quatro algarismos na forma ABXX: os dois primeiros algarismos identificam os principais elementos de liga presentes no aço e os últimos os teores de carbono. Por exemplo, se iniciar em 1 e na sequência o 0, é o modelo para os aços carbono simples. Isso significa dizer que um aço identificado como 1045 contém 0,45 % em peso de carbono em sua composição química (ABNT, 2000; BRINGAS, 2002).

O aço SAE 1045 é um aço carbono muito utilizado para construção mecânica, bem como é considerado um aço especial com aplicações em eixos, ferramentas e parafusos, por possuir boa usinabilidade (ABNT-NBR 172/2000; AZEVEDO, 2002; MORI, 2018).

Este aço passa comumente por beneficiamento em temperabilidade baixa, pois a dureza terá pouca inserção no material; além disso, possui boa resistência à fratura. As aplicações de durezas para esses aços variam de 180 a 300 HB. É recomendado o tratamento de normalização

para seções mais extensas. São indicados para fabricação de materiais que necessitem de resistência mecânica, como parafusos, ferrolhos, pregos e colunas (OLIVEIRA; DENTI, 2007; AÇOSPORTE, 2018).

É possível identificar a composição química do aço carbono SAE/AISI na Tabela a seguir:

Tabela 1 - Composição química do aço carbono SAE/AISI

| SAE/AISI | COMPOSIÇÃO QUÍMICA (%) | | | |
|----------|------------------------|-------------|--------|--------|
| | C | Mn | P Máx. | S Máx. |
| 1005 | 0,06 Máx. | 0,35 Máx. | 0,030 | 0,050 |
| 1006 | 0,08 Máx. | 0,25 - 0,40 | 0,030 | 0,050 |
| 1008 | 0,10 Máx. | 0,30 - 0,50 | 0,030 | 0,050 |
| 1010 | 0,08 - 0,13 | 0,30 - 0,60 | 0,030 | 0,050 |
| 1012 | 0,10 - 0,15 | 0,30 - 0,60 | 0,030 | 0,050 |
| 1015 | 0,13 - 0,18 | 0,30 - 0,60 | 0,030 | 0,050 |
| 1016 | 0,13 - 0,18 | 0,60 - 0,90 | 0,030 | 0,050 |
| 1017 | 0,15 - 0,20 | 0,30 - 0,60 | 0,030 | 0,050 |
| 1018 | 0,15 - 0,20 | 0,60 - 0,90 | 0,030 | 0,050 |
| 1020 | 0,18 - 0,23 | 0,30 - 0,60 | 0,030 | 0,050 |
| 1021 | 0,18 - 0,23 | 0,60 - 0,90 | 0,030 | 0,050 |
| 1022 | 0,18 - 0,23 | 0,70 - 1,00 | 0,030 | 0,050 |
| 1023 | 0,20 - 0,25 | 0,30 - 0,60 | 0,030 | 0,050 |
| 1025 | 0,22 - 0,28 | 0,30 - 0,60 | 0,030 | 0,050 |
| 1026 | 0,22 - 0,28 | 0,60 - 0,90 | 0,030 | 0,050 |
| 1029 | 0,25 - 0,31 | 0,60 - 0,90 | 0,030 | 0,050 |
| 1030 | 0,28 - 0,34 | 0,60 - 0,90 | 0,030 | 0,050 |
| 1035 | 0,32 - 0,38 | 0,60 - 0,90 | 0,030 | 0,050 |
| 1038 | 0,35 - 0,42 | 0,60 - 0,90 | 0,030 | 0,050 |
| 1039 | 0,39 - 0,44 | 0,70 - 1,00 | 0,030 | 0,050 |
| 1040 | 0,37 - 0,44 | 0,60 - 0,90 | 0,030 | 0,050 |
| 1042 | 0,40 - 0,47 | 0,60 - 0,90 | 0,030 | 0,050 |
| 1043 | 0,40 - 0,47 | 0,70 - 1,00 | 0,030 | 0,050 |
| 1044 | 0,43 - 0,50 | 0,30 - 0,60 | 0,030 | 0,050 |
| 1045 | 0,43 - 0,50 | 0,60 - 0,90 | 0,030 | 0,050 |
| 1046 | 0,43 - 0,50 | 0,70 - 1,00 | 0,030 | 0,050 |
| 1049 | 0,46 - 0,53 | 0,60 - 0,90 | 0,030 | 0,050 |
| 1050 | 0,48 - 0,55 | 0,60 - 0,90 | 0,030 | 0,050 |
| 1053 | 0,48 - 0,55 | 0,70 - 1,00 | 0,030 | 0,050 |
| 1055 | 0,50 - 0,60 | 0,60 - 0,90 | 0,030 | 0,050 |

Fonte: GERDAU (2003, p. 33).

O eixo de motor tipo rabeta é fabricado e comercializado como um aço carbono SAE 1045 devido a sua resistência mecânica, sendo este ideal para fabricar peças submetidas a esforços contínuos de flexão, tração e torção e necessitam ter resistência à fadiga para não sofrer empenamentos e até mesmo fratura mecânica.

Neste estudo, será analisada a resistência mecânica do aço carbono comprado como 1045 no mercado de Belém da qual compõe o eixo do motor tipo rabeta a fim de realização de tratamentos e verificar a sua confiabilidade e, conseqüentemente, tentar elevar o tempo de vida útil desse equipamento.

2.3 Diagrama tensão x deformação

A tenacidade é uma das características que agrega ao material a condição de absorver a

carga na região plástica. Uma forma de se conhecer a tenacidade do objeto é por meio do ensaio de tração que fornecerá a curva tensão-deformação. Esse teste permite verificar a carga de trabalho por unidade de volume e mostra o quanto o corpo de prova suporta sem que ocorra fratura (PADILHA, 2000).

A resiliência é conceituada como o quanto o material consegue resistir à energia mecânica enquanto está na região elástica de modo que possibilite devolver a energia obtida (FERRAZ, 2003).

A ductilidade é a condição que um corpo tem de sofrer deformação plástica, mas sem se romper. Pode ser medida por meio do alongamento (ϵ) ou da estrição. Quanto mais dúctil o aço, maior é a redução de área ou o alongamento antes da ruptura (PINHEIRO; MUZARDO; SANTOS, 2003).

A fragilidade é observada no comportamento dos materiais quando há pouca ou nenhuma resistência a impactos que ocasionam fratura de forma brusca (FERRAZ, 2003).

Segundo Callister (2012), quando uma carga for estática ou apresente variação muito lenta em relação ao tempo, ou seja, submetida a esforços em sua seção transversal ou externa, o ensaio de tensão-deformação é o mais viável para averiguar essas situações, os três principais modos de estabelecer a carga são tração, compressão e cisalhamento.

O ensaio de tração permite criar gráficos do diagrama de tensão x deformação nos quais verifica-se as condições de fadiga de baixo ciclo que ocorre até 10^3 e alto ciclo com valores acima de 10^3 , assim como as condições de vida finita que nos metais ocorre em expectativa até 10^6 ciclos, quando ultrapassa esse valor é considerada vida infinita (ALMEIDA, 2018).

O diagrama tensão-deformação é obtido a partir do ensaio de tração ou compressão realizado em um corpo de prova, permite extrair valores correspondentes a carga, tensão de escoamento, tensão máxima, entre outros. Pode ser descrito como tensão nominal ou de engenharia, realizando a divisão da carga (F) pela área (A_0) de forma que a tensão seja constante em toda a região do corpo de prova.

A deformação nominal ou de engenharia pode ser adquirida por meio do extensômetro assim como pela realização de divisão da variação no comprimento de referência pelo comprimento inicial (HIBBELER, 2006).

A tensão é determinada por meio da força dividida pela área do segmento que recebeu a força aplicada (força/área).

Fórmula da Tensão:

$$\sigma(t) = \frac{F(t)}{A} \quad (1)$$

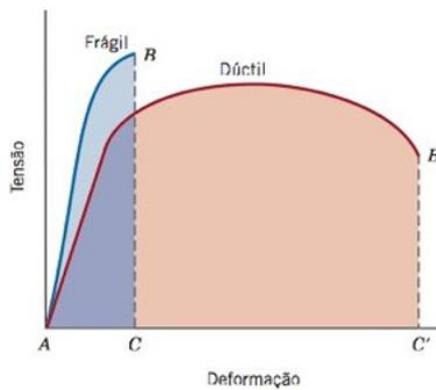
As deformações são estabelecidas por meio da divisão entre a diferença da área final e inicial do corpo de prova que já tenha sido normalizado.

Fórmula da Deformação:

$$\varepsilon(t) = \Delta(t)/L \quad (2)$$

No diagrama abaixo, verificamos o comportamento dos materiais. De acordo com a Figura 3, nota-se a ocorrência da deformação elástica e plástica, denominando-se materiais dúcteis; é possível também visualizar na Figura que não há quase nenhuma deformação (MASCIA, 2006).

Figura 3 - Diagrama Tensão x Deformação



Fonte: CALLISTER (2012, p. 143).

A elasticidade é a fase do ensaio de tração em que um corpo de prova tem condições de retornar à origem sem deformação quando interrompida a tensão. Já na fase de plasticidade o material não consegue voltar à forma original; na maioria dos casos, há o rompimento antes mesmo de chegar nessa etapa (PFEIL; PFEIL, 2009; JÚNIOR et al., 2014).

2.4 Fadiga

A fadiga é considerada uma diminuição gradativa da capacidade de suportar a carga de tensão na peça ou equipamento. Ela causa ruptura lenta do material, consequência do avanço quase infinitesimal das fissuras que se formam no seu interior. O avanço das trincas acontece por flutuação de tensões sejam elas aleatórias, ocasionais ou contínuas. As cargas que têm variações, independentemente de serem cíclicas ou não, causam deformações plásticas ao longo do tempo. Estas deformações levam o material a uma deterioração progressiva, dando origem à trinca, a qual cresce até atingir um tamanho crítico, suficiente para a ruptura final, em geral brusca (ROSA, 2002; BELISÁRIO, 2015).

Fadiga pode ser descrita como um tipo de falha em metais por tensões dinâmicas, de forma que essa falha aconteça em aspecto de tensão menor que a capacidade de resistência à tração ou

limite de escoamento. Foi designada fadiga pelo fato de acontecer após vários períodos de tensões e ciclos de deformação. A fadiga está entre as maiores causas de falhas, estimando em torno de 90%, tem características imprevisíveis e com efeitos danosos. Alguns dos fatores que mais influenciam no desgaste por fadiga são o nível de tensão, o projeto, efeitos de superfície, variáveis metalúrgicas e causas ambientais (CALLISTER, 2012).

No caso de materiais frágeis ou duros, como as ligas de alta resistência de alumínio e os aços tratados para uma alta dureza, a nucleação das trincas inicia na interface entre a matriz e as inclusões existentes, já que a matriz não chega a ser deformada plasticamente. Dessa forma, não surgem as bandas de deslizamento na superfície livre, com a nucleação iniciando mais no interior do material (ROSA, 2002).

Em curvas de Tensão x Deformação, pode-se perceber que, quanto mais elevada a amplitude da tensão alternada aplicada, menor será a quantidade de ciclos que o material terá condições de suportar antes da fratura. No caso do aço, a amplitude da tensão alternada ficará constante quando alcançar determinado valor N. Então, define-se um limite da tensão alternada, chamado de limite de resistência à fadiga, abaixo do qual a falha por fadiga não ocorrerá, a qual demonstra o valor máximo da tensão alternada que não prejudicará o material quando exposto a determinados ciclos (CRUZ, 2013).

As falhas mecânicas que ocorrem de forma inesperada têm como maior causa a fadiga, em que uma trinca se propaga devido à repetição de carga imposta no material no decorrer do tempo. Essas cargas podem ser variáveis, cíclicas, pulsantes ou complexas; o diagrama tensão x deformação demonstra esse tipo de falha. Nos componentes metálicos, grande parte que apresentaram esse tipo de problema tiveram a fadiga como responsável, sendo extremamente danosa, pois transcorre inesperadamente (ABRAHÃO et al., 2008; NOGUEIRA, 2014).

As fadigas de baixo ciclo são aquelas em que o objeto se rompe antes mesmo de completar 1.000 ciclos, consideradas como deformações plásticas. Já as fadigas de alto ciclo são as que conseguem suportar acima dos 1.000 ciclos, pois estas ultrapassam a zona plástica, indo para a elástica até acontecer a fratura (ZILIO, 2013).

2.5 Fratura

A fratura é definida como a divisão de uma estrutura em dois ou mais segmentos, devido à aplicação de tensão estática (ROCHA et al., 2016). A ocorrência de fratura em um material é definida em duas categorias, dúctil ou frágil, conforme suas características. Na fratura dúctil, ocorre deformação plástica na nucleação e na expansão da trinca. Já na fratura frágil, em metais há uma ruptura abrupta, pouca ou nenhuma deformação plástica (ROSA, 2002).

Nos metais, a ocorrência de fratura dúctil passa por etapas de nucleação, crescimento e junção de vazios minúsculos gerados nas inclusões que ocasionarão a falha. Em materiais frágeis, esse processo é chamado de clivagem e advém da divisão de planos paralelos (ROCHA, 2009).

Um material com ponto de inclusão agrega tensões. A irregularidade em suas estruturas causará transição em sua resistência devido à elevação de tensões sofridas. Quando estiver sob esforços de tensões menores que o limite de escoamento do material, este irá sofrer a falha. As imperfeições mais comuns são as trincas que podem se formar no processo de usinagem ou no momento em que há submissão a cargas (MELCHER, 2014).

Na fratura dúctil, é visível a ocorrência de uma estrição (empescoamento), com formação de microcavidades (dimples) que se formam na sequência; após deformação e redução da área, a propagação da trinca continua de forma paralela. A fratura frágil ocorre sem nenhuma deformação relevante, de forma que a trinca se expande bruscamente e demonstra uma estrutura plana, ou seja, não há irregularidades na região que se rompeu, não ocorrendo deformação plástica (CALLISTER, 2012).

A diferença entre esses dois tipos de fratura é a forma como a trinca vai se expandindo: na dúctil acontece com aumento das cargas, na frágil há instabilidade no momento em que atinge o limite de tensão mesmo que não se aumente a quantidade de carga, como pode ser visto na Figura 4. (ASM, 1993; TIGRINHO; FILHO; MARCONDES, 2013).

Figura 4 - Fratura do tipo taça e cone (a), Fratura frágil (b).



Fonte: CALLISTER (2012, p. 203).

Neste trabalho, temos a ocorrência de fraturas dúcteis, provenientes de esforços de alongamento após o ensaio de tração e de submissão a cargas cíclicas no ensaio de fadiga, provocados por deformações plásticas.

2.6 Tratamentos Termoquímicos

O tratamento termoquímico em aços é procedimento que tem por finalidade modificar suas características, cujo processo é realizado por meio do aquecimento e do resfriamento, graduando a temperatura conforme a estrutura desejada e utilizando forno específico para tratamento

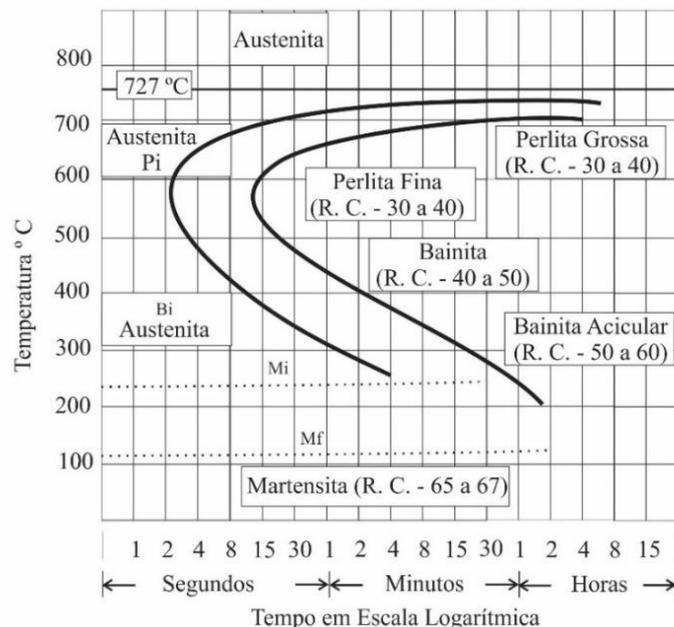
(BARBOSA et al., 2017).

A realização do tratamento térmico advém da necessidade de adequar o aço conforme especificidade do projeto, uma vez que as microestruturas do material escolhido precisam se adequar às propriedades mecânicas em que será empregado. Essas mudanças na microestrutura geram novos constituintes estruturais de equilíbrio dos aços, de forma que a austenita, ao diminuir sua temperatura, poderá se transformar em cementita, ferrita, perlita, bainita e martensita. Essa variação é obtida pelo resfriamento lento ou rápido, pois é essa velocidade que definirá a nova microestrutura obtida (FAVALESSA et al., 2006).

Para compreender melhor a obtenção dessa microestrutura, é importante conhecer o diagrama TTT, pois é por meio dessas variações que será possível analisar as curvas de aquecimento e resfriamento, nas quais a velocidade do resfriamento é determinante para estabelecer o novo microconstituente (SILVA, 2016).

Na Figura 5, observa-se as etapas de modificação das microestruturas. Na região da curva identificada pela letra I, ocorre a transformação da austenita, na letra F, finaliza-se esta etapa. Já a região onde temos temperatura um pouco superior a 200°C, demarcada pelas letras Mi, temos o início da martensita e, na temperatura pouco superior a 100°C, demarcada pelas letras Mf, temos o final da transformação austenita (CHIAVERINI, 2008).

Figura 5 - Diagrama TTT (Transformação Temperatura Tempo)

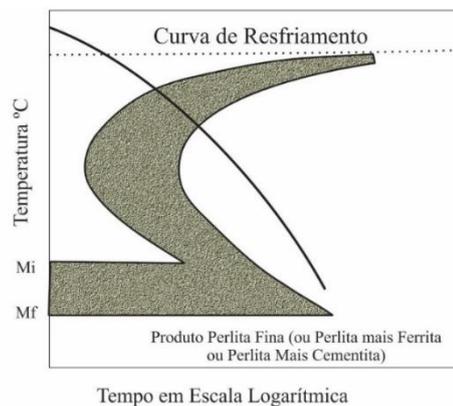


Fonte: Adaptado de CHIAVERINI (2008).

Alguns tratamentos serão aplicados neste trabalho, entre eles a normalização, a cementação, a têmpera e o revenimento, para melhorar as propriedades mecânicas da estrutura do aço e, assim, ter um melhor beneficiamento para ampliação da vida útil do material.

O tratamento térmico de normalização tem por finalidade aprimorar a estrutura do aço tornando-o mais uniforme. Sua importância é tida para refinar os grãos, pois beneficia os aspectos após a usinagem, melhorando a estrutura dendrítica e favorece etapas posteriores como a têmpera. A Figura 6 faz a representatividade deste processo (CHIAVERINI, 2008).

Figura 6 - Diagrama Esquemático Representativo da Operação de Normalização



Fonte: Adaptado de CHIAVERINI (2008).

Este tratamento é realizado em forno, aquecendo-se o aço até atingir a temperatura da austenita, que fica em torno de 910°C a 1400°C quando composta por ferro puro. Em seguida, é feita a remoção do material para resfriar em temperatura ambiente (VAN VLACK, 2014).

2.6.1 Cementação

O tratamento termoquímico de cementação serve para aumentar a dureza e a resistência mecânica do material, diminuindo o desgaste em torno de sua superfície, na qual aumenta-se a concentração de carbonos no aço, mantendo a ductilidade e a tenacidade do núcleo para serem realizados tratamentos posteriores, como têmpera e revenimento (VALE, 2011; MENDONÇA, 2012).

Amplamente utilizada no setor metalúrgico das indústrias, a cementação apresenta característica de agregar carbono ao aço em temperatura austenita, possibilitando a criação de peças com alta rigidez na área externa e tenazes em seu interior, atribuindo a essas peças mais resistência ao impacto e à corrosão (GRILO; PERES, 2012).

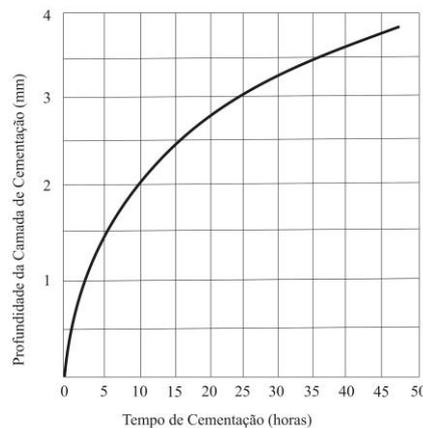
O tratamento termoquímico de cementação é dividido em 3 etapas: Primeiramente os corpos de prova são colocados em uma caixa com carbono completamente fechada e são aquecidos em alta temperatura (750°C a 1000°C). O tempo de aquecimento determina a espessura da camada que se eleva, ou seja, quanto maior o período de aquecimento, mais espessa se torna; além disso, a qualidade do carburante também ajuda a determinar essa característica. A segunda

etapa é o tempo de temperatura determinado para o tratamento. A última é o resfriamento, que é lento e ocorre dentro da própria caixa. Concluída todas as etapas, as peças estão prontas para serem temperadas (PAULI; ULIANA, 1997; REIS, 2013).

Nesse processo, a cementação apresenta algumas vantagens: pode ser realizada nos mais variados fornos, tem baixo custo para pequenas quantidades assim como para peças com grandes dimensões, não há exigência de muita técnica de quem for realizar o processo. Existem também as desvantagens como: não ser recomendada para espessuras finas que tenham que ser regradas por limite curto, a inviabilidade de têmpera imediata logo após a cementação por causa da complexidade de desempacotar peças, além da lentidão do processo de aquecer e resfriar devido ao processo térmico inativo (SILVA; MEI, 1988).

A Figura 7 faz a representatividade da relação tempo x profundidade de camada de forma que quanto maior o tempo de cementação maior será a espessura da camada.

Figura 7 - Tempo de Cementação x Profundidade de Camada



Fonte: Adaptado de SILVA; MEI (1988).

2.6.2 Têmpera

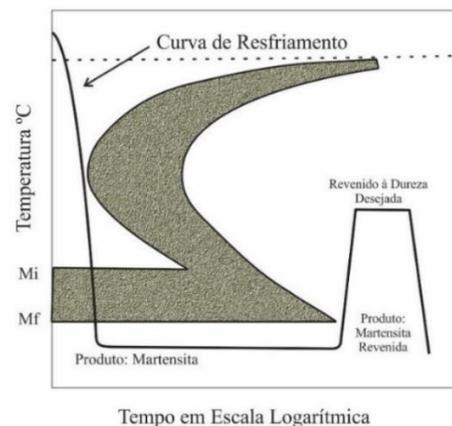
A têmpera é um tratamento térmico de grande importância, pois, por meio dela juntamente com o revenimento, é que se pode chegar em características adequadas para aplicações em condições extremas que exigem maior esforço e confiabilidade, como as que estão voltadas para a área mecânica, a exemplo dos meios de transporte. Nesse tratamento, o temperamento da peça resulta em um tensionamento compressivo na área externa e tração na área interna, aumentando a resistência à fadiga (CHIAVERINI, 2008; MENDONÇA et al., 2012).

Esse tratamento visa chegar na estrutura martensita, a qual repassa a dureza e a fragilidade ao aço elevando amplamente a resistência à tração. O tratamento térmico da têmpera é realizado por meio da exposição do aço a uma temperatura variando de 815°C a 870°C e, logo em seguida,

por meio do resfriamento brusco, haja vista que, para chegar na estrutura martensita, requer-se um resfriamento imediato (CELESTINO; FELIPE; MACHADO, 2007; SILVA, 2016).

A martensita nos aços tem formação cúbica de corpo centrado (CCC), tem pouca solubilidade entre carbono e aço em estrutura de cristalinidade tetragonal de corpo centrado (TCC), o que aumenta a resistência e diminui a ductilidade, tornando o material com mais chances de quebra. Então, faz-se necessário outro tratamento - o revenimento - para diminuir a tensão a que foi exposto, recuperar a ductilidade e reduzir a perda de resistência mecânica adquirida no tratamento, a Figura 8 exemplifica esse processo. (SILVA, 2016).

Figura 8 - Diagrama esquemático representativo das operações de têmpera e revenimento



Fonte: Adaptado de CHIAVERINI (2008).

Nas etapas de realização do tratamento de têmpera, primeiramente o aço é aquecido a uma temperatura em torno de 800°C, a temperatura deve se manter constante para conseguir temperar por completo. E por último é realizado o resfriamento, que pode ser feito em água, óleo ou jato de ar (PAULI; ULIANA, 1997).

No presente trabalho, a têmpera foi realizada em temperatura 850° C e mantida a temperatura durante 30 minutos; após essa etapa foi realizado o resfriamento a óleo.

2.6.3 Revenimento

O tratamento térmico de revenimento consiste em realizar o reaquecimento do corpo de prova no forno a uma temperatura variando entre 150°C e 700°C, geralmente por 1 hora. Esse procedimento ocorre para realizar o alívio de tensões após a têmpera. O aquecimento desses materiais ocasiona a modificação da microestrutura, permanecendo em tempo necessário para que ocorram as transformações que possibilitem a recuperação de parte da ductilidade e tenacidade perdidas, sendo depois resfriadas até a temperatura ambiente (REED HILL, 1982; OLIVEIRA; JÚNIOR; SILVA, 2009; RIOS; AMARAL; SOUZA, 2016).

O revenimento tem por finalidade estabelecer um ponto de equilíbrio entre as características de resistência mecânica assim como aumentar a tenacidade modificando a microestrutura. As ações provocadas por este tratamento são: “precipitação de carbonetos; recuperação e recristalização da estrutura martensítica e formação de austenita, que permanece retida, após resfriamento à temperatura ambiente” (FILHO; LIMA; MARIANO, 2007, p. 2).

A realização deste tratamento após o tratamento da têmpera permite alcançar temperaturas inferiores à perlita e à bainita que se obtém a martensita, de maneira que equilibra aspectos de ductilidade, dureza e resistência à tração, realizando o alívio de tensões. Geralmente, os dois tratamentos estão associados, pois o revenimento complementa as características da têmpera (MITTAL, 2013).

A temperatura definida para a realização do tratamento é um ponto determinante para a obtenção dos resultados. Com a realização do revenimento, o processo de difusão torna a composição do material mais estável e com isso diminui a fragilidade. Abaixo, pode-se observar como cada temperatura influencia no material conforme citado por Reed-Hill (1982). O autor estabelece cinco fases para o revenimento:

No primeiro estágio, um carboneto que não é a cementita se precipita na martensita. Em consequência, o teor de carbono da martensita se reduz, resultando numa estrutura bifásica constituída de carboneto e martensita de baixo carbono. Essa reação ocorre com velocidades mensuráveis entre a temperatura ambiente e cerca de 200°C. O segundo estágio corresponde a decomposição da austenita retida em bainita. A reação bainítica se torna mensurável de cerca de 100°C até 300°C, enquanto, para temperaturas abaixo de 100°C, admite-se que a austenita se transforme em martensita e não em bainita. A formação de ferrita e cementita a partir dos produtos de reação dos estágios um e dois constitui o que se chama de terceiro estágio do revenido. Esta reação ocorre num intervalo de tempo razoável, em temperaturas acima de 200°C. O quarto estágio envolve o crescimento das partículas de cementita, e o quinto estágio se aplica principalmente aos aços-liga. Neste último estágio formam-se compostos intermediários e carbonetos complexos (REED-HILL, 1982, p. 621).

O tratamento térmico consiste em uma das etapas mais consideráveis na fabricação, uma vez que, ele define a microestrutura e as propriedades finais, logo é necessário definir pontos fundamentais: “a aplicação a que se destina a ferramenta, os fornos utilizados, o ciclo térmico de austenitização, o meio de resfriamento, o ciclo térmico de revenido e a quantidade de revenidos”. (SCHLATTER, 2012).

Neste trabalho, foram realizados os tratamentos de normalização no forno a 900°C, por uma hora; já o tratamento termoquímico de cementação foi realizado em forno a 955°C, durante 5 horas. A têmpera foi realizada a 850°C por 30 minutos e, logo em seguida, o resfriamento brusco a óleo; por último, foi feito tratamento de revenimento a 700°C por 1 hora com resfriamento a temperatura ambiente.

2.7 Ensaios Mecânicos

2.7.1 Ensaio de Tração

O ensaio de tração acontece para que seja possível realizar a medição e a variação da carga aplicada. Ocorre quando há uma inserção de carga de tração crescente, em uma única direção, aplicada ao corpo de prova, já devidamente pronto para o teste, até que ele seja rompido (COSTA et al., 2009).

O ensaio de tração é realizado em máquina universal. Por meio dos testes provenientes dele, é possível analisar as características do material, os tipos de liga e observar os tipos de fratura. Esse equipamento permite obtenção de dados mais detalhados, tanto para zona elástica como para a plástica (CLAUDINO, 2017).

A utilização do ensaio de tração tem como finalidade identificar as características do material quanto à sua fabricação, o quanto ele suporta de carga, os pontos críticos de uma peça que geram falhas. Esse ensaio gera o diagrama de tensão-deformação, que permite analisar a resistência mecânica do material, como a resistência à tração, o módulo de elasticidade, a tensão do escoamento, a tensão na ruptura, a deformação no escoamento e a deformação na ruptura (AZEVEDO et al., 2016; SAPUCAIA; SILVA; OLIVEIRA, 2018).

Em um estudo realizado por Souza (2017) com uso do ensaio de tração aplicado aço SAE 1020, obteve os valores para S_y = Limite de escoamento (Mpa). S_u = Limite de resistência mecânica (Mpa). AL = Alongamento percentual do corpo de prova em percentual.

Logo verificou-se que este aço é de média resistência e alta ductilidade. Por meio do ensaio de tração, este material foi classificado como dúctil, uma vez que sem a existência de uma pré-trinca de fadiga ao final do entalhe mecânico, não haveria a fratura do corpo de prova. Dessa forma foi submetido um pré-trincamento para direcionar a fratura por tensão e não por deformação.

Tabela 2 - Valores do ensaio de tração no aço 1020

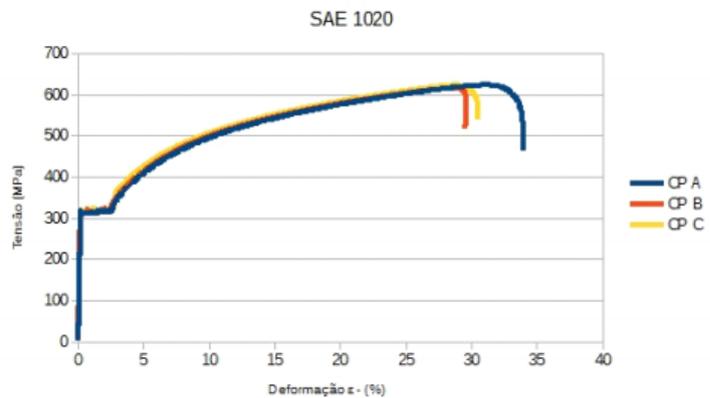
| CP | S_y (MPa) | S_u (MPa) | AL (%) |
|-------|-------------|-------------|----------|
| A | 315 | 481,1 | 24,33702 |
| B | 316 | 481,5 | 23,60137 |
| C | 316 | 478,8 | 22,96388 |
| Média | 316 | 481,1 | 23,60137 |

Fonte: Adaptada de SOUZA (2017).

