



Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Centro de Tecnologia e Ciências

Faculdade de Engenharia

Paulo Rodrigues Oliveira


**Avaliação do Recobrimento de TiN Aplicado em Ferramenta de Aço AISI
1045 para o Processo de Soldagem por Atrito, FSW**

Rio de Janeiro

2018

Paulo Rodrigues Oliveira

**Avaliação do Recobrimento de TiN Aplicado em Ferramenta de Aço AISI 1045 para o
Processo de Soldagem por Atrito, FSW**



Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Mecânica dos Sólidos.

Orientador: Prof. José Brant de Campos

Rio de Janeiro

2018

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B

O48 Oliveira, Paulo Rodrigues.
Avaliação dorecobrimento de TiN aplicado em ferramenta de aço
AISI 1045 para o processo de soldagem por atrito, FSW / Paulo
Rodrigues Oliveira. – 2018.
115f.

Orientador: José Brant de Campos.
Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro,
Faculdade de Engenharia.

1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Soldagem - Teses. 3. Ligas de
alumínio - Teses. 4. Ligas de titânio - Teses. 5. Aço para ferramentas -
Teses. I. Campos, José Brant de. II. Universidade do Estado do Rio de
Janeiro, Faculdade de Engenharia. III. Título.

CDU 621.791.03-034.1

Bibliotecária: Júlia Vieira – CRB7/6022

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta tese,
desde que citada a fonte.

Assinatura

Data

Paulo Rodrigues Oliveira

**Avaliação do Recobrimento de TiN Aplicado em Ferramenta de Aço AISI 1045
para o Processo de Soldagem por Atrito, FSW**

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Mecânica dos Sólidos.

Aprovado em: ____ de julho de 2018

Banca Examinadora:

Prof. José Brant de Campos, D.Sc. (Orientador)
Faculdade de Engenharia - UERJ

Prof. José Luís Lopes da Silveira, D.Sc.
Faculdade de Engenharia – COPPE / UFRJ

Prof. Marcelo Huguenin Maia da Costa, D.Sc.
Departamento de Física – PUC / RIO

Prof. Antônio Marinho Júnior, D.Sc.
Faculdade de Engenharia - UERJ

Prof. Alexandre Mello de Paula Silva, D.Sc.
Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas - CBPF

Capitão de Fragata (EN) Otávio Henrique Paiva Martins Fontes, D.Sc.
Marinha do Brasil - MB

Rio de Janeiro

2018

DEDICATÓRIA

A minha Família, pois sem o seu apoio e compreensão a realização deste trabalho não seria possível.

AGRADECIMENTOS

A Deus, único digno de toda a Honra e Glória.

A minha Família pelo apoio e compreensão pelos momentos de dedicação ao trabalho. Raquel e Letícia vocês são especiais e estaremos sempre juntos.

A Marinha do Brasil por ter permitido a realização deste trabalho, em tempo parcial, possibilitando o aprimoramento e continuo adestramento. Em especial ao Contra-Almirante (EN) Celso Mizutani KOGA por sua fidalguia, confiança e apoio. Aos Capitães de Fragata (EN) Otávio Henrique PAIVA Martins Fontes e SERGIO AUGUSTO Alves Fernandes pelos momentos de discussão e confiança depositada. Aos demais amigos pelo incentivo e apoio.

Ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade do Estado do Rio de Janeiro pela atenção dos integrantes, compreensão e entendimento para a realização do trabalho. Ao Professor Dr. José Brant de Campos pelos ensinamentos e por sua amizade, meu Muito Obrigado! Ao NANOFAB/UERJ pelo apoio material e de equipamentos. Ao Pós Doutorando Vitor, pelas imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e discussões sobre as técnicas de caracterização.

Especial agradecimento ao Laboratório de Superfícies e Nanoestruturas/CBPF e todos os seus integrantes, destaco o empenho e dedicação do engenheiro Alexandre Gerk, amigo e que sem as horas gastas no laboratório este trabalho não estaria concluído.

As instituições parceiras deste trabalho MB, CBPF, PUC/RJ, UFRJ, IME, USU e ICN pois sem o apoio não seria possível a realização das atividades propostas.

THE ONLY EASY DAY WAS YESTERDAY

U.S. Navy SEAL

RESUMO

OLIVEIRA, Paulo Rodrigues. **Avaliação do recobrimento de TiN aplicado em ferramenta de aço AISI 1045 para o processo de soldagem por atrito, FSW**. 2018. 115f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

O processo de soldagem por fricção e mistura mecânica, FSW (*Friction Stir Welding*), consiste na realização da união de materiais, dissimilares ou não, com o uso de uma ferramenta rotativa, responsável pelo aquecimento e mistura das partes a serem soldadas. Neste processo não ocorre a fusão dos materiais envolvidos e uma série de defeitos, oriundos do processo de soldagem, são eliminados. Desenvolvido durante a década de 1990 pelo instituto TWI (*The Welding Institute*) o processo FSW é destaque, devido ao baixo custo para a realização de soldas em ligas que tradicionalmente apresentam dificuldade de união pelos processos de soldagens convencionais. Como exemplo citamos as ligas de Al de aplicação na indústria aeronáutica, aeroespacial e de construção naval das séries 2XXX.X (Al-Cu), 5XXX.X (Al-Mg), 6XXX.X (Al-Mg-Si) e 7XXX.X (Al-Zn). Também o processo FSW vem sendo aplicado não só a ligas de Al, como também em ligas de maior dureza e resistência como aço e ligas de Ti. Peça fundamental no processo FSW a ferramenta responsável pela penetração, fricção e formação do cordão de solda requer criterioso método de seleção, para a obtenção de uma relação custo/benefício viável a produção. O objetivo deste trabalho é avaliar o recobrimento superficial realizado em ferramentas de aço AISI 1045 para o processo FSW visando o aumento da vida útil e mantendo o baixo custo para a sua fabricação. O desenvolvimento deste trabalho consistiu no recobrimento de amostras de aço AISI 1045 com TiN, pelo método *Magnetron Sputtering*, caracterização do filme depositado através de técnicas de difração de Raios X (DRX), microscopia eletrônica de varredura (MEV), espectroscopia de fotoelétrons por Raio X (XPS) e ensaios de microdureza Vickers (HV). O rendimento das ferramentas foi avaliado através da realização de ensaios pelo processo FSP, comparando esforços resultantes e deformações entre as ferramentas, com e sem recobrimento.

Palavras-chave: Soldagem; Ligas de alumínio; Ligas de titânio; Aço para ferramentas.

ABSTRACT

OLIVEIRA, Paulo Rodrigues. **Evaluation of TiN Coating Applied in Steel Tool AISI 1045 for the Friction Welding Process, FSW**. 2018. 115f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

The Friction Stir Welding process, FSW, consists in the realization of the union of materials, dissimilar or not, with the use of a rotating tool, responsible for the heating and mixing of the parts to be welded. In this process the materials involved do not melt and many defects from the welding process are eliminated. Developed during the 1990s by the The Welding Institute, TWI, the FSW process has been increased in application due to the low cost of welding in alloys, that traditionally have difficulty to be joining by conventional welding processes. For example Al alloys of application in the aeronautical, aerospace and shipbuilding industries of the series 2XXX.X (Al-Cu), 5XXX.X (Al-Mg), 6XXX.X (Al-Mg-Si) and 7XXX.X (Al-Zn). Also, the FSW process has been applied not only to Al alloys, but also to alloys of higher hardness and strength such as steel and Ti alloys. A fundamental part in the FSW process, the tool is responsible for penetration, friction and formation of the weld joint and requires careful selection method, to obtain a viable cost-benefit ratio. The objective of this work is to evaluate the surface coating performed on AISI 1045 steel tools for the FSW process aiming at increasing the useful life and maintaining the low cost for its manufacture. The development of this work consisted in the coating samples of AISI 1045 with TiN by the Magnetron Sputtering method, characterization of the deposited film through X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM), photoelectron spectroscopy by X-Ray (XPS) and Vickers microhardness tests (HV). The yield of the tools evaluated through the FSP process, comparing the resulting stresses and deformations between the tools, with and without recoating.

Keywords: Welding; Aluminum alloy; Titanium alloys; Tool-steel.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 – (a) Esquema de soldagem pelo processo FSW e (b) etapas em que ocorrem o processo de soldagem, adaptado [3]. | 19 |
| Figura 2 – Subchassi dos veículos Honda Accord fabricados a partir de 2013. Exemplifica união de materiais dissimilares, aço e Al, na indústria de bens de consumo, produção em massa [4]. | 20 |
| Figura 3 – Seção transversal esquemática do processo de soldagem FSW utilizado para a soldagem do subchassi dos modelos Honda Accord produzidos a partir de 2013 [4]. | 20 |
| Figura 4 – Caverna de pressão em fuselagem de aeronaves. Foto (A) componente produzido anterior ao processo FSW constituído de 60 chapas, 2500 rebites e cerca de 300m de selagem. Foto (B) componente produzido pelo processo FSW constituído diretamente por uniões das chapas soldadas de topo. Adaptado de [7]. | 23 |
| Figura 5 – Curvas de influência da deposição de filme sobre a vida útil aplicada em uma ferramenta de corte; A) HSS, B) HSS nitretado, C) TiN reafiado e D) TiN nova [39]. | 26 |
| Figura 6 – Representação esquemática de uma superfície metálica em contato com o ar. Sendo as regiões: A - metal não afetado, B - metal afetado com camada de óxido, C - camada de óxido, D - água e oxigênio adsorvidos, E - gordura e F - poeira [10]. | 30 |
| Figura 7 – Configurações de juntas para o processo FSW: (a) topo simples, (b) topo de aresta, (c) topo “T”, (d) sobreposta, (e) sobreposta múltipla, (f) sobreposta “T” e (g) filete [7]. | 33 |
| Figura 8 – Chapas de liga de Al 5052 com juntas de topo soldadas por FSW. Acabamento superficial do processo assegura melhoras no desempenho dos processos de união. | 34 |
| Figura 9 – Seção transversal de regiões de uma união soldada pelo processo FSW [12]. | 35 |
| Figura 10 – Representação de uma ferramenta típica para o processo de solda FSW, adaptado de [12]. | 36 |
| Figura 11 – Representação esquemática do equipamento utilizado para a realização do processo de nitretação iônica e deposição do filme de TiN, laboratório de nanomateriais CBPF, adaptado de [19]. | 41 |
| Figura 12 – Reator esquemático para a realização de deposição de filmes finos pelo processo PVD <i>sputtering</i> . [adaptado de 24]. | 47 |
| Figura 13 – Arranjo de um processo <i>sputtering</i> com o uso de fonte RF [27]. | 49 |

| | |
|--|----|
| Figura 14 – Comparação entre os processos <i>sputtering</i> (a) <i>sputtering</i> convencional com fonte DC e (b) <i>magnetron sputtering</i> também com fonte DC. (c) arranjo das linhas de campo magnéticas no cátodo de um <i>magnetron</i> [21]..... | 50 |
| Figura 15 – Fluxograma das atividades desenvolvidas no trabalho. | 54 |
| Figura 16 – Cabine de jateamento abrasivo utilizada no preparo superficial das amostras e ferramentas. | 55 |
| Figura 17 – Rugosímetro SP1560, fabricado pela TQC, utilizado para realização de medidas de rugosidade superficial..... | 56 |
| Figura 18 – Microdurômetro utilizado para realização das mediadas, LaCam/UERJ. | 57 |
| Figura 19 – Difratômetro <i>X’Pert Pro</i> do laboratório de cristalografia e difração de raios-x do CBPF. | 58 |
| Figura 20 – Microscópio eletrônico de varredura de emissão de campo (MEV-FEG) pertencente ao NanoFab/UERJ. | 59 |
| Figura 21 – Porta amostras com dispositivo de fixação desenvolvido e construído na oficina mecânica do CBPF. | 60 |
| Figura 22 – Reator <i>magnetron sputtering</i> instalado no Laboratório de Superfícies e Nanoestruturas/CBPF, utilizado para a realização do processo de nitretação a plasma e deposição do filme de TiN..... | 60 |
| Figura 23 – Equipamento XPS utilizado para realização de análise química superficial, PUC/RIO. | 63 |
| Figura 24 – Esquema de projeto proposto para realização dos ensaios de FSP, análise do comportamento das ferramentas, adaptado de [9]..... | 64 |
| Figura 25 – Conjunto de ferramentas com e sem recobrimento de TiN utilizadas para a realização dos ensaios de FSP. | 65 |
| Figura 26 – Cabeçote, mandril de fixação e ferramenta acoplados no centro de usinagem CNC Polaris V400, CEFCON COPPE/UFRJ. | 65 |
| Figura 27 – Dinamômetro e conjunto de fixação da peça (corpo de provas) para a execução do processo FSP. | 66 |
| Figura 28 - Paquímetro utilizado para realização da verificação dimensional..... | 66 |
| Figura 29 – Valores de rugosidade para as diferentes etapas do processo de fabricação..... | 67 |
| Figura 30 – Valores de microdureza <i>Vickers</i> para as amostras ensaiadas..... | 68 |
| Figura 31 – DRX das amostras após as etapas de produção. Em vermelho (1) aço AISI 1045 jateado, em azul (2) após a nitretação a plasma e em verde (3) deposição do filme de TiN.... | 69 |

| | |
|---|----|
| Figura 32 – Ajuste para a determinação das fases pelo Método de <i>Rietveld</i> da amostra com a deposição do revestimento..... | 71 |
| Figura 33 – Microscopia eletrônica de varredura das amostras com magnificação de 1.000X, (a) aço AISI1045 jateado, (b) nitretado e (c) com o revestimento de TiN, filme acompanhou a morfologia superficial depositando em “camadas”..... | 72 |
| Figura 34 - Microscopia eletrônica de varredura das amostras com magnificação de 5.000X, (a) aço AISI1045 jateado e (b) nitretado..... | 73 |
| Figura 35 - Microscopia eletrônica de varredura das amostras com filme de TiN magnificação de 60.000X (a) e 100.000X (b)..... | 73 |
| Figura 36 – Espectros XPS, C1s, para a amostra revestida com TiN..... | 75 |
| Figura 37 - Espectros XPS, N1s, para a amostra revestida com TiN..... | 76 |
| Figura 38 – Espectro XPS, O1s, para a amostra revestida com TiN..... | 77 |
| Figura 39 – Espectro XPS, Ti2p, para a amostra revestida com TiN..... | 78 |
| Figura 40 – Amostras após a realização do processo FSP. Amostras A, D e F sem recobrimento de TiN..... | 79 |
| Figura 41 – Gráficos de torque e força axial das amostras número 1 com 1200rpm, 200mm/min, com e sem revestimento. | 80 |
| Figura 42 - Gráficos força transversal e de avanço das amostras número 1 com 1200rpm, 200mm/min, com e sem revestimento..... | 81 |
| Figura 43 – Torque máximo em função da rotação e da velocidade de avanço para (a) ferramenta com revestimento e (b) ferramenta sem revestimento..... | 84 |
| Figura 44 – Força axial máxima em função da rotação e da velocidade de avanço para (a) ferramenta com revestimento e (b) ferramenta sem revestimento. | 85 |
| Figura 45 – Força transversal máxima em função da rotação e da velocidade de avanço para (a) ferramenta com revestimento e (b) ferramenta sem revestimento. | 86 |
| Figura 46 – Força de avanço máxima em função da rotação e da velocidade de avanço para (a) ferramenta com revestimento e (b) ferramenta sem revestimento. | 87 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 – Benefícios do processo FSW aplicados na indústria. Adaptado de [1]. | 21 |
| Tabela 2 – Histórico do processo de soldagem. Adaptado de [11]. | 28 |
| Tabela 3 – Características dos materiais a serem soldados pelo processo FSW [2]. | 31 |
| Tabela 4 – Variação percentual das propriedades da liga 2024, na região de solda FSW, em relação ao metal base. Adaptado de [2]. | 32 |
| Tabela 5 – Variação percentual das propriedades da liga 7075, na região de solda FSW, em relação ao metal base. Adaptado de [2]. | 32 |
| Tabela 6 – Principais materiais soldados pelo processo FSW com sugestão de material para fabricação da ferramenta. Adaptado de [6]. | 38 |
| Tabela 7 – Propriedades características dos principais revestimentos realizados pelo método PVD, adaptado de [21]. | 45 |
| Tabela 8 - Principais propriedades mecânicas do aço AISI 1045 [29]. | 52 |
| Tabela 9 - Principais propriedades mecânicas do TiN [30]. | 53 |
| Tabela 10 – Principais propriedades mecânicas do Al5052 H34 [31]. | 53 |
| Tabela 11 - Condições para os processos de <i>etching</i> e nitretação a plasma para as amostras. | 61 |
| Tabela 12 – Ensaios de deposição de TiN para determinar parâmetros de deposição. | 62 |
| Tabela 13 – Energias de ligação e <i>FWHM</i> pra ligações típicas para filmes de TiN depositados por técnicas industriais de <i>PVD</i> [35, 36, 38]. | 74 |
| Tabela 14 – Resultado comparativo entre as áreas dos espectros XPS com os valores típicos de energia de ligação. | 79 |
| Tabela 15 – Relação de desempenho entre ferramentas com e sem o filme de TiN, processo FSP. | 82 |
| Tabela 16 – Análise estatística da relação de desempenho para as grandezas estudadas. | 82 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | | |
|--------|---|--|
| FSW | - | <i>Friction stir welding</i> |
| TWI | - | <i>The welding institute</i> |
| AISI | - | <i>American iron and steel institute</i> |
| DRX | - | Difração de Raios X |
| MEV | - | Microscópio eletrônico de varredura |
| FEG | - | <i>Field emission gun</i> |
| XPS | - | Espectroscopia de fotoelétrons por Raios X |
| FSP | - | <i>Friction stir process</i> |
| ICN | - | Itaguaí Construções Navais |
| USU | - | Universidade Santa Úrsula |
| IME | - | Instituto Militar de Engenharia |
| CBPF | - | Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas |
| MB | - | Marinha do Brasil |
| PUC/RJ | - | Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro |
| UFRJ | - | Universidade Federal do Rio de Janeiro |
| H/E | - | Relação entre dureza e módulo de elasticidade |
| SSW | - | <i>Solid state welding</i> |
| ERW | - | <i>Electric resistance welding</i> |
| OAW | - | <i>Oxyacetylene welding</i> |
| TW | - | <i>Thermite welding</i> |
| MMA | - | <i>Manual metal arc</i> |
| SMAW | - | <i>Shield metal arc welding</i> |
| ESW | - | <i>Electroslag welding</i> |
| PAW | - | <i>Plasma arc welding</i> |
| TIG | - | <i>Tungsten inert gas</i> |
| GTAW | - | <i>Gas tungsten arc welding</i> |
| FCAW | - | <i>Flux cored arc welding</i> |
| SW | - | <i>Spot welding</i> |
| MIG | - | <i>Metal inert gas</i> |
| GMAW | - | <i>Gas metal arc welding</i> |

| | | |
|----------|---|--|
| EUA | - | Estados Unidos da América |
| SAW | - | <i>Submerged arc welding</i> |
| LBW | - | <i>Laser beam welding</i> |
| ZTA | - | Zona termicamente afetada |
| PCBN- | | Nitreto cúbico de boro policristalino |
| PAPVD- | | <i>Plasma activated physical vapour deposition</i> |
| PVD | - | <i>Physical vapour deposition</i> |
| CVD | - | <i>Chemical vapour deposition</i> |
| CEFCON- | | Centro de estudos em fabricação e comando numérico |
| NANOFAB- | | Laboratório multiusuário de nanofabricação e caracterização de nanomateriais |
| ICSD | - | <i>Inorganic crystal structure database</i> |
| ICDD | - | <i>International center for diffraction data</i> |
| CPS | - | <i>Count per second</i> |
| LACAM- | | Laboratório de caracterização de materiais |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | | |
|-----------------|---|--|
| MPa | - | Mega Pascal |
| HB | - | Dureza Brinell |
| HV | - | Dureza Vickers |
| Al | - | Alumínio |
| Ti | - | Titânio |
| N | - | Nitrogênio |
| Mg | - | Magnésio |
| Si | - | Silício |
| Zn | - | Zinco |
| W | - | Tungstênio |
| C | - | Carbono |
| Co | - | Cobalto |
| NaCNO- | - | Cianeto de sódio |
| °C | - | Grau Celsius |
| N ₂ | - | Gás nitrogênio |
| NH ₃ | - | Amônia |
| H ₂ | - | Gás hidrogênio |
| Ar | - | Gás argônio |
| Fe | - | Ferro |
| γ | - | Nitreto de ferro (Fe ₄ N) |
| ϵ | - | Nitreto de ferro (Fe ₃ -2N) |
| TiN | - | Nitreto de titânio |
| TiCN | - | Carbo nitreto de titânio |
| bar | - | Unidade de pressão |
| θ | - | Ângulo de difração |
| μm | - | Micrometro |
| mm | - | milimetro |
| Ry | - | Rugosidade máxima |
| gf | - | Grama força |
| Fx | - | Força axial |

Fy - Força transversal
Fz - Força de avanço
GPa - Giga Pascal
eV - Elétron Volt
mTorr - MilliTorr

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| INTRODUÇÃO..... | 18 |
| Motivação para pesquisa | 18 |
| Escolha do tema..... | 22 |
| Objetivo da pesquisa..... | 24 |
| 1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 27 |
| 1.1. Processo de Soldagem | 27 |
| 1.2. Processo FSW | 30 |
| 1.2.1. Características da junta soldada..... | 33 |
| 1.2.2. Ferramenta de soldagem FSW | 35 |
| 1.3. Recobrimento superficial..... | 38 |
| 1.3.1. Nitretação..... | 39 |
| 1.3.2. Nitretação Iônica ou a Plasma | 40 |
| 1.3.3. Recobrimento com TiN | 42 |
| 2. MATERIAIS E MÉTODOS | 52 |
| 2.1. Materiais | 52 |
| 2.2. Metodologia | 53 |
| 2.3. Procedimentos experimentais | 54 |
| 2.3.1. Preparo superficial das amostras..... | 54 |
| 2.3.2. Medição de Rugosidade..... | 56 |
| 2.3.3. Determinação de microdureza <i>Vickers (HV)</i>..... | 56 |
| 2.3.4. Difração de Raios X (DRX) | 57 |
| 2.3.5. Microscopia eletrônica de varredura (MEV)..... | 58 |
| 2.3.6. Nitretação a plasma..... | 59 |
| 2.3.7. Recobrimento superficial de TiN..... | 61 |
| 2.3.8. Espectroscopia de fotoelétrons por Raio X (XPS)..... | 63 |
| 2.3.9. Ensaio de soldagem <i>FSW/FSP</i> | 63 |
| 2.3.10. Análise dimensional..... | 66 |
| 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES | 67 |
| 3.1. Rugosidade | 67 |
| 3.2. Dureza | 68 |

| | | |
|-------------|---|----|
| 3.3. | Difração de Raios X (DRX) | 68 |
| 3.4. | Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) | 72 |
| 3.5. | Espectroscopia de fotoelétrons por Raio X (XPS) | 74 |
| 3.6. | Processo FSP | 79 |
| 4. | CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS | 89 |
| 4.1. | Conclusão | 89 |
| 4.2. | Trabalhos Futuros | 90 |
| | REFERÊNCIAS | 92 |
| | ANEXOS | 97 |
| | Ferramentas utilizadas | 97 |
| | Gráficos dos esforços, resultantes do processo FSP | 98 |

INTRODUÇÃO

Motivação para pesquisa

A necessidade de estruturas leves e resistentes ganhou destaque nas últimas décadas devido a restrições de matéria prima e ao advento da produção “verde” em que se busca redução no consumo de insumos e principalmente de energia, para a produção de bens de consumo. Com isso o uso de materiais avançados, como ligas de Al, Ti, Mg e aços micro ligados vem se expandindo e ganhando cada vez mais mercado. Entretanto alguns desses materiais apresentam características de processos que inviabilizam a aplicação de métodos convencionais de produção. Como exemplo as ligas de Al, utilizadas na indústria aeronáutica, aeroespacial e de construção naval, das séries 2XXX.X (Al-Cu), 5XXX.X (Al-Mg), 6XXX.X (Al-Mg-Si) e 7XXX.X (Al-Zn) que quando submetidas aos processos convencionais de soldagem por fusão estão sujeitas a problemas típicos da baixa soldabilidade. A baixa soldabilidade, característica desses materiais, resulta em defeitos como porosidade, trincas de solidificação e perda de propriedades mecânicas, resultando em um cordão de solda com propriedades menores do que o metal de base [1, 2]. Desta maneira o desenvolvimento do processo FSW (*Friction Stir Welding*) pelo instituto TWI (*The Welding Institute*) durante a década de 1990 vem assegurando, de forma econômica e eficiente, melhorias na soldagem destes materiais. A Figura 1 apresenta, de forma esquemática, os principais movimentos e esforços envolvidos no processo FSW e as etapas necessárias para a formação do cordão de solda.

Outra aplicação de destaque do processo FSW é a realização de soldagem de materiais dissimilares, união entre diferentes materiais. Sempre foi um desafio para a tecnologia de processos a união dissimilar de maneira homogênea e com garantia de resistência mecânica. Em muitas aplicações o uso de rebites ou uniões aparafusadas ainda é utilizado o que demanda um custo maior entre material e mão de obra para a realização/montagem do componente além de por vezes proporcionar acabamento que pode acarretar perda de desempenho na utilização do componente.

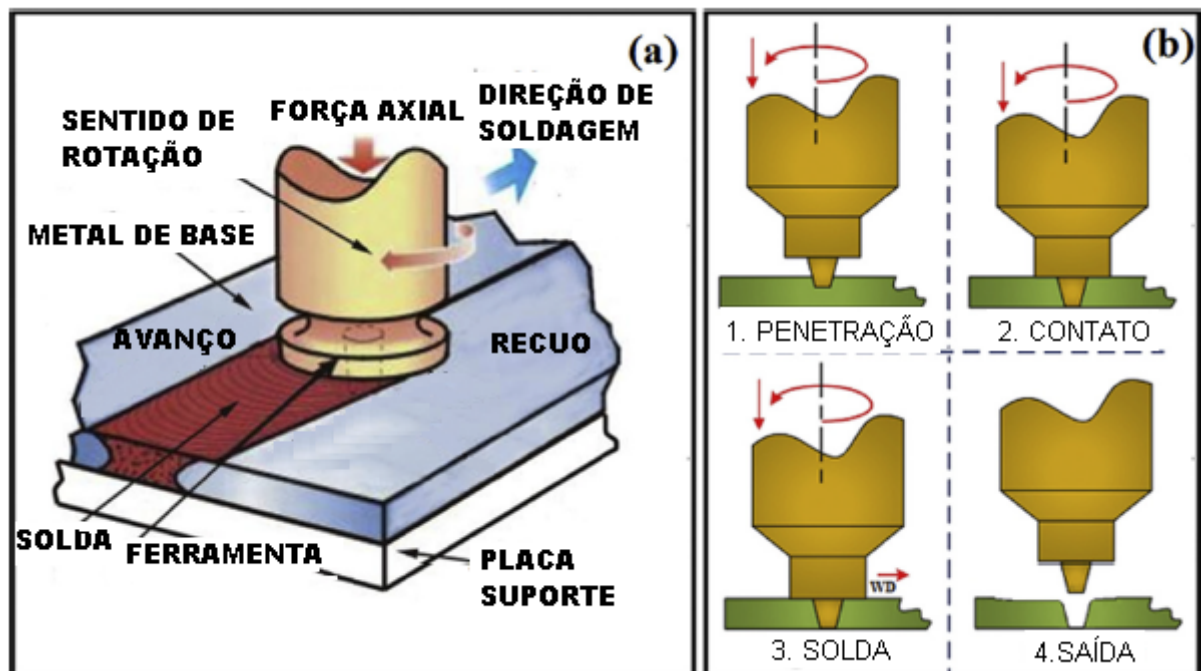


Figura 1 – (a) Esquema de soldagem pelo processo FSW e (b) etapas em que ocorrem o processo de soldagem, adaptado [3].

Como exemplo de aplicação da tecnologia FSW, na união de materiais dissimilares, já aplicada na indústria de produção em massa, os modelos de automóveis Honda Accord desde as versões 2013, contam com este processo para montagem do subchassi dianteiro, estrutura formada por ligas de aço e Al. A Figura 2 e a Figura 3 apresentam a localização do componente na estrutura do veículo bem como o esquema de união dos materiais.

A adoção do processo FSW na montagem de um componente de responsabilidade que suporta todo o sistema de suspensão dianteira do veículo, garante maior absorção de imperfeições do terreno e melhor dirigibilidade, além de contribuir para que o componente seja 25% mais leve e apresente rigidez estrutural 20% maior, comparado a versões anteriores. O resultado da aplicação deste processo é economia de combustível durante toda a vida útil do veículo e melhorias no comportamento dinâmico e de segurança, devido a uma melhor distribuição de peso do veículo. Relativo aos custos de produção ao comparar o processo FSW com os processos de soldagem convencionais a utilização da solda FSW resultou em uma economia de 50% nos custos relativos a energia para a produção do componente [4, 5].

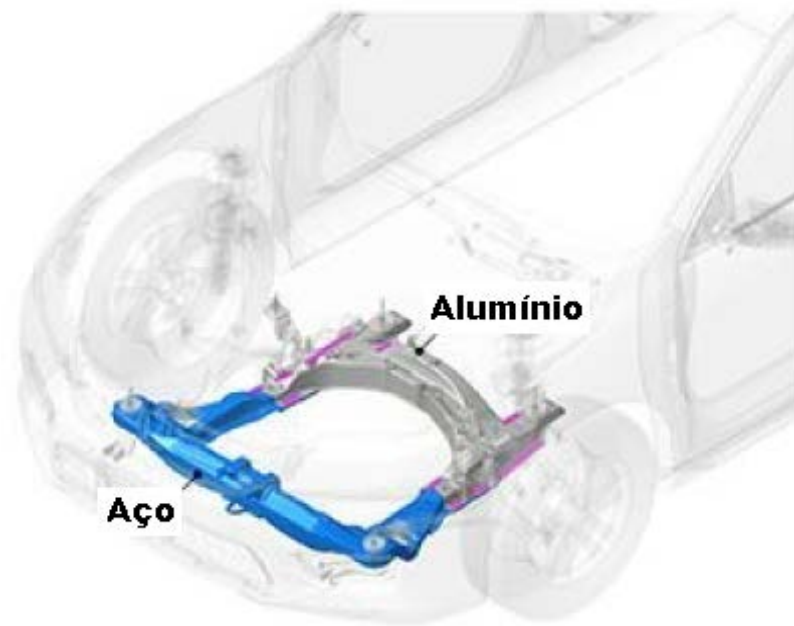


Figura 2 – Subchassi dos veículos Honda Accord fabricados a partir de 2013. Exemplifica união de materiais dissimilares, aço e Al, na indústria de bens de consumo, produção em massa [4].

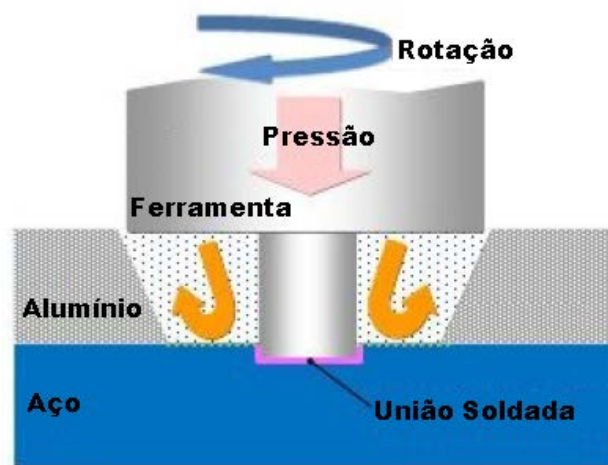


Figura 3 – Seção transversal esquemática do processo de soldagem FSW utilizado para a soldagem do subchassi dos modelos Honda Accord produzidos a partir de 2013 [4].

Somado a todas as vantagens apresentadas, o processo FSW é também considerado como sendo tecnologia “verde” em termos de eficiência energética, pois não funde o material de base, não necessita de proteção gasosa ou sólida pois não há poça de fusão, não gera fumaça, respingos ou radiação ultravioleta que normalmente são prejudiciais aos operadores e ao meio ambiente.

Como utiliza a tecnologia de máquinas ferramenta operatrizes é um processo que apresenta uma série de benefícios relativos ao uso de equipamentos e mão de obra. Podemos citar os seguintes pontos relevantes:

- facilidade na automação;
- boa relação custo/benefício;
- não tem limitações quanto ao posicionamento da junta; e
- não necessita formação/qualificação de soldadores exclusivos para o processo de soldagem bem como reduz a dependência entre a qualidade da solda e a aptidão do soldador.

A implementação do processo FSW nas indústrias contribui para um melhor aproveitamento da mão de obra disponível na empresa, já que o próprio operador/ferramenteiro se torna o soldador e o responsável pela execução do cordão de solda.

Como ponto negativo há a necessidade de desenvolver um dispositivo, rígido, para fixar o material a ser soldado a máquina. Investimento que é justificado através do rendimento do processo, a Tabela 1 exemplifica os principais pontos positivos do processo FSW.

Tabela 1 – Benefícios do processo FSW aplicados na indústria. Adaptado de [1].

| Benefícios Metalúrgicos | Benefícios ao Meio Ambiente | Benefícios Energéticos |
|---|---|--|
| Processo realizado em fase sólida | Não requer proteção gasosa | Melhora as características do material, permitindo o uso e união de diferentes espessuras |
| Boa estabilidade dimensional e repetitividade | Não necessita de limpeza superficial | |
| Pequena distorção das peças a serem soldadas | Não produz respingos | Consome somente 2,5% da energia necessária se comparado ao processo de solda a laser |
| Sem perda de elementos de liga | Elimina a necessidade de solventes aplicados ao desengraxamento | |
| Excelentes propriedades metalúrgicas na área de solda | Não utiliza materiais consumíveis como arames, fluxo ou gases | Devido a possibilidade de produção de estruturas mais leves e robustas resulta em um menor consumo de combustível, quando a estrutura está aplicada em um meio de transporte |
| Refino da microestrutura | | |
| Ausência de trincas | Não necessita da aplicação de técnicas de reparo | |
| Substituição de múltiplas uniões aparafusadas/rebitadas | Redução no uso de componentes e de consumíveis | |

Para a formação do cordão de solda a ferramenta do processo FSW é submetida diretamente a grandes cargas axiais e transversais, resultando em desgaste, devido ao atrito. Assim muito dos investimentos em pesquisa e desenvolvimento são dedicados a projetos de geometrias mais eficientes bem como materiais que agreguem valor e viabilizem a relação custo/benefício, aumento do tempo de vida da ferramenta com redução do tempo de *set up* do equipamento [6].

Vida útil e propriedades como: elevada resistência mecânica, dureza a quente, condutividade térmica, coeficiente de dilatação, estabilidade química e reatividade com o O₂, são decisivos para a qualidade da solda executada. Como as características de desgastes e avarias sofridas pelas ferramentas de FSW são muito semelhantes aos ocorridos nos processos de usinagem o uso de técnicas de deposição de filmes finos, como TiN e SiN, em ferramentas de aço, podem garantir propriedades desejáveis as ferramentas aplicadas ao processo FSW, resultando em um maior tempo de vida e com a realização da solda a baixos custos.

Como apresentamos o processo de soldagem FSW destaca-se como uma promissora ferramenta para a indústria metal mecânica. Tendo como arquitetura, para a sua execução, uma máquina operatriz e uma ferramenta dedicada, o desenvolvimento da ferramenta e a consequente seleção do seu material são peças fundamentais para a execução da solda com perfeição e qualidade.

Escolha do tema

A redução de recursos energéticos e a preservação do meio ambiente estão definitivamente inseridas no ambiente industrial e o consumo de produtos que utilizam tecnologias “verdes” são cada vez mais exigidos pelos consumidores.

Economia de recursos, automação com consequente redução da mão de obra e garantia de repetitividade no processo de produção são desafios que todas as empresas atuais buscam. Neste cenário o processo de soldagem FSW ganha destaque pois é responsável por unir materiais de forma eficiente e com garantia de propriedades, eliminando uniões desnecessárias e desperdício de material além de resultar em qualidade e acabamento superiores aos processos anteriormente utilizados. Pode ser aplicado na soldagem de dutos de ventilação/ar condicionado e de estruturas leves aplicadas a área naval. A Figura 4 apresenta a aplicação do processo FSW para otimização da produção de componentes aeronáuticos em que foi substituída a montagem de 60 chapas com 2500 rebites e 300 m de selagem por uniões soldadas de topo.

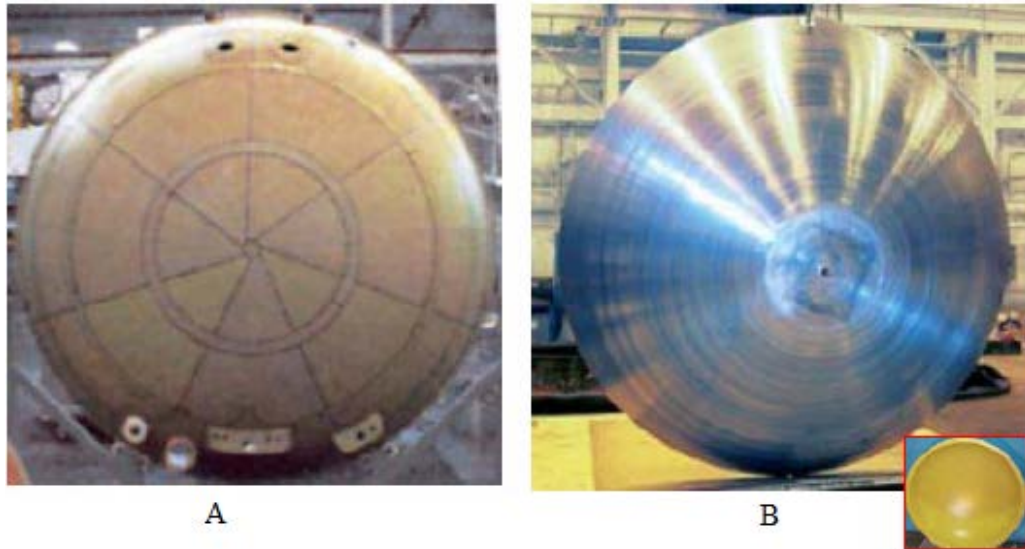


Figura 4 – Caverna de pressão em fuselagem de aeronaves. Foto (A) componente produzido anterior ao processo FSW constituído de 60 chapas, 2500 rebites e cerca de 300m de selagem. Foto (B) componente produzido pelo processo FSW constituído diretamente por uniões das chapas soldadas de topo. Adaptado de [7].

A garantia de que a ferramenta adequada, desenvolvida a custos competitivos, está sendo aplicada ao processo de soldagem garante o sucesso da técnica. Assim a aplicação de conhecimentos já dominados em áreas da indústria de ferramentas, de forma a obter melhoria das propriedades do material da ferramenta, contribui para a redução dos custos envolvidos no processo aumentando a competitividade do produto produzido e investimentos em pesquisa e desenvolvimento do processo utilizado, FSW.

Os aços e suas ligas vem sendo usado com sucesso na confecção de ferramentas para o processo de soldagem FSW, em ligas de baixa dureza. A proposta deste trabalho é avaliar o desempenho de ferramentas de soldagem FSW, fabricada em aço AISI 1045, revestidas com TiN, visando o aumento da vida útil.

Com base no conhecimento de que a superfície dos materiais é a parte mais importante, pelo fato de que muitas falhas começam nesta região e em certas aplicações a superfície deve apresentar propriedades diferentes do substrato, como no processo de soldagem FSW. A avaliação das propriedades superficiais é fundamental, já que a qualidade do acabamento superficial e características mecânicas podem gerar a nucleação de falhas (devido a exposição dos contornos de grãos) além de influenciar diretamente no custo, devido a necessidade de aplicação de processos de acabamento e/ou tratamento. Elevada dureza a quente e resistência a

abrasão são características que a superfície da ferramenta de soldagem FSW deve apresentar, entretanto valores de tenacidade compatíveis com os esforços do processo devem ser assegurados. Uma forma de obter propriedades superficiais adequadas ao processo é a aplicação de revestimentos, amplamente utilizada na indústria de ferramentas metal mecânica [8].

Como dificuldade, para o processo de deposição de filmes e/ou recobrimento, destacamos garantir a aderência necessária do material depositado ao substrato. A diferença da razão H/E (dureza e módulo de elasticidade) entre o material do recobrimento e o substrato é um dos principais responsáveis por falhas na aderência. Como forma de reduzir a diferença entre as relações H/E do substrato e do revestimento, pois quanto menor esta diferença maior a aderência do filme ao substrato, diversas técnicas podem ser aplicadas, para o estudo proposto, substrato de AISI 1045 e revestimento de TiN, foi escolhido o processo de nitretação a plasma como pré-tratamento e posterior deposição do filme de TiN pelo processo *magnetron sputtering* não reativo.

A escolha do TiN como recobrimento é em função de que os filmes de nitretos de cátions metálicos, especialmente de titânio, têm demonstrado grande desempenho em aplicações em que são necessários elevados valores de dureza superficial, resistência à corrosão e ao cisalhamento, em temperaturas altas. Além de ser um recobrimento com tecnologia consagrada na indústria metal mecânica.

Com isso, para a modificação das propriedades da ferramenta de aço AISI 1045, foram utilizadas técnicas convencionais e economicamente viáveis para a modificação superficial do substrato. Sempre visando a necessidade de que os processos resultem em produtos com reprodutibilidade, confiabilidade e baixo custo.

A proposta é a aplicação técnicas de revestimento consagradas e desenvolvidas tecnologicamente, com o objetivo do aumento da aderência do filme ao substrato. Foram realizadas caracterizações do filme depositado, de forma a permitir o projeto de filmes funcionais de TiN, aderentes em superfícies de aço para aplicação em ferramentas de soldagem FSW.

Objetivo da pesquisa

O objetivo deste trabalho é avaliar o recobrimento de TiN em corpos de prova e ferramentas para o processo de soldagem FSW de aço AISI 1045, garantindo sua aderência e

integridade ao substrato. Técnicas de micro dureza *Vickers* (HV), difração de Raios X (DRX), microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia de fotoelétrons excitados por Raios X (XPS) foram utilizadas para a caracterização do filme depositado. Assim assegura-se as propriedades mecânicas e químicas necessárias para o bom desempenho da ferramenta, durante o processo de soldagem FSW.

O desempenho do processo de recobrimento foi avaliado através da realização do processo *Friction Stir Process* (FSP), simulando cordões de solda através do uso de ferramentas com e sem o filme de TiN. Os esforços resultantes, torque, força axial, transversal e de avanço e as deformações geométricas nas ferramentas de soldagem, foram utilizadas para avaliar o desempenho da ferramenta/vida útil.

Em decorrência da similaridade de esforços a que a ferramenta FSW e as ferramentas de usinagem estão submetidas [6], o tempo de vida/vida útil de uma ferramenta revestida com TiN deverá seguir os parâmetros apresentados na Figura 5.

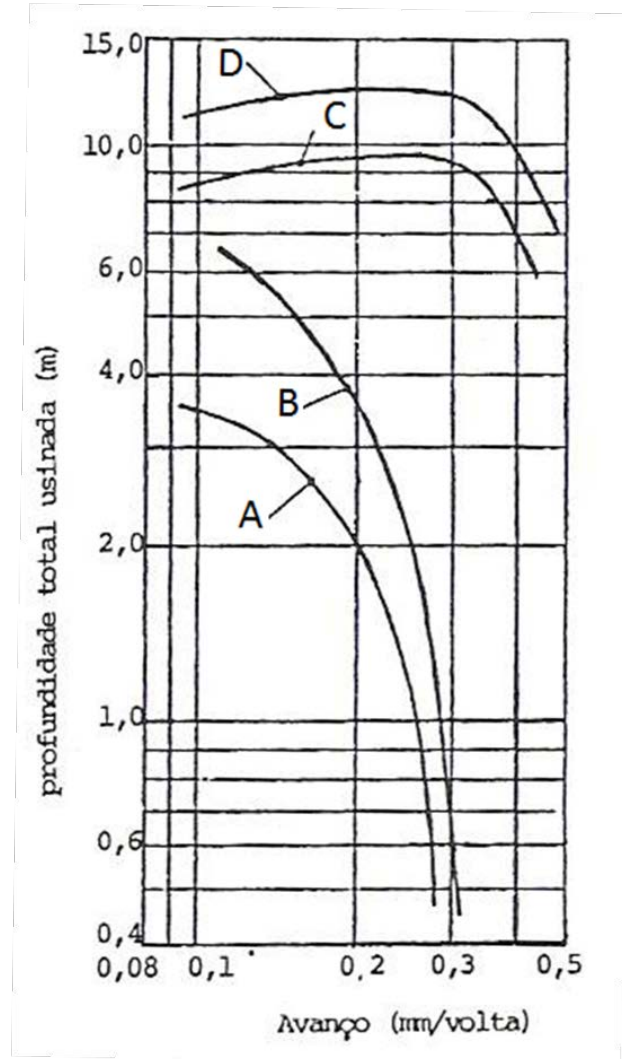


Figura 5 – Curvas de influência da deposição de filme sobre a vida útil aplicada em uma ferramenta de corte; A) HSS, B) HSS nitretado, C) TiN reafiado e D) TiN nova [39].

Os valores de esforços aplicados a ferramenta FSW foram obtidos a partir da metodologia utilizada por *Quintana Cuellar* [9]. O conjunto de dispositivos utilizados e aplicados permitiu a obtenção de forças axiais, transversais, de avanço e o torque, ferramental desenvolvido em [9]. Com os resultados foi realizada comparação estatística entre os rendimentos e desgastes das ferramentas.

1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O processo de soldagem garante a união entre componentes sem a necessidade da realização de furos, utilizados para a colocação e fixação de parafusos e/ou rebites. A solda também assegura, entre os componentes, a garantia de estanqueidade e de propriedades mecânicas, que em sua maioria excedem as do material de base. Neste capítulo serão apresentadas as definições de uniões entre componentes, técnicas de recobrimento superficial e as formas de caracterização utilizadas, para assegurar a qualidade do filme depositado, com o uso de HV, DRX, MEV e XPS.

1.1. Processo de Soldagem

A união entre componentes sempre foi um desafio para a engenharia. A formação de juntas que garantam as propriedades mecânicas dos metais de base, flexibilidade de aplicação e custo competitivos de fabricação somente puderam ser asseguradas com o desenvolvimento das tecnologias em soldagem, iniciada nos primeiros anos do século XX.

A necessidade de construção de equipamentos e máquinas para operar nas mais adversas condições impulsionou a pesquisa e o desenvolvimento de processos cada vez mais sofisticados para a união de componentes de diversos tipos de materiais. As Grandes Guerras (1914/1918 e 1939/1945) juntamente com a corrida espacial destacam-se como motivadoras para o desenvolvimento de processos de fabricação.

Os métodos de união entre componentes metálicos podem ser divididos em duas categorias principais: os baseados na ação de forças macroscópicas e os baseados na ação de forças microscópicas, entre as partes a serem unidas. Na primeira categoria destacamos o uso de rebites e de parafusos que asseguram a rigidez da junta através da resistência ao cisalhamento e ao atrito resultantes das interações entre as áreas de contato dos elementos de fixação e as peças a serem unidas. Já na segunda categoria a união entre as partes é assegurada através da aproximação dos átomos e/ou moléculas dos materiais dos componentes a serem unidos, ou destes e de um material intermediário adicionado a junta, até distâncias suficientemente pequenas para a formação de ligações químicas, principalmente dos tipos Metálicas e de *Van der Waals*. Os processos de soldagem enquadram-se nesta segunda categoria, juntamente com os processos de brasagem e a colagem [10].

A Tabela 2 apresenta a linha do tempo para os processos de soldagem. O período compreendido entre as décadas de 1920 e 1950 apresenta maior desenvolvimento para a área de processos em soldagem.

Tabela 2 – Histórico do processo de soldagem. Adaptado de [11].

| Processo de Soldagem | Abreviatura | Inventor | Ano | Instituto | País |
|-----------------------------------|--------------------|-------------------------------|------------|--------------------------|-----------------|
| Soldagem por resistência | ERW | Elihu Thomson | 1886 | Thomson Electric Welding | EUA |
| Soldagem oxicom bustível | OAW | Edmund Fouche, Charles Picard | 1900 | | França |
| Soldagem alumínio térmica | TW | Goldschmidt | 1900 | Goldschmidt AG | Alemanha |
| Soldagem a arco manual | MMA, SMAW | Oscar Kjellberg | 1907 | ESAB | Suécia |
| Soldagem por eletroescória | ESW | Nikolay Benardos | 1908 | | Rússia |
| Soldagem plasma | PAW | Schonner, R.M. Gage | 1909 | BASF | Alemanha |
| Soldagem TIG | TIG, GTAW | Charles L. Coffin | 1920 | | EUA |
| Soldagem a arco com arame tubular | FCAW | Stoody | 1926 | | EUA |
| Soldagem de pinos | SW | | 1930 | New York Navy Yard | EUA |
| Soldagem MIG | MIG, GMAW | H.M. Hobart e P.K. Devers | 1930 | Airco & Battelle | |
| Soldagem a arco submerso | SAW | Robinoff | 1930 | National Tube Co. | EUA |
| Soldagem MAG | MAG, GMAW | Lyubavskii e Novoshilov | 1953 | | União Soviética |
| Soldagem a laser | LBW | Martin Adams | 1970 | TWI | Inglaterra |
| Soldagem por fricção | FSW | Wayne Thomas e outros | 1991 | TWI | Inglaterra |

A quantidade de processos e de aplicações desenvolvidas para a soldagem não restringem as operações/processos de soldagem, somente a união entre materiais dos componentes. É comum o uso do termo soldagem para indicar processo de recuperação/fabricação em que é necessária a realização de adição de um material e posterior realização de operações de usinagem. Essa gama de aplicações e processos faz com que a

definição de soldagem seja dada pelas duas afirmações abaixo citadas, que caracterizam os processos utilizados, bem como as forças de ligação entre os átomos e/ou moléculas dos materiais dos componentes envolvidos:

1. “Processo de união de materiais usados para obter a coalescência localizada de metais e não metais, produzido por aquecimento até uma temperatura adequada com ou sem a utilização de pressão e/ou metal de adição.” [10]; e
2. “Processo de união de materiais baseado no estabelecimento de forças de ligação química de natureza similar às atuantes no interior dos próprios materiais, na região de ligação entre os materiais que estão sendo unidos.” [10].

Como citado a formação da junta soldada necessita de uma quantidade de energia entre os átomos superficiais dos materiais dos componentes a serem unidos, de forma que ligações atômicas permanentes sejam formadas. Para alguns materiais o simples contato entre as superfícies é suficiente para a realização da solda, exemplo é a união entre dois blocos de gelo. Para metais somente o contato superficial, exceto em condições especiais, não é suficiente para a realização da junta soldada. Isto se explica devido a existência de dois tipos básicos de obstáculos [10]:

1. A elevada rugosidade microscópica e/ou sub microscópica que as superfícies metálicas, mesmo polidas, apresentam; e
2. As camadas de óxidos, umidade, gordura e poeira existente nas superfícies. Estas camadas normalmente se formam de maneira rápida e são consequência da existência de ligações incompletas nas superfícies dos metais. A Figura 6 representa uma superfície metálica típica em contato com o ar.

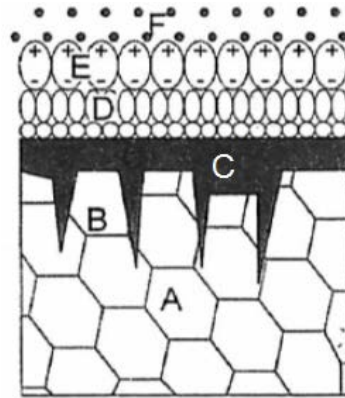


Figura 6 – Representação esquemática de uma superfície metálica em contato com o ar. Sendo as regiões: A - metal não afetado, B - metal afetado com camada de óxido, C - camada de óxido, D - água e oxigênio adsorvidos, E - gordura e F - poeira [10].

Como forma de superar esses obstáculos, para a formação da junta soldada em materiais metálicos e a conseqüente união dos metais de base, os processos de soldagem existentes são divididos em dois grandes grupos:

1. O primeiro consiste em deformar a superfície de contato permitindo a aproximação e a realização das ligações atômicas. Nestes processos os materiais dos componentes a serem unidos podem sofrer aquecimento local, de maneira a facilitar a deformação superficial e garantir a uniformização da junta soldada, formada sem a fusão dos metais de base; e
2. O segundo sofre a aplicação de calor na região da junta soldada até a fusão do metal de base e do metal de adição, quando aplicado. Como resultado deste processo as superfícies entre os componentes a serem unidos são eliminadas e com a solidificação do material fundido a junta soldada é formada [10].

1.2. Processo FSW

O processo de soldagem por fricção e mistura mecânica, FSW é um processo de união no estado sólido, SSW (*Solid State Welding*), por atrito, autógeno, no qual uma ferramenta não consumível cilíndrica com um pino, em rotação, é pressionada contra as partes a serem soldadas. A rotação da ferramenta promove, através de atrito ferramenta/peça, geração de calor, que facilitará o escoamento de material no deslocamento da ferramenta sobre a peça, resultando em união devido a mecanismos mecânicos de extrusão e forjamento [12].

Desenvolvida em 1991 na Inglaterra pelo instituto TWI esta técnica vem se destacando em inúmeras aplicações industriais como uma alternativa a técnicas convencionais de soldagem por fusão, pois como processo SSW os materiais soldados por FSW não apresentam defeitos típicos de processos convencionais como poros, trincas e incrustações.

Aplicada inicialmente para a soldagem de não ferrosos como as ligas de alumínio, cobre e magnésio que apresentam baixa soldabilidade, devido à camada superficial de óxidos aliado aos altos índices de defeitos, resultantes do processo de solidificação, o processo FSW vem se expandindo para outros materiais, como aço, ligas de Ti e principalmente na formação de cordões de solda entre materiais dissimilares [13].

A eliminação dos defeitos, que originalmente ocorrem nos processos convencionais de solda, é sem dúvida a principal vantagem do processo FSW. Entretanto como a temperatura durante a realização da solda não atinge a temperatura de fusão do metal de base e não há metal de adição, as propriedades mecânicas resultantes no cordão de solda sofrem pequenas alterações em relação ao metal base, quando comparadas com ligas soldadas por processos convencionais de solda [2].

Como exemplo de variação das propriedades mecânicas dos materiais submetidos ao processo de soldagem FSW, um estudo realizado no processo de soldagem de painéis de fuselagem de aviões, constituídos de ligas de alumínio 2024 e 7075, mostrou a variação das propriedades das juntas soldadas, em relação percentual ao metal base, razão entre o material soldado e o metal base. Os resultados estão apresentados na Tabela 3 (propriedades dos materiais a serem soldados),

Tabela 4 e Tabela 5 (variação percentual das propriedades após o processo FSW) [2].

Tabela 3 – Características dos materiais a serem soldados pelo processo FSW [2].

| PROPRIEDADES \ MATERIAL | 2024 | 7075 |
|--------------------------------|-------------|-------------|
| Tensão de escoamento | 76 MPa | 95 MPa |
| Tensão de ruptura | 185 MPa | 220 MPa |
| Alongamento | 20% | 17% |
| Dureza | 47 HB500 | 60 HB500 |
| Tensão de cisalhamento | 125 MPa | 150 MPa |
| Tensão limite de fadiga | 90 MPa | 160 MPa |

Tabela 4 – Variação percentual das propriedades da liga 2024, na região de solda FSW, em relação ao metal base. Adaptado de [2].

| Liga 2024 | Hashimoto et al. | Von strombeck et al. | Biallas et al. | Talwar et al. | Zettler et al. | Kumagai et al. |
|----------------------|-------------------------|-----------------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Eficiência da união | 78% | 83% | 90% | 88% | 70% a 97% | 83% |
| Resistência a tração | - | 77% | - | 91% | - | 79% |
| Alongamento | - | 27% | 30% a 50% | 41% | - | 19% |
| Resistência a fadiga | - | - | 80% | - | - | - |

Tabela 5 – Variação percentual das propriedades da liga 7075, na região de solda FSW, em relação ao metal base. Adaptado de [2].

| Liga 7075 | Magnusson et al. | Mahoney et al. | Talwar et al. |
|----------------------|-------------------------|-----------------------|----------------------|
| Eficiência da união | 90% | - | 84% |
| Resistência a tração | - | 80% | 71% |
| Alongamento | - | 24% | 33% |
| Resistência a fadiga | 100% | - | - |

As tabelas 4 e 5 demonstram que para as propriedades mecânicas nas juntas soldadas pelo processo FSW, exceto o alongamento, ficam, em média 20% menores do que o metal de base, sem a necessidade de realizar tratamentos térmicos posteriores, resultando em economia no processo de produtivo. Ainda se somam, as seguintes vantagens para o processo [12]:

- Boa resistência mecânica e a fadiga;
- Alta qualidade estrutural;
- Baixa distorção pós soldagem;
- Microestrutura refinada;
- Sem produção de fuligem ou exalação de gases; e
- Sem necessidade de gás de proteção, exceto para casos de aço ao carbono e aço inoxidável, que necessitam de uma atmosfera inerte visando a adsorção de O₂.

No entanto aliadas as vantagens e qualidades, do processo FSW, há limitações. Entre elas destacamos [12]:

- Necessidade de sistemas de fixação de elevada rigidez com placa de apoio (*backing*) para cada tipo de junta a unir;
- Equipamento de soldagem de baixa flexibilidade, não portátil e de elevado custo;
- Ferramenta específica para cada conjunto de ligas a unir;
- Tempo elevado para preparação da máquina por união;
- Difícil determinação de parâmetros, necessidade de realização de testes preliminares;
- Furo na peça no final da soldagem; e
- Dificuldade de realizar soldas em materiais com elevado ponto de fusão, resultando em elevação de custo para ferramentas e ferramental.

1.2.1. Características da junta soldada

O processo FSW tem como configurações mais comuns a união de materiais com juntas de topo e sobrepostas. Entretanto outros tipos de juntas, como juntas tipo “T”, de filete e sobrepostas múltipla também são possíveis quando necessárias e não requerem nenhuma preparação especial das condições superficiais do material [7], como apresentado na Figura 7.

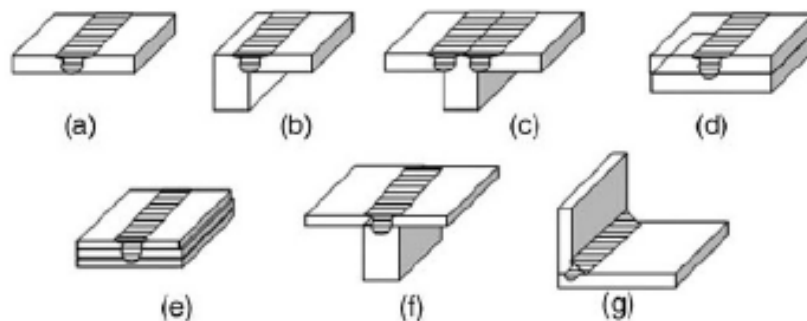


Figura 7 – Configurações de juntas para o processo FSW: (a) topo simples, (b) topo de aresta, (c) topo “T”, (d) sobreposta, (e) sobreposta múltipla, (f) sobreposta “T” e (g) filete [7].

A figura 7 ilustra a região de saída a ferramenta, após a realização do processo de soldagem FSW, em uma união com juntas de topo. A solda foi realizada entre chapas de Al da série 5052. Nesta região é possível observar o cordão de solda, seu acabamento com rebarbas resultantes do processo e a inexistência de reforço de solda na área do cordão, comum nos processos SAW e GMAW. O furo existente devido a saída da ferramenta deve estar contido em uma região de descarte, sendo eliminado por corte após o termino do processo de soldagem. O acabamento superficial com boa qualidade e a ausência de modificações decorrentes do aumento de temperatura, comum nos processos de soldagem tradicionais, fazem quem que as

uniões realizadas por FSW assegurem ao processo produtivo ganhos significantes em relação ao tempo de produção pois eliminam etapas posteriores para o acabamento como a remoção do reforço de solda do cordão.

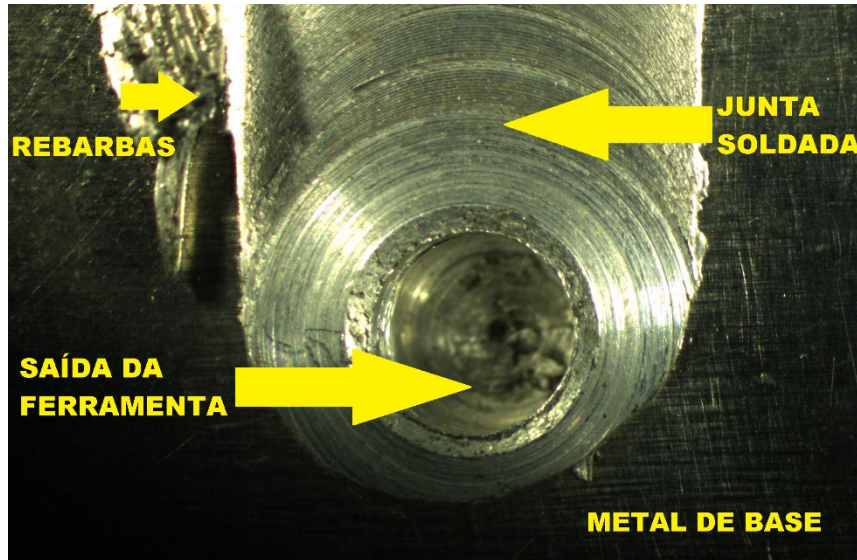


Figura 8 – Chapas de liga de Al 5052 com juntas de topo soldadas por FSW. Acabamento superficial do processo assegura melhoras no desempenho dos processos de união.

Como resultado do avanço da ferramenta sobre o metal base, a região transversal da junta soldada apresenta zonas microestruturais distintas, representadas na Figura 9. Estudos realizados em uma liga de alumínio 6082 consideram cinco as zonas microestruturais padrão, sendo elas [12]:

- Região A – Metal de Base (MB): região não afetada pelo calor ou deformação induzida pela ferramenta de soldagem;
- Região B – Zona Termicamente Afetada (ZTA): região afetada pelo ciclo térmico durante a soldagem, o que leva a modificação microestrutural e de propriedades mecânicas, porém sem deformação plástica residual na microestrutura;
- Região C – Zona Termo Mecanicamente Afetada (ZTMA): nesta área o material foi plasticamente deformado pela ferramenta e o fluxo de calor resultante exerceu algum tipo de influência no material que está próximo à área de atrito e de material extrudado. No caso do alumínio, a recristalização não ocorre nesta zona, apesar de existir uma extensiva deformação presente;

- Região D – *Nugget*: é a região central da solda localizada dentro da ZTMA onde ocorre a recristalização, também chamada lente de soldagem, em que grãos originais e contornos de subgrãos favorecem a formação de finos grãos equiaxiais oriundos de recristalização. Esta região é denominada de zona dinamicamente recristalizada, o que acaba resultando em alterações de propriedades mecânicas; e
- Região E – *Swirl Zone*: é a região que eventualmente aparece no lado de avanço da solda no limite entre a ZTMA e a ZTA, quando ocorre escoamento turbulento de material formando um vórtice entre a ZTMA e a ZTA. A recristalização dinâmica que ocorre na região do *nugget* pode ser atribuída aos fenômenos envolvidos no trabalho a quente do material.

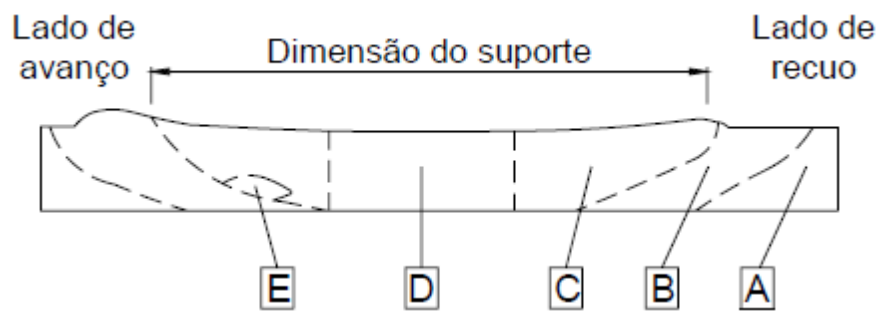


Figura 9 – Seção transversal de regiões de uma união soldada pelo processo FSW [12].

1.2.2. Ferramenta de soldagem FSW

O desenvolvimento e a qualidade de uma união soldada pelo processo FSW é influenciado de forma significativa pela ferramenta, desta forma justifica-se o estudo e definição prévia de sua geometria e do seu material. Sendo ela a responsável pela geração de calor e fluxo plástico do metal de base, que originam o cordão de solda, as propriedades mecânicas da união soldada são diretamente afetadas. O desempenho do equipamento de soldagem também é diretamente afetado pelo comportamento dinâmico da ferramenta, ferramenta desgastadas, geometricamente inadequadas ou com material inadequado acarretam excessos nas cargas aplicadas ao equipamento o que pode resultar em vibração, desgaste prematuro e aumento no consumo de energia durante o processo de soldagem.

A ferramenta utilizada no processo FSW, apesar de estar sujeita ao desgaste por atrito, é considerada como não consumível [12]. É composta geometricamente de:

1. Haste de fixação a qual é necessária para montagem em um dispositivo para fixação na máquina-ferramenta;
2. Região correspondente a um suporte também conhecida como *shoulder*; e
3. Uma terceira área denominada de pino (*pin ou probe*).

A Figura 9 apresenta uma ferramenta esquemática, com a divisão geométrica citada.

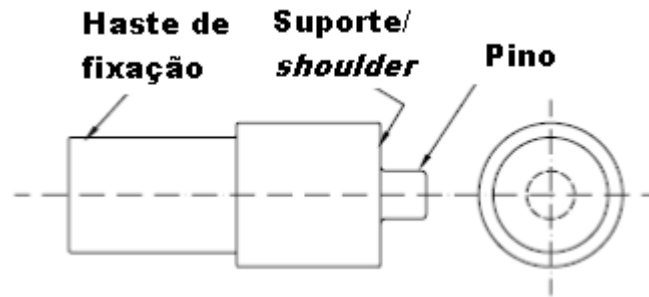


Figura 10 – Representação de uma ferramenta típica para o processo de solda FSW, adaptado de [12].

A referência [12] cita que cada parte da ferramenta possui uma função específica ou conjunto de funções na consolidação da união da junta. Assim, as duas partes fundamentais a considerar são:

- Face da ferramenta que é chamada de suporte, *shoulder*; e
- Pino da ferramenta.

Com relação ao *shoulder*, verifica-se que durante o processo de soldagem quando a ferramenta está submetida à compressão sobre a superfície das chapas e rotação imposta pelo eixo-árvore da máquina, a mesma torna-se responsável pela geração da maior parte do calor. Isto é decorrente do processo de atrito estabelecido neste sistema tribológico e é a principal fonte de calor do processo FSW.

O calor gerado em decorrência de atrito entre o *shoulder* e as chapas a serem soldadas, causa redução do limite de escoamento, facilitando o processo de escoamento plástico do material e, por consequência, a soldagem. Com isso, um aumento na espessura do material a ser unido é diretamente proporcional a demanda da quantidade de calor para a obtenção de uma solda com qualidade. Esta necessidade é sanada alterando-se as dimensões da ferramenta e os parâmetros de soldagem [12].

O *shoulder* da ferramenta também tem a função de atuar como uma restrição contra a expulsão de material devido as forças reativas do material em escoamento em torno do pino da ferramenta. Já o pino da ferramenta tem a função de gerar trabalho mecânico de deformação do material que está na linha de soldagem, além de controlar o escoamento de material em torno de si próprio e abaixo do suporte da ferramenta [8].

A deformação de material causada pelo deslocamento do pino em rotação através da linha de soldagem das juntas é considerada como um processo de conformação de material por extrusão. Neste processo o material em escoamento tem uma tendência a subir a frente do pino, devido a componente de forças de reação, entretanto o *shoulder* executa um trabalho de forjamento contínuo no material.

Considerando a deformação do material, o pino é classificado como uma fonte primária responsável por deformação e como fonte secundária de geração de calor, enquanto o *shoulder* da ferramenta é a fonte secundária de deformação e a primária de calor [12]. Desta maneira, pino e *shoulder* da ferramenta atuam como elementos responsáveis pela parcela de deformação mecânica e conseqüentemente de geração de calor que facilita a deformação e a união autógena entre as partes.

É inevitável que a combinação de geometria entre o suporte da ferramenta e o pino seja importante para o resultado do processo FSW, onde a integridade da região central da solda (*nugget*) também depende do projeto da ferramenta. A parte restante da ferramenta é o corpo de sustentação considerada como necessária à fixação e como elemento de resistência mecânica e de dissipação de calor.

Como apresentado o processo de solda FSW submete a ferramenta a elevadas cargas e altas temperaturas, principalmente durante a execução de soldas em ligas com maior resistência, como exemplo os aços e as ligas de Ti. Isto resulta em limitações comerciais para a aplicação do processo FSW para esses tipos de ligas devido ao alto custo e baixo tempo de vida das ferramentas [6].

Devido aos esforços e as condições de operação, que as ferramentas são submetidas, as propriedades requeridas para as ferramentas de corte e as aplicadas ao processo FSW são similares [6]. Isto faz com que o material escolhido deva apresentar: resistência a temperatura de trabalho (a quente); resistência ao desgaste; ductilidade; boa performance a fluência;

usinabilidade; possuir microestrutura estável; resistência a oxidação; ser quimicamente inerte; preço comercialmente compatível além de curto tempo para ser fabricada.

Devido a semelhança entre os mecanismos de desgastes nas operações de corte e no processo FSW, os materiais normalmente utilizados para a fabricação das ferramentas são semelhantes. Assim destacamos, como principais materiais: os aços ferramentas, WC-Co, PCBN, metais refratários, ligas de cobalto, ligas de níquel, ligas de tungstênio, aços inoxidáveis e cerâmicos. Além destes materiais a ferramenta pode receber revestimento, para melhorar sua performance, entre os tipos de revestimentos destaca-se o uso do TiN, que apresenta ganhos consideráveis de performance [14]. A Tabela 6 lista os materiais para ferramentas utilizados para a realização de solda, processo FSW, nos mais comuns materiais a serem soldados.

Tabela 6 – Principais materiais soldados pelo processo FSW com sugestão de material para fabricação da ferramenta. Adaptado de [6].

| UNIÃO SOLDADA | | |
|---|------------------|---|
| MATERIAL | ESPESSURA | MATERIAL DA FERRAMENTA |
| AZ31, Mg | 1-5 mm | Aço H13 |
| AZ31B-H24, Mg | 2 mm | Aço H13 |
| 6111-T4, Al | 0-9 mm | Aço H13 |
| 5754, Al | 1-32 mm | Aço AISI 1045 / Aço H13 |
| 7020-T6, Al | 4 mm | Aço H13 |
| 6061-T6 Al + 20% Al ₂ O ₃ | 5-6 mm | Aço AISI temperado ao óleo (62 HRC) |
| AA 6061 + (3-7)% TiC | 6 mm | Aços alto C e/ou alto Cr |
| Ti-6Al-4V | 3-12 mm | Ligas de W-La |
| Ti-6Al-4V | 2 mm | Ligas de W com 3%, em peso, Re |
| Aço carbono | 1-6 mm | Ligas com base WC |
| Aços AISI 1018 | 3-6 mm | Ligas com base Mo e W |
| Aço DP 590 | 1-2 mm | Ligas de Si ₃ N ₆ com recobrimento de TiN/TiC |

1.3. Recobrimento superficial

A melhora das propriedades mecânicas, tribológicas e térmicas dos materiais para produção de ferramentas, pode ser realizada de diversas formas. Além dos tratamentos térmicos e termoquímicos o revestimento superficial, através da deposição de filmes finos, apresenta resultado satisfatório no desempenho de ferramentas utilizadas nos processos de usinagem, estampagem e corte [15, 16, 17].

Durante a década de 1970 experimentos realizados com a deposição de TiN produzidos por deposição física de vapor assistida por plasma (PAPVD), sobre ferramentas de corte, demonstraram melhorias no desempenho tribológico [15]. Comprovada a melhora no desempenho, juntamente com o desenvolvimento das técnicas de deposição PAPVD, permitiram a produção de camadas de TiN mais compactas, menos porosas e com espessura mais uniforme [16]. Também se destaca os avanços alcançados nas etapas de preparo e limpeza dos substratos, o que resultou em filmes com melhores índices de aderência [16].

De forma geral, as camadas de TiN aplicadas em ferramentas apresentam espessura de 2 a 8 μm , dureza na faixa de 2000-2500HV e uma razão H/E (relação entre dureza e módulo de elasticidade) de aproximadamente 0,04. Entretanto o filme de TiN é sempre depositado sobre substratos com dureza sensivelmente menor, melhores índices de tenacidade, como exemplo o aço ABNT 1045 que apresenta dureza entre 180-200HV, resultando em uma razão H/E de aproximadamente 0,009. Desta forma, nas ferramentas, ocorre uma transição abrupta entre as propriedades do substrato/revestimento, que é responsável, na maioria dos casos, por fomentar o início das falhas.

Para minimizar a diferença entre as relações de H/E do filme, a ser depositado, e do substrato foi necessário o desenvolvimento de novos tipos de substratos com propriedades compatíveis com a da camada de filme. Como opção para aproximar as propriedades do substrato com a da camada do filme, exemplo TiN, sem causar prejuízos à tenacidade da ferramenta modifica-se somente as propriedades do substrato próximo as regiões de interface com o revestimento. Uma aplicação consagrada e que apresenta bons resultados é a realização do tratamento termoquímico de nitretação [18].

1.3.1. Nitretação

A nitretação é um procedimento usado normalmente para o tratamento de superfícies metálicas, resultando em aumento da dureza superficial, melhora na resistência a corrosão e consequente redução no desgaste das ferramentas. Também utilizada como pré-revestimento para a deposição de filmes finos, já que contribui para uma redução no diferencial entre as razões H/E entre o substrato e o filme depositado, aumentando a aderência entre eles [18]. A nitretação pode ser realizada através de banho em sal cianídrico, NaCNO, a uma temperatura de 500 a 550°C por um período de 30 a 90 minutos ou através de técnicas de controle de plasma

(nitretação iônica), utilizando gás de reação, como por exemplo uma mistura entre NH_3 e H_2 , por um período de aproximadamente de uma hora [18].

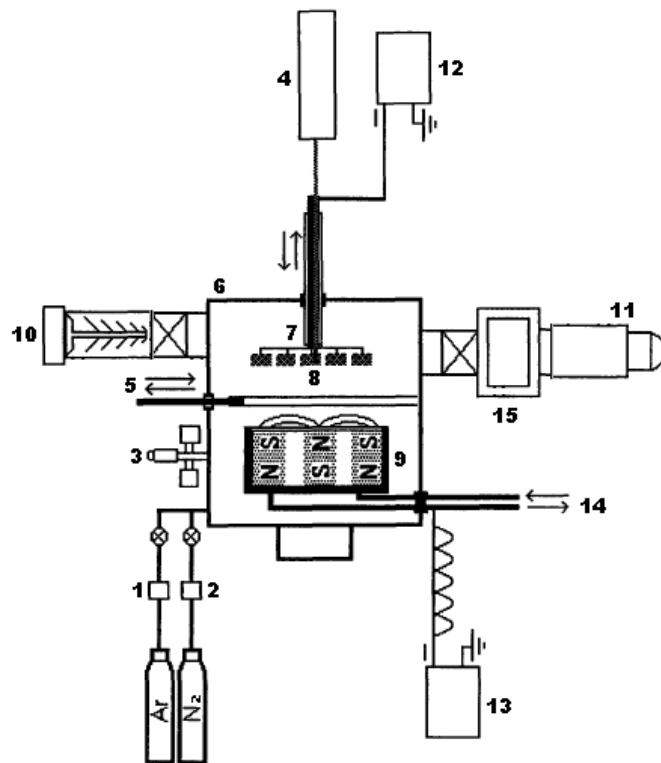
1.3.2. Nitretação Iônica ou a Plasma

A nitretação iônica ou a plasma, é caracterizada pela utilização de um gás ionizado através da aplicação de uma diferença de potencial entre o equipamento (ânodo) e o substrato a ser nitretado (cátodo), sob baixas pressões (vácuo), formando o plasma. O gás no estado iônico pode ser N_2 puro ou uma mistura entre NH_3 e H_2 , N_2 e H_2 , N_2 e Ar em diferentes proporções. O processo de nitretação ocorre devido ao bombardeamento da amostra pelos íons de N. Com a absorção do N pela superfície da amostra, o processo passa a ser termo físico-químico, com a reação junto ao Fe e elementos de liga formando nitretos, com alta dureza e resistência ao desgaste. A faixa de temperatura empregada para o processo é de 375°C a 650°C , o que na maioria dos aços (substratos) não altera as propriedades mecânicas.

A estrutura da camada nitretada inclui uma zona de difusão com ou sem uma zona de compostos (camada branca). Esta estrutura depende dos tipos de elementos de liga presentes no substrato do tempo e da temperatura do tratamento. Esta zona de compostos consiste na formação da camada branca normalmente composta de nitretos γ (Fe_4N) e ϵ (Fe_{3-2}N).

Como a concentração do nitrogênio aumenta em direção à superfície, precipitados coerentes são formados quando o limite de solubilidade do N é atingido. Os precipitados podem existir tanto nos contornos dos grãos como dentro destes no reticulado cristalino. Estes precipitados de nitretos de ferro e de elementos de liga distorcem os reticulados e ancoram as discordâncias, aumentando substancialmente a dureza no material [19].

Como forma de garantir velocidade ao processo produtivo da ferramenta e evitar necessidade de equipamentos dedicados a cada um dos tratamentos propostos a realização da nitretação iônica foi realizada no mesmo equipamento em que foi depositado o filme de TiN. Uma representação esquemática de um equipamento utilizado, laboratório de filmes finos e nanomateriais do CBPF, para o processo de nitretação é apresentada na Figura 11.



| | |
|-------------------------------|---------------------------------|
| 1 e 2 – Fluxímetros; | 3 – Medidores de pressão; |
| 4 – Termopar; | 5 – <i>Shutter</i> ; |
| 6 – Câmara; | 7 – Porta amostras; |
| 8 – Amostras; | 9 – <i>Magnetron</i> ; |
| 10 – Bomba turbomolecular; | 11 – Bomba turbomolecular; |
| 12 e 13 – Fontes de potência; | 14 – Sistema de refrigeração; e |
| 15 – Câmara porta amostras. | |

Figura 11 – Representação esquemática do equipamento utilizado para a realização do processo de nitretação iônica e deposição do filme de TiN, laboratório de nanomateriais CBPF, adaptado de [19].

Como característica o processo de nitretação iônica apresenta grande versatilidade no controle sobre os parâmetros de processamento, possibilitando a seleção dos nitretos desejados, ou mesmo até suprimir a formação da camada branca. Esta pode ser considerada uma das grandes vantagens desse processo. Já que a ausência de uma zona de compostos ou camada branca seguida de uma zona de difusão subjacente é a combinação desejada para a maioria das aplicações do processo de nitretação iônica quando utilizado como prévia para a deposição superficial de filmes finos, como a deposição subsequente de TiN.

1.3.3. Recobrimento com TiN

Os filmes obtidos de nitretos de cátions metálicos, como os TiN, TiCN, TiAlN, TiSiN, AlTiN, TiCNO, têm demonstrado serem de interesse em aplicações onde são necessários grandes valores de dureza superficial, resistência à corrosão e ao cisalhamento [8].

O revestimento de TiN é o mais popular na indústria de ferramentas isto é resultado da boa capacidade de aderência a uma grande variedade de materiais para substratos. Também apresenta boa barreira às reações químicas, valores de tenacidade e coeficiente de atrito elevados e reduzida perda de dureza a quente (acima de 600°C), quando comparado com outros tipos de revestimentos.

As propriedades físico-químicas do TiN, em relação às ferramentas não revestidas, são benéficas, tanto contra o desgaste abrasivo, quanto contra o desgaste por deslizamento, pois eles têm elevada dureza e baixa afinidade química com os materiais contra os quais são, geralmente, colocados em contato [20].

Para a obtenção de revestimentos de filmes de TiN os métodos de deposição a partir da fase de vapor são tradicionalmente empregados. Para a deposição de filmes, na qual a formação é obtida a partir da fase vapor se divide em dois grupos básicos: PVD (*Physical Vapor Deposition*) e CVD (*Chemical Vapor Deposition*).

Nos processos CVD, a deposição envolve reações químicas termicamente induzidas na superfície de um substrato aquecido e com os reagentes fornecidos na forma gasosa. Estes processos normalmente são realizados em temperaturas na ordem de 600°C a 1100°C, o que podem causar efeitos adversos nas propriedades do substrato, no caso dos aços. Como forma de minimizar os efeitos da temperatura sobre o substrato técnicas de PACVD (*Plasma Assisted Chemical Vapor Deposition*) são aplicadas permitindo trabalhar com temperaturas cerca de 50% menores e fazendo com que o processo de deposição não altere as características mecânicas do substrato.

Nos processos PVD o material do filme é transportado até a superfície na forma atômica, molecular ou iônica, obtidos por meios físicos a partir de fontes sólidas, líquidas ou gasosas. Reações químicas, entre os componentes do filme ou o substrato, podem ou não ocorrer na superfície do substrato. Como a temperatura de operação na superfície do substrato é

normalmente menor do que em processos CVD, estes processos são os mais indicados para os substratos sensíveis ao calor [19].

Existem ainda diversas variações do processo em função do meio de obtenção do vapor ou mesmo da existência ou não de reações químicas durante o processo. Em alguns casos, nos processos PVD, são introduzidos gases reativos (N_2 , CH_4 ou O_2) com a finalidade de promoverem reações químicas com as espécies evaporadas para a obtenção da deposição. Este é um exemplo de processo conhecido como PVD reativo.

A fase de vapor, a ser depositada, pode ser gerada por meios térmicos (evaporação) ou por meio de transferência de momento (pulverização catódica), *sputtering*.

A evaporação por meios térmicos é o mais simples dos métodos e é caracterizado pela evaporação do material empregando uma fonte de calor/energia. A vaporização é realizada sob vácuo, de forma a produzir um fluxo de átomos que irão condensar sobre a superfície do substrato, produzindo o revestimento [19].

Já a geração da fase vapor por *sputtering* ocorre através do bombardeio do material que será utilizado como fonte (alvo) por íons e/ou átomos, ou seja, por transferência de momento das partículas incidentes para os átomos do alvo.

Os processos *sputtering* mesmo apresentando menores taxas de deposição, apresentam vantagens sobre os processos de evaporação: uniformidade das camadas, possibilidade de deposição de materiais refratários, deposição de filmes isolantes além de ser um processo sem a formação de macro partículas [19].

Seja em processos por evaporação ou por *sputtering* pode ser utilizada uma descarga incandescente, plasma, aplicada ao substrato. A esta modificação no processo recebe o nome de íon *plating* ou PAPVD (*Plasma Assisted Physical Vapour Deposition*), muitas vezes sendo considerado um terceiro método de deposição. Com a utilização deste processo importantes modificações na morfologia e estrutura dos filmes ocorrem, além de assegurar as seguintes vantagens ao processo [19]:

- i. Melhor adesão do filme devido à realização de limpeza por *sputtering* e do pré-aquecimento pelo bombardeamento por íons e partículas do substrato;
- ii. Maior uniformidade da espessura e controle da estrutura do filme devido a efeitos de bombardeamento do substrato, e do filme;

- iii. Elimina a necessidade de etapas posteriores de polimento ou acabamento pois o revestimento mantém o acabamento superficial;
- iv. Deposição de uma ampla gama de materiais, incluindo isolantes;
- v. Controle preciso da taxa de deposição;
- vi. Deposição de filmes de alta pureza; e
- vii. Baixas temperaturas de deposição devido a altas energias envolvidas diretamente nas espécies do revestimento.

A Tabela 7 apresenta os principais recobrimentos utilizados para aplicação de resistência ao desgaste tribológico realizados pelo processo PVD. Observando as propriedades do TiN em relação aos demais materiais utilizados observamos que as propriedades de coeficiente de fricção, temperatura de deposição e nanoindentação atendem as necessidades do processo FSW, entretanto a resistência a abrasão, entre os filmes citados, não apresenta o maior valor.

A versatilidade e ganho no rendimento que os filmes finos implementam nas diversas áreas de aplicação fez com que as técnicas de deposição evoluíssem de forma a atender a demanda do mercado. O método PVD *sputtering* além das vantagens citadas não necessita do uso de componentes tóxicos durante a deposição diferente do CVD, entretanto as baixas taxas de deposição exigiam que o tempo para realização do filme fosse elevado. Como forma de aumentar a taxa de deposição e obter maior densidade no filme depositado a técnica magnetron *sputtering* é aplicada e garante o aumento da taxa de deposição de 0,5 – 5,0 $\mu\text{m/h}$ para cerca de 100 $\mu\text{m/h}$ [21].

Tabela 7 – Propriedades características dos principais revestimentos realizados pelo método PVD, adaptado de [21].

| Propriedade | Valores típicos para os revestimentos | | | | | | |
|---|---------------------------------------|-----------|-----------|-----------|------------------|------------|-----------|
| | TiN | TiAlN | TiCN | CrN | MoS ₂ | DLC (Puro) | M-C:H |
| Temperatura de deposição [°C] | 150 - 450 | 150 - 450 | 150 - 450 | 150 - 300 | 150 - 250 | 150 - 500 | 150 - 250 |
| Espessura típica, intervalo [μm] | 1 - 10 | 1 - 10 | 1 - 10 | 1 - 50 | 1 - 10 | 1 - 2 | 1 - 5 |
| Nanoindentação [GPa] (carga de 5mN, espessura do recobrimento 2μm) | 22 - 30 | 24 - 32 | 28 - 35 | 12 - 22 | 3 - 16 | 25 - 70 | 8 - 22 |
| Tensões internas [GPa] | 1 - 10 | 1 - 10 | 1 - 10 | 0,1 - 6 | 0,1 - 5 | 1 - 12 | 0,1 - 7 |
| Coefficiente de fricção (carga de 20N aplicada contra uma esfera de 6mm de aço 52100) | 0,5 - 0,7 | 0,4 - 0,6 | 0,2 - 0,5 | 0,4 - 0,6 | 0,02 - 0,1 | 0,05 - 0,2 | 0,1 - 0,2 |
| Resistência a abrasão* | + | ++ | ++ | - | +++ | + | ++ |
| Resistência adesiva* | + | ++ | +++ | - | +++ | +++ | - |
| Resistência a corrosão* | ++ | +++ | + | +++ | +++ | + | + |

* +++, Excelente; ++, boa; +, razoável e - fraca.

1.3.3.1. Deposição de filmes por *sputtering*

O processo de deposição de filmes PVD por *sputtering* é uma técnica que foi utilizada pela primeira vez no final do século XIX por *Michael Faraday*. Consistia na evaporação de arames e era utilizado somente para fins de observação científica, pois apresentava baixa qualidade no filme produzido. Somente na década de 1930 é que o processo de *sputtering* pode ter as aplicações industriais ampliadas devido ao desenvolvimento de bombas de vácuo de alta performance.

O fenômeno consiste na remoção de partículas de material da superfície de um sólido através do impacto de partículas energéticas [22]. A formação dessas partículas energéticas se dá da seguinte forma [23]: íons no plasma a baixa pressão (3 a 100mTorr) são acelerados pelo campo elétrico em direção ao cátodo, superfície sólida denominado alvo. Com o impacto os seguintes fenômenos podem ocorrer:

1. Os íons podem ser refletidos, sendo provavelmente neutralizados;
2. Os impactos dos íons podem causar a ejeção de elétrons do alvo (um ou mais), os quais são chamados de elétrons secundários;
3. Os íons podem penetrar no alvo. Conhecido como implantação iônica é um fenômeno usado em microeletrônica e em alguns casos também pode contaminar o alvo;
4. Os impactos dos íons podem ser responsáveis por um rearranjo na estrutura do material. O que pode resultar na criação de defeitos na microestrutura do material, criação de vacâncias e discordâncias na rede cristalina; e
5. Os íons colidem com a superfície do alvo e ejetam seus átomos. Esse “processo” de ejeção/retirada de átomos superficiais é que define o fenômeno *sputtering*.

No processo de *sputtering* os átomos ejetados/retirados da superfície do alvo possuem uma energia da ordem de 10 eV [21]. E para que o processo *sputtering* seja eficiente, as partículas incidentes (íons) devem possuir dimensões atômicas. Com isso uma partícula muito pequena, como um elétron, não possui energia cinética suficiente para, durante o choque, efetivar a retirada de átomos. Já uma partícula muito grande, devido a seu volume, não interage com átomos e/ou moléculas superficiais. Por este motivo, os gases são utilizados como partículas incidentes para o processo de *sputtering*. Os gases ainda apresentam como vantagem

a estabilidade química (gases nobres) o que garante que não haverá interação química entre os íons, que colidem, e o material do alvo.

Na maioria das vezes o gás utilizado para a realização do processo de *sputtering* é o argônio (Ar), *sputtering* não reativo, pois apresenta elevado número de massa e apresenta boa relação entre facilidade de se obter com alta pureza e custo. Mas em algumas aplicações gases reativos como N₂, O₂ e CH₄ são utilizados, denominando o processo *sputtering* reativo. A Figura 12 apresenta, de forma esquemática o processo de deposição de filme PVD através da técnica *sputtering* em um reator com atmosfera de Ar, *sputtering* não reativo.

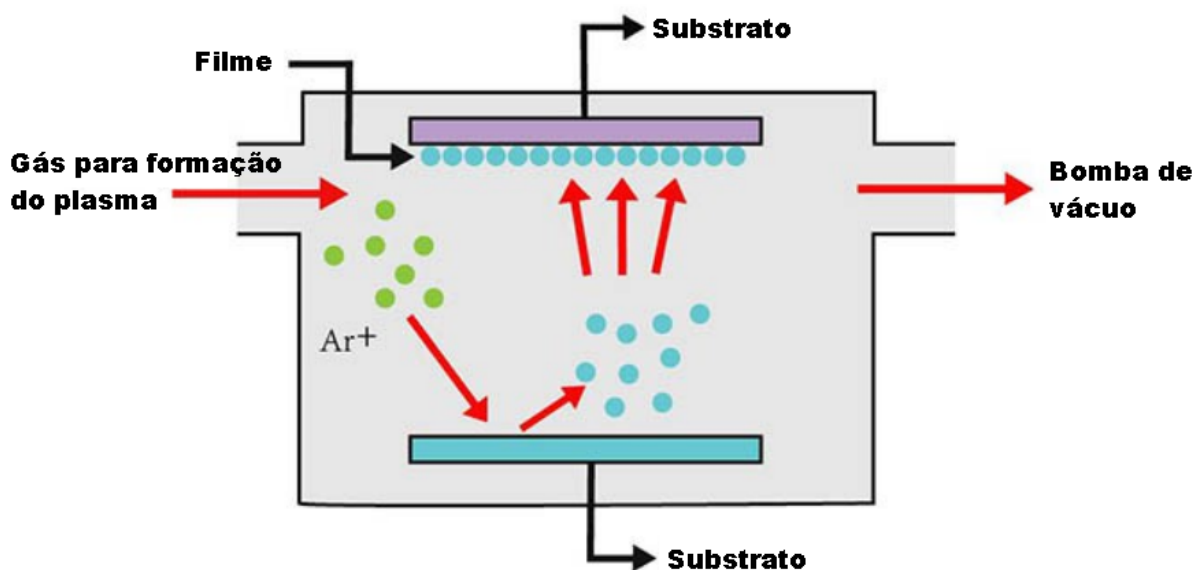


Figura 12 – Reator esquemático para a realização de deposição de filmes finos pelo processo PVD *sputtering*. [adaptado de 24].

O processo de deposição de filmes finos por *sputtering* é amplamente utilizado, sendo vantajoso frente a outros processos de deposição PVD. Através dessa técnica assegura-se alta pureza e densidade, pequeno teor de defeitos, estequiometria e composição controladas, altas taxas de deposição, possibilidade de realização de filmes multicamadas, pequeno risco de contaminação por impurezas e uniformidade e repetibilidade do filme.

1.3.3.2. Processo *magnetron sputtering*

O processo *magnetron sputtering* consiste em desbastar a superfície do alvo através de íons produzidos em um plasma magneticamente confinado em uma atmosfera de gases rarefeitos ultrapuros [25].

O processo consiste em confinar, grande parte do plasma em uma região bem próxima ao alvo, aproximadamente 60mm com o uso de ímãs permanentes ou eletroímãs. Assim a região a frente do cátodo ocorre a formação de um caminho fechado de linhas de campo, o que resultará no aprisionamento dos elétrons secundários nesta região. Como resultado desse aprisionamento eletrônico, há maior taxa de ionização no plasma, e conseqüente aumento na taxa de deposição de átomos no substrato [26]. Podemos relacionar as principais vantagens do uso do campo magnético para o aprisionamento eletrônico:

1. Aumento na taxa de deposição na ordem de 10^3 vezes;
2. Os átomos são ejetados/retirados da superfície do alvo com energia da ordem de 20eV;
3. Devido a elevada taxa de ionização o plasma pode ser mantido bem próximo ao cátodo com tensões menores (aproximadamente 350V) e correntes maiores (10V), com fonte DC;
4. As baixas pressões de trabalho (ordem de 5mTorr) aumentam o caminho livre médio dos átomos ejetados, permitindo que atinjam o substrato com maior quantidade de energia, o que resulta em um filme de maior qualidade com redução no espalhamento dos átomos pelo interior da câmara; e
5. Redução no aquecimento do substrato, pois não sofre mais o bombardeamento por elétrons energéticos, o que possibilita o depósito de filmes em materiais sensíveis a temperatura.

O processo *magnetron sputtering* é um sistema de deposição que se caracteriza, principalmente, por apresentar altas taxas de deposição. Os filmes depositados pelo processo *magnetron sputtering* podem ser de uma grande variedade de materiais, com alta condutividade elétrica, como os metais e suas ligas, utilizando uma fonte de potência DC ou independente da condutividade elétrica, como as cerâmicas técnicas TiN, Si₃N₄, AlN entre outras, com o uso de uma fonte de potência RF. Um arranjo típico é apresentado na Figura 13.

O uso de uma fonte RF no processo *magnetron sputtering*, com frequência acima de 50kHz, faz com que os elétrons oscilem na região de confinamento magnético com energia suficiente para sustentar as colisões de ionização e manutenção do plasma, reduzindo a necessidade de elétrons secundários [25]. Desta forma usando um plasma de alta frequência a corrente pode passar através do material do alvo sem o acúmulo de cargas mantendo assim o plasma constante [27].

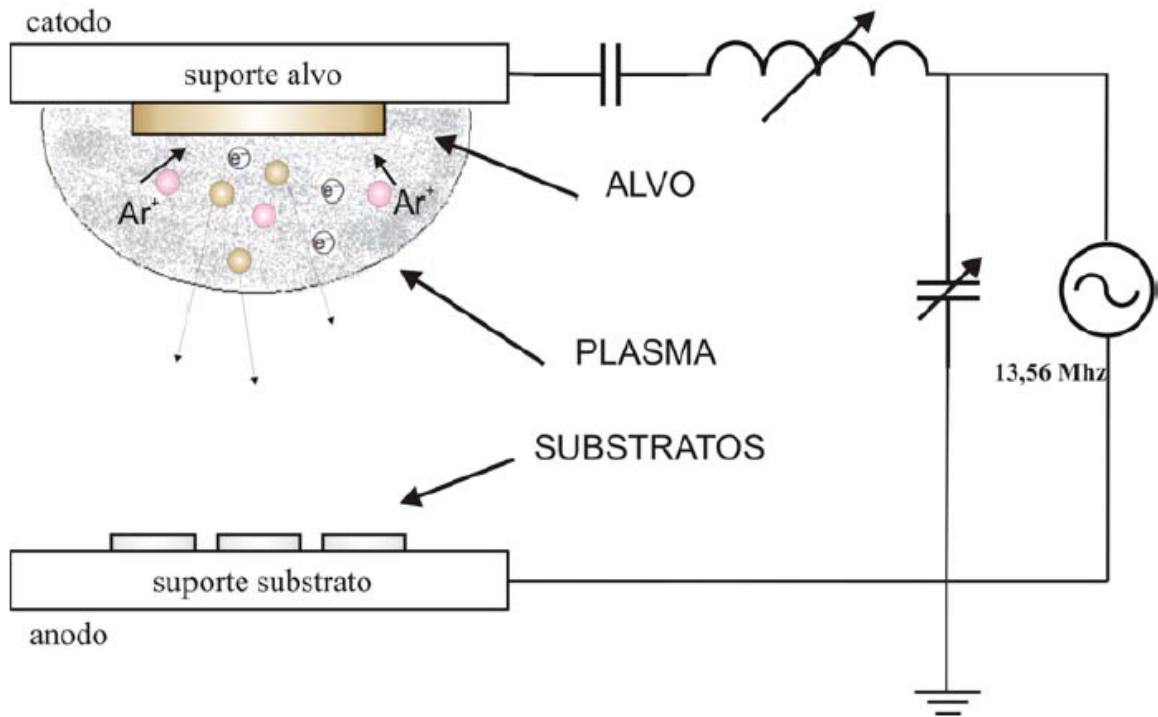


Figura 13 – Arranjo de um processo *sputtering* com o uso de fonte RF [27].

Tipicamente as fontes RF utilizadas para o processo e produzidas operam com a frequência de 13,56kHz, é a frequência reservada pelo *Federal Communications Commission* para aplicações em processos *sputtering* [25]. O uso desta frequência é observado pelos principais fabricantes de fontes no mundo.

A Figura 14 apresenta o arranjo esquemático de um *magnetron* além de ilustrar o campo magnético e o caminho íon / átomos ejetados do alvo durante o processo de *sputtering*.

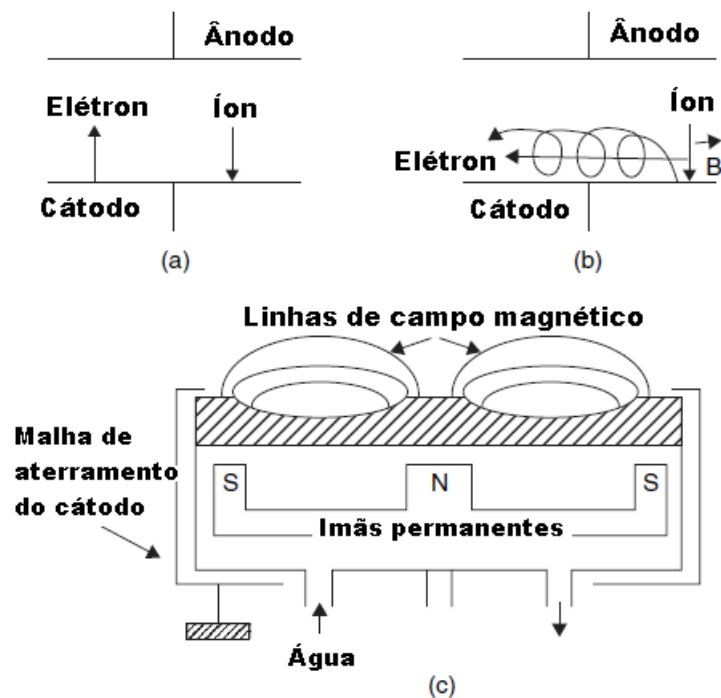


Figura 14 – Comparação entre os processos *sputtering* (a) *sputtering* convencional com fonte DC e (b) *magnetron sputtering* também com fonte DC. (c) arranjo das linhas de campo magnéticas no cátodo de um *magnetron* [21].

Para, no processo *magnetron sputtering* o melhor rendimento ser obtido, é importante o sistema de refrigeração dos *magnetron* ser eficiente. Outro ponto de atenção é no uso de rampas de potência para alvos que não apresentam boa condutividade térmica, tais requisitos asseguram além do máximo desempenho do processo a integridade do alvo e do próprio conjunto *magnetron*, já que cerca de 90% da potência fornecida ao cátodo deve ser dissipada pelo sistema de refrigeração.

A Figura 11 representa, de forma esquemática, o equipamento utilizado para a realização do filme de TiN. A vantagem do uso deste equipamento é que ambas as etapas do processo de recobrimento, nitretação iônica e a deposição do filme de TiN puderam ser realizadas. Além de ser um equipamento montado pelo próprio centro de pesquisa, CBPF, como resultado dos trabalhos desenvolvidos pelos grupos de pesquisa do Laboratório de Superfícies e Nanoestruturas/CBPF.

1.3.3.3. Processo *magnetron sputtering* não reativo

A deposição pelo processo *magnetron sputtering* pode ser realizada em uma câmara contendo gás inerte, geralmente Ar, *sputtering* não reativo ou na presença de uma mistura de gases, inertes (Ar) e reativos (O_2 e/ou N_2) o que caracteriza o processo *sputtering* reativo.

Filmes de TiN podem depositados utilizando ambos os processos. Com as particularidades devidas a cada processo, vantagens e desvantagens entre o uso da deposição reativa ou não reativa, devem ser avaliadas.

A deposição não reativa de TiN em *magnetron sputtering* a partir de alvos de TiN com elevada pureza é possível devida a sua estabilidade química, resultante da elevada energia de ligação entre o Ti-N que é da ordem de 397 eV. Esta estabilidade garante ao TiN a manutenção das suas características durante o processo de *sputtering* do material do alvo até a formação das camadas do filme no substrato.

A principal diferença entre os processos de deposição de TiN reativo e não reativo é a taxa de deposição, que chega a ser três vezes maior quando utilizado o processo não reativo [28]. Outro ponto importante para a formação do filme de TiN é a forma de bombardeamento dos íons no substrato. A variação de energia dos íons e a variação de fluxo, dada pela razão íon/átomo, alteram características microestruturais, tamanhos de grão, tensões do filme aplicado ao substrato, que resultam em modificações nas propriedades mecânicas e térmicas do TiN. Assim para que o crescimento do filme passe a ser de grãos colunares e poros para grãos densos e fibrosos é necessária uma maior ativação para o processo de crescimento do filme, que ocorre devido ao bombardeamento iônico. Para o processo de deposição reativo ambos os valores, energia dos íons e variação de fluxo da razão íon/átomo é maior do que para o processo não reativo, pois, o processo reativo precisa dissociar o N_2 gasoso em íons N.

O uso da fonte RF para a deposição do filme faz com que o filme seja depositado de forma mais homogênea, devido a frequência da fonte RF e da baixa potência utilizada, entretanto o tempo de deposição é superior ao utilizado pelo processo com fonte DC.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção apresentaremos de forma estruturada as etapas desenvolvidas durante a realização do trabalho, descrevendo as operações realizadas para a produção e avaliação das ferramentas de aço AISI 1045 revestidas com TiN para o uso no processo de soldagem FSW.

2.1. Materiais

Para a execução/realização de cada etapa proposta do trabalho foram utilizados os seguintes materiais:

1. Aço AISI 1045 – aço médio carbono de aplicações gerais, em formato de barra trabalhado a frio com diâmetro de 20mm, uso como recebido. A partir desta barra foram confeccionados corpos de prova com 2mm de espessura e ferramentas, conforme anexo 7.1. Os corpos de provas e ferramentas passaram pelas etapas de produção simultaneamente e foram utilizados para as caracterizações/ensaios. As principais propriedades do AISI 1045 são dadas pela Tabela 8;
2. TiN comercial, pureza de 99,5%, utilizado como alvo. Produzido pela *AJA International Inc.* Principais propriedades do TiN são apresentadas na Tabela 9;
3. Nitrogênio gasoso, com grau de pureza de 99,0%. Fornecido pela White Martins gases industriais Ltda;
4. Argônio gasoso, com grau de pureza de 99,5%. Fornecido pela White Martins Gases industriais Ltda;
5. Esferas de vidro para jateamento com granulometria número 230, abertura de 63µm, conforme normas [40], [41] e [42];
6. Chapas de Al 5052 H34. Propriedades do Al 5052 H34 dadas pela Tabela 10; e
7. Lâminas de Si com orientação (100).

Tabela 8 - Principais propriedades mecânicas do aço AISI 1045 [29]

| PROPRIEDADE | VALOR |
|--------------------------------|-------|
| Coefficiente de <i>Poisson</i> | 0,29 |
| Módulo de Cisalhamento [GPa] | 80 |
| Dureza [HV] | 188 |
| Módulo de elasticidade [GPa] | 206 |

Tabela 9 - Principais propriedades mecânicas do TiN [30]

| PROPRIEDADE | VALOR |
|--------------------------------|--------------|
| Coefficiente de <i>Poisson</i> | 0,25 |
| Módulo de Cisalhamento [GPa] | 240 |
| Dureza [HV] | 2300 |
| Módulo de elasticidade [GPa] | 600 |

Tabela 10 – Principais propriedades mecânicas do Al5052 H34 [31].

| PROPRIEDADE | VALOR |
|--------------------------------|--------------|
| Coefficiente de <i>Poisson</i> | 0,33 |
| Módulo de Cisalhamento [GPa] | 145 |
| Dureza [HV] | 78 |
| Módulo de elasticidade [GPa] | 70,3 |

2.2. Metodologia

A metodologia utilizada no trabalho está apresentada no fluxograma da Figura 15. Consistiu na caracterização de cada etapa do processo de produção das ferramentas revestidas com TiN, para o processo de soldagem FSW. Os métodos aplicados em cada etapa tiveram como referência a bibliografia e tecnologias usuais, aplicadas para a produção, caracterização e medidas de desempenho de ferramentas comerciais, revestidas com TiN. Buscou-se minimizar os custos de fabricação de forma que a relação custo/benefício, da ferramenta revestida, atendessem as necessidades de qualidade e produtividade para a execução da soldagem de chapas de Al pelo processo FSW.

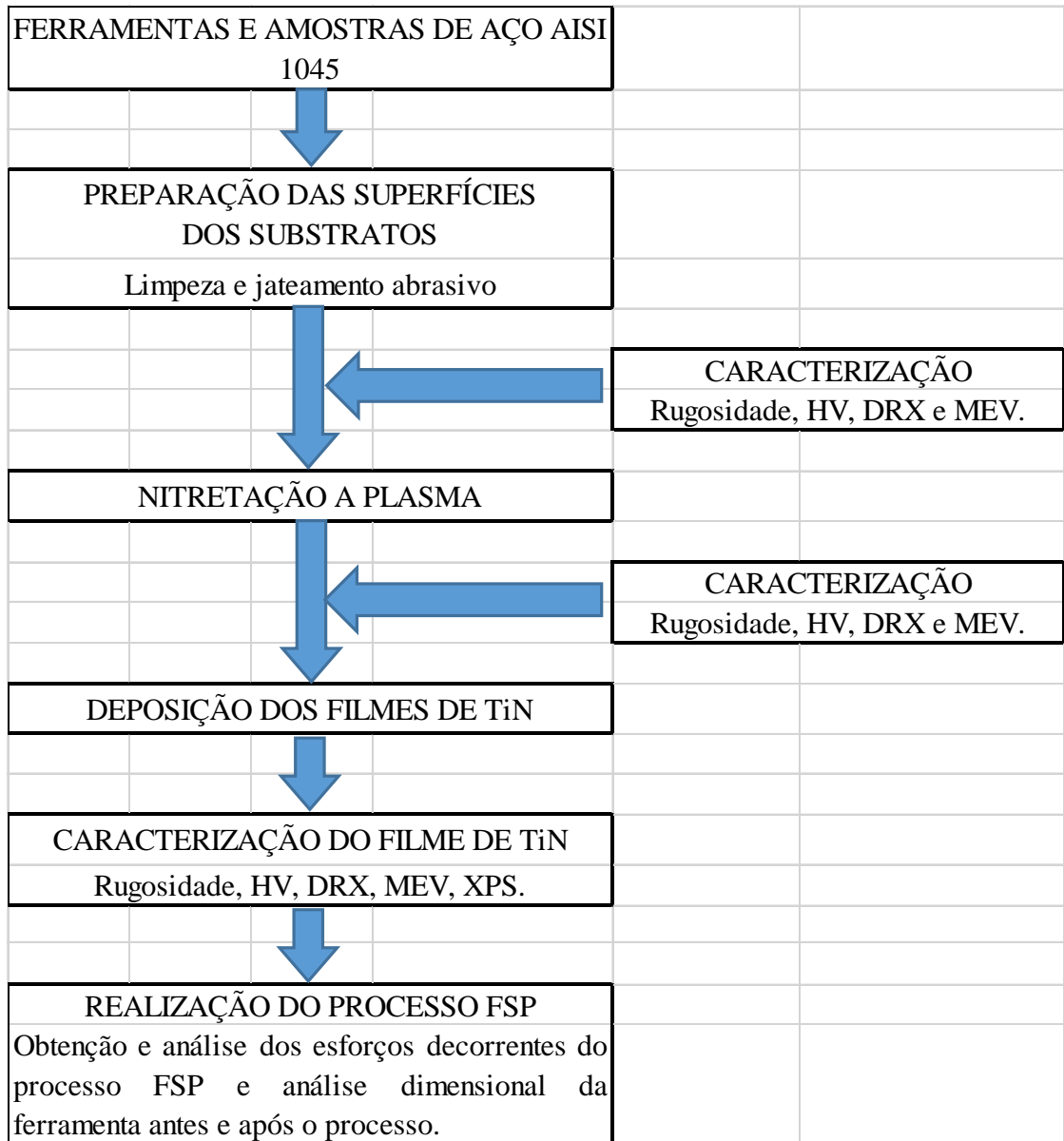


Figura 15 – Fluxograma das atividades desenvolvidas no trabalho.

2.3. Procedimentos experimentais

Os procedimentos experimentais propostos para o trabalho foram divididos em etapas conforme o fluxograma apresentado na Figura 15. Todos os procedimentos foram realizados nas instituições que apoiaram este trabalho: CBPF, PUC/RIO e UERJ.

2.3.1. Preparo superficial das amostras

Foram preparadas 20 amostras de aço AISI 1045, com diâmetro de 20mm e espessura de 4mm e 04 ferramentas para o processo de soldagem FSW/FSP, conforme desenho anexo 7.1.

Todas as amostras e ferramentas foram jateadas ao metal branco, grau A Sa3 conforme [44]. O material abrasivo foi microesfera de vidro tipo I – B, definida pelas normas [40], [41], [42] e [43] com peneiras número 230 e granulometria de 63 μ m. A pressão de trabalho utilizada foi de 6,5Bar. O equipamento utilizado foi a cabine para jato fabricada pela BRUMAR equipamentos Ltda, modelo 500x500mm, conforme Figura 16, pertencente ao Laboratório de Superfícies e Nanoestruturas/CBPF do CBPF.



Figura 16 – Cabine de jateamento abrasivo utilizada no preparo superficial das amostras e ferramentas.

Após o processo de jateamento abrasivo todas as peças sofreram 30 minutos de limpeza em aparelho de ultrassom sendo: 15 minutos submersas em acetona e 15 minutos submersas em álcool isopropílico e posterior secagem com jato de ar quente.

O acabamento superficial ao jateado ao metal branco, grau A, Sa3, foi selecionado visando a redução dos custos com o preparo superficial da ferramenta. Evitando-se operações caras de usinagem, como a retificação e/ou polimento o que acarretaria um aumento nos custos de produção. Também o aumento da rugosidade superficial contribui para uma melhor aderência do filme mecânico sobre o substrato, adesão mecânica. Entretanto elevados níveis de rugosidade, como o utilizado, podem ser prejudiciais.

2.3.2. Medição de Rugosidade

Medidas de rugosidade superficial foram realizadas nas amostras após o preparo da superfície e após cada etapa de tratamento. As medidas de rugosidade foram obtidas em conformidade com [45] e realizadas com o uso do rugosímetro digital modelo SP1560, fabricado pela TQC com precisão de $1\mu\text{m}$. O equipamento, Figura 17, pertence a Marinha do Brasil (MB) e cedido a empresa Itaguaí Construções Navais (ICN).



Figura 17 – Rugosímetro SP1560, fabricado pela TQC, utilizado para realização de medidas de rugosidade superficial.

Os valores de rugosidade obtidos são referentes a rugosidade máxima, R_y , das superfícies. A indicação R_y é a medida da distância entre os “picos” e “vales” da superfície do material, nos pontos medidos. O controle da rugosidade superficial visa assegurar aderência mecânica do filme ao substrato e verificar interferências das etapas do processo de deposição de filme no acabamento superficial.

2.3.3. Determinação de microdureza *Vickers* (HV)

O método de medição de microdureza *Vickers* foi realizado em conformidade com [46]. O ensaio consiste em utilizar um equipamento calibrado dotado de um penetrador de diamante em forma de pirâmide com base quadrada e com um ângulo Θ conhecido entre as faces opostas no vértice. Pressiona-se o penetrador sobre a superfície do corpo de provas com uma carga F .

A medida das diagonais, impressas sobre a superfície do corpo de provas, é utilizada para cálculo da área de impressão, que dividindo a força aplicada resulta no valor de microdureza *Vickers*.

Os ensaios foram realizados no LaCam/UERJ em um microdurômetro Panambra MV 1000A, Figura 18. Os ensaios foram realizados com carga de 100gf e tempo de 10s.



Figura 18 – Microdurômetro utilizado para realização das mediadas, LaCam/UERJ.

2.3.4. Difração de Raios X (DRX)

Análises de difração de Raios X foram realizadas após em cada etapa dos processos, necessários a deposição do filme de TiN.

O difratograma de Raios X (Θ - 2Θ) de um filme fino pode ser dividido em duas regiões: baixos ângulos ($2\Theta < 15^\circ$) e altos ângulos ($2\Theta > 15^\circ$). A região de baixos ângulos é resultante do espalhamento proveniente da modulação química da espessura do filme, enquanto que a região de altos ângulos depende do comprimento de coerência estrutural (planos cristalinos) normal ao filme (somente na varredura Θ - 2Θ acoplados) [25].

Foram aplicadas técnicas de difração de baixo ângulo, $2\Theta < 15^\circ$, para determinação da espessura do filme de TiN e posterior cálculo da taxa de deposição. Difração de alto ângulo, $2\Theta > 15^\circ$ obedecendo a lei de *Bragg*, foi utilizada para a caracterização da estrutura do substrato,

verificação da presença da camada branca e estrutura do filme produzido, determinando fases presentes, cristalinidade e orientações preferenciais.

Para as análises de difração foi utilizado o equipamento pertencente ao laboratório de cristalografia e difração de raios-x do CBPF, Figura 19. Difratormetro Panalitical, modelo *X'Pert Pro*, operando com radiação de Cu com $\lambda=1,542\text{\AA}$. A fonte foi excitada com tensão de 40KV e corrente de 40mA. Os difratogramas foram obtidos usando velocidade de varredura angular de $0,05^\circ/\text{s}$, ângulo de varredura (2θ) de 10° a 90° .

Os difratogramas foram analisados com auxílio dos softwares *HightScore*, para análise qualitativa, e *Topas Academic versão 4.1* para análise quantitativa. Banco de dados ICSD foi utilizado para obtenção de fichas atualizadas dos materiais.



Figura 19 – Difratormetro *X'Pert Pro* do laboratório de cristalografia e difração de raios-x do CBPF.

2.3.5. Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Foi utilizado para a análise morfológica da superfície das amostras técnicas de microscopia eletrônica de varredura. Os ensaios foram realizados no microscópio eletrônico de varredura de emissão de campo (MEV-FEG) pertencente ao laboratório multiusuário NanoFab da UERJ, Figura 20.

O microscópio utilizado é recém adquirido pelo laboratório, fabricado pela JEOL, modelo JSM-7100FT. As magnificações adotadas foram 200, 1.000, 5.000 e 50.000 vezes para cada condição da amostra.



Figura 20 – Microscópio eletrônico de varredura de emissão de campo (MEV-FEG) pertencente ao NanoFab/UERJ.

2.3.6. Nitretação a plasma

O tratamento termoquímico de nitretação superficial a plasma foi realizado no reator do Laboratório de Superfícies e Nanoestruturas/CPBF. Para a fixação das amostras e ferramentas foi necessária a construção de um dispositivo de forma que as amostras e ferramentas ficassem fixas ao dispositivo e mesmo pudesse ser acoplado ao sistema de fixação do equipamento. O dispositivo apresentado na Figura 21, foi produzido nas oficinas mecânicas do CBPF e permitiu a realização dos tratamentos de nitretação e deposição de TiN em 03 amostras e 02 ferramentas, simultaneamente.

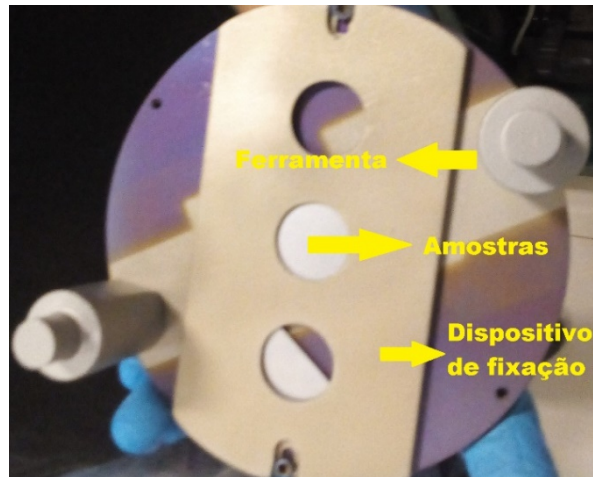


Figura 21 – Porta amostras com dispositivo de fixação desenvolvido e construído na oficina mecânica do CBPF.

O processo de nitretação iônica foi realizado no mesmo equipamento utilizado para a deposição de filmes finos, o que assegurou redução de custos e *set up* para a realização do procedimento, Figura 22.



Figura 22 – Reator *magnetron sputtering* instalado no Laboratório de Superfícies e Nanoestruturas/CBPF, utilizado para a realização do processo de nitretação a plasma e deposição do filme de TiN.

Os parâmetros utilizados para o tratamento termoquímico de nitretação estão descritos na Tabela 11 e têm como referência padrões disponíveis na literatura, [21, 26, 32]. O início do

processo de nitretação as amostras sofreram uma etapa de *etching*, visando limpeza (remoção de óxidos) e ativação superficial. Ajustes foram realizados de forma a realizar o processo em uma atmosfera com N₂ e Ar de forma a evitar a formação da camada branca:

Tabela 11 - Condições para os processos de *etching* e nitretação a plasma para as amostras.

| ETAPA | COMPOSIÇÃO GASOSA | TEMPERATURA SUBSTRATO [°C] | TRATAMENTO [minutos] | PRESSÃO [mTorr] | FONTE | POTÊNCIA [W] |
|----------------|---------------------------|----------------------------|----------------------|------------------------|-------|--------------|
| <i>Etching</i> | 100% | 350 | 15 | 100 | RF | 30 |
| Nitretação | 20%N ₂ - 80%Ar | 350 | 60 | $\frac{160N_2}{590Ar}$ | RF | 30 |

As amostras e ferramentas, antes do início do procedimento e colocação na câmara para o processo de nitretação a plasma, sofreram as etapas descritas no item 3.3.1.

Ao término do processo de nitretação a plasma as amostras foram caracterizadas conforme os itens 3.3.2, 3.3.3 e 3.3.4. A caracterização segue o procedimento apresentado no fluxograma da Figura 15.

2.3.7. Recobrimento superficial de TiN

O processo de deposição de filme de TiN foi realizado no Laboratório de Superfícies e Nanoestruturas/CPBF em um reator *magnetron sputtering* montado e tendo muitos de seus componentes e todo o sistema de controle/automação produzidos e implementado pelo CBPF, Figura 22.

A opção por realizar o processo de deposição não reativo e com o uso da fonte RF foi devido, a maior taxa de deposição que este processo apresenta, melhor controle estequiométrico do composto e estabilidade no processo de nucleação/formação do filme, sobre o substrato, garantido pelo uso da fonte RF [28, 33].

Para o início do procedimento de recobrimento de TiN, as amostras e ferramentas passaram por todas as etapas apresentadas nos itens 3.3.1, 3.3.2, 3.3.3, 3.3.4, 3.3.5 e 3.3.6.

Os parâmetros utilizados para a produção do filme seguiram como referência os valores utilizados pelas referências [28, 33]. Entretanto de forma a ajustar a performance do equipamento e com segurança obter uma taxa de deposição comercialmente viável exigiu a

realização de testes. Nos testes, variações de potência, temperatura do substrato e pressão de Ar na câmara foram realizadas. Os resultados são apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 – Ensaio de deposição de TiN para determinar parâmetros de deposição.

| Material | Alvo | Potência [W] / Fonte | Pressão [mTorr] | Atm. | Temperatura Substrato [°C] | Taxa de Deposição [nm/min] | OBS |
|----------|------|----------------------|-----------------|------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| Si | TiN | 50/RF | 5 | Ar | ambiente | 0 | Sem capacidade de medição |
| Aço/Si | TiN | 100/RF | 5 | Ar | ambiente | 1,010 | Coloração amarela |
| Aço/Si | TiN | 150/RF | 5 | Ar | 550 | 1,101 | Coloração ouro envelhecido |
| Aço | TiN | 175/RF | 5 | Ar | 550 | 1,200 (Ref) | Coloração ouro envