

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PPGEMec - PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

FÁBIO TOMMASINI DE CARVALHO JÚNIOR

ESTUDO DA LEITURA DO SINAL DE RUNOUT UTILIZANDO SENSORES DO
TIPO EDDY CURRENT EM EIXOS DE AÇO REVESTIDOS PELO PROCESSO DE
LASER CLADDING

SÃO CARLOS
2023

FÁBIO TOMMASINI DE CARVALHO JÚNIOR

ESTUDO DA LEITURA DO SINAL DE RUNOUT UTILIZANDO SENSORES DO
TIPO EDDY CURRENT EM EIXOS DE AÇO REVESTIDOS PELO PROCESSO DE
LASER CLADDING

Dissertação apresentada à Universidade Federal de São
Carlos para obtenção do título de Mestre em Engenharia
Mecânica.

Linha de pesquisa: Engenharia de superfícies.

Orientador: Prof. Dr. Vitor Ramos Franco.

Co-orientador: Prof. Dr. Fabricio Tadeu Paziani

SÃO CARLOS
2023



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Folha de Aprovação

Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Fábio Tommasini de Carvalho Júnior, realizada em 01/02/2023.

Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Vitor Ramos Franco (UFSCar)

Prof. Dr. Armando Ítalo Sette Antonialli (UFSCar)

Prof. Dr. Gregory Bregion Daniel (UNICAMP)

O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho aos meus pais e irmãs por todo o amor e suporte durante minha jornada.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES).

Aos meus pais, que dedicaram suas vidas à educação dos filhos, lhes sou eternamente grato pelo amor e incentivo durante toda a minha trajetória.

Ao Professor Doutor Vitor Ramos Franco, pelo companheirismo nos momentos que passamos juntos desde os tempos de minha graduação, e pelo acompanhamento e orientações essenciais para a conclusão desta dissertação.

Ao Professor Doutor Fabrício Tadeu Paziani, pelo tempo dedicado em analisar e contribuir com o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço aos membros das bancas de qualificação e defesa, Profs. Drs. Armando Ítalo Sette Antonialli, Gustavo Franco Barbosa e Gregory Bregion Daniel, pela disposição de análise e enriquecimento do texto.

Ao Sr. Welson Donizetti Guiotti, profissional de referência na indústria de redutores e multiplicadores de velocidade, agradeço por todo o conhecimento compartilhado e suporte primordiais que possibilitaram a execução e conclusão desse trabalho.

Ao Sr. Walter Biagi Becker, principal provedor de todos os recursos necessários para realização das etapas experimentais desse trabalho, e pela oportunidade de desenvolver esse estudo em parceria com a Zanini Renk.

Aos colegas Luiz Fellipe Nogueirão, Frank Simon Rocha e Marco Gabriel Lorenzoni, agradeço pela amizade e pelas ricas contribuições ao desenvolvimento dessa dissertação.

Aos profissionais da Zanini Renk, Srs. Thiago D'Oliveira, Joaquim Carlos Neto, Luander Mafra, Pedro Martesi e Alex Santos, pelas horas dedicadas na execução e análises experimentais realizadas nesse estudo.

Por fim, à UFSCar e à Zanini Renk, as duas principais instituições que são a base de minha formação profissional.

*“Tal qual o ferro oxida com a falta de uso,
também a inatividade destrói o intelecto.”*

Leonardo Da Vinci

RESUMO

O monitoramento contínuo de vibrações em máquinas rotativas é uma prática comum na área de engenharia de automação e manutenção preditiva. Particularmente em redutores e multiplicadores de velocidade, o deslocamento radial e axial dos eixos rotativos é medido por sistemas de monitoramento contínuo para análise de vibração com sensores do tipo *eddy current* (EC) para análise de deslocamento relativo. Por se tratar de um sensor de proximidade, as condições superficiais e propriedades metalúrgicas do mensurado influenciam diretamente no sinal coletado. Para maior confiabilidade, os desvios geométricos das pistas onde são feitas essas medições nos eixos precisam ser conhecidos. Para isso, o ensaio de *runout* é uma etapa crucial no processo de fabricação para avaliar a integridade dessas regiões. O ensaio realizado com sensor EC traz como resultado um valor denominado *runout* total (TIR). Esse sinal é uma composição dos desvios geométricos da superfície (*runout* mecânico) e de um ruído nessa leitura conhecido como *runout* elétrico (ERO) que surge devido às variações nas propriedades do material da peça, e essa perturbação no sinal é captada como sendo uma alteração na distância do sensor até o objeto medido. Esse ensaio é praticado na indústria em grande parte para eixos rotativos fabricados em aço carbono forjado. Em decorrência dos mais diversos desvios ocorridos durante a fabricação, existem situações em que é possível realizar uma adição de material para recuperação dimensional. Uma opção que vem ganhando força nos últimos anos é a tecnologia de deposição de material pelo processo de *laser cladding* (LC). No entanto, pouco se sabe sobre como as propriedades metalúrgicas e eletromagnéticas dessas camadas de revestimento metálico aplicadas sobre os eixos influenciam na leitura de proximidade de um sensor EC. Esse trabalho estuda a resposta captada por esses sensores durante os ensaios de TIR em dois eixos rotativos fabricados em aço 18CrNiMo7-6 e 42CrMo4, cada um deles revestidos com duas ligas de pó metálico - HGMET e X-402 - depositadas por LC. Considerando os defeitos superficiais e subsuperficiais encontrados nesse tipo de revestimento e as alterações provocadas na microestrutura do substrato, concluiu-se que, nas condições pré-estabelecidas e mediante os resultados apresentados, o sinal ERO se comporta de maneira desordenada e apresenta valores de 150 até 400% acima dos valores registrados no material do substrato sem revestimento. Em termos práticos para a indústria, considerando também os custos do processo para recuperação de eixos, o estudo não recomenda a utilização dessa solução nas pistas de leitura de vibração e em suas proximidades.

Palavras-chave: Laser Cladding. 18CrNiMo7-6. 42CrMo4. Runout Total (TIR). Runout Elétrico (ERO). Sensor Eddy Current.

ABSTRACT

A STUDY USING EDDY CURRENT PROBES FOR THE TOTAL INDICATED RUNOUT READING OVER LASER CLADDED STEEL SHAFT SURFACES

The continuous vibration monitoring in rotary machines is a common practice at the automation engineering and predictive maintenance fields. Specially for gearboxes speed increasers and reducers, the radial and axial vibration of the rotary shafts is measured by vibration system analysis sets that use eddy current (EC) sensors for data collecting of relative displacement. When using proximity sensors, the surface conditions of the measured part directly influence the collected signal. In order to increase the reliability of the measurement, geometrical deviations in the runout track must be known. Therefore, the runout test is a crucial step in rotary sets manufacturing processes to ensure the integrity of these regions. The output results with EC sensors test is the Total Indicated Runout (TIR), which is a composition of geometric deviations of the surface (mechanical runout) and a noise in the collected signal known as electrical runout (ERO) that arises due to oscillations in the electrical and metallurgical properties of the target material, and this disturbances in signal are captured as variations in the distance between sensor and object. This test is widely practiced in industry for shafts manufactured from forged steel parts. Due to most diverse manufacturing deviations of these shafts, there are situations in which it is possible to carry out a process of adding material for dimensional recovery by additive manufacturing (AM). One option is the material deposition technology through laser cladding process (LC). However, not much is known about how material properties of these coated layers applied over shafts influence the reading of EC sensors. This work explores the readings captured by an EC sensor during TIR tests on two rotating shafts made of steel alloys 18CrNiMo7-6 and 42CrMo4, each one of them coated with two metallic powder alloys - HGMET and X-402 - deposited by LC process. Considering the defects of the clads inherent to the coating process and the alterations caused in the microstructure of the substrate, it was concluded under the pre-established conditions and through the presented results that the ERO signal behaves randomly and presents values from 150 up to 400% above the values recorded on the uncoated substrate material. In practical terms for the industry, also considering the costs of the process for recovering shaft collars, the study does not recommend the use of this solution neither over vibration reading tracks nor their surroundings.

Keywords: Laser Cladding. 18CrNiMo7-6. 42CrMo4. Total Indicated Runout (TIR). Electrical Runout (ERO). Eddy Current Sensor.

Lista de Figuras

| | | |
|------|---|----|
| 1.1 | Preparação de um multiplicador de velocidades na bancada de testes da Zanini Renk. | 19 |
| 2.1 | Gráficos do movimento vibratório em resposta a um estímulo: (a) determinístico e (b) aleatório. | 25 |
| 2.2 | Posição dos sensores de proximidade para medição de vibração relativa . . | 26 |
| 2.3 | <i>Runout</i> Mecânico e Elétrico | 28 |
| 2.4 | Ensaio de <i>Runout</i> realizado em um rotor de uma turbina a vapor. | 29 |
| 2.5 | Posições do sensor para medição de <i>runout</i> no eixo | 31 |
| 2.6 | Linhas de campos magnéticos gerados por uma bobina percorrida por corrente elétrica. | 32 |
| 2.7 | Ciclo de Histerese de um material Ferromagnético. | 35 |
| 2.8 | Domínios magnéticos observados em amostras magnéticas homogêneas. . . | 36 |
| 2.9 | Representação esquemática do interior de um sensor indutivo do tipo EC . | 40 |
| 2.10 | Representação da área do campo magnético que atinge o objeto | 42 |
| 2.11 | Manufatura aditiva utilizando o processo de <i>laser cladding</i> | 43 |
| 2.12 | Peça de aço liga 18CrNiMo7-6 revestida pelo processo LC. | 44 |
| 2.13 | Bocais de deposição por a) alimentação coaxial e b) alimentação lateral . . | 45 |
| 2.14 | Bicos injetores de pó metálico para o processo de revestimento por LC. . . | 46 |
| 2.15 | Vista esquemática da seção transversal de um cordão depositado por LC. . | 48 |
| 2.16 | Influência do aumento da potência do laser nas taxas de diluição. | 48 |
| 2.17 | (a) Definição dos parâmetros <i>offset</i> e <i>overlap</i> . (b) Vista em corte do revestimento mostrando os defeitos de ligação. | 49 |
| 2.18 | Imagem obtida com MEV da morfologia dos grãos atomizados fabricados pelos processos a) GA, e por b) PREP. Qualidade dos revestimentos feitos com pós fabricados por c) GA, e por b) PREP. | 51 |
| 2.19 | Variação no modo de solidificação através da zona fundida. | 52 |
| 2.20 | Microestrutura da região do laser. | 52 |
| 2.21 | Perfil de Microdureza ao longo do perfil de uma amostra de revestimento Fe-Al em aço mole. | 53 |
| 2.22 | Efeitos da introdução do oxigênio na poça de fusão. | 55 |

| | | |
|------|---|----|
| 2.23 | Formação de óxidos na superfície de amostras revestidas por LC com revestimentos de: a) liga com 3,0 % de alumínio; e b) liga com 0,6 % de alumínio em sua composição. | 55 |
| 2.24 | Formação de poros alongados e rachaduras por falta de fusão. | 56 |
| 2.25 | Formação de poros no interior de revestimentos aplicados por LC. | 57 |
| 2.26 | Formação de trincas no na superfície e no interior de revestimentos aplicados por LC. | 58 |
| 2.27 | Indicação do sinal de retorno em diferentes superfícies a) Peça com 2 defeitos; b) Peça com 2 defeitos, porém o maior impedindo a detecção do menor; c) peça com 1 defeito porém com superfície de fundo irregular; e d) anisotropia no material impedindo a passagem do sinal. | 59 |
| 2.28 | Classificação teórica das zonas do campo sônico: | 60 |
| 2.29 | Etapas para realização do ensaio com líquido penetrante. | 62 |
| 3.1 | Fluxograma de fabricação dos eixos 1 e 2 para ensaios de <i>runout</i> | 63 |
| 3.2 | Fluxograma de fabricação das amostras 1 e 2 para análise metalográfica. | 64 |
| 3.3 | Eixos e Amostras desbastados no perfil após tratamento térmico. | 68 |
| 3.4 | Desenho de usinagem do Eixo 1 na fase de desbaste no perfil para aplicação do revestimento. | 68 |
| 3.5 | Vista em corte mostrando a profundidade estimada dos revestimentos nos eixos. | 69 |
| 3.6 | Vista em corte mostrando a profundidade estimada dos revestimentos nas amostras. | 69 |
| 3.7 | Funil de Escoamento de Hall. | 70 |
| 3.8 | Estrutura da HRC para deposição de pós metálicos pelo processo de Laser Cladding. | 71 |
| 3.9 | Abastecimento do tambor de injeção de pó metálico. | 72 |
| 3.10 | Processo de pré-aquecimento do substrato. | 73 |
| 3.11 | Mapeamento dos canais para processo de deposição das camadas. | 73 |
| 3.12 | Colo do eixo após deposição do revestimento. | 74 |
| 3.13 | Conferência das dimensões do revestimento e limpeza com escova de aço. | 75 |
| 3.14 | Resfriamento das peças em Vermiculita. | 76 |
| 3.15 | Desenho para acabamento do Eixo 1 após aplicação do revestimento nos canais. | 77 |
| 3.16 | Posições das pistas para medição do <i>runout</i> | 78 |
| 3.17 | Preparação para medição de <i>runout</i> mecânico. | 79 |
| 3.18 | Preparação para medição de <i>runout</i> total (TIR). | 80 |
| 3.19 | Componentes do equipamento de medição: (a) Sensor EC TM0180; (b) Cabo transmissor TM0181 e <i>Proximator</i> TR4101; (c) Tacômetro PLT200. | 81 |

| | | |
|------|---|-----|
| 3.20 | Sequência de preparação das amostras para análise de microestrutura. . . . | 82 |
| 3.21 | Preparação das amostras para análise de microestrutura. | 83 |
| 3.22 | Medidor de dureza por microscopia Clemex ST-2000. | 84 |
| | | |
| 4.1 | Inspeção de ultrassom nos Eixos 1 e 2 antes do acabamento em retífica. . . | 88 |
| 4.2 | Resultado do ensaio com líquido penetrante no Eixo 1. | 88 |
| 4.3 | Resultado do ensaio com líquido penetrante no Eixo 2. | 89 |
| 4.4 | Sinais de <i>runout</i> mecânico do Eixo 1. | 90 |
| 4.5 | Sinais de <i>runout</i> mecânico do Eixo 2. | 90 |
| 4.6 | Gráficos de <i>runout</i> mecânico e TIR do Eixo 1, pistas 1, 2, 3 e 4. | 93 |
| 4.7 | Gráficos de <i>runout</i> mecânico e TIR do Eixo 1, pistas 1, 5, 6 e 7. | 94 |
| 4.8 | Gráficos de <i>runout</i> mecânico e <i>runout</i> total do Eixo 2, pistas 1, 2, 3 e 4. . . | 96 |
| 4.9 | Gráficos de <i>runout</i> mecânico e <i>runout</i> total do Eixo 2, pistas 1, 5, 6 e 7. . . | 97 |
| 4.10 | Vista da seção transversal dos corpos de prova com 5x de ampliação. . . . | 98 |
| 4.11 | Detalhamento dimensional das amostras. | 99 |
| 4.12 | Contraste entre grãos devido às suas diferentes refletividades. | 100 |
| 4.13 | Características da microestrutura em: (a) revestimento Stellite 6 obtido com MEV com 5000x de ampliação; e em (b) revestimento X-402 obtido com por MO com 100x de ampliação. | 100 |
| 4.14 | Características da microestrutura do conjunto Eixo 1 / Liga HGMET, nas regiões: (a) interface entre revestimento e substrato; (b) ZTA do substrato; e (c) somente no substrato. | 101 |
| 4.15 | Características da microestrutura do conjunto Eixo 1 / Liga X-402, nas regiões: (a) interface entre revestimento e substrato; (b) ZTA do substrato; e (c) somente no substrato. | 102 |
| 4.16 | Características da microestrutura do conjunto Eixo 2 / Liga HGMET, nas regiões: (a) interface entre revestimento e substrato; (b) ZTA do substrato; e (c) somente no substrato. | 102 |
| 4.17 | Características da microestrutura do conjunto Eixo 2 / Liga X-402, nas regiões: (a) interface entre revestimento e substrato; (b) ZTA do substrato; e (c) somente no substrato. | 103 |
| 4.18 | Microporosidades registradas via MO com 50x de ampliação. | 103 |
| 4.19 | Defeitos de falta de fusão registrados via MO com 5x de ampliação. . . . | 104 |
| 4.20 | Trincas por falta de fusão registradas por análise via MO com 10x de ampliação. | 104 |
| 4.21 | Defeitos de falta de fusão registrados por análise via MO com 5x de ampliação. | 105 |
| 4.22 | Defeitos de falta de fusão registrados por análise via MO com 5x de ampliação. | 105 |
| 4.23 | Perfil de microdureza medida ao longo da seção transversal das amostras. . | 106 |

Lista de Tabelas

| | | |
|-----|---|-----|
| 2.1 | Normas com limites de vibração e <i>runout</i> total (TIR) | 27 |
| 2.2 | Espessuras mínimas de cada material do objeto para medições com sensores EC operando à frequência de 1,0 MHz | 41 |
| 3.1 | Composição química do aço liga DIN 18CrNiMo7-6. | 65 |
| 3.2 | Composição química do aço liga DIN 42CrMo4. | 65 |
| 3.3 | Parâmetros utilizados no ciclo de tratamento térmico das peças. | 67 |
| 3.4 | Composição química das ligas de pó metálico utilizadas no experimento . . | 69 |
| 3.5 | Propriedades físicas das ligas de pó metálico | 70 |
| 3.6 | Parâmetros do processo de deposição por LC. | 74 |
| 3.7 | Especificações técnicas de instrumentação ProvibTech. | 80 |
| 4.1 | Espessura das camadas de revestimento após acabamento dos eixos. | 87 |
| 4.2 | Rugosidades superficiais - Eixos 1 e 2. | 87 |
| 4.3 | Valores coletados no ensaio de <i>runout</i> mecânico - Eixos 1 e 2. | 89 |
| 4.4 | Valores de <i>runout</i> mecânico e <i>runout</i> total - Eixo 1 | 92 |
| 4.5 | Valores de <i>runout</i> mecânico e <i>runout</i> total - Eixo 2 | 95 |
| 4.6 | Durezas superficiais - Eixos 1 e 2. | 106 |

Lista de Símbolos

Siglas e Abreviações

| | |
|-------------|---|
| <i>AISI</i> | American Iron and Steel Association |
| <i>CAD</i> | Computer-aided Design |
| <i>CAM</i> | Computer-aided Manufacturing |
| <i>DED</i> | Directed Energy Deposition |
| <i>ERO</i> | Electrical Runout |
| <i>GA</i> | Atomização a gás |
| <i>LC</i> | Laser Cladding |
| <i>lmv</i> | Logical volume manager |
| <i>LVDT</i> | Linear Variable Differential Transformers |
| <i>MA</i> | Manufatura Aditiva |
| <i>MEV</i> | Microscópio eletrônico de varredura |
| <i>MO</i> | Microscopia Ótica |
| <i>PBF</i> | Power Bed Fusion |
| <i>PREP</i> | Plasma rotating electrode process |
| <i>SAE</i> | Society of Automotive Engineers International |
| <i>TIR</i> | Total Indicated Runout |
| <i>ZTA</i> | Zona termicamente afetada |

Letras Gregas

| | |
|--------------|--|
| α | Inclinação do cabeçote com relação ao eixo z |
| χ | Suscetibilidade |
| ϵ_0 | Constante dielétrica |

| | |
|------------|---|
| λ' | Dimensão do menor defeito detectável no ensaio de Ultrassom |
| λ | Comprimento de onda sonora |
| μ | Permeabilidade |
| μ_0 | Permeabilidade no vácuo |
| ω | Rendimento |
| Φ_B | Fluxo magnético |
| ϕ_L | Diâmetro da mancha focal do feixe de laser |
| ρ | Resistividade |
| θ_B | Ângulo entre as direções ds e r_B |

Símbolos

| | |
|------------|--|
| ΔV | Diferença de potencial |
| A | Altura do cordão acima do substrato |
| A_c | Área do cordão acima do substrato |
| A_e | Área da bobina |
| A_L | Área do feixe de laser |
| A_p | Área das placas de um capacitor |
| A_T | Aporte térmico do laser |
| A_{mix} | Área da porção diluída no substrato |
| B | Campo magnético interno |
| C | Capacitância |
| c | Velocidade do som |
| d | Distância entre sensor e peça no ensaio de <i>runout</i> total |
| d_B | Distância entre o cabeçote e a peça no processo LC |
| d_C | Distância entre as placas de um capacitor |
| D_L | Taxa de diluição |
| ds | Incremento de comprimento do fio da bobina |
| f_s | Frequência da onda sonora |
| H | Campo magnético externo |
| h | Altura total do cordão do revestimento |

| | |
|-----------|---|
| H_C | Coercividade |
| h_{mix} | Altura da porção diluída do substrato |
| i | Corrente elétrica |
| k | Constante dielétrica |
| L | Indutância |
| L_A | Largura do canal preenchido |
| L_c | Largura do cordão do revestimento |
| M | Magnetização do material |
| M_R | Remanência |
| M_s | Magnetização de saturação |
| N_e | Número de espiras |
| n_p | Número de passes (ou cordões) |
| O_v | Overlap |
| P_d | Momento dipolar magnético |
| P_L | Potência do laser |
| Q | Taxa de deposição no processo DED |
| q | Carga elétrica |
| T_B | Torque na bobina |
| v | Velocidade de avanço do cabeçote no processo DED |
| z | Distância entre o centro da espira e um ponto no objeto |

Sumário

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Introdução | 18 |
| 1.1 | Objetivos | 21 |
| 1.2 | Organização do Trabalho | 22 |
| 2 | Fundamentação Teórica | 23 |
| 2.1 | Monitoramento de vibrações em eixos de máquinas rotativas | 23 |
| 2.2 | Ensaio de <i>Runout</i> | 27 |
| 2.3 | Conceitos de eletromagnetismo | 32 |
| 2.3.1 | Histerese e Domínios Magnéticos | 34 |
| 2.3.2 | Capacitância | 36 |
| 2.3.3 | Indutância | 37 |
| 2.4 | Sensores Eletromagnéticos | 38 |
| 2.4.1 | Sensores Capacitivos | 39 |
| 2.4.2 | Sensores Indutivos | 39 |
| 2.5 | <i>Laser Cladding</i> | 43 |
| 2.5.1 | Parâmetros do processo DED-LC | 46 |
| 2.5.2 | Morfologia e estrutura dos revestimentos | 50 |
| 2.5.3 | Principais tipos de defeitos | 54 |
| 2.6 | Ensaio não destrutivo | 58 |
| 2.6.1 | Ultrassom | 58 |
| 2.6.2 | Líquido Penetrante | 61 |
| 3 | Materiais e Métodos | 63 |
| 3.1 | Identificação da Demanda | 64 |
| 3.2 | Fabricação dos Corpos de Prova | 64 |
| 3.2.1 | Operações de pré-usinagem dos eixos (Substratos) | 65 |
| 3.2.2 | Escolha das ligas de revestimento | 68 |
| 3.2.3 | Processo de deposição do pó metálico (<i>Laser Cladding</i>) | 71 |
| 3.2.4 | Processo de Usinagem - Acabamento | 77 |
| 3.3 | Procedimento de Ensaio | 78 |
| 3.4 | Análise metalográfica | 82 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 4 | Resultados | 86 |
| 4.1 | Inspeções dimensionais | 86 |
| 4.2 | Ensaaios não destrutivos | 86 |
| 4.3 | <i>Runout</i> Mecânico | 89 |
| 4.4 | <i>Runout</i> Total (TIR) | 91 |
| 4.4.1 | Eixo 1 (18CrNiMo7-6) | 92 |
| 4.4.2 | Eixo 2 (42CrMo4) | 93 |
| 4.5 | Análise de metalografia e dureza das amostras | 98 |
| 4.5.1 | Macroestrutura | 99 |
| 4.5.2 | Microestrutura | 99 |
| 4.5.3 | Defeitos | 103 |
| 4.5.4 | Dureza | 105 |
| 5 | Considerações Finais e Conclusão | 108 |
| 5.1 | Sugestões para trabalhos futuros | 110 |
| | Referências | 111 |

Capítulo 1

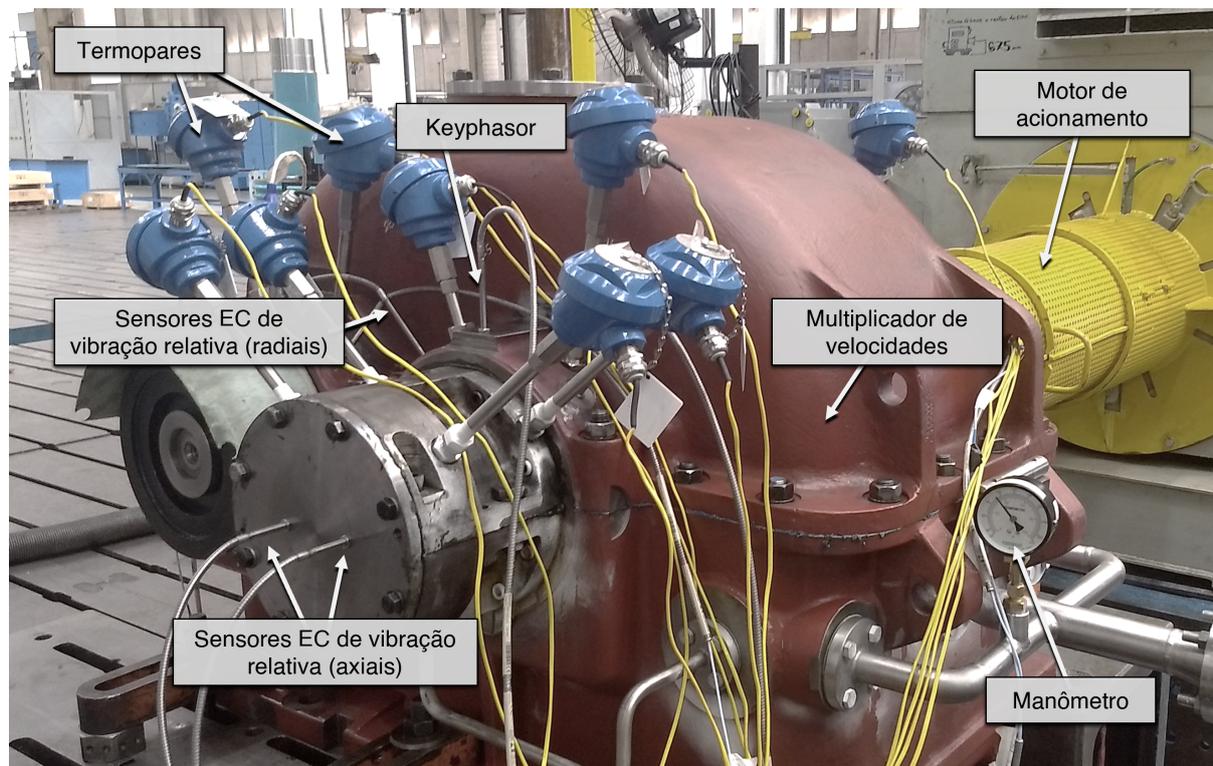
Introdução

Análise de vibração é um dos principais parâmetros do monitoramento de máquinas rotativas (redutores ou multiplicadores de velocidade, rotores, bombas e turbinas a vapor). Basicamente o que se avalia é a vibração global – usualmente monitorada com o uso de acelerômetros –, e a vibração relativa, que na grande maioria dos casos são avaliadas por sensores de proximidade do tipo *Eddy Current* (EC) posicionados nas direções radiais e axiais de eixos rotativos, com o intuito de identificar variações de posição e traduzi-las em sinais de vibração. No entanto, os sinais captados por esses sensores sofrem interferências decorrentes de desvios geométricos nas peças rotativas – como erros de concentricidade e circularidade, classificados como *runout* mecânico – e de erros de medição provocados por interferências geradas na leitura do sensor pelas propriedades eletromagnéticas do material, classificados como *runout* elétrico (*Electrical Runout - ERO*). Essas interferências causadas na impedância dos sensores EC são geradas por diferentes fatores como suscetibilidade e permeabilidade magnética, e que segundo Adewale e Tian (2012) podem ser analisadas separadamente. Segundo Yu et al. (2013), essas propriedades são introduzidas no material durante os processos de fabricação da peça, como processos de usinagem e tratamento térmico.

A importância da leitura do sinal de *runout* total (ou como define Littrell (2005), *Total Indicated Runout - TIR*) – nomenclatura que designa o sinal formado pela composição dos sinais de *runout* mecânico e elétrico – está relacionada diretamente com a manutenção preditiva das máquinas. O monitoramento de vibrações de eixos de máquinas rotativas é uma prática comum para aumentar a confiabilidade do funcionamento desses equipamentos. Em redutores e multiplicadores de altas velocidades (máquinas do tipo turbo, com rotações de acionamento que podem variar de 1.800 a 15.000 rpm), onde os eixos giram sobre mancais de deslizamento com um filme de óleo entre eles, comumente utiliza-se o método de medição de vibração relativa, ou seja, a variação da posição da linha de centro de um eixo rotativo com relação à superfície do mancal de deslizamento no qual está apoiado.

A medição de vibração relativa consiste no posicionamento do sensor de proximidade em uma base que seja estática em relação ao objeto a ser mensurado. No caso dessa medição

Figura 1.1: Preparação de um multiplicador de velocidades na bancada de testes da Zanini Renk.



Fonte: Próprio autor.

em caixas de engrenagem redutoras ou multiplicadoras de velocidade, essa base é composta pela carcaça que sustenta todo o conjunto (eixos, mancais e sensores). Para equipamentos fabricados seguindo as diretrizes da norma API-613 (2021), essas medições de vibração são feitas no teste de funcionamento do equipamento sem carga e à plena velocidade de trabalho. Na Figura 1.1 é mostrada a preparação de um desses testes na fábrica da Zanini Renk, localizada em Cravinhos-SP. Na imagem, é possível observar a complexa montagem dos sensores de monitoramento como termopares, manômetros e sensores do tipo EC para medição de vibração relativa radial e axial.

Como observa DeBlock, Wood e McDonnell (2007), o sinal de TIR registra vetorialmente a variação de posição do eixo em baixa rotação. Esse perfil é uma característica específica de cada eixo, e interfere na interpretação do sinal de vibração captado por sensores indutivos - sinal também projetado no campo vetorial. Como os sensores não fazem a separação entre vetores de vibração e vetores de sinais de outras fontes, o sinal captado acaba por não refletir com precisão o real comportamento de vibração em um eixo rotativo. Se em determinada posição o vetor de *runout* estiver na mesma direção e sentido do vetor de vibração, os sinais se somam, mostrando um sinal maior do que o real, podendo desarmar o equipamento desnecessariamente (mesmo estando com valores reais de vibração dentro dos limites aceitáveis). Por outro lado, se o vetor do sinal de *runout* estiver na mesma direção porém em sentido oposto ao vetor de vibração, o vetor resultante será menor

do que o sinal real de vibração. Essa situação pode ser ainda mais crítica, pois esconde um possível defeito da máquina que pode estar gerando níveis elevados de vibração, mas que não estão sendo devidamente captados pelos sensores. Apesar disso, como descrito por Littrell (2005), a norma API-670 (2014) proíbe o uso dessa técnica de compensação vetorial em sistemas de monitoramento contínuo, pois o sinal gerado pelo *runout* elétrico pode mudar ao longo do tempo. A técnica de subtrair o sinal de *runout* do sinal de vibração somente deve ser usada isoladamente em análises diagnósticas.

Sabendo desse problema, a indústria constantemente procura aprimorar os processos de fabricação de peças rotativas para diminuir desvios geométricos superficiais, além de buscar soluções para eliminar ou amenizar os efeitos provocados pelas características dos materiais e que resultam em interferências na leitura do sinal.

Mediante os desafios que surgem durante as etapas de fabricação de peças rotativas, principalmente em produções específicas como ocorre na Zanini Renk, onde os projetos são feitos sob medida para cada cliente ou aplicação – realidade muito diferente à de uma fábrica de produção de peças seriadas – não é incomum a situação em que um eixo rotativo apresenta problemas dimensionais, seja por problemas de operação, escolha errada de parâmetros de corte, quebra de ferramenta durante a usinagem, deformações após tratamento térmico, dentre outros desvios.

Para alguns desses casos, uma das soluções que começou a ganhar notoriedade é a aplicação de um revestimento ao redor desses eixos através da adição de pós ou fios compostos das mais variadas ligas metálicas, dentre elas a deposição pelo método *Laser Cladding* (LC). Essa solução ganhou força nos últimos anos devido aos benefícios econômicos, permitindo que se reaproveitem peças de grande porte e grande valor agregado através do recobrimento de regiões de trabalho, como por exemplo colos de rolamentos em eixos rotativos. Torims (2013) relata em seu artigo as vantagens da recuperação de colos de eixos virabrequins em motores a diesel, pontuando as numerosas vantagens do processo LC na recuperação dessas peças como velocidade do processo e possibilidade de obter geometrias complexas com poucos processos de usinagem. Embora a solução para o problema dimensional seja simples, grande parte desses eixos apresentam outras características com as quais esses revestimentos devem corresponder sem prejudicar o desempenho do equipamento. Algumas regiões são mais críticas do que outras, e podem exigir propriedades diferentes desses revestimentos dependendo da aplicação. Em um mesmo eixo de um redutor, por exemplo, é possível identificar quatro regiões: colos para montagem de engrenagens ou acoplamentos de transmissão de torque; colos de vedação para evitar contaminação ou vazamento de óleos lubrificantes; colos de apoio de rolamentos ou mancais de deslizamento; e colos que servem como pistas de medição de vibração, onde se faz necessário um ensaio de *runout* ainda nas etapas de fabricação.

Mesmo com a vasta gama de tamanhos disponíveis de redutores, um objetivo comum entre os diferentes projetos dessas máquinas é realizar, ocupando pouco espaço,

a interligação entre um motor elétrico e uma máquina que precisa ser acionada com um torque elevado. Por esse motivo, os eixos dessas caixas de engrenagens possuem comprimentos limitados, com o intuito também de limitar os efeitos de deflexão. Nessas configurações, as diferentes regiões do eixo estão muito próximas umas das outras, e a aplicação de revestimentos metálicos pode interferir negativamente no funcionamento desses equipamentos caso não sejam selecionados de maneira adequada.

Uma região do eixo onde é montada uma engrenagem por interferência, por exemplo, exige propriedades específicas para um revestimento, como boa resistência a esforços compressivos e torcionais, conseqüentemente exigindo uma alta resistência na interface de ligação entre a camada revestida e o substrato. Já uma região de vedação, além de resistir aos esforços torcionais e de deflexão do eixo, precisam também apresentar boa resistência ao desgaste, pois trabalham em constante regime de atrito dinâmico com anéis retentores. As regiões de apoio nos mancais também exigem boa resistência aos esforços torcionais, mas são menos solicitadas quanto a esforços compressivos ou aos efeitos de desgaste.

De todas as regiões do eixo, as únicas superfícies a serem avaliadas por sensores eletromagnéticos são as pistas de medição de vibração. O intuito deste estudo é avaliar se essas pistas ou faixas de *runout* podem ser recuperadas dimensionalmente pelo processo LC analisando a resposta dos ensaios de TIR realizados sobre esses revestimentos.

1.1 Objetivos

O ensaio de *runout* apesar de ser uma prática comum no mercado, possui poucas definições a respeito de seus critérios de aceitação, e também sobre como obter uma superfície que apresente variações geométricas dentro dos limites preestabelecidos. Caso uma inspeção mostre que os valores estipulados não foram atingidos, também não há clareza sobre possíveis práticas de fabricação que promovam a diminuição do sinal de *runout*, uma vez que a redução somente da componente mecânica não é suficiente. O método mais utilizado para redução do sinal do TIR é a busca por melhorar as condições geométricas superficiais da peça, devido a dificuldade em alterar as propriedades eletromagnéticas do material de maneira controlada objetivando a diminuição do sinal ERO.

Além disso, a Zanini Renk vem colocando em prática em seu histórico recente a recuperação de colos de eixos pelo método LC, porém com limitações e receios frente ao desconhecimento das possibilidades que esse método pode oferecer. Atualmente, as recuperações se limitam a colos de vedação e colos de rolamento, regiões sem transmissão de torque por interferência. Regiões solicitadas como colos de engrenagens, ou regiões onde são feitas leituras de vibração ainda não são recuperadas por deposição de recobrimentos. O objetivo deste estudo é analisar experimentalmente as conseqüências decorrentes da recuperação de eixos nessas regiões de leitura de sensores por deposição por LC de ligas de pós metálicos, avaliando alterações no sinal de TIR coletado por sensores do tipo EC.

1.2 Organização do Trabalho

Para embasamento do estudo, no capítulo 2 são apresentados os principais conceitos para entendimento dos fenômenos físicos e metalúrgicos que a fase experimental abrange, desde conceitos das inspeções de *runout* mecânico e total, passando por teorias de vibração, conceitos de eletromagnetismo, princípios de funcionamento de sensores de proximidade e teoria sobre processos de manufatura aditiva com tecnologia laser.

No capítulo 3, são definidos os materiais e processos de fabricação das amostras - usinagem, tratamento térmico, ensaios não destrutivos, revestimento por *laser cladding* e etapas de acabamento. Em seguida, são definidos também os instrumentos de medição utilizados para o monitoramento de cada parâmetro relevante na avaliação final dos resultados, além de todos os equipamentos que ajudaram no enriquecimento da análise. São definidas também as etapas de preparação e execução do procedimento experimental.

A análise dos resultados no capítulo 4 possibilita a comparação dos dados coletados em cada etapa do experimento, mostrando os resultados dos ensaios de TIR, parâmetros do processo LC, defeitos encontrados nos revestimentos, análise de macro e microestrutura e perfil de dureza das amostras.

Por último, o capítulo 5 pontua os principais resultados e apresenta conclusões embasadas na fundamentação teórica. Também são propostas algumas sugestões de melhorias ao procedimento experimental e outras possibilidades como inspiração e motivação para trabalhos futuros abordando esse tema.

Capítulo 2

Fundamentação Teórica

Neste capítulo, é apresentada a teoria estudada para melhor entendimento dos conceitos que compõem a fase experimental do trabalho. Iniciando pelo monitoramento de vibrações, prática vastamente utilizada como método de manutenção preditiva em máquinas rotativas, cujos resultados são afetados diretamente pelas alterações geométricas e eletromagnéticas da peça. Em seguida, foram abordados os princípios do ensaio de *runout* praticado na indústria, mais especificamente na seara da fabricação de caixas de engrenagem do tipo turbo (redutores e multiplicadores de altas velocidades). Depois, foram identificados os princípios metalográficos e eletromagnéticos por trás dos fenômenos físicos observados nos ensaios, e que regem o comportamento de cada componente utilizado. Foram então analisados os diferentes tipos de sensores para cada aplicação, e escolhendo o mais adequado ao experimento. Em seguida é apresentada uma introdução ao universo da aplicação de revestimentos pelo processo de *laser cladding*, em que objetivou-se integrar as propriedades do produto final com os conceitos apresentados previamente. Por fim, são descritos alguns métodos de avaliação não destrutiva para detecção de defeitos e descontinuidades nos revestimentos que possam porventura interferir na leitura do sensor.

2.1 Monitoramento de vibrações em eixos de máquinas rotativas

O interesse no estudo das vibrações surgiu desde a invenção dos instrumentos musicais. Por volta do ano de 4.000 a.C., os povos orientais começaram a aprimorar a fabricação desses instrumentos, que exigia certo conhecimento para projetar e construir estruturas e caixas acústicas que emitissem e amplificassem diferentes sons. A harpa é provavelmente um dos primeiros instrumentos criados pelo homem, inspirada provavelmente nos arcos de caça, na época em que essa atividade era essencial para o ser humano. Segundo Rao e Yap (1995), à medida que os instrumentos começaram a ser fabricados em maior escala, demandando um processo mais organizado e projetos padronizados, mais estudos

começaram a ser desenvolvidos. O filósofo e matemático Pitágoras (582 – 507 a.C) é considerado um dos pioneiros a estudar os princípios de funcionamento dos instrumentos musicais sob uma abordagem científica, realizando experimentos ao provocar estímulos em cordas de diferentes comprimentos e comparando seu comportamento. A relação dessas excitações com as frequências naturais de vibração dos elementos, no entanto, surgiu séculos depois.

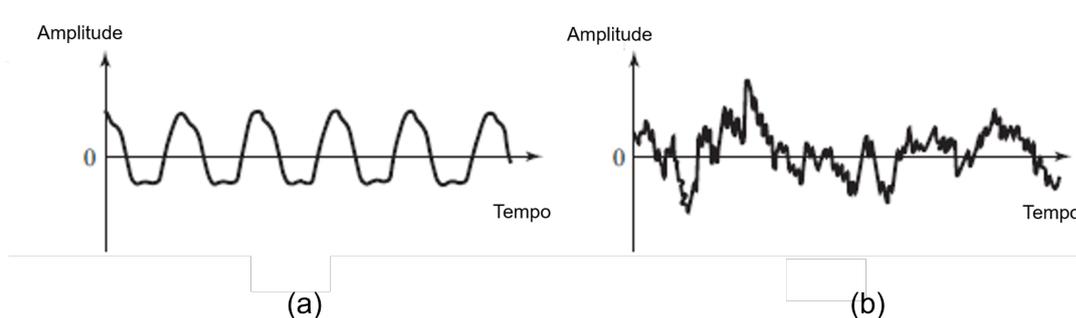
Mais tarde, em 132 d.C., na China, foi inventado o primeiro sismógrafo, instrumento utilizado para mensurar a intensidade de abalos sísmicos, fenômeno frequente nessa região naquela época. Já no século XVII, Galileu Galilei (1564 – 1642), considerado o fundador dos experimentos científicos da era moderna, iniciou os estudos de frequência analisando os movimentos oscilatórios de um pêndulo. Suas descobertas motivaram outros grandes cientistas — como Isaac Newton (1642 – 1727) e Brook Taylor (1685 – 1731) — a explorarem os conceitos agrupados no então novo segmento da física classificado como acústica. Desde então, esse fenômeno se mostrou presente em aplicações cotidianas da sociedade, como estruturas civis e mecanismos projetados para facilitar o trabalho do homem. Com o surgimento das máquinas-ferramenta na primeira Revolução Industrial, passou a ser estudado mais a fundo como um problema de engenharia, pois afetava diretamente a vida útil das máquinas. Posteriormente, a análise de vibração se mostrou necessária também para melhorar a qualidade dos produtos, redução de ruídos de um equipamento em funcionamento e redução das vibrações para aumentar o conforto do operador da máquina, seja ela uma britadeira ou um veículo de luxo.

Atualmente, os estudos de vibração contam com o auxílio da tecnologia de análise por elementos finitos para simular estruturas com milhares de graus de liberdade, estimando assim suas frequências naturais e prevendo com precisão o seu comportamento em diferentes situações. Analisando o comportamento de eixos rotativos, segundo Hartog (1985), a vibração se comporta como um fenômeno com movimento periódico, ou seja, que se repete a intervalos de tempo fixos durante o funcionamento de uma máquina rotativa. Esse intervalo de tempo é denominado período de vibração, e os deslocamentos apresentados pelo eixo resultantes desse estímulo são as amplitudes do movimento vibratório.

Basicamente, o mecanismo ou estrutura é excitado por um estímulo (entrada) que o faz reagir com um movimento vibratório (saída). Na maioria dos casos, o estímulo se inicia por uma excitação, e o corpo responde com um movimento oscilatório por determinado período de tempo, dependendo da sua intensidade e do amortecimento do sistema. Esse comportamento é conhecido como vibração livre. Há casos, porém, em que o estímulo segue sendo gerado — ordenadamente ou aleatoriamente —, e o sistema segue oscilando enquanto durarem os impulsos de entrada. Esse é o caso das vibrações forçadas, que podem ser ordenadas (determinísticas) ou aleatórias. Os movimentos dessas duas situações são ilustrados pela Figura 2.1.

Com o avanço das tecnologias de instrumentação a partir dos anos 1950 e com o

Figura 2.1: Gráficos do movimento vibratório em resposta a um estímulo: (a) determinístico e (b) aleatório.



Fonte: Rao e Yap (1995)

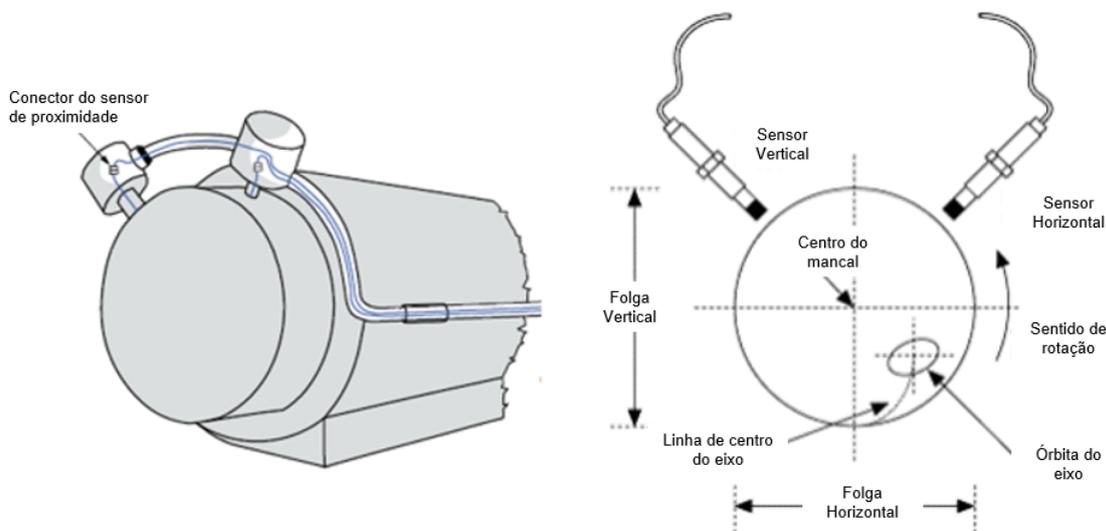
aumento da produtividade de grandes indústrias, o conceito de manutenção preditiva – monitoramento dos equipamentos em tempo real de modo a prever possíveis falhas – se tornou uma necessidade no processo produtivo das empresas para garantirem que suas máquinas não sofram danos durante o funcionamento. Dessa forma, se for identificado um comportamento atípico ou prejudicial ao equipamento durante o monitoramento, a máquina pode ser desligada para possibilitar a tomada de ações de correção menos dramáticas, cenário muito mais vantajoso do que uma manutenção corretiva, onde o problema já ocorreu gerando danos mais severos até mesmo em equipamentos periféricos.

Um dos tipos de análise de vibração preditiva em máquinas rotativas mede a variação da posição relativa de um eixo em um plano. Essa variação pode ser medida posicionando-se dois sensores de proximidade deslocados 90° entre si e apontando perpendicularmente para o centro teórico do eixo, como mostrado na Figura 2.2. Essa inspeção é conhecida como medição de vibração relativa radial, onde o termo relativa se refere ao deslocamento do eixo (móvel) em relação a sua estrutura de apoio (estática), que é onde geralmente está fixado o sensor.

Para possibilitar essa medição dos valores de vibração, os sensores de proximidade precisam estar posicionados em locais fixos e conhecidos da carcaça, com um pequeno espaçamento entre o eixo e a ponta do sensor. Para que se obtenha uma leitura de vibração com alto grau de confiabilidade, a região do eixo que será enxergada pelo sensor deve ser preparada para que possíveis desvios superficiais não perturbem o sinal coletado. Essas regiões são as chamadas pistas de *runout*, que são faixas com acabamentos mais refinados, de largura definida com rugosidade mais baixa e livre de riscos, amassamentos e quaisquer outras avarias que afetem a leitura do sinal.

Na fase de projeto, a engenharia de desenvolvimento do produto, já conhecendo os sensores previstos para instalação e monitoramento do equipamento, deve seguir alguns parâmetros para definir os níveis de rugosidade e acabamento dessas superfícies, especificando o limite admissível da leitura de sinal de *runout* total (TIR) naquela região. Muitas normas de monitoramento trazem limites para os níveis de vibração aceitáveis em diferentes aplicações, mas poucas apresentam limites aceitáveis para os valores de *runout*.

Figura 2.2: Posição dos sensores de proximidade para medição de vibração relativa



Fonte: API-670 (2014)

Para turbo redutores industriais — equipamentos que atingem velocidades periféricas na engrenagem de até 150 m/s —, as normas API-613 (2021) e API-677 (2006) são referências para fabricação de equipamentos de alta qualidade. As duas normas definem que o valor máximo da amplitude de vibração pico-a-pico, sem filtro e em qualquer plano, deve ser igual a $25 \mu\text{m}$ ou A — considerar o menor valor —, em que A é obtido utilizando-se a Equação 2.1. A norma API-687 (2001) traz especificações para manutenção em redutores de velocidade, e apesar de não trazer limites de vibração — recomendando que se mantenham os limites determinados pelo fabricante do equipamento original —, determina os limites desejados para o ensaio de verificação do TIR.

$$A = 25,4 \cdot \sqrt{\left(\frac{12.000}{N}\right)} \quad [\mu\text{m}] \quad (2.1)$$

em que N é a velocidade de rotação do eixo em rpm.

Adicionalmente, essas normas também definem os valores máximos admissíveis para os limites de TIR. Na Tabela 2.1 são apresentados os limites máximos de vibração pico-a-pico, e os valores de *runout* correspondentes.

No geral, as normas API foram desenvolvidas para padronizar a fabricação de máquinas de alto desempenho, no geral aplicadas na indústria de óleo e gás, projetadas para operar em ambientes de condições severas de operação e difícil acesso, como plataformas de petróleo ou navios de guerra - como corvetas e fragatas -, com o objetivo de minimizar a quantidade de intervenções de manutenção nessas máquinas. Os valores mostrados na tabela utilizados em projetos padrão da Zanini Renk — isto é, quando não é exigido o padrão de qualidade API —, foram definidos com base nessas normas e aprimorados ao

Tabela 2.1: Normas com limites de vibração e *runout* total (TIR)

| Normas | Limites de vibração relativa | Limites de <i>runout</i> total |
|-------------|--|---|
| API 613 | - Para vibrações radiais pico-a-pico: $A = 25,4 \cdot \sqrt{\left(\frac{12.000}{N}\right)}$ ou $A = 25 \mu\text{m}$, o que for menor | Rugosidade máxima da pista: $R_a = 0,8 \mu\text{m}$ Magnetismo residual máximo = 5 gauss - <i>Runout</i> total radial de 25% de A ou $6,35 \mu\text{m}$, o que foi maior |
| | - Para vibrações axiais pico-a-pico: $A = 50 \mu\text{m}$ | - <i>Runout</i> total axial igual a, no máximo, $13 \mu\text{m}$. |
| API 677 | - Para vibrações radiais pico-a-pico: $A = 25,4 \cdot \sqrt{\left(\frac{12.000}{N}\right)}$ ou $A = 50 \mu\text{m}$, o que for menor | Rugosidade máxima da pista: $R_a = 0,8 \mu\text{m}$ Magnetismo residual máximo = 5 gauss - <i>Runout</i> total radial de até $6,5 \mu\text{m}$ para eixos com diâmetros menores que 305 mm |
| | - Para vibrações axiais pico-a-pico: $A = 60 \mu\text{m}$ | - <i>Runout</i> total radial de até $10 \mu\text{m}$ para eixos com diâmetros maiores ou iguais a 305 mm - <i>Runout</i> total axial igual a, no máximo, $15 \mu\text{m}$. |
| API 687 | Limites de vibração devem ser os mesmos valores admissíveis de vibração pico-a-pico da norma de fabricação original do equipamento. | Rugosidade máxima da pista: $R_a = 0,8 \mu\text{m}$ Magnetismo residual máximo = $\pm 2,0$ gauss - <i>Runout</i> total radial de até $6,0 \mu\text{m}$ - <i>Runout</i> total axial de até $12 \mu\text{m}$. |
| Zanini Renk | - Para vibrações radiais pico-a-pico: $A = 25,4 \cdot \sqrt{\left(\frac{12.000}{N}\right)}$ ou $A = 25 \mu\text{m}$, o que for menor | Rugosidade máxima da pista: $R_a = 0,8 \mu\text{m}$ Magnetismo residual máximo = 5 gauss - <i>Runout</i> total radial de 25% de A ou $6,5 \mu\text{m}$, o que foi maior |
| | - Para vibrações axiais pico-a-pico: $A = 50 \mu\text{m}$ | - <i>Runout</i> total axial igual a, no máximo, $13 \mu\text{m}$. |

A = amplitude permitida de vibração pico a pico sem filtro; N = máxima rotação contínua, em rpm.

Fonte: Informações consultadas nas normas citadas na coluna 1 e compiladas na tabela pelo próprio autor.

longo de anos de experiência em fabricação e monitoramento desses equipamentos, podendo também ser aplicados em equipamentos menos solicitados ou de fácil intervenção.

2.2 Ensaio de *Runout*

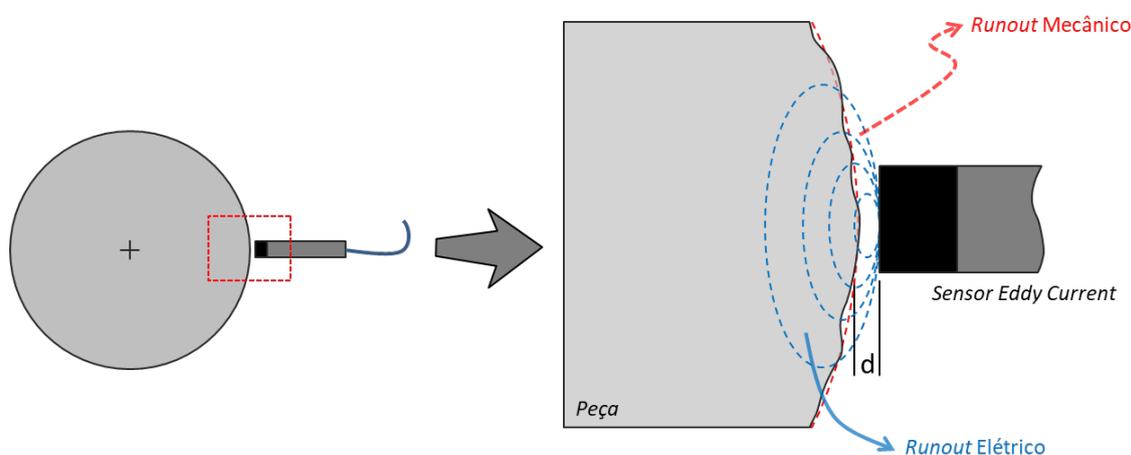
Por volta de 1987, quando as normas da *American Petroleum Institute* (API) foram revisadas com o intuito de promover limites para controlar a vibração de eixos rotativos, a indústria foi impactada por um crescimento expressivo no uso de sensores de monitoramento. Dentre eles, os sensores de proximidade do tipo *Eddy Current* (EC) para medição de vibração relativa – isto é, a vibração de um eixo rotativo em relação a um ponto de referência estacionário – foram os que tiveram maior aceitação no mercado devido à sua praticidade e consistência nas medições. Usualmente, dois sensores são posicionados a 90° entre si, apontando para o centro teórico do eixo (em movimento), determinando a posição do centro do eixo a cada instante conforme ele rotaciona.

Os sensores estão fixados na carcaça em posições pré-determinadas sobre os eixos, de maneira que sempre estarão posicionados sobre uma faixa de largura definida ao longo de sua circunferência. Essa faixa no eixo é denominada pista ou faixa de *runout* (*runout tracks*). É possível que em sua superfície existam defeitos como riscos, amassamentos, alta rugosidade, ou então que a pista tenha sido usinada deixando o diâmetro com desvios geométricos acentuados de circularidade ou excentricidade. Nesses casos, esses desvios serão captados como uma adição no sinal de vibração, mas devendo ser interpretados como erros de medição.

Além dos fatores mecânicos, as variações nas propriedades eletromagnéticas do

material nas pistas de *runout* também compõem o aumento desse erro de medição (ERO). O sinal adicional de vibração decorrente dessas variações mecânicas e elétricas é conhecida como erro de *runout* total (TIR). Esse erro pode ser tanto adicionado como subtraído do sinal de vibração real medido no equipamento em funcionamento (rotacionando em sua velocidade nominal de trabalho), dependendo do ângulo de fase. O erro de *runout* pode ser corrigido vetorialmente, subtraindo-o do vetor de vibração, porém somente para fins de uma análise diagnóstica de falha ou comportamento atípico do equipamento, conforme recomenda a norma API-670 (2014). Na Figura 2.3 é ilustrado esquematicamente as interações entre a peça e o sensor.

Figura 2.3: *Runout* Mecânico e Elétrico

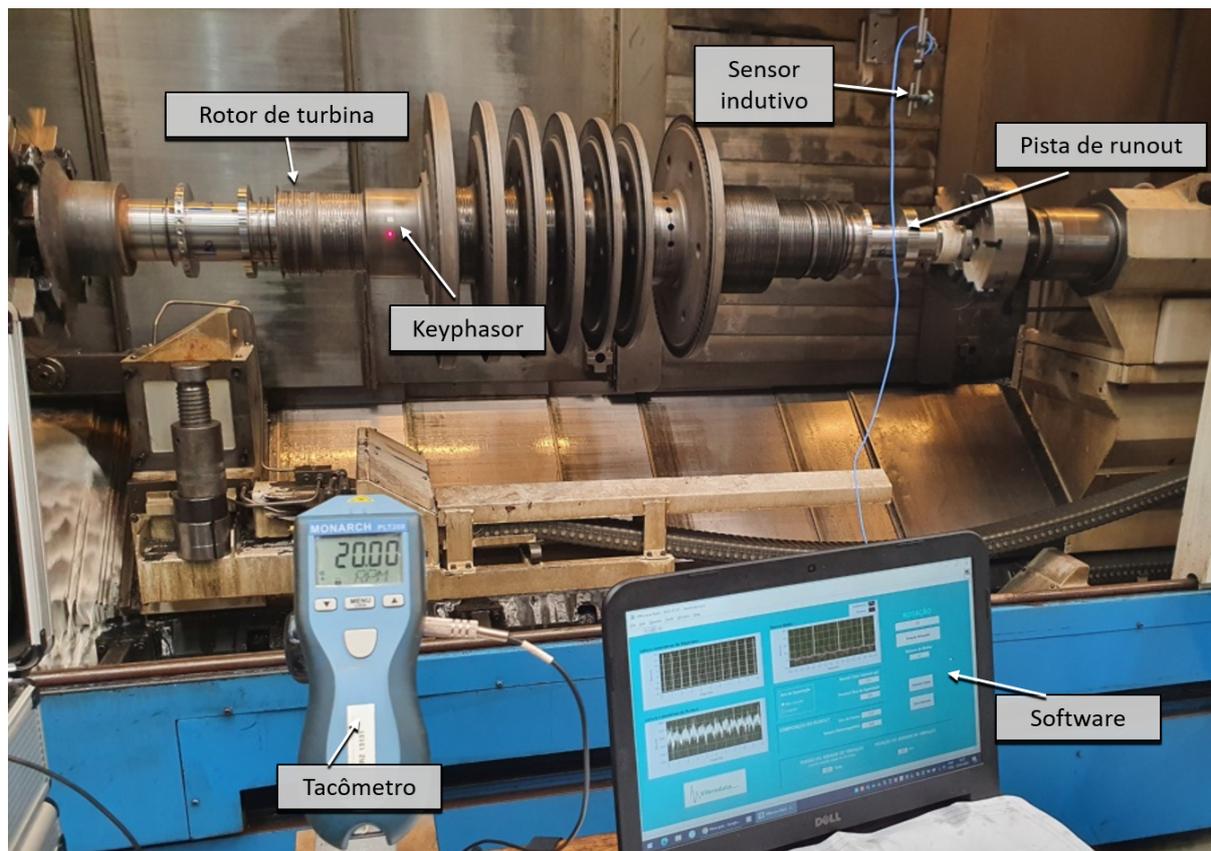


Fonte: Próprio autor.

No universo da fabricação de caixas de engrenagens redutoras ou multiplicadoras de velocidades, turbinas a vapor e compressores, existem normas que trazem limites máximos admissíveis para as variações mecânicas e elétricas que surgem nas pistas de *runout* – mostrados na Tabela 2.1 –, com o intuito de mitigar essas ocorrências ainda no processo de fabricação. Isso ocorre ao fato de que é muito dispendioso para o fabricante identificar esse erro somente no momento do teste rotativo do equipamento já montado, uma vez que caso o erro seja excessivo, a máquina teria que ser desmontada e as peças voltariam para a máquina-ferramenta para realizar operações de correção geométrica dessas pistas. Por esse motivo, as verificações são comumente feitas durante o processo de fabricação dos eixos antes de iniciar-se o processo de montagem, como mostrado na Figura 2.4.

Segundo DeBlock, Wood e McDonnell (2007), em aproximadamente 10 a 15% de sua velocidade nominal de trabalho, os efeitos dinâmicos da rotação de um eixo são tão pequenos que podem ser desprezados. Nessa condição, o sinal de vibração teórico deveria ser nulo. No entanto, os defeitos de fabricação (sejam imperfeições superficiais ou desvios geométricos de concentricidade e circularidade) somados com as alterações elétricas provocadas pela microestrutura da peça geram um erro de medição do sinal de *runout* que

Figura 2.4: Ensaio de *Runout* realizado em um rotor de uma turbina a vapor.



Fonte: Próprio autor.

pode ser identificado nessas baixas rotações.

Essas máquinas são configuradas para serem desligadas quase que instantaneamente no momento em que os níveis de vibração excederem um valor estipulado. Essa vibração pode ser descrita como uma frequência, que pode ser representada por um vetor com amplitude e ângulo de fase definidos. Analogamente, segundo Littrell (2005), o erro de TIR também pode ser descrito como um vetor. Porém, o sensor não é capaz de identificar e diferenciar os dois vetores quando esses ocorrem simultaneamente, enxergando somente a soma entre eles. A consequência desse fenômeno é que o erro de *runout* pode aumentar ou diminuir a amplitude do sinal de vibração que está sendo monitorada. Se for somado, pode transmitir a informação equivocada de que a máquina possui um problema sério de vibração excessiva; se for subtraído, pode ocultar um problema de vibração já existente, potencialmente acarretando danos no equipamento.

Um sensor de proximidade indutivo possui uma bobina na ponta que induz um campo magnético à medida que uma corrente elétrica a atravessa. Conforme o sensor se aproxima de uma superfície metálica condutora de eletricidade, correntes do tipo *Eddy Current* são induzidas na superfície do metal, reduzindo a intensidade do campo magnético resultante. Segundo DeBlock, Wood e McDonnell (2007), essa redução é identificada

pela bobina como uma queda de impedância ou tensão eletromagnética que, até certo ponto, pode ser considerada linearmente proporcional a uma mudança de distância entre a superfície da peça e a superfície do sensor. Quando um eixo vibra, o sensor capta esse movimento a partir da diferença de potencial gerada entre essas superfícies, que através de um fator de conversão é transformada em uma variação de distância em micrometros (μm).

Como as correntes parasitas (*eddy currents*) são formadas na superfície mais externa do eixo, quaisquer variações geométricas ou metalúrgicas ao longo da circunferência da pista de leitura de *runout* influenciam na variação da tensão eletromagnética e, conseqüentemente, em uma variação de distância.

Segundo Petrovic e Jakovljevic (2009), os sensores de proximidade operam em frequências de 100 kHz a 1,5 MHz. Portanto, a profundidade das correntes geradas é muito pequena, mas as variações próximas à superfície da peça provocam grandes alterações na leitura do sinal. Por esse motivo, como as características químicas e eletromagnéticas do material não podem ser facilmente alteradas, surge a necessidade de processos de fabricação que promovam um melhor acabamento superficial da peça para compensar esse erro na leitura do TIR.

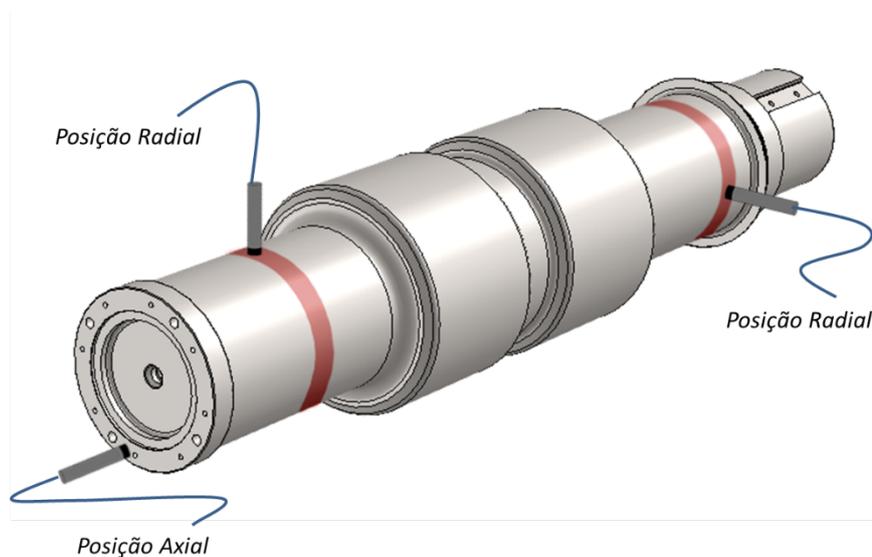
O sinal do TIR é o resultado da soma das componentes mecânica e elétrica. O *runout* mecânico pode ser medido com relógios comparadores ou apalpadores, por exemplo. Conforme afirma Littrell (2005), cuidados especiais devem ser tomados à precisão muito pequena a ser obtida nessas medições, com resolução de pelo menos 2 μm . Por esse motivo, alguns instrumentos são os mais indicados para se obter essa medição, como LVDT (*Linear Variable Differential Transformers*) ou comparadores eletrônicos. As variações geométricas ocorrem em qualquer circunstância, mesmo que a peça tenha sido usinada na máquina mais precisa possível. Conseqüentemente, eixos cilíndricos nunca serão perfeitamente circulares ou concêntricos. Para realização do ensaio, os sensores podem ser posicionados de diferentes formas, mas sempre perpendiculares à superfície a ser medida, conforme mostrado na Figura 2.5.

Assumindo que não existam riscos, amassamentos ou outros defeitos superficiais em uma pista de *runout*, ainda existirão 3 fontes de erro de origem mecânica que influenciam na variação do sinal medido: desvio de circularidade da pista; desvio de circularidade no diâmetro de apoio do eixo no mancal; e desvios de concentricidade entre colo de apoio e pista de *runout*.

A componente elétrica surge por variações nas propriedades metalúrgicas e da estrutura cristalina do material do eixo ao longo da circunferência da pista de *runout*, que levam a alterações na condutividade elétrica, permeabilidade magnética e outros fatores associados a composição química e estrutura granular do material do eixo, afetando diretamente a leitura do sinal.

Como dito anteriormente, os rolamentos de um torno ou de uma retífica cilíndrica

Figura 2.5: Posições do sensor para medição de *runout* no eixo



Fonte: Próprio autor.

não são perfeitos, e carregam erros de concentricidade que são transmitidos ao eixo no momento da usinagem. Esses desvios são identificados como órbitas percorridas pelo centro teórico do eixo durante sua rotação. Enquanto isso ocorre, a máquina transfere esses erros para a ferramenta de corte, que retira diferentes quantidades de material em cada ponto da circunferência, promovendo uma superfície elíptica nas mesmas proporções da órbita gerada.

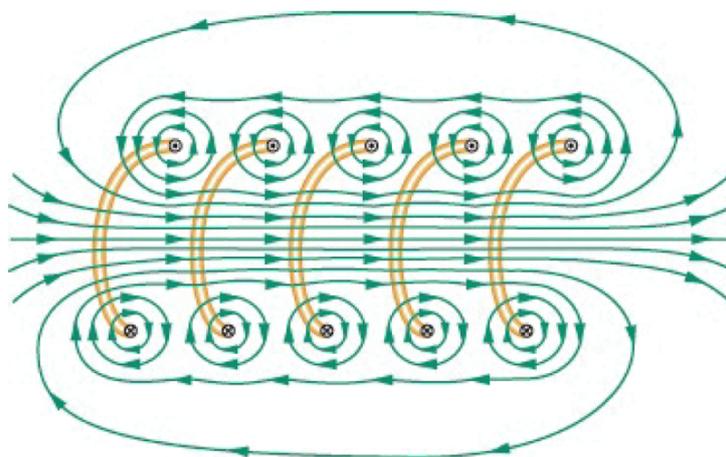
Um dos métodos para a verificação desse desvio nas peças é o posicionamento em blocos V, rotacionando manualmente e pausadamente, e fazendo leituras de deslocamento com sensores de proximidade (tipo EC) e relógios comparadores. Porém, Littrell (2005) demonstrou que eixos com diferentes geometrias podem gerar resultados semelhantes da variação de diâmetro medida com relógios comparadores analógicos. Uma das razões para que as normas recomendem a medição em blocos V é que o ensaio de *runout* deve ser feito em outra máquina (ou nos blocos) diferente de onde foi feita a retificação, pois se for feito na mesma máquina em que foi acabado, os desvios podem ser mascarados. Ou seja, se um torno ou retífica tiver seus rolamentos desgastados que produzam uma forma elíptica ao eixo em sua seção transversal, o eixo reproduzirá os erros da máquina se for medido nela. Segundo Schwenke et al. (2008), existe uma série de fontes de erros atribuídos a essas máquinas-ferramentas como desgaste de componentes, forças dinâmicas, erros cinéticos e termomecânicos que podem ser transferidos como erros geométricos para a peça. Embora haja métodos que permitam a separação dos erros geométricos – como o método da reversão que permite identificar e simular desvios transversais ao barramento de tornos horizontais –, a recomendação prática é, sempre que possível, realizar o ensaio de *runout* do eixo em uma máquina diferente da qual ele foi fabricado.

2.3 Conceitos de eletromagnetismo

Os campos magnéticos são produzidos basicamente de duas formas. Uma delas é através de partículas elementares, como elétrons, que possuem um campo magnético intrínseco. Para Coey (2010), em alguns materiais, os elétrons produzem campos que se somam para produzir um campo magnético permanente que cerca o material como um todo. Esses materiais são conhecidos como ímãs permanentes. Porém, na maioria dos materiais, os campos magnéticos dos elétrons se cancelam, resultando em um campo resultante nulo.

Outra maneira de gerar um campo magnético é pelo movimento de partículas eletricamente carregadas, assim como elétrons produzindo uma corrente elétrica em um fio. Na Figura 2.6 é mostrada de forma esquemática a formação das linhas de um campo magnético gerado em torno de uma bobina percorrida por uma corrente elétrica alternada. Como definem Halliday, Resnick e Walker (2016), a corrente alternada refere-se a uma corrente ou tensão fornecida em forma de onda senoidal. Isso significa que o sentido do fluxo dos elétrons ao longo de um fio elétrico varia em períodos iguais e constantes. No Brasil, a frequência de oscilação dessa corrente é de 60Hz, ou seja, os elétrons mudam de direção 120 vezes por segundo. Essa variação do sentido dos elétrons implica na variação do sentido da corrente elétrica, e é essa variação do sentido da corrente que resulta na variação do campo magnético induzido. Posteriormente, o físico James Maxwell (1831 – 1879) provou em sua publicação de 1862 que o efeito oposto também ocorre, ou seja, um fluxo elétrico variável (gerado por uma corrente elétrica variável) pode induzir um campo magnético.

Figura 2.6: Linhas de campos magnéticos gerados por uma bobina percorrida por corrente elétrica.



Fonte: Halliday, Resnick e Walker (2016)

Quando o campo magnético gerado pela bobina de um sensor atinge as partículas elétricas de um objeto, as mesmas sofrem uma excitação gerando o movimento dos elétrons,

que por sua vez geram uma corrente elétrica local e, conseqüentemente, um campo magnético reagente. A interação entre esses campos magnéticos depende das propriedades metalúrgicas e eletromagnéticas do material medido, da distância do sensor até o objeto, do número de espiras da bobina e da intensidade da corrente elétrica que a percorre.

Considerando um ponto na superfície que está sendo magnetizada, pode-se calcular o campo magnético B desse ponto no objeto dividindo o fio da bobina do sensor em pequenos incrementos ds . Para o valor da corrente elétrica, define-se também um incremento da corrente como $i \cdot ds$. Com isso, pode-se calcular o campo resultante desse incremento de corrente pela Equação 2.2:

$$dB = \frac{\mu_o}{4\pi} \cdot \frac{i \cdot ds \cdot \text{sen}\theta_B}{r_B^2} \quad (2.2)$$

em que r_B é o raio da bobina, θ_B é o ângulo entre as direções de ds e r_B , e μ_o é a constante conhecida como permeabilidade do vácuo, cujo valor é dado por $\mu_o = 1,26 \cdot 10^{-6}$ T.m/A.

No caso de uma bobina percorrida por uma corrente e com momento dipolar magnético P_d , a mesma se comporta como um dipolo magnético que, na presença de um campo magnético B , experimenta um torque T_B dado pela Equação 2.3:

$$T_B = P_d \cdot B \quad (2.3)$$

O momento dipolar magnético da bobina é expresso pela Equação 2.4:

$$P_d = N_e \cdot i \cdot A_e \quad (2.4)$$

em que N_e é o número de espiras, i a corrente elétrica e A_e a área das espiras da bobina.

O módulo do campo magnético em pontos situados sobre o eixo central das espiras é dado pela Equação 2.5:

$$B(z) = \frac{\mu_o \cdot i \cdot r^2}{2 \cdot (r^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (2.5)$$

em que z é a distância entre o ponto considerado até o centro da espira.

Para calcular o campo magnético induzido no interior do material B , considerando \vec{B} e \vec{P}_d como vetores paralelos, pode-se reescrever a Equação 2.5 na forma definida pela Equação 2.6 para definir o campo magnético gerado pela bobina percorrida por uma corrente elétrica:

$$\vec{B}(z) = \frac{\mu_o}{2\pi} \cdot \frac{\vec{P}_d}{z^3} \quad (2.6)$$

Dessa forma, pode-se considerar a bobina como um dipolo magnético, pois experimenta um torque na presença de um campo magnético externo e produz um campo magnético dado pela Equação 2.6 para pontos distantes sobre o eixo de z . A bobina

percorrida por corrente tende a se alinhar ao campo magnético externo aplicado.

2.3.1 Histerese e Domínios Magnéticos

A magnetização dos materiais ocorre basicamente pela movimentação dos domínios magnéticos e o tamanho dos contornos de grão também influencia nessa movimentação. Segundo Colpaert, Costa et al. (2008), em uma mesma área, quanto menores os grãos, maior a quantidade de contornos de grão, que é onde ocorre o espalhamento dos elétrons durante a condução. Conseqüentemente, maior será a dificuldade de movimentação da estrutura granular.

Cada elétron de um átomo possui um momento dipolar magnético orbital e um momento dipolar magnético de *spin*, que se combinam vetorialmente. A resultante dessas duas grandezas vetoriais se combina vetorialmente com as resultantes dos outros átomos de um material, e essa combinação de todos os momentos dipolares resultantes é que resultam nas propriedades magnéticas dos materiais. Tipler e Mosca (2009) classificam essas propriedades em 3 principais grupos:

Diamagnetismo, onde os momentos dipolares magnéticos são produzidos nos átomos do material apenas quando esse é submetido a um campo magnético externo. A combinação desses momentos dipolares induzidos resulta em um campo magnético de baixa intensidade no sentido contrário ao do campo externo, e se extingue quando o campo externo é removido. Essa propriedade existe em todos os materiais, mas é tão fraca que só é possível identificá-la quando as duas outras propriedades não estão presentes.

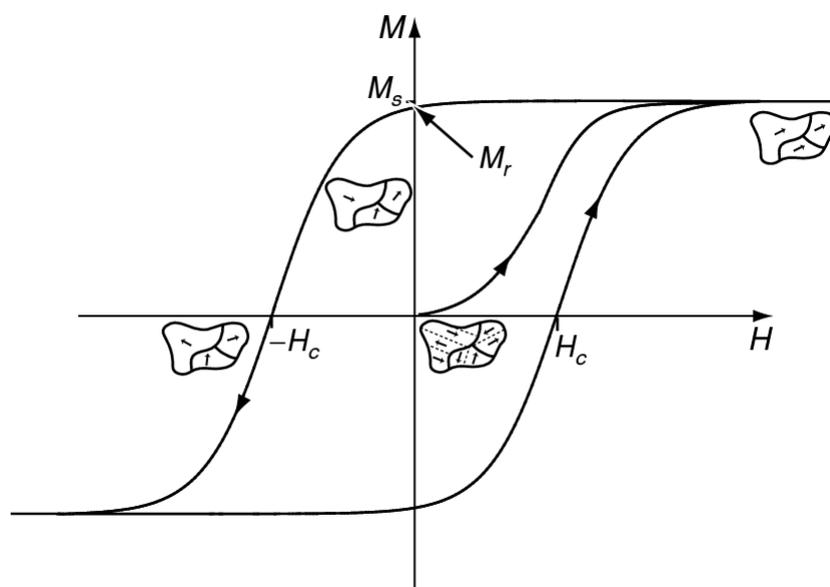
Paramagnetismo, observado em materiais que contêm elementos da família dos metais de transição. Os átomos desses elementos possuem momentos dipolares magnéticos totais diferentes de zero, mas como são orientados aleatoriamente, o campo magnético resultante é igual a zero. Porém, um campo magnético externo pode alinhar parcialmente os momentos dipolares magnéticos atômicos, fazendo com que o material apresente um campo magnético resultante no mesmo sentido que o campo externo, que se extingue quando o campo externo é removido.

Ferromagnetismo, observado somente em alguns materiais como Fe, Ni, Co. Nesses materiais, os momentos dipolares magnéticos de átomos vizinhos se alinham, produzindo regiões com intensos momentos magnéticos. Um campo magnético externo pode alinhar os momentos magnéticos das regiões, fazendo com que uma amostra de material produza um forte campo magnético no mesmo sentido que o campo externo, e que permanece na peça quando o campo externo é removido.

Segundo Bertotti e Mayergoyz (2006), os principais fatores que contribuem para alterações na energia de um material ferromagnético são anisotropia, energia magnetoestática e energia de interação com o campo magnético externo. Para Coey (2010), a manifestação mais expressiva do magnetismo nos sólidos é a magnetização

espontânea dos metais ferromagnéticos, que está diretamente associada com o conceito de Histerese. O termo vem do grego *hysteresis*, que em tradução livre significa 'estar atrasado'. O termo foi utilizado pela primeira vez pelo físico escocês James Alfred Ewing (1855-1935) para se referir aos efeitos magnéticos residuais que permanecem em um objeto após a remoção da aplicação inicial de uma força magnética. Esse é o conceito base de ímãs artificiais permanentes, que explica como alguns materiais podem ser magnetizáveis e permanecerem assim por longos períodos de tempo mesmo cessando a fonte magnetizadora.

Figura 2.7: Ciclo de Histerese de um material Ferromagnético.

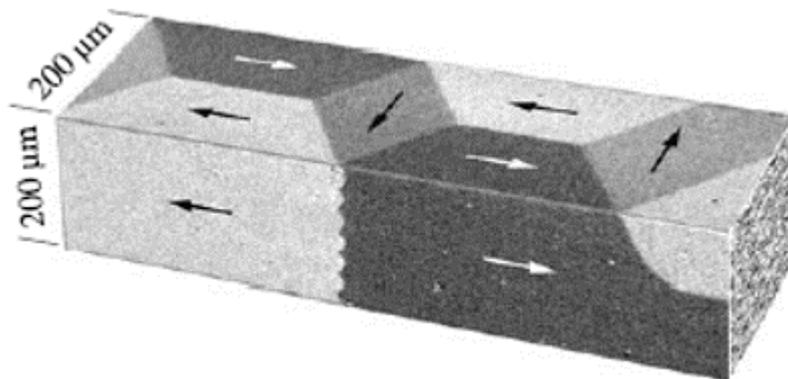


Fonte: Coey (2010)

Como mostrado no gráfico da Figura 2.7, considera-se inicialmente um material não magnetizado, partindo do ponto zero. Conforme o campo magnético externo H aumenta, o material aumenta sua magnetização até que atinja um nível de saturação M_s . À medida que H diminui, ou seja, é reduzido até cessar a fonte magnetizadora, o material começa a diminuir sua magnetização. No entanto, quando H é nulo, a magnetização remanescente no material permanece com valor M_r , fenômeno conhecido como remanência. Nota-se pela figura que a magnetização H_c é a intensidade do campo reverso que precisa ser aplicada no material para que sua magnetização remanescente M_r volte a zero. A intensidade do campo H_c é denominada coercividade, uma propriedade magnética sensível à estrutura cristalina do material, morfologia e até defeitos ou discontinuidades internas, podendo ser alterada submetendo a amostra a diferentes tratamentos térmicos ou mecânicos. Por esse motivo, Coey (2010) observa que materiais mais endurecidos possuem alta coercividade (curvas de histerese mais largas), ou seja, os campos magnéticos induzidos tem maior tendência a permanecerem no material depois de eliminar a fonte externa. De forma análoga, materiais mais moles possuem baixa coercividade (curvas de histerese mais esbeltas).

A teoria do físico francês Pierre Weiss (1865-1940) publicada em 1906 descreve

Figura 2.8: Domínios magnéticos observados em amostras magnéticas homogêneas.



Fonte: Hubert e Schäfer (2008)

que um material ferromagnético em seu estado desmagnetizado divide-se em pequenos volumes como ilustrado pela Figura 2.8, e os chamou de domínios magnéticos, onde cada um é espontaneamente magnetizado até atingir o nível de saturação da magnetização M_s do material. No entanto, suas orientações espontâneas são aleatórias de maneira que os momentos magnéticos se cancelam, produzindo um campo magnético resultante praticamente nulo. Quando um campo magnético externo H excita o material, os chamados domínios magnéticos se reorientam no sentido do campo induzido. Após cessar a fonte excitadora, alguns domínios voltam à sua configuração inicial, com exceção de alguns domínios que, segundo Hubert e Schäfer (2008), possuem uma memória magnética da orientação que adquiriram com o campo induzido, e permanecem em suas novas direções (remanência).

Outras duas propriedades magnéticas constatadas como relevantes ao funcionamento de sensores indutivos são a permeabilidade magnética (μ) e a suscetibilidade magnética (χ). A permeabilidade nada mais é do que a facilidade que um material tem de absorver um campo magnético externo em seu interior e reproduzir o seu próprio campo interno B . Já a suscetibilidade está relacionada com a rotação dos domínios magnéticos, ou seja, representando a facilidade com que um campo magnético externo rotaciona os domínios do material. Essas propriedades magnéticas facilitam o entendimento do comportamento do material quando este é estimulado por uma fonte de magnetização externa, como ocorre por exemplo quando posicionamos um sensor indutivo em suas proximidades.

2.3.2 Capacitância

Basicamente, um capacitor é um dispositivo projetado para armazenar energia elétrica e descarregar rapidamente. Um exemplo clássico de sua aplicação é o armazenamento de energia para disparar os flashes de uma câmera fotográfica. Como as pilhas fornecem energia aos poucos, o capacitor coleta essa energia por um tempo, e após ter acumulado

energia suficiente, a descarrega de uma só vez. Segundo Halliday, Resnick e Walker (2016), a quantidade de carga que um capacitor é capaz de armazenar é denominada capacitância e depende da geometria das placas, do material dos componentes e do material entre as placas, podendo ser obtida calculada pela Equação 2.7,

$$C = \frac{q}{\Delta V} \quad (2.7)$$

em que C é a capacitância medida em farad (F), q é a carga elétrica do capacitor medida em coulombs (C), e ΔV é a diferença de potencial entre as placas medida em volts (V). Esse parâmetro indica a quantidade de carga necessária para produzir determinada diferença de potencial. Quanto maior a capacitância, maior a carga necessária. Para placas planas, com a Equação 2.8 percebe-se que a capacitância depende somente de fatores geométricos, como a área das placas A_p e a distância d_p entre elas, além da constante elétrica ϵ_0 . Quanto maior a distância entre as placas, menor a capacitância.

$$C = \frac{\epsilon_0 \cdot A_p}{d_p} \quad (2.8)$$

Outro fator importante é o que existe no espaço entre as placas. Quando esse espaço é preenchido com um material dielétrico, ou seja, um material isolante (como plástico ou óleo), a capacitância é multiplicada por uma constante dielétrica k do material isolante. Por definição, a constante dielétrica do vácuo é igual a 1, aumentando gradativamente para diferentes materiais como ar ($k=1,00054$), papel ($k=3,5$), água ($k=80,4$) ou óleo ($k=4,5$), por exemplo. No fundo, a alteração do valor das capacitâncias pelos isolantes nada mais é do que a capacidade dos materiais em aumentar o valor da diferença de potencial entre as placas (isolando as cargas de cada placa). Quanto maior a constante dielétrica do material, maior é a diferença de potencial que ele consegue manter entre as placas. Alguns materiais tem uma carga limite que conseguem suportar. Esse limite é uma propriedade conhecida como rigidez dielétrica. Se essa rigidez é ultrapassada (sobrecarga do capacitor), pode haver uma ruptura do material dielétrico, que então passa a permitir a passagem de corrente livremente, inutilizando o dispositivo.

2.3.3 Indutância

Da mesma forma que uma corrente elétrica gera um campo magnético, foi descoberto por volta de 1820 pelo físico britânico Michael Faraday (1791 – 1867) que o efeito oposto também ocorre, ou seja, campos magnéticos são capazes de induzir correntes elétricas. Essa ligação entre campo magnético e campo elétrico induzido é conhecida como a lei da indução de Faraday.

Conforme descreve Halliday, Resnick e Walker (2016), a lei de Faraday diz que uma força eletromotriz e uma corrente são induzidas em uma espira (ou bobina) quando a

quantidade de campo magnético que a atravessa varia. No exemplo abaixo, considera-se que um campo magnético externo H induz uma corrente elétrica i em um objeto, que ao produzir corrente elétrica funciona também como uma bobina, induzindo um campo magnético interno B . Para calcular o valor da quantidade de campo magnético ou fluxo magnético Φ , tem-se a Equação 2.9 que relaciona o campo magnético \vec{B} que atravessa uma espira de área A_e .

$$\Phi_B = \int \vec{B} \cdot d\vec{A}_e \quad (2.9)$$

Se a espira for plana e o campo magnético for uniforme e perpendicular ao plano da espira, pode-se simplificar para a Equação 2.10.

$$\Phi_B = B \cdot A_e \quad (2.10)$$

Pouco tempo depois, Heinrich Lenz descobriu que a corrente induzida na espira tem um sentido tal que o campo magnético induzido pela corrente se opõe ao campo magnético que induz a corrente. Dessa forma, quando um ímã é aproximado ou afastado de uma espira, uma força magnética oferece resistência ao movimento e, portanto, é preciso realizar um trabalho positivo para executar o movimento.

Um indutor pode ser usado para produzir um campo magnético com as propriedades desejadas. O tipo mais simples de indutor é o solenoide. Se as espiras do solenoide conduzem uma corrente i , essa corrente produz um fluxo magnético Φ na região central do indutor. A indutância L pode ser calculada pela Equação 2.11, em que N_e é o número de espiras.

$$L = \frac{N_e \cdot \Phi_B}{i} \quad (2.11)$$

A unidade da indutância é T.m²/A, conhecida como henry (H), e também pode ser escrita como o produto da permeabilidade no vácuo por uma grandeza com dimensão de comprimento. A permeabilidade do vácuo pode ser portanto reescrita como $\mu_o = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m.

2.4 Sensores Eletromagnéticos

Sensores eletromagnéticos exigem alta sensibilidade para detectar pequenas variações de intensidade de campos magnéticos. Quando determinada aplicação exige um monitoramento por meio de um sensor de proximidade, imediatamente surgem duas possibilidades: a utilização de sensores capacitivos ou de sensores indutivos. Para cada aplicação, o engenheiro de automação ou o instrumentista responsável devem conhecer os princípios de funcionamento de cada um desses dispositivos para fazer a escolha mais adequada. Nas seções a seguir são detalhados os aspectos construtivos e princípios de

funcionamento básicos de cada tipo de sensor.

2.4.1 Sensores Capacitivos

Sensores capacitivos são dispositivos utilizados para realizar medições precisas da distância de sua ponta até a superfície de um alvo, ou então, quando essa distância é fixa, pode ser usado para medir a espessura de um material não condutor que esteja entre o sensor e uma base condutora.

Uma das vantagens desse tipo de sensor é que, quando usado em alvos não condutores, sua leitura não é afetada por eventuais alterações no material alvo, ou seja, todos os materiais não condutores parecem iguais ao sensor capacitivo. Segundo Wilson (2004), basicamente há três fatores que promovem alterações na capacitância: o tamanho das placas (ou seja, tamanho do sensor e do alvo); o material entre as placas (composição do material do *gap*); e a distância entre as placas (ou entre o sensor e o alvo).

Na prática, o tamanho do sensor e do material alvo permanecem inalterados. Assim, tem-se duas aplicações distintas para esse tipo de sensor. Considerando fixo o tamanho das superfícies, se a distância entre as placas for constante, qualquer alteração na capacitância do sensor só pode ser resultado de alterações no material do *gap* (espaço entre eles). Um uso comum é passar sob o sensor materiais para avaliar variações em sua espessura, composição ou densidade. Por exemplo, passando um material cuja composição química e densidade são conhecidas e constantes, as variações indicadas pelo sensor representarão alterações na espessura do material. Uma aplicação comum que segue esse princípio ocorre na seara da pintura industrial, na qual pode-se fazer a medição de espessura de camada de tinta seca aplicada sobre a superfície condutora de um equipamento.

Na outra aplicação, ainda considerando fixo o tamanho das superfícies, se o material do *gap* permanecer inalterado (ar, por exemplo), a variação da capacitância detectada pelo sensor é resultado de uma variação na distância entre as placas, ou seja, entre a ponta do sensor e a superfície do alvo. Uma aplicação prática desse princípio é encontrada em sensores para medição de vibração mecânica (deslocamento relativo). Porém, conhecendo o princípio de funcionamento dos sensores capacitivos e considerando as condições adversas de operação em máquinas como redutores e multiplicadores de velocidade industriais – partículas de óleo, água, limalhas e particulados metálicos, dentre outros contaminantes que podem surgir entre as placas do capacitor, isto é, entre peça e sensor – é possível concluir que este não é o sensor mais indicado para essa aplicação.

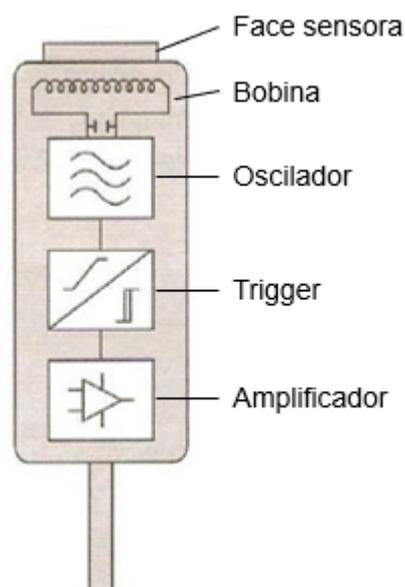
2.4.2 Sensores Indutivos

Sensores indutivos são dispositivos utilizados para medições precisas de posição ou distância da ponta do sensor até um alvo, que deve ser composto por um material condutor. Diferentemente dos sensores capacitivos, esses sensores não são afetados por variações

que ocorram no *gap*, podendo ser utilizados em ambientes onde haja contaminação nessa região como óleo e fluidos refrigerantes presentes na superfície da peça. Nessa categoria de sensores se enquadram os do tipo EC, utilizados nos ensaios realizados nesse trabalho.

No entanto, a sensibilidade desses sensores é afetada por alterações das características do material da peça a ser medida. Aço, alumínio, cobre, níquel, cada material possui propriedades que interferem na resposta do sensor de um jeito diferente. Por esse motivo, o sensor deve ser calibrado especificamente para o material que será avaliado. Possuem alta resolução (2,0 nm) e altas respostas em frequência (valores acima de 80 kHz), e podem inclusive operar submersos em substâncias líquidas ou gasosas.

Figura 2.9: Representação esquemática do interior de um sensor indutivo do tipo EC



Fonte: Thomazini e Albuquerque (2020).

Na Figura 2.9 são ilustrados os componentes internos de um sensor de indução. O circuito interno do sensor é composto por uma bobina, um circuito oscilador, e um disparador (*trigger*) em conjunto com um amplificador. Uma corrente elétrica alternada percorre a bobina posicionada na ponta do sensor que, juntamente com o oscilador, geram um campo eletromagnético alternado primário. Ao aproximar um material metálico ferroso em frente à face sensora, são geradas as correntes parasitas pelo princípio da indução eletromagnética. Essas correntes geram campos magnéticos secundários, que por sua vez reagem com o campo magnético primário gerado pela bobina, e essa interação entre os campos é conhecida como reatância indutiva. À medida que a distância entre o sensor e o objeto varia, essas interações no campo magnético também variam, indicando pequenas alterações na energia e na amplitude do campo magnético primário. O circuito de disparo presente no interior do sensor indutivo é responsável por detectar – a partir de um certo ponto – a queda do campo magnético e enviar um sinal para a saída (amplificador)

alterando a sua tensão (em mV).

Quanto mais próximo da peça estiver o sensor, maiores serão as interações entre os campos magnéticos primário e secundários, e maior é a resolução do sinal captado, dentro dos limites estabelecidos pelo fabricante do sensor.

Também por esse motivo, o objeto precisa ter uma espessura mínima para possibilitar a indução das correntes, e pode variar conforme as propriedades elétricas e magnéticas de cada material e conforme a frequência do sensor. Na Tabela 2.2 esse conceito é exemplificado listando as espessuras mínimas de alguns materiais considerando uma frequência de operação do sensor de 1,0 MHz.

Tabela 2.2: Espessuras mínimas de cada material do objeto para medições com sensores EC operando à frequência de 1,0 MHz

| Material | Espessura mínima [mm] |
|-----------------|------------------------------|
| Cobre | 0,2 |
| Alumínio | 0,25 |
| Aço INOX 304 | 0,4 |
| Latão | 1,6 |
| Aço 1040 | 0,008 |
| Aço INOX 416 | 0,08 |
| Ferro | 0,6 |

Fonte: Wilson (2004).

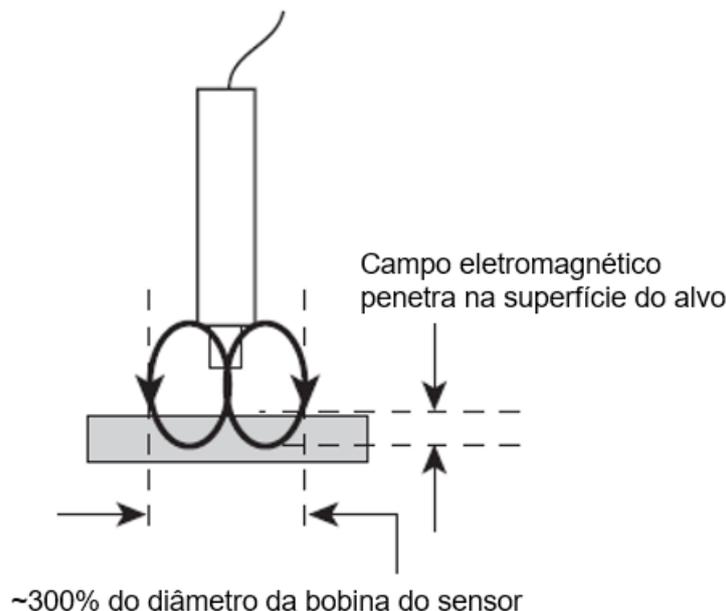
Por último, conforme indicado na Figura 2.10 a área da peça a ser medida também precisa ser, no mínimo, três vezes maior que o diâmetro da ponta do sensor, pois, na maioria dos casos, o campo eletromagnético gerado tem cerca de até três vezes o tamanho do diâmetro da bobina, embora seja possível calibrar o sensor para áreas menores em aplicações específicas.

Analogamente aos sensores capacitivos, Wilson (2004) pontua os três fatores que geram alterações na indutância: o tamanho da bobina e o tamanho da superfície da ponta do sensor; a distância entre a ponta do sensor e a superfície medida; e o material da peça que está sendo avaliada. Como o tamanho do material e do sensor permanecem constantes, a variação da distância (ou do *gap*) entre eles e possíveis alterações nas propriedades do material são os únicos fatores capazes de promover alterações na medição. Em outras aplicações, mantendo-se a distância fixa, é possível também utilizar os sensores indutivos para identificar falhas e descontinuidades nos materiais.

No geral, sensores EC são resistentes a poeira, umidade, óleo ou materiais dielétricos no *gap* entre a ponta do sensor e o material alvo, além de se mostrarem eficientes em grandes faixas de temperatura (usualmente de -50 a 150°C).

Além das observações de Coey (2010) sobre as respostas de materiais ferromagnéticos a fontes externas magnetizadoras, Tian, Zhao e Baines (1998) relatam em seus estudos que a resistividade (ρ) e a permeabilidade (μ) do material alvo também influenciam na

Figura 2.10: Representação da área do campo magnético que atinge o objeto



Fonte: Wilson (2004).

medição com sensores EC. Esses dois fatores interferem no sinal de maneira a gerar erros conhecidos como não-homogeneidade, pois esses fatores se alteram conforme é alterado o material da peça a ser medida. Essa característica é muito mais presente em materiais ferrosos do que os não ferrosos, e gera distúrbios na propagação das correntes parasitas, afetando a precisão do sinal coletado. Todos esses fatores promovem alterações na resposta captada pelo sensor EC, gerando o erro de *runout* elétrico (ERO).

Quando sensores são usados para diferenciar um material de outro, basta recalibrar o sensor para cada tipo de material. No entanto, quando os sensores são utilizados para medir desvios geométricos, a não-homogeneidade é produzida, dentre outros fatores, através da não equalização da resistividade e da permeabilidade do material alvo. Novos sensores EC atingem maiores resoluções como $0,01 \mu\text{m}$ em uma superfície até 300% do diâmetro da bobina, podendo ser melhor utilizada em medições de alta precisão.

Em seus experimentos, Tian, Zhao e Baines (1998) verificaram que a diferença entre os valores medidos pode ser atribuída a influência da não-homogeneidade. É possível observar que a não-homogeneidade em metais não ferrosos como alumínio e cobre é muito menor do que em materiais ferrosos. A resistividade (ρ) é um fator que causa essa heterogeneidade em metais não ferrosos. Já em metais ferrosos, além da resistividade, a permeabilidade (μ) também contribui para o aumento desse efeito.

Tian, Zhao e Baines (1998) também demonstraram que a não-homogeneidade do ferro fundido mostrou-se maior que no aço carbono, atribuindo esse efeito ao fato de que a resistividade do aço é menor que a do ferro. Adicionalmente, considerou-se

que a homogeneização da permeabilidade no aço é maior que no ferro. A influência da permeabilidade do objeto depende, portanto, da equalização e da quantidade de permeabilidade do objeto. A equalização dessa permeabilidade está relacionada com o processo de fabricação da peça que está sendo medida. Sendo assim, a precisão da medição pode ser maior se um processo de equalização de permeabilidade (como a desmagnetização) for efetuado no objeto antes da medição com o sensor EC. Devido à permeabilidade, a precisão da medição em objetos não ferrosos pode ser maior do que em objetos ferrosos.

2.5 *Laser Cladding*

Após a descoberta da tecnologia a laser por Theodore Maiman em 1960, a precisão e a flexibilidade dos lasers mostraram grande potencial para processamento de materiais e superfícies. Devido aos elevados custos iniciais e a baixa eficiência das fontes de feixes de laser, demorou até 1980 para que o processo de revestimento utilizando energia laser (*laser cladding*) (LC) se tornasse praticável em nível industrial. Em sua forma mais simples, conforme descrito por Cavaliere (2021), esse processo é utilizado em grande parte para revestir superfícies metálicas com o objetivo de reforçar a proteção de superfícies mecânicas expostas a condições ambientes abrasivas ou corrosivas. Um exemplo dessa aplicação é mostrado na Figura 2.11.

Figura 2.11: Manufatura aditiva utilizando o processo de *laser cladding*.

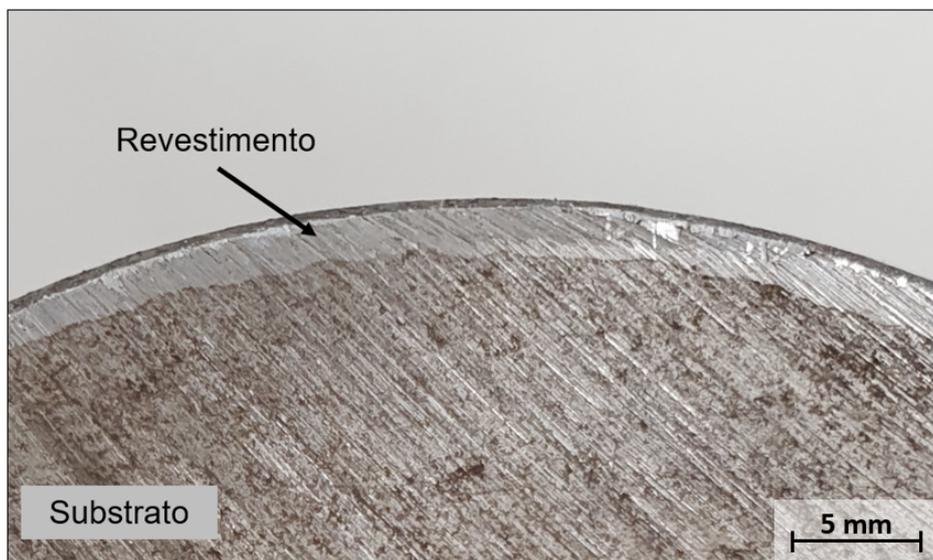


Fonte: Cavaliere (2021).

Na fabricação de caixas de engrenagens e turbinas a vapor, essa tecnologia vem sendo aplicada nos últimos anos para recuperação geométrica de peças usinadas ou para

eliminar defeitos como riscos e trincas. Na Figura 2.12 é mostrada seção transversal de um eixo de aço 18CrNiMo7-6 com um revestimento aplicado pelo processo de LC.

Figura 2.12: Peça de aço liga 18CrNiMo7-6 revestida pelo processo LC.



Fonte: Próprio autor.

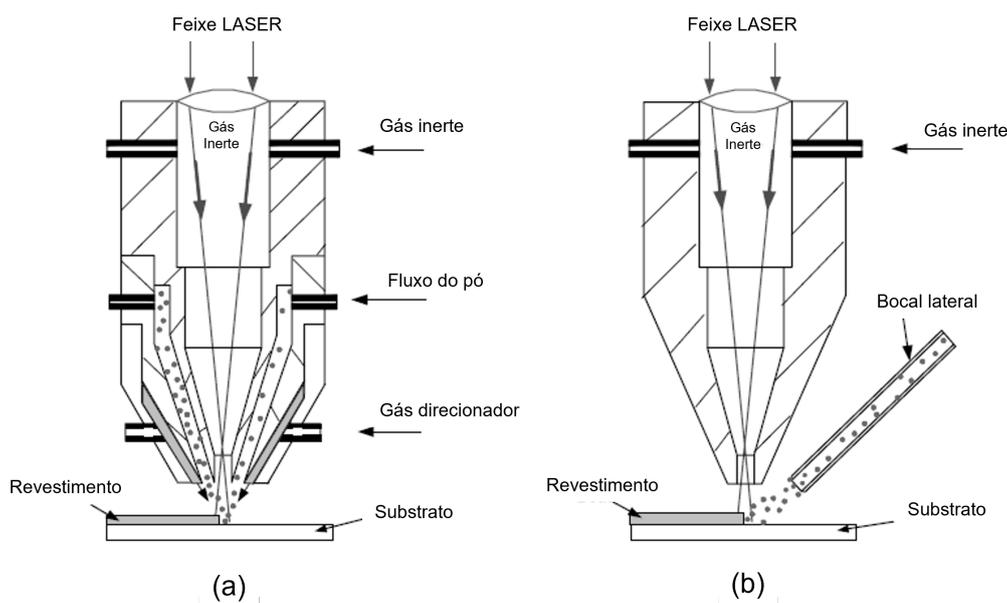
Inicialmente, a manufatura aditiva com o revestimento a laser evoluiu a partir da necessidade de recuperar matrizes de estampagem desgastadas. Atualmente, como afirmam Francisco, Santana e Rezende (2020), a tecnologia do processo LC vem se consolidando nas indústrias de óleo e gás como solução para aumentar a vida útil de componentes maciços que trabalham sob condições severas de operação em ambientes de alta pressão e altamente corrosivos. Como a fabricação desses componentes pesados em material nobre é economicamente inviável, o recobrimento com materiais que apresentem boa resistência a esses fatores torna-se uma opção vantajosa.

O processo utiliza tecnologia laser, softwares de CAD/CAM, sensores para controle, braços robóticos e baseia-se nos princípios da manufatura aditiva e da metalurgia do pó. A literatura mostra que existem várias nomenclaturas para se referir ao mesmo processo. Segundo Toyserkani, Khajepour e Corbin (2004), para deposição de material com o objetivo de revestimento de uma superfície, denominada substrato, usam-se os termos *Laser Cladding*, *Laser coating*, *Laser powder deposition* e *Laser surfacing*. Apesar da grande variedade de nomes, todos eles se referem ao processo de deposição de finas camadas de pó metálico a ser fundido ao substrato por uma fonte de calor a laser. Já DebRoy et al. (2018) divide o processo em duas principais categorias: o processo de LC por injeção coaxial de pó ou por injeção lateral. Nos dois casos, o método é definido como processo de Deposição de Energia Direcionada (*DED = Directed Energy Deposition*). Outros dois métodos também muito utilizados são os que utilizam alimentação lateral a fio, e os que utilizam pós pré-depositados em uma superfície, denominado *Powder Bed Fusion (PBF)* ou fusão em leito de pó. Os experimentos realizados nesse trabalho utilizaram peças

processadas utilizando a tecnologia DED-LC, que será o foco da fundamentação teórica.

Os métodos de preenchimento por injeção do pó podem ser realizados com 2 tipos de bocais diferentes: por alimentação coaxial ao feixe de laser, como mostrado no item (a) da Figura 2.13, ou por alimentação externa ou lateral ao bocal que emite a fonte de calor, como mostrado no item (b) da mesma imagem. Para revestir as peças desse experimento foi utilizado o método de aspersão do pó coaxialmente ao feixe de laser (a).

Figura 2.13: Bocais de deposição por a) alimentação coaxial e b) alimentação lateral



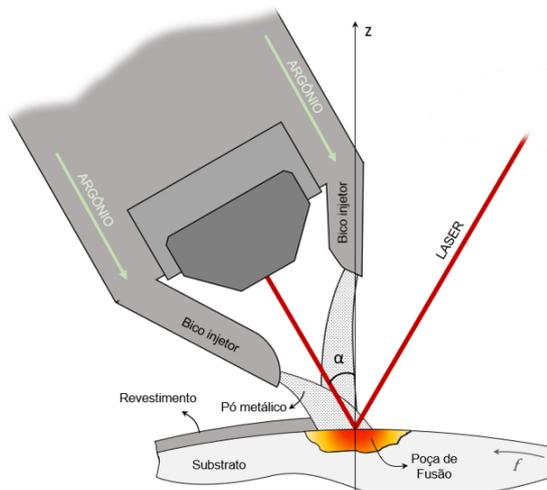
Fonte: Toyserkani, Khajepour e Corbin (2004)

Para Toyserkani, Khajepour e Corbin (2004), o método da injeção do pó (DED) vem se confirmando ao longo dos anos como o mais efetivo processo de deposição, pelo fato do feixe de laser atravessar o fluxo de pó e atingir a zona da poça de fusão por completo, sem ser obstruída por exemplo por um fio rígido, como ilustrado pela Figura 2.14. Além disso, esse método é capaz de produzir peças com geometria complexa em processo contínuo de deposição, com a integração de softwares de CAD/CAM que separam a deposição de material em camadas, mesmo princípio utilizado nas impressoras 3D convencionais. Esse foi o método selecionado para revestir as peças utilizadas nesse estudo.

O método DED-LC se difere dos outros métodos de manufatura aditiva, como observado por Kies et al. (2020), por permitir altas velocidades de avanço na deposição em ambiente aberto e com atmosfera protetiva localizada. Além disso, em comparação ao processo PBF, é capaz de depositar material de 2 a 10 vezes mais rápido, com a vantagem de não precisar ocorrer enclausurado em ambiente controlado, conforme afirma DebRoy et al. (2018), permitindo a aplicação de recobrimentos em peças de grande porte.

Uma das vantagens da deposição em pó metálico é que a composição do material do revestimento pode ser facilmente modificada por meio da combinação com diferentes ligas. Por outro lado, a adição por fio metálico pode ser usada em superfícies mais grosseiras,

Figura 2.14: Bicos injetores de pó metálico para o processo de revestimento por LC.



Fonte: Próprio autor.

além de ser um método mais limpo, uma vez que menos material é perdido em comparação com a aspersão do pó. Geralmente, fios metálicos são comercializados a custos mais baixos, mas sua composição química é padronizada, e variações com aditivos são mais limitadas e só podem ser obtidas através do revestimento dos fios com outros materiais.

2.5.1 Parâmetros do processo DED-LC

A potência necessária do laser para esse tipo de processo depende dos materiais do substrato e do revestimento, e da taxa de deposição almejada. Para melhor controle de processo, podem ser utilizados controladores de temperatura e até sistemas de visualização computadorizada. O laser pode ser emitido e conduzido através de um fio de fibra ótica. O feixe se propaga pelos fios, atravessa lentes convergentes e reflete em espelhos que o direcionam para a saída do bocal. A peça então é fundida localmente na região atingida pelo laser, gerando uma região de metal líquido denominada poça de fusão (*melted pool*). Para evitar contaminação e oxidação dessa região, o processo deve ser protegido por um gás inerte, usualmente o argônio, podendo ser injetado coaxialmente com o bocal ou paralelamente, em alguns casos servindo também como gás de transporte do pó metálico para evitar a contaminação da liga.

Dois parâmetros determinantes para a eficácia do processo são a potência do laser P_L (watts) e a velocidade de avanço v (mm/s). A relação entre eles está diretamente relacionada com o tamanho da poça de fusão e com a taxa de diluição. Já a quantidade de pó adicionado ao processo impacta na taxa de deposição e na temperatura da região. Segundo Borges et al. (2010), a taxa de deposição Q é dada em mm^3/s e pode ser obtida conforme a Equação 2.12:

$$Q = A_L \cdot v \quad (2.12)$$

em que A_L é a área do feixe do laser em mm^2 .

A velocidade de avanço do bocal tipicamente varia de 5 a 25 mm/s, e influencia o tempo de duração do processo e a quantidade volumétrica de calor depositada considerando o tamanho da zona termicamente afetada (ZTA) e a diluição dos componentes metálicos. Segundo Lucena (2020), o aporte térmico A_T fornecido pelo laser para fundir o pó metálico ao substrato pode ser calculado conforme Equação 2.13, dado em J/mm^2 :

$$A_T = \frac{P_L}{v \cdot \phi_L} \quad (2.13)$$

em que ϕ_L é o diâmetro da mancha focal do feixe de laser na peça, em mm.

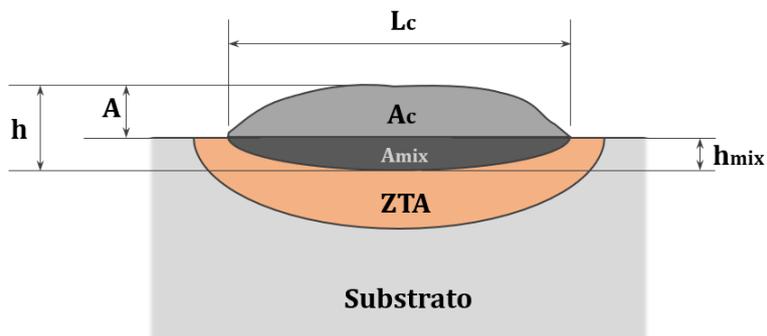
Outra variável relevante para uma execução adequada do processo é o posicionamento adequado do cabeçote de deposição em relação ao substrato. Basicamente duas dimensões são importantes: o ângulo α do cabeçote com relação ao eixo Z, como mostrado na Figura 2.14; e a distância d_B (*stand-off*) entre o cabeçote e a peça. Borges et al. (2010) descreve que essa distância varia tipicamente entre 8 e 15 mm, de acordo com a potência do laser e velocidade de avanço do bocal escolhidas.

Uma das vantagens do processo LC frente a outros processos de deposição como a soldagem convencional é a baixa taxa de diluição D_L do material do substrato, o que implica em uma ZTA menos extensa. Em sua tese, Ya (2015) define a taxa de diluição através da razão entre a área da porção diluída entre revestimento e substrato (A_{mix}) com a área total do cordão ($A_{mix} + A_c$), indicadas na Figura 2.15 adaptada de Correia (2018). De maneira equivalente, considerando uma largura fixa do cordão igual a L_C comum para as duas áreas, a diluição pode ser calculada de forma aproximada utilizando as alturas h_{mix} e h através da Equação 2.14:

$$D_L[\%] = \frac{h_{mix}}{h} \times 100 \quad (2.14)$$

Para Toyserkani, Khajepour e Corbin (2004), a diluição é a porcentagem da mistura entre o substrato e o revestimento, e seu valor aumenta proporcionalmente à medida que aumenta o tempo de interação dos materiais com a fonte de calor, evento que ocorre diminuindo a velocidade de avanço ou aumentando a potência do laser, situação mostrada na Figura 2.16. Os valores aceitáveis para diluição estão compreendidos entre 2 e 10%. Taxas de diluição elevadas acarretam a mistura e conseqüente alteração da composição química dos materiais na poça de fusão, o que pode afetar as propriedades metalúrgicas que se deseja obter com o revestimento aplicado – como por exemplo resistência ao desgaste ou à corrosão. Por outro lado, regiões com diluições muito pequenas apresentam o risco de não promover a ligação metalúrgica completa com o substrato, o que pode desencadear no

Figura 2.15: Vista esquemática da seção transversal de um cordão depositado por LC.



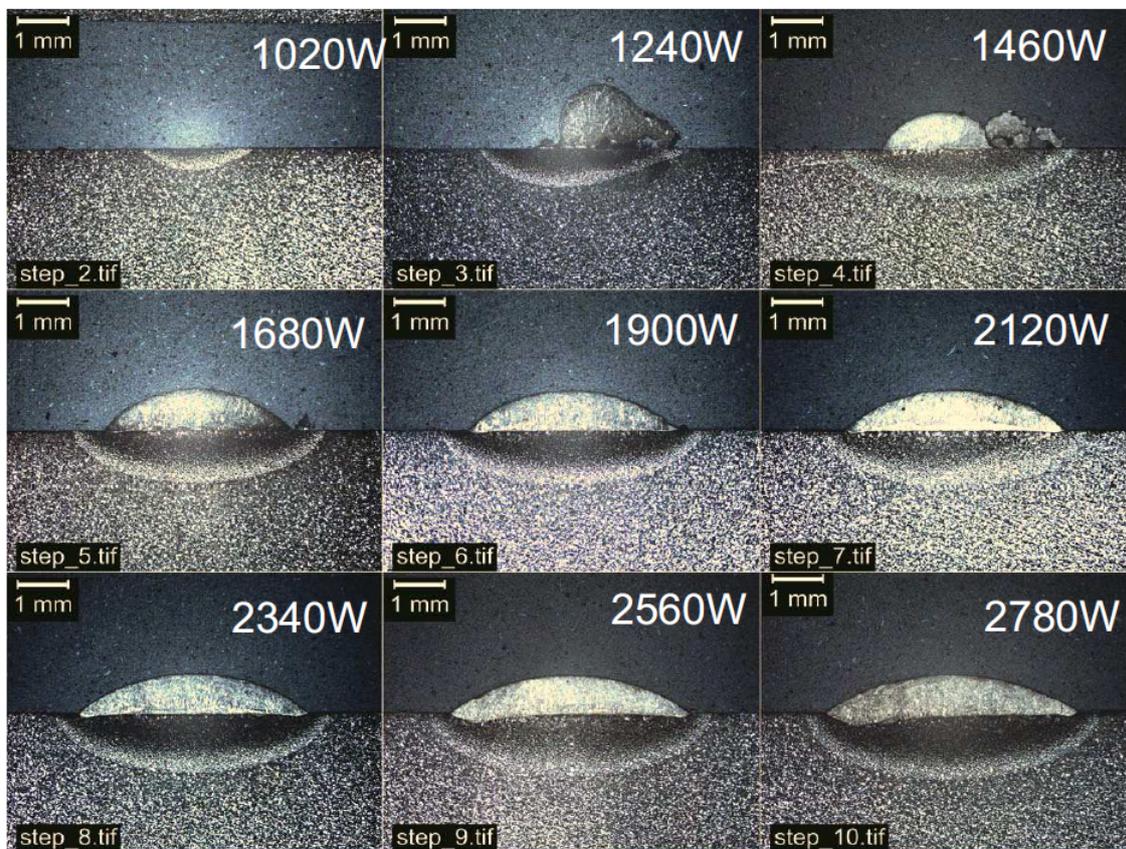
A – Altura do cordão acima do substrato
 Ac – Área do cordão acima do substrato
 Amix – Área da porção diluída no substrato

h – Altura total do cordão do revestimento
 h_{mix} – Altura da porção diluída do substrato
 L_c – Largura do cordão do revestimento

Fonte: Imagem adaptada de Ya (2015).

destacamento do recobrimento.

Figura 2.16: Influência do aumento da potência do laser nas taxas de diluição.



Fonte: Ya (2015).

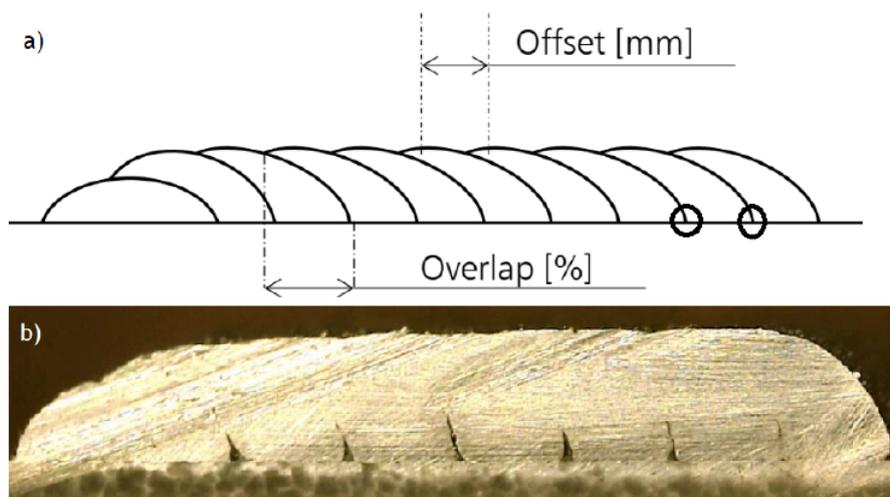
Ainda utilizando o esquema da Figura 2.15, outro parâmetro que influencia na deposição adequada de material é a razão $\frac{L_c}{A}$. Segundo Correia (2018), as condições ideais

para uma boa qualidade de revestimento ocorrem quando a largura L_c é de 3 a 4 vezes a altura do cordão A . Esse parâmetro está diretamente relacionado com a largura do cordão e a sobreposição entre os cordões que determinará a quantidade necessária de passes para o total preenchimento do canal. Conforme mostrado na Figura 2.17, o passo dado pelo cabeçote DED-LC entre um cordão e outro (definido por *offset*) determinará também a sobreposição (ou *overlap*) entre os cordões que compõem a largura total da camada revestida. Dependendo da altura A e da largura L_c , os valores de *overlap* podem estar relacionados com o aparecimento de defeitos na linha de fusão como falta de material, trincas e porosidades na interface entre os materiais. Esse valor pode ser calculado pela Equação 2.15:

$$O_v[\%] = \frac{1}{L_c} \cdot \left(\frac{n_p \cdot L_c - L_A}{n_p - 1} \right) \times 100 \quad (2.15)$$

em que L_A é a largura total do canal a ser preenchido e n_p é o número de passes (ou cordões) contidos no comprimento L_A .

Figura 2.17: (a) Definição dos parâmetros *offset* e *overlap*. (b) Vista em corte do revestimento mostrando os defeitos de ligação.



Fonte: Correia (2018).

Outras variáveis que interferem nas características finais da estrutura do revestimento são as características químicas e físicas do material utilizado, como por exemplo seu ponto de fusão, soldabilidade, tensões superficiais da fase líquida, condutividade térmica e reflexibilidade do laser. Em resumo, quando comparado com outros processos de revestimento, o processo DED-LC apresenta vantagens por promover boa adesão com o substrato com baixa diluição e ZTA de baixa extensão. Isso ocorre porque as interações localizadas do laser com os materiais (pó e substrato) ocorrem de forma concentrada em uma área pequena e duram pouco tempo. Consequentemente a taxa de resfriamento durante o processo é muito intensa, variando entre 3×10^3 e 3×10^4 K/s de acordo com

DebRoy et al. (2018), que observa também que as temperaturas de fusão de diferentes ligas podem variar de 900 a 2.000 ° C, dependendo da composição química. Por esse motivo, as temperaturas de pico na poça de fusão podem atingir os 2.500 ° C de acordo com a potência selecionada para o laser.

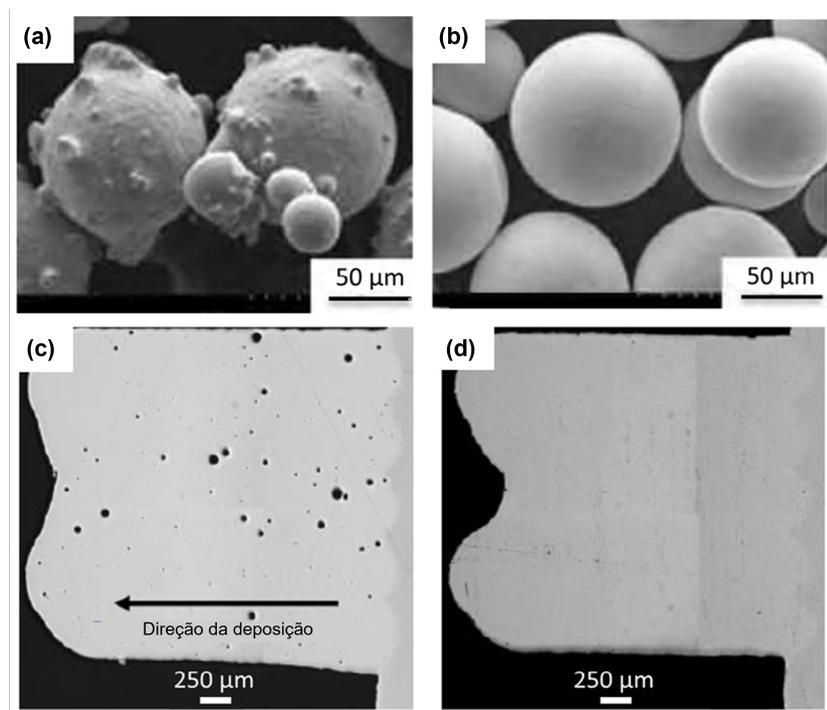
A relação entre a geometria da peça e a taxa de deposição do material também é uma limitação importante. Com aspersão do pó metálico, é possível obter camadas finas de 0,1 mm de espessura a uma taxa de deposição de 0,5-1,0 g/min. Em estruturas mais robustas, pode-se atingir uma taxa de deposição de até 150 g/min. Devido ao rápido aquecimento, fusão e solidificação de uma liga por uma fonte de calor em movimento, diferentes regiões do revestimento sofrem ciclos constantes de aquecimento e resfriamento, afetando diretamente sua microestrutura e propriedades mecânicas, além de possibilitar o surgimento de uma série de defeitos característicos desse processo. Como forma de minimizar esses defeitos, é preciso fazer a escolha adequada das ligas e da qualidade do pó metálico a ser utilizado no processo.

2.5.2 Morfologia e estrutura dos revestimentos

Para realização dos processos de manufatura aditiva (MA), um dos fatores de maior importância é a qualidade do metal de adição. As propriedades dos grãos do pó metálico como tamanho e morfologia dos grãos ditam a fluidez do pó durante o processo. Em comparação com o PBF, o processo DED é menos sensível a variações das propriedades químicas e permite uma maior heterogeneidade de sua composição. Segundo Ning et al. (2021), no caso dos pós metálicos, parâmetros como escoabilidade, distribuição granulométrica e morfologia dos grãos são determinantes no desempenho desse material durante o processo de fusão com o substrato. Na Figura 2.18 é feita uma comparação entre as morfologias de grãos de pó metálico fabricados pelo processo de atomização a gás (*gas atomization* = GA) e grãos fabricados pelo processo de eletrodo rotativo de plasma (*plasma rotating electrode process* = PREP). As imagens obtidas com um microscópio eletrônico de varredura (MEV) mostram também a influência de cada morfologia na qualidade final do revestimento. DebRoy et al. (2018) reforça que pós com distribuição uniforme de tamanhos de grão promovem uma fusão mais homogênea, além de garantir uma boa ligação entre camadas, boa estrutura cristalina, boas propriedades mecânicas e melhor acabamento superficial. Apesar do objetivo do processo GA ser produzir grãos com forma esférica, existem as chamadas partículas satélites que aumentam a rugosidade superficial do grão, como mostrado no item (a) da Figura 2.18. Além disso, o processo de produção por GA deixa bolhas de gás aprisionadas dentro dos grãos, e que são liberadas durante o processo de fusão, explicando uma maior incidência de porosidades no interior do revestimento.

As taxas de resfriamento também interferem na qualidade do recobrimento depositado. Segundo DebRoy et al. (2018), elas são importantes em dois momentos:

Figura 2.18: Imagem obtida com MEV da morfologia dos grãos atomizados fabricados pelos processos a) GA, e por b) PREP. Qualidade dos revestimentos feitos com pós fabricados por c) GA, e por b) PREP.



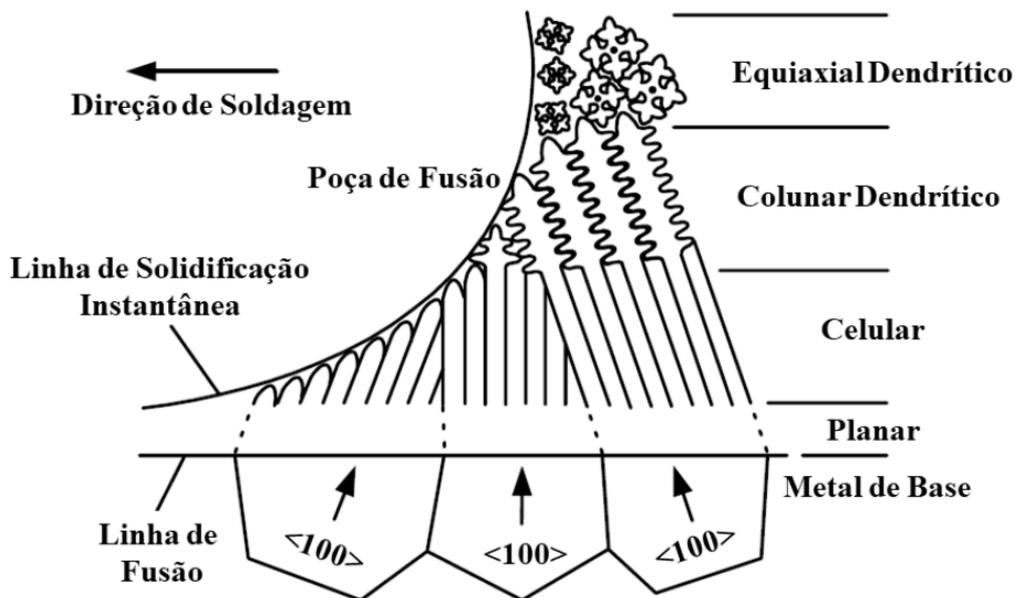
Fonte: DebRoy et al. (2018).

nas transformações que ocorrem na mudança da fase líquida para sólida, onde são definidas as características de solidificação do material, formando basicamente estruturas granulares de dendritas celulares, colunares e equiaxiais; e nas transformações que ocorrem no resfriamento entre 800 e 500 °C, que também promovem modificações na microestrutura sólida.

No processo de LC, essas modificações na estrutura granular e cristalográfica dos componentes dependem da fusão e da solidificação na poça de fusão. O processo de solidificação consiste no avanço de uma estrutura sólida em direção à fase líquida do material. Quando o metal sólido começa a nuclear e crescer no líquido, assume as estruturas mostradas na Figura 2.19. Yin et al. (2019) observa que em razão dos gradientes de temperatura a microestrutura nas proximidades da linha de fusão é composta por cristais planos, celulares e dendríticos. Há também na poça de fusão uma região onde ocorre a transição colunar-equiaxial mostrada na Figura 2.20, fenômeno de solidificação que depende da composição química da liga e das condições da solidificação. Segundo Zhang et al. (2018), os mecanismos de solidificação ocorrem por nucleação heterogênea em pós parcialmente fundidos (estruturas cristalinas equiaxiais) e no crescimento epitaxial a partir do fundo da poça de fusão (estruturas cristalinas colunares).

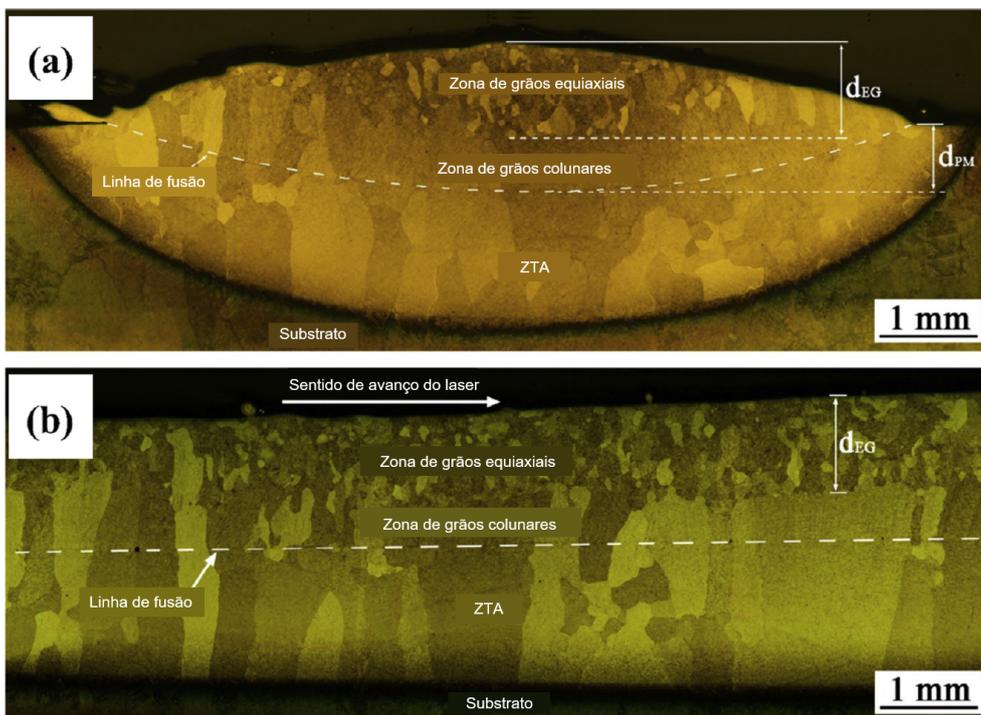
As características da estrutura cristalina tanto dos revestimentos quanto dos substratos podem ser avaliadas também através da análise do perfil de dureza desses materiais. Segundo Toyserkani, Khajepour e Corbin (2004) é possível perceber ao longo do

Figura 2.19: Variação no modo de solidificação através da zona fundida.



Fonte: Sousa et al. (2019).

Figura 2.20: Microestrutura da região do laser.

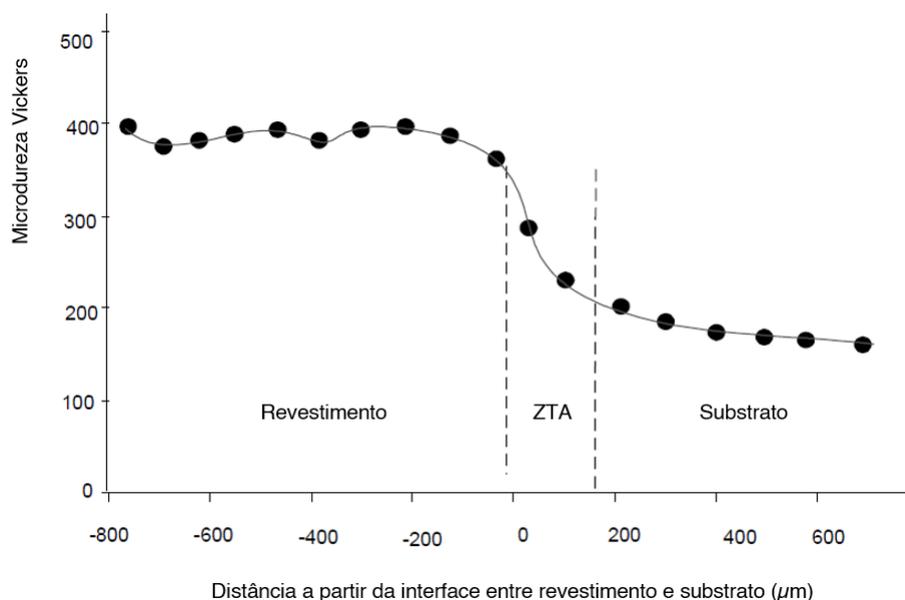


Fonte: Zhang et al. (2018).

revestimento um aumento de dureza partindo da interface entre os materiais em direção à superfície mais externa do revestimento, como mostrado no gráfico da Figura 2.21. Olhando para a direção oposta (no sentido do substrato), percebe-se na ZTA uma queda de dureza caracterizada por um processo de difusão de temperatura a ponto de provocar um segundo

revestimento nas proximidades da poça de fusão, resultados também observados por Souto (2013). À medida que avançamos em direção ao substrato saindo da ZTA, percebe-se em alguns casos um aumento de dureza, de acordo com o material e com sua estrutura antes do revestimento.

Figura 2.21: Perfil de Microdureza ao longo do perfil de uma amostra de revestimento Fe-Al em aço mole.



Fonte: Toyserkani, Khajepour e Corbin (2004).

Considerando a grande variedade de materiais fabricados na forma de pó metálico, existem infinitas combinações dos materiais em diferentes proporções para atingir o objetivo desejado com cada revestimento. Ya (2015) descreve os três principais tipos de material de deposição usados para fabricação desses revestimentos, que são os pós a base de cobalto (Co), níquel (Ni) e ferro (Fe). A produção desses pós pelo processo de GA permite que a liga se resfrie rapidamente formando tamanhos de grãos muito pequenos. Elementos como cromo (Cr), vanádio (V), molibdênio (Mo) e titânio (Ti) podem ser adicionados às ligas para melhorar as propriedades do material.

- **Ligas a base de cobalto (Co):** são utilizadas para melhorar a resistência ao desgaste de um material. Os elementos que melhor se combinam com esse material são o cromo, níquel, molibdênio, titânio e carbono (C). O cromo é adicionado ao cobalto para formar carbonetos e aumentar a resistência na matriz de cobalto, melhorando a resistência da liga à corrosão e oxidação. Já o níquel melhora a ductilidade do material e aumenta a resistência à formação e propagação de trincas. O molibdênio adicionado ao cobalto possui grandes átomos que deformam a treliça da estrutura do material e promovem maior resistência à matriz. Também favorece a formação de carbonetos que ajudam a impedir a movimentação das discordâncias, aumentando a resistência mecânica do material.

- **Ligas a base de níquel (Ni):** são mais vantajosas que as de cobalto pelo custo-benefício, uma vez que o cobalto é um material mais raro na natureza e, portanto, mais custoso. No geral, o níquel é misturado com ligas de cromo, boro (B), carbono, silício e alumínio (Al). Quando adicionados, carbonetos de boro e silício se formam no revestimento para aumentar a resistência ao desgaste e à corrosão. A adição de alumínio por sua vez auxilia na formação de fases intermetálicas, aumentando a dureza do material.
- **Ligas a base de ferro (Fe):** são usualmente misturadas com cromo, molibdênio, carbono, manganês (Mn) e tungstênio (W). Esses elementos garantem a formação de carbonetos que melhoram a resistência da liga ao desgaste, corrosão e oxidação, além de fortalecer a estrutura sólida do material.

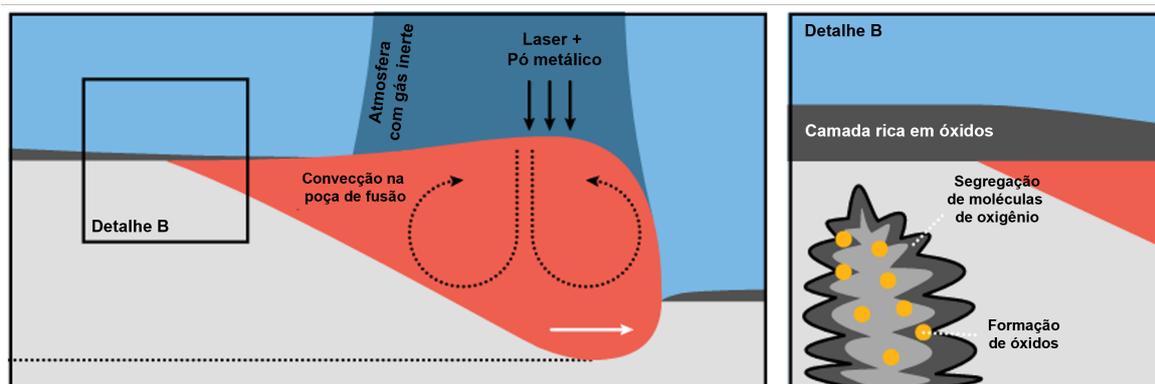
2.5.3 Principais tipos de defeitos

De forma geral, todos os processos que utilizam pó metálico para MA são suscetíveis a defeitos no interior da superfície depositada. Irregularidades do processo de deposição podem variar desde pequenos poros até grandes trincas, rachaduras, defeitos de ligação e cavidades. Segundo Ya (2015), não existe ainda um processo executado por LC que seja 100% isento de defeitos, mas existem meios para minimizá-los. A proteção contra oxidação é um desafio por conta da elevada quantidade de calor que deve ser protegida por uma atmosfera inerte. Durante o processo, regiões desprotegidas da zona fundida do material podem reagir com o oxigênio e formar óxidos indesejados, podendo acarretar defeitos e irregularidades microscópicas. Outro fator que pode desencadear o surgimento de defeitos é o contato do revestimento com superfícies propensas a retenção de umidade, como berços, suportes ou caixas de madeira. As partículas de água quando em contato com o metal variam a taxa de resfriamento de forma localizada, facilitando o surgimento de trincas e fissuras no material.

Apesar das vantagens da deposição por LC em ambiente aberto com atmosfera protetora localizada, a rápida velocidade de avanço do bocal traz também alguns problemas. Um deles é que a atmosfera protetora com gás inerte que é injetada na região da poça de fusão muitas vezes não é suficiente para proteger as regiões onde já foi depositado o recobrimento, e que ainda estão se resfriando. A Figura 2.22 apresentada por Kies et al. (2020) mostra de forma esquemática os efeitos da interação da camada recém depositada com o oxigênio.

Nota-se que esse fenômeno gera na superfície uma fina camada de óxidos. Na imagem da Figura 2.23 obtida com MEV, Kies et al. (2020) mostra um exemplo de camadas de óxidos de Fe e Mn formadas em um revestimento de passe único. Em uma operação de deposição de um único passe, essa camada pode ser removida por processos de usinagem, por exemplo. No entanto, em revestimentos que exigem múltiplas camadas, os óxidos se

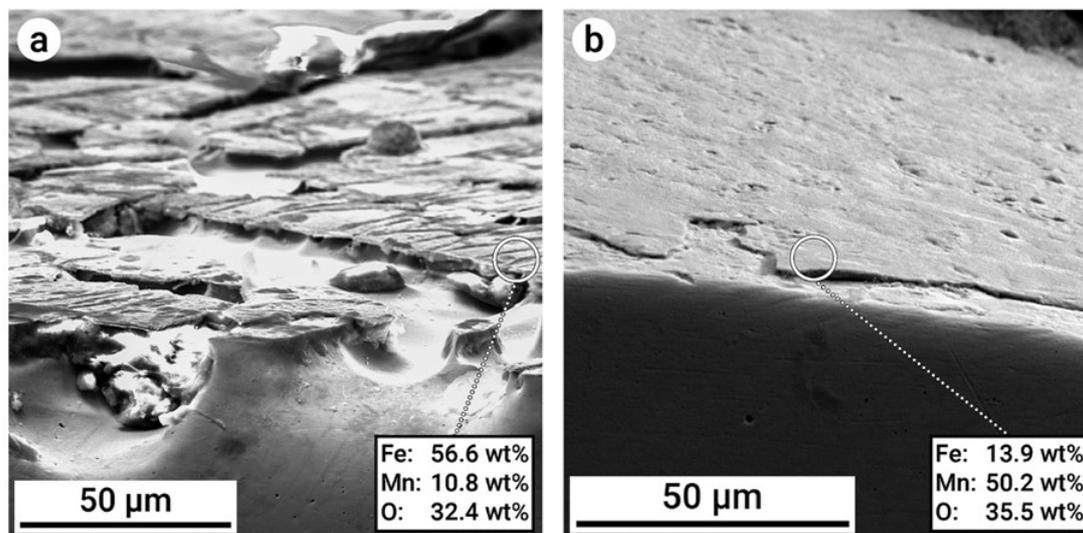
Figura 2.22: Efeitos da introdução do oxigênio na poça de fusão.



Fonte: Kies et al. (2020).

fundem novamente e se misturam dentro da poça de fusão, concentrando-se no interior da camada como óxidos precipitados e se acumulando nas regiões intergranulares, aumentando a incidência de trincas no material.

Figura 2.23: Formação de óxidos na superfície de amostras revestidas por LC com revestimentos de: a) liga com 3,0 % de alumínio; e b) liga com 0,6 % de alumínio em sua composição.



Fonte: Kies et al. (2020).

Além disso, pelo próprio processo natural de solidificação, as partículas de escórias se concentram na superfície do material. Novamente, isso se torna um problema para processos que exigem múltiplos passes, pois a usinagem pode não remover todos esses defeitos.

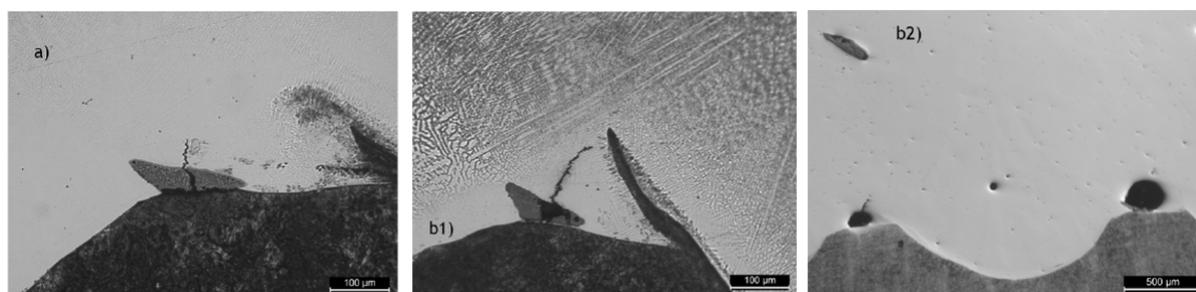
Por outro lado, como observa Ning et al. (2021), os ciclos curtos de aquecimento e resfriamento favorecem o aparecimento de trincas e poros, fatores que enfraquecem as propriedades mecânicas do material. E no caso de executar o processo com uma potência inadequada, o aporte térmico pode ser insuficiente para derreter todas as partículas do pó

metálico (considerando variações na morfologia e tamanho dos grãos de pó), o que leva à formação de poros maiores devido à falta de fusão. Para evitar isso, um dos controles de qualidade de processo é garantir uma distribuição granulométrica entre 45 e 150 μm . Os principais tipos de defeitos são classificados a seguir:

Falta de fusão

Também chamados de defeitos de ligação, ocorrem tipicamente por penetração inadequada da poça de fusão entre camadas ou entre revestimento e substrato, devido a energia insuficiente promovida pelo feixe de laser, resultando em poros lineares alongados ou rachaduras, como mostrado na Figura 2.24. Segundo DebRoy et al. (2018), poças de fusão mais profundas evitam espaços vazios de defeitos de ligação. Para Borges et al. (2010), os defeitos de penetração são afetados pela quantidade total de energia introduzida para fundir o substrato e o pó do revestimento. No caso do pó, é afetado por sua escoabilidade e pelo tamanho do grão. Ya (2015) argumenta que os defeitos ocorrem principalmente devido ao curto tempo de interação do laser na poça de fusão. Além disso, vazios entre os cordões podem ocorrer por *overlap* excessivo, podendo inclusive se propagar através de trincas.

Figura 2.24: Formação de poros alongados e rachaduras por falta de fusão.



Fonte: Correia (2018).

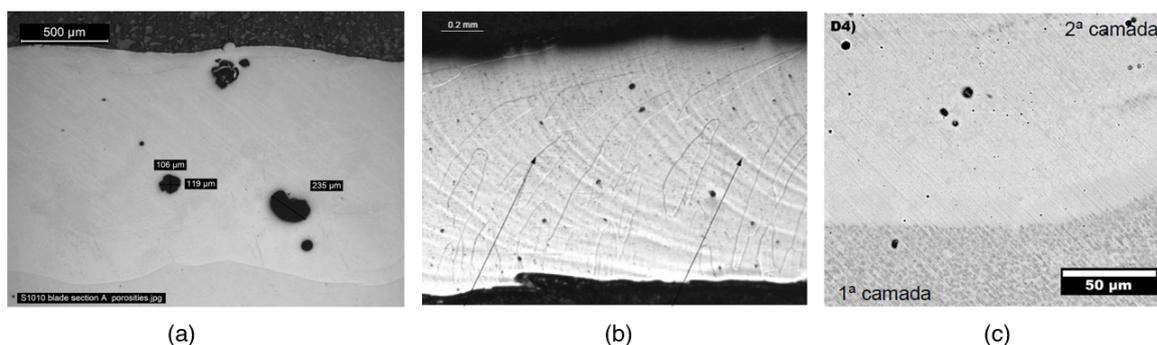
Porosidades

Para DebRoy et al. (2018) e Borges et al. (2010), porosidades são defeitos comuns ao processo de MA decorrentes de bolhas de gás aprisionadas dentro dos grãos de pó fabricados por GA, ou também pela penetração de gases externos quando a proteção do gás inerte é inadequada. Velocidades de avanço muito altas e potência insuficiente do laser também geram maior quantidade de poros.

Conforme afirmado por Correia (2018), é comum em revestimentos de múltiplas camadas a formação de poros a partir de bolhas de gás aprisionados nas camadas mais inferiores dos revestimentos. O fato é que, devido às altas taxas de resfriamento, algumas

bolhas de gás não conseguem ser expelidas do revestimento a tempo. Na Figura 2.25 são mostrados alguns defeitos de porosidade tipicamente encontrados em revestimentos aplicados por LC.

Figura 2.25: Formação de poros no interior de revestimentos aplicados por LC.



Fonte: (a) Ya (2015); (b) Toyserkani, Khajepour e Corbin (2004); e (c) Lucena (2020).

Outro tipo de porosidades são as microporosidades interdendríticas, que ocorrem no processo de solidificação quando o movimento do líquido não é suficiente para vencer as forças de contração do material na solidificação.

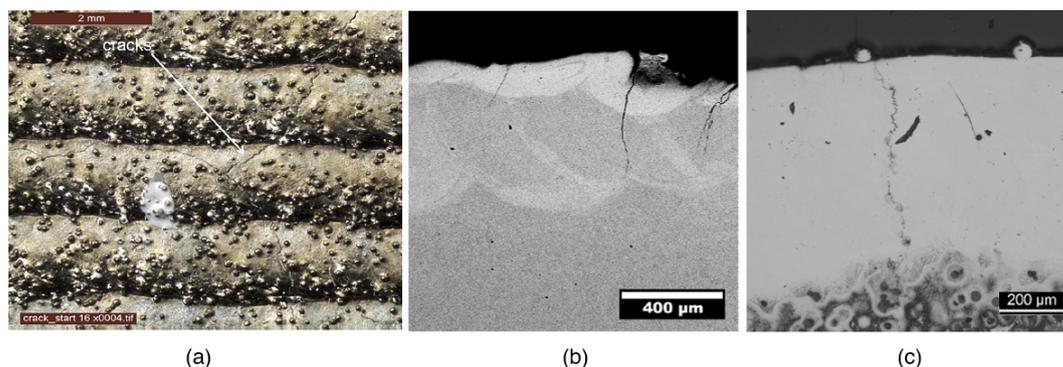
Trincas

Os diferentes tipos de trincas geralmente ocorrem a partir das contrações do material durante a solidificação e o resfriamento. As trincas de solidificação se propagam pelos contornos de grãos, e ocorrem em temperaturas mais elevadas, acima dos 200°C. Segundo DebRoy et al. (2018), as trincas entre camadas são comuns pois as temperaturas de solidificação da camada superior com a inferior são diferentes entre si, gerando diferentes taxas de solidificação e contração e acumulando tensões residuais no revestimento. Para Kies et al. (2020), as trincas são geradas a partir da formação de óxidos e de tensões residuais decorrentes de tensões térmicas relacionadas aos ciclos abruptos de aquecimento e resfriamento. Na Figura 2.26 são mostrados alguns desses defeitos.

Segundo Ya (2015), as trincas podem surgir tanto nos revestimentos quanto nos substratos. As chamadas trincas a quente ocorrem durante a solidificação do material, geralmente causadas por fatores metalúrgicos como composição química, taxas de solidificação e tamanho de grão; ou por fatores termomecânicos, como ciclos térmicos e tensões térmicas residuais. Muitas dessas trincas surgem devido ao excesso de tensões de contração no resfriamento, comum em processos de revestimento com multicamadas.

Já as trincas a frio são comuns em temperaturas menores que 200°C e podem surgir tanto no revestimento quanto na ZTA do substrato, ocorrendo pela presença de uma estrutura cristalina martensítica suscetível a essa fragilidade. Como estão associadas a elevadas tensões térmicas e residuais na zona de ligação entre os materiais, esse tipo

Figura 2.26: Formação de trincas na superfície e no interior de revestimentos aplicados por LC.



Fonte: (a) Ya (2015); (b) Lucena (2020); e (c) Correia (2018).

de defeito pode ser minimizado através da realização do pré-aquecimento adequado do substrato.

Inclusões e segregações

No interior da superfície do revestimento podem variar desde segregações até impurezas e oxidações. Segregações diminuem conforme aumentam as taxas de resfriamento. Quando se combina a redistribuição de soluto com o crescimento do sólido (estruturas dendríticas colunares), DebRoy et al. (2018) observa que o resultado é a variação da composição química no sólido, isto é, a solubilidade dos componentes varia conforme a temperatura e a fase do material.

2.6 Ensaios não destrutivos

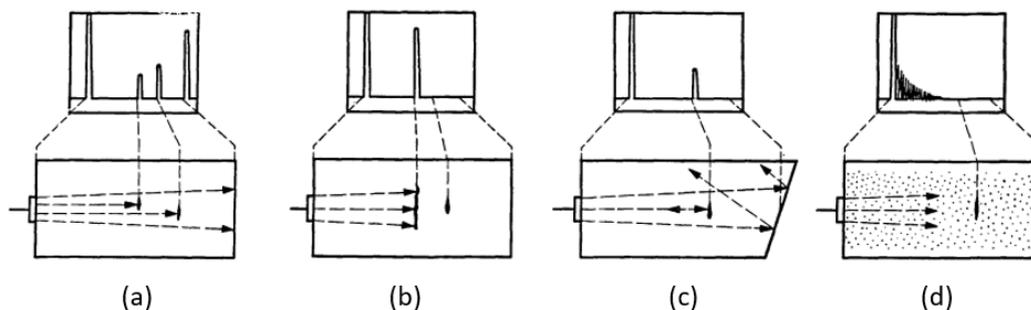
Nessa seção são detalhados alguns procedimentos de inspeção por ensaios não destrutivos usualmente aplicados durante o processo de manufatura de eixos e engrenagens fabricadas em materiais forjados e fundidos. O intuito dos ensaios é identificar discontinuidades internas e externas na peça, como trincas e porosidades que possam interferir nos resultados do ensaio de *runout* alguma forma.

2.6.1 Ultrassom

O ensaio de ultrassom é um dos métodos não destrutivos mais utilizados na indústria para detecção de defeitos internos em metais. Segundo Andreucci (2022), o objetivo do ensaio é, por meio de um transdutor (ou cabeçote) que emite pulsos sonoros através de vibrações emitidas por um cristal piezoelétrico, detectar discontinuidades que surgem durante os processos de fabricação das peças, como trincas e porosidades. Diferentemente de ensaios com raio-X, o exame ultrassônico em sua forma tradicional não apresenta a

visualização do defeito em si, mas permite dimensioná-lo através da triangulação dos sinais detectados em uma região avaliada sob diferentes ângulos, e através da análise na tela do aparelho da intensidade dos ecos de retorno das ondas emitidas, como mostrado na Figura 2.27.

Figura 2.27: Indicação do sinal de retorno em diferentes superfícies a) Peça com 2 defeitos; b) Peça com 2 defeitos, porém o maior impedindo a detecção do menor; c) peça com 1 defeito porém com superfície de fundo irregular; e d) anisotropia no material impedindo a passagem do sinal.



Fonte: Adaptado de Krautkrämer (2013).

Segundo Krautkrämer (2013), a não-homogeneidade do material (anisotropia) causada por grãos com orientação aleatória, presença de descontinuidades como poros e inclusões, granulação grosseira e segregações, todos são fatores que contribuem para a atenuação do sinal, dificultando a passagem do som pelo material e impossibilitando a análise. Em aços forjados, a velocidade acústica varia menos de 5% nas diferentes ligas, estando tipicamente entre 5,87 e 5,94 km/s. As frequências de operação típicas para esses materiais estão na faixa de 1,0 a 4,0 MHz. Em aços fundidos, a atenuação do som começa a aumentar devido à estrutura anisotrópica e granulação grosseira, além do alto grau de porosidade inerente ao processo de fundição.

Materiais metálicos sinterizados, com estruturas que melhor se aproximam dos revestimentos depositados por LC, apresentam naturalmente um grau de porosidade residual. Conforme afirma Krautkrämer (2013), essa porosidade aumenta a atenuação do sinal, e os materiais só podem ser medidos utilizando valores de frequências muito superiores aos utilizados usualmente em aços forjados, podendo variar de 10 a 25MHz. Como ilustrado pelo item (d) da Figura 2.27, porosidades isoladas podem não provocar alterações no sinal, mas agrupamentos de poros podem inclusive impedir a passagem do sinal por completo, impossibilitando a inspeção.

Andreucci (2022) descreve o comprimento da onda sonora que percorre um sólido por λ , e define que a dimensão do menor defeito detectável no ensaio de ultrassom é da ordem de $\frac{\lambda}{2}$. A relação entre a velocidade de propagação do som c e a frequência f_s da onda sonora emitida pelo transdutor é dada pela Equação 2.16:

$$c = \lambda \cdot f_s \quad (2.16)$$

Dessa forma, definindo $\lambda' = \frac{\lambda}{2}$, pode-se concluir que o menor defeito detectável dado uma velocidade de propagação do som no material e frequência sonora conhecidas é dado pela Equação 2.17:

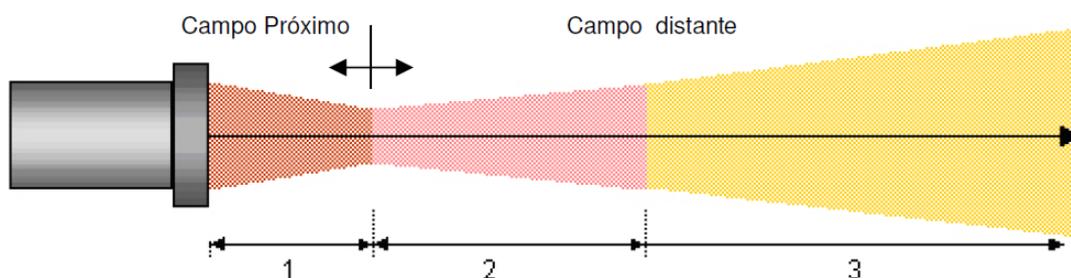
$$\lambda' = \frac{c}{2 \cdot f_s} \quad (2.17)$$

Como a velocidade de propagação do som é constante em um mesmo material, o único parâmetro que se pode variar é a frequência. Pela relação apresentada na Equação 2.17, é possível concluir que, quanto maior a frequência de operação, menor será o defeito detectável pelo ensaio.

A norma BS-EN-10228-3 (2016) traz orientações para a execução do ensaio em peças fabricadas em aço forjado. É necessário que a superfície da peça esteja usinada com uma rugosidade $R_a = 12,5 \mu\text{m}$ ou menor, e que as frequências típicas de operação variem entre 1,0 e 2,0 MHz.

A norma ISO-4386-1 (2012) por sua vez traz especificações para verificar a aderência do metal patente em mancais de deslizamento. Nesse caso, a rugosidade deve ser $R_a = 5,0 \mu\text{m}$ ou menor. Apesar das diferenças de material, o processo se assemelha a essa inspeção pela verificação da integridade da ligação na interface entre dois materiais. Diferentemente da inspeção de ultrassom em forjados, esse ensaio usa um transdutor mais sensível, com frequência de operação de 4,0 MHz.

Figura 2.28: Classificação teórica das zonas do campo sônico:



Fonte: Andreucci (2022).

Por se tratar de uma união metalúrgica, onde o pó metálico se funde com o material do substrato, as ondas ultrassônicas emitidas pelo transdutor percorrem os grãos da peça livremente. Além disso, mesmo utilizando um transdutor mais sensível para avaliação, as possíveis fissuras superficiais, quase imperceptíveis a olho nu, caem no campo próximo (ou zona morta) do cabeçote – conforme exemplificado na Figura 2.28 –, região onde, segundo Andreucci (2022) discontinuidades muito pequenas são difíceis de serem detectadas. O

mesmo ocorre com trincas e defeitos de ligação. Além disso, mesmo com uma zona morta pequena e sendo capaz de enxergar defeitos nas proximidades da superfície do eixo, o cabeçote operando com frequência de 4,0 MHz é capaz de detectar defeitos de, no mínimo, 1,20 mm de diâmetro.

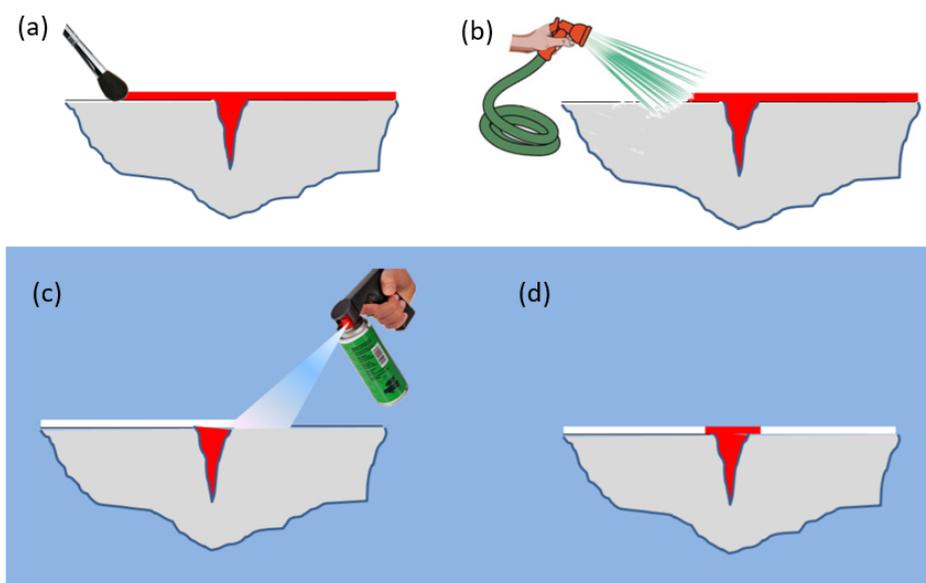
De forma aproximada, considerando-se que a velocidade acústica em revestimentos depositados por manufatura aditiva seja, no melhor dos casos, semelhante à velocidade em aços forjados ($c = 5,87$ km/s), e utilizando os sensores disponíveis na Zanini Renk para realização desses ensaios com frequências de operação que variam de 1,0 a 4,0 MHz, conclui-se que os mínimos defeitos detectáveis possuem dimensões de 1,46 mm (4,0 MHz) a 5,87 mm (1,0 MHz). De qualquer maneira, o ensaio é válido para identificar manchas ou defeitos maiores do que 1,46 mm de diâmetro.

2.6.2 Líquido Penetrante

Outro procedimento comumente utilizado na indústria para detecção de defeitos é o ensaio com líquido penetrante. Para poder executar o ensaio, a peça a ser inspecionada deve ter uma rugosidade $R_a = 6,5 \mu\text{m}$ ou menor. Conforme mostrado na Figura 2.29, em temperatura ambiente, o componente a ser avaliado é coberto com um líquido de baixa viscosidade e alta capilaridade, podendo ser colorido ou fluorescente. Conforme especificações da norma BS-EN-10228-2 (2016), após um período de 10 a 30 minutos, o líquido é removido da superfície da peça com jato de água sem pressão. A peça é seca com papel absorvente, e são aguardados mais 5 minutos para garantir a secagem completa da água. Na sequência, a peça é novamente recoberta, dessa vez com líquido revelador de alta volatilidade. A parte líquida da substância evapora em alguns segundos, deixando na peça uma fina camada em pó branco. Nesse momento, o líquido penetrante que se acumulou em aberturas na superfície como trincas ou poros são então absorvidos pelo pó revelador, que indica os defeitos em vermelho e em contraste com o fundo branco da peça para melhor visualização.

Com esse ensaio é possível identificar trincas superficiais e fissuras no revestimento e também na união com o substrato nas extremidades laterais, indicando se houve ou não uma boa aderência na deposição com o processo de LC.

Figura 2.29: Etapas para realização do ensaio com líquido penetrante.



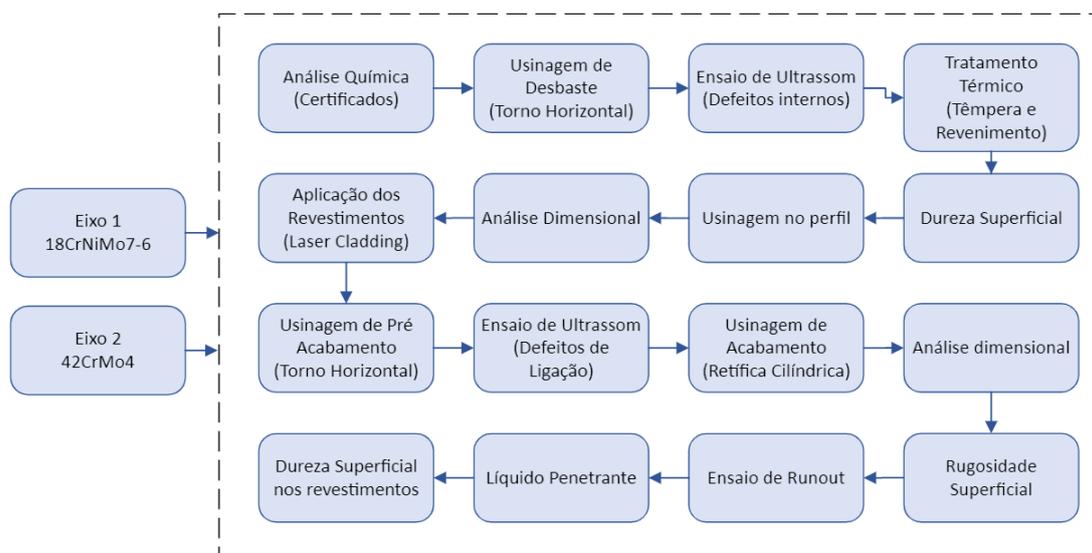
Fonte: Adaptado de Andreucci (2021).

Capítulo 3

Materiais e Métodos

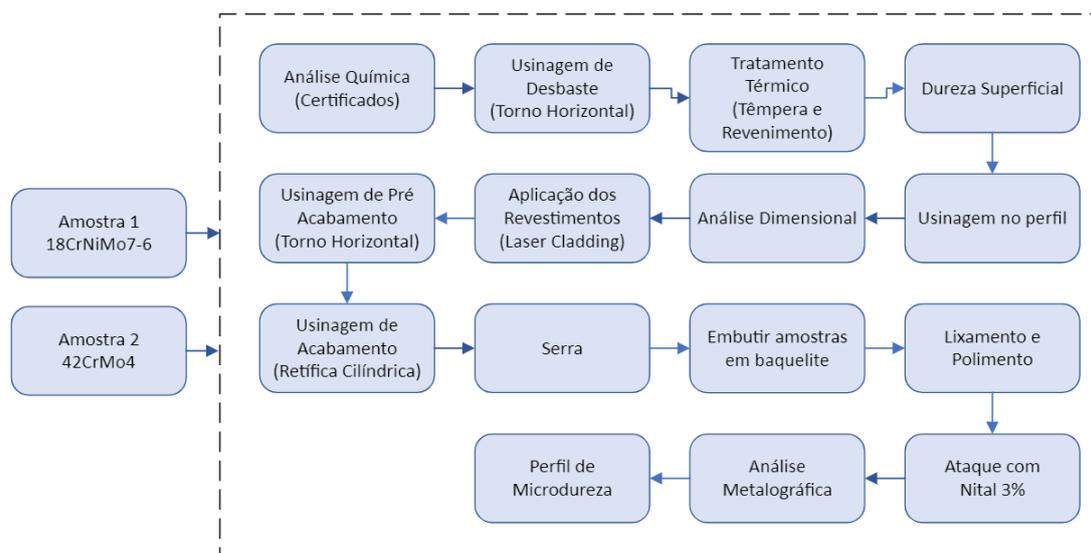
Neste capítulo, explora-se a relevância desse estudo frente ao mercado, mostrando que a demanda por serviços de revestimento para recuperação dimensional é crescente, mas que essa prática deve ser criteriosamente avaliada dependendo da região do eixo que será revestida. Em seguida, nos fluxogramas das Figuras 3.1 e 3.2, são listados os processos de fabricação dos corpos de prova, desde os processos de usinagem de preparação para receber as camadas de revestimento até às fases finais de acabamento das pistas de *runout* e análise metalográfica das amostras. Ao longo deste capítulo cada processo foi detalhado, desde a deposição do revestimento por meio do processo LC até os procedimentos de ensaio para análise de *runout* mecânico e total.

Figura 3.1: Fluxograma de fabricação dos eixos 1 e 2 para ensaios de *runout*.



Fonte: Próprio autor.

Figura 3.2: Fluxograma de fabricação das amostras 1 e 2 para análise metalográfica.



Fonte: Próprio autor.

3.1 Identificação da Demanda

A inspeção de *runout* de eixos rotativos de turbinas e turbo redutores é uma prática obrigatória na fabricação dessas peças para garantir o bom funcionamento dessas máquinas e para possibilitar a compensação desse erro em uma análise diagnóstica de vibração. No entanto, há poucas referências normativas sobre a inspeção de *runout*, tanto para fabricação – isto é, especificando quais são os processos de usinagem mais indicados para se obter uma faixa de *runout* dentro dos valores especificados – quanto para o processo de inspeção – faltam especificações de quais instrumentos são os mais indicados, métodos de preparação da peça, e até critérios de aceitação para diferentes peças, materiais e aplicações. Frente a esse cenário, percebe-se uma oportunidade de pesquisa para aprofundamento sobre o tema, buscando consolidar experimentalmente algumas práticas que sirvam como referência para elaboração de normas e procedimentos de execução do ensaio de *runout* em situações em que a recuperação dos eixos pela adição de revestimentos metálicos for necessária, como ocorre na recuperação pelo processo LC.

3.2 Fabricação dos Corpos de Prova

Nos itens que seguem estão descritos de forma detalhada os processos de fabricação utilizados para obtenção dos corpos de prova em forma de eixos, especialmente projetados para realizar os ensaios de *runout*.

3.2.1 Operações de pré-usinagem dos eixos (Substratos)

Para simular as etapas de fabricação de um eixo de um redutor de altas velocidades, foram fabricadas duas peças. Um dos eixos foi fabricado em material forjado de aço DIN 18CrNiMo7-6, comum para fabricação de engrenagens e eixos com pinhão integrado (peças dentadas), com composição química definida conforme Tabela 3.1. Esse material, dependendo da aplicação, tipicamente é submetido ao processo de têmpera e revenimento. Após atingir a temperatura de austenitização, durante a têmpera ocorre a transformação da microestrutura em martensita. Segundo Pan et al. (2022), nesse momento uma série de carbonetos se formam na matriz martensítica e a austenita se quebra no revenimento, aliviando as tensões e melhorando as propriedades mecânicas do material. A estrutura final é predominantemente composta de martensita revenida, bainita e austenita retida.

Tabela 3.1: Composição química do aço liga DIN 18CrNiMo7-6.

| Composição química do material (% em peso) | | | | | | | | |
|--|-------------|----------|-----------|---------|---------|-----------|-------------|-----------|
| 18CrNiMo7-6 | C | Si (max) | Mn | P (max) | S (max) | Cr | Mo | Ni |
| DIN EN 10084 | 0,15 - 0,21 | 0,4 | 0,5 - 0,9 | 0,025 | 0,035 | 1,5 - 1,8 | 0,25 - 0,35 | 1,4 - 1,7 |
| Eixo 1 / Amostra 1 | 0,18 | 0,3 | 0,55 | 0,006 | 0,008 | 1,58 | 0,29 | 1,58 |

Fontes: DIN EN 10084 (2008); Certificado de origem emitido pelo fabricante do aço.

O segundo eixo foi fabricado em material forjado de aço DIN 42CrMo4, comum para fabricação de eixos lisos não cementados, e possui composição química definida conforme Tabela 3.2. Como observado por Meysami et al. (2010), esse é um aço típico para processos de têmpera e revenimento, cuja fase dominante após o tratamento térmico é a martensita revenida.

Tabela 3.2: Composição química do aço liga DIN 42CrMo4.

| Composição química do material (% em peso) | | | | | | | |
|--|-------------|-----------|-------------|----------|----------|-------------|-------------|
| 42CrMo4 | C | Si (máx.) | Mn | P (máx.) | S (máx.) | Cr | Mo |
| DIN EN 10083-3 | 0,38 - 0,45 | 0,40 | 0,60 - 0,90 | 0,025 | 0,035 | 0,90 - 1,20 | 0,15 - 0,30 |
| Eixo 2 / Amostra 2 | 0,4 | 0,25 | 0,95 | 0,008 | 0,002 | 0,94 | 0,22 |

Fontes: DIN EN 10083-3 (2007); Certificado de origem emitido pelo fabricante do aço.

Os eixos foram projetados para que simulassem eixos reais de redutores de velocidade com dimensões usuais presentes nos escopos de fabricação da Zanini Renk. Além disso, por utilizar materiais nobres e de alto valor agregado, as peças deveriam ser preservadas após os ensaios, possibilitando o reaproveitamento em posteriores estudos ou na fabricação de outros componentes. Por esses motivos fez-se necessária a fabricação de duas amostras de tamanho reduzido e de mesmo material para possibilitar a destruição e corte nas seções dos revestimentos, permitindo assim a realização das análises metalográficas.

Para facilitar a identificação das peças na dissertação e na exposição dos resultados, os eixos utilizados no experimento foram classificados da seguinte forma:

- **Eixo 1:** fabricado em aço liga DIN 18CrNiMo7-6 (Dimensões acabadas: Ø 100 mm x 400 mm)
- **Amostra 1:** fabricado em aço liga DIN 18CrNiMo7-6 (Dimensões acabadas: Ø 50 mm x 150 mm)
- **Eixo 2:** fabricado em aço liga DIN 42CrMo4 (Dimensões acabadas: Ø 90 mm x 380 mm)
- **Amostra 2:** fabricado em aço liga DIN 42CrMo4 (Dimensões acabadas: Ø 50 mm x 140 mm)

A diferença dimensional entre os eixos 1 e 2 foi definida para facilitar a identificação dos materiais na fábrica, garantindo a rastreabilidade das peças, porém seguindo as mesmas profundidades nos canais e mesmas tolerâncias geométricas. O mesmo método foi aplicado nas amostras.

Comercialmente os aços são comumente designados pela classificação da AISI (American Iron and Steel Association) ou também pela SAE (Society of Automotive Engineers International). Para a liga DIN 18CrNiMo7-6 a classificação equivalente é o aço SAE/AISI 4820, e a liga DIN 42CrMo4 corresponde ao aço SAE/AISI 4140. Para que houvesse maior confiabilidade nos resultados, os eixos e as amostras foram fabricados a partir de materiais de uma mesma corrida de aciaria. Os eixos foram adquiridos em estado bruto e já tratados termicamente (normalização) pelas forjarias. O tratamento térmico de normalização consiste no aquecimento do material até que sua estrutura apresente uma fase austenítica homogênea, e em seguida resfriando lentamente ao ar calmo até a temperatura ambiente. Segundo Chiaverini (1979), esse tipo de tratamento é indicado para aços que sofrerão tratamento posterior de têmpera e revenimento, pois produz uma estrutura uniforme e reduz empenamentos.

Após as verificações iniciais realizadas na inspeção de recebimento de material – inspeção visual, dimensional e composição química via certificados do fabricante, as peças seguiram para a etapa de jateamento com granalhas de ferro, procedimento necessário para remover resíduos e carepas da superfície das peças antes da usinagem. Em seguida, os eixos foram encaminhados para início no processo de desbaste.

O primeiro passo é o faceamento das pontas na mandriladora, removendo sobremetal nas faces. Depois, são usinados os furos de centro nas duas faces para facilitar o transporte com olhais e para possibilitar o apoio do eixo entre pontas na máquina-ferramenta. Seguindo o processo, a peça foi enviada ao torno mecânico para uma primeira operação de desbaste no diâmetro externo, deixando a superfície com uma rugosidade média de $Ra = 6,0 \mu\text{m}$. Nessa etapa, foi removido material de modo a deixar 5,0 mm de sobremetal no diâmetro.

Em seguida, é realizada uma operação de inspeção por ultrassom em toda a extensão da peça para verificar a existência de defeitos internos que possam prejudicar a realização do experimento, e também para garantir a integridade da peça para quando for submetida a esforços de torção ou flexão, visto que um dos objetivos ao final desse estudo é que o material dos eixos seja disponibilizado para reaproveitamento.

Os eixos aprovados no ensaio de ultrassom foram então submetidos ao mesmo processo de tratamento térmico de um eixo de redutor. Inicialmente, os eixos são inseridos no forno elétrico para aquecimento a $890^{\circ}C$. Depois, as peças são retiradas do forno e imersas em um tanque com óleo especial para têmpera a $60^{\circ}C$. Por fim, são levadas novamente ao forno por mais algumas horas para o processo de revenimento, e em seguida resfriam lentamente ao ar calmo. Na Tabela 3.3 estão registrados o tempo de forno, temperatura e dureza das peças após a conclusão do processo.

DebRoy et al. (2018) destaca que existem ligas em que o tratamento térmico posterior pode ser realizado em materiais que passam por transformação de fase após os ciclos de aquecimento e resfriamento a ponto de alterar significativamente suas propriedades mecânicas (como ligas de Inconel 718 e Ti-6Al-4V), e que também existem outras ligas onde não é recomendado realizar o tratamento térmico de têmpera e revenimento após a aplicação dos revestimentos, devido ao aumento de tensões residuais nas camadas revestidas. Em seus estudos com recobrimentos de aço inoxidável martensítico AISI 431, Liu et al. (2016) verificou um aumento de até 42% nas tensões de tração no interior das camadas após realizar esses tratamentos. Por esse motivo, simulando também o processo padrão ao qual um eixo real de um redutor seria submetido, os tratamentos de têmpera e revenimento foram realizados somente nos substratos, antes do processo de recobrimento dos canais.

Tabela 3.3: Parâmetros utilizados no ciclo de tratamento térmico das peças.

| | Eixo 1 (18CrNiMo7-6) | | Eixo 2 (42CrMo4) | |
|------------------|----------------------|----------------|------------------|----------------|
| | Têmpera | Revenimento | Têmpera | Revenimento |
| Temperatura | $890^{\circ}C$ | $660^{\circ}C$ | $890^{\circ}C$ | $540^{\circ}C$ |
| Tempo de Patamar | 3 horas | 3 horas | 1,5 horas | 3 horas |
| Dureza Final | 220 HB | | 320 HB | |

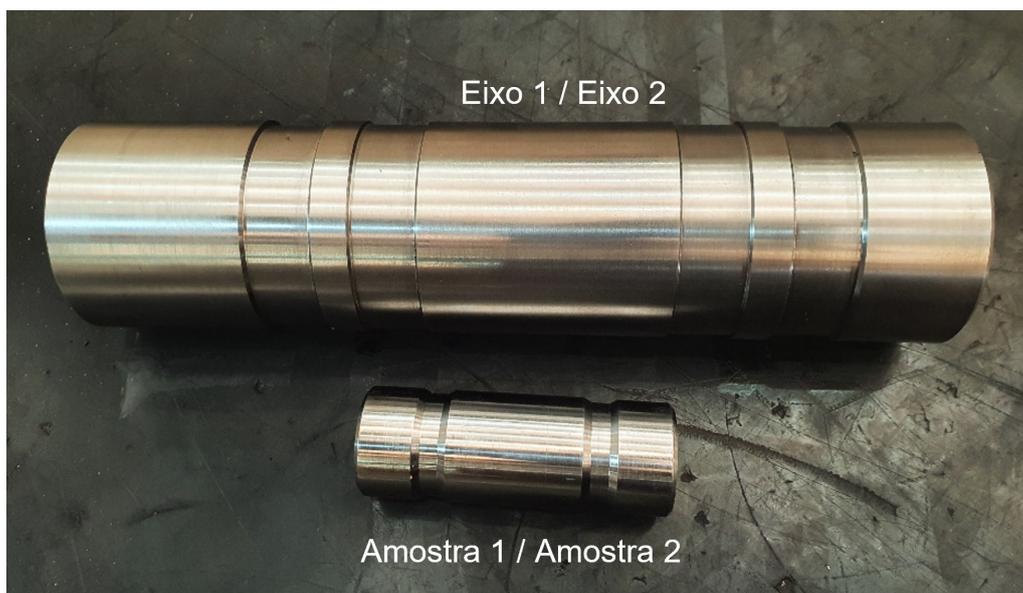
Fonte: Próprio autor.

Após o tratamento térmico e devidamente resfriadas, a superfície das peças são novamente jateadas com jato de granalha, dessa vez para remover os resíduos de óleo de têmpera e as carepas provenientes do tratamento térmico. Após medição da dureza superficial, as peças voltaram ao torno para desbaste no perfil de usinagem mostrado na Figura 3.3.

O desenho dos eixos nessa fase prevê a usinagem de canais com profundidades específicas para que, após o revestimento e usinagem de acabamento, fosse possível obter espessuras controladas do material depositado na superfície, conforme ilustrado na Figura 3.5. Particularmente para as amostras, devido ao tamanho reduzido, foram feitos somente dois canais com 2,0 mm de profundidade no raio e 15 mm de largura, um para cada revestimento em cada uma das peças. A espessura final estimada dos revestimentos é mostrada na Figura 3.6.

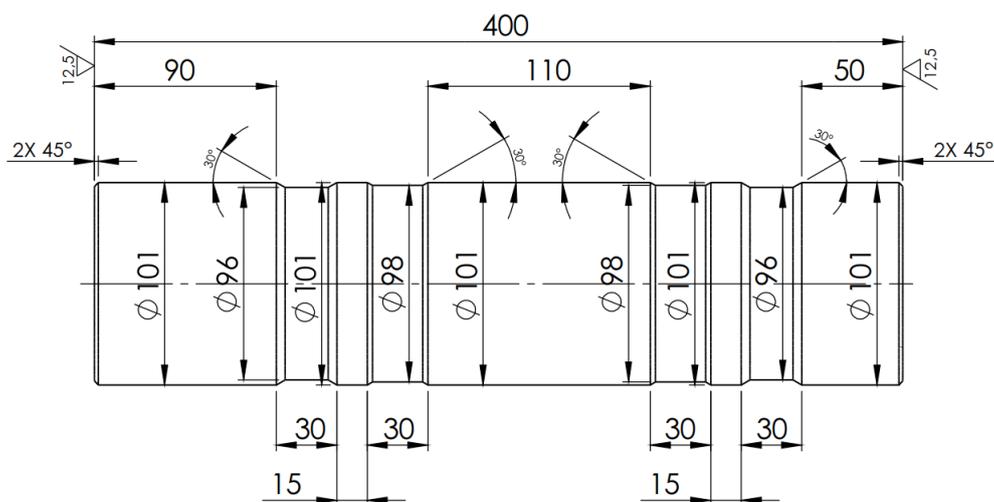
Após usinagem dos eixos e das amostras no perfil, as peças foram enviadas ao Controle de Qualidade para inspeção visual e protocolo das medidas reais conforme

Figura 3.3: Eixos e Amostras desbastados no perfil após tratamento térmico.



Fonte: Próprio autor.

Figura 3.4: Desenho de usinagem do Eixo 1 na fase de desbaste no perfil para aplicação do revestimento.



Fonte: Próprio autor.

especificado nos desenhos de fabricação. Liberadas pelo inspetor do Controle de Qualidade, as peças foram devidamente embaladas e enviadas ao fornecedor HRC, responsável pela deposição do revestimento.

3.2.2 Escolha das ligas de revestimento

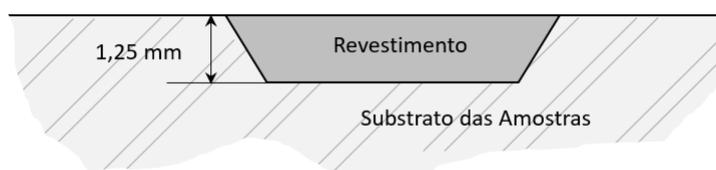
A escolha das ligas de pó metálico para revestimento de eixos deve considerar alguns fatores relacionados com as características de trabalho da peça que será recoberta. Particularmente para eixos de caixas de engrenagens redutoras e multiplicadoras, a torção e a deflexão são situações comuns no regime de trabalho desses equipamentos. Dependendo

Figura 3.5: Vista em corte mostrando a profundidade estimada dos revestimentos nos eixos.



Fonte: Próprio autor.

Figura 3.6: Vista em corte mostrando a profundidade estimada dos revestimentos nas amostras.



Fonte: Próprio autor.

da região, o desgaste por atrito também é um evento que deve ser evitado. Para cada uma dessas características existem ligas metálicas adequadas, variando suas propriedades dependendo das proporções de cada elemento adicionado na liga. Entendendo essa demanda sinalizada pela Zanini Renk, a empresa HRC Metalização LTDA. vem desenvolvendo juntamente com a Höganäs (fabricante dos pós metálicos) algumas ligas específicas de pós atomizados a gás (produzidos através da desintegração do metal líquido) para revestimento das diferentes regiões desses eixos, como colos de mancais e de vedação. Atualmente são utilizadas, na maioria dos casos, duas ligas metálicas que possuem composições químicas mostradas na Tabela 3.4.

Tabela 3.4: Composição química das ligas de pó metálico utilizadas no experimento

| Nomenclatura | Composição química (% em peso) | | | | | | | | | | |
|--------------|--------------------------------|------|-----|------|------|------|-----|-----|------|-----|------|
| | C | Mn | Si | P | S | Cr | Ni | Mo | Fe | W | Co |
| HGMET | 0,03 | bal. | 0,4 | – | – | 25,6 | 9,1 | 4,9 | 0,6 | 1,8 | bal. |
| X-402 | 0,01 | 0,3 | 0,6 | 0,01 | 0,01 | 12,2 | 4,2 | 2,6 | bal. | – | 4,7 |

Fonte: Certificados de origem emitidos pelos fabricantes.

- Liga HGMET: liga utilizada pela Zanini Renk para recuperação de diâmetros que serão submetidos a esforços compressivos e torcionais, como colos de alojamento de mancais de rolamento e colos de encamisamento por interferência de cubos e engrenagens.
- Liga X-402: liga utilizada pela Zanini Renk para recuperação de diâmetros nos quais é necessária uma alta resistência ao desgaste por abrasão, como colos de vedação

com retentores e anéis metálicos do tipo labirinto.

Ao enviar os eixos para realizar a aplicação dos revestimentos, as ligas de pó metálico foram definidas com base nas recomendações da própria HRC, considerando a consolidação do bom desempenho que esses materiais vêm apresentando no histórico recente de peças fabricadas na Zanini Renk e recuperadas pelo processo de LC. Com as ligas escolhidas, o fabricante do pó metálico (Höganäs) fornece o material com certificados de análise química e outras informações relacionadas com o desempenho do processo de deposição, como densidade, escoamento de Hall (ou escoabilidade) e distribuição granulométrica. Alguns desses dados são mostrados na Tabela 3.5.

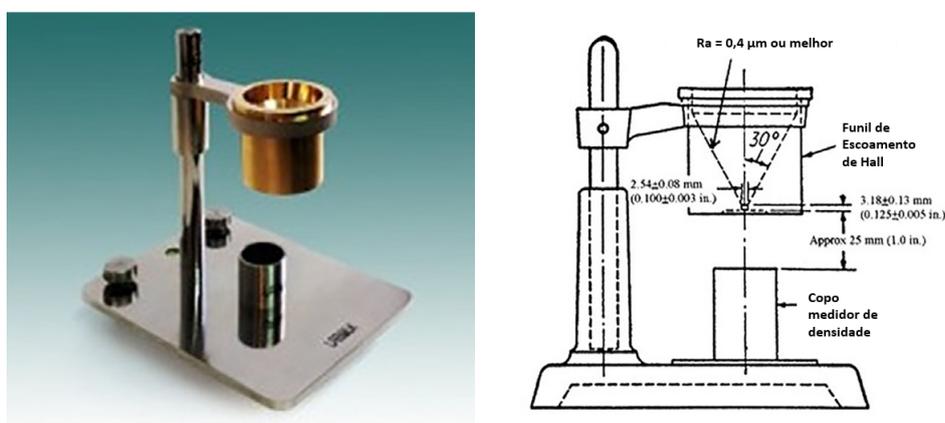
Tabela 3.5: Propriedades físicas das ligas de pó metálico

| Descrição | HGMET | X-402 |
|---|---------|---------|
| Fabricante do pó metálico | Höganäs | Höganäs |
| Código do produto | 097876 | 109769 |
| Lote do produto | 2999288 | 2883199 |
| Densidade aparente [g/cm ³] | 4,76 | 4,32 |
| Escoamento de Hall [s/50g] | 13,50 | 15,70 |
| Rendimento (ω) [%] | 87,7 | 99,17 |

Fonte: Certificados de origem emitidos pelo fabricante.

A velocidade ou Escoamento de Hall é um parâmetro utilizado para medir a escoabilidade de pós metálicos através de uma abertura em um dispositivo denominado Funil de Escoamento de Hall, mostrado na Figura 3.7. O dispositivo, fabricado conforme especificações da norma ASTM-B213-13 (2013), possui uma abertura de 2,54mm de diâmetro e que permite a passagem do pó metálico até uma balança com resolução de 0,01g. Quando a abertura do funil é liberada, o tempo é cronometrado até que a balança marque 50 g. O escoamento é então definido na unidade s/50g. O rendimento ω representa o valor em % da quantidade de grãos metálicos com diâmetros entre 53 - 180 μm .

Figura 3.7: Funil de Escoamento de Hall.

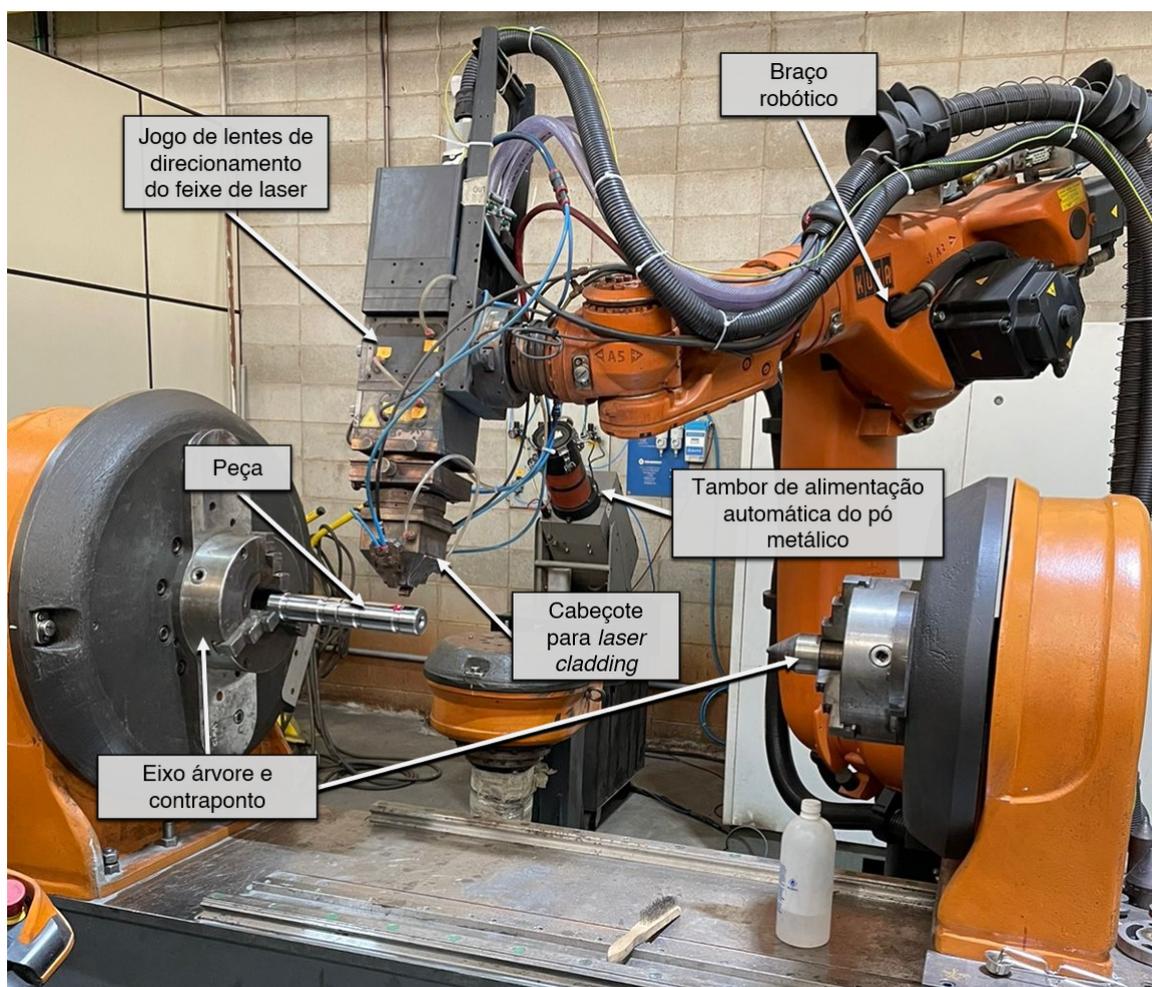


Fonte: Dai et al. (2021).

3.2.3 Processo de deposição do pó metálico (*Laser Cladding*)

De acordo com o tamanho das peças, o operador da máquina definiu a velocidade de rotação do eixo para que recebesse a deposição metálica de forma homogênea. É possível entender os componentes do equipamento de deposição por LC pela Figura 3.8, composto de uma estrutura semelhante a de um torno mecânico, com eixo árvore e contraponto, e um braço robótico onde está acoplado o cabeçote de deposição do pó metálico e cabeçote LaserLine que opera com fonte diodo-laser até 4,0 kW de potência.

Figura 3.8: Estrutura da HRC para deposição de pós metálicos pelo processo de Laser Cladding.



Fonte: Próprio autor.

Antes de serem utilizadas, as ligas permaneceram por algumas horas em uma estufa com temperaturas que podem variar de 60 a 200 °C, com o intuito de garantir que não haja umidade acumulada nas partículas do pó metálico. Para que o pó circule pelas mangueiras até o cabeçote, o sistema é pressurizado com argônio (Ar) a uma pressão de 3,5 bar, gás inerte necessário para que não haja contaminação ou oxidação da liga com possíveis resíduos encontrados em redes convencionais de ar comprimido. O operador da máquina alimenta o tambor de injeção do pó metálico mostrado na Figura 3.9 com a liga especificada

no processo.

Figura 3.9: Abastecimento do tambor de injeção de pó metálico.



Fonte: Próprio autor.

Para o Eixo 1, iniciou-se o processo com a deposição do pó metálico HGMET. O tambor é abastecido com esse pó e o sistema de pressurização é ligado. Nessa etapa, o primeiro jato de pó metálico é descartado para evitar deposição de outra liga que possa estar acumulada nas mangueiras e bocais. Antes de receber o pó metálico, a peça foi pré-aquecida com maçarico conforme imagem da Figura 3.10, chegando a temperaturas entre 400 a 450°C. Dessa forma, o resfriamento do material do revestimento se torna mais homogêneo, pois perde calor mais lentamente para a peça. Conforme observado por Jiang et al. (2016), essa etapa é essencial para minimizar as tensões residuais que surgem no substrato devido às diferentes condutividades térmicas e taxas de resfriamento entre revestimento e metal base, minimizando assim o aparecimento de trincas e fissuras na interface de união dos materiais.

O operador responsável por conduzir o processo faz um mapeamento da peça como mostrado na Figura 3.11, registrando no computador da máquina as coordenadas correspondentes aos pontos inicial e final do colo da peça onde será aplicado o revestimento. De acordo com o comprimento do colo e sua profundidade, além do material do pó e do substrato, o operador define a potência do laser e a velocidade de rotação da peça. Para esse experimento, foi definida uma potência de 4,0 kW com a peça rotacionando a uma velocidade periférica de 6,0 mm/s. Os parâmetros do processo utilizados em todas as peças estão definidos na tabela 3.6.

Figura 3.10: Processo de pré-aquecimento do substrato.



Fonte: Próprio autor.

Figura 3.11: Mapeamento dos canais para processo de deposição das camadas.



Fonte: Próprio autor.

O bocal utilizado é composto por dois bicos de injeção de pó dispostos segundo o método de alimentação coaxial, com uma distância de *stand-off* de cerca de 12 mm da peça, e um ângulo α de inclinação com relação ao eixo z (vertical) de 18° . Ao centro, o

Tabela 3.6: Parâmetros do processo de deposição por LC.

| Parâmetros | Eixos 1 e 2 | Amostras 1 e 2 |
|--|--------------|----------------|
| Temperatura de pré-aquecimento [°C] | 400 - 450 | 250 - 300 |
| Potência do laser (P_L) [W] | 4000 | 3000 |
| Velocidade de avanço (v) [mm/s] | 6,0 | 6,0 |
| Diâmetro da mancha focal do feixe de laser (ϕ_L) [mm] | 6,0 | 6,0 |
| Área do feixe de laser (A_L) [mm ²] | 9π | 9π |
| Aporte térmico (A_T) [J/mm ²] | 111,11 | 83,33 |
| Taxa de deposição (Q) [mm ³ /s] | 169,64 | 169,64 |
| Largura dos bicos injetores | 6,0 x 3,0 mm | 6,0 x 3,0 mm |
| Largura do canal na peça | 30 mm | 15 mm |
| Largura dos passes (cordões) | 6,0 mm | 6,0 mm |
| Quantidade de passes (cordões) | 7 | 3 |
| Quantidade de camadas | 4 | 3 |
| Razão L/A | 5,0 | 6,7 |
| Overlap | 33% | 25% |

Fonte: Próprio autor.

feixe de laser passa por um conjunto de lentes que direcionam os raios na superfície da peça concentrando-os na região onde será formada a poça de fusão. Além disso, os bicos injetores também têm alturas deslocadas entre si, configuração necessária para que o calor gerado pelo laser e refletido pela peça não danifique o equipamento, como já mostrado na Figura 2.14. O argônio flui pelos mesmos canais do pó, funcionando como meio transportador do pó metálico e formando também uma atmosfera protetiva.

Figura 3.12: Colo do eixo após deposição do revestimento.

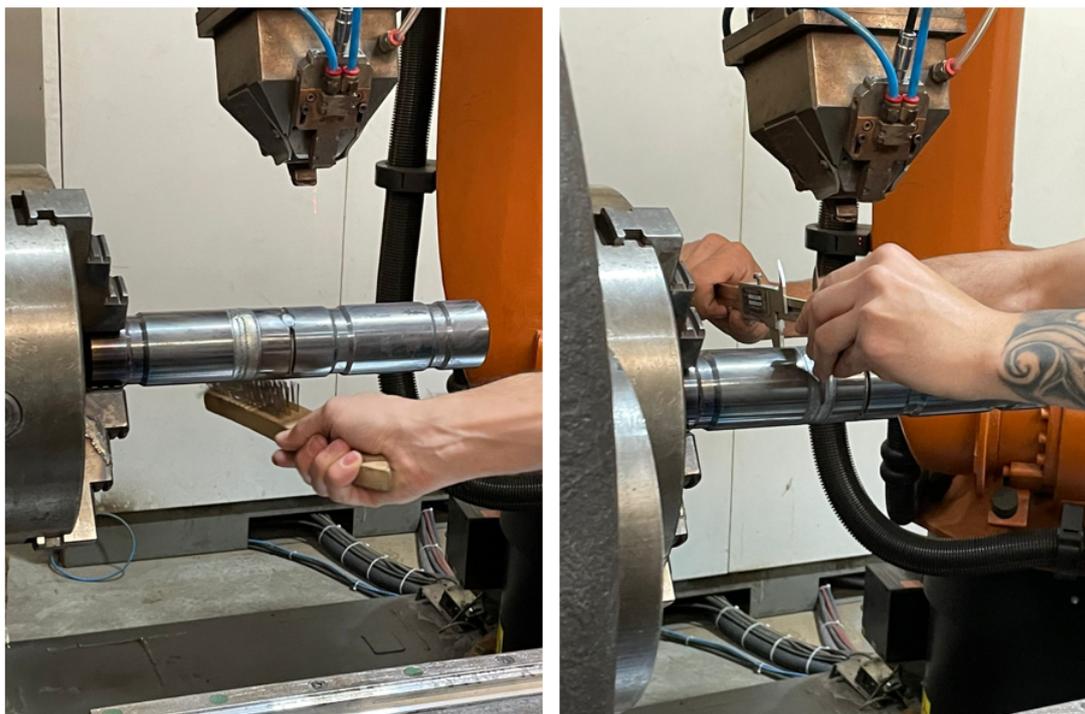


Fonte: Próprio autor.

Com a peça pré-aquecida, inicia-se o processo de revestimento. O pó metálico começa a ser bombardeado contra a superfície da peça através dos bocais em direção ao ponto de fusão, onde o feixe de laser derrete o material a temperaturas próximas aos 2.500 °C. Para proteger a poça de fusão onde o pó se funde ao substrato, o sistema de aspersão forma uma atmosfera de argônio nessa região para evitar a oxidação e o surgimento de substâncias contaminantes.

Para os eixos desse experimento, cada camada de revestimento levou cerca de 30 segundos para completar uma volta ao redor do diâmetro. Ao todo, em cada um dos canais, foram necessários 7 passes sobrepostos ao longo do comprimento para cobrir toda a largura do canal, e 4 camadas de revestimento para atingir o diâmetro final desejado, totalizando 28 passes em cerca de 15 minutos por canal preenchido. Conforme mostrado pela Figura 3.13, em alguns momentos entre uma camada e outra o operador confere o dimensional da peça e faz uma rápida limpeza superficial com uma escova de aço, com o intuito de desgrudar da peça as partículas de pó metálico que não se fundiram com o restante do revestimento.

Figura 3.13: Conferência das dimensões do revestimento e limpeza com escova de aço.



Fonte: Próprio autor.

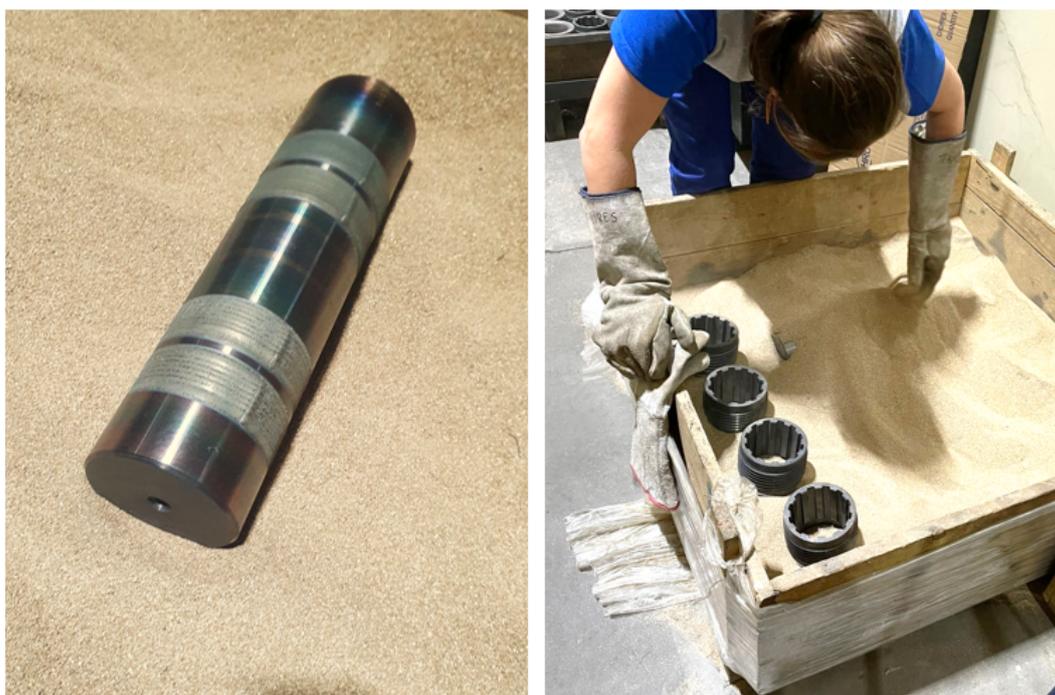
Conforme mostra a Tabela 3.6, os bocais de aspersão do metal de adição possuem formato retangular de 6,0 mm de comprimento por 3,0 mm de largura. Como a largura de cada canal é de 30 mm, e foram utilizados 7 passes para preencher todo o comprimento do canal, é possível calcular através da Equação 2.15 o *overlap* (O_v) do processo, ou seja, a porcentagem de sobreposição entre os passes. Os resultados são mostrados na mesma

tabela.

No eixo 1, ao preencher os dois primeiros canais com o mesmo revestimento, o operador esvazia o reservatório da máquina com o pó remanescente e abastece com a outra liga (X-402). Novamente antes de iniciar o processo, o operador descarta os resquícios de pó acumulados no sistema de injeção da máquina e avalia a temperatura superficial da peça, realizando novo aquecimento caso necessário. Na sequência, após novo mapeamento, a máquina começa a depositar a outra liga na peça. Após mais 15 minutos de deposição em cada canal, o processo de revestimento é finalizado, e o resultado é mostrado na Figura 3.12.

Rapidamente, com o auxílio de luvas térmicas, o operador retira a peça da máquina e a deposita em uma caixa - conforme mostrado na Figura 3.14 - com Vermiculita granulada, mineral constituído de silicatos hidratados de magnésio e alumínio utilizado como isolante térmico. Esse processo permite que a peça resfrie lentamente, com o intuito de evitar o aumento das tensões residuais decorrentes do processo e diminuindo a possibilidade de surgimento de trincas, poros e fissuras na superfície.

Figura 3.14: Resfriamento das peças em Vermiculita.



Fonte: Próprio autor.

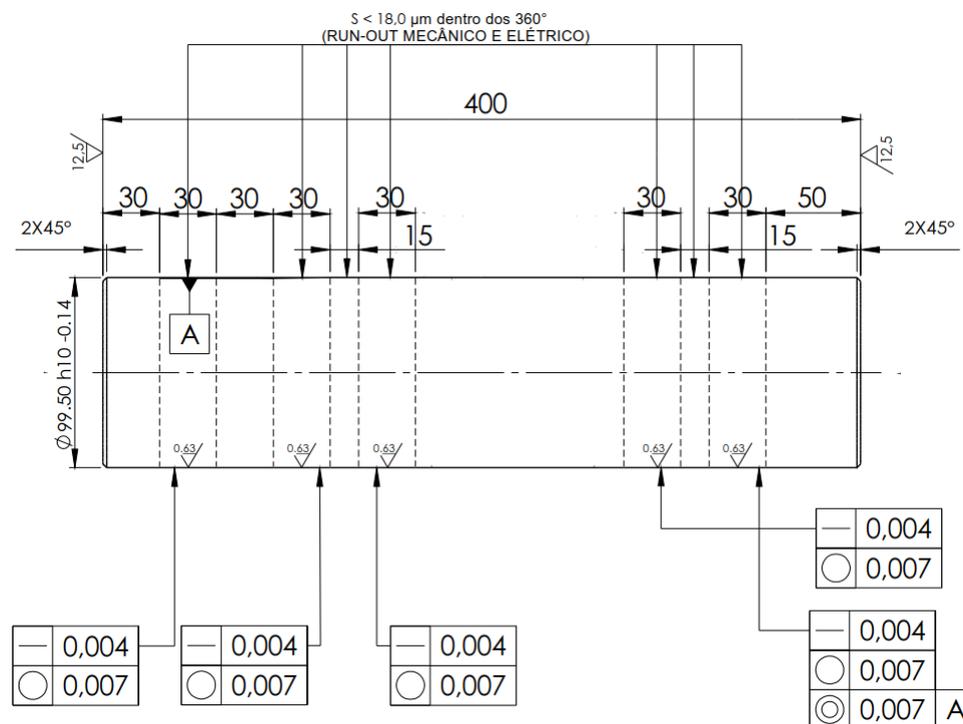
Esse processo se repetiu para o eixo 2 e para as amostras 1 e 2. Após algumas horas de resfriamento até atingirem a temperatura ambiente, as peças foram embaladas e enviadas de volta à Zanini Renk para continuidade no processo de preparação dos ensaios de *runout*.

3.2.4 Processo de Usinagem - Acabamento

Ao retornarem à Zanini Renk, as peças foram colocadas no torno horizontal para usinagem de pré-acabamento. As regiões do revestimento com sobremetal são removidas deixando cerca de 0,2 mm de material para serem removidos na retificação. Antes da etapa de acabamento, foi feito um novo ensaio por ultrassom como tentativa de avaliar a integridade das regiões onde houve a deposição do revestimento, com o objetivo de identificar defeitos como espaços vazios provocados por falta de aderência ou falta de fusão entre a liga e o substrato, e que possam interferir na leitura do sinal de *runout*.

Como será mostrado no capítulo 4, o ensaio mais adequado para identificar as discontinuidades superficiais é a inspeção com líquido penetrante. Para não remover a peça da máquina - ou seja, para não perder a centragem da peça na retífica -, optou-se por realizar esse ensaio após a avaliação do sinal de *runout* nas pistas dos eixos. Dessa forma, as peças foram enviadas para o processo de retificação do diâmetro externo com o objetivo de ajustar a medida final e melhorar a rugosidade superficial, respeitando as tolerâncias geométricas especificadas no desenho mostrado na Figura 3.15.

Figura 3.15: Desenho para acabamento do Eixo 1 após aplicação do revestimento nos canais.

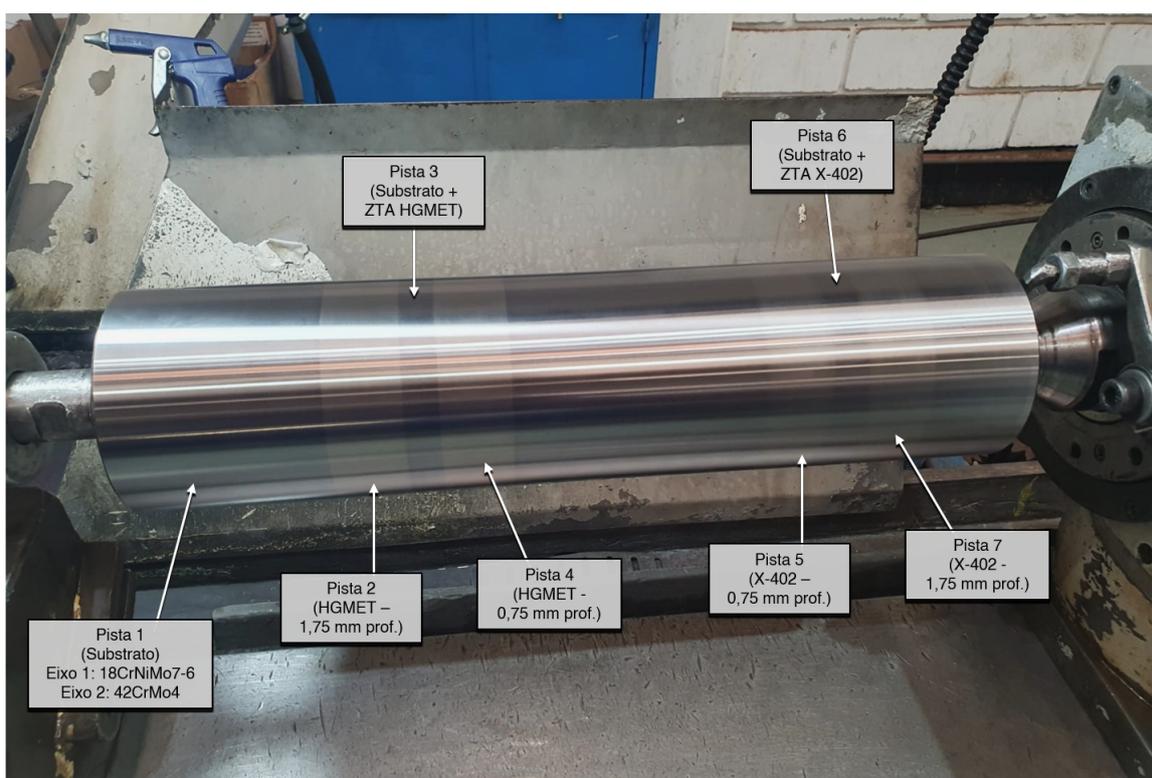


Fonte: Próprio autor.

3.3 Procedimento de Ensaio

Após o processo de retificação, as peças permaneceram na máquina para que não perdessem a mesma preparação de centragem utilizada durante o processo de usinagem de acabamento. Como mostrado na Figura 3.16, a peça foi subdividida axialmente em 7 pistas para realizar as inspeções, e em 18 pontos ao redor do diâmetro para coleta dos valores de *runout* mecânico.

Figura 3.16: Posições das pistas para medição do *runout*.



Fonte: Próprio autor.

A posição de cada uma das pistas foi definida conforme os critérios abaixo, levando em consideração as possíveis respostas no sinal de *runout* elétrico:

- **Pista 1:** leitura do sinal no substrato, sem alterações na microestrutura provocadas pelas altas temperaturas do processo DED-LC.
- **Pista 2:** leitura do sinal sobre o revestimento HGMET, com 1,75mm de espessura de camada.
- **Pista 3:** leitura do sinal no substrato entre as faixas de HGMET, região que abrange ZTA gerada pelo processo DED-LC.
- **Pista 4:** leitura do sinal sobre o revestimento HGMET, com 0,75mm de espessura de camada.

- **Pista 5:** leitura do sinal sobre o revestimento X-402, com 0,75mm de espessura de camada.
- **Pista 6:** leitura do sinal no substrato entre as faixas de X-402, região que abrange a ZTA gerada pelo processo DED-LC.
- **Pista 7:** leitura do sinal sobre o revestimento X-402, com 1,75mm de espessura de camada.

Inicialmente, foi registrado o desvio de *runout* mecânico em cada uma das pistas. No porta ferramentas da máquina posicionou-se um relógio comparador analógico apenas para referência de alinhamento, e nas pistas – uma por vez – foi montado um relógio digital MarCator 1086R mostrado na Figura 3.17. O relógio digital é zerado no ponto 1, e o eixo é rotacionado em incrementos de 20°. Com isso, para cada eixo foram coletados 18 pontos em cada uma das 7 pistas.

Figura 3.17: Preparação para medição de *runout* mecânico.

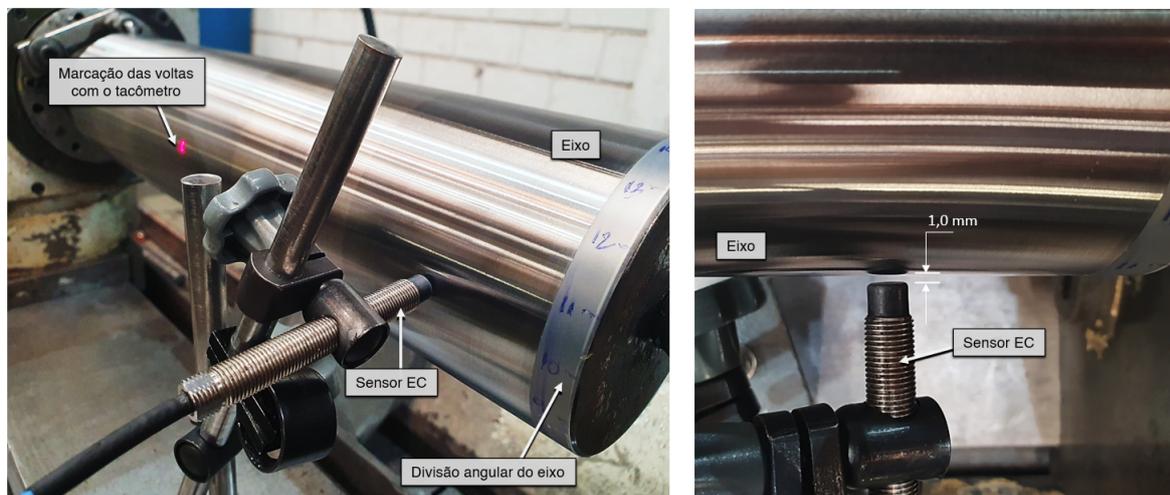


Fonte: Próprio autor.

Em seguida, com o eixo na mesma posição, foi feita a preparação para a leitura do TIR utilizando sensor EC da marca ProvibTech, modelo TM0180. O sensor é fixado em um suporte com uma base magnética apoiada no barramento da máquina-ferramenta. A fixação deve ocorrer de modo que a face do sensor fique o mais paralela possível à superfície do eixo, conforme exemplificado pela Figura 3.18. Conforme especificação do fabricante, a

distância ideal para o ensaio é de 1,25 mm entre o eixo e o sensor (distância que produz uma diferença de potencial que varia entre 7,5 e 8,5 volts).

Figura 3.18: Preparação para medição *derunout* total (TIR).



Fonte: Próprio autor.

O sensor TM0180 é conectado por um cabo transmissor TM0181-040-00 a um transdutor do tipo *proximitor* modelo TR4101 (também do fabricante ProvibTech) mostrados na Figura 3.19. O equipamento é conectado a um computador por meio de um cabo USB tipo B 2.0. A montagem do *hardware* e desenvolvimento do *software* para leitura e interpretação dos sinais são comercializados pela empresa Vibrodata. As especificações dos instrumentos são mostradas na Tabela 3.7.

Tabela 3.7: Especificações técnicas de instrumentação ProvibTech.

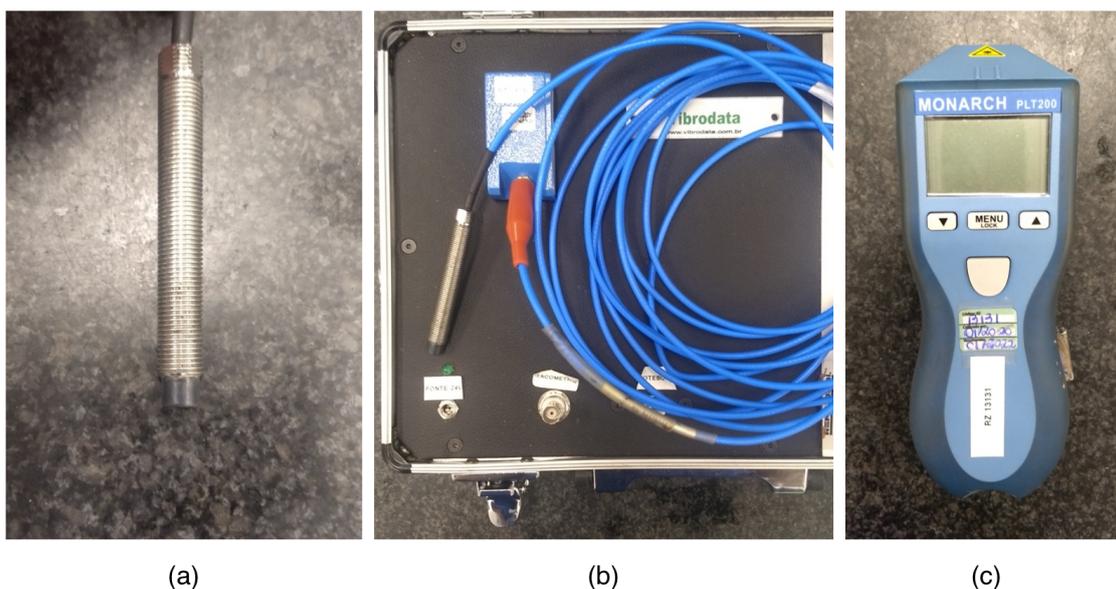
| Características Técnicas | Transmissor (Proximitor) | Sensor EC |
|------------------------------|--------------------------|-----------------------|
| Marca | ProvibTech (PVT) | ProvibTech (PVT) |
| Modelo | TR4101-A00-E00-G00-S00 | TM0180-07-00-05-10-02 |
| Alimentação (VDC) | 16-30VDC | 23-30VDC |
| Faixa de transmissão (mA) | 4 - 20 | 4 - 20 |
| Fundo de escala linear (mm) | 2,0 | 2,0 |
| Resposta em frequência (Hz) | 2,0 - 3.000 | 0 - 10.000 |
| Sensibilidade (mV/ μ m) | 8,00 | 7,87 |
| Gap sensor-eixo (mm) | 1,25 | 1,25 |
| Gap sensor-eixo (V) | 8V \pm 0,5V | 8V \pm 0,5V |
| Diâmetro da extremidade (mm) | - | 8,0 |
| Largura mínima do alvo (mm) | - | 15,0 |

Fonte: Informações compiladas na tabela pelo próprio autor a partir das fichas técnicas dos instrumentos emitidas pelo fabricante ProvibTech.

Para que o *software* identifique a quantidade de rotações para subdividir a quantidade de pontos coletados a cada volta, é preciso fixar na peça um adesivo que funcione como um *keyphasor* - uma descontinuidade que promova um salto na leitura do sinal, e faça a divisão das revoluções do eixo. Para ler a rotação e marcar o número de

voltas, é utilizado um tacômetro a laser modelo PLT200 da Monarch, mostrado no item (c) da Figura 3.19. Esse instrumento está incluso no pacote da Vibrodata e possui uma conexão direta com o *software*, marcando as voltas do eixo e possibilitando a avaliação da periodicidade do sinal.

Figura 3.19: Componentes do equipamento de medição: (a) Sensor EC TM0180; (b) Cabo transmissor TM0181 e *Proximito* TR4101; (c) Tacômetro PLT200.



Fonte: Próprio autor.

O computador, o transdutor e o tacômetro são apoiados em uma mesa separada da máquina. Recomenda-se evitar posicioná-los sobre tabladados de madeira ou de plástico, pois a instabilidade dessas estruturas pode transmitir vibrações de máquinas vizinhas para os instrumentos, gerando perturbações e ruídos adicionais na leitura do sinal.

Posicionada na horizontal, a peça precisa ser rotacionada a uma velocidade alta o suficiente para eliminar os efeitos de deflexão do eixo, conforme define DeBlock, Wood e McDonnell (2007), mas não a ponto de tornar significantes as dilatações por efeitos dinâmicos. Por essa razão, conforme orienta também o próprio fabricante Vibrodata, a rotação ideal da peça para efetuar o ensaio deve estar entre 30 e 100 rpm. A rotação utilizada nesse experimento foi de cerca de 75 rpm para os eixos 1 e 2, de acordo também com as práticas usuais já adotadas pela Zanini Renk no dia a dia. Nessa rotação, a taxa de amostragem é de 2,5 Hz, ou seja, 2,5 pontos coletados a cada segundo, que para o diâmetro dos eixos desse experimento totalizaram cerca de 150 pontos por volta.

No eixo, é fixado um pequeno adesivo refletor que serve como obstáculo ao raio laser emitido pelo tacômetro, instrumento que mede as rotações da peça em rpm, e que faz a marcação de cada volta enviando um sinal contínuo e mostrando um "salto" no gráfico quando identifica a passagem do adesivo pelo feixe de laser. O sensor EC capta simultaneamente o sinal resultante da variação da distância entre sensor e peça, e o *software*

interpreta e transforma esse sinal em uma variação de distância em micrometros (μm).

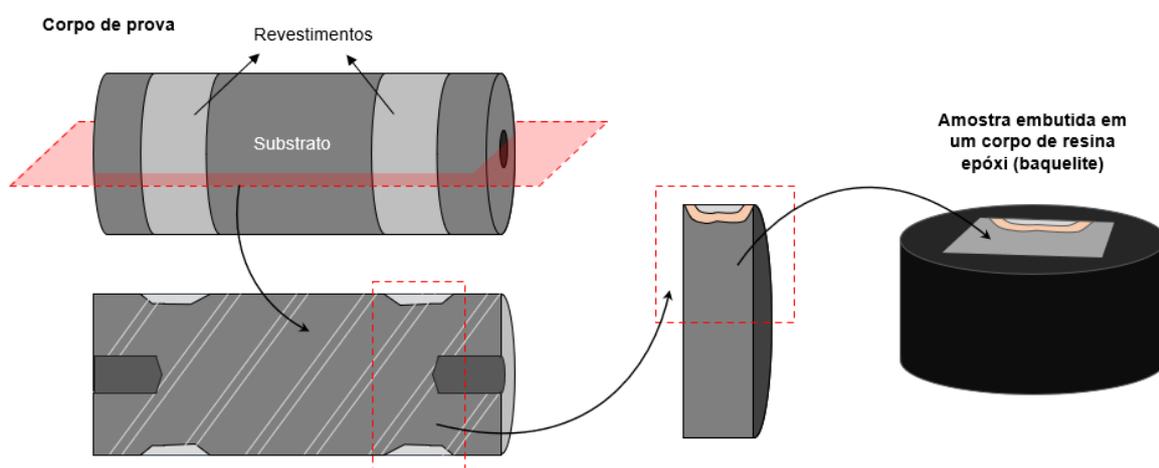
A diferença entre os pontos máximos e mínimos é calculada automaticamente pelo software, mostrando na tela em tempo real o valor calculado do TIR para a peça ensaiada. O inspetor com o desenho em mãos é capaz de avaliar prontamente se a peça atende ou não aos requisitos de projeto, trazendo um ganho significativo na produtividade, permitindo que as possíveis correções na peça sejam feitas de imediato. Para avaliação do comportamento do sinal e construção de gráficos e relatórios, o software permite a exportação dos dados em formato *.lvm* (*logical volume manager*).

Após a conclusão dos ensaios coletando dados em todas as 7 pistas dos eixos 1 e 2, as peças foram retiradas da máquina. Os diâmetros externos são novamente conferidos e protocolados, bem como as rugosidades superficiais. Por fim, é possível avaliar sob condições adequadas a integridade superficial dos revestimentos através do ensaio com líquido penetrante. Os resultados são mostrados no capítulo 4.

3.4 Análise metalográfica

Para análise metalográfica do revestimento e das regiões afetadas no substrato, foram fabricados dois eixos menores de mesmo material dos eixos 1 e 2 para que fossem destruídos, permitindo assim uma análise da seção transversal da peça com acesso à zona de ligação e defeitos internos do revestimento, dentre outros aspectos.

Figura 3.20: Sequência de preparação das amostras para análise de microestrutura.



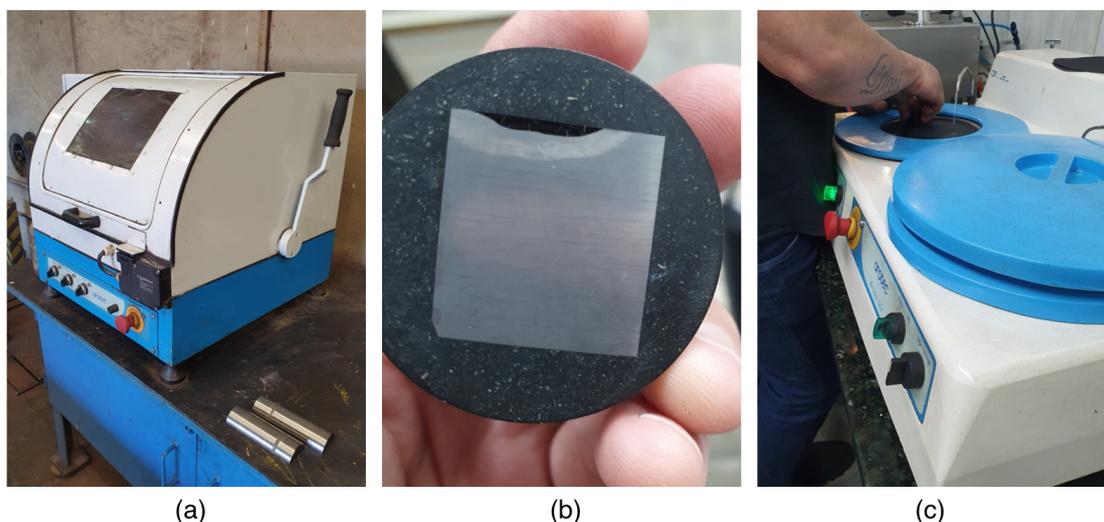
Fonte: Próprio autor.

A técnica de caracterização escolhida para análise metalográfica foi a microscopia ótica (MO). Os equipamentos utilizados foram um microscópio OLYMPUS GX 41 adaptado com retroiluminação OLYMPUS LG-PS2. Para registro das imagens, o sistema é equipado com uma câmera AxioCam ERc5s da Zeiss, e o tratamento e manipulação das imagens são

feitos pelo software AxioVision V.4.9.1.0. A estrutura de preparo e análise das amostras para avaliação metalográfica e de perfil de dureza pertencem ao laboratório de análises de Tratamento Térmico da Zanini Renk.

A preparação das amostras foi feita conforme ilustrado esquematicamente pela Figura 3.20, e começa com a escolha da superfície da peça que será avaliada. No caso desse estudo, foi selecionada a seção longitudinal do eixo para que fosse possível visualizar a extensão da ZTA no sentido axial da peça, cobrindo toda a largura dos canais revestidos nas amostras 1 e 2.

Figura 3.21: Preparação das amostras para análise de microestrutura.



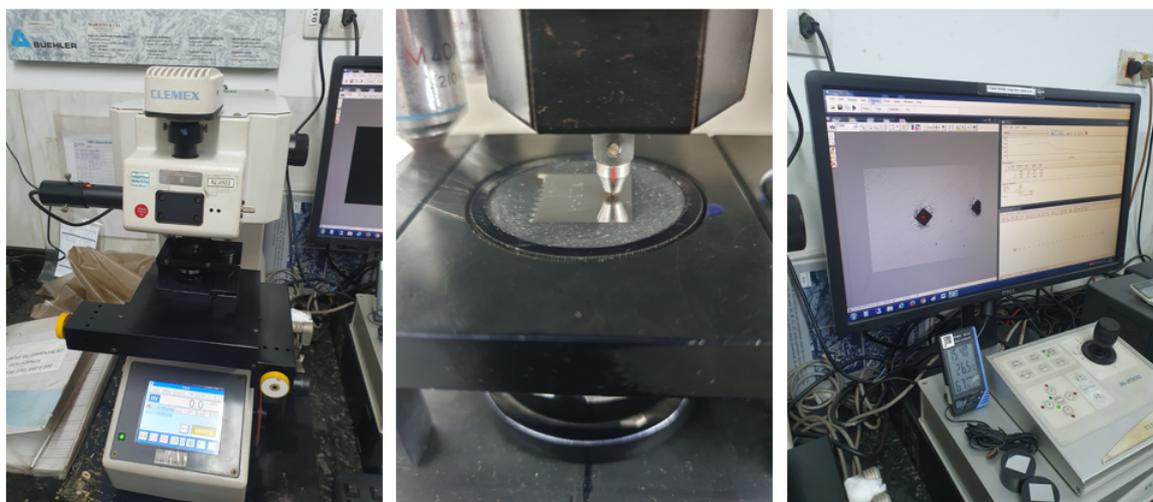
Fonte: Próprio autor.

Primeiramente as peças foram cortadas no sentido longitudinal com uma serra. Em seguida, em uma máquina de corte do tipo *cut-off* mostrada no item (a) da Figura 3.21, que utiliza disco abrasivo de carbetto de silício, as amostras foram cortadas em pedaços menores para que coubessem na prensa de embutimento, equipamento que envolve as peças em um corpo cilíndrico fabricado em baquelite, material termoplástico comumente usado para essa aplicação. A amostra é posicionada na embutidora dentro de uma câmara cilíndrica com a face a ser analisada voltada para baixo. Os espaços vazios ao redor da amostra são preenchidos com baquelite granulado até completar o volume da câmara. O compartimento é fechado com um êmbolo com uma pressão de 125 kgf/mm^2 e temperaturas de até 120°C . Após cerca de 20 minutos, a resina derrete, preenche os espaços vazios no volume da câmara, e na sequência é resfriada por 5 minutos, solidificando e promovendo à amostra um formato cilíndrico. As amostras produzidas possuem um corpo cilíndrico de 40 mm de diâmetro e 24 mm de altura, mostrado no item (b) da Figura 3.21. Os detalhamentos dimensionais de cada amostra são mostrados na seção 4.

A etapa de embutimento é necessária para possibilitar o manuseio seguro das amostras, que antes da análise devem passar por um processo de lixamento e polimento

da superfície. Esse processo é realizado manualmente em uma máquina do tipo Politriz, mostrada no item (c) da Figura 3.21. Nesse caso, foi utilizada a Aropol 2V fabricada pela Arotec, que possui duas mesas giratórias onde são posicionadas as lixas e um disco giratório de feltro para polimento. O lixamento tem como objetivo promover uma superfície plana e de baixa rugosidade. Segundo Colpaert, Costa et al. (2008), para evitar o aquecimento localizado e possíveis encruamentos que possam mascarar os resultados, recomenda-se que as temperaturas da peça não ultrapassem os 100°C durante o processo de lixamento. Para isso, a superfície da lixa é lubrificada constantemente com água corrente, o que também auxilia simultaneamente na limpeza da própria superfície da peça. Foram utilizadas seis lixas rotativas com as seguintes granulometrias: 120, 240, 320, 400, 600 e 1200. Após a última etapa de lixamento, as peças foram polidas com o disco de feltro umedecido com uma solução líquida com grãos abrasivos de diamante de $3,0\ \mu\text{m}$ de diâmetro.

Figura 3.22: Medidor de dureza por microscopia Clemex ST-2000.



Fonte: Próprio autor.

No final desse processo, as amostras são lavadas e secas com um jato de ar quente (neste caso, um secador de cabelos). Nesse momento, a superfície polida apresenta uma rugosidade da ordem de $R_a = 0,05\ \mu\text{m}$. Isso é necessário pois está diretamente relacionado com a reflexibilidade dos grãos quando são atingidos pelo feixe de luz do microscópio.

Nesse momento já é possível identificar a presença de trincas, poros ou outras discontinuidades maiores na superfície das amostras. Porém, para que seja possível visualizar os contornos de grão e avaliar a estrutura cristalina, faz-se necessário realizar um processo de ataque químico (ou causticação) na superfície das amostras. O reagente escolhido foi o Nital 3% - composição com proporção de 3,0 ml de ácido nítrico (HNO_3) para 97,0 ml de álcool etílico ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$). O ataque pode variar de 5 a 15 segundos, dependendo da intensidade de escurecimento que se deseja obter. Após esse tempo, a superfície é lavada com álcool isopropílico e novamente seca com um jato de ar quente.

Nesse momento as superfícies das peças revelam os contornos de grão da microestrutura metálica e estão prontas para serem analisadas por microscopia.

Para medição das durezas ao longo da seção longitudinal das peças, as amostras foram avaliadas com o medidor de dureza Clemex ST-2000, mostrado na Figura 3.22. Após definir a quantidade de pontos a serem medidos e o espaçamento entre eles, o equipamento faz as identações na amostra de forma automática, utilizando o método de dureza Vickers. Em seguida, avaliando as imagens através do microscópio, o software focaliza nas marcações e mede as diagonais de cada indentação, fornecendo então o valor de dureza correspondente.

Capítulo 4

Resultados

Neste capítulo são apresentados todos os registros das verificações realizadas durante o processo de fabricação das peças, como medida real dos eixos, espessura dos revestimentos e rugosidades. Na sequência, são expostos os resultados dos ensaios de *runout* mecânico e total, fazendo uma comparação entre os valores para analisar a contribuição do *runout* elétrico na leitura sobre os revestimentos. Por fim, são mostrados também os resultados das análises de microestrutura e perfil de dureza ao longo da seção transversal do revestimento.

4.1 Inspeções dimensionais

Depois do desbaste por torneamento dos eixos no perfil conforme especificações do desenho mostrado na Figura 3.15, foi feito um mapeamento dimensional de todos os diâmetros.

Após a etapa de aplicação dos revestimentos nos eixos, a peça teve que ser novamente torneada para eliminar o sobremetal das camadas revestidas, deixando as peças cilíndricas. Na sequência, após retificação do diâmetro externo, foram coletadas as medidas finais dos eixos para que fosse possível calcular a espessura final de cada revestimento. Os valores obtidos estão dispostos na Tabela 4.1, e apresentaram pequenas variações em comparação às espessuras estimadas no início do processo. No entanto, essas variações foram irrelevantes para a análise do sinal de TIR das peças.

Em seguida, foram registrados também os valores de rugosidade superficial em cada uma das pistas nos dois eixos, utilizando um rugosímetro Mitutoyo SJ-210. Os resultados são mostrados na Tabela 4.2, e mostraram-se satisfatórios.

4.2 Ensaios não destrutivos

Antes do início da fase experimental foi feito o dimensionamento das peças e a realização de ensaios não destrutivos. A avaliação dos resultados consiste na interpretação

Tabela 4.1: Espessura das camadas de revestimento após acabamento dos eixos.

| Eixo | Regiões (Material) | Diâmetro (perfil) [mm] | Diâmetro (acabado) [mm] | Espessura do Revestimento [mm] |
|-------------------------|-----------------------|---------------------------|----------------------------|-----------------------------------|
| Eixo 1 (18CrNiMo7-6) | Pista 2 (HGMET) | 96,43 | 99,62 | 1,595 |
| | Pista 4 (HGMET) | 98,40 | 99,62 | 0,610 |
| | Pista 5 (X-402) | 98,45 | 99,62 | 0,585 |
| | Pista 7 (X-402) | 96,38 | 99,62 | 1,620 |
| Eixo 2 (42CrMo4) | Pista 2 (HGMET) | 86,16 | 89,30 | 1,570 |
| | Pista 4 (HGMET) | 88,11 | 89,30 | 0,595 |
| | Pista 5 (X-402) | 88,00 | 89,30 | 0,650 |
| | Pista 7 (X-402) | 86,05 | 89,30 | 1,625 |

Fonte: Próprio autor.

Tabela 4.2: Rugosidades superficiais - Eixos 1 e 2.

| Rugosidade (Ra) [μm] - Valor máximo permitido: Ra = 0,63 μm | | | | | | | |
|---|--------------------------|--------------------|--------------------------|--------------------|--------------------|--------------------------|--------------------|
| Eixo | Pista 1 (18CrNiMo7-6) | Pista 2 (HGMET) | Pista 3 (18CrNiMo7-6) | Pista 4 (HGMET) | Pista 5 (X-402) | Pista 6 (18CrNiMo7-6) | Pista 7 (X-402) |
| Eixo 1 | 0,293 | 0,279 | 0,279 | 0,268 | 0,304 | 0,314 | 0,295 |
| Eixo 2 | 0,339 | 0,301 | 0,345 | 0,32 | 0,334 | 0,343 | 0,351 |

Fonte: Próprio autor.

das alterações no sinal de *runout* total provocadas pelas propriedades eletromagnéticas da microestrutura de cada superfície avaliada pelo sensor. Para isso, é importante comparar primeiro os deslocamentos registrados pelo relógio comparador (*runout* mecânico). O comprimento do eixo foi projetado para minimizar sua deflexão quando fixado entre pontos na máquina de retificação, diminuindo os desvios de concentricidade entre as pistas.

Após a fase de pré-acabamento dos dois eixos realizada no torno, foi realizado um ensaio de ultrassom mostrado na Figura 4.1. Apesar das limitações do ensaio nos revestimentos conforme detalhado no capítulo 2, foi confirmado no ensaio que houve uma boa qualidade na ligação metalúrgica entre revestimento e substrato nas duas peças, e que não existem defeitos de ligação relevantes que possam perturbar a leitura do sinal do TIR.

Para atestar a qualidade e integridade da superfície dos eixos, foram realizados ensaios com líquido penetrante como mostrado nas Figuras 4.2 e 4.3, ensaio ideal para visualização de trincas, fissuras e indicações de porosidades abertas na superfície dos eixos.

Ao contrário do que recomenda Littrell (2005), não foi possível realizar a avaliação do *runout* em outra máquina por falta de disponibilidade na fábrica. Dessa forma, com o intuito de aproveitar a mesma centragem do eixo na máquina utilizada para dar o acabamento na peça, os ensaios de *runout* são iniciados imediatamente após a retificação de cada eixo. Por esse motivo, os ensaios com líquido penetrante foram realizados após a coleta do sinal de *runout*, com as peças fora da máquina.

Para o Eixo 1, o ensaio com líquido penetrante não identificou nenhum defeito superficial relevante, isto é, qualquer indicação de trincas, fissuras ou poros que possam atrapalhar a inspeção do TIR. Já o Eixo 2 apresentou fissuras nas duas pistas onde foi

Figura 4.1: Inspeção de ultrassom nos Eixos 1 e 2 antes do acabamento em retífica.



Fonte: Próprio autor.

Figura 4.2: Resultado do ensaio com líquido penetrante no Eixo 1.



Fonte: Próprio autor.

aplicado o revestimento da liga X-402. Essas aberturas na superfície da peça não surtem efeito na leitura do sinal de *runout* mecânico, mas interferem na leitura do TIR, como evidenciado mais adiante.

Figura 4.3: Resultado do ensaio com líquido penetrante no Eixo 2.



Fonte: Próprio autor.

4.3 *Runout* Mecânico

Após acabamento dos eixos na retífica cilíndrica, foram coletados inicialmente os resultados de *runout* mecânico, onde são feitas medições em 18 pontos ao redor do eixo em cada uma das pistas. Os valores máximos e mínimos de cada medição são mostrados na Tabela 4.3 para os dois eixos. A coluna de *runout* mecânico total mostra o resultado da diferença entre o maior e menor ponto de cada faixa. Esse resultado é o valor de referência a ser comparado com o critério de aceitação estabelecido, para atestar se a peça está aprovada ou não. Os gráficos das Figuras 4.4 e 4.5 mostram a variação do *runout* mecânico ao redor do diâmetro e também ao longo do comprimento do eixo, da pista 1 em direção à pista 7.

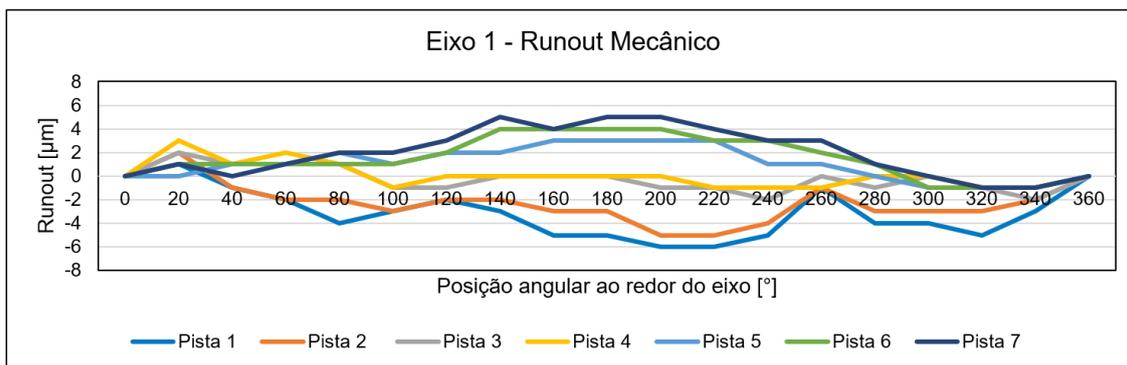
Tabela 4.3: Valores coletados no ensaio de *runout* mecânico - Eixos 1 e 2.

| Eixo | Região (Material) | Mínimo [μm] | Máximo [μm] | <i>Runout</i> mecânico total [μm] |
|--------|-----------------------|-----------------------------|-----------------------------|---|
| Eixo 1 | Pista 1 (18CrNiMo7-6) | -6 | 1 | 7 |
| | Pista 2 (HGMET) | -5 | 2 | 7 |
| | Pista 3 (18CrNiMo7-6) | -2 | 2 | 4 |
| | Pista 4 (HGMET) | -1 | 3 | 4 |
| | Pista 5 (X-402) | -1 | 3 | 4 |
| | Pista 6 (18CrNiMo7-6) | -1 | 4 | 5 |
| | Pista 7 (X-402) | -1 | 5 | 6 |
| Eixo 2 | Pista 1 (42CrMo4) | -1 | 2 | 3 |
| | Pista 2 (HGMET) | -2 | 0 | 2 |
| | Pista 3 (42CrMo4) | -3 | 2 | 5 |
| | Pista 4 (HGMET) | -2 | 2 | 4 |
| | Pista 5 (X-402) | 0 | 5 | 5 |
| | Pista 6 (42CrMo4) | -1 | 4 | 5 |
| | Pista 7 (X-402) | 0 | 6 | 6 |

Fonte: Próprio autor.

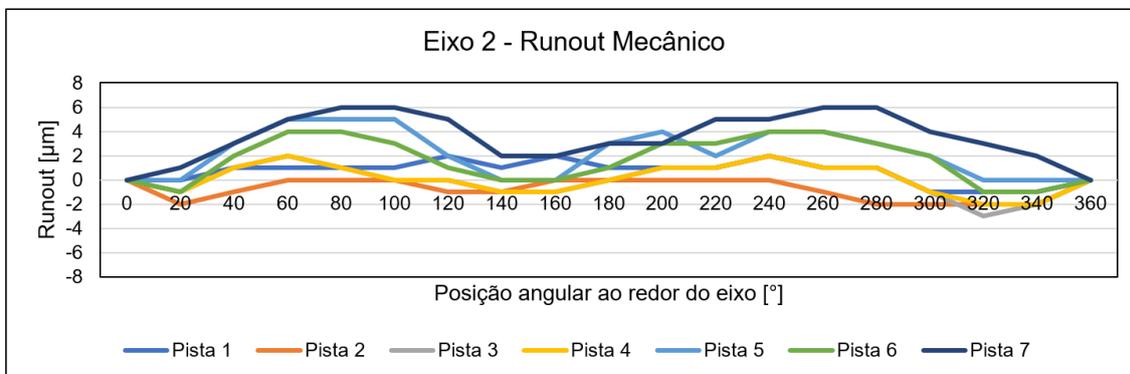
Como descrito no capítulo 2, os valores de *runout* total esperados para eixos de redutores levam em consideração o diâmetro dos eixos e suas velocidades de trabalho, calculando inicialmente os valores admissíveis de vibração e em seguida os limites aceitáveis de *runout* total. Como os eixos utilizados no experimento não são eixos de redutores, isto é, foram projetados e fabricados exclusivamente para a realização desse estudo, não possuem, portanto, velocidades de rotação de trabalho pré-definidas.

Figura 4.4: Sinais de *runout* mecânico do Eixo 1.



Fonte: Próprio autor.

Figura 4.5: Sinais de *runout* mecânico do Eixo 2.



Fonte: Próprio autor.

Considerando a vasta gama de equipamentos fabricados pela Zanini Renk para as mais variadas aplicações, as velocidades de rotação desses eixos variam muito. Para caixas redutoras e multiplicadoras, por exemplo, as rotações de trabalho estão na faixa de 1.800 a 15.000 rpm na maioria dos casos. Conseqüentemente, considerando os limites propostos pela norma API-613 (2021), os valores máximos aceitáveis de *runout* total para os eixos dessas máquinas estão entre 6,35 e 16,4 μm . Portanto, considerou-se para esse experimento um valor máximo de 16 μm no sinal de *runout* para considerar o resultado aprovado. Vale ressaltar que o objetivo do estudo não é atingir o menor valor de *runout* possível, e sim fazer uma comparação entre as leituras em cada pista avaliando se os valores *runout* obtidos nos revestimentos estão próximos aos valores coletados nos substratos.

Analisando os gráficos, nota-se que os valores de *runout* mecânico mostram somente os desvios geométricos das superfícies retificadas dos eixos. Por esse motivo, percebe-se uma variação pequena e de mesma grandeza em todas as pistas em cada um dos eixos. Mesmo que todas as pistas das peças tenham sido retificadas com um único *setup* de máquina, ou seja, não havendo movimentação na centragem ou nos parâmetros de corte na retificação de uma pista para outra, as folgas existentes na própria máquina-ferramenta, bem como um mínimo desalinhamento entre as pontas de apoio da peça, transformam-se em incertezas do processo de usinagem e transferem os desvios para as peças fabricadas.

Esse pequeno desvio é inerente ao processo de acabamento da peça, e pode ser considerado irrelevante dependendo dos limites adotados para avaliação. Tipicamente para eixos de redutores, o aceitável é um desvio de 0,015 mm de batimento entre os colos. Para o caso desse experimento, onde o objetivo é a comparação entre as pistas e considerando também que os resultados de *runout* mecânico e total foram coletados com a peça na mesma posição e centragem, esse desvio também pode ser considerado aceitável, não interferindo na interpretação dos resultados. No geral, conclui-se que em cada um dos eixos, todas as pistas apresentam as mesmas características geométricas, o que sugere que quaisquer desvios encontrados entre as medições de TIR estão relacionados a outros aspectos das peças.

4.4 *Runout* Total (TIR)

Conhecidos os desvios geométricos das peças, é iniciado o processo de coleta do sinal de *runout* total (TIR) com o sensor EC, realizados logo em seguida da coleta dos valores de *runout* mecânico. O ensaio com o sensor EC gera uma tabela de dados com aproximadamente 150 pontos coletados por revolução do eixo. Para assegurar a repetibilidade do experimento, foram feitas 5 medições em cada pista. Como critério de aceitação, os valores devem estar dentro dos limites utilizados em projetos padrões da Zanini Renk relacionados na Tabela 2.1 apresentada no capítulo 2.

Antes do início dos ensaios com o sensor EC, foi feita uma verificação utilizando um medidor de campo magnético Gaussmeter PM-220 da Magnaflux, para avaliar se havia algum indício de magnetismo residual presente nas superfícies das peças que pudesse provocar alterações nos resultados. Conforme especificado na API-670 (2014), os valores de magnetismo residual em regiões de leitura de instrumentos não podem exceder os 5,0 gauss. Para os dois eixos, os valores obtidos em todas as pistas variaram de 0 a 0,5 gauss, atestando que as peças estavam em conformidade com as exigências da norma.

4.4.1 Eixo 1 (18CrNiMo7-6)

Para o Eixo 1, os dados coletados na pista 1, longe das regiões revestidas, serviram como referência para os valores esperados a serem obtidos também nos revestimentos. Na Tabela 4.4 são expostos em valores máximos e mínimos os resultados dos ensaios de *runout* mecânico no Eixo 1, bem como os valores calculados do TIR para cada pista.

Tabela 4.4: Valores de *runout* mecânico e *runout* total - Eixo 1

| Região | Runout Mecânico [μm] | | | Runout Total [μm] | | |
|-----------------------|-----------------------------|--------|-------|--------------------------|---------|--------|
| | Máximo | Mínimo | Total | Máximo | Mínimo | TIR |
| Pista 1 (18CrNiMo7-6) | -6 | 1 | 7 | 6,453 | -5,983 | 12,436 |
| Pista 2 (HGMET) | -5 | 2 | 7 | 18,288 | -12,898 | 31,186 |
| Pista 3 (18CrNiMo7-6) | -2 | 2 | 4 | 5,346 | -5,791 | 11,137 |
| Pista 4 (HGMET) | -1 | 3 | 4 | 18,127 | -11,742 | 29,869 |
| Pista 5 (X-402) | -1 | 3 | 4 | 18,680 | -17,857 | 36,537 |
| Pista 6 (18CrNiMo7-6) | -1 | 4 | 5 | 5,833 | -4,595 | 10,428 |
| Pista 7 (X-402) | -1 | 5 | 6 | 17,416 | -14,585 | 32,001 |

Fonte: Próprio autor.

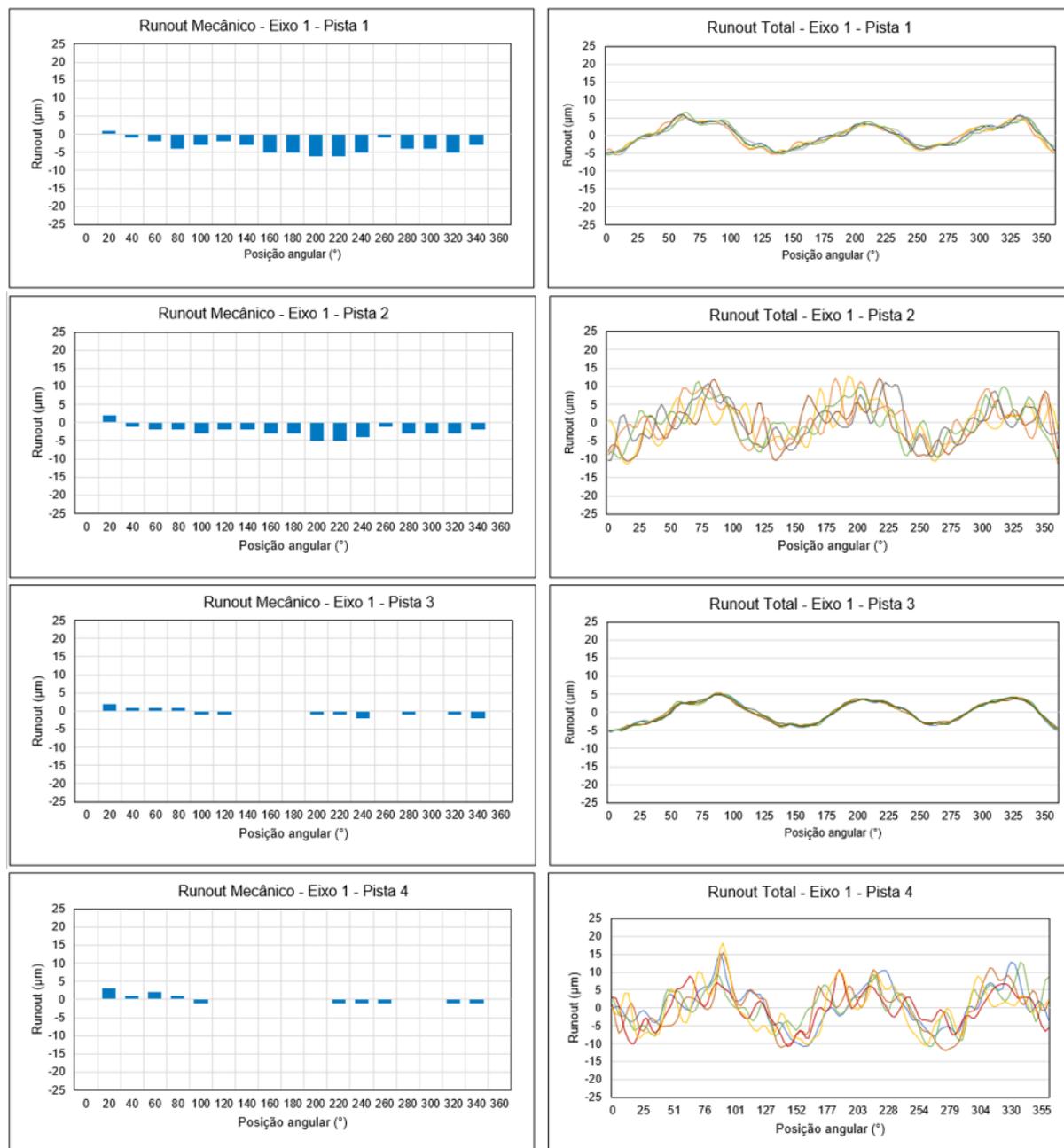
Analisando os resultados do Eixo 1, nota-se um aumento expressivo nos valores de *runout* total por consequência do erro de *runout* elétrico provocado pelas propriedades estruturais e eletromagnéticas da peça em suas diferentes regiões. A pista 1 mostra a contribuição das características do material do eixo (18CrNiMo7-6) para o *runout* elétrico, valor que se repete nas pistas 3 e 6, regiões que foram, em parte, termicamente afetadas pelo processo de deposição, mas que não foram revestidas.

Para as pistas 2 e 4 são mostrados os valores do TIR efetivamente sobre as camadas revestidas com a liga HGMET. A pista 2 apresentou valores 150% acima do que na pista de referência. Já a pista 4 mostrou um aumento cerca de 140% maior que os resultados obtidos na pista 1.

Para as pistas 5 e 7 são mostrados os valores do TIR coletados nas camadas revestidas com a liga X-402. Nesse revestimento, as duas pistas registraram aumentos acima de 150% no TIR com relação à pista 1.

Para melhor visualização dos resultados, na Figura 4.6 são mostrados graficamente os resultados obtidos nos ensaios de *runout* mecânico e total nas pistas onde foi depositada a liga HGMET no Eixo 1. Os resultados obtidos nos ensaios realizados nas pistas com revestimento X-402 são mostrados na Figura 4.7.

Analisando a proximidade entre os valores obtidos, com esse experimento não foi possível identificar a influência da diferença entre as espessuras dos revestimentos. No entanto, é notável a diferença do valor do TIR sobre as regiões revestidas em comparação com a superfície de referência. Como os valores obtidos nos revestimentos ultrapassaram o limite máximo pré estabelecido de $16\mu m$, os ensaios nessas regiões foram considerados reprovados.

Figura 4.6: Gráficos de *runout* mecânico e TIR do Eixo 1, pistas 1, 2, 3 e 4.

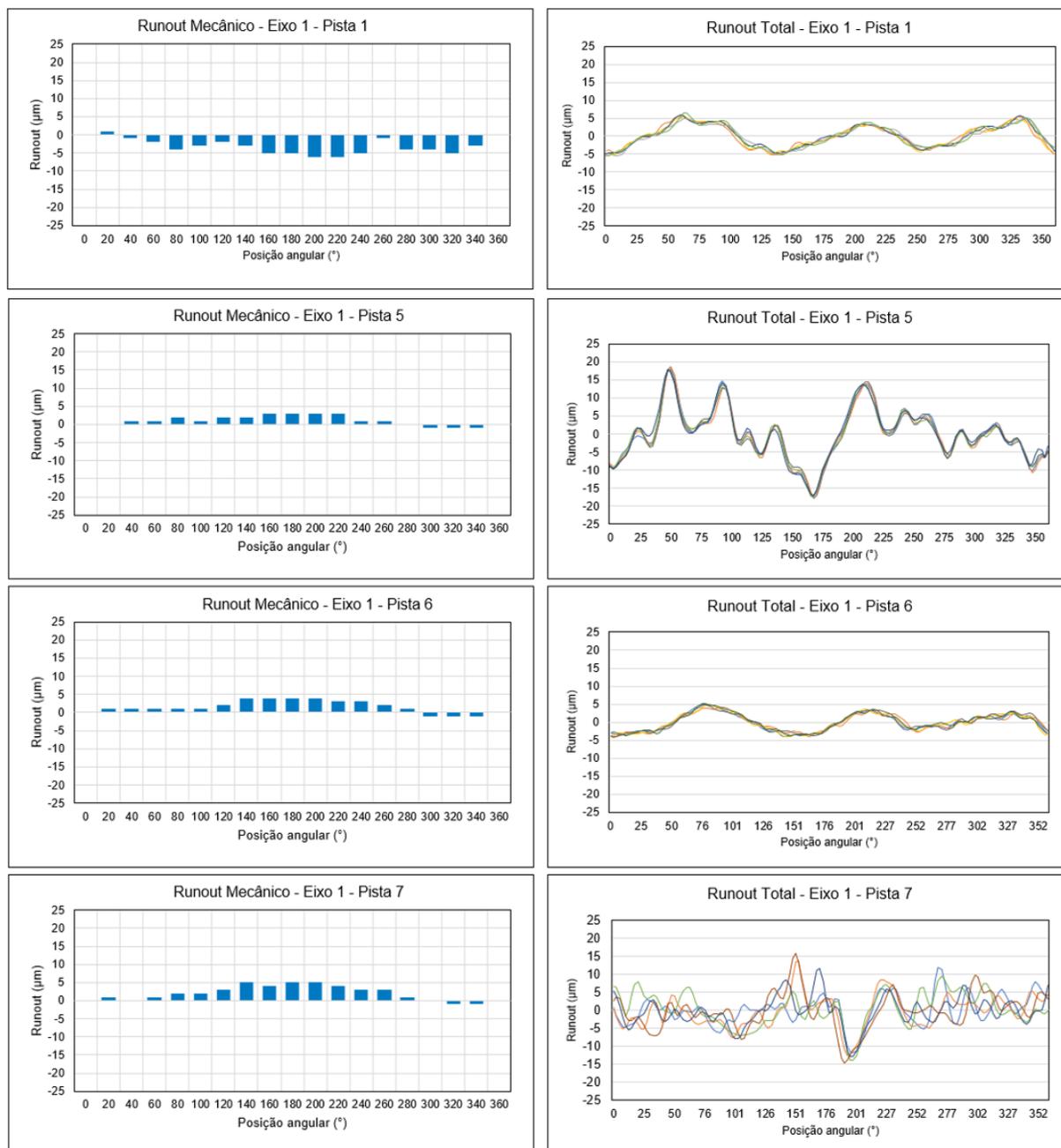
Fonte: Próprio autor.

4.4.2 Eixo 2 (42CrMo4)

De forma análoga para o Eixo 2, os dados coletados na pista 1 serviram como referência para as demais medições nas demais faixas. Na Tabela 4.5 são apresentados os resultados gerais dos ensaios.

Analisando os resultados do Eixo 2, semelhante ao que ocorreu no Eixo 1, é possível identificar um aumento nos valores de *runout* total devido ao efeito do *runout* elétrico. A pista 1 mostra a contribuição do material do eixo (42CrMo4), comportamento observado

Figura 4.7: Gráficos de *runout* mecânico e TIR do Eixo 1, pistas 1, 5, 6 e 7.



Fonte: Próprio autor.

também nas pistas 3 e 6, regiões da ZTA no substrato.

Para as pistas 2 e 4 são mostrados os valores do TIR coletados sobre as camadas revestidas com a liga HGMET. As pistas 2 e 4 apresentaram valores mais de 400% acima do que na pista de referência, muito acima também do que foi obtido para o Eixo 1 na mesma liga. Como foi visto nos resultados dos ensaios não destrutivos, essas foram as pistas que apresentaram fissuras na superfície, defeitos que certamente estão relacionadas com o aumento na perturbação do sinal coletado.

Tabela 4.5: Valores de *runout* mecânico e *runout* total - Eixo 2

| Região | Runout Mecânico [μm] | | | Runout Total [μm] | | |
|-------------------|-----------------------------|--------|-------|--------------------------|---------|--------|
| | Máximo | Mínimo | Total | Máximo | Mínimo | TIR |
| Pista 1 (42CrMo4) | -1 | 2 | 3 | 5,036 | -4,083 | 9,119 |
| Pista 2 (HGMET) | -2 | 0 | 2 | 16,683 | -29,207 | 45,890 |
| Pista 3 (42CrMo4) | -3 | 2 | 5 | 2,992 | -3,783 | 6,775 |
| Pista 4 (HGMET) | -2 | 2 | 4 | 21,516 | -28,060 | 49,576 |
| Pista 5 (X-402) | 0 | 5 | 5 | 12,125 | -11,014 | 23,139 |
| Pista 6 (42CrMo4) | -1 | 4 | 5 | 6,618 | -4,507 | 11,125 |
| Pista 7 (X-402) | 0 | 6 | 6 | 9,558 | -9,639 | 19,197 |

Fonte: Próprio autor.

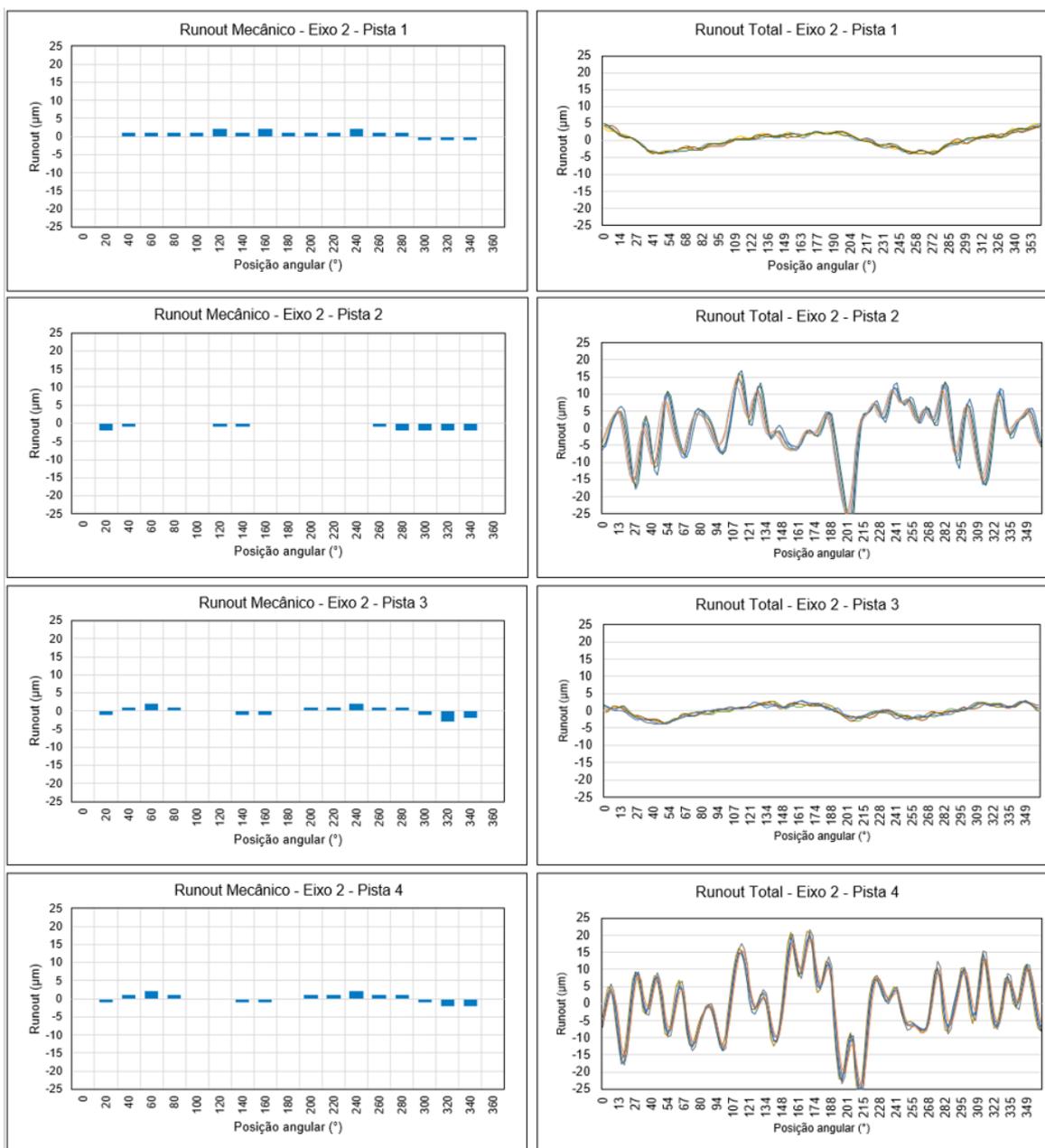
Para as pistas 5 e 7, são mostrados os valores do TIR coletados nas camadas revestidas com a liga X-402. A pista 5 apresentou valores 110% maiores do que na pista 1. Na pista 7, 150% maiores do que na pista de referência.

Na Figura 4.8 são mostrados os resultados obtidos nos ensaios de *runout* mecânico e total nas pistas onde foi depositada a liga HGMET no Eixo 2. Os dois primeiros gráficos mostram os valores de referência da pista 1 para efeito de comparação, e os demais gráficos mostram os resultados das pistas 2, 3 e 4.

Na Figura 4.9 são mostrados graficamente os resultados obtidos nos ensaios de *runout* mecânico e total nas pistas onde foi depositada a liga X-402 no Eixo 2. Os dois primeiros gráficos mostram os valores de referência da pista 1 para efeito de comparação, e os demais gráficos mostram os resultados das pistas 5, 6 e 7.

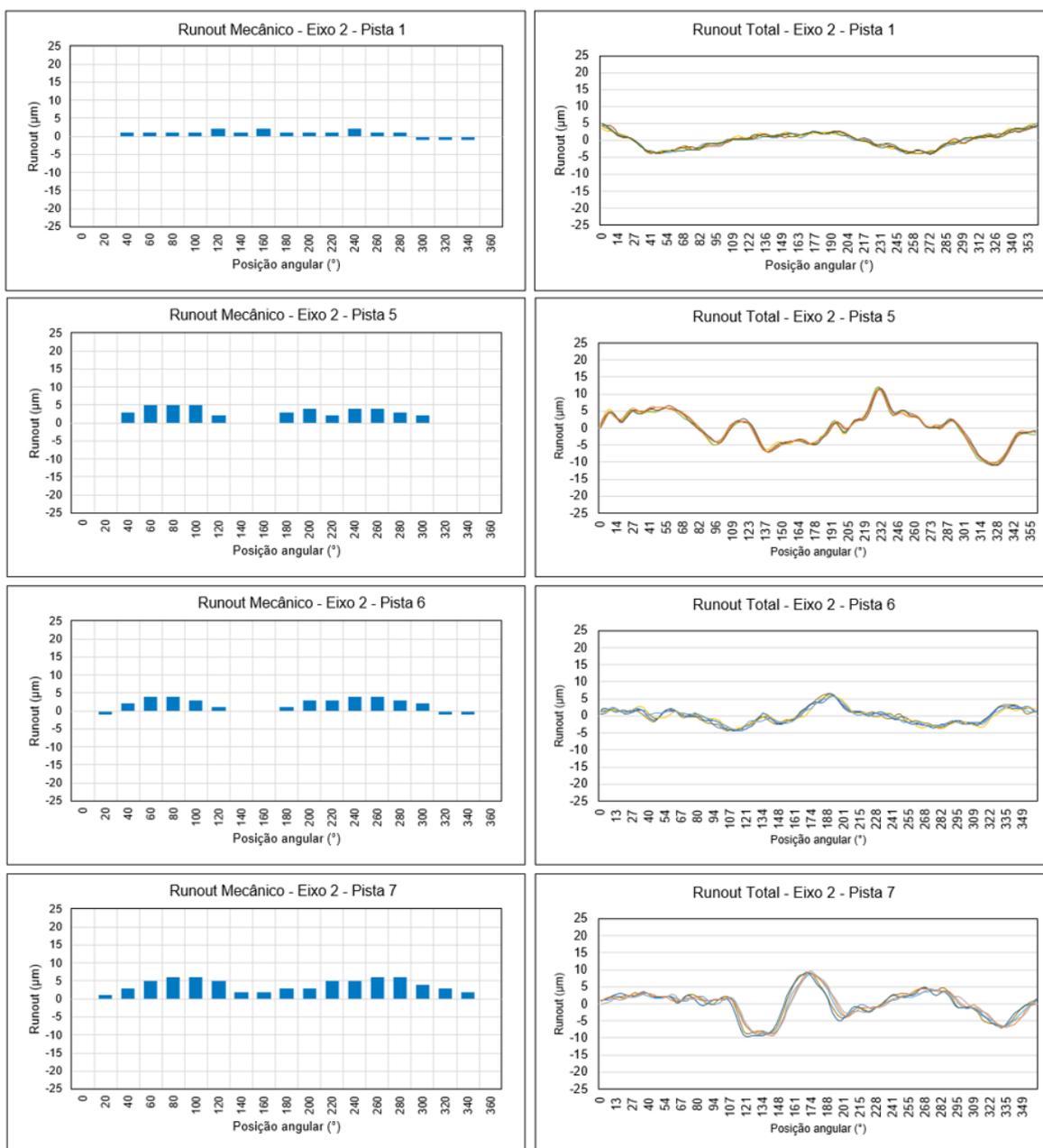
Novamente considerando que os valores obtidos em pistas com mesmo revestimento apresentaram pouca variação, não foi possível identificar a influência da diferença entre as espessuras dos revestimentos nos resultados dos ensaios. Para as pistas que possuem revestimento, também para o Eixo 2 as diferenças dos valores do TIR em comparação com a superfície de referência foram expressivas o suficiente para que ultrapassassem o limite máximo de $16\mu m$, também reprovando os ensaios nessas regiões.

Figura 4.8: Gráficos de *runout* mecânico e *runout* total do Eixo 2, pistas 1, 2, 3 e 4.



Fonte: Próprio autor.

Figura 4.9: Gráficos de *runout* mecânico e *runout* total do Eixo 2, pistas 1, 5, 6 e 7.

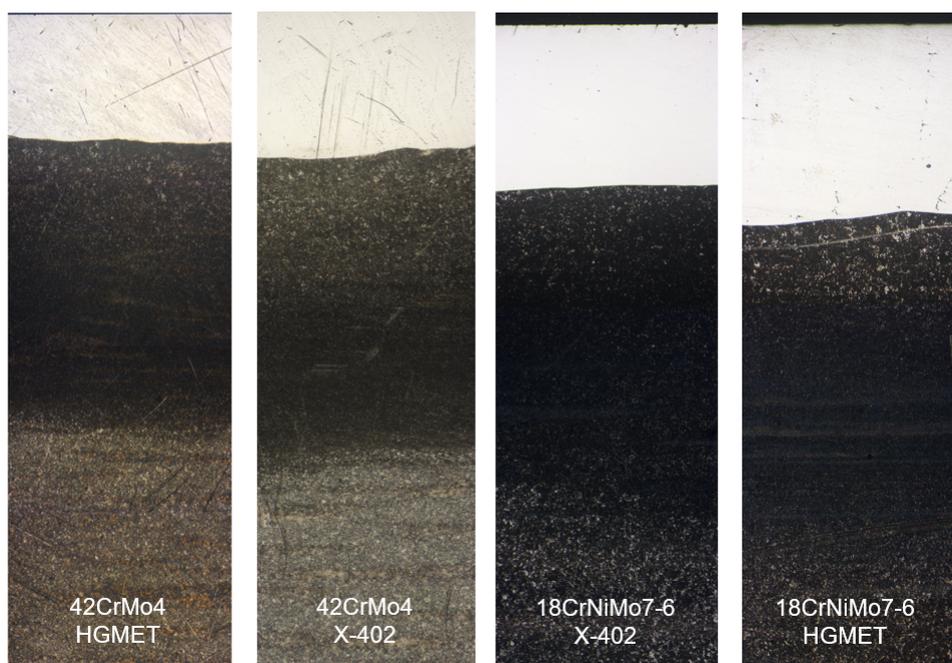


Fonte: Próprio autor.

4.5 Análise de metalografia e dureza das amostras

A análise metalográfica das amostras pode ser dividida em duas principais etapas: análise da macroestrutura, onde são avaliadas as dimensões do revestimento e da ZTA; e análise da microestrutura, cujo objetivo é identificar a estrutura cristalina dos materiais e as possíveis alterações devido ao aquecimento no processo de *laser cladding*. A respeito da taxa de diluição, devido a escolha do processo multicamadas e o fato de o laser ter sido depositado dentro de canais, não é possível determinar por imagens as alturas h e h_{mix} solicitadas na equação 2.14. No entanto, analisando o perfil das amostras, é possível identificar que o formato dos canais permaneceu praticamente inalterado, indicando uma baixa taxa de diluição entre revestimento e substrato característica do processo LC – segundo valores previstos por Toyserkani, Khajepour e Corbin (2004) e também encontrados experimentalmente por Borges et al. (2010), entre 2 e 10%.

Figura 4.10: Vista da seção transversal dos corpos de prova com 5x de ampliação.



Fonte: Próprio autor.

Após o processo de polimento, as amostras recebem o ataque químico com o reagente Nital 3%, possibilitando a visualização das características da microestrutura. Nesse momento, ao receber o ataque químico as superfícies das amostras revelam basicamente 3 diferentes camadas: a camada do revestimento depositado (no topo, mais clara), a zona termicamente afetada no substrato (ZTA, ao centro e mais escura), e a região do substrato com microestrutura inalterada. Na Figura 4.10 é apresentada uma imagem dessas regiões das quatro amostras com 5x de ampliação.

4.5.1 Macroestrutura

Antes de olhar a microestrutura, uma primeira avaliação da macrografia é importante pois é possível verificar a qualidade do polimento, bem como identificar possíveis riscos, trincas, porosidades e bolhas no material do revestimento e do substrato. Colpaert, Costa et al. (2008) define a avaliação de macroestrutura como uma análise à vista desarmada ou com até 10x de ampliação, que tem como objetivo principal a verificação da homogeneidade do material ao longo da seção, bem como a identificação de defeitos maiores como riscos, trincas, porosidades, bolhas, vazios e rechupes, além de dimensionar regiões como a ZTA. Nessa etapa, portanto, é feito um detalhamento dimensional das amostras como mostrado na Figura 4.11, realizado nas peças já com polimento e ataque químico, essencial para revelar as heterogeneidades macro na estrutura.

Figura 4.11: Detalhamento dimensional das amostras.

| | | | | |
|--------------|---|---------|--------------|---------|
| | a = largura da amostra | | | |
| | b = altura da amostra | | | |
| | c = largura do canal revestido | | | |
| | d = largura da ZTA no diâmetro externo do eixo da amostra | | | |
| | e = profundidade do canal revestido | | | |
| | f = profundidade da ZTA a partir do revestimento | | | |
| | | | | |
| Substrato | 18CrNiMo 7-6 | 42CrMo4 | 18CrNiMo 7-6 | 42CrMo4 |
| Revestimento | HG MET | HG MET | X-402 | X-402 |
| a | 22 mm | 22 mm | 20 mm | 19 mm |
| b | 18 mm | 24 mm | 18 mm | 24 mm |
| c | 14 mm | 13 mm | 12 mm | 12 mm |
| d | 2,0 mm | 2,6 mm | 1,6 mm | 3,2 mm |
| e | 1,2 mm | 1,2 mm | 1,3 mm | 1,1 mm |
| f | 2,4 mm | 2,5 mm | 2,2 mm | 2,6 mm |

Fonte: Próprio autor.

4.5.2 Microestrutura

Colpaert, Costa et al. (2008) classifica a análise da microestrutura por microscopia ótica (MO) como a mais comum entre os metalógrafos, que tem como objetivo analisar os contornos de grãos dos materiais através da emissão de uma luz visível na amostra, e os feixes de luz refletidos pelos diferentes grãos, cada um em uma direção, mostram

pontos mais claros e outros mais escuros, relacionados com a planicidade e rugosidade das superfícies, conforme ilustrado pela Figura 4.12.

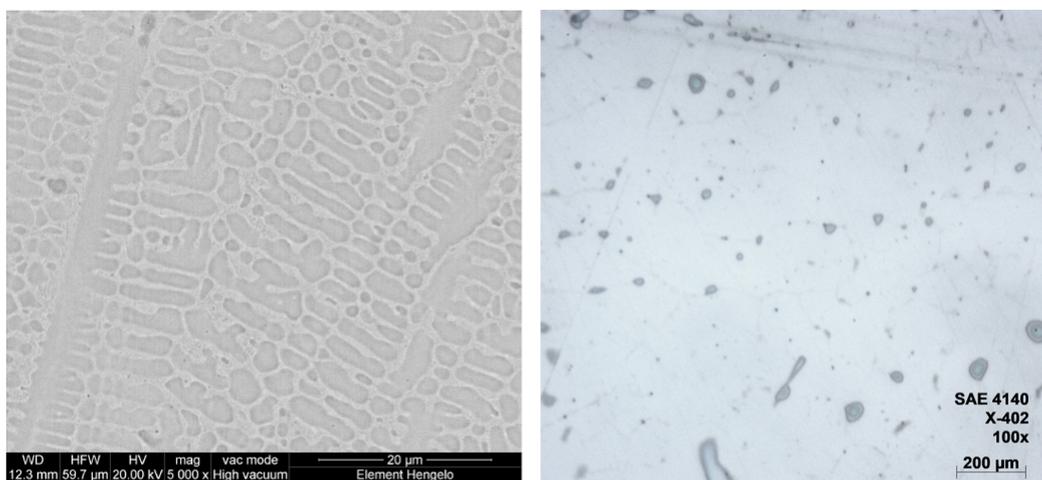
Figura 4.12: Contraste entre grãos devido às suas diferentes refletividades.



Fonte: Colpaert, Costa et al. (2008).

O tempo de ataque químico é crucial para revelar de forma adequada as microestruturas da amostra. O tempo para revelar as estruturas das amostras desse experimento foi de 5 segundos. No entanto, nem todos os reagentes são eficazes em todas as regiões. O reagente Nital 3% escolhido para essa análise, por exemplo, não revelou as estruturas dos revestimentos em nenhuma das amostras. Segundo Colpaert, Costa et al. (2008), a diferença de atacabilidade dos reagentes se dá devido a alterações na composição química e na estrutura cristalina dos metais.

Figura 4.13: Características da microestrutura em: (a) revestimento Stellite 6 obtido com MEV com 5000x de ampliação; e em (b) revestimento X-402 obtido com por MO com 100x de ampliação.



(a)

(b)

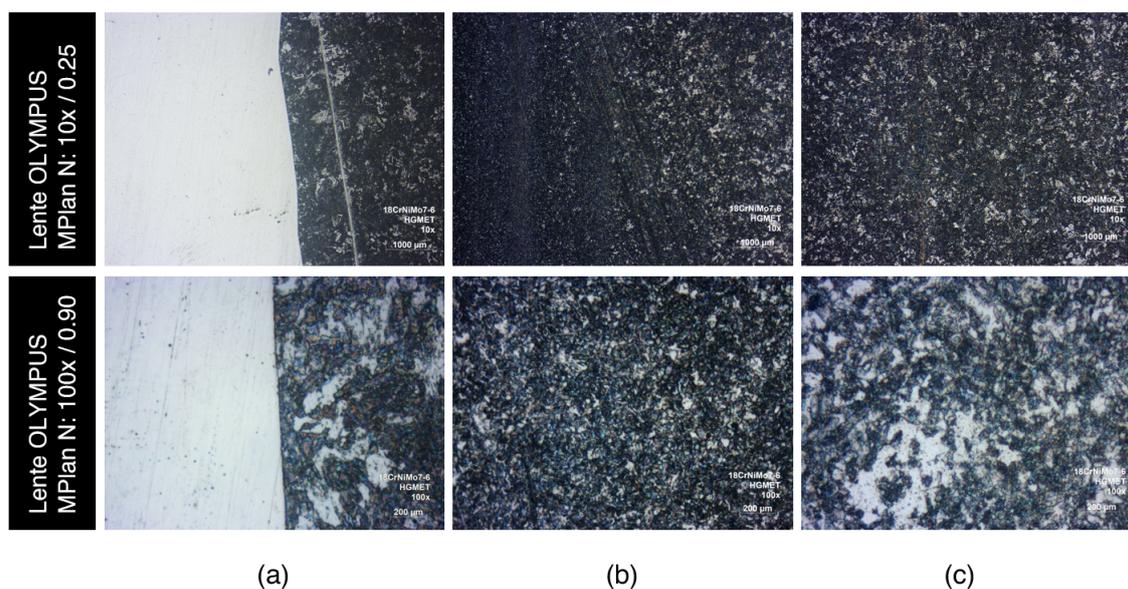
Fonte: (a) Ya (2015); (b) Próprio autor.

No entanto, superfícies com polimento muito acentuado dificultam o ataque pois o reagente não penetra homogeneamente na superfície. Além disso, o polimento excessivo também prejudica as análises com MO por conta da excessiva refletividade da luz. Na Figura 4.13 é apresentado um registro de imagem utilizando MEV com 5000x de ampliação coletado por Ya (2015) revelando as estruturas dendríticas do revestimento, ao lado do

registro coletado pelo autor, com ampliação de 100x. A diferença entre as imagens traduz a importância de maiores ampliações para que seja possível identificar as estruturas refinadas localizadas nos revestimentos LC.

As Figuras 4.14 e 4.15 mostram as microestruturas identificadas na amostra 1 (18CrNiMo7-6) com as ligas HGMET e X-402, respectivamente. Nas imagens, que trazem ampliações de 10x e 100x, nota-se uma estrutura martensítica próxima à linha de fusão (interface entre os materiais), onde o material atinge a fase de austenitização e resfria rapidamente formando uma estrutura predominantemente martensítica. Em seguida, escurecimento da região da ZTA se assemelha a uma queima no material devido às elevadas temperaturas. Esse processo de segundo revenimento gera um refinamento da estrutura além de promover um aumento de dureza no substrato. Conforme as imagens se afastam do revestimento em direção ao núcleo, percebe-se a predominância de uma estrutura martensítica já presente no material, que fora tratado termicamente por têmpera e revenimento. Infelizmente com o processo de análise adotado não foi possível visualizar em maiores detalhes as estruturas cristalinas dos revestimentos.

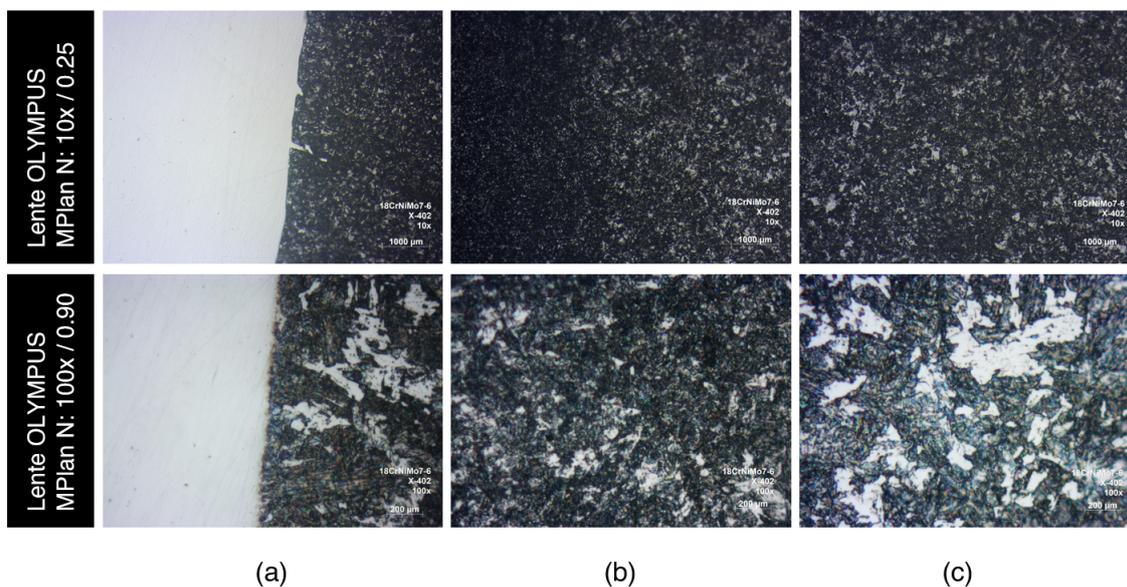
Figura 4.14: Características da microestrutura do conjunto Eixo 1 / Liga HGMET, nas regiões: (a) interface entre revestimento e substrato; (b) ZTA do substrato; e (c) somente no substrato.



Fonte: Próprio autor.

As Figuras 4.16 e 4.17 mostram as microestruturas identificadas na amostra 2 (42CrMo4) com as ligas HGMET e X-402, respectivamente. Nas imagens com ampliações de 10x e 100x, nota-se o mesmo comportamento observado na amostra 1, com uma estrutura martensítica predominante no substrato próxima à interface dos materiais, escurecimento da ZTA com refinamento da estrutura e aumento de dureza, como será observado na seção seguinte. A medida que avançam em direção ao núcleo, as imagens registram também as mesmas estruturas martensíticas do substrato previamente temperado e revenido. Da

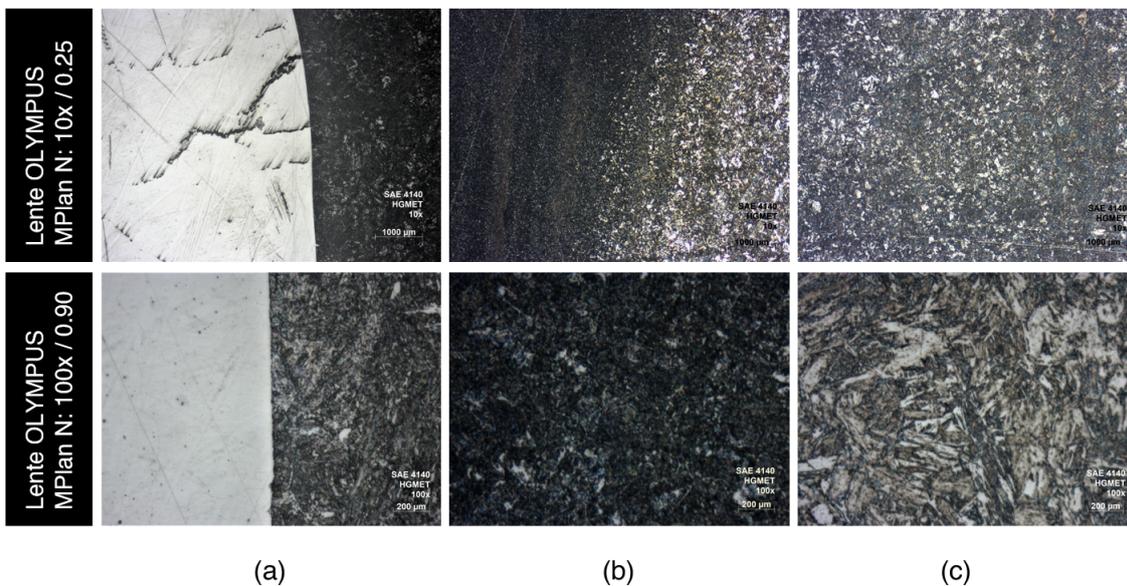
Figura 4.15: Características da microestrutura do conjunto Eixo 1 / Liga X-402, nas regiões: (a) interface entre revestimento e substrato; (b) ZTA do substrato; e (c) somente no substrato.



Fonte: Próprio autor.

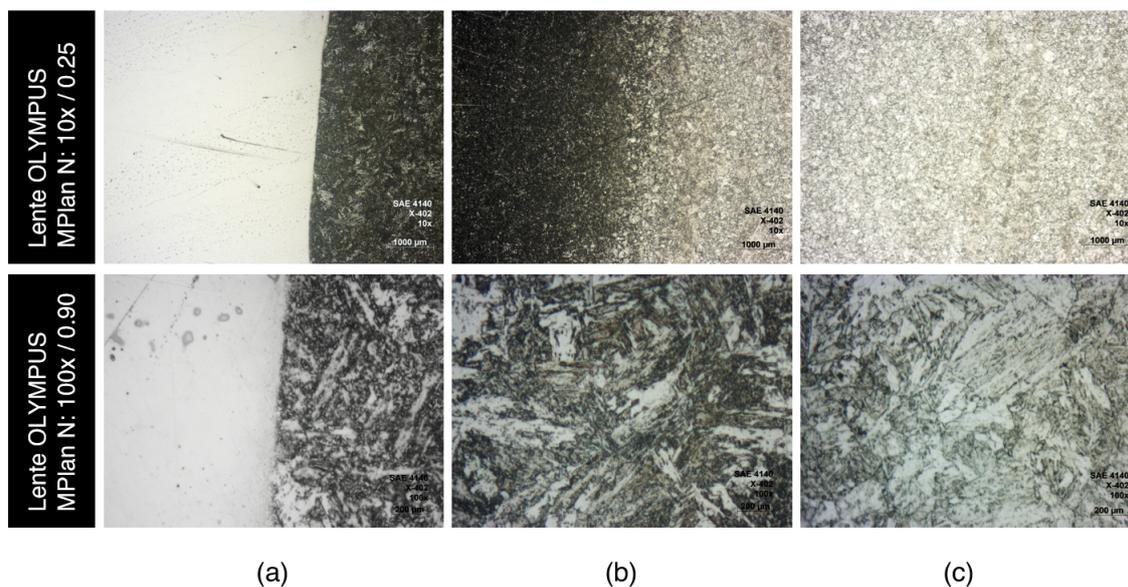
mesma forma que na amostra 1, não foi possível visualizar as estruturas granulares dos revestimentos.

Figura 4.16: Características da microestrutura do conjunto Eixo 2 / Liga HGMET, nas regiões: (a) interface entre revestimento e substrato; (b) ZTA do substrato; e (c) somente no substrato.



Fonte: Próprio autor.

Figura 4.17: Características da microestrutura do conjunto Eixo 2 / Liga X-402, nas regiões: (a) interface entre revestimento e substrato; (b) ZTA do substrato; e (c) somente no substrato.

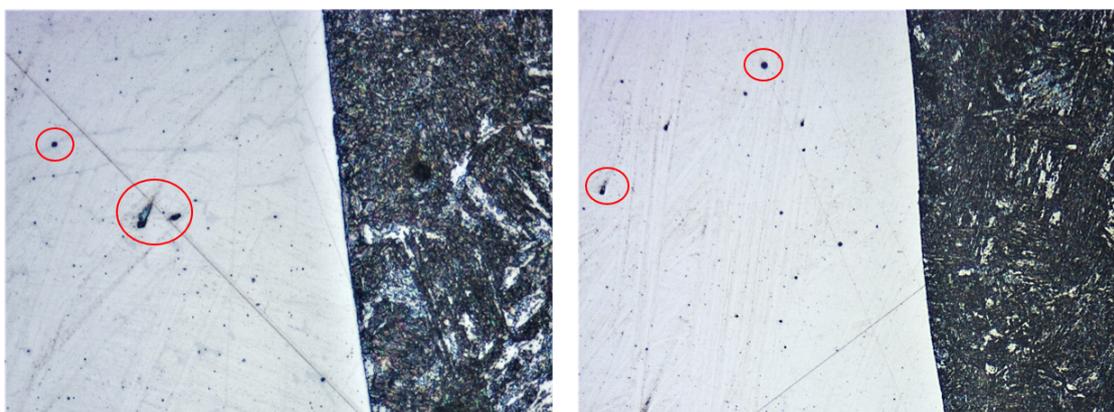


Fonte: Próprio autor.

4.5.3 Defeitos

Ao realizar as análises metalográficas nas amostras 1 e 2 por microscopia ótica (MO), foram identificados alguns defeitos no revestimento que, conforme mostrado no capítulo 2, são típicos dos processos recobrimento por LC. O primeiro deles são as microporosidades distribuídas entre as camadas do revestimento mostradas na Figura 4.18, que estão associadas principalmente com o aprisionamento de bolhas de gás nas partículas do pó metálico, fenômeno inerente ao processo de atomização a gás (GA) utilizado na fabricação de grãos com morfologia esférica.

Figura 4.18: Microporosidades registradas via MO com 50x de ampliação.

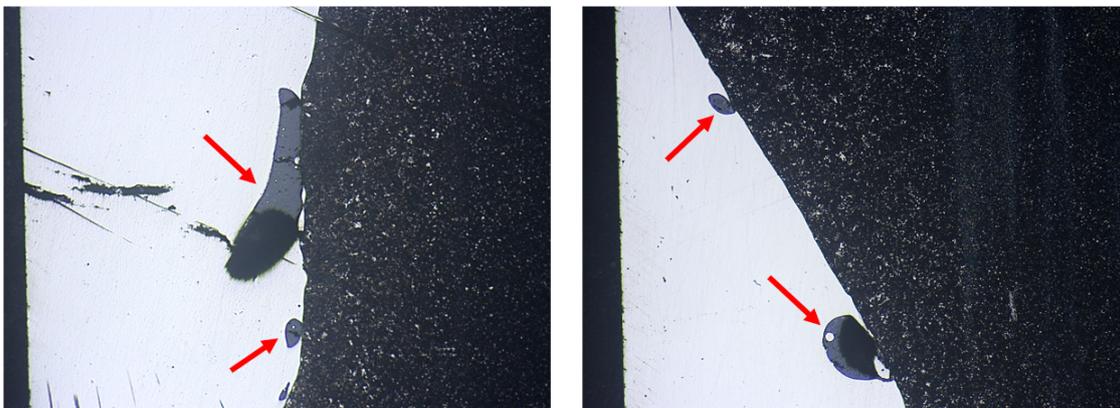


Fonte: Próprio autor.

Na Figura 4.19 são indicados defeitos que podem ser classificados como falta de

fusão, pois possuem formas alongadas e estão localizados no revestimento acima da linha de fusão entre a camada revestida e o substrato.

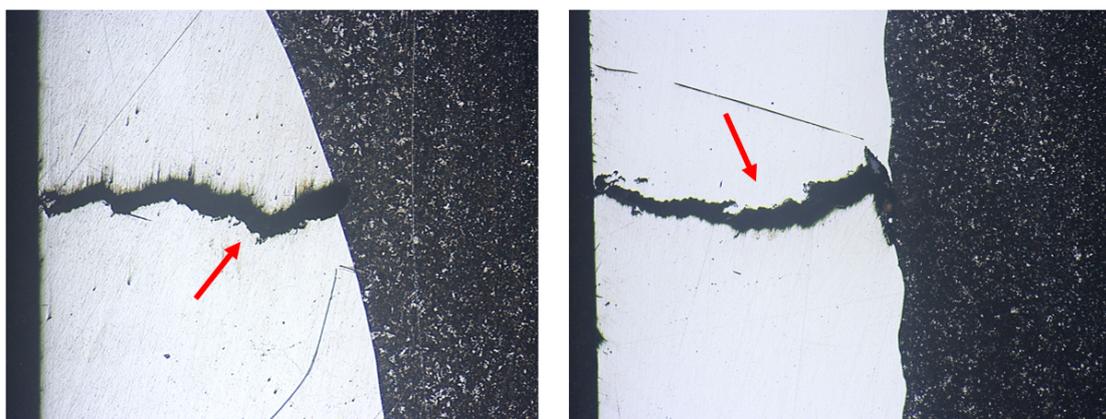
Figura 4.19: Defeitos de falta de fusão registrados via MO com 5x de ampliação.



Fonte: Próprio autor.

Foi possível também identificar, a olho nu, defeitos como trincas atravessando o revestimento desde a superfície externa até o substrato. Essas trincas mostradas na Figura 4.20 ocorreram com maior incidência nas peças fabricadas em material 18CrNiMo7-6, e são resultado de porosidades alongadas formadas por falta de fusão entre o substrato e o revestimento, e que evoluíram para a formação de trincas devido às contrações do material e taxas de resfriamento elevadas. Esses defeitos são considerados críticos ao processo pois, além de gerarem interferência no sinal de *runout* captado pelo sensor EC, diminuem a resistência mecânica do revestimento e da peça como um todo.

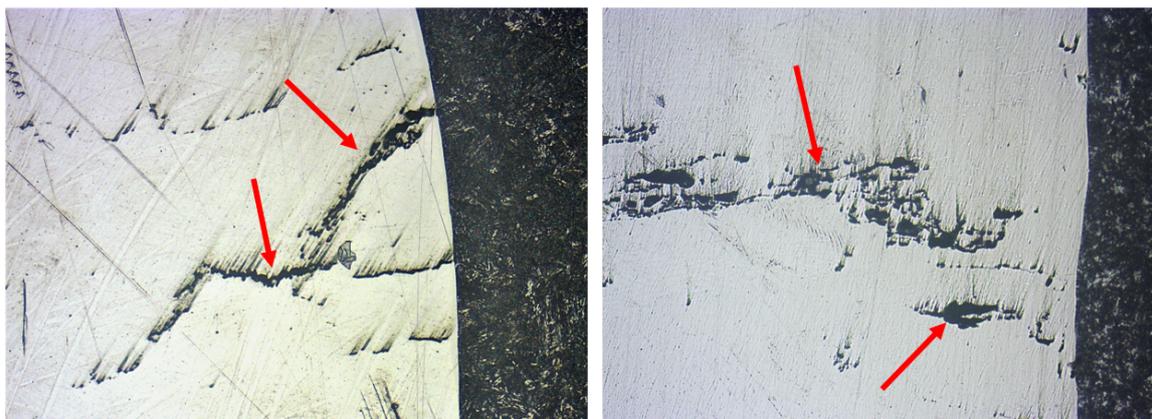
Figura 4.20: Trincas por falta de fusão registradas por análise via MO com 10x de ampliação.



Fonte: Próprio autor.

Adicionalmente, foram encontradas em todas as amostras trincas no revestimento propagando-se no sentido do alinhamento dos grãos (normal à linha de fusão), como mostra a Figura 4.21.

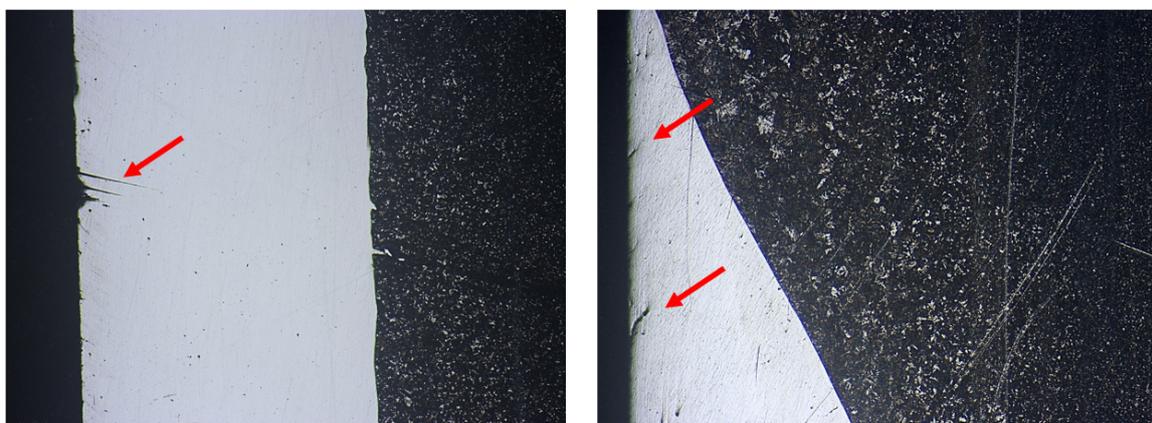
Figura 4.21: Defeitos de falta de fusão registrados por análise via MO com 5x de ampliação.



Fonte: Próprio autor.

Por último, foram identificadas também trincas ocorrendo na superfície externa do revestimento mostradas na Figura 4.22, que foram consideradas relevantes pois, assim como as trincas internas, além de comprometerem a resistência mecânica do revestimento, geram perturbações na leitura do sinal de TIR com sensores EC.

Figura 4.22: Defeitos de falta de fusão registrados por análise via MO com 5x de ampliação.



Fonte: Próprio autor.

4.5.4 Dureza

Para avaliar a dureza superficial nos eixos 1 e 2, foi utilizado o durômetro de impacto digital Proceq Equotip 2. Os valores encontrados foram coletados pelo método de dureza Brinell, mas foram convertidos para dureza Vickers para efeito de comparação com os valores de microdureza nas amostras, e estão listados na Tabela 4.6. Segundo Correia (2018), as alterações de dureza em diferentes regiões de um mesmo material são decorrentes da não homogeneidade do processo de pré-aquecimento, visto que se trata de um processo manual (com maçarico) e pouco controlado.

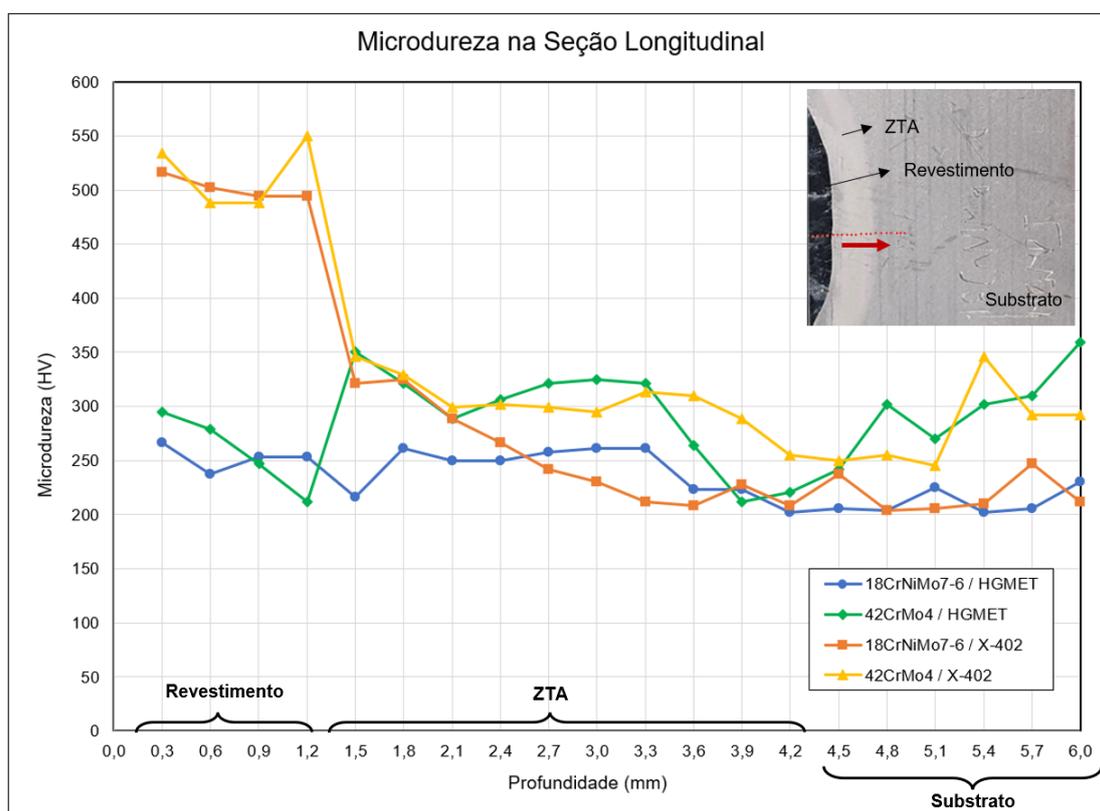
Tabela 4.6: Durezas superficiais - Eixos 1 e 2.

| Eixo | Dureza Superficial [HV] | | | | | | |
|--------|-------------------------|--------------------|------------------------|--------------------|--------------------|------------------------|--------------------|
| | Pista 1 (Substrato) | Pista 2 (HGMET) | Pista 3 (Substrato) | Pista 4 (HGMET) | Pista 5 (X-402) | Pista 6 (Substrato) | Pista 7 (X-402) |
| Eixo 1 | 197 | 252 | 180 | 241 | 458 | 201 | 458 |
| Eixo 2 | 303 | 197 | 292 | 201 | 474 | 285 | 490 |

Fonte: Próprio autor.

Para avaliar o comportamento da dureza no interior dos materiais através do revestimento em direção ao núcleo do eixo, foram coletados os valores de microdureza Vickers nas mesmas amostras utilizadas para avaliar a microestrutura, dessa vez utilizando o equipamento de medição de dureza Clemex ST-2000. Os resultados são mostrados graficamente na Figura 4.23, com identações com espaçamento de 0,3 mm entre si, no sentido da seta vermelha (da superfície externa do eixo até o núcleo), coletando um total de 20 pontos em cada amostra. A força aplicada para impressão das identações é de 1,0 kgf por um período de 10 segundos.

Figura 4.23: Perfil de microdureza medida ao longo da seção transversal das amostras.



Fonte: Próprio autor.

Olhando para os revestimentos, nas amostras de HGMET nota-se uma variação de dureza entre 240 e 300 HV nos primeiros 1,2mm de profundidade (dentro do revestimento), e nas amostras de X-402 os valores oscilam entre 480 e 550 HV. Percebe-se em todas as amostras um aumento de dureza na ZTA em relação ao substrato. Também observado por

Francisco, Santana e Rezende (2020), esse aumento ocorre devido à formação de bainita e martensita no material por conta das altas taxas de resfriamento no processo. Para Lucena (2020), os valores elevados de dureza no revestimento estão associados ao refinamento da estrutura e à precipitação de carbonetos e boretos.

Analisando os substratos, nas amostras de 18CrNiMo7-6, percebe-se uma queda abrupta de dureza na zona de transição entre o revestimento X-402 e a ZTA - de 500 para 325 HV no início da ZTA, caindo gradativamente até os 200 HV no restante da peça -, e uma certa estabilidade nos valores de dureza do revestimento HGMET - em torno dos 250 HV na ZTA e depois 200 HV até os 6,0 mm de profundidade da amostra.

Nas amostras de 42CrMo4, há também uma queda repentina no valor da dureza com o revestimento X-402 - de 550 para 350 HV no início da ZTA, diminuindo até os 300 ao longo da ZTA e depois até os 200 HV no restante, com sinais de aumento de dureza ao final dos 6,0 mm de profundidade da amostragem. No revestimento HGMET, percebe-se um aumento de dureza na ZTA - de 200 para 350 HV, seguido de uma queda no final da ZTA novamente até 200 HV, e outra vez aumentando na zona do substrato até o final das identações.

Conforme previsto por Toyserkani, Khajepour e Corbin (2004) e em concordância com o resultados obtidos por Souto (2013), percebe-se de forma geral uma queda de dureza na região do revestimento partindo da superfície externa em direção à linha de fusão, por conta de um menor refinamento da estrutura dendrítica nessa região típica de processos de deposição em multicamadas. Ao atingir a ZTA, nota-se um aumento de dureza relacionado à formação de carbonetos no material base, predominando também uma estrutura martensítica logo abaixo da linha de fusão devido às altas taxas de resfriamento ao qual os materiais são submetidos nos processos de deposição por LC, e evoluindo para uma estrutura refinada por um segundo revenimento. Por fim, ao sair da ZTA é possível identificar uma estabilidade de dureza no substrato do eixo 1 e um aumento de dureza na mesma região do eixo 2, devido aos níveis de dureza encontrados no material dos dois eixos conforme descrito na Tabela 4.6.

Capítulo 5

Considerações Finais e Conclusão

A solução de revestimento de eixos rotativos de redutores e multiplicadores através do processo de deposição de material por *laser cladding* tem se mostrado vantajosa em relação a outros processos, como a metalização e soldagem convencional, por exemplo. Isso se deve ao fato de o processo de deposição DED-LC provocar o derretimento do substrato, promovendo uma ligação metalúrgica entre as camadas com baixas taxas de diluição e pequena extensão da ZTA, melhorando a aderência do revestimento na peça e mantendo as propriedades do material do revestimento.

Levando-se em consideração que os ensaios de *runout* total (TIR) são etapas essenciais na fabricação dessas peças – desde que no equipamento final onde serão montadas esteja previsto o monitoramento de vibrações relativas com sensores de proximidade do tipo EC –, a recuperação dessas regiões torna-se uma questão crítica e que deve ser avaliada com critério.

Pelos resultados apresentados no capítulo 4, percebe-se que existem desafios no processo de aplicação do revestimento que geram defeitos superficiais e subsuperficiais nessas camadas, e que se tornam obstáculos para as medições do sinal de TIR. E mesmo nas regiões onde não foram identificados esses defeitos, o sinal obtido mostrou-se, em média, 140% maior do que nas regiões onde não foi aplicado o revestimento. O resultado se repetiu para as ligas HGMET e X-402 em cada um dos eixos.

Um dos fatores que prejudica a análise – vivenciado também por outros autores – é a escassez de amostras, uma vez que o processo de deposição dos revestimentos é custoso devido à nobreza dos elementos que compõem as ligas de pó metálico, além do processo em si, que utiliza alto aporte energético e gases nobres como argônio, tanto para transportar o pó pelos bicos injetores como para gerar uma atmosfera protetora na zona da poça de fusão. Além disso, o processo de fabricação dos eixos, horas de máquina para fabricação, tratamento térmico, análise de TIR e destruição das amostras para análise metalográfica, todos esses fatores elevam o custo do projeto. No entanto, a análise dos resultados dos ensaios de TIR – que é o objetivo principal desse trabalho – embasada pela fundamentação teórica levantada no capítulo 2 dessa dissertação produzem conclusões

consistentes sobre não recomendação da realização desse ensaio em pistas localizadas sobre esses revestimentos, até que se estabeleçam parâmetros adequados do processo de LC para possibilitar que isso aconteça.

Analisando os gráficos dos sinais de TIR para os dois eixos, não foram constatadas mudanças significativas no sinal quando alteradas as profundidades para uma mesma liga de revestimento, uma vez que os sinais obtidos em pistas de mesmo revestimento foram muito similares, independente das profundidades dos canais.

Os resultados dos ensaios realizados nas regiões entre os revestimentos (pistas 3 e 6) mostraram-se satisfatórios, porém ainda com valores ligeiramente maiores do que nas pistas de referência. Como foi verificado, as regiões próximas ao revestimento estão dentro da ZTA, que devem ser evitadas sempre que possível.

A análise metalográfica das amostras auxilia no entendimento do comportamento do material do substrato nas proximidades do revestimento. Em todas as amostras verificou-se uma boa taxa de diluição dos metais de adição, mantendo o perfil dos canais praticamente intacto (com pouca deformação e penetração), além de ZTAs de pequena extensão em profundidade – cerca de 100 a 120% da espessura do próprio revestimento. Apesar das alterações na estrutura cristalina do material na linha de fusão e na ZTA, conclui-se que esses fatores não são determinantes nos resultados de ensaio de *runout* sobre os revestimentos, uma vez que a penetração dos campos magnéticos produzidos por sensores EC é pequena. No entanto, as alterações de dureza na ZTA afetam as regiões do substrato nas extremidades laterais dos revestimentos, produzindo alterações no sinal captado.

Nas análises dos perfis de microdureza nas amostras, percebe-se uma queda de dureza ao longo do revestimento, partindo da superfície externa da peça em direção ao núcleo. Na ZTA nota-se um aumento de dureza devido a formação de carbonetos e ao rápido resfriamento do material, que atinge a fase de austenitização e resfria rapidamente formando uma estrutura predominantemente martensítica. Ao longo da ZTA, uma queda de dureza é identificada por conta de um segundo revenimento no material e refinamento dos grãos e, por fim, uma estabilização da dureza ao atingir o substrato numa estrutura martensítica já presente no material base. Com base nesse perfil de microdureza característico, conclui-se que revestimentos de menor espessura apresentarão maior difusão de temperatura ao substrato e conseqüentemente menores durezas, o que os torna materiais com estrutura de alta suscetibilidade magnética, característica não desejada para inspeções de *runout*.

O mesmo ocorre para revestimentos de maior espessura, mas que passam por processos de usinagem que retiram muito sobremetal. Quanto maior a quantidade de material removido, mais a superfície externa da peça se aproxima da interface entre revestimento e substrato. Com isso, além de apresentar uma dureza mais baixa, existe uma maior incidência de defeitos de ligação como poros por falta de fusão entre os materiais e poros produzidos por bolhas de gás aprisionado, fatores que influenciam diretamente nos sinais captados pelo sensor EC.

Os defeitos encontrados no revestimento são prejudiciais pois interferem fortemente na não-homogeneidade do material, propriedade essencial para obter medições estáveis e confiáveis em sensores EC. Além disso, defeitos de ligação e trincas podem se propagar tanto no sentido de desprendimento do revestimento como avançar para o próprio material do substrato, colocando em risco sua resistência mecânica e, portanto, limitando suas aplicações.

Portanto, a recomendação é que, em um eventual desvio no eixo onde se deseja realizar a recuperação por *laser cladding*, as pistas de *runout* sejam preservadas e mantidas a uma distância de pelo menos 5,0 mm das extremidades laterais de regiões que possuam revestimentos depositados por LC.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Com o intuito de aprofundar os estudos de revestimentos depositados por LC objetivando a utilização desse processo de recuperação em quaisquer regiões dos eixos, são propostas as seguintes sugestões para experimentos e trabalhos futuros:

- Em um único eixo, fixando composição química do substrato e do revestimento, com canais de profundidade constante, realizar o processo de deposição variando os parâmetros em cada pista, como potência do laser e velocidade de avanço do cabeçote.
- Em eixos de mesmo material e mesmas dimensões (diâmetro e comprimento), mudar a profundidade dos canais de um em relação ao outro, mantendo fixos os parâmetros do processo LC.
- Em eixos de mesmo material e canais com profundidade constante, variar o diâmetro dos eixos para verificar a influência da difusão do calor por convecção em peças de massas diferentes, fixando os parâmetros do processo LC.
- Aumentando as possibilidades de configuração das amostras conforme proposto nos itens supracitados, realizar análise estatística de variância (ANOVA) para verificar a influência de cada parâmetro nos resultados obtidos.
- Para análise metalográfica de macro e microestrutura dos revestimentos, dar preferência a métodos de preparo de amostras automatizados, buscando uma uniformidade na preparação das amostras com baixos desvios de paralelismo da face a ser inspecionada, fator que promove melhor focalização e conseqüentemente melhor resolução nas imagens geradas. Testar diferentes reagentes no substrato e nos revestimentos com o intuito de selecionar o que promova a melhor visualização da estrutura cristalina em cada região. Uma solução proposta por Francisco, Santana

e Rezende (2020) é a utilização do reagente Água Régia, composto de 3 partes de HCl para 1 parte de HNO_3 .

- Sempre que possível, optar pela análise de microestrutura feita com microscópios eletrônicos de varredura (MEV) ou com tecnologia semelhante ou superior, a fim de garantir uma melhor visualização e interpretação das imagens geradas.
- Projetar eixos com dimensões que permitam realizar, em uma mesma peça, ensaios de *runout* mecânico e total, análise de microestrutura e ensaios mecânicos de resistência a tração, impacto, deflexão e torção.
- Realizar ensaios de *runout*, sempre que possível, em máquinas diferentes das que foram utilizadas no acabamento das pistas, possibilitando também a realização do ensaio com líquido penetrante antes da inspeção para avaliação do TIR.
- Para análise de *runout* mecânico, sempre que possível, optar pela utilização de instrumentos que possuam resposta em frequência (LVDT) e possibilitem uma análise simultânea com o sensor EC. Dessa forma torna-se possível a sobreposição dos dados, melhorando a qualidade da análise dos resultados, além de produzir uma amostragem de desvios geométricos com maior número de pontos coletados por volta.
- Para eixos fabricados nos mesmos materiais dos que foram utilizados nesse estudo, testar a deposição de outras ligas em parceria com os fabricantes de pós metálicos, objetivando a diminuição de defeitos de ligação, porosidades, fissuras e trincas abertas na superfície, sem prejudicar as propriedades mecânicas dos revestimentos.
- Testar a solução de conformação com ferramenta de diamante nas pistas revestidas por LC, processo comumente utilizado na indústria para melhorar o acabamento superficial semelhante ao roleteamento (*deep rolling*). O processo tem o objetivo de conformar o material comprimindo as cristas e encruando a superfície externa dos eixos. A solução funciona em alguns casos realizados diretamente em materiais forjados (substratos), mas não foi testada nas pistas de revestimento objetos desse estudo.

Referências Bibliográficas

ADEWALE, I. D.; TIAN, G. Y. Decoupling the influence of permeability and conductivity in pulsed eddy-current measurements. **IEEE Transactions on Magnetics**, IEEE, v. 49, n. 3, p. 1119–1127, 2012.

ANDREUCCI, R. Ensaio por ultrassom. **Associação Brasileira de Ensaios Não Destrutivos e Inspeção - ABENDI**, São Paulo, BR, 2022.

ANDREUCCI, R. A. Ensaio com líquidos penetrantes. **Associação Brasileira de Ensaios Não Destrutivos e Inspeção - ABENDI**, São Paulo, BR, 2021.

API-613. **Special Purpose Gear Units for Petroleum, Chemical and Gas Industry Services**. 6. ed. Washington, EUA: American Petroleum Institute Publishing Services, 2021.

API-670. **Machinery Protection Systems**. 5. ed. Washington, EUA: American Petroleum Institute Publishing Services, 2014.

API-677. **General-Purpose Gear Units for Petroleum, Chemical and Gas Industry Services**. 3. ed. Washington, EUA: American Petroleum Institute Publishing Services, 2006.

API-687. **Rotor Repair**. 1. ed. Washington, EUA: American Petroleum Institute Publishing Services, 2001.

ASTM-B213-13. **Standard Test Methods for Flow Rate of Metal Powders Using the Hall Flowmeter Funnel**. West Conshohocken, EUA: American Society for Testing and Materials, 2013.

BERTOTTI, G.; MAYERGOYZ, I. D. **The Science of Hysteresis: Physical modeling, micromagnetics, and magnetization dynamics**. Amsterdã, NL: Gulf Professional Publishing, 2006. v. 2.

BORGES, B.; QUINTINO, L.; MIRANDA, R. M.; CARR, P. Imperfections in laser cladding with powder and wire fillers. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Springer, v. 50, n. 1, p. 175–183, 2010.

BS-EN-10228-2. **Non-destructive testing of steel forgings - Part 2: Penetrant Testing**. Londres, GB: BSI Standards Limited, 2016.

BS-EN-10228-3. **Non-destructive testing of steel forgings - Part 3: Ultrasonic testing of ferritic or martensitic steel forgings**. Londres, GB: BSI Standards Limited, 2016.

CAVALIERE, P. **Laser Cladding of Metals**. Cham, CH: Springer, 2021.

CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos**. 7. ed. São Paulo, BR: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais - ABM, 1979.

COEY, J. M. **Magnetism and magnetic materials**. Dublin, UK: Cambridge University Press, 2010.

COLPAERT, H.; COSTA, A. L. V. da et al. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. São Paulo, BR: Editora Blucher, 2008.

CORREIA, A. B. Seleção e otimização dos parâmetros do processo de laser cladding para a reparação de componentes. **Dissertação realizada no âmbito do Mestrado em Engenharia Mecânica**, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2018.

DAI, L.; CHAN, Y.; VASTOLA, G.; KHAN, N.; RAGHAVAN, S.; ZHANG, Y. Characterizing the intrinsic properties of powder—a combined discrete element analysis and hall flowmeter testing study. **Advanced Powder Technology**, Elsevier, v. 32, n. 1, p. 80–87, 2021.

DEBLOCK, M. J.; WOOD, B. M.; MCDONNELL, J. Predicting shaft proximity probe track runout on API motors and generators. In: IEEE. **2007 IEEE Petroleum and Chemical Industry Technical Conference**. Alberta, CA, 2007.

DEBROY, T.; WEI, H.; ZUBACK, J.; MUKHERJEE, T.; ELMER, J.; MILEWSKI, J.; BEESE, A. M.; WILSON-HEID, A. d.; DE, A.; ZHANG, W. Additive manufacturing of metallic components—process, structure and properties. **Progress in Materials Science**, Elsevier, v. 92, p. 112–224, 2018.

DIN EN 10083-3. **Steels for quenching and tempering - Part 3: Technical delivery conditions for alloy steels**. Brussels, BE: European Committee for Standardization, 2007.

DIN EN 10084. **Case hardening steels - Technical delivery conditions**. Brussels, BE: European Committee for Standardization, 2008.

FRANCISCO, A. C.; SANTANA, A. I. de C.; REZENDE, M. C. Estudo sobre soldagem de revestimento utilizando o processo laser cladding. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 9, p. 64681–64694, 2020.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. Fundamentos de física, volume 3: Eletromagnetismo. **Jearl Walker: tradução e revisão técnica Ronaldo Sérgio de Biasi. Rio de Janeiro: LTC**, p. 395, 2016.

HARTOG, J. P. D. **Mechanical vibrations**. Nova York, EUA: Courier Corporation, 1985.

HUBERT, A.; SCHÄFER, R. **Magnetic domains: the analysis of magnetic microstructures**. Berlin, DE: Springer Science & Business Media, 2008.

ISO-4386-1. **Plain bearings — Metallic multilayer plain bearings - Part 1: Non-destructive ultrasonic testing of bond of thickness greater than or equal to 0,5 mm**. 3. ed. Genebra, CH: BSI Standards Limited, 2012.

JIANG, J.; LIAN, G.; XU, M.; LI, C.; CHEN, B.; LI, B. Influence of preheating temperature on mechanical properties of laser cladding layer. In: AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **International Manufacturing Science and Engineering Conference**. Virginia, EUA, 2016. v. 49897, p. V001T02A031.

- KIES, F.; WILMS, M. B.; PIRCH, N.; PRADEEP, K. G.; SCHLEIFENBAUM, J. H.; HAASE, C. Defect formation and prevention in directed energy deposition of high-manganese steels and the effect on mechanical properties. **Materials Science and Engineering: A**, Elsevier, v. 772, p. 138688, 2020.
- KRAUTKRÄMER, J. **Ultrasonic testing of materials**. Berlin, DE: Springer Science & Business Media, 2013.
- LITTRELL, N. Understanding and mitigating shaft runout. **Orbit**, v. 25, n. 3, 2005.
- LIU, Y.; LI, A.; CHENG, X.; ZHANG, S.; WANG, H. Effects of heat treatment on microstructure and tensile properties of laser melting deposited AISI 431 martensitic stainless steel. **Materials Science and Engineering: A**, Elsevier, v. 666, p. 27–33, 2016.
- LUCENA, F. A. d. Produção de recobrimentos resistentes ao desgaste através de laser cladding de pós das ligas amorfizáveis Fe-Co-Nb-B-(y). **Tese para obtenção do título de Doutor em Ciência e Engenharia de Materiais**, Universidade Federal de São Carlos, 2020.
- MEYSAMI, A.; GHASEMZADEH, R.; SEYEDEIN, S.; ABOUTALEBI, M. An investigation on the microstructure and mechanical properties of direct-quenched and tempered AISI 4140 steel. **Materials & Design**, Elsevier, v. 31, n. 3, p. 1570–1575, 2010.
- NING, J.; ZHANG, H.-B.; CHEN, S.-M.; ZHANG, L.-J.; NA, S. J. Intensive laser repair through additive manufacturing of high-strength martensitic stainless steel powders (i)-powder preparation, laser cladding and microstructures and properties of laser-cladded metals. **Journal of Materials Research and Technology**, Elsevier, Amsterdã, NL, v. 15, p. 5746–5761, 2021.
- PAN, H.; WANG, Z.; ZHANG, J.; LI, J.; WEI, G.; QIAO, B.; LIU, L.; LI, J.; ZHAO, Y.; WANG, Z. et al. The effects of QP on microstructures and mechanical properties of a 18CrNiMo7-6 steel. **Materials Science and Engineering: A**, Elsevier, v. 861, p. 144374, 2022.
- PETROVIC, P. B.; JAKOVLJEVIC, Z. Dynamic compensation of electrical runout in eddy current contactless measurements of non-stationary ferromagnetic target. **Sensor Letters**, American Scientific Publishers, v. 7, n. 2, p. 191–202, 2009.
- RAO, S. S.; YAP, F. F. **Mechanical vibrations**. Nova York, EUA: Addison-wesley New York, 1995. v. 4.
- SCHWENKE, H.; KNAPP, W.; HAITJEMA, H.; WECKENMANN, A.; SCHMITT, R.; DELBRESSINE, F. Geometric error measurement and compensation of machines—an update. **CIRP annals**, Elsevier, v. 57, n. 2, p. 660–675, 2008.
- SOUSA, J. M. S. d. et al. Análise das propriedades tribológicas de revestimentos de ni-cr-b-si depositados via laser cladding a pó. **Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica**, Universidade Federal de Santa Catarina, 2019.
- SOUTO, H. I. M. Laser cladding: sua aplicação à deposição de revestimentos em lâminas de destrocadores de madeira. **Dissertação realizada no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais**, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2013.

THOMAZINI, D.; ALBUQUERQUE, P. U. B. de. **Sensores industriais: fundamentos e aplicações**. São Paulo, BR: Saraiva Educação SA, 2020.

TIAN, G.; ZHAO, Z.; BAINES, R. The research of inhomogeneity in eddy current sensors. **Sensors and Actuators A: physical**, Elsevier, v. 69, n. 2, p. 148–151, 1998.

TIPLER, P. A.; MOSCA, G. **Física para Cientistas e Engenheiros, 6^a edição**. Rio de Janeiro, BR: LTC, 2009.

TORIMS, T. The application of laser cladding to mechanical component repair, renovation and regeneration. **Daaam international scientific book**, DAAAM International Vienna, v. 12, p. 587–608, 2013.

TOYSERKANI, E.; KHAJEPOUR, A.; CORBIN, S. F. **Laser Cladding**. Florida, EUA: CRC press, 2004.

WILSON, J. S. **Sensor Technology Handbook**. Amsterdã, NL: Elsevier, 2004.

YA, W. Laser materials interactions during cladding: analyses on clad formation, thermal cycles, residual stress and defects. 2015.

YIN, Y.; PAN, C.; ZHANG, R.; LU, C.; ZHAO, C.; LI, Z. Research on microstructure transformation and property of 18Cr–0.2C Fe-based coatings. **Surface Engineering**, Taylor & Francis, v. 35, n. 7, p. 604–610, 2019.

YU, Y.; TIAN, G.; LI, X.; SIMM, A. An approach to ERO problem in displacement eddy current sensor. **Nondestructive Testing and Evaluation**, Taylor & Francis, v. 28, n. 3, p. 195–207, 2013.

ZHANG, Y.; JAROSINSKI, W.; JUNG, Y.-G.; ZHANG, J. Additive manufacturing processes and equipment. In: **Additive manufacturing**. Amsterdã, NL: Elsevier, 2018. p. 39–51.