No gráfico elaborado no estudo de Souza 2017, pode-se visualizar as curvas de tensão e deformação na Figura 9, da qual todos os corpos de prova tiveram patamar de escoamento semelhante, valores de limite de resistência a tração bem próximos, quanto ao alongamento, o

corpo de prova A foi um pouco maior em relação ao corpo de prova B e C.

Figura 9 - Valores do ensaio de tração no aço 1020



Fonte: SOUZA (2017, p. 49).

No presente estudo, o ensaio de tração permitiu obter o limite de tensão máxima que cada corpo de prova suportou assim como a tensão de escoamento, pois é por meio dela que será obtida a tensão para a realização do ensaio de fadiga.

2.7.2 Ensaio de Fadiga

O ensaio de fadiga é realizado por meio de aplicação de carga cíclica, ou seja, constante ao longo do tempo, sobre um corpo de prova devidamente preparado conforme os padrões exigidos, o qual é submetido a carregamentos por meio de mancais que o sustentam, enquanto um motor elétrico produz giros no corpo de prova contabilizados em ciclos. Os ensaios de fadiga podem ser de tração-compressão, torção e flexão rotativa. Mais especificamente na indústria e para os meios de transporte automobilístico, aeroespacial e aquático, utiliza-se o ensaio de fadiga rotativa (GARCIA, SPIN, SANTOS, 2000; AZEVEDO, 2016).

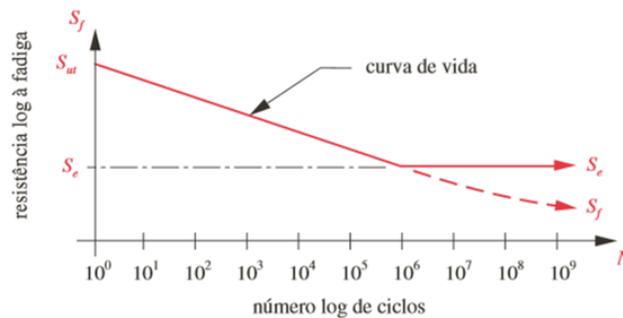
Os materiais utilizados para realização dos ensaios são chamados de corpos de prova (CPs), os modelos utilizados em testes com máquina de fadiga por flexão rotativa seguem dois modelos: “cilíndrico com seção de teste de perfil reto e cilíndrico com seção de teste definida por um raio de concordância” (OLIVEIRA et al., 2017, p. 2).

Dessa forma, a resistência à fadiga é mensurada pelo nível de tensão que resultará no defeito do corpo de prova em exercício de funcionamento para um número específico de ciclos, em que a existência de outras condições relevantes podem afetar a durabilidade, entre elas: tamanho, tipo de carga, acabamento superficial, temperatura, confiabilidade, presença de gradientes de tensão e defeitos de fabricação (SANTOS, 2008; OLIVEIRA et al., 2017).

2.7.2.1 Fatores influenciadores de fadiga

Norton (2013) define que a resistência à fadiga (S_f) do ciclo é a mesma que a resistência estática (S_{ut}), na qual ocorre a diminuição de forma linear proporcionalmente ao número de ciclos ao atingir 10^6 ciclos que o interceptam (S_e), este é o limite de resistência à fadiga considerado para alguns metais e ligas. A Figura 10 exemplifica essas informações.

Figura 10 - Resistência à fadiga x Número de Ciclos



Fonte: NORTON (2013, p. 38).

A realização dos ensaios mecânicos ocorre normalmente em condições previamente estabelecidas seja pela temperatura, carga, seja pelo bom acabamento dos corpos de prova seguindo padrões e outras características já preestabelecidas, de acordo com a norma ABNT NBR ISO 4965-1:2016, porém, isso muitas vezes diverge da situação real de uso de peças e aparelhos no cotidiano. O ensaio de fadiga consegue simular bem essas condições, além de permitir uma abordagem estatística, de forma que se pode perceber tais divergências na realização dos testes em laboratório e as condições reais de uso quanto ao limite de fadiga. Para corrigi-los, deve-se utilizar a equação de Marin (ALMEIDA, 2018):

$$S_e = K_a K_b K_c K_d K_e K_f S'_e = K_{eq} S'_e \quad (3)$$

S_e → Limite de resistência à fadiga do elemento de máquina

S'_e → Limite de resistência à fadiga do corpo de prova (ensaio)

K_a → Fator de acabamento superficial

K_b → Fator de tamanho ou dimensão

K_c → Fator de confiabilidade

K_d → Fator de temperatura

K_e → Fator de concentração de tensões

K_f → Fator de modificação de efeitos variados

A ocorrência de fadiga também pode advir de outros fatores como: acabamento de superfície, tamanho, tipo de solicitação, temperatura, confiabilidade e itens variados. Essas

variáveis são utilizadas como medidas de correção tanto para as condições do material como para o ensaio que simulará as reais condições de uso (BUDYNAS; NYSBETT, 2005; NORTON, 2013; BRANDÃO, 2013).

A seguir se detalhará a influência de cada K e como ele pode interferir no efeito de fadiga:

- Fator de Acabamento Superficial (K_a): tem função determinante, pois o acabamento do material define a qualidade da peça, necessita de um polimento para que seja livre de rugosidades e deformações para não ocasionar a formação de trincas e conseguir ter uma boa resistência mecânica (BRANDÃO, 2013).
- Fator de Tamanho ou Dimensão (K_b): esse fator considera que os corpos de prova devem apresentar um tamanho padronizado; para realização do ensaio de fadiga rotativa, a área transversal cilíndrica deve estar na ordem de 7,62mm. No entanto, os materiais quando submetidos a testes poderão ter possíveis diferenças na áreas transversal e dimensional, de forma que o fator tamanho é utilizado como um dos quesitos a serem considerados (ALMEIDA, 2018).
- Fator de Confiabilidade (K_c): Confiabilidade está diretamente ligada à estatística por meio da probabilidade, a qual pode avaliar as condições mecânicas e estudar as chances de um componente falhar. A Confiabilidade está inserida dentro do intervalo $0 \leq R \leq 1$. Considerando que de mil peças fabricadas, por exemplo, seis tenham falhas, este será um resultado dentro do limite de tolerância. Essa função pode ser descrita como:

$$R = 1 - \frac{6}{1000} = 0,994. \quad (4)$$

Então, temos 99,4% de confiabilidade (BUDYNAS, NISBETT, 2005).

- Fator de Temperatura (K_d): a temperatura interfere nas características mecânicas do material conforme a sua variação, já que a temperatura de confecção da peça é distinta do que será ensaiado, o que pode modificar sua resistência. Logo, o fator de temperatura é necessário para adequar-se às condições reais de trabalho (BRANDÃO, 2013; PINHEIRO; NOGUEIRA; COSTA, 2014).
- Fator de Concentração de Tensões (K_e): os materiais estão sujeitos a muitos esforços seja por flexão rotativa, seja por axial (efeito de puxar e empurrar), diferenciando-se da resistência estática (S_{ut}), da qual foram estabelecidos os valores médios do fator de carregamento (BUDYNAS; NISBETT, 2005):

$$K_e = \begin{cases} 1 & \text{torção} \\ 0,85 & \text{axial} \\ 0,59 & \text{torção} \end{cases} \quad (5)$$

As tensões cíclicas somadas às irregularidades contidas em uma peça, como por formação de “cantos vivos”, furos, falhas na realização de usinagem ou solda, tornam-se fatores preponderantes para a formação de trincas que afetam o equilíbrio da distribuição da tensão na peça, estes são conhecidos fatores de concentração de tensão. Essas concentrações levam à mudança de geometria, modificação das características elásticas e elevação da concentração de carga, o que ocasiona descontinuidades na estrutura. Essas circunstâncias aceleram o estado de fadiga, o que ocasionará na fratura e na perda da peça (ROSA, 2002; MENDONÇA, 2016).

- Fator de modificação de efeitos variados (Kf): esses fatores são indicados para propor redução do limite de endurance (limite de resistência à fadiga do material para vida infinita), porém nem sempre estão acessíveis. Dentre eles estão: tensões residuais, corrosão, chapeamento eletrolítico, pulverização de metal, frequência cíclica e corrosão de piezo-ciclofricção (BUDYNAS; NISBETT, 2005).

2.7.2.2 *Rugosidade*

As rugosidades são pequenos desvios com sutis comprimentos de onda, podem ser definidas como micro e manométrica, porém de grande impacto em relação às dimensões atômicas. Essas deformidades podem ter diversas amplitudes e distanciamentos. Essas descontinuidades que causam a rugosidade podem advir de descuidos no processo de fabricação e defeitos naturais do material (FERREIRA, 2018).

Uma das unidades de medição mais utilizadas para leitura de rugosidade é a rugosidade média (Roughness Average), (Ra), que é a média aritmética dos valores absolutos dos distanciamentos desvios de rugosidade na superfície. As principais causas da rugosidade são: condições de atrito, formação de gume posição e desgaste da ferramenta, além disso pode ter influência também pela vibração no momento do torneamento. Por isso, é importante manter o controle de qualidade durante o processo de fabricação (BIASIBETTI et al., 2019).

No trabalho de Bezerra e Machado (2008) citado na Tabela 3, constatou-se que a rugosidade foi inversa ao do raio da ponta na condição de velocidade de 300/min, uma vez que a ferramenta comercial raio de ponta foi de 0,8mm. Esta teve menor valor de rugosidade quanto às ferramentas não coberta e recoberta de 0,4mm. Ao utilizar as velocidades de corte 10 e 100m/min, obteve-se o mesmo comportamento da rugosidade quanto à condição da ferramenta, de forma que as duas tiveram pior acabamento superficial, no entanto o acabamento obtido pelas condições não recoberta e recoberta não tiveram diferenciação em seus resultados.

Tabela 3 - Valores de Rugosidade Ra

| Condição | Ra (μm) |
|---|--------------------------------------|
| Vc = 10/min (ferramenta não recoberta) | 2,05 \pm 0,15 |
| Vc = 10/min (ferramenta recoberta) | 1,87 \pm 0,33 |
| Vc = 10/min (ferramenta comercial) | 3,59 \pm 0,55 |
| Vc = 100/min (ferramenta não recoberta) | 2,17 \pm 0,43 |
| Vc = 100/min (ferramenta recoberta) | 2,23 \pm 0,12 |
| Vc = 100/min (ferramenta comercial) | 3,40 \pm 0,21 |
| Vc = 300/min (ferramenta não recoberta) | 2,73 \pm 0,17 |
| Vc = 300/min (ferramenta recoberta) | 3,21 \pm 0,44 |
| Vc = 300/min (ferramenta comercial) | 1,95 \pm 0,35 |

Fonte: Adaptado de BEZERRA; MACHADO (2008).

O objetivo do ensaio de fadiga rotativa, neste trabalho, é determinar quantos ciclos o material pode suportar antes de se deformar ou romper, o que determinará o seu tempo de vida útil. Para isso, alguns tratamentos térmicos foram utilizados, como o de normalização para refino dos grãos, tratamento termoquímico de cementação e tratamento termoquímico de cementação, têmpera e revenimento em um eixo de motor aço carbono. Foi realizada a medição da rugosidade tanto nos materiais trefilados (sem tratamento - ST), assim como nos corpos de prova que foram normalizados e receberam tratamento termoquímico de cementação (NC), assim como nos que foram normalizados e receberam tratamento termoquímico de cementação, têmpera e revenimento (NCTR) para verificar a superfície do material.

2.7.3 Ensaio de Dureza Rockwell

O ensaio de dureza Rockwell é uma técnica que se iniciou nos Estados Unidos no início do século XX e consiste em analisar a dureza por meio de penetração. A dureza Rockwell é mais usual para aços temperados em relação à dureza Brinell, pois está mais indicada para um número de materiais com dureza menor, uma vez que elevar o valor da dureza pode causar deformação nas esferas de medição quando superior a 400 HB (MACHADO; SANTOS, 2018).

O ensaio de Dureza Rockwell é regido pela norma ABNT NBR ISO 6508-1:2019, a qual estabelece os padrões para os ensaios de dureza Rockwell e Rockwell superficial, em escalas de campo para aplicação em materiais metálicos.

A dureza é uma característica importante voltada para a área de mecânica, uma vez que mede a resistência de um corpo de prova quando esse material sofre pressão de outro, ou propriamente no ensaio, de forma que irá apresentar risco ou marcas definitivas. O ensaio de dureza consiste em utilizar penetradores específicos que realizam pressão por meio de pré cargas e cargas, pelo qual se verificará as deformações. A partir da profundidade que o indentador atingir e do valor medido, será estabelecida a dureza do material (GARCIA; SPIN; SANTOS, 2000).

Este ensaio permite a medição direta, um dos mais comuns no setor industrial, devido a sua simplicidade e por não precisar de muitos conhecimentos técnicos de manuseio. Há várias escalas de medição para utilizar com penetradores e cargas, sendo possível utilizar tanto em materiais metálicos como em polímeros. Os indentadores possuem esferas produzidas em aço e também de diamantes e seus diâmetros podem ser de 1/16, 1/8, 1/4 e 1/2 polegadas. É necessário que o corpo de prova tenha espessura dez vezes maior que a profundidade de impressão, assim como necessita que esteja afastado cerca de três diâmetros de outras marcas já realizadas pelo penetrador e extremidades da peça, (MORAIS, 2016; ABNT, 2019). A tabela 4 especifica cada característica.

Tabela 4 - Escala de Dureza Rockwell normal e suas aplicações

| Escala de Dureza Rockwell e Suas Aplicações | | | | | |
|---|---------------|-------------|----------------------|---------------------|---|
| Escala | Cor da Escala | Carga Maior | Penetrador | Faixa de Utilização | Campo de Aplicação |
| A | Preta | 60 | Diamante cone 120° | 20 a 88 HRA | Carbonetos, folhas de aço com fina camada superficial endurecida. |
| C | Preta | 150 | Diamante cone 120° | 20 a 70 HRC | Aço, titânio, aços com camada endurecida profunda, materiais com HRB > 100. |
| D | Preta | 100 | Diamante cone 120° | 40 a 77 HRD | Chapas finas de aço com média camada endurecida. |
| B | Vermelha | 100 | Esfera aço 1,5875 mm | 20 a 100 HRB | Ligas de cobre, aços brandos, ligas de alumínio, ferro maleável etc. |
| E | Vermelha | 100 | Esfera aço 3,175 mm | 70 a 100 HRE | Ferro fundido, ligas de alumínio e de magnésio. |
| F | Vermelha | 60 | Esfera aço 1,5875 mm | 60 a 100 HRF | Ligas de cobre recozidas, folhas finas de metais moles. |
| G | Vermelha | 150 | Esfera aço 1,5875 mm | 30 a 94 HRG | Ferro maleável, ligas de cobre-níquel-zinco e de cobre-níquel. |
| H | Vermelha | 60 | Esfera aço 1,5875 mm | 80 a 100 HRH | Alumínio, zinco e chumbo. |
| K | Vermelha | 150 | Esfera aço 1,5875 mm | 40 a 100 HRK | Metais de manuais e outros muito moles ou finos. |

Fonte: Adaptado de Luz (2017).

Para definição de qual escala será utilizada, A, B, C ou outras, é verificado o tipo de material. No caso de serem ligas de cobre, ligas de aço ou de alumínio, pode-se utilizar a medida do indentador de 1/16 e uma carga de 100 kg e será denominada na escala; para materiais com maior dureza, utiliza-se o diamante de 120° e uma carga de 150 kg, neste caso a dureza será

considerada na escala C (SIMÊNCIO, 2017).

Em um estudo realizado por Filho (2012), foram obtidos valores de dureza Brinell (HB) para um aço 1045, o qual utilizou o indentador circular. A Tabela 5 mostra a proximidade dos valores de dureza Brinell obtidos neste estudo com o teste realizado por Filho (2012), também em um aço carbono.

Tabela 5 - Valores de Dureza Brinell para o aço carbono 1045

| Identação | Método convencional | Ferramenta computacional crescimento de regiões | Ferramenta computacional contornos ativos |
|----------------------------------|---------------------|---|---|
| 1 | 136,36 HB | 138,15 HB | 140,85 HB |
| 2 | 142,78 HB | 142,45 HB | 143,69 HB |
| 3 | 143,05 HB | 146,11 HB | 148,86 HB |
| 4 | 174,89 HB | 174,38 HB | 177,63 HB |
| 5 | 141,33 HB | 136,50 HB | 127,20 HB |
| 6 | 134,75 HB | 131,76 HB | 137,26 HB |
| 7 | 132,73 HB | 134,70 HB | 138,94 HB |
| 8 | 146,82 HB | 147,19 HB | 150,91 HB |
| 9 | 138,69 HB | 142,31 HB | 150,67 HB |
| 10 | 138,69 HB | 138,87 HB | 146,22 HB |
| Média | 143,00 HB | 143,24 HB | 146,22 HB |
| Desvio padrão | 11,96 | 11,97 | 13,18 |
| Erro relativo em relação à média | 2,64% | 2,64% | 8,85% |

Fonte: Adaptado de FILHO (2012).

2.8 Confiabilidade

O estudo da confiabilidade apresenta-se como peça fundamental para conhecer o funcionamento de aparelhos, suas principais características, os materiais que o compõem, os tipos de falhas possíveis, tendo em vista conhecer a durabilidade exata que eles terão, para enfim estabelecer uma confiabilidade no mercado. A criação dessa técnica surgiu devido à necessidade de peças e equipamentos realizarem atividades vitais nas indústrias, de maneira que também garantissem a segurança das pessoas e dos produtos (SILVA et al., 2015). “A confiabilidade de um item corresponde à sua probabilidade de desempenhar adequadamente o seu propósito especificado, por um determinado período de tempo e sob condições ambientais predeterminadas” (LEEMIS, 1995, p. 384).

A confiabilidade permite verificar o tempo de falha em todas as fases de seu ciclo de vida, estabelece a probabilidade do tempo de vida útil até ocorrer a pane. Essas características são de

grande importância para indústrias, pois podem determinar a durabilidade e maior confiabilidade para os consumidores, por ocasionarem menores chances de falhas ou defeitos (O'CONNOR, 2002).

Com a alta produtividade industrial, principalmente em meios eletrônicos, equipamentos de transporte e máquinas para desempenhar as mais diversas funções, houve a necessidade da criação de teste de confiabilidade, visto que, apesar de confiáveis, principalmente em processos em que ocorre produção em larga escala, precisam de um acompanhamento para verificar se o processo segue dentro dos padrões.

A confiabilidade tem por finalidade realizar pesquisas sobre o tempo de vida útil de determinado aparelho, peça ou maquinaria. Para isso, são necessários vários testes a fim de se conhecer as características e o que pode levar a uma pane inesperada (SILVA et al., 2015).

Para Matos e Zotti (2010), durabilidade está intrinsecamente ligada à confiabilidade e tem como objetivo fazer com que o tempo estimado seja de fato o esperado. A Estatística permite realizar estudos de confiabilidade utilizando probabilidades, pelos quais é possível identificar o tempo de falha e planos de manutenção.

A Medição das Falhas pode ser mesurada pelas taxas de falhas que estabelecem a frequência com que acontecem, pela confiabilidade, pois esta determina a probabilidade que a falha ocorre, e pela disponibilidade, que realiza a medição das consequências das falhas. Essas taxas e a confiabilidade são duas maneiras diferentes de analisar as medições. Neste trabalho, será usada a confiabilidade, por meio da probabilidade da Distribuição de Weibull, através do método Curva da Banheira, o qual utiliza os parâmetros α e β para conseguir determinar o desempenho de uma peça ou componente ao longo do tempo (SLACK et al., 1999).

2.9 Distribuição de Weibull

A Distribuição de Weibull é uma distribuição de probabilidade contínua, criada por Ernest Hjalmar Wallodi Weibull, físico sueco, que em 1939 realizou experimento do modelo de probabilidade estatística a respeito da fadiga de material. Esse modelo de probabilidade permite realizar estudos em que é possível ilustrar falhas de partida, na fase inicial (mortalidade infantil), falhas aleatórias e falhas provocadas por desgaste ao longo do tempo, estimar parâmetros acerca das falhas e obter resultados gráficos. Essa distribuição também permite a escrita específica ao risco proporcional e de falha acelerada. É amplamente utilizada na engenharia para realizar estudos sobre a vida útil, pois tem grande variabilidade de formas (CRUZ, 2013).

Associada à confiabilidade, a distribuição de Weibull pode realizar estudos de caso em que a taxa de falha é crescente, decrescente ou constante. Na engenharia, serve, por exemplo, para

estudos de casos do tempo de vida útil de aparelhos e máquinas, assim como para análise de sobrevivência, pois é uma técnica diversificada e muito difundida para testar a confiabilidade (RELIASOFT, 2005).

A Distribuição de Weibull pode ser aplicada quando um componente ou corpo de prova sofrer deformações aleatórias e de forma independente ao longo do tempo até que ocorra a inviabilidade de uso devido a algum defeito que tenha ocorrido (WERNER, 1996).

A análise por meio da distribuição de Weibull, também denominada análise de dados de vida, é uma técnica de análise que, a partir de uma amostra representativa, possui a funcionalidade de fazer previsões de um produto dentro de uma população. Isto é feito por um ajuste de parâmetros em uma distribuição estatística de dados de vida e essa distribuição pode então ser utilizada para estimar características importantes, tais como confiabilidade ou probabilidade de falha em um período específico (SILVEIRA, 2019).

Na Engenharia, a utilização da distribuição de Weibull deve-se a ela ser adaptável por meio de seus parâmetros que permitem estudar a ocorrência de defeito no decorrer do tempo, situação que é muito recorrente devido aos desgastes contínuos provocados por corrosão, fadiga, fluência (ASSIS, 2015).

A distribuição de Weibull define $f(x)$ como a função da densidade de falhas em relação ao número de ciclos (x); os parâmetros são: α é o parâmetro de escala ou vida e β que é tido como parâmetro de forma da curva, este é o coeficiente angular de forma que β é adimensional e α da mesma escala de grandeza dos dados, essa equação é definida conforme equação 6 (NOGUEIRA, 2014, TEIXEIRA, 2017).

$$f(x) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{x}{\alpha}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{x}{\alpha}\right)^{\beta}} \quad (6)$$

Em seguida, realiza-se os ajustes da equação 7, de modo que é obtida a probabilidade de falha, também chamada de função densidade acumulada, (CRUZ, 2013; NOGUEIRA, 2013).

$$F[f(x)] = 1 - e^{-\left(\frac{x}{\alpha}\right)^{\beta}} \quad (7)$$

Na qual $Ff(x)$ estabelece a probabilidade de falha em função dos parâmetros α e β ao longo do tempo. A confiabilidade está associada à característica do bom funcionamento, sendo esta oposta à probabilidade de falha. Define-se a partir da equação 8 a função de confiabilidade em relação aos ciclos (R_x), sendo representada pela seguinte equação:

$$R(x) = 1 - F[f(x)] \quad (8)$$

Segundo Cruz (2013), define-se:

x : variável número de ciclos ou vida em fadiga

α : vida característica ou parâmetro de escala

β : parâmetro de forma

$F[f(x)]$: probabilidade de falha

$R(x)$: confiabilidade

A partir da linearização da equação, forma-se uma nova equação:

$$\ln\left(\ln\left(\frac{1}{1-F[f(x)]}\right)\right)\beta \ln(x) - \beta \ln(\alpha) \quad (9)$$

$$Y = mX + c \quad (10)$$

$$\alpha = e^{\left(\frac{-c}{\beta}\right)} \quad (11)$$

Definido como:

$$Y = \ln(\ln(1/(1 - F[f(x)]))) \quad (12)$$

$$X = \ln(x)$$

$$m = \beta$$

$$c = -\beta (\ln(\alpha))$$

$$N_{Rx} = \alpha \cdot ((-\ln(Rx))^{\frac{1}{\beta}}) \quad (13)$$

Na qual N_{Rx} é denominado como a quantidade de ciclos que o corpo de prova pode suportar em relação à fadiga em comparação a confiabilidade definida $R(x)$.

2.9.1 Parâmetro de escala ou vida característica (α)

Este parâmetro permite conhecer sobre a resistência de fadiga que o material pode suportar. Ele também define a probabilidade de falha de 63,2% de falhas se o parâmetro de posição for 0 (MAKITA; SANTA MARIA, 2011; PEREIRA, 2013).

Por meio dele, verifica-se a forma de distribuição, uma vez que, ao se elevar esse parâmetro, a função se tornará dispersa (ALVES et al., 2013).

2.9.2 Parâmetro de forma (β)

Este parâmetro define a forma de inclinação que a curva se projeta, de maneira que determina a confiabilidade. É considerado adimensional dos dados e classifica o tipo de falha conforme descrição (CRUZ, 2013; ROCHA, 2015):

$\beta < 1$ para funções com taxas de falhas decrescentes

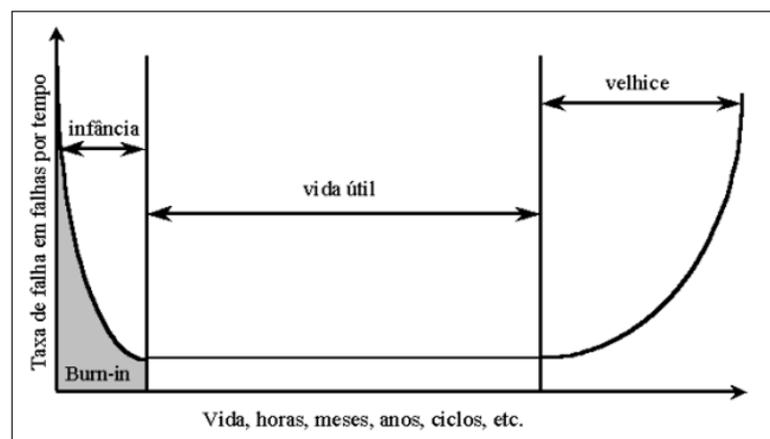
$\beta = 1$ para funções com taxas de falhas constantes

$\beta > 1$ para funções com taxas de falhas crescentes

- Falhas da infância ou Mortalidade infantil $\beta < 1$: ocorrem comumente por erros de projeto e geralmente declinam com o tempo através de processo de controle rígido.
- Falhas na vida útil $\beta = 1$: ocorrem de maneira inesperada em tempo não previsível. O defeito pode acontecer quando há uma concentração de tensão sobre uma peça.
- Falhas na velhice $\beta > 1$: ocorrem por desgaste devido ao tempo de uso que causa o envelhecimento do aparelho ou peça. São consideradas falhas crescentes e podem ser minimizadas com a manutenção preventiva. Porém, muitas vezes, pode decretar o fim da vida útil (MATOS; ZOTTI, 2010).

As inclinações do gráfico geram a curva da banheira para o parâmetro de β (Figura 11).

Figura 11 - Curva da Banheira.



Fonte: MATTOS; ZOTTI (2010, p. 6).

A curva da banheira é bastante utilizada para representar o comportamento de falha em vários materiais como aparelhos e eletrônicos, materiais mecânicos, até mesmo as pessoas. A utilização deste gráfico acontece devido à vida útil sofrer modificações com o decorrer do tempo (SOUZA, 2013). Uma outra causa que afeta bastante a determinação de um modelo que seja mais adequado para melhorar a manutenção dos equipamentos é a inexistência de dados para estudos estatísticos.

Haja vista a manutenção ter por finalidade reduzir ou tornar quase nulas as falhas, estas são realizadas para tornar o material seguro. Existe uma categoria chamada de dados censurados, em que as manutenções são preventivas, ou seja, antes que a falha ocorra, e permitem desenvolver estudos para estimar a confiabilidade, porém nem sempre conseguem determinar o momento ideal

para realização de intervenção ótima. Para auxiliar esse processo na resolução deste problema, é possível utilizar a combinação de dados de sistemas similares, com uso de informações de aparelhos que funcionam sob o mesmo processo (SOUZA, 2013).

2.10 Teste de Van der Waerden

O teste de Van der Waerden pode ser usado como alternativa ao teste de Kruskal Wallis, caso os dados não atendam aos pressupostos da ANOVA para normalidade e homogeneidade. As suposições do modelo são as mesmas do teste de Kruskal Wallis. Os dados consistem em k amostras aleatórias:

$$y_{i1}, \dots, y_{ini}, \quad i = 1, \dots, k. \quad (14)$$

Segundo Martinez (2014) e Pohlert (2016), todos os valores de N formam a classificação 1 para definir N como explicado no teste de Kruskal Wallis, ou seja, r_{ij} denota a classificação da observação y_{ij} e cada r_{ij} é transformado no quantil $R_{ij} / (N + 1)$ de uma variável normal aleatória padrão e é chamado:

$$A_{ij} = Z (r_{ij} / (N + 1)) \quad (15)$$

Conforme Pohlert (2016), o teste de Van der Waerden pode definir-se da seguinte forma:

H_0 : Todas as populações da distribuição k são idênticas;

H_1 : Pelo menos uma das populações tende a produzir observações diferentes das demais.

$$A_{ij} = \Phi^{-1} \left(\frac{R_{ij}}{n+1} \right) \quad (16)$$

A soma do i -ésimo score denota A_j . A variância (S^2) é calculada a partir da equação 17.

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum A^2_{ij} \quad (17)$$

Finalmente, a estatística de teste é dada pela:

$$V = \frac{1}{S^2} \sum_{j=1}^K \frac{A^2_j}{n_j} \quad (18)$$

A estatística de teste V é aproximadamente χ^2 -distribuída e testada quanto à significância em um nível de $1 - \alpha$ com $GL = k - 1$. (19)

O teste de escores normais proposto por Van der Waerden, para k amostras independentes, é empregado com dados ordinais em uma situação de teste de hipótese envolvendo duas ou mais amostras independentes. É um dos vários testes de escores normais que foram desenvolvidos para avaliar dados. Testes de escores normais transformam um conjunto de ordens de classificação em um conjunto de escores de desvio padrão (isto é, escores z), estes são frequentemente descritos

como testes de distribuição livre, na medida em que a forma das distribuições populacionais subjacentes para os dados originais tem pouco efeito sobre os resultados de tais testes. Por causa de suas suposições mínimas, os testes de escores normais são categorizados como testes não paramétricos (SHESKIN, 2000).

O teste de escores normais de Van der Waerden para k amostras independentes é baseado nas mesmas suposições que a análise de variância unidirecional de Kruskal Wallis por ranks, que são as seguintes:

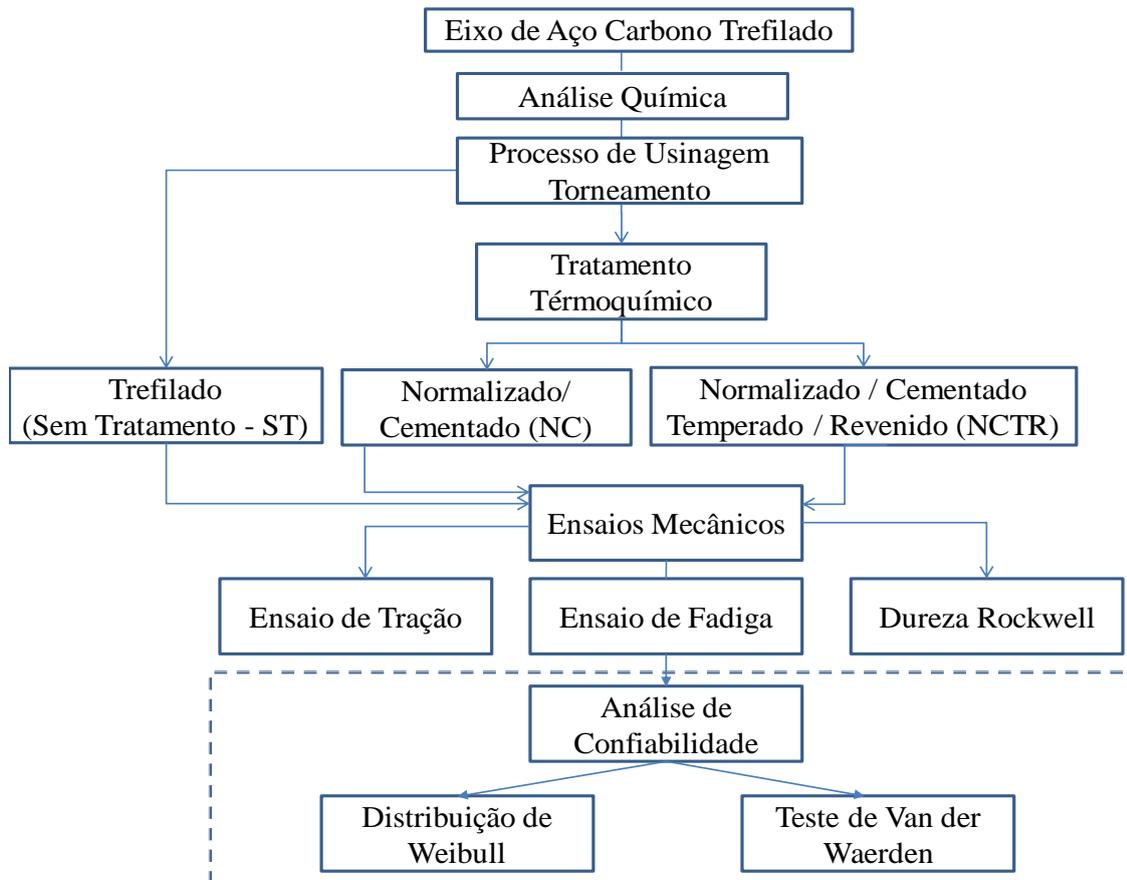
- Cada amostra foi selecionada aleatoriamente da população que representa;
- As k amostras são independentes uma da outra;
- A variável dependente (que é subsequentemente classificada) é uma variável aleatória contínua;
- As distribuições subjacentes das quais as amostras são derivadas são idênticas em forma. As formas das distribuições populacionais subjacentes, no entanto, não precisam ser normais.

Se o resultado do teste de escores normais de Van der Waerden para k amostras independentes for significativo, isso indica que há uma diferença relevante, entre pelo menos duas das amostras, no conjunto de k amostras. Consequentemente, pode-se concluir que existe uma alta probabilidade de que pelo menos duas das k amostras sejam distintas (SHESKIN, 2000).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O fluxograma abaixo define os procedimentos que foram realizados, por meio de distribuição de processos de atividades interligadas e suas transições decorrentes ao longo do tempo, com intuito de alcançar melhores resultados. Todas essas atividades podem ser vistas conforme a Figura 12 que exemplifica o passo a passo de como se compõe as técnicas aplicadas.

Figura 12 - Fluxograma de Atividades



Fonte: Autoria própria, 2019.

Para fins gerais desta pesquisa, as hipóteses a serem testadas são:

H_0 : Os tratamentos termoquímicos não são capazes de gerar maior confiabilidade

H_1 : Os tratamentos termoquímicos são capazes de gerar maior confiabilidade

O teste de hipótese geral será dividido em dois subtestes operacionalizados pela avaliação da Distribuição de Weibull e pelo Teste de Van der Waerden, a serem descritos adiante nas seções: 3.2.9 e 3.2.10 respectivamente.

3.1 Materiais

3.1.1 Elemento do estudo de caso

Para a realização desta pesquisa, utilizaram-se corpos de prova usinados a partir de eixos fabricados pelo processo de fundição e, posteriormente, por conformação a frio de trefilamento em seu estado de compra, como mostra a Figura 13.

Os eixos de aço carbono foram adquiridos na zona comercial mais frequentada pelos ribeirinhos, chamada “Porto do Sal”, na cidade de Belém, exclusivamente para realização deste trabalho.

Figura 13 - Eixos de aço carbono utilizados em rabetas adquiridos no mercado local



Fonte: Autoria própria, 2019.

Foram utilizadas, conforme mostra a Tabela 6, os corpos de prova para análise química, para ensaio de tração, para ensaio de fadiga e dureza.

Tabela 6 - Disposição de corpos de prova para realização de ensaios

| Ensaio | Quantidade |
|---------------------------|-------------------|
| Ensaio de Análise Química | 3 |
| Ensaio de Tração | 8 |
| Ensaio de Fadiga | 24 |
| Ensaio de Dureza | 3 |
| Total | 38 |

Fonte: Autoria própria, 2019.

Após esses procedimentos, foram realizados: o ensaio de dureza Rockwell B, posteriormente convertido para dureza Brinell devido às notações técnicas e científicas desta serem mais usuais; a mensuração dos dados para analisar a confiabilidade do material por meio da aplicação da Distribuição de Weibull, do teste de Van der Waerden; a análise fractográfica; a

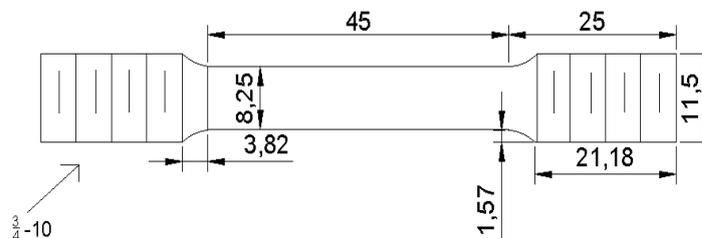
Microscopia de Varredura Eletrônica (M.E.V.); a Espectroscopia por Energia Dispersiva (E.D.S) e a Análise de Fluorescência. Esses testes foram feitos para estudar a composição química e saber se os tratamentos propiciaram melhoria da resistência mecânica do eixo.

3.2 Metodologia Experimental

3.2.1 Corpos de Prova

Para realização de ensaios mecânicos, é necessária a produção de corpos de prova seguindo os padrões e dimensões específicas para cada teste, estabelecidos pelas normas da ASTM E8/E8M para tração, de acordo com a Figura 14.

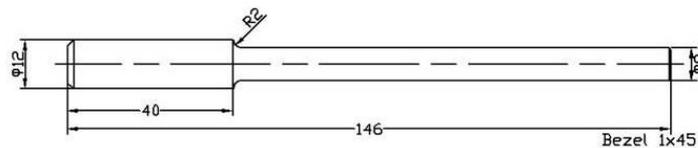
Figura 14 - Dimensões do corpo de prova para ensaio de tração



Fonte: Teixeira (2017, p. 28).

A máquina de ensaio de tração foi ajustada com velocidade 2.0 mm/min sendo utilizados 8 corpos de provas dos três eixos de rabeta, dos quais 3 ficaram no estado em que foram adquiridos (trefilados) e não passaram por tratamentos, 2 normalizados e cementados (NC) e 3 normalizados, cementados, temperados e revenidos (NCTR). Por meio deste teste, foi possível obter propriedades como: tensão de escoamento, tensão máxima e deformação total. A Figura 15 especifica o modelo do corpo de prova.

Figura 15 - Corpo de prova para ensaio de fadiga



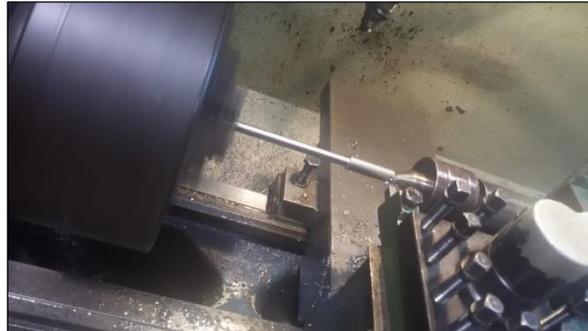
Fonte: Gunt (2016, p. 22).

3.2.2 Usinagem

Para realização do processo de usinagem, foram fabricados corpos de prova provenientes de cada um dos 3 eixos de rabeta, cujo material é o aço carbono. Esse procedimento pode ser observado na Figura 16. Parte dos materiais não receberam tratamentos termoquímicos e ficaram

trefilados conforme adquiridos; já outra parte recebeu tratamentos para realização dos ensaios mecânicos posteriormente.

Figura 16 - Usinagem do Corpo de Prova



Fonte: Autoria própria, 2019.

A Figura 17 faz referência à imagem do corpo de prova trefilado e pronto para realização do ensaio de tração. Na Figura 18 temos o corpo de prova trefilado pronto para ser submetido ao do ensaio de fadiga.

Figura 17 - Corpo de Prova trefilado para ensaio de tração



Fonte: Autoria própria, 2019.

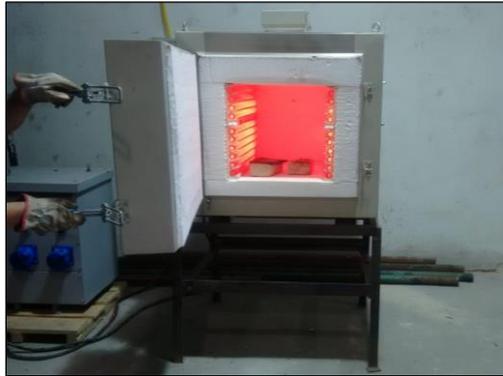
Figura 18 - Corpo de Prova trefilado para o ensaio de Fadiga



Fonte: Autoria própria, 2019.

Para a realização dos tratamentos térmicos de normalização, cementação, têmpera e revenimento, foi utilizado o forno industrial, linha laboratorial J 200, modelo LF0961201 com controlador lógico programável, com capacidade de Kw 16 e limite de temperatura de 1.200° C, do Instituto Federal do Pará (IFPA), como pode ser observado na Figura 19.

Figura 19 - Forno utilizado para realização dos tratamentos térmicos e químicos



Fonte: Autoria própria, 2019.

3.2.3 Normalização

No processo térmico de normalização, foram deixadas 1 peça de cada eixo para o ensaio de tração e 7 peças de cada eixo para o ensaio de fadiga. No processo de normalização, o forno foi aquecido durante uma hora a uma temperatura de 900°C. Na Figura 20, temos o corpo de prova para ensaio de tração após o processo de normalização e, na Figura 21, pode-se observar os corpos de prova para ensaio de fadiga após o receber o tratamento de normalização.

Figura 20 - Corpo de Prova Para Ensaio de Tração Normalizados



Fonte: Autoria própria, 2019.

Figura 21 - Corpos de Prova para Ensaio de Fadiga Normalizado



Fonte: Autoria própria, 2019.

Para a realização da cementação, foi utilizada uma caixa adicionada de carbono e posteriormente inseridos os corpos de prova de tração e fadiga. Em seguida, foram levados ao forno em temperatura de 955°C por um período de 5 horas, na sequência foi realizado o processo de resfriamento lento ao ar. A Figura 22 mostra a caixa para o procedimento de cementação, as Figuras 24 e 25 mostram os corpos de provas de ensaio de tração e ensaio de fadiga, respectivamente, após o tratamento termoquímico.

Figura 22 - Caixa com Carbono para Tratamento de Cementação



Fonte: Autoria própria, 2019.

Figura 23 - Corpos de Prova para Ensaio de Tração Normalizado e Cementado



Fonte: Autoria própria, 2019.

Figura 24 - Corpos de Prova para Ensaio de Fadiga Normalizado e Cementado



Fonte: Autoria própria, 2019.

3.2.4 Normalização, Cementação, Têmpera e Revenimento (NCTR)

Neste processo de tratamento, foram deixadas 3 amostras para o ensaio de tração e 8 para o ensaio de fadiga. Já com os materiais normalizados e cementados, estes foram temperados por 30 minutos a uma temperatura de 850°C. Após essa etapa, foi feito o resfriamento brusco utilizando óleo mineral conforme a Figura 25, chamado de têmpera; em seguida foi feito o revenimento por 1 hora a uma temperatura de 700°C para posteriormente ser realizado o resfriamento a temperatura ambiente, a fim de permitir o alívio de tensões provocados pela têmpera. As Figuras 26 e 27 mostram os corpos de prova para ensaio de tração e fadiga, respectivamente, após os tratamentos termoquímicos.

Figura 25 - Meio de arrefecimento após tratamento térmico de têmpera com óleo mineral



Fonte: Autoria própria, 2019.

Figura 26 - Corpos de prova para ensaio de tração normalizado, cementado, temperado e revenido



Fonte: Autoria própria, 2019.

Figura 27 - Corpos de prova para ensaio de fadiga normalizado, cementado, temperado e revenido



Fonte: Autoria própria, 2019.

3.2.5 Ensaio de Tração

O ensaio de tração foi realizado na máquina da AROTEC, modelo WDW 1006 - USB acoplado ao computador com sistema de aquisição de dados, pertencente ao Instituto Federal do Pará e possibilitou a realização dos ensaios na qual foram realizados com velocidade de 2 mm/min. Estes permitiram plotar gráficos no software Origin Pro 8 para analisar a tensão-deformação também conhecida como curva S-N, dos corpos de prova que foram fabricados em processo de conformação a frio, trefilados ST, assim como os que foram tratados NC e NCTR, de acordo com a Figura 28. Por meio deste ensaio é extraído os valores da tensão de escoamento, que é necessário para ser inserido na máquina de ensaio de fadiga.

Figura 28 - Máquina de ensaio de tração do IFPA



Fonte: Autoria própria, 2019.

3.2.6 Ensaio de Fadiga

Os resultados dos ensaios de fadiga rotativa foram obtidos a partir da máquina Gunt Hamburg WP 140 Umla, Spannung 230 V, como mostra a Figura 29, com frequência 60 Hz, Nominal Power 0,4 kw. Com os valores de tensão de escoamento extraídos a partir da média do ensaio de tração, estes foram inseridos na máquina fadiga, realizou-se o ensaio de fadiga com os grupos de materiais ST, NC e NCTR, e a partir da quantidade de ciclos que os corpos de prova puderam suportar criou-se a Tabela da Distribuição de Weibull assim como os gráficos de taxas de falhas x confiabilidade através do software Excel, e analisou-se a vida útil deste aço carbono por intermédio dos parâmetros α e β advindos da distribuição de Weibull e a comparação de grupos com o teste de Van der Waerden.

Figura 29 - Máquina de Fadiga por Flexão Rotativa do IFPA



Fonte: Autoria própria, 2019.

3.2.7 Ensaio de dureza Rockwell

Realizou-se ensaios de dureza Rockwell B (HRB) por ser um aço baixo carbono e mais adequado que o C (HRC) para verificar possíveis variações de dureza na seção transversal e superfície dos corpos de prova de fadiga, os quais podem afetar o desempenho do material.

Devido a esse tipo de dureza não ser utilizada cientificamente e comercialmente na indústria, será convertida para dureza Brinell (HB). A partir dos valores obtidos destes 5 pontos de dureza, será realizada a média de dureza Rockwell B (HRB), a qual será transformada para média da dureza Brinell (HB). Na Figura 30 podemos visualizar o Durômetro Rockwell.

Figura 30 - Durômetro Rockwell



Fonte: Autoria própria, 2019.

3.2.8 Rugosidade

Para verificar a superfície do material (rugosidade) dos corpos de prova, utilizou-se o rugosímetro Digital Portátil - TR-200 – Time, TR-200 com escala de rugosidade para medir em Ra, Rz, Ry, Rq, Rt, Rp, Rmax, Rv, R3z, RS, RSm, RSk e Rmr, sendo que neste trabalho utilizou-se a escala Ra. Com resolução de display de 0,01 μm , tem escala de medição de 0,025 a 12,5 μm ,

Comprimento de Corte de 0,25 mm/ 0,8 mm/ 2,5 mm/ Auto, Comprimento de Avaliação 1 a 5 L, Comprimento Máximo 17,5 mm, Comprimento Mínimo 1,3 mm, Interface RS232.

A norma NBR 8404/84 estabelece 12 classes de rugosidade, correspondente aos desvios médios aritméticos (Ra) expressos em microns (μm). A Tabela 7 informa as classes de rugosidade e com os desvios correspondentes.

Tabela 7 - Características de rugosidade (Ra)

| Classe de rugosidade | Desvio médio aritmético Ra (μm) |
|----------------------|--|
| N12 | 50 |
| N11 | 25 |
| N10 | 12,5 |
| N9 | 6,3 |
| N8 | 3,2 |
| N7 | 1,6 |
| N6 | 0,8 |
| N5 | 0,4 |
| N4 | 0,2 |
| N3 | 0,1 |
| N2 | 0,05 |
| N1 | 0,025 |

Autor: Adaptado NBR 8404 (1984).

A rugosidade dos corpos de prova de ensaio de fadiga foi medida por meio da superfície usinada. O parâmetro utilizado foi o Ra (Roughness Average), sendo este um dos mais utilizados nas pesquisas e na área industrial e, na área técnica, recomendado pela ABNT de acordo com a norma NBR 8404 e NBR 4487, através do rugosímetro digital, como pode ser visto na Figura 31.

As normas estabelecem classes de rugosidade e os seus desvios médios correspondentes, assim como termos, definições e parâmetros. As medidas deste estudo foram realizadas na posição transversal, paralela ao comprimento de 0,8 mm, sendo obtidos quatro valores de rugosidade para cada corpo de prova e, a partir de então, encontrada a média aritmética para cada grupo de materiais.

Figura 31 - Rugosímetro Digital



Fonte: Autoria própria, 2019.

3.2.9 Distribuição de Weibull

3.2.9.1 Análise da Distribuição de Dados por Weibull

A mensuração dos dados pela técnica da distribuição de Weibull ocorre a partir da obtenção dos dados advindos do ensaio de fadiga, estabelecendo as seguintes etapas:

- I. Inicialmente, os valores dos níveis de tensão foram estabelecidos para os corpos de prova trefilados (sem tratamento) (446), normalizados e cementados (129) e normalizados, cementados temperados e revenidos (352).
- II. Para cada nível de tensão, os dados foram ordenados de forma crescente de número de ciclos até o momento da fratura.
- III. Já com os dados de tensão obtidos, foi calculada a probabilidade de falha utilizando o Rank Médio de Bernard, na equação 20, que também foi utilizado por Nogueira (2013), Heleno (2014) e Teixeira (2017), o qual i é o número da série analisada e n o número total de amostras da série. Neste trabalho, foram utilizadas 5 amostras para ST, 5 para NC e 5 para NCTR.

$$Rm = \frac{i-0,3}{n+0,4} \quad (20)$$

- IV. A partir dos valores obtidos do Ranking Médio, realizou-se o cálculo de log com uso da seguinte fórmula: $\ln(\ln(1/(1-Rm)))$. (21)
- V. O próximo passo foi extrair os valores de \ln (ciclos) a partir das informações dos resultados do passo IV.
- VI. Por conseguinte, foi plotado um gráfico a partir dos resultados de: $\ln(\ln(1/(1-Rm)))$ que correspondente ao eixo Y e os resultados de \ln (ciclos) que correspondem ao eixo X.
- VII. Nessa etapa, foi feita a regressão linear e desta forma encontrado o parâmetro de forma (β).
- VIII. Para obtenção do parâmetro α , utilizou-se a fórmula $\alpha = e^{\left(\frac{-c}{\beta}\right)}$, conforme equação 11 e desta maneira conheceu-se o parâmetro de escala (α).
- IX. Após serem encontrados os parâmetros (α) e (β) foi possível encontrar a densidade acumulada de falha por meio da fórmula: $F[f(x)] = 1 - e^{-\left(\frac{x}{\alpha}\right)^\beta}$, de acordo com a equação 7.
- X. Com o uso destes parâmetros (α) e (β), também foi possível saber a quantidade de ciclos a que o material pode resistir para uma confiabilidade de 50%, utilizando a equação 13:

$$N_{Rx} = \alpha \cdot ((-\ln(Rx))^{\frac{1}{\beta}}).$$

Portanto as hipóteses a serem testadas são:

H₀: Os tratamentos termoquímicos não são capazes de promover o aumento da vida útil

H₁: Os tratamentos termoquímicos são capazes de promover o aumento da vida útil.

Esses resultados serão comparados a partir dos parâmetros α (parâmetro de escala ou vida) e β (parâmetro de forma).

3.2.10 Teste de Van der Waerden

O teste não paramétrico de Van der Waerden foi aplicado através do software R Studio no qual foi possível identificar a resposta de cada material diante dos testes de fadiga, também permitiu plotar o gráfico de comparação dos tratamentos e constatar qual grupo obteve melhor resultado.

A estatística de Van der Waerden testa as seguintes hipóteses:

H₀: Todas as populações da distribuição k são idênticas;

H₁: Pelo menos uma das populações tende a produzir observações diferentes das demais.

Desta forma caso H₀ seja rejeitado, pode-se concluir que algum tratamento se diferenciou dos demais.

Neste trabalho, o teste Van der Waerden se mostrou mais robusto em relação ao teste Kruskal Wallis, pois este foi mais sensível na comparação de grupos e identificação de qual deles obteve melhores resultados.

3.2.11 Microscopia de Varredura Eletrônica (M.E.V.)

A Microscopia foi realizada para analisar a superfície de fratura e verificar as condições e características de cada material, através da resolução de topografia, identificação de formação de microcavidades (dimples) dos materiais sem tratamento e com tratamento, desta forma será identificado se os tratamentos contribuíram para melhoria da resistência mecânica e conseqüentemente do tempo de vida do material. O aparelho utilizado foi o microscópio de varredura eletrônica da Tescan, como mostra a Figura 32.

Figura 32 - Microscópio de Varredura Eletrônica



Fonte: Autoria própria, 2019.

3.2.12 Análise da Espectroscopia por Energia Dispersiva (E.D.S.)

A Espectroscopia por Energia Dispersiva também foi realizada com o mesmo equipamento da microscopia de varredura eletrônica, conforme Figura 32, a qual permitiu uma análise quantitativa da composição química por energia dispersiva de raio-x, visualizando e diferenciando a densidade das amostras de cada grupo de corpo de prova sem tratamento e com tratamento, o que fornece o percentual constituinte de cada material.

3.2.13 Fractografia

A análise fractográfica analisou a superfície de fratura dos corpos de prova que passaram por ensaio de fadiga, com auxílio do estereoscópio da marca Carl Zeiss, de acordo com a Figura 33. Utilizou-se o software Zeiss 2.0, de forma que verificou-se características da fratura, se dúctil ou frágil, fibroses, marcas de praia, pontos inclusão, o comportamento dos materiais que não passaram por tratamento e os que passaram por tratamento, sob tensões diferentes estabelecidas por meio ensaio de tração.

Figura 33 - Estereoscópio



Fonte: Autoria própria, 2019.

3.2.14 Análise de Fluorescência de Raio X

A espectrometria de fluorescência de raios-X é uma técnica a qual permite a identificação dos elementos químicos presentes em cada amostra, por meio da proporção (concentração) em que cada um deles se encontra presente no aço carbono, de maneira que mensura-se a intensidade do raio x apresentados por cada um dos constituintes. Essa técnica possibilita realizar a análises químicas em todos os tipos de amostras (líquidos, sólidos ou pós) por isso é uma das mais utilizadas assim como a espectrometria por energia dispersiva (EDS).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Análise de Fluorescência de Raio X

A análise de fluorescência demonstrou a composição química em parte por milhão (ppm) nos corpos de prova ST, NC e NCTR. Nessa análise, foi visualizada a concentração dos seguintes elementos: silício (Si) que é responsável por promover o aumento da dureza e a resistência nos materiais; cálcio (Ca) que proporciona uma melhoria na resistência mecânica e também torna o aço mais limpo conforme citado por Marcon (2007); cromo (Cr), permite ter a melhora da temperabilidade assim como a resistência à corrosão e à abrasão; manganês (Mn) contribui para aumentar a dureza e a resistência mecânica, além de possuir ação desoxidante; e ferro (Fe), principal elemento constituinte, seu teor está acima de 98% nas amostras estudadas.

A Tabela 8 apresenta a concentração dos elementos silício (Si), cálcio (Ca), cromo (Cr), manganês (Mn) e ferro (Fe) encontrados por meio da análise de fluorescência. Nela pode-se observar o quantitativo dos elementos químicos presentes, sendo que o teor de ferro é muito semelhante tanto para o material sem tratamento assim como para os que receberam tratamentos. O componente predominante é o ferro e em todos os materiais teve valor próximos. O teor de silício foi um pouco maior nos materiais NC e menor nos NCTR. Em relação ao teor de Cálcio, o maior teor encontrado foi nos materiais NCTR e o menor nos ST. Os teores de cromo se estabeleceram muito próximos entre todos os materiais. Quanto à concentração do manganês, o corpo de prova com maior teor foi no NCTR e o menor foi ST.

Tabela 8 - Concentração em ppm dos elementos silício, cálcio, cromo, manganês e ferro, analisados quantitativamente por meio da técnica da fluorescência de raios X

| Elemento Químico | Teor de Composição nos materiais em ppm (parte por milhão) | | |
|------------------|--|---------------------|-----------------------|
| | Corpo de Prova (ST) | Corpo de Prova (NC) | Corpo de Prova (NCTR) |
| Silício (Si) | 0,307 | 0,337 | 0,301 |
| Cálcio (Ca) | 0,164 | 0,192 | 0,197 |
| Cromo (Cr) | 0,117 | 0,119 | 0,121 |
| Manganês (Mn) | 0,743 | 0,755 | 0,752 |
| Ferro (Fe) | 98,600 | 98,500 | 98,500 |

Fonte: Autoria própria, 2019.

4.2 Ensaio de Tração

A Tabela 9 apresenta os valores para o ensaio de tração utilizando corpos de prova do eixo de rabeta fabricado a partir do aço carbono. Nela os materiais ST apresentaram os maiores valores de tensão de escoamento; quanto ao limite de resistência à tração, o maior valor encontrado foi

em uma amostra do grupo ST, os outros maiores valores no grupo NCTR. Em relação à deformação total, o corpo de prova do grupo NCTR foi o que mostrou maior deformação total.

Tabela 9 - Dados obtidos do ensaio de tração com a velocidade de 2,00 mm/min, em aço carbono com material sem tratamento e com diferentes tipos de tratamentos

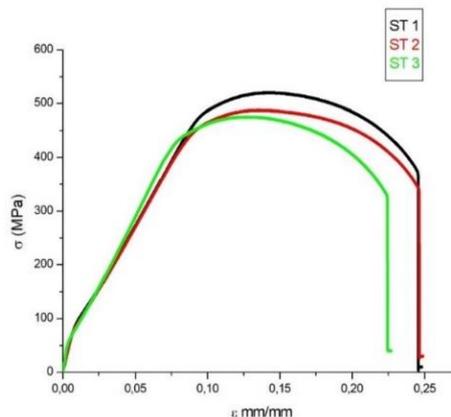
| Corpo de Prova | σ Escoamento | σ Max | Deformação Total |
|----------------|---------------------|--------------|------------------|
| ST 1 | 478,25 | 520,04 | 0,25 |
| ST 2 | 442,80 | 487,76 | 0,25 |
| ST 3 | 416,41 | 475,48 | 0,23 |
| NC 1 | 130,07 | 402,66 | 0,34 |
| NC 2 | 128,13 | 388,74 | 0,30 |
| NCTR1 | 363,29 | 507,89 | 0,39 |
| NCTR2 | 357,30 | 513,69 | 0,40 |
| NCTR3 | 350,00 | 511,82 | 0,34 |

Fonte: Autoria própria, 2019.

Os gráficos das Figuras 31, 32 e 33 mostram os corpos de prova sem tratamento térmico (ST), os normalizados e cementados (NC) e os normalizados, cementados, temperados e revenidos (NCTR), respectivamente. A partir dos gráficos, foram obtidas as tensões de escoamento, tensão de ruptura e deformação total. Os corpos de provas ST apresentaram os seguintes resultados: ST 1 tensão de escoamento 478,25, tensão máxima 520,04, deformação máxima 0,25. O corpo de prova ST 2 teve uma tensão de escoamento 442,80, tensão máxima 487,76, deformação máxima 0,25. O ST 3 apresentou os seguintes resultados: tensão de escoamento 416,41, tensão máxima 475,48, deformação máxima 0,23.

O limite de escoamento para os corpos de prova ST foi obtido através de uma reta paralela à curva por meio do ensaio de tração. O valor do limite de escoamento é essencial porque este determina o valor tensão a que o material deve ser exposto no ensaio de fadiga rotativa. A partir desses valores realiza-se a média de três valores de tensão por meio do ensaio de tração, gerada no software Origin 8.0, conforme Figura 34.

Figura 34 - Ensaio de tração dos corpos de prova ST 1, ST 2 e ST 3, com velocidade de ensaio de 2 mm/min.

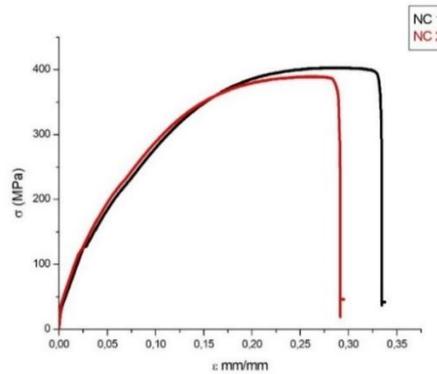


Fonte: Autoria própria, 2019.

A Figura 35 é referente aos corpos de prova NC: o corpo de prova 1 teve a tensão de escoamento 130,07, limite de resistência à tração de 402,66, deformação máxima 0,34; enquanto o corpo de prova 2 obteve tensão de escoamento 128,13, limite de resistência à tração 388,74, deformação máxima 0,30.

Para os corpos de prova NC, foi possível visualizar o patamar de escoamento na curva gerada pela máquina de ensaio de tração e também gerada pelo software Origin 8.0 após o tratamento dos dados.

Figura 35 - Ensaio de tração do corpo de prova NC 1 e NC 2 com velocidade de ensaio de 2 mm/min

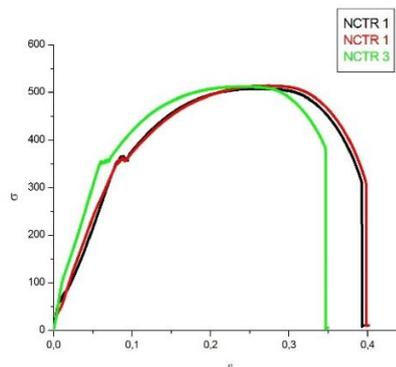


Fonte: Autoria própria, 2019.

A Figura 36 é referente ao grupo de corpos de prova NCTR, o qual apresentou os seguintes resultados: tensão de escoamento 363,29, tensão máxima 507,89 e deformação máxima 0,39 para o corpo de prova 1; tensão de escoamento 357,30, tensão máxima 513,69 e deformação máxima 0,40 para o corpo de prova 2; e tensão de escoamento 350,00, tensão máxima 511,82 e deformação máxima 0,34 para o corpo de prova 3.

A curva obtida através do ensaio de tração para o corpo de prova NCTR, elaborada com uso do software Origin 8.0, após a análise dos dados, apresentou patamar de tensão de escoamento como pode ser observado na Figura 36.

Figura 36 - Ensaio de tração do corpo de prova NCTR, com velocidade de ensaio de 2 mm/min.



Fonte: Autoria própria, 2019.

Dessa forma, conclui-se que os ST tiveram a maior tensão de escoamento, já o limite de resistência à reação, apenas uma amostra de ST teve o maior valor, superando o grupo NCTR; já o corpo de prova NCTR teve maior alongamento, os corpos de prova NC tiveram os valores mais baixos quanto à tensão de escoamento, esta que será utilizada no ensaio de fadiga.

4.3 Rugosidade

Nesta pesquisa, a comparação da rugosidade entre os três grupos, quanto aos valores médios obtidos, retratou que: os materiais ST tiveram a maior média de rugosidade com 2.496 μm nos corpos de prova; já o grupo com tratamento NC tiveram a menor média com 2.176 μm de medição de rugosidade e os NCTR tiveram média de 2.369 μm de rugosidade. Logo define-se que o grupo NC teve o melhor acabamento em sua superfície. Esses valores podem ser consultados nas Tabelas 10, 11 e 12.

Tabela 10 - Rugosidade dos corpos de prova de fadiga ST

| Rugosidade dos Materiais Trefilados (Sem Tratamento - ST) | | | | | | | | | | | | |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Unidade | CP 1 | CP 2 | CP 3 | CP 4 | CP 5 | CP 6 | CP 7 | CP 8 | CP 9 | CP 10 | CP 11 | CP 12 |
| RA | 3.192 | 2.491 | 2.299 | 1.266 | 1.676 | 3.367 | 4.202 | 1.918 | 3.642 | 1.278 | 2.949 | 1.594 |
| RA | 2.529 | 2.270 | 2.402 | 1.489 | 1.538 | 3.517 | 3.734 | 1.657 | 4.242 | 1.479 | 3.162 | 1.941 |
| RA | 2.995 | 2.030 | 2.559 | 1.117 | 1.941 | 3.685 | 3.910 | 1.614 | 3.923 | 1.684 | 3.073 | 1.738 |
| RA | 2.373 | 2.352 | 2.259 | 1.365 | 1.952 | 3.932 | 3.780 | 2.062 | 4.157 | 1.351 | 2.452 | 1.692 |
| Média | 2.772 | 2.286 | 2.380 | 1.309 | 1.777 | 3.625 | 3.907 | 1.813 | 3.991 | 1.448 | 2.909 | 1.741 |
| Desvio Padrão | 385 | 193 | 134 | 157 | 204 | 242 | 211 | 214 | 269 | 178 | 317 | 146 |

Fonte: Autoria própria, 2019.

Tabela 11 - Rugosidade dos corpos de prova de fadiga com tratamento NC

| Rugosidade dos Materiais Normalizados, Cementados (NC) | | | | | | | |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Unidade | CP 1 | CP 2 | CP 3 | CP 4 | CP 5 | CP 6 | CP 7 |
| RA | 1.506 | 2.405 | 1.928 | 2.376 | 2.365 | 1.376 | 1.657 |
| RA | 1.707 | 3.570 | 2.037 | 1.504 | 2.146 | 1.561 | 1.956 |
| RA | 2.333 | 2.173 | 1.804 | 2.171 | 2.857 | 2.560 | 2.536 |
| RA | 2.057 | 3.288 | 1.987 | 1.984 | 3.511 | 1.862 | 1.680 |
| Média | 1.901 | 2.859 | 1.939 | 2.009 | 2.720 | 1.840 | 1.957 |
| Desvio Padrão | 367 | 675 | 100 | 373 | 606 | 520 | 409 |

Fonte: Autoria própria, 2019.

Tabela 12 - Rugosidade dos corpos de prova de fadiga com tratamento NCTR

| Rugosidade dos Materiais Normalizados, Cementados, Temperados e Revenidos (NCTR) | | | | | | | | |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Unidade | CP 1 | CP 2 | CP 3 | CP 4 | CP 5 | CP 6 | CP 7 | CP 8 |
| RA | 1.810 | 1.711 | 2.881 | 3.261 | 2.406 | 2.926 | 1.298 | 2.554 |
| RA | 2.739 | 2.002 | 2.216 | 3.243 | 1.779 | 3.396 | 1.145 | 2.586 |
| RA | 1.706 | 1.896 | 3.713 | 3.977 | 2.196 | 3.478 | 1.174 | 2.847 |
| RA | 2.294 | 1.347 | 1.884 | 1.713 | 1.521 | 3.481 | 1.173 | 3.453 |
| Média | 2.137 | 1.739 | 2.674 | 3.049 | 1.976 | 3.320 | 1.198 | 2.860 |
| Desvio Padrão | 476 | 288 | 808 | 954 | 400 | 266 | 68 | 417 |

Fonte: Autoria própria, 2019.

Em comparação ao estudo de rugosidade realizado por Bezerra e Machado (2008), por meio das médias e desvios padrão Ra (rugosidade média), verifica-se valores semelhantes para o aço carbono conforme estabelecido nas Tabelas 10, 11 e 12 de rugosidade com medições.

Quanto ao experimento de Souza (2017), percebeu-se, na presente pesquisa, o comportamento do material como dúctil, sendo este aço carbono de teor semelhante. O limite de resistência à tração, teve uma variação entre os materiais com e sem tratamento (desta pesquisa), a qual compreende-se na faixa de valores do estudo de Souza (2017). Em relação ao alongamento total, os valores obtidos foram iguais ou superiores ao estudo já citado.

4.4 Análise da Dureza Rockwell/Brinell

A partir dos valores obtidas em cinco áreas da seção transversal de cada um dos corpos de prova de ensaio de fadiga sem tratamento, foi realizada a média e encontrados os valores de dureza Rockwell B, transformados para dureza Brinell e determinado o valor da dureza do material, de acordo com a Tabela 13.

Tabela 13 - Médias da seção transversal dos corpos de prova ST

| DUREZA ROCKWEL B PARA CORPOS DE PROVA ST NA SEÇÃO TRANSVERSAL | | | | | | | | DUREZA BRINELL |
|--|-------------------|------------|------------|------------|------------|------------|--------------|-----------------------|
| | Carga(kgf) | HRB | HRB | HRB | HRB | HRB | MÉDIA | HB MÉDIA |
| CP1 | 100 | 84,70 | 85,20 | 87,00 | 82,20 | 85,80 | 84,98 | 152 |
| CP2 | 100 | 81,80 | 78,90 | 83,80 | 81,90 | 81,60 | 81,60 | 143 |
| CP3 | 100 | 78,40 | 78,70 | 83,90 | 84,00 | 85,80 | 82,16 | 152 |
| CP4 | 100 | 79,70 | 83,90 | 83,70 | 84,30 | 84,00 | 83,12 | 152 |
| CP5 | 100 | 83,40 | 84,60 | 85,10 | 85,50 | 86,40 | 85,00 | 162 |

Fonte: Autoria própria, 2019.

A Tabela 14 apresenta as médias da seção de superfície dos corpos de prova por meio dos valores obtidos em cinco áreas na superfície de cada um deles no ensaio de fadiga sem tratamento. A partir dos valores individuais, foi realizada a média e encontrados valores de dureza Rockwell B, depois transformados para dureza Brinell e então determinou-se o valor da dureza do material.

Tabela 14 - Médias da seção de superfície dos corpos ST

| DUREZA ROCKWEL B PARA CORPOS DE PROVA ST NA SUPERFÍCIE DO MATERIAL | | | | | | | | DUREZA BRINELL |
|---|-------------------|------------|------------|------------|------------|------------|--------------|-----------------------|
| | Carga(kgf) | HRB | HRB | HRB | HRB | HRB | MÉDIA | HB MÉDIA |
| CP1 | 100 | 78,60 | 75,80 | 79,60 | 81,30 | 78,90 | 78,84 | 143 |
| CP2 | 100 | 81,00 | 81,50 | 80,50 | 81,60 | 79,50 | 80,82 | 143 |
| CP3 | 100 | 81,90 | 82,00 | 78,60 | 80,50 | 80,30 | 80,66 | 143 |
| CP4 | 100 | 79,20 | 79,90 | 79,50 | 81,10 | 80,20 | 79,98 | 143 |
| CP5 | 100 | 83,60 | 83,70 | 79,50 | 82,20 | 84,00 | 82,60 | 152 |

Fonte: Autoria própria, 2019.

Na Tabela 15, podem-se observar os valores obtidos em cinco áreas da seção transversal de cada um dos corpos de prova de ensaio de fadiga com tratamento de normalização e cementação, a partir dos quais foi realizada a média e encontrados os valores de dureza Rockwell B, convertidos para dureza Brinell, que determinou o valor da dureza do material.

Tabela 15 - Médias da seção transversal dos corpos de prova NC

| DUREZA ROCKWEL B PARA CORPOS DE PROVA NORMALIZADO E CEMENTADO NA SEÇÃO TRANSVERSAL MÉDIA | | | | | | | DUREZA BRINELL | |
|---|------------|------------|------------|------------|------------|--------------|-----------------------|-------|
| Carga(kgf) | HRB | HRB | HRB | HRB | HRB | MÉDIA | HB MÉDIA | |
| CP1 | 100 | 42,80 | 49,60 | 50,20 | 53,60 | 51,70 | 49,58 | 85,50 |
| CP2 | 100 | 47,20 | 53,50 | 53,10 | 54,40 | 51,60 | 51,96 | 85,50 |
| CP3 | 100 | 44,80 | 50,50 | 51,40 | 52,00 | 54,20 | 50,58 | 85,50 |
| CP4 | 100 | 47,40 | 50,50 | 52,00 | 49,60 | 50,50 | 50,00 | 85,50 |
| CP5 | 100 | 43,40 | 49,30 | 53,10 | 51,30 | 53,40 | 50,10 | 85,50 |

Fonte: Autoria própria, 2019.

A partir dos valores obtidas em cinco áreas na superfície de cada um dos corpos de prova de ensaio de fadiga NC, representados na Tabela 16, encontrou-se os valores de dureza Rockwell B por meio da média, os quais foram transformados para dureza Brinell para determinar o valor da dureza do material.

Tabela 16 - Médias da seção de superfície dos corpos de prova NC.

| DUREZA ROCKWEL B PARA CORPOS DE PROVA NORMALIZADO E CEMENTADO NA SUPERFÍCIE DO MATERIAL | | | | | | | DUREZA BRINELL | |
|--|------------|------------|------------|------------|------------|--------------|-----------------------|-----|
| Carga(kgf) | HRB | HRB | HRB | HRB | HRB | MÉDIA | HB MÉDIA | |
| CP1 | 100 | 65,70 | 62,50 | 61,40 | 68,20 | 67,50 | 65,06 | 105 |
| CP2 | 100 | 58,10 | 64,60 | 69,10 | 61,40 | 68,60 | 64,36 | 105 |
| CP3 | 100 | 65,70 | 64,60 | 65,30 | 63,30 | 72,10 | 66,20 | 105 |
| CP4 | 100 | 60,90 | 64,60 | 62,60 | 67,00 | 74,80 | 65,98 | 105 |
| CP5 | 100 | 65,70 | 65,10 | 65,00 | 60,20 | 63,90 | 63,98 | 105 |

Fonte: Autoria própria, 2019.

Na Tabela 17, verifica-se os valores obtidos em cinco áreas da seção transversal de cada um dos corpos de prova de ensaio de fadiga NCTR. A partir deste valores obtidos foi feita a média, encontrou-se os valores de dureza Rockwell B, e por conseguinte convertidos para dureza Brinell para determinar o valor da dureza do material.

Tabela 17 - Médias da seção transversal dos corpos de prova NCTR

| DUREZA ROCKWEL B PARA CORPOS DE PROVA NCTR NA SECÃO TRANSVERSAL | | | | | | | | DUREZA BRINELL |
|---|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------------|
| | Carga(kgf) | HRB | HRB | HRB | HRB | HRB | MÉDIA | HB MÉDIA |
| CP1 | 100 | 66,60 | 68,50 | 69,50 | 71,10 | 71,50 | 69,44 | 114 |
| CP2 | 100 | 62,70 | 68,20 | 68,20 | 70,00 | 68,20 | 67,46 | 114 |
| CP3 | 100 | 64,60 | 66,80 | 66,20 | 70,80 | 69,30 | 67,54 | 114 |
| CP4 | 100 | 63,30 | 64,70 | 66,80 | 68,10 | 68,90 | 66,36 | 105 |
| CP5 | 100 | 62,80 | 65,40 | 67,00 | 72,10 | 70,20 | 67,50 | 114 |

Fonte: Autoria própria, 2019.

Na Tabela 18, verifica-se os valores obtidos em cinco áreas da seção transversal de cada um dos corpos de prova de ensaio de fadiga NCTR. Feita a média dos valores individuais, encontrou-se os valores de dureza Rockwell B, que convertidos para dureza Brinell determinaram o valor da dureza do material.

Tabela 18 - Médias da seção de superfície dos corpos de prova com tratamento de normalização, cementação têmpera e revenimento

| DUREZA ROCKWEL B PARA CORPOS DE PROVA NCTR NA SUPERFÍCIE DO MATERIAL | | | | | | | | DUREZA BRINELL |
|--|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------------|
| | Carga(kgf) | HRB | HRB | HRB | HRB | HRB | MÉDIA | HB MÉDIA |
| CP1 | 100 | 81,10 | 81,70 | 79,30 | 83,60 | 91,40 | 83,42 | 152 |
| CP2 | 100 | 84,90 | 81,00 | 83,00 | 82,80 | 83,70 | 83,08 | 152 |
| CP3 | 100 | 79,70 | 81,60 | 82,10 | 82,50 | 80,80 | 81,34 | 143 |
| CP4 | 100 | 79,50 | 78,70 | 75,80 | 77,20 | 82,20 | 78,68 | 133 |
| CP5 | 100 | 77,00 | 73,80 | 75,60 | 77,40 | 77,80 | 76,32 | 133 |

Fonte: Autoria própria, 2019.

Para análise do teste de dureza nas amostras de cada grupo, foram realizadas 5 perfurações, com uso do identador. Na Figura 37, é possível verificar o resultado que corresponde ao material do corpo de prova ST; na Figura 38 o material NC; e na Figura 39 o NCTR com ampliação da imagem em 200 µm.

Figura 37 - Amostra do Corpo de Prova Trefilado (ST)

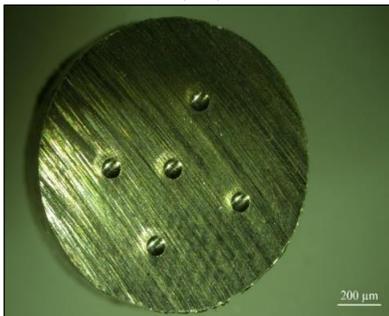


Figura 38 - Amostra do Corpo de Prova (NC)

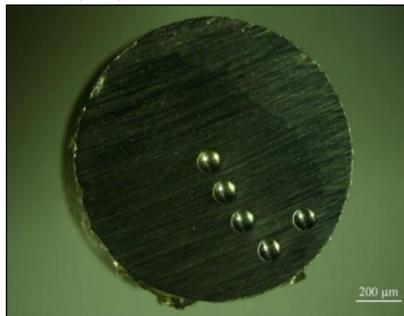
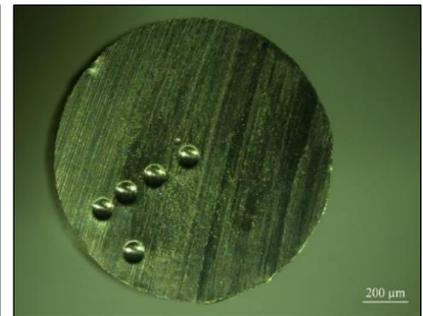


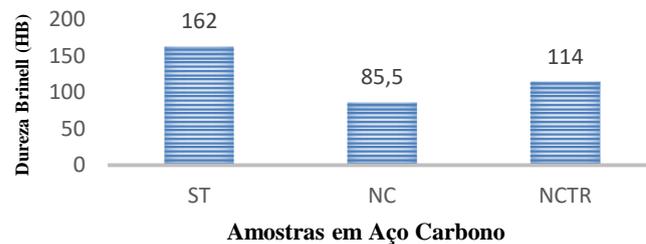
Figura 39 - Amostra do Corpo de Prova NCTR



Fonte: Autoria própria, 2019.

Na Figura 40, observa-se a comparação de dureza Brinell (HB) dos materiais e nela verifica-se que o material que apresentou maior dureza na seção transversal no corpo de prova ST com média de dureza de 162 HB, seguido do material NCTR com média de dureza de 114 HB. O grupo com menor dureza na seção transversal foi o NC, que apresentou dureza de 85,5 HB. Na área de seção transversal, o material ST permaneceu com as tensões residuais do processo de fabricação, nessa região os materiais que receberam tratamentos tiveram menor dureza do que na superfície, pois os tratamentos diminuiram a dureza e promoveram alívio de tensões.

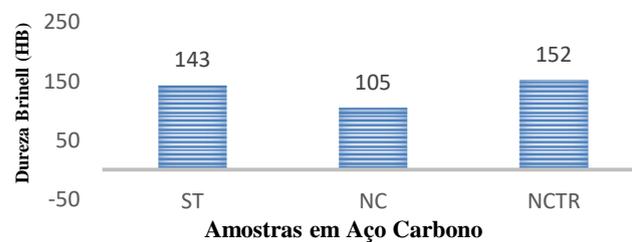
Figura 40 - Comparação de Dureza Brinell na Seção Transversal dos Materiais



Fonte: Autoria própria, 2019.

Na Figura 41, há comparação de dureza Brinell dos materiais quanto à superfície. Verifica-se que o grupo com maior dureza foi o NCTR, com média de 152 HB, seguido do grupo ST com média de 143 HB; o NC apresentou média de dureza bem abaixo em relação aos outros dois grupos, com média 105 HB na superfície do material. Logo, percebe-se que o tratamento de cementação não foi tão eficaz, uma vez que a difusão de carbono em caixa é pequena, diferente do processo líquido ou gasoso. Já o material trefilado, como não recebeu nenhum tratamento, permaneceu com tensão residual do processo de fabricação de conformação a frio. O material NCTR teve seu nível de dureza elevado em relação ao demais, devido aos processos termoquímicos aplicados em sua superfície.

Figura 41 - Comparação de Dureza Brinell na Superfície dos Materiais



Fonte: Autoria própria, 2019.

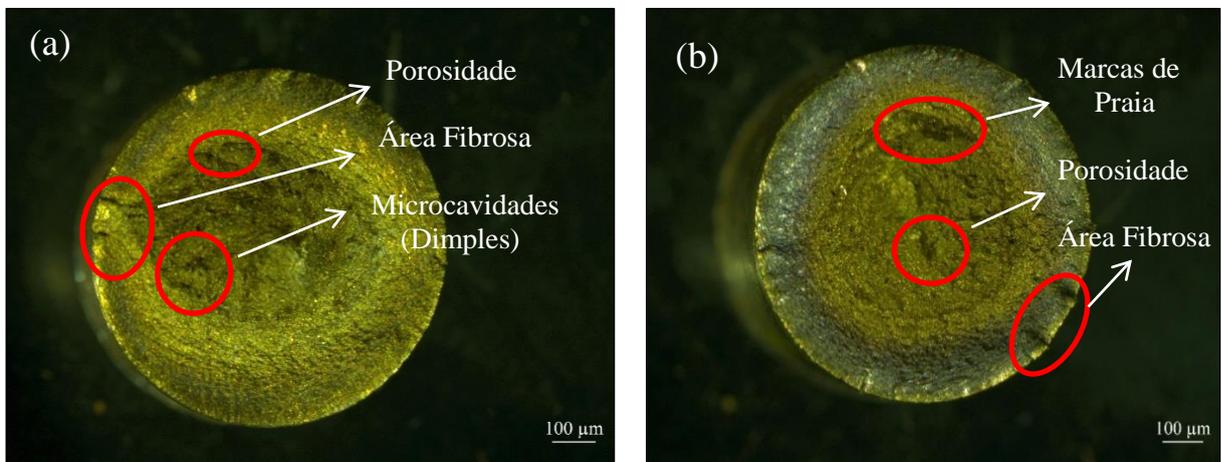
Comparando as durezas tanto na região transversal quanto na superfície do material, os corpos de prova NC apresentam os menores valores, sendo este material mais resiliente. O material ST obteve maior valor de dureza na região transversal, já o tratado NCTR teve o maior valor na região da superfície.

Em uma pesquisa de dureza Brinell realizada por Filho (2012), foi realizado o ensaio com indentação de forma circular, o qual demonstrava presença de “cantos vivos”, de forma que a técnica de contornos ativos se assemelha tanto à técnica tradicional quanto a de crescimento de regiões. Em comparação ao estudo realizado por Teixeira (2017), para um aço carbono SAE 1045 para a dureza Brinell, a média encontrada foi de 248 HB, valor este mais elevado que os encontrados neste estudo tanto para materiais com e sem tratamento, possivelmente, devido ao trabalho com tensões de escoamento terem sido mais altas, assim como a severidade do ensaio.

4.5 Resultados da Análise Fractográfica

Nas Figuras 42 (a) do corpo de prova ST1 e 42 (b) do corpo de prova ST 2 mostram a existência de “dimples”, ou seja, microcavidades esféricas que causam porosidade na qual ocasionam grandes vazios na estrutura das amostras e iniciam a formação da trinca, uma vez que provocam a fratura dúctil, na qual a área fibrosa é onde desencadeou a trinca, em seguida ocorreu a propagação de trincas em decorrência da deformação plástica e formação de marcas de praia no momento em que atinge a tensão máxima e resultou na fratura.

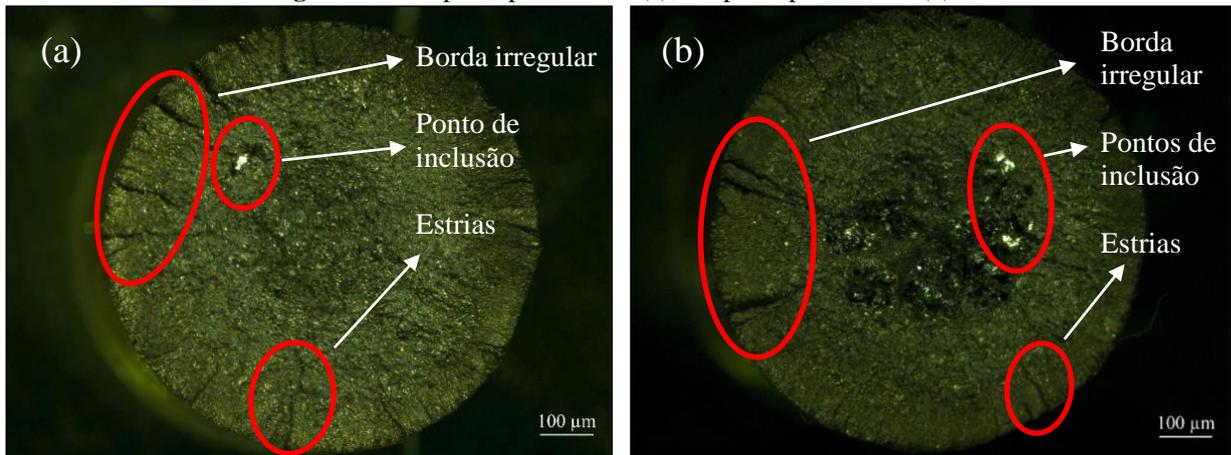
Figura 42 - Corpo de prova ST 1 (a), Corpo de prova ST 2 (b)



Fonte: Autoria própria, 2019.

As Figuras 43 (a) corpo de prova NC1 e 43 (b) do corpo de prova NC2 apresentam as características de nucleações do centro em direção à borda, que apresentou irregularidades em seu contorno, por conseguinte se propagou a trinca resultando em uma fratura dúctil nos corpos de prova NC1 e NC 2, ao analisar as amostras após o ensaio de fadiga verificou-se também que há presença de microcavidades, estrias e possível presença de pontos de inclusão que seriam concentradores de tensão, estes são pontos de colapso para a fratura no corpo de prova.

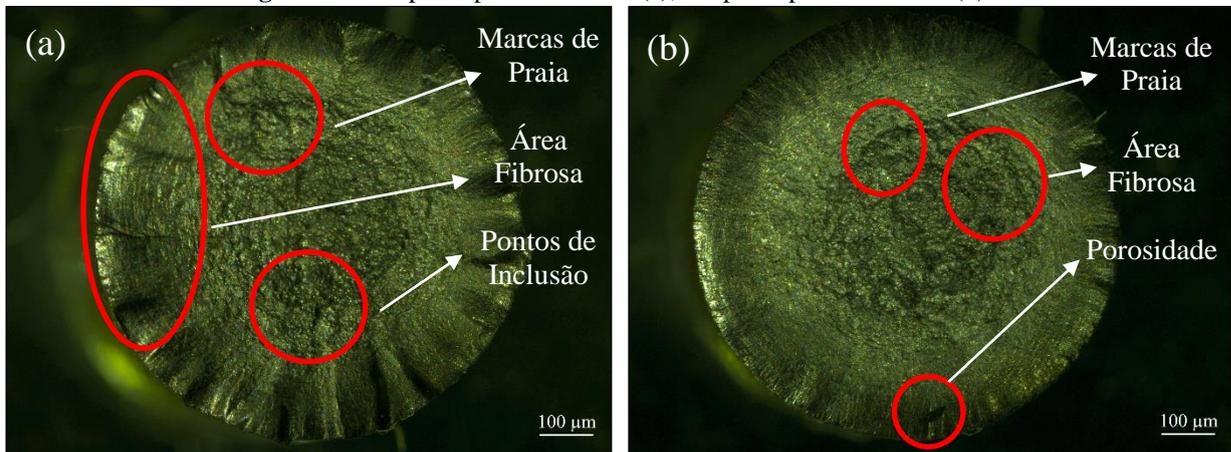
Figura 43 - Corpo de prova NC 1 (a), Corpo de prova NC 2 (b)



Fonte: Autoria própria, 2019.

Os corpos de prova NCTR mostram o tipo de fratura dúctil, devido à porosidade do material. Observa-se na região fibrosa a nucleação e formação de trincas e marcas de praia. O corpo de prova 44 a apresentou fratura de superfície irregular e serrilhada, já o corpo de prova 44 b teve a superfície com contorno mais regular. Divergências como essas podem ocorrer por imperfeições naturais do material ou falhas no processo de fabricação, assim o material pode apresentar composição heterogênea.

Figura 44 - Corpo de prova NCTR 1 (a), Corpo de prova NCTR 2 (b)



Fonte: Autoria própria, 2019.

4.6 Caracterizações Morfológicas

Nesta etapa do trabalho são apresentados e discutidos os resultados obtidos na análise qualitativa da microestrutura do material para identificação das fases presentes.

Foram preparadas amostras metalográficas para cada condição de tratamento aplicado ao aço, seguindo procedimentos de padrões de corte, embutimento, lixamento e polimento, além de tomar precauções como limpeza, secagem e acondicionamento em local conveniente. Em seguida foram realizados ataques químicos com Nital 3% nos corpos de prova.

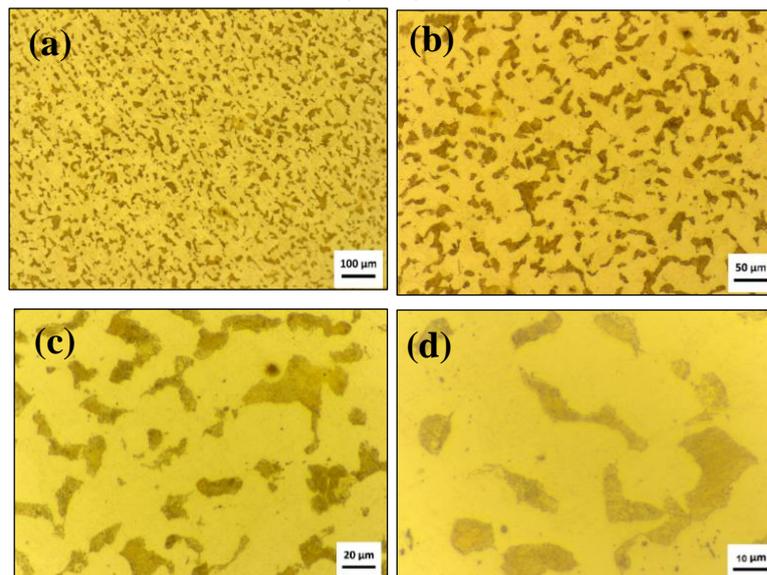
4.6.1 Microscopia Óptica

As imagens de microscopia óptica permitiram identificar visualmente as diferenças micro estruturais dos corpos de prova. Através da metodologia apresentada em materiais e métodos, foram coletadas imagens no microscópio óptico na ampliação de 100x, 200x, 500x e 1000x.

A Figura 45 (a), (b), (c) e (d), mostra o aço carbono trefilado sem tratamento térmico, o qual possui uma microestrutura característica de aço com baixo teor de carbono, apresentando uma estrutura perlítica - estrutura lamelar formada das fases ferrita e do microconstituente cementita, este rico do elemento carbono (C).

Basicamente, esta microestrutura consiste de matriz ferrítica com a fase perlítica. Ainda na Figura 45 (a), podem ser visualizados os grãos alongados típicos de eixos fabricados pelo processo de conformação mecânica de trefilação.

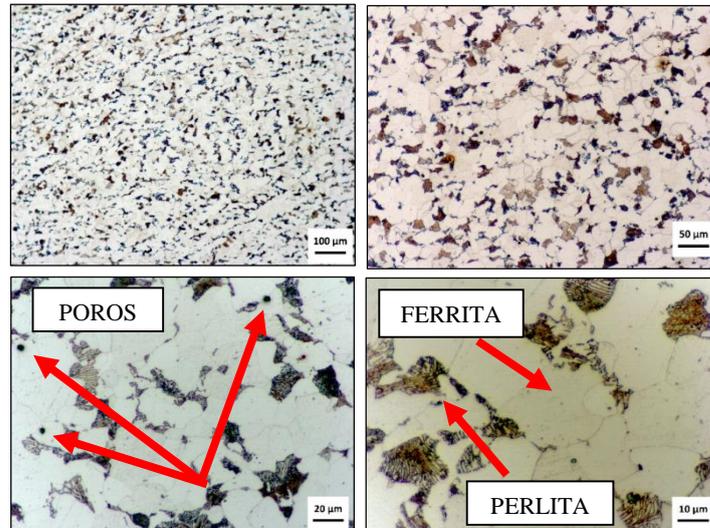
Figura 45 - Evolução do Aumento na Microestrutura do Aço Carbono Trefilado sem Tratamento Térmico com aumento de 100x, 200x, 500x e 1000x



Fonte: Autoria própria, 2019.

A Figura 46 mostra o aço do estudo com o tratamento de normalização, com aumento de 100x, 200x, 500x e 1000x, este é formado por uma microestrutura refinada que é composta de ferrita (região clara) e perlita (região escura) distribuídas uniformemente na composição da amostra, a Figura também mostra a quantidade de poros internos que o eixo apresenta oriundo do processo de fabricação por conformação a frio trefilado.

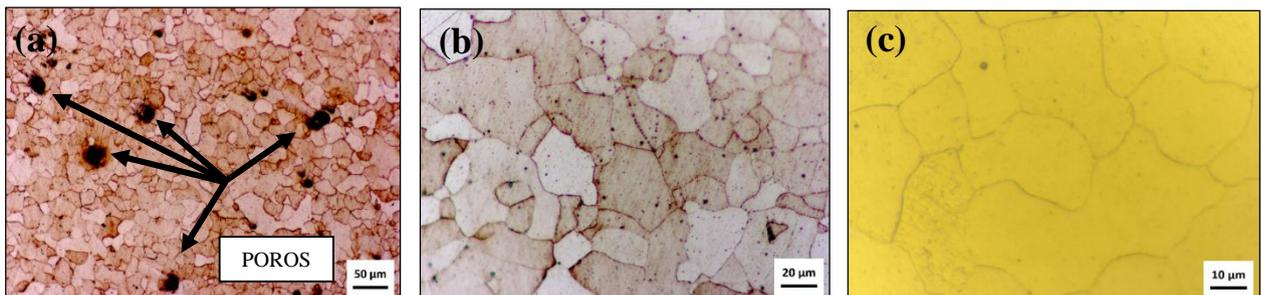
Figura 46 - Apresenta a microestrutura do aço carbono utilizado na pesquisa normalizado, formado por ferrita (regiões claras) e perlita (regiões escuras) com aumento de 100x, 200x, 500x e 1000x



Fonte: Autoria própria, 2019.

Analisando as microestruturas da Figura 47, na condição normalizada e cementada, nota-se uma diferença microestrutural entre as superfícies (a) e (b) da borda e (c) do centro da amostra, ou seja, há uma quantidade muito maior de grãos de perlita na borda do que no centro, isso se deve ao processo de cementação. As imagens mostram que a superfície carbonetada não foi atingida, formando uma microestrutura geral de perlita e ferrita, e não apresenta descarbonetação superficial. A principal mudança microestrutural observada é o aumento da quantidade de perlita na borda.

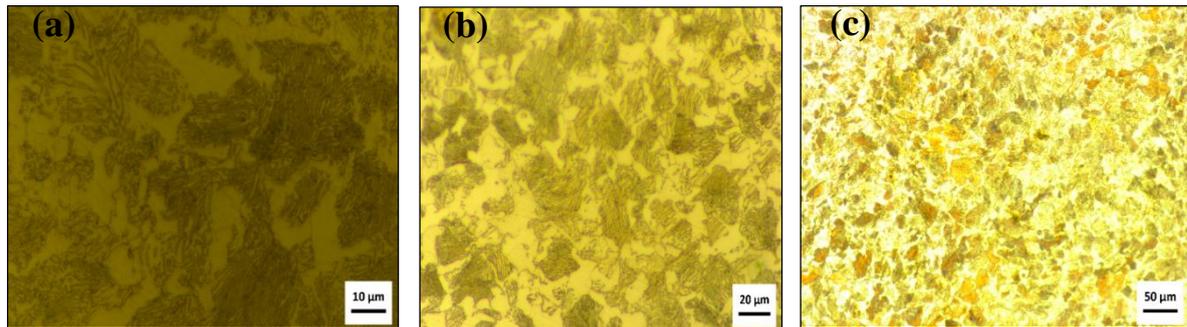
Figura 47 - Apresenta as microestruturas da borda do aço na condição NC nos aumentos (a) borda 200x, (b) borda 500x e (c) centro 1000x



Fonte: Autoria própria, 2019.

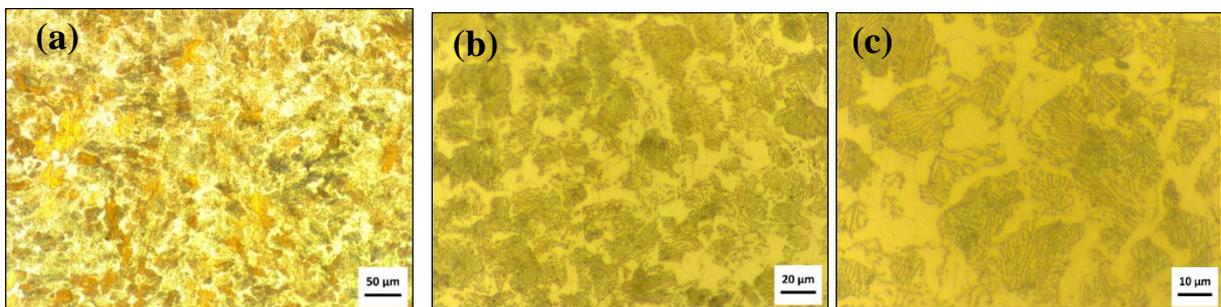
A Figura 48 mostra o aço do estudo na condição normalizado, cementado, temperado e revenido na borda da amostra (a), (b) e (c). Já a Figura 49 apresenta o mesmo aço com a microestrutura realizada no centro da amostra (a), (b) e (c). É possível observar que com a cementação, seguida de têmpera realizada com granulado rico do elemento carbono, esta microestrutura apresenta menor quantidade de ferrita e maior quantidade de perlita na superfície. Observa-se também a ausência de estrutura martensítica pelo pouco carbono na composição do material.

Figura 48 - Apresenta as microestruturas da borda do aço na condição NCTR nos aumentos 200x, 500x e 1000x



Fonte: Autoria própria, 2019.

Figura 49 - Apresenta as microestruturas do centro do aço na condição NCTR nos aumentos 200x, 500x e 1000x.



Fonte: Autoria própria, 2019.

A ideia original do estudo é de se preservar o centro com a microestrutura original de aço carbono, ferrita e perlita e, modificar somente a superfície, então os tratamentos térmicos utilizados foram condizente com as microestruturas adquiridas.

4.6.2 Microscopia Eletrônica de Varredura e EDS

Como o aço carbono do estudo apresentou uma microestrutura refinada nas análises de microscopia óptica, percebeu-se a necessidade de uma profundidade de foco maior para que se obtivesse uma imagem adequada para melhor realização das análises metalográficas. Como alternativa, foi utilizada a microscopia eletrônica de varredura (MEV), por elétrons secundários e a Espectrometria Dispersiva de Raio X (EDS).

As análises qualitativas de EDS mostram que a matriz do aço estudado em todos os tratamentos submetidos, em geral, não difere em sua composição química. Entretanto, em todas as amostras submetidas, percebe-se que não houve apresentação de picos de enxofre (S), que é um elemento sempre presente nos aços carbono comum. A alta concentração de enxofre é tida como uma impureza, pois altera as propriedades mecânicas.

Os picos não presentes nas amostras sugerem que o S foi totalmente solubilizado na matriz quando fundido no processo convencional de produção. Os picos do manganês (Mn), que é um

agente removedor de enxofre (S) e Oxigênio (O) e controla inclusões, de alumínio (Al), de silício (Si) que é capaz de aumentar a resistência do aço, dentre outros elementos foram identificados no precipitado dos mapas de todos corpos de prova com e sem tratamento térmico, o que sugere a substituição de átomos de ferro por estes átomos, formando as inclusões e precipitações. Suski e Oliveira (2013) mencionam em seu trabalho que a presença desses elementos na estrutura não é nociva ao aço.

As micrografias obtidas no MEV foram adquiridas com aumento de 1000x e 5000x das microestruturas do aço carbono em estudo, para as condições de trefilados, normalizado e cementado e normalizado, cementado, temperado e revenido.

Uma comparação entre as micrografias obtidas dos corpos de prova nas condições dos tratamentos térmicos aplicados permite afirmar que, através de uma percepção visual, a microestrutura da perlita é evidente em todos os tratamentos. Embora não seja possível quantificar as lamelas de perlita (espessura e comprimento), parâmetros importantes na influência das propriedades mecânicas do material, é possível observar que os grãos dessa microestrutura apresentam diferenças de tamanho e distribuição na matriz de ferrita para os diferentes tratamentos térmicos.

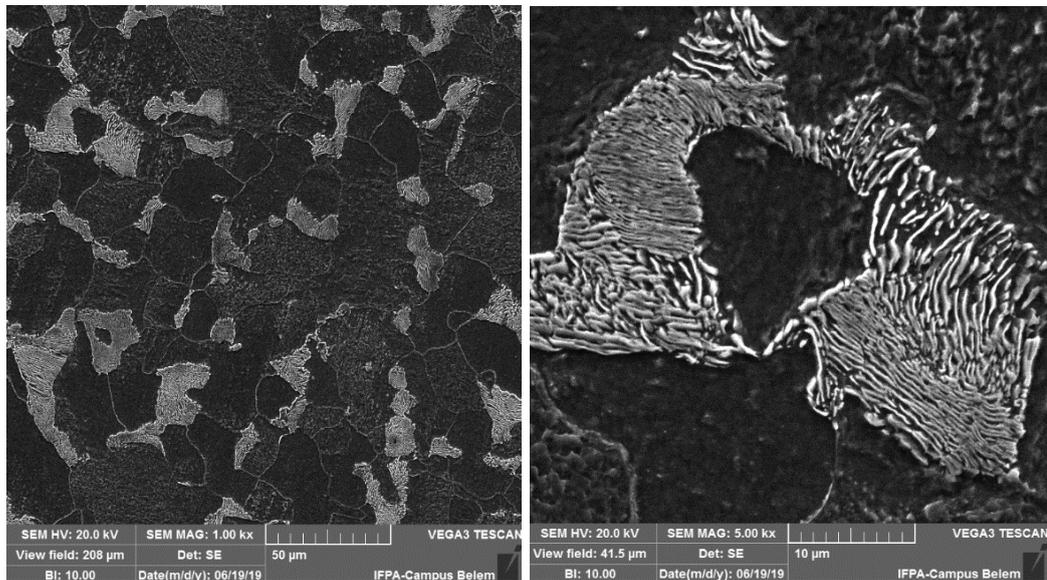
Para todos os corpos de prova que sofreram o tratamento de normalização foi obtido um maior refinamento das microestruturas em geral. Os corpos de prova termoquímicos demonstraram um maior refinamento da estrutura perlítica.

A Figura 50 mostra o MEV, e as Figuras 51 e 52 mostram o EDS do aço carbono trefilado ST em forma de mapas, respectivamente, obtidos do centro da amostra.

A Figura 53 mostra o MEV na borda do aço na mesma condição. Obedecendo à estrutura de aços com baixo teor de carbono, este corpo de prova apresenta-se com uma matriz ferrítica com grãos de perlita. Observa-se também que a borda possui a mesma morfologia do centro, por esta razão não se fez necessário replicar os mapas de EDS para este corpo de prova.

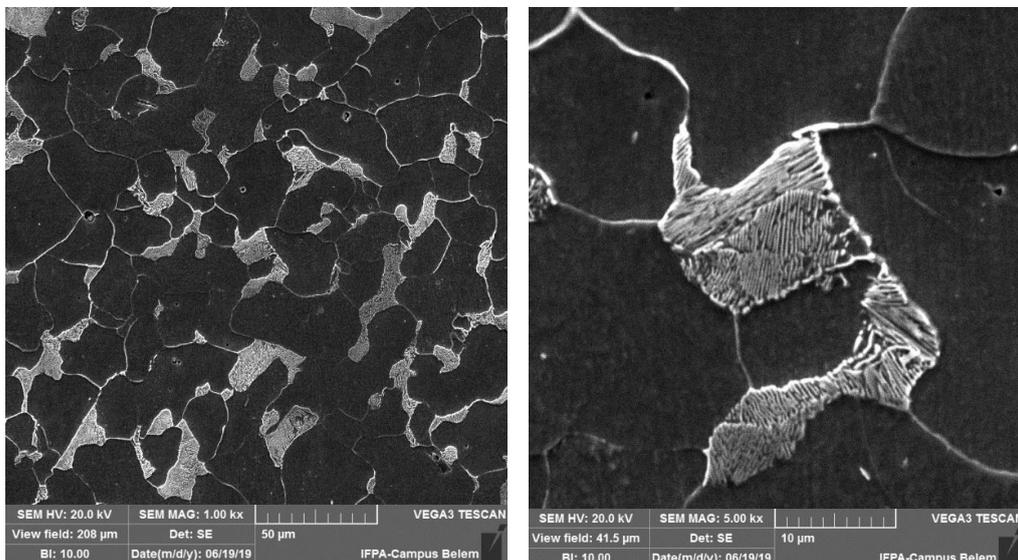
Ao analisar os mapas, nota-se a presença do elemento alumínio e silício além do elemento manganês comumente encontrado em aço carbono em um pico significativo. Os pontos 2 e 4 no mapa da varredura da Figura 53 apresentam um significativo aumento de 9,48 e 7,29 respectivamente em percentual no peso do elemento carbono por estarem na região da perlita.

Figura 50 - Micrografia observada em MEV do aço carbono trefilada sem tratamento térmico com aumento de 1000 e 5000 vezes. Matriz ferrita com grãos de perlita no centro do corpo de prova



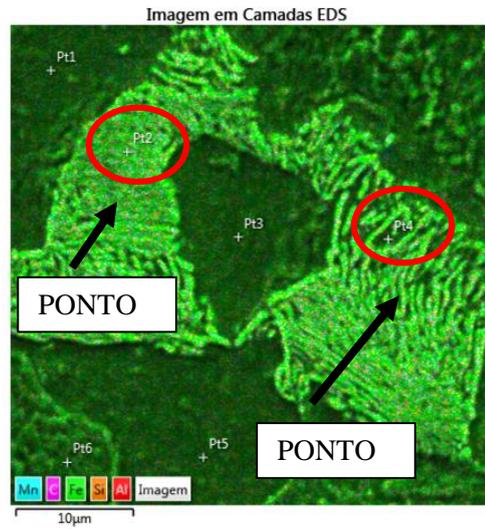
Fonte: Autoria própria, 2019.

Figura 51 - Micrografia observada em MEV do aço carbono trefilada ST com aumento de 1000 e 5000 vezes. Matriz ferrita com grãos de perlita na borda do corpo de prova



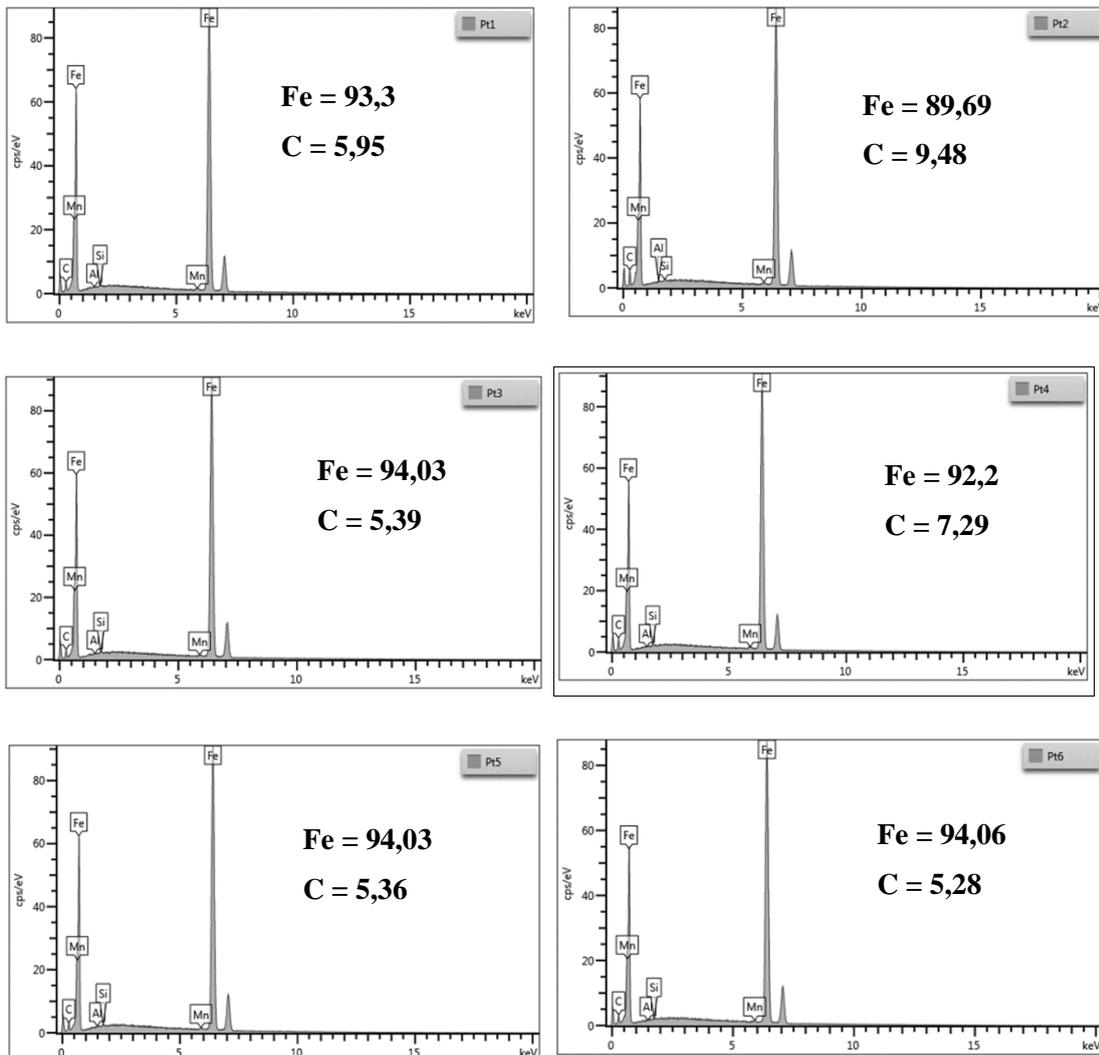
Fonte: Autoria própria, 2019.

Figura 52 - Micrografia do EDS do aço carbono trefilada ST com aumento de 5000 vezes, no centro mostrando os pontos definidos de varredura



Fonte: Autoria própria, 2019.

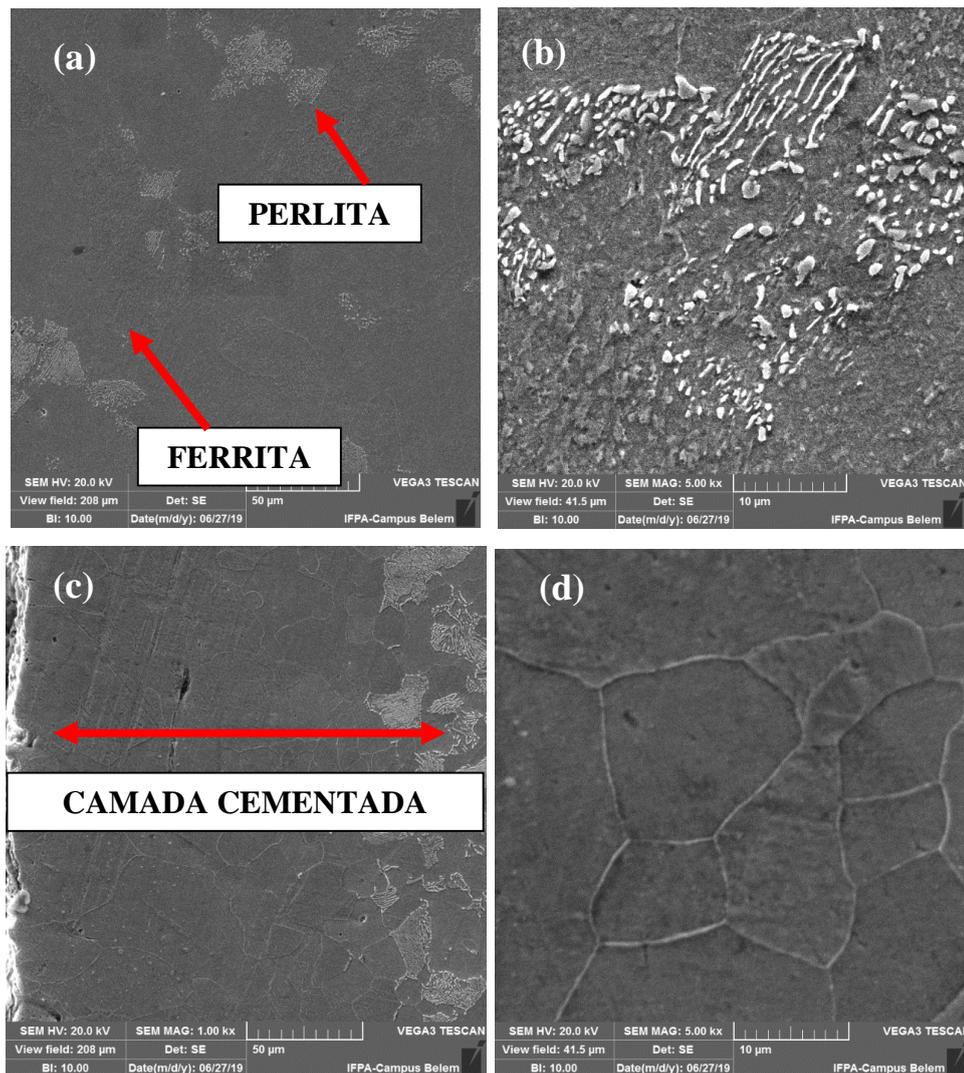
Figura 53 - Mapa do EDS do aço carbono trefilada ST com aumento de 5000 vezes, mostrando os mapas dos pontos 1, 2, 3, 4, 5 e 6 com seus elementos



Fonte: Autoria própria, 2019.

A Figura 54 a, b (centro), c e d (borda) mostram o MEV do corpo de prova de aço carbono NC respectivamente. Observa-se que após o tratamento térmico de cementação houve uma modificação na borda do corpo de prova com a difusão do carbono para a superfície devido ao tratamento termoquímico de cementação. Nota-se neste corpo de prova que não houve modificação da estrutura no centro que apresenta uma matriz ferrítica com grãos de perlita dispersos.

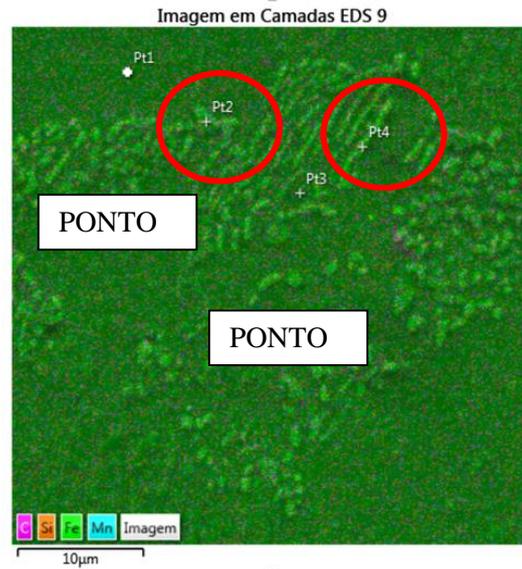
Figura 54 - Micrografia observada em MEV do aço carbono NC com aumento de 1000 e 5000 vezes (a) e (B) centro, (c) e (d) borda



Fonte: Autoria própria, 2019.

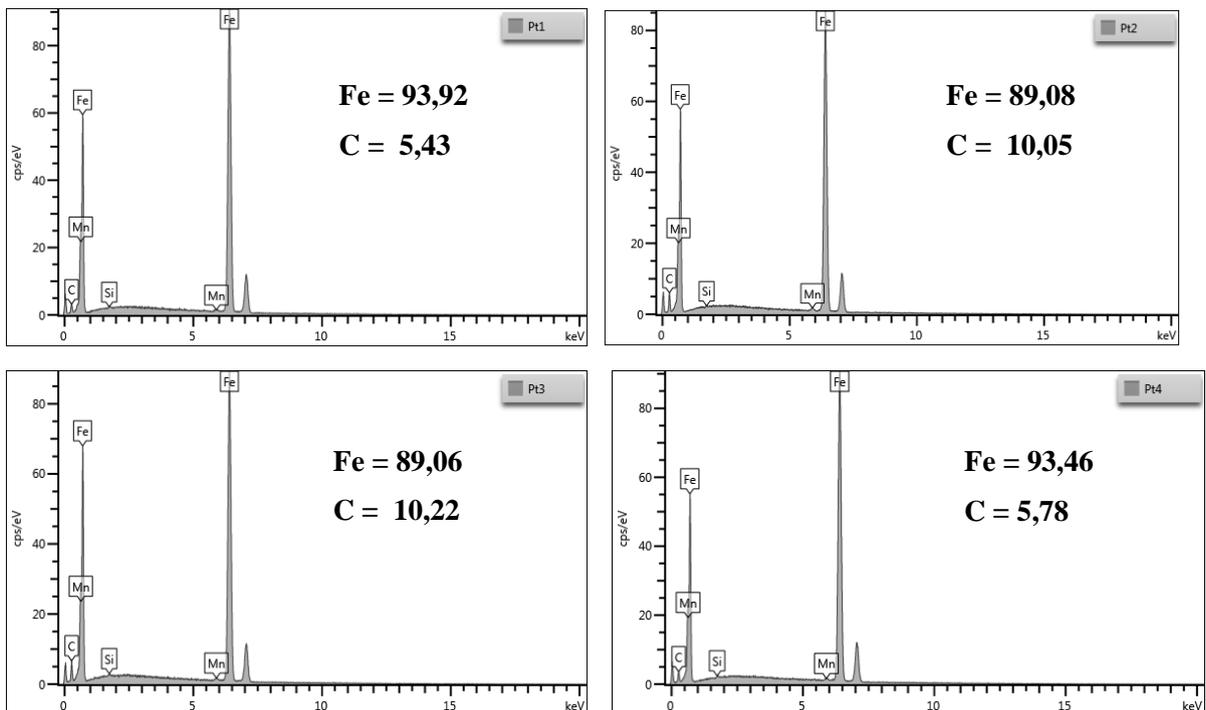
De acordo com a Figura 55 a qual mostra os mapas de EDS, os pontos 1, 2, 3 e 4 no mapa da varredura apresentam uma porcentagem em peso de carbono de 5,43, 10,05, 10,22 e 5,78 respectivamente no centro da peça, como pode ser visto na Figura 56. Nota-se que os pontos 2 e 3 apresentam um aumento da quantidade de carbono por estarem provavelmente em cima da lamela da cementita da estrutura perlítica.

Figura 55 - Micrografia do EDS do aço carbono NC com aumento de 1000 vezes, mostrando os pontos de varredura no centro do corpo de prova



Fonte: Autoria própria, 2019.

Figura 56 - Mapa do EDS do aço carbono NC com aumento de 1000 vezes, mostrando os mapas dos pontos 1, 2, 3 e 4 com seus elementos presentes

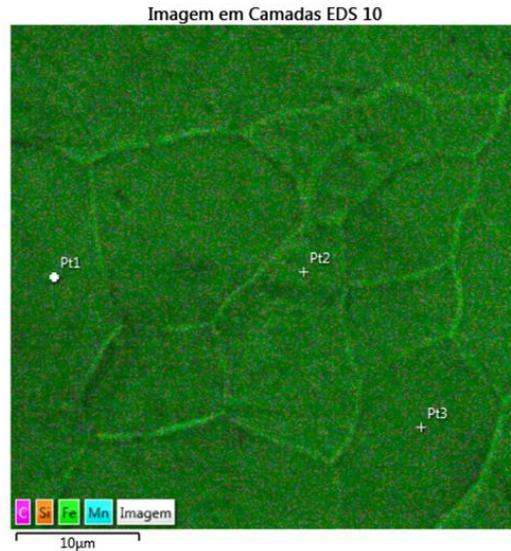


Fonte: Autoria própria, 2019.

Analisando os mapas de EDS da Figura 57, nota-se a presença de uma camada cementada oriunda do tratamento termoquímico de cementação. A Figura 58 mostra os pontos 1, 2 e 3 no mapa da varredura que apresentam um aumento de 6,59, 7,91 e 6,92 respectivamente em porcentagem peso do elemento carbono na borda da peça. Nota-se que todos os pontos apresentam

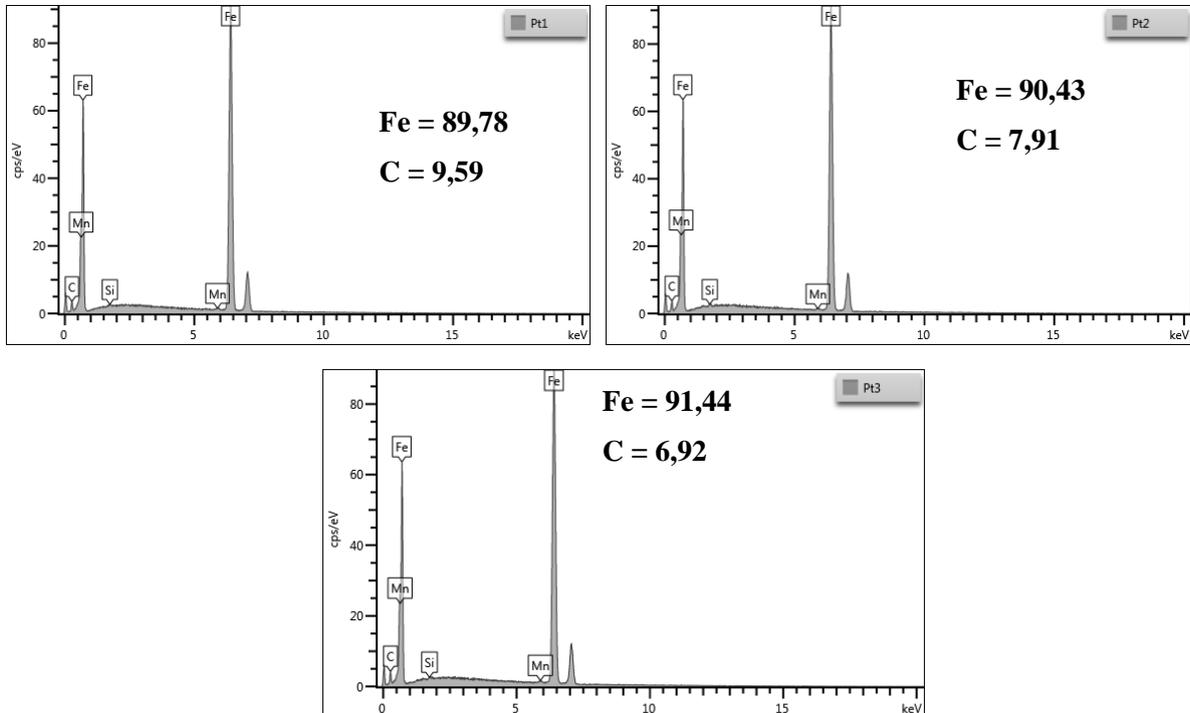
maior quantidade de carbono por estarem dentro da camada cementada.

Figura 57 - Micrografia do EDS do aço carbono NC com aumento de 1000 vezes, mostrando os pontos de varredura na borda do corpo de prova



Fonte: Autoria própria, 2019.

Figura 58 - Mapa do EDS do aço carbono NC com aumento de 5000 vezes, mostrando os mapas dos pontos 1, 2 e 3 com seus elementos presentes

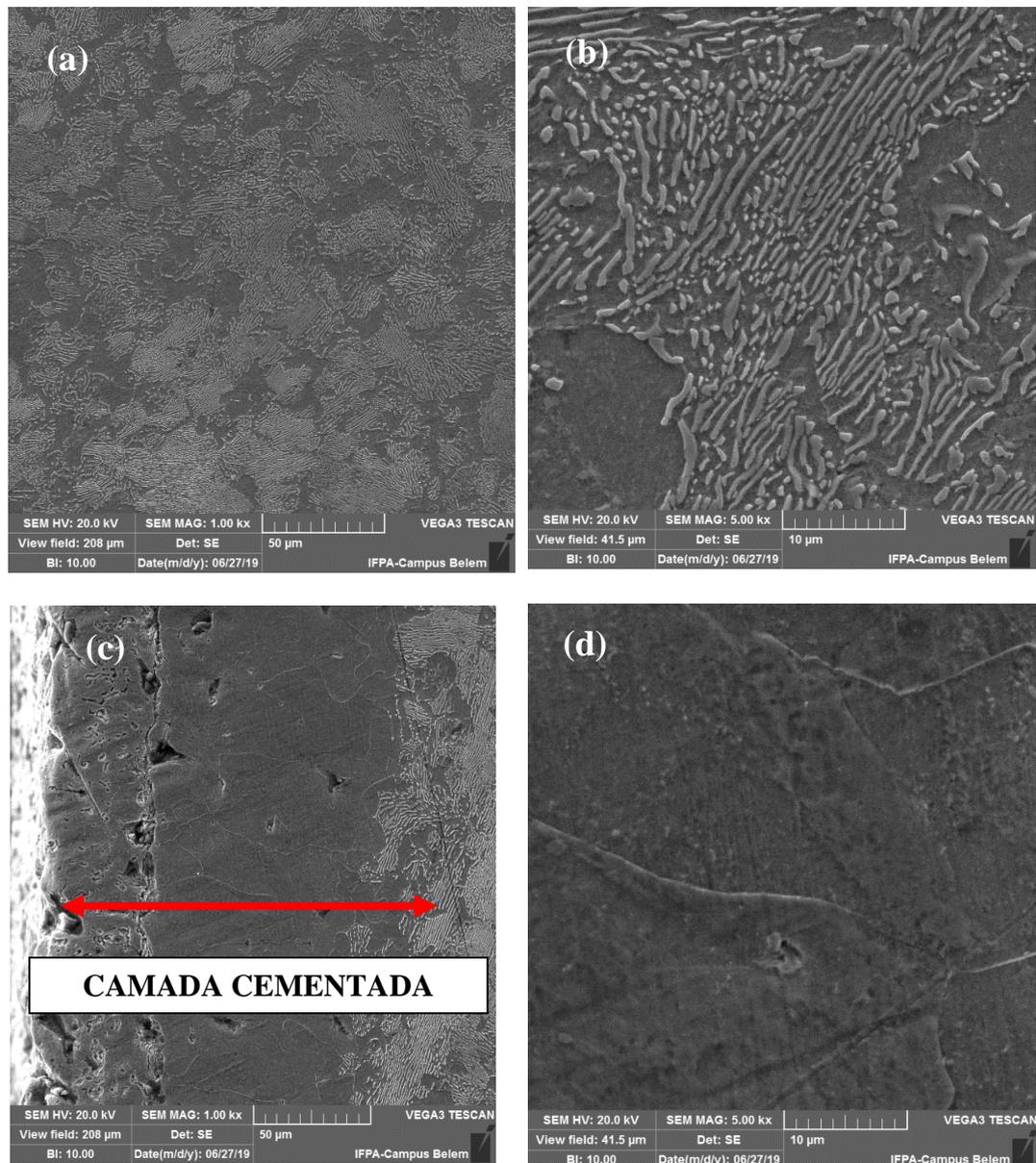


Fonte: Autoria própria, 2019.

A Figura 59 (a), (b), (c) e (d) mostra o MEV do corpo de prova de aço carbono NCTR. Observa-se que, após o tratamento térmico de cementação, houve uma modificação no centro do corpo de prova com o aumento dos grãos de perlita devido ao tratamento térmico de têmpera e,

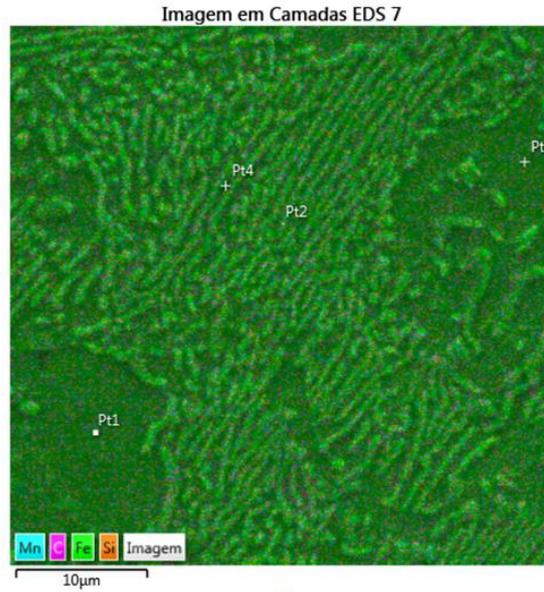
na superfície da borda do material, esse corpo de prova mostra a camada cementada. Analisando os mapas de EDS da Figura 60, nota-se a presença do elemento carbono em uma concentração maior em todos os corpos de prova. Os pontos 1, 2, 3 e 4 no mapa da varredura da Figura 61 apresentam um aumento de 8,02, 8,13, 6,09 e 6,29 respectivamente em porcentagem peso do elemento carbono devido ao processo de difusão do carbono no tratamento termoquímico de cementação.

Figura 59 - Micrografia observada em MEV do aço carbono NCTR com aumento de 1000 e 5000 vezes (a) e (b) centro e (c) e (d) borda



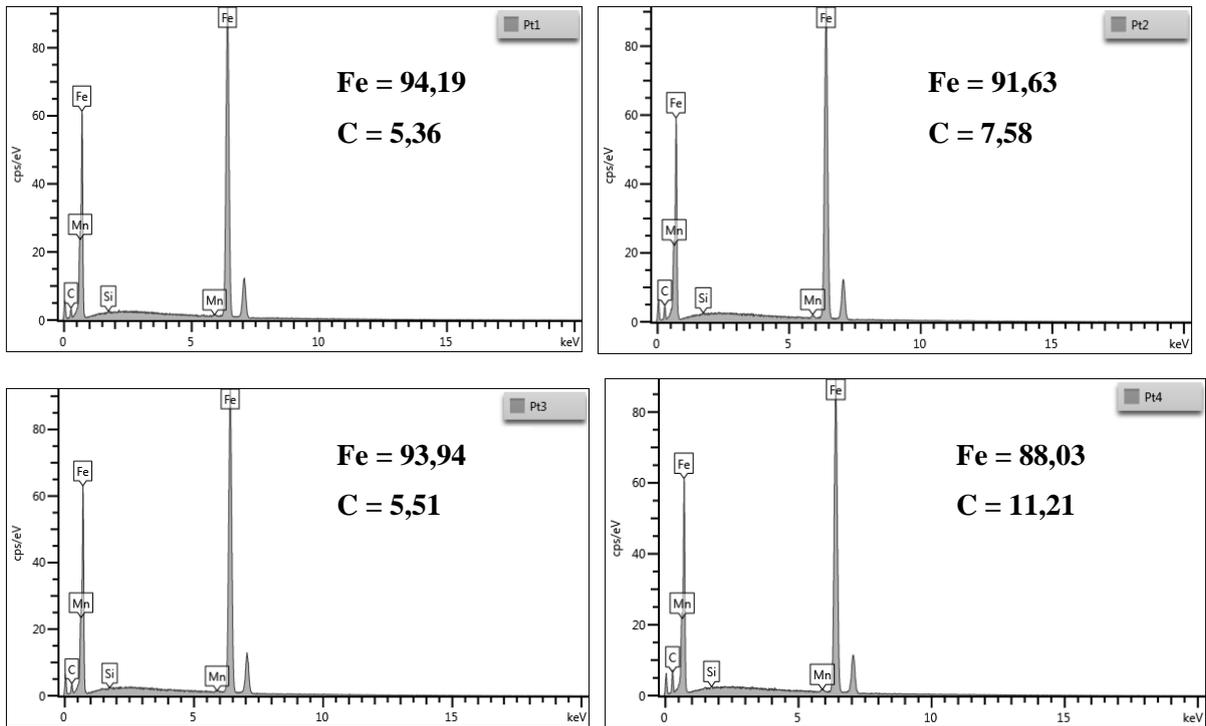
Fonte: Aatoria própria, 2019.

Figura 60 - Micrografia do EDS do aço carbono NCTR com aumento de 1000 vezes, mostrando os pontos de varredura no centro



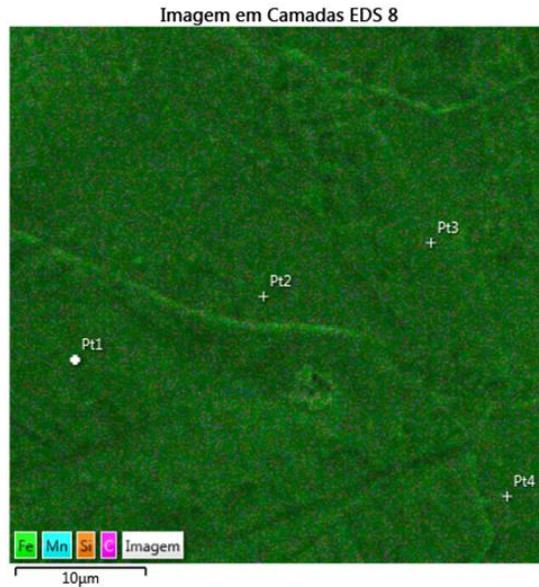
Fonte: Autoria própria, 2019.

Figura 61 - Mapa do EDS do aço carbono NCTR com aumento de 1000 vezes, mostrando os mapas dos pontos 1, 2, 3 e 4 com seus elementos



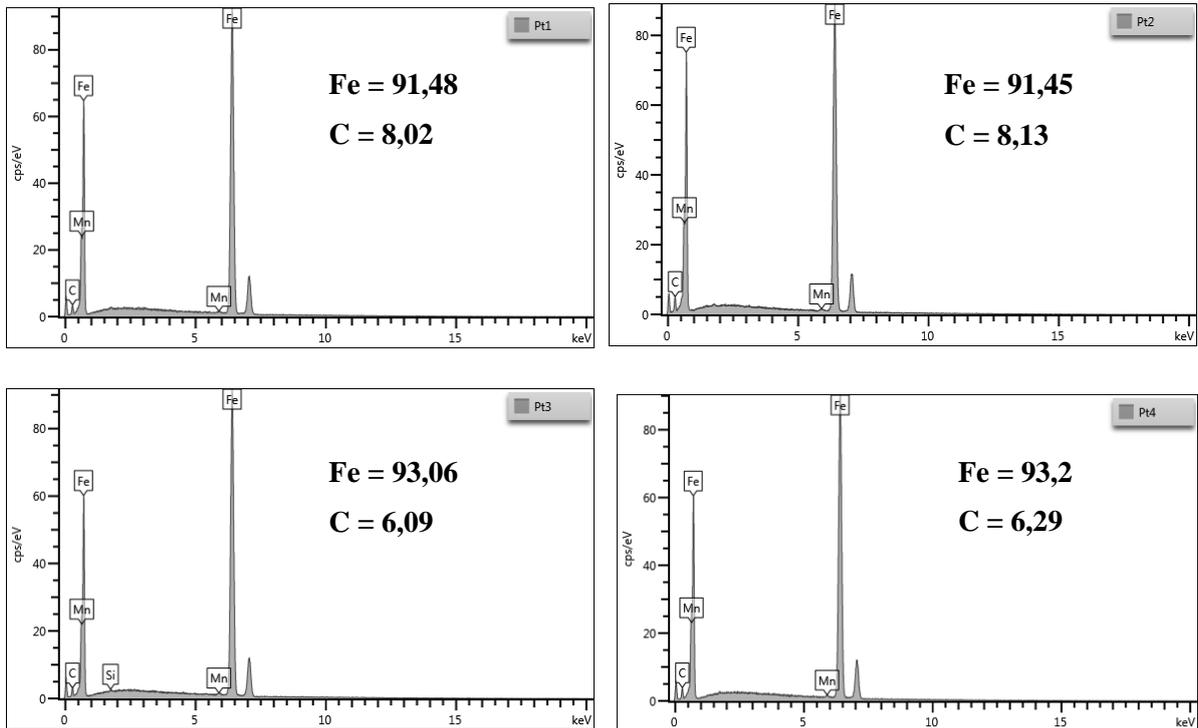
Fonte: Autoria própria, 2019.

Figura 62 - Micrografia do EDS do aço carbono NCTR com aumento de 5000 vezes, mostrando os pontos de varredura no centro



Fonte: Autoria própria, 2019.

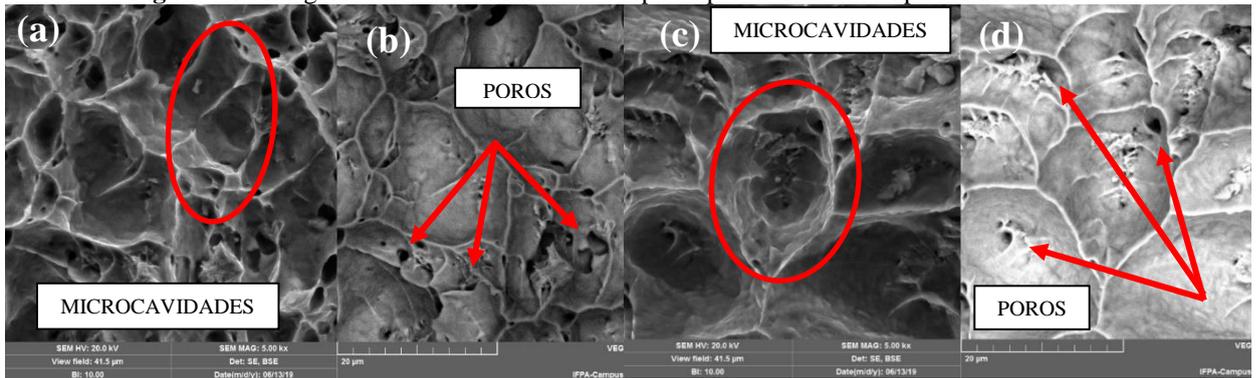
Figura 63 - Mapa do EDS do aço carbono NCTR com aumento de 5000 vezes, mostrando os mapas dos pontos 1, 2, 3 e 4 com seus elementos



Fonte: Autoria própria, 2019.

Nas imagens utilizando o M.E.V. no aço carbono trefilado ST, é visível a presença de microcavidades esféricas (dimples) que tornam o material poroso nas Figuras 64 (a), (b), (c) e (d), além disso apresentam contornos irregulares, o que sugere que o material possa ter uma composição heterogênea.

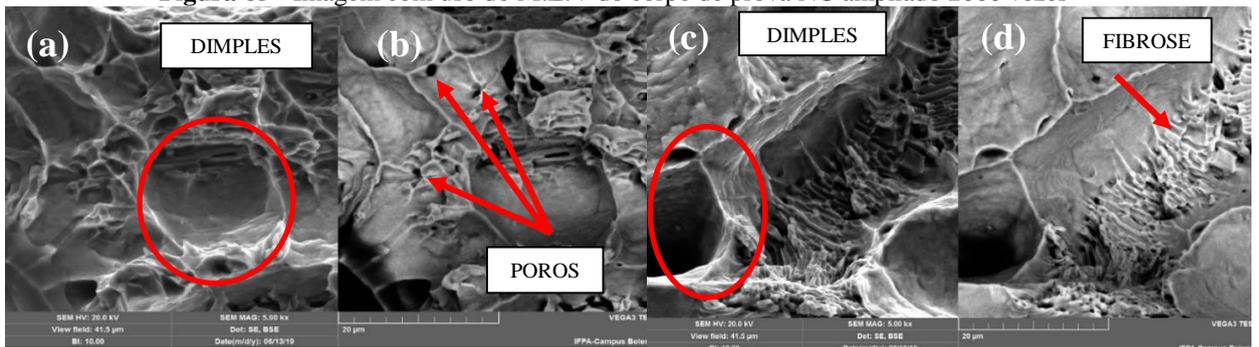
Figura 64 - Imagem com uso do M.E.V. do corpo de prova trefilado ampliado 2000 vezes



Fonte: Autoria própria, 2019.

A Microscopia dos corpos de prova NC mostra a presença de “dimples” que são microcavidades, formadas por muitos poros que geram vazios na estrutura do material, devido a estes serem concentradores de tensão e propagadores de trincas que desencadeiam o colapso no momento da fratura, como pode ser visto nas Figuras 65 (a), (b), (c) e (d).

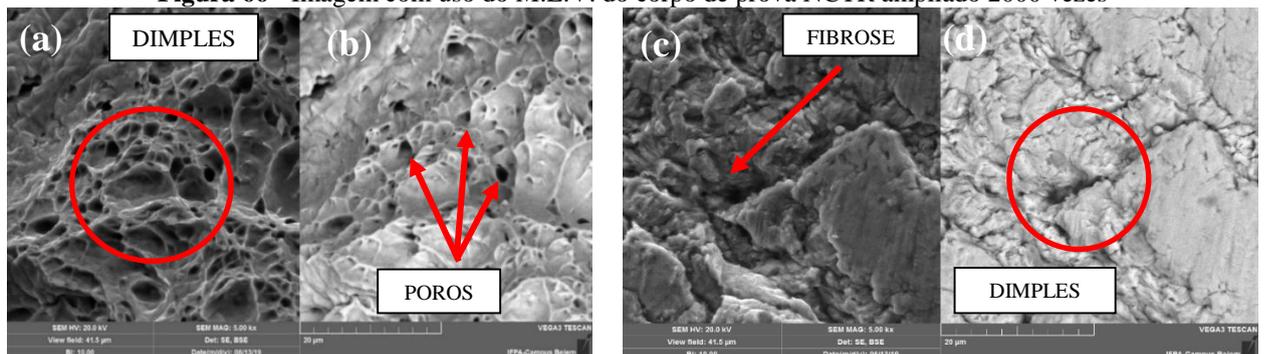
Figura 65 - Imagem com uso do M.E.V. do corpo de prova NC ampliado 2000 vezes



Fonte: Autoria própria, 2019.

Na imagem gerada por meio do M.E.V., com ampliação de 2.000 vezes como indicada nas Figuras 66 (a), (b), (c) e (d), é possível verificar as microcavidades, porosidade do material, pontos de inclusões e distanciamento das estruturas gerando grandes vazios, estes são percussores da deformação plástica e da ocorrência de fratura dúctil.

Figura 66 - Imagem com uso do M.E.V. do corpo de prova NCTR ampliado 2000 vezes



Fonte: Autoria própria, 2019.

Em estudo realizado por Rocha et al. (2016) sobre fratura em aço carbono, os autores observaram por meio do MEV a presença de microcavidades esféricas também conhecidas como “dimples”, assim como caracterização muito irregular que evidencia uma extensa deformação plástica e pouca caracterização de cisalhamento. Logo, define-se que este material sofreu uma fratura dúctil.

Já em relação a outro corpo de prova que sofreu fratura, Rocha et al. (2016) verificaram a superfície mais plana e regular com formato granular e a ausência de microcavidades esféricas, porém com linhas de nervuras ou de trincamento, evidenciando fratura frágil e formação intergranulares por pouca aparência de deformação plástica.

A temperatura foi um dos fatores que mais interferiram em estruturas cúbicas de corpo centrado devido à dependência dos planos de clivagem e dos planos compactos de redes cristalinas em função de ter ductilidade variável, a qual apresenta tenacidade em temperaturas mais elevadas e frágil em temperaturas baixas (ROCHA et al., 2016).

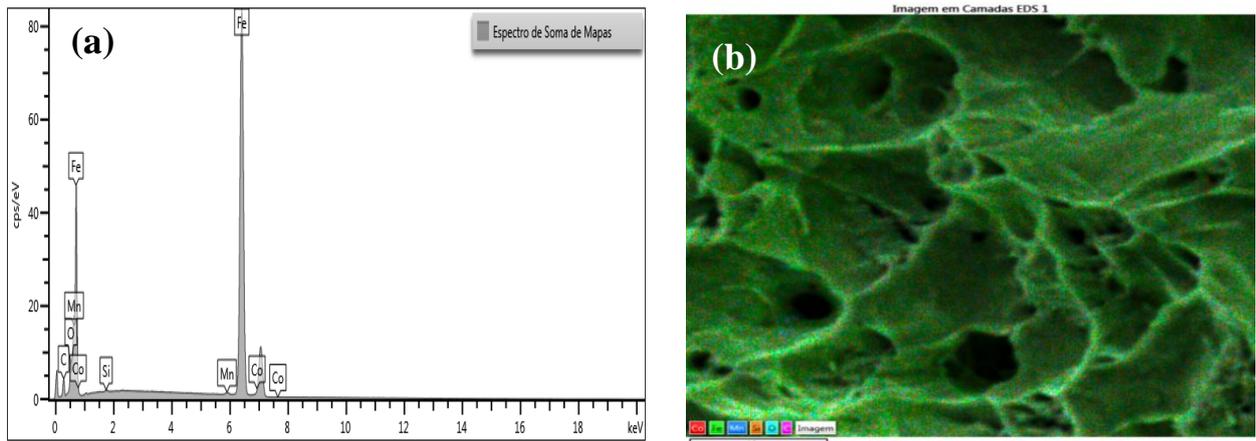
Em outro estudo realizado por Souza (2017), é possível identificar o local da fratura por meio do MEV, assim como a interface da superfície fraturada detalha o local do entalhe, que compreende a parte chanfrada, onde é possível observar os riscos da ferramenta de usinagem, seguido da eletroerosão. A pré-trinca ocorre logo abaixo e seu comprimento obedece à razão $a/w = 0,3$.

As características apresentadas neste estudo são muito semelhantes às apontadas por Rocha et al. (2016) e Souza (2017), com microcavidades evidentes. Estas tornam o material poroso devido aos vazios que se formam e propiciam a deformação plástica e pontos de colapso que desencadeiam a nucleação da trinca até chegar ao estágio de fratura de característica dúctil.

4.6.3 Análise da Espectroscopia por Energia Dispersiva (E.D.S.)

A análise do corpo de prova trefilado ST apresentou alta concentração de ferro (Fe), sendo este o principal elemento de composição do aço, bem como um baixo teor de carbono (C), e até mesmo a ausência deste elemento químico em alguns pontos. Há também a presença de elementos como Manganês (Mn), Colbalto (Co), Silício (Si) e Oxigênio (O), como pode ser visualizado na Figura 67 (a), e também o espectro de cores com a distribuição dos elementos pode ser visto na Figura 67 (b).

Figura 67 - Caracterização por meio da espectroscopia por energia dispersiva do aço carbono trefilado ST



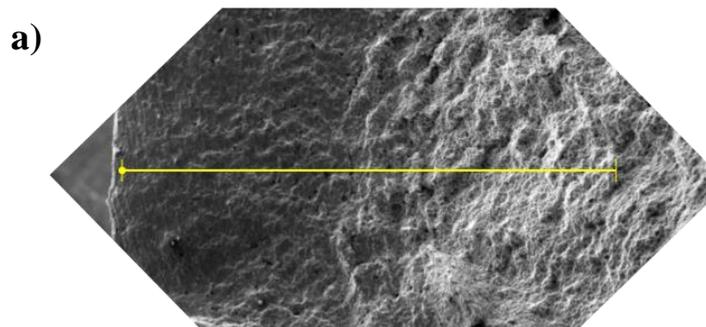
Fonte: Autoria própria, 2019.

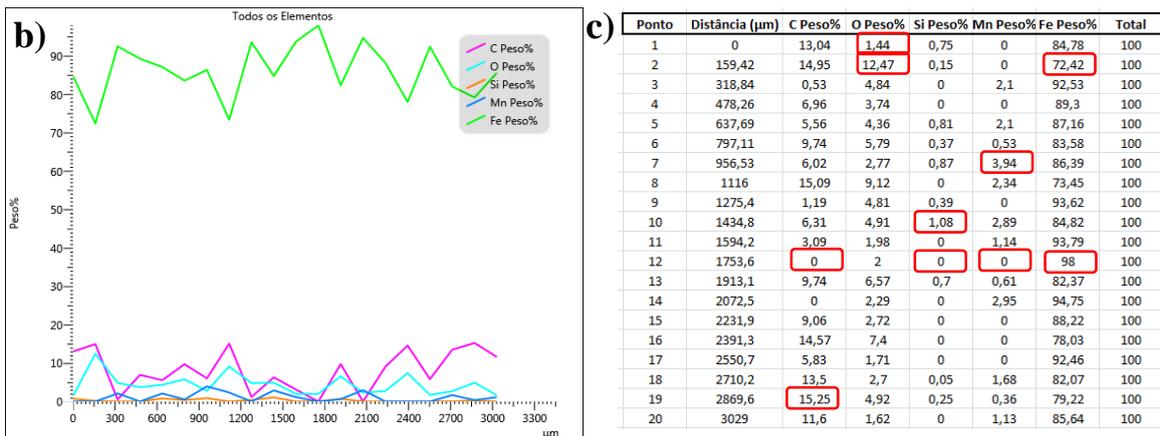
Na Figura 68 é possível visualizar a estrutura do centro e da borda, na qual a porosidade no centro do material é mais evidente do que em relação à superfície. Ao analisar quantitativamente os elementos de composição existentes, há uma heterogeneidade em sua distribuição. Em relação ao ferro (Fe), atingiu o máximo no ponto 12, com o teor de concentração chega a 98%, enquanto no ponto 2 teve o menor teor de concentração com 72,42%, uma diferença maior que 25% em sua composição.

Outra questão que chama atenção é no teor de carbono, que teve o maior teor no ponto 19 com percentual de 15,25% e em outros há ausência deste elemento químico no aço. Este é um dos principais fatores de determinação de dureza e resistência mecânica. Assim, caso ele permanecesse constante, teria maior dureza e menor ductilidade.

Ressalta-se também variação na distribuição dos demais elementos, por exemplo, o oxigênio (O), o qual teve concentração máxima de 12,47% no ponto 2 enquanto no ponto 1 foi encontrado o teor mínimo que é de 1,44%. O silício (Si), mesmo em concentrações pequenas, é encontrado com teor máximo de 1,08% no ponto 10 e em determinados pontos ele não é encontrado. O mesmo ocorre com o manganês (Mn), o teor máximo encontrado é de 3,94% no ponto 7, já em outros pontos teve teor nulo.

Figura 68 - Quantitativo dos elementos químicos que compõe o aço carbono trefilado ST

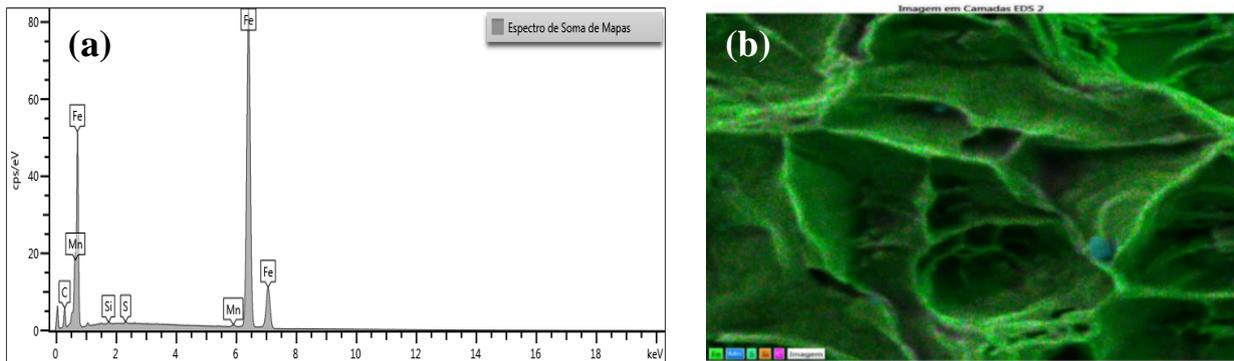




Fonte: Autoria própria, 2019.

A análise do Corpo de Prova NC demonstrou a existência de alta concentração de ferro (Fe), oscilação no teor de carbono (C), assim como a inconstante distribuição dos outros elementos, a exemplo do Manganês (Mn), Oxigênio (O) e Silício (Si), visível na Figura 69 (a), bem como o espectro de cores com a distribuição dos elementos na Figura 69 (b).

Figura 69 - Caracterização por meio da espectroscopia por energia dispersiva do aço carbono NC



Fonte: Autoria própria, 2019.

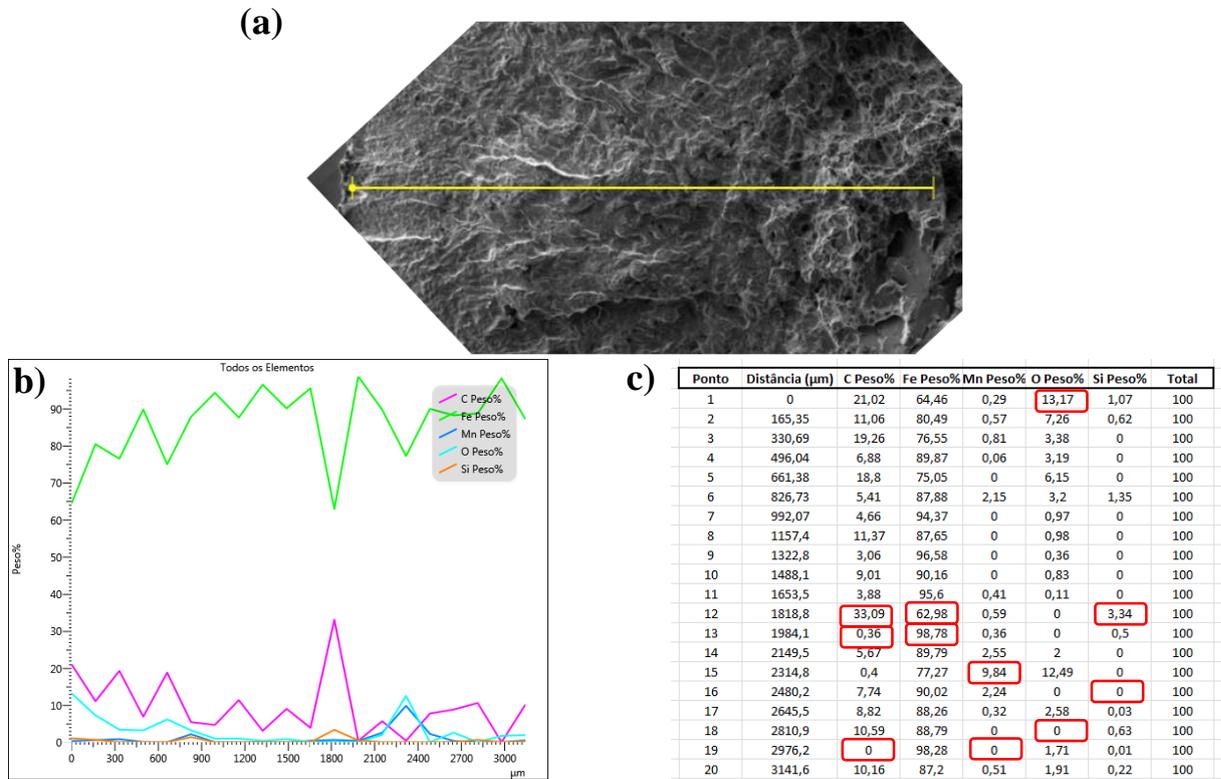
Na Figura 70 é possível visualizar a estrutura do centro e da borda: há existência de microcavidades e porosidade do material principalmente no centro, aproximando-se da superfície se nota uma região fibrosa e estriada.

Em relação à composição dos elementos químicos, no ferro (Fe) o maior teor encontrado foi de 98,78% enquanto o menor teor foi de 62,98%, uma redução de 35,8%, ressalta-se que esses dois pontos estão bem próximos, sendo eles o de número 12 e 13 na Figura 70.

Quanto aos percentuais de carbono (C), a maior concentração foi no ponto 12 com 33,09%. No ponto seguinte de número 13, há uma redução brusca neste percentual que é de 0,36%, o menor percentual está no ponto 19 que não há existência de carbono. O manganês (Mn) teve sua maior concentração 9,84% no ponto 15, já em outros pontos não há existência deste material. O oxigênio (O) teve a maior concentração no ponto 1 com 13,17% e em outros pontos é nulo o

percentual. O silício (Si) teve maior concentração de 3,34%, porém, em outros pontos, não há presença deste elemento.

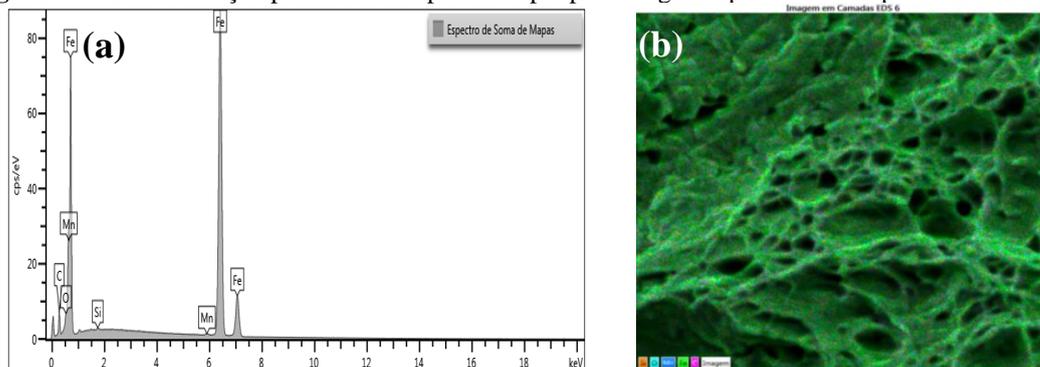
Figura 70 - Quantitativo dos elementos químicos que compõe o aço carbono NC



Fonte: Autoria própria, 2019.

Em relação à análise do Corpo de Prova NCTR, o Ferro (Fe) é o elemento predominante. Quanto ao teor dos outros elementos, há pontos com picos e outros em que não foi identificada a presença dos demais elementos. Nessa amostra, conforme Figura 71 (a), foram identificados carbono (C), manganês (Mn), oxigênio (O) e silício (Si), assim como o espectro de cores com a distribuição dos elementos na Figura 71 (b).

Figura 71 - Caracterização por meio da espectroscopia por energia dispersiva do corpo de Prova NCTR

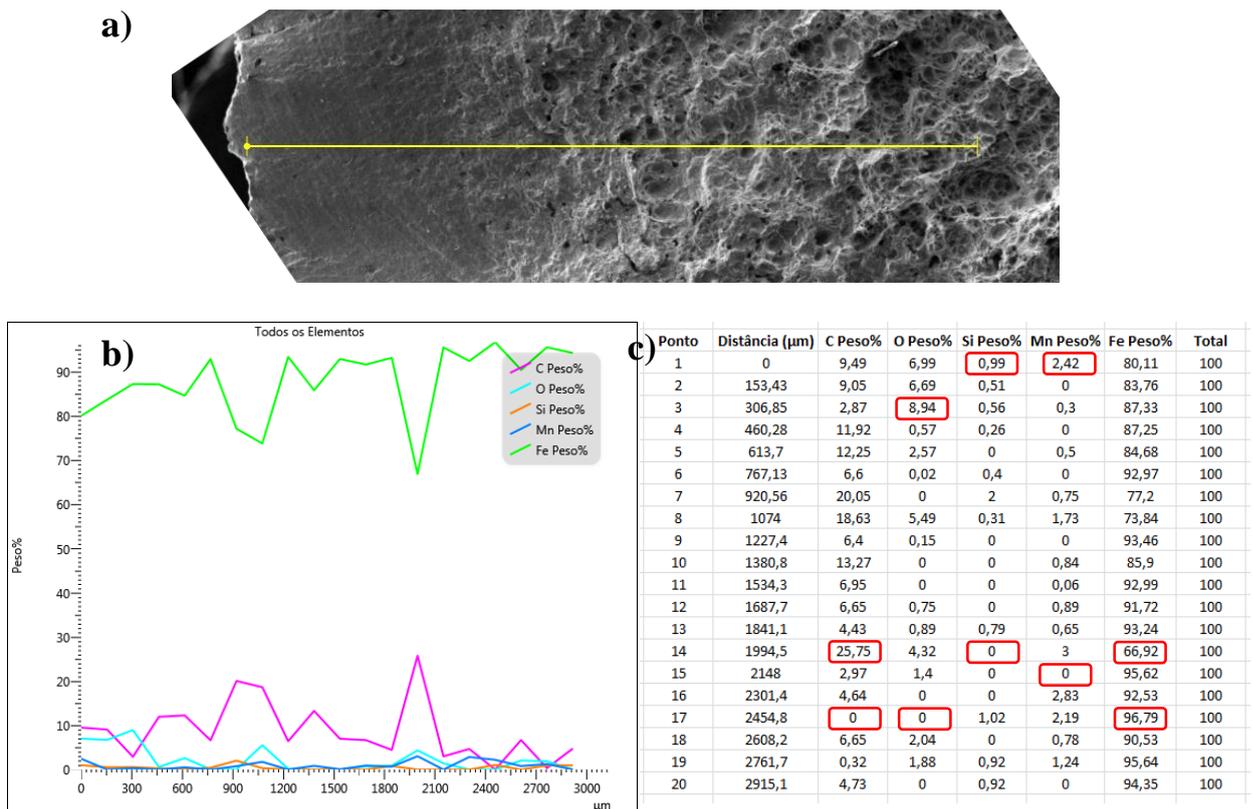


Fonte: Autoria própria, 2019.

Na Figura 72 é possível visualizar a estrutura do centro para a superfície, é nítida a presença de poros e pontos de inclusão, estes são concentradores de tensão que podem ser zonas de colapso, bem como vazios que causam a porosidade do material principalmente no centro.

Existe uma variação na concentração de todos os elementos, o ferro (Fe) teve seu nível máximo no ponto 17 que teve 96,79%, já o menor percentual foi no ponto 14 como 66,92% uma redução de 29,87% em relação a esses dois pontos. O carbono (C) teve seu ápice no ponto 14 com 25,75% enquanto no ponto 17 não foi encontrado esse elemento. O oxigênio teve sua maior concentração no ponto 2 com 8,94% enquanto no ponto 17 e alguns outros não foram encontrados esse componente. O silício (Si) nessa amostra teve sua maior concentração no ponto número 1 com 0,99%, no entanto em outros pontos ele não foi localizado. O manganês (Mn) por sua vez teve o maior teor foi no ponto 1 com 2,42%, outrora em alguns pontos esse percentual foi nulo.

Figura 72 - Caracterização por meio da espectroscopia por energia dispersiva do aço carbono NCTR



Fonte: Autoria própria, 2019.

4.7 Resultados da Distribuição de Weibull

Tabela 19 - Dados da Distribuição de Weibull

| Ensaio de Fadiga | | | | | | | | | | | |
|------------------|--------|-------|---------|---|---------------|------------|----------------------------------|----------------------|----------|------------|--------------|
| Corpo de Prova | Tensão | Ciclo | Posição | Número total de amostras da série analisada | Ponto Mediano | $1/(1-PM)$ | $\ln(\ln(1/(1-PM)))$ Eixo (Y) | $\ln(N)$ Eixo (X) | Beta | c | Alfa |
| ST | 446 | 532 | 1 | 5 | 0,129630 | 1,14893617 | -1,974458694 | 6,276643 | 3,368862 | -22,524235 | 801,117456 |
| | | 619 | 2 | 5 | 0,314815 | 1,45945946 | -0,972686141 | 6,428105 | | | |
| | | 651 | 3 | 5 | 0,500000 | 2,00000000 | -0,366512921 | 6,478510 | | | |
| | | 684 | 4 | 5 | 0,685185 | 3,17647059 | 0,144767396 | 6,527958 | | | |
| | | 1086 | 5 | 5 | 0,870370 | 7,71428571 | 0,714455486 | 6,990257 | | | |
| NC | 129 | 17129 | 1 | 5 | 0,129630 | 1,14893617 | -1,974458694 | 9,748528 | 3,582891 | -36,330864 | 25338,929075 |
| | | 18418 | 2 | 5 | 0,314815 | 1,45945946 | -0,972686141 | 9,821084 | | | |
| | | 20425 | 3 | 5 | 0,500000 | 2,00000000 | -0,366512921 | 9,924515 | | | |
| | | 24518 | 4 | 5 | 0,685185 | 3,17647059 | 0,144767396 | 10,10716 | | | |
| | | 33328 | 5 | 5 | 0,870370 | 7,71428571 | 0,714455486 | 10,41415 | | | |
| NCTR | 352 | 731 | 1 | 5 | 0,129630 | 1,14893617 | -1,974458694 | 6,594413 | 2,361497 | -16,504491 | 1084,632441 |
| | | 735 | 2 | 5 | 0,314815 | 1,45945946 | -0,972686141 | 6,599870 | | | |
| | | 763 | 3 | 5 | 0,500000 | 2,00000000 | -0,366512921 | 6,637258 | | | |
| | | 827 | 4 | 5 | 0,685185 | 3,17647059 | 0,144767396 | 6,717805 | | | |
| | | 1566 | 5 | 5 | 0,870370 | 7,71428571 | 0,714455486 | 7,356280 | | | |

Fonte: Autoria própria, 2019

A partir dos valores obtidos na Tabela 7 com uso da Distribuição de Weibull, percebe-se o maior valor do parâmetro de escala (α) na menor tensão, que representa a durabilidade útil do material. Conforme a tensão aplicada nos materiais trefilados, a tensão apresentada foi de 446 e parâmetro de escala ou vida foi de 801,12. O grupo NC teve a menor tensão com 129 e o maior parâmetro de escala 25338,93; o grupo NCTR obteve uma tensão intermediária entre as já citadas com 352 e parâmetro de escala de 1084,63.

Ao analisar o parâmetro de forma (β), é possível perceber que este teve comportamento aleatório, pois mesmo na maior tensão obteve valor de (β) = 3,37, sendo este valor maior que na segunda maior tensão que foi 352 e o valor de (β) = 2,36. Na menor tensão o valor de (β) apresentou resultado de 3,58 para os materiais NC, sendo este o maior valor de (β) entre os três grupos testados, com maior confiabilidade, encontrando-se na zona III da curva da banheira.

Em analogia com outros trabalhos que realizaram estudos sobre confiabilidade e aplicação da distribuição de Weibull, Teixeira (2017) referência que o valor de alfa (α) se eleva conforme diminui o nível de tensão, ou seja, a durabilidade do material está ligada ao nível de tensão que ele sofre. O autor, ao analisar o parâmetro β , em tensões mais elevadas, ele obtém valores acima de 1, tendo o comportamento na região de falhas da zona III da curva da banheira, garantindo uma boa confiabilidade em relação ao tempo de uso. Quando β obtém valor próximo de 1, o tempo de vida do material se estabelece na região II, devido a defeitos aleatórios e alta dispersão entre os dados dos ciclos.

Já o estudo de Cruz (2013) sobre o comportamento dos parâmetros α e β teve comportamento semelhante ao estudo de Teixeira (2017) e também foi constatado que quanto maior a tensão aplicada menor é o valor de α parâmetro de vida. Em relação ao β , que na maior tensão o valor também foi mais alto, resultou em valores acima de 1 na zona III da curva da banheira.

Em outra pesquisa realizada por Makita e Santa Maria (2011), o qual aplicou a distribuição de Weibull para estudar a probabilidade de falha em relação ao número de ciclos, observou-se que o parâmetro de forma β que representa a inclinação da curva indica a forma como os dados foram distribuídos em relação ao tempo de vida. Assim, percebe-se que é crescente a taxa de falha à medida que aumenta a quantidade de ciclos do aço ABNT 4140.

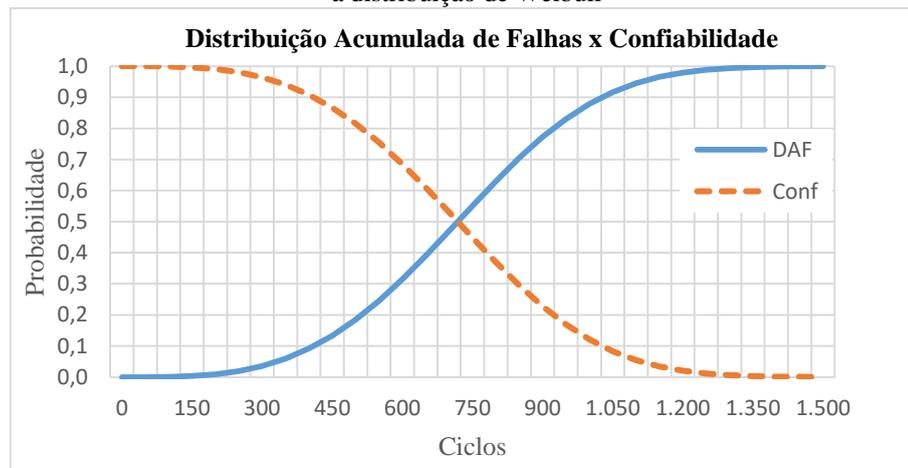
Dessa forma, ao comparar os comportamento dos parâmetros α e β deste estudo com as bibliográficas citadas, o comportamento dos parâmetros é semelhante no caso dos corpos de prova trefilado ST e do corpo NC; já os parâmetros do corpo de prova NCTR apresentaram divergência, o qual foi exposto a uma tensão intermediária comparado aos outros grupos, no entanto o valor

de β ficou acima de 1, situando-se na zona III da curva de banheira, região de velhice. Uma possível explicação seria a heterogeneidade na composição química das amostras e a maior concentração de perlita que aumenta a rigidez após o tratamento NCTR, devido aos alívios de tensão, correção de dureza, aumentando a ductilidade do material. Materiais dúcteis possuem maior resistência na zona plástica.

A Tabela 7 permitiu traçar gráficos da Distribuição Acumulada de Falhas (D.A.F.) x Confiabilidade através dos parâmetros (α) e (β) encontrados para cada tipo de material, sendo estabelecido o eixo x para os ciclos e y para a probabilidade, observando-se que em todos os gráficos o ponto de intercepto foi no valor de 50%, situação em que é recomendável manutenção preventiva.

Na Figura 73, que apresenta a tensão de 446 para o grupo ST, o material atingiu os 50% de probabilidade de falha nos 700 ciclos, a recomendação é que o material tenha manutenção preventiva. Quando atingiu 1150 ciclos, sua probabilidade de continuar funcionando foi 0.

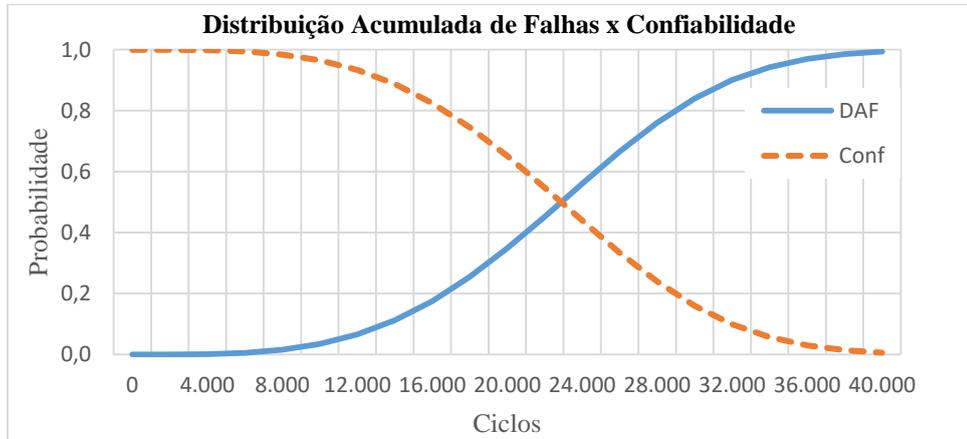
Figura 73 - Comportamento do corpo de prova em aço carbono trefilado ST na tensão de 446 MPa, de acordo com a distribuição de Weibull



Fonte: Autoria própria, 2019.

A Figura 74, que apresenta a tensão de 129, a mais baixa conforme obtida no ensaio de tração para o grupo NC, o material atingiu os 50% de probabilidade de falha nos 22.000 ciclos, a recomendação é que o eixo realize uma manutenção preventiva para evitar fratura por fadiga. Quando atingiu 36.000 ciclos, sua probabilidade de continuar funcionando foi 0.

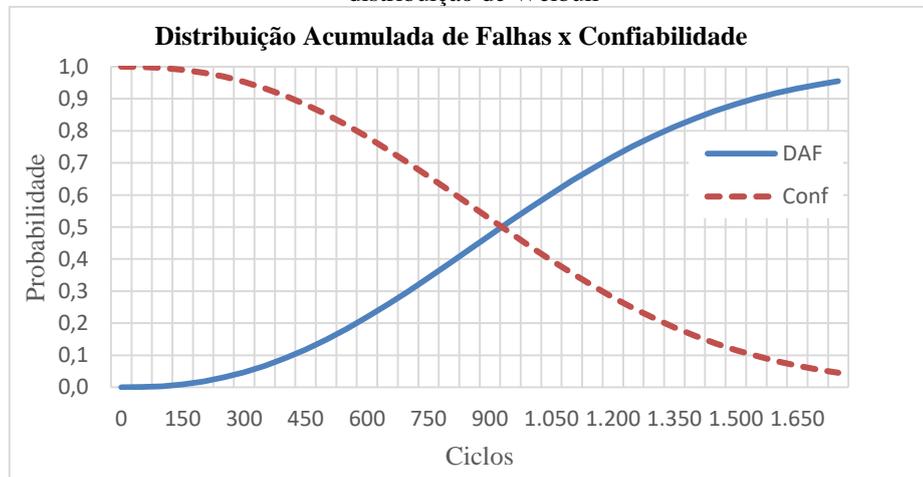
Figura 74 - Comportamento do corpo de prova em aço carbono NC na tensão de 129 MPa, de acordo com a distribuição de Weibull



Fonte: Autoria própria, 2019.

A Figura 75, que apresenta a tensão intermediária de 352, para o grupo NC mostra que o material atingiu os 50% de probabilidade de falha nos 900 ciclos, a recomendação é que o material tenha manutenção preventiva. Quando atingiu 1750 ciclos, sua probabilidade de continuar funcionando foi 0.

Figura 75 - Comportamento do corpo de prova em aço carbono NCTR na tensão de 352 MPa, segundo a distribuição de Weibull



Fonte: Autoria própria, 2019.

No trabalho realizado por Teixeira (2017), quando o material foi exposto a maior tensão que foi de 450, ele atingiu os 50% quando chegou em 8.000 ciclos e quando chegou em 29.000 ciclos a chance de ainda estar funcionando é 0.

Quando o material é colocado à tensão de 350 o ponto de intercepto da curva de confiabilidade e taxa de falhas foi de 22.000 ciclos, no momento que atingiu os 100% da curva a quantidade de ciclos foram de 105 mil. Na tensão de 250 o material chegou aos 50% em 35.000 ciclos, quando o corpo de prova alcançou 75.000 ciclos atingiu a probabilidade nula de

funcionamento. Em relação à tensão de 150, a mais baixa exposta na análise, o material ao chegar aos 50%, ponto recomendado para uma manutenção preventiva, obteve os 136.000 ciclos, o limite da curva atingiu os 100% em 2,5 milhões de ciclos.

Nesse último nível de tensão, Teixeira (2017) ressalta uma maior aproximação entre os pontos 0% e 50% e um maior distanciamento entre os pontos de 50% a 100% de ciclos, repercutindo as falhas aleatórias de tensão, pode-se perceber um estreitamento da zona de confiabilidade de 0 até 50% e um alargamento da zona entre 50% e 100%, tendo em vista que nessa condição de trabalho as falhas são mais aleatórias, o ponto em que o material tenha chances nulas de estar ainda operando seja apenas acima de 2,5 milhões de ciclos. Logo, esse ponto foi bem abaixo do nulo, em razão da grande dispersão dos dados nessa tensão, este considerado próximo ao limite teórico de fadiga do material.

Observa-se a distribuição dos dados deste estudo semelhantes ao estilo de curvas plotadas por Teixeira (2017), porém diferenciados nos níveis de tensão. No material sem tratamento que foi exposto ao maior nível de tensão, a distribuição dos dados se manteve constante entre 0% a 50%, assim como 50% a 100%. Nos materiais normalizados e cementados que obtiveram mais tempo de vida útil e o menor nível de tensão, houve um maior distanciamento de 0 a 50% devido às falhas também serem aleatórias e terem uma maior proximidade de 50% a 100%. Quanto aos materiais normalizados, cementados, temperados e revenidos com uma tensão intermediária comparado aos outros dois grupos, o comportamento da curva ficou bem centralizado entre 0%, 50% e 100% devido à pouca dispersão dos dados, uma vez que alcançou o limite de fadiga do material.

No trabalho de Nogueira (2013) também verificou-se que quanto maior a tensão menor é o número de ciclos que corpo de prova resistiu, desta forma o maior valor de α o maior valor de β foi encontrado na menor tensão. Observou-se que em casos que os valores sejam menor que 1, há grande dispersão nos dados e uma circunstância que pode levar a esses resultados é a heterogeneidade no material.

4.8 Teste de Van der Waerden

A verificação dos pressupostos constatou que os dados violaram a suposição de normalidade e variâncias iguais, ainda que tenham sido transformados, desta forma optou-se pelo teste Van der Waerden para k-amostras independentes, que é um teste não paramétrico alternativo à Anova, conforme explicam Conover e Iman (1979), quando seus pressupostos não são verificados.

A partir do teste de Van der Waerden, observou-se o comportamento dos materiais no

grupo que não recebeu tratamento e nos que receberam tratamentos de acordo com número de ciclos que conseguiram suportar, conforme a Figura 76. Nela os corpos de prova NC tiveram melhores desempenho de forma que suportaram mais ciclos, diferenciando-se dos demais; já o grupo de materiais que receberam tratamento NCTR apresentaram melhor desempenho em relação ao grupo ST. A partir de então foi analisado teste de hipóteses.

Conforme as hipóteses testadas:

H_0 : Todas as funções de distribuição da população k são idênticas;

H_1 : Pelo menos uma das populações tende a produzir observações diferentes das demais.

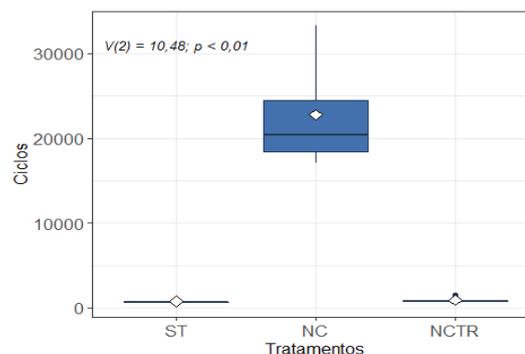
Figura 76 - Valores do Teste de Van der Waerden

```
##
## Van der Waerden normal scores test
##
## data: Ciclos by trat
## Van der Waerden chi-squared = 10,48, df = 2, p-value = 0,0053
##
## Pairwise comparisons using van der Waerden normal scores test for
## multiple comparisons of independent samples
##
## data: Ciclos by trat
##
##      ST      NC
## NC  6,9e-05 -
## NCTR 0,0392 0,0035|
```

Fonte: Autoria própria, 2019.

Com o nível de significância fixado em 5%, observou-se o P-valor de 0,0053 obtido no teste de Van der Waerden, desta forma há evidências para rejeitar H_0 e aceitar a hipótese alternativa, logo pelo menos um dos tratamentos diferem dos demais. A partir do exame visual na Figura 77, percebe-se que os corpos de prova NC apresentaram os melhores resultados e se diferenciaram dos demais. Já o grupo NCTR teve desempenho superior ao ST quando observado o nível de tensão recebido e o número de ciclos que suportou.

Figura 77 - Comparação entre tratamentos entre grupos ST, NC e NCTR x Ciclos



Fonte: Autoria própria, 2019.

Sheskin (2000) ressalta que, para ser rejeitada a hipótese nula, o valor calculado deve ser igual ou superior ao valor crítico do teste qui-quadrado conforme observado o nível de significância e deve ser avaliado de acordo com a tabela dessa distribuição. Dessa forma, quando estabelecidos os graus de liberdade ao nível de significância de 95% e valor crítico de 0,05%, conforme o teste de pontuação normal de Van der Waerden para k amostras independentes, pode-se concluir que existe uma diferença significativa entre pelo menos dois dos três grupos expostos a diferentes níveis de ruído. Este resultado pode ser resumido da seguinte forma: $\chi^2_{vdw} = 8.10$, $p < 0,05$.

Ao comparar os resultados desta pesquisa com o estudo de Sheskin (2000), constatou-se que o teste de Van der Waerden foi eficiente e conseguiu determinar diferenças entre os níveis de ruído, assim como no presente estudo por meio do número de ciclos o teste de Van der Waerden estabeleceu diferenças entre os diferentes grupos.

Assim, neste trabalho, há evidências para rejeitar H_0 , logo o tratamento NC se mostrou bem superior para aumentar o número de ciclos; já o NCTR também elevou, porém em menores quantidades em relação às amostras de aço carbono sem tratamento, concluindo-se que os tratamentos promoveram melhora da confiabilidade.

5 CONCLUSÃO

O objetivo desse trabalho foi avaliar o efeito dos tratamentos termoquímicos sobre a confiabilidade dos eixos em aço carbono trefilado acoplado em rabetas, fabricados e comercializados no mercado de Belém. Os resultados indicaram que os tratamentos são capazes de proporcionar a melhora na confiabilidade. A vida útil dos eixos aumentou significativamente, logo o efeito dos tratamentos termoquímicos foi positivo. No tocante à comparação de desempenho, os materiais que receberam tratamentos termoquímicos foram superiores em relação aos sem tratamento, com destaque para NC.

Na análise de fluorescência, percebeu-se a composição heterogênea do material, uma vez que em alguns pontos há maior concentração de um elemento e em outros percebe-se uma redução completa deles. Verificou-se também que o eixo tem teor de carbono em torno de 0,20, valor este menor que o comercializado no mercado de Belém, indicado como aço carbono 1045.

No ensaio mecânico de tração, os corpos de prova ST tiveram as tensões de escoamento mais elevadas, assim como um dos corpos de prova apresentou o maior valor de tensão máxima, enquanto a deformação total foi a menor em relação aos outros dois grupos. O grupo NC apresentou a menor tensão de escoamento. O grupo NCTR teve a maior deformação total.

Em relação à rugosidade, os três grupos apresentaram valores médios semelhantes acima de 2; já em relação ao desvio padrão, o grupo NCTR apresentou os maiores valores.

O ensaio de dureza Brinell realizou a comparação dos corpos de prova trefilados ST, NC e NCTR. Na seção transversal, o grupo que apresentou maior dureza foi ST, pois permaneceu com as tensões residuais do processo de fabricação, e a menor dureza foi o NC, nessa região os materiais que receberam tratamentos tiveram menor dureza do que na superfície, visto que os tratamentos diminuíram a dureza e promoveram alívio de tensões. Já na superfície, foi grupo NCTR teve maior dureza, devido aos processos termoquímicos aplicados em sua superfície e o grupo NC continuou com a menor dureza.

A análise fractográfica mostrou que todos os corpos de prova apresentaram porosidade devido à presença de microcavidades (dimples) em sua estrutura, além disso observou-se também áreas fibrosas, compostas por estrias, marcas de praia e pontos de inclusão, estes são possíveis desencadeadores de trinca que resultaram em fratura dúctil caracterizada por bordas irregulares.

Na análise metalográfica, a partir do ataque químico com Nital a 3%, identificou-se as microestruturas também com porosidade no aço, nas quais encontrou-se a estrutura lamelar ferrítica e perlítica. Esta última resultante da combinação ferrita mais cementita. Essas microestruturas foram ampliadas 100, 200, 500 e 1000 vezes.

O M.E.V. e o E.D.S. permitiram verificar a estrutura perlita presente em todos os três grupos, onde foram encontrados elementos químicos como alumínio, silício e manganês em quantidade significativa. A normalização propiciou o refinamento dos grãos de perlita.

No grupo ST, a borda do aço permaneceu na mesma condição. Obedecendo à estrutura de aços com baixo teor de carbono, este corpo de prova apresenta-se com uma matriz ferrítica com grãos de perlita, observa-se também que a borda possui a mesma morfologia do centro.

No corpo de prova NC, houve modificação da borda por difusão de carbono devido ao tratamento. No centro não houve alteração da matriz ferrítica com grão de perlita. No grupo NCTR houve uma modificação no centro do corpo de prova com o aumento dos grãos de perlita devido ao tratamento térmico de têmpera e, na superfície da borda do material, esse corpo de prova mostra a camada cementada.

Através do ensaio de fadiga, foi possível realizar a análise dos resultados da Distribuição de Weibull, no qual o parâmetro de escala ou vida mostrou que os corpos de prova NC tiveram melhor tempo de vida útil em relação ao NCTR, assim como sobre os trefilados (ST).

O teste de Van der Waerden evidenciou que os corpos de prova NC tiveram melhor desempenho, pois suportaram mais ciclos, assim como os corpos de prova NCTR mostraram ter um desempenho melhor em relação ao grupo ST.

Conclui-se, assim, que o tratamento termoquímico de normalização e cementação foi o que melhor surtiu o efeito desejado nos eixos em aço carbono trefilado acoplado em rabetas, uma vez que modificaram a estrutura mecânica do eixo, a qual propiciou o aumento da vida útil em ciclos e, dessa forma, melhorou a confiabilidade.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realizar o levantamento de custo e benefício para manutenção de eixos de rabetas, levando em consideração as características em que o material foi confeccionado, como potência, tamanho do eixo e o custo operacional de manutenção e substituição da peça.

- Utilizar os indicadores de manutenção com MTBF (Mean Time Between Failure) que serve para analisar tempo médio entre falhas, definindo o tempo total em que conseguirá funcionar com segurança. O MTTR (Mean Time To Repair) mensura o tempo médio para reparos, ou seja, quanto tempo é necessário para conseguir deixar novamente em condições de uso.

REFERÊNCIAS

ABRAHÃO, R. R. R.; BITTENCOURT, C.; TSURUTA, K. M.; RADE, R. S. L. **Fadiga de Materiais - Uma Revisão Bibliográfica**. VIII Encontro Interno. XII Seminário de Iniciação Científica. Universidade Federal de Uberlândia. 2008.

AÇO BRASIL. 2015. Disponível em: <http://www.acobrasil.org.br/site2015/processo.html> Açosporte. Acesso em: 11 mar. 2019.

AÇOS SAE 1045. Disponível em: <http://www.acosporte.com.br/aco-sae-1045> Acesso em: 29 out. 2018.

AÇOSPORTE. **Tudo que Você Precisa Saber sobre Aço**. 2018. Disponível em: <https://soluesindustriais.wordpress.com/category/acosporte/>. Acesso em: 29 jan. 2019.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). **Conjuntura dos Recursos Hídricos do Brasil**. Regiões Hidrográficas Brasileiras. Edição Especial. Brasília, [2015]. Disponível em: <http://www.snirh.gov.br/portal/snirh/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos/regioeshidrograficas2014.pdf>. Acesso em: 05 mai. 2019.

ALMEIDA, J. C. **Projeto Mecânico, Enfoque Baseado na Fadiga e na Mecânica da Fratura**. Ed. Elsevier, 1ª Ed. 2018. Disponível em: <https://books.google.com.br/books/>. Acesso em: 17 jun. 2019.

ALVES, A.V. P.; SANTOS, G. B. S.; FILHO, F. C. M. M.; SANCHES. Análise dos Métodos de Estimativa Para os Parâmetros das Distribuições de Gumbel e Gev em Eventos de Precipitações Máximas na Cidade De Cuiabá-MT. **Revista Eletrônica de Engenharia Civil**. Vol 6, Nº 1, p. 32-43, ISSN: 2179-0612. 2013.

AMARAL, S.; ESCADA, M. I. S.; ANDRADE, P. R.; ALVES, P. A.; PINHEIRO, T. F. P.; PINHO, C. M. D.; MEDEIROS, L. C. C.; SAITO, E. A.; RABELO, T. N. **Da Canoa à Rabeta: Estrutura e Conexão das Comunidades Ribeirinhas no Tapajós (Pa)**. Pesquisa de Campo Jun/Jul de 2009. Relatório Técnico de Atividade de Pesquisa do INPE nos Projetos PIME e GEOM. São José dos Campos – SP, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Indicação do estado de superfícies em desenhos técnicos. **NBR 8404**. MAR 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Especificações geométricas do produto (GPS). Rugosidade método do perfil – termos, definições e parâmetros da rugosidade. **NBR ISO 4287**. 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Aço Carbono e Ligados Para Construção Mecânica - Designação e Composição Química. **NBR NM 87**. Out 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Materiais metálicos - Ensaio de dureza Rockwell Parte 2: Verificação e calibração de máquinas de ensaio e penetradores. **ABNT NBR ISO 6508-2:2019**.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Aços Carbono Ligados para a Construção Mecânica – Designação e Composição Química. **NBR NM 87/2000**. Rio de Janeiro, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Critério de Classificação dos Aços. **NBR NM 172/2000**. Rio de Janeiro, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Materiais metálicos - Calibração da força dinâmica no ensaio de fadiga uniaxial - Parte 1: Sistemas de ensaio, elaborada pelo Comitê Brasileiro de Máquinas e Equipamentos Mecânicos. **NBR ISO 4965-1:2016**.

ASM INTERNATIONAL. 1993. **Metals Handbook**. Vol. 12 and 14, 9. ed.

ASSIS, R. **Garantias e Contratos de Assistência pós-venda**. 2015. Disponível em: http://www.rassis.com/artigos/Estatistica/Artigo_Garantias_Rui%20Assis.pdf. Acesso em: 10 out. 2018.

ASTM. **E8/E8m Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials**.

AZEVEDO, A. G. L. **Avaliação da técnica da dupla camada da recuperação de peças de aço ABNT 1045**. 2002. 108 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia e Ciência de Materiais, Engenharia Mecânica e Produção, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2002.

AZEVEDO, C. M. P.; GODINHO, L. H.; SARAIVA, M. A. L.; ALAVARENGA, S. D.; RIBEIRO, M. V. A. A. Ensaio Mecânico de Tensão-Deformação sob Tração: Um Estudo Integrado com a disciplina de Cálculo. **Persp. Online: Exatas e Eng.**, Campos Dos Goytacazes, 15 (06) 29 – 35 – 2016. Disponível em: http://www.seer.perspectivasonline.com.br/index.php/exatas_e_engenharia/article/view/1030/800. Acesso em: 07 mai. 2019.

AZEVEDO, D. F. O. **Tipos de Carregamento. Conhecendo como as cargas atuam e prevenindo-se contra falhas**. Mogi das Cruzes – SP, 2016.

AZZOLINI, D. **Estudo da Influência da Temperatura de Pré-Aquecimento nas Propriedades Mecânicas de um Aço SAE 1045, soldado pelo Processo Mig/Mag**. Centro Universitário Univates, Lajeado. 2017.

BARBOSA, F. M.; ORTEGOSA, C. Z.; LAPORTE, D. J.; BRANCO, F. P.; ROSA, B. P. **Projeto e Construção de um Forno para Tratamento Térmico de Aços**. Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC'2017 8 a 11 de agosto de 2017 – Belém-PA, Brasil.

BELISÁRIO, E. S. **Verificação à Fadiga em Pontes Rodoviárias e Concreto Armado no Brasil: Avaliação de Critério Normativo Simplificado**. 2015. 112 f. Monografia, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro -RJ.

BEZERRA, D. C.; MACHADO, I. F. **Avaliação da usinabilidade em torneamento de aço ABNT 1045, para diferentes velocidades de corte e ferramentas**. USP, São Paulo – SP, 2008. Disponível em: http://sites.poli.usp.br/d/pme2600/2008/Artigos/Art_TCC_018_2008.pdf. Acesso em: 30 jun. 2019.

BIASIBETTI, G. R. S.; NUNES, R. M.; CAVALER, L. C. C.; ROCHA, A. S. Análise da Rugosidade Superficial de Barras de Aço SAE 1045 após Torneamento. **Revista Matéria**, v. 24, n.1, 2019. ISSN 1517-7076 artigo e-12293, 2019.

BRANDÃO, R. P. **Projeto Mecânico de uma Máquina de Ensaio de Fadiga por Flexão Rotativa**. 76p. (Monografia) Graduação – UFRJ/ POLI/ Engenharia Mecânica, 2013.

BRASIL. **Caderno da Região Hidrográfica Amazônica**. Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Recursos Hídricos. Brasília: MMA, 2006.

BRINGAS, J. E. **Handbook Comparative World Steel Standards**. 2ª Ed. p.cm – (ASTM data series; DS 67A) Baltimore, 2002.

BUDYNAS, R. G.; NISBETT, J. K. **Elementos de Máquina de Sigley**. Projeto de Engenharia Mecânica. Tradução João Batista de Aguiar, José Manuel de Aguiar, 7ª ed. Porto Alegre, Bookman, 2005.

CALLISTER, W. D. Jr.; RETHWISCH, D. G. 1940. Tradução: Sergio Murilo Stamile Soares; Revisão Técnica: José Roberto Moraes d’Almeida. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

CARVALHO, A. C.; ESPIRITO SANTO, S. P. **Plano de Manutenção de Motores de Rabeta para o Projeto Engenheiro Cidadão**. 2014. 59 p. Monografia. Universidade Federal do Pará. Tucuruí – Pa.

CELESTINO, P. A. P.; FELIPE, R.C. T. S.; MACHADO, T. G. Análise Comparativa entre o Tratamento Térmico (Têmpera) e o Tratamento Termoquímico (Cementação) realizado em Aço 1040. **Holos**, Ano 23, Vol. 3(2007).

CIMM. 2019. Disponível em: <https://www.cimm.com.br/portal/verbetes/exibir/605-obtencao-do-aco-processo>. Acesso em: 11 mar. 2019.

CHIAVERINI, V. **Tratamento Térmico das Ligas Metálicas. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais**. São Paulo - SP, 2008.

CLAUDINO, M. F. **Projeto de uma Máquina de Tração de 2.000 toneladas**. Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio. Rio de Janeiro – RJ, 2017.

CONOVER, W. J.; IMAN, R. L. **On multiple-comparisons procedures**. Los Alamos Sci. Lab. Tech. Rep. LA-7677-MS, p. 1-14, 1979.

COSTA, A. V.; GUTIERREZ JR, J.; RODRIGUES, R. M.; SILVA, V. D. P. **Ensaios Mecânicos de Materiais Metálicos**. Relatório Técnico. Universidade de Mogi das Cruzes. SP, 2009.

COSTA, A. **Ilha do Capim: Ilhas de Abaetetuba**. 2011. Disponível em: <http://ademirhelenorocha.blogspot.com/2011/07/ilha-do-capim-ilhas-de-abaetetuba-1.html> Acesso em: 30 ago. 2018.

CRUZ, W. P **Análise Estatística Usando a Distribuição de Weibull de Ensaios de Fadiga**

- Axial em Juntas Soldadas pelo Processo Gmaw e Gmaw-Cw.** 57 p. Monografia (Graduação em Engenharia de Materiais). Universidade Federal do Pará. Marabá – Pa, 2013.
- CRUZ, M. J. M. **Territorialização Camponesa na Várzea Amazônica.** Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo - USP. São Paulo, 2007.
- DUARTE, R. P. **Obtenção Simplificada de Curvas Tensão-Deformação Cíclicas a partir de Ensaio Monótonos.** 2015, 96 p. Dissertação, Universidade Federal Fluminense. Niterói -RJ.
- FAVALESSA, D.; FILHO, E. A. S.; PREVITAL, G.; GUISSO, H.; CALIXTO, J. P.; GRIPPA, J.; ANGELI, W.; SAGRATZKI, N. L. Tratamentos Térmicos: Efeito da Velocidade de Resfriamento Sobre as Microestruturas dos Aços ABNT 1045. **Revista Educação e Tecnologia.** Ano 1. Nº 2, Out/Mar 2006.
- FECHINE, E. F. G. **Mulheres Ribeirinhas do Rio Madeira: Cotidiano Envolto em Brumas.** Dissertação (mestrado) 169 p. Fundação Universidade Federal de Rondônia. Porto Velho, 2007.
- FERRAZ, H. O Aço na Construção Civil. **Revista Eletrônica de Ciências** – São Carlos – SP, Nº 22 - Outubro / Novembro / Dezembro de 2003.
- FERREIRA, L. S. G. **Gênero de Vida Ribeirinho na Amazônia: Reprodução Socioespacial na Região das Ilhas de Abaetetuba-PA.** (Dissertação) 149 p. Universidade Federal do Pará. 2013.
- FERREIRA, R. C. B.; VACA, L. E. A. O Rio é Minha Rua: A circulação e o agrupamento dos ribeirinhos na Amazônia Oriental. **E-metropolis.** nº 29, ano 8, junho de 2017.
- FERREIRA, F. V. **Efeito De Tratamentos de Superfície e Rugosidade na Formação de Incrustações de Carbonato de Cálcio.** 64 p. (monografia) Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro – RJ, 2018.
- FILHO, E. S.; LIMA, A. P.; MARIANO, N. A. Efeito do Tratamento Térmico na Caracterização Microestrutural e das Propriedades Mecânicas de um Aço Inoxidável Martensítico do tipo 13Cr5Ni0,02C. **REM: R. Esc. Minas,** Ouro Preto, 60(1): 123-127, jan. mar. 2007.
- FILHO, P. P. R.; ALBUQUERQUE, V. H. C.; CAVALCANTE, T. S.; TAVARES, J. M. R. S. Ferramenta Computacional para Análise de Imagens de Ensaio Mecânicos de Dureza. **Rev. Technol. Fortaleza,** v. 33, n. 2, p. 145-155, dez. 2012.
- GAMA, A. S. M.; Fernandes, T. G.; Parente, R. C. P.; Secli, S. R. Inquérito de saúde em comunidades ribeirinhas do Amazonas, **Cad. Saúde Pública;** 34(2):e00002817 Brasil. 2018.
- GARCIA, A.; SPIN, J. A.; SANTOS, C. A. **Ensaio dos Materiais.** Rio de Janeiro – RJ, 2000.
- GERDAU. **Manual dos Aços.** Aços Finos Piratini. 2003.
- GUNT. **Experiments instructions.** Fatigue test machine. WP 140. Barsbuttel, Germany, 2016.

GRILO, J. P.F.; PERES, M. M., **Características, propriedades e aplicações da Cementação em Aço**. Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN, 2012.

HELENO, B. C. **Aplicação da Manutenção Centrada na Fiabilidade a Dispositivos Médicos**. 131 p. Dissertação (Mestrado). Universidade Católica Portuguesa. Faculdade de Engenharia. Lisboa – PT, 2014.

HIBBELER, R. C. **Resistência dos Materiais**, 5ª Ed. - São Paulo: Person, 2006.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. 2010. Disponível em: <https://censo2010.ibge.gov.br/noticias-censo.html?busca=1&id=3&idnoticia=2417&t=atlas-censo-demografico-ibge-mapeia-mudancas-sociedade-brasileira&view=noticia>. Acesso em: 06 mar. 2019.

INSTITUTO DO AÇO BRASIL. **Processo siderúrgico**. Brasília, 2015. Disponível em: <http://www.acobrasil.org.br/site2015/processo.html>. Acesso em: 15 mai. 2019.

JOSHUA PROJECT. **Ribeirinhos, Amazon River Peoples in Brazil**. Disponível em: https://joshuaproject.net/people_groups/11073/BR. Acesso em: 05 mar. 2019.

JÚNIOR, H. D.; PALMEIRA, A.A.; HABIBE, A. F.; MAGNANO, R. O. Estudo das equações aplicáveis em teoria de plasticidade independente do tempo. **Cadernos UniFOA**. Edição Especial do Curso de Mestrado Profissional em Materiais - Junho/2014.

LEEMIS, L. M. **Reliability: Probabilistic models and statistical methods**. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1995.

LIMA, M. A. R; ANDRADE, E. R. G. Os ribeirinhos e sua relação com os saberes. **Revista Educação em Questão**, Natal, v. 38, n. 24, p. 58-87, maio/ago. 2010.

LUZ, G. **Ensaio de Dureza Rockwell**. Disponível em: <https://www.materiais.gelsonluz.com/2017/12/ensaio-de-dureza-rockwell.html>. Acesso em: 18 mai. 2019.

MACHADO, J. P.; SANTOS, M. B. **Estudo Comparativo da Temperabilidade e Dureza dos Aços SAE 4140 e 4340 Temperados ao Maçarico**. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense, Monografia. 64 p. Campos dos Goytacazes – RJ. 2018.

MAKITA, F. K. M.; SANTA MARIA, V. A. R. **Estudo Sobre a Curva S-N e o Gráfico de Weibull para Análise de Resistência à Fadiga de Contato de Engrenagens**. 112 p. (Monografia) Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba – PR. 2011.

MARCON, L. **Estudo da Evolução das Inclusões do Aço SAE 8620 com Tratamento de Inclusões com Cálcio em Escala Laboratorial**. 109 p. (Dissertação). Mestrado em Minas, Metalurgia e Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – RS, 2007.

MARTINEZ H. L. J. Empirical Power of Four Statistical Tests in One Way Layout. **International Mathematical Forum**, vol. 9, n. 28, 1347 – 1356. Universidade de Caldas, Colombia, 2014.

- MASCIA, N. T. **Tração, Compressão e Lei de Hooke**. Universidade Estadual de Campinas- Departamento de Estruturas- Campinas/SP, 2006.
- MATOS, P. Z.; ZOTTI, D. M. **Análise de Confiabilidade Aplicada à Indústria para Estimações de Falhas e Provisionamento de Custos**. Monografia de Graduação. 59 p. Universidade Federal do Paraná. Curitiba - PR. 2010.
- MEGHI INDUSTRIA. **Rabeta Longa, Turbo Tornado**. Disponível em: <https://www.meghi.com.br/produtos/rabeta-longa-turbo-tornado>. Acesso em: 31 out. 2018.
- MELCHIER, P. J. **Tenacidade a Fratura de Aços Estruturais que Apresentam Delaminações**. p. 98. Dissertação (Mestrado Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ. Rio de Janeiro. 2014.
- MENDONÇA, E. M. C.; CARNEIRO, J. R. G.; SILVA, W. E.; CATALÃO, R. P. C. **Estudo Comparativo entre Cementação à vácuo (Baixa Pressão) e Cementação Tradicional**. TTT 2012 - VI Conferência Brasileira sobre Temas de Tratamento Térmico 17 a 20 de junho de 2012, Atibaia, SP, Brasil.
- MENDONÇA, E. M. **Análise de Concentração de Tensões e Fadiga em uma Junta Soldada**. 74 p. (Monografia) Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio de Janeiro – RJ, 2016.
- MITTAL, A. **Guia dos Aços**. Aços Longos. Março 2013. Disponível em: <http://brasil.arcelormittal.com.br/pdf/quem-somos/guia-aco.pdf>. Acesso em: 31 mar. 2019.
- MORAIS, V. S. **Projeto e construção de Charpy utilizando a modelagem numérica da Plataforma Ansys® no estudo comparativo entre ensaios numéricos e práticos a partir de diferentes propriedades mecânicas de materiais compósitos**. 179 p. (Doutorado). Tese. Universidade Estadual de São Paulo. Ilha Solteira – SP, 2016.
- MOREIRA, E. **Amazônia: o conceito e a paisagem**. Rio de Janeiro: SPVEA (Superintendência do Plano de Valorização Econômica da Amazônia), 1960. 94 p.
- MORI, G. N.; CESCUNETI, L. B. Análise das propriedades metalográficas do Aço Sae 1045 nos processos térmicos de normalização, revenimento e têmpera, **Rev. Esfera Acadêmica Tecnologia** (ISSN 2526-4141), v. 3, n. 1, 2018.
- MORIM, J. **Ribeirinhos**. Fundação Joaquim Nabuco. Fundaj/Unesco. 2014. Disponível em: http://basilio.fundaj.gov.br/pesquisaescolar/index.php?option=com_content&view=article&id=1053:ribeirinhos&catid=52:letra-r. Acesso em: 10 mar. 2019.
- MORGADO, T. L. M.; BRANCO, C. M.; INFANTE, V. Previsão de Vida à Fadiga dos Engates (Rabetas) dos Vagões de Transporte de Carvão. **Revista da Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões**, Coimbra, v. 14, p. 1-9, 2007.
- NETO, F. R.; FURTADO, L. G. Belém, A Ribeirinidade Amazônica: Algumas Reflexões. **Cadernos de Campo**, São Paulo, n. 24, p. 158-182, 2015.
- NEVES, J. G. Ribeirinhos, Desenvolvimento e a Sustentabilidade possível. **Revista Partes**. São Paulo, ISSN 1678-8419. 2008. Disponível em: <https://www.partes.com.br/2008/03/19/>

ribeirinhos-desenvolvimento-e-a-sustentabilidade-possivel-3/. Acesso em: 27 out. 2018.

NOGUEIRA, J. T. P. **Máquina de Testes de Fadiga Mecânica por Flexão Rotativa**. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC- Rio de Janeiro – RJ, 2014.

NORIA. 2009. Disponível em: <http://rabetanoria.blogspot.com/2009/05/rabeta-noria-para-motor-estacionario-35.html>. Acesso em: 18 jun. 2018.

NORTON, R. L. **Projeto de máquinas [recurso eletrônico]: uma abordagem integrada** / Robert L. Norton; [tradução: Konstantinos Dimitriou Stavropoulos et al.]. – 4. ed. – Dados eletrônicos. – Porto Alegre: Bookman, 2013.

O’CONNOR, P. D. T. **Practical Reliability Engineering**. John Wiley & Sons, 2002 – 4th Edition.

OLIVEIRA, C. S.; DENTI, G. B. **Avaliação da Tenacidade do Impacto da Região Revenida pelo Passe Duplo em Soldagem Smaw do Aço Aisi 1045**. Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, 2007.

OLIVEIRA, A. R.; JÚNIOR, I. C. A.; SILVA, G. **Influência da Temperatura no Revenimento do Aço Sae 4340**. XIII Encontro Latino Americano de Iniciação Científica e IX Encontro Latino Americano de Pós-Graduação – Universidade do Vale do Paraíba – 2009.

OLIVEIRA, L. S. **Modernização da Frota Ribeirinha**. Políticas e Estratégias. Departamento de Estudos da Escola Superior de Guerra – ESG, Rio de Janeiro - RJ, 2014.

OLIVEIRA, A. R. F.; SILVA, E. H. M.; PAULA, G. C.; SILVA, R. R. F. **Desenvolvimento de Equipamento para Ensaio de Fadiga por Flexão**. Semana de Educação, Ciência e Tecnologia - SECITEC – Itumbiara, GO- 2017.

PADILHA, A. F. **Materiais de Engenharia**. Microestrutura e Propriedades. Curitiba: Humus, 2000.

PAULI, E. A.; ULIANA, F. S. **Tratamentos Térmicos – Mecânica**. Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial - SENAI. Programa de Certificação de Pessoal de Manutenção Mecânica (CPM). SENAI - ES, 1997.

PEREIRA, J. A. M. **Desenvolvimento de Novo Método para Determinação do Tamanho de Lote Mínimo em Amostragem Aleatória para Materiais Frágeis Empregando a Distribuição De Weibull**. 227 p. (Tese) Doutorado em Engenharia e Ciências dos Materiais. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Campos dos Goytacazes – RJ, 2013.

PEREIRA, E. A. D. **As encruzilhadas das territorialidades ribeirinhas: transformações no exercício espacial do poder em comunidades ribeirinhas da Amazônia Tocantina Paraense**. 435 p. Tese. (Doutorado em Geografia Humana). Universidade Federal Fluminense. Niterói – RJ, 2014.

PFEIL, W; PFEIL, M. **Estruturas de Aço**. Dimensionamento prático. 8.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

PINHEIRO, L. M.; MUZARDO, C.D.; SANTOS, S.P. **Estruturas de Concreto**. 2003. Disponível em: <http://www.fec.unicamp.br/~almeida/ec702/EESC/Acos.pdf>. Acesso em: 25 mar. 2019.

PINHEIRO, V.; NOGUEIRA, L. M.; COSTA, A. L. M. **Algoritmo para Análise Gráfica e Dimensionamento de Eixos de Transmissão de Potência**. Congresso Nacional de Engenharia Mecânica. XIV CONEMI. Salvador – BA, 2014.

PLANALTO CENTRAL. 2007. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2007/Decreto/D6040.htm. Acesso em: 03 mar. 2019.

POHLERT, T. **The Pairwise Multiple Comparison of Mean Ranks Package (PMCMR)**. 2016. Disponível em: <https://cran.r-project.org/web/packages/PMCMR/vignettes/PMCMR.pdf>. Acesso em: 05 jul. 2019.

PRAVIA, Z. M. C.; DREHMER, G. A. **Estruturas de Aço**. Universidade de Passo Fundo. Passo Fundo – RS, 2004. Qualinox. 2018. Disponível em: <http://www.qualinox.com.br/aco-carbono.htm>. Acesso em: 22 jul. 2018.

QUALINOX. **Aços carbonos**. 2018. Disponível em: <http://www.qualinox.com.br/aco-carbono.htm>. Acesso em: 22 jul. 2018.

REED-HILL, R. E. **Princípios de Metalurgia Física**. Ed. Guanabara Dois. 2ª Ed. Rio de Janeiro – RJ, 1982.

REIS, K. T. **Tecnologia dos Materiais**. Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial – SENAI. 84 p. SENAI-MG. Ouro Preto, 2013.

RELIASOFT BRASIL. **Reliability Hot Wire**. Conceitos de Confiabilidade, Características da Distribuição Weibull. Ed. 3, Mai 2005.

RIOS, C. T.; AMARAL, M.P.; SOUZA, E. S. **Influência de tratamentos térmicos na microestrutura e propriedades mecânicas do aço SAE 4140**. 22º CBECiMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais 06 a 10 de Novembro de 2016, Natal, RN, Brasil.

ROCHA, D. L. **Revisão bibliográfica sobre os critérios de falha segundo a ótica da mecânica da fratura, em especial, o desenvolvimento da curva de resistência dos materiais (Curva R)**. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Espírito Santo Centro Tecnológico – UFES. Espírito Santo, 60 p. 2009.

ROCHA, R. J. **Estudo sobre métodos de estimação de $f(t)$ para o cálculo dos parâmetros de distribuições de Weibull com a aplicação em uma análise de falhas de garrafas pet**. 18 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Bacharelado Interdisciplinar em Mobilidade). Curso de Graduação em Bacharelado Interdisciplinar em Mobilidade, Universidade Federal de Santa Catarina, Rio de Janeiro, 2015.

ROCHA G. B. T.; PEREIRA, L. M. M.; FARIAS, L. D. P.; GANDUR, N. L.; FLORES, P. M.; OLIVEIRA, R. M.; SILVA, M. H. P. **Análise Fractográfica em MEV – fratura dúctil x fratura**

frágil. Instituto Militar de Engenharia (IME). **Revista Militar de Ciência e RMCT**. v. 33, nº 2, 2016.

ROSA, E. **Análise da Resistência Mecânica**. (Mecânica da Fratura e Fadiga). Universidade Federal de Santa Catarina-2002. Ed. Grante. 1ª Edição.

SANTOS, L. V. **Análise da falha por fadiga em eixos de motores para sistemas de arrefecimento**. 105 p. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica. São Paulo – SP, 2008.

SANTOS, A. R.; TREIN, E. S. A. Educação Ambiental no Contexto Ribeirinho Amazônico. **REU**, Sorocaba, SP, v. 36, n. 3, p. 181-200, dez. 2010.

SAPUCAIA, M, B, R.; SILVA, F. M. A.; OLIVEIRA, C. A. M. **Análises em ensaios de tração nas amostras de latão, aço carbono 1020l e aço carbono 1010l**. 23º CBECiMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 04 a 08 de Novembro de 2018, Foz do Iguaçu, PR, Brasil.

SARAIVA, A. L.; SILVA, J. C. A (Re)Organização do Espaço na Vila de Nazaré: A Criação do Bairro de São Sebastião. **Revista de educação, cultura e meio ambiente**, mai. n. 22, v. IV, 2001.

SERRA, N. E. M. Compreendendo a Lógica do Trabalho em Populações Tradicionais Ribeirinhas. **Revista de educação, cultura e meio ambiente**, mai. n. 22, v. IV, 2001.

SHESKIN, D. **Handbook of Parametric and Nonparametric Statistical Procedures**. 2 ed. ISBN 1-58488-133-X. Ed. Chapman & Hall/CRC. Boca Raton, Florida, D.C., 2000.

SILVA, J. R. S. S.; SOUZA, L. A. D.; CASTRO, L. Z.; FERREIRA, T. A.; CAMPOS, M. S. **Análise da Confiabilidade: um estudo de caso**. In: XXXV Encontro Nacional De Engenharia de Produção Perspectivas Globais para a Engenharia de Produção, 2015, Fortaleza, CE, Anais. Fortaleza: Fábrica de Evento, Hotel Praia Centro. 2015.

SILVA, A. C. M. **Tratamento térmico de têmpera no aço SAE 1040 em diferentes meios de resfriamento**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará, Campus Universitário de Marabá, Instituto de Geociências e Engenharias, Faculdade de Engenharia de Materiais, Curso de Engenharia de Materiais, Marabá, 2016.

SILVA, E. S. **Modelagem e análise da rugosidade superficial do aço 1045 tratado termicamente**. 84 p. (Dissertação). Mestrado em Engenharia Mecânica. Universidade Federal da Paraíba. UFPB. João Pessoa – PB, 2017.

SILVEIRA, C. B. **Confiabilidade e disponibilidade de máquinas: um exemplo prático**. Disponível em: <https://www.citisystems.com.br/confiabilidade-disponibilidade-maquinas/>. Acesso em: 21 fev. 2019.

SIMÊNCIO, E. C. A. **Materiais de Construção Mecânica**. Ed. Educacional, Londrina – PR, 2017.

SLACK, N.; CHAMBERS, S.; HARLAND, C.; HARRISON, A.; JOHNSTON, R. **Administração da Produção**. Edição Compacta. Ed. Atlas. São Paulo, 1999.

SCHLATTER, D. **Efeito da têmpera e revenido nas propriedades mecânicas e microestruturais de aços rápidos obtidos por processos convencionais e metalurgia do pó**. 137 p. (Dissertação). Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais. Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Florianópolis – SC, 2012.

SOUZA, A. A. **Ensaio Mecânicos de Materiais Metálicos, Fundamentos Teóricos e Práticos**. São Paulo – SP, 5ª ed. Edgar Bluncher – 1982.

SOUZA, R. N. O. **Deteção de falha aplicada na atualização de probabilidade de falha**. 61 p. Dissertação. Mestrado em Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Minas Gerais. 2013.

SOUZA, T. L. F. **Análise comparativa da resistência à fratura dos aços SAE 1020 e SAE 4140**. 74 p. (Monografia) Bacharelado em Engenharia Mecânica. Pontifícia Universidade Católica. Rio de Janeiro – RJ, 2017.

SUSKI, C. A.; OLIVEIRA, C. A. S. Análise de precipitados por microscopia eletrônica de varredura e de transmissão em um aço ao boro. **Tecnol. Metal. Mater. Miner.**, São Paulo, v. 10, n. 4, p. 336-345, out./dez. 2013.

TECÉM. **Tipos de aço e sua classificação segundo SAE / AISI**. 2013.

TEIXEIRA, J. V. U. **Estudo do comportamento de eixos de rabeta produzidos em aço SAE 1045 sob fadiga**. (Monografia). Trabalho de Conclusão de Curso. Instituto Federal do Pará. Belém – PA, 2017.

TIGRINHO, L. M. V.; FILHO, R. A. C.; Marcondes, P. V. P. **Análise da fratura do aço avançado de alta resistência variando os estados de tensão e deformação através do ensaio de estampagem**. 7º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação. – Penedo, Itatiaia – RJ – Brasil, 2013.

VALE, A. R. M. **Tratamento Térmico**. Belém: IFPA; Santa Maria: UFSM, 2011. 130 p. Disponível em: https://www.ufsm.br/unidades-universitarias/ctism/cte/wp-content/uploads/sites/413/2018/12/09_tratamento_termico.pdf. Acesso em: 31 mar. 2019.

VAN VLACK, L. H. **Princípios e Ciências dos Materiais**. 13ª reimpressão. Editora Blucher. São Paulo - SP, 2000.

VAN VLACK, L. H. **Princípios e Ciências dos Materiais**. 20ª reimpressão. Editora Blucher. São Paulo - SP, 2014.

WERNER, L. **Modelagem dos Tempos de Falhas ao Longo do Calendário**. 107 p. (Dissertação). Mestrado em Engenharia de Produção. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre – RS, 1996.

ZILIO, J. L. **Avaliação da Resistência à Corrosão – Fadiga no Aço API 5L X60 em Meio Aquoso Salino**. (Dissertação). 83 p. Programa de Pós-Graduação de Engenharia de Minas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2013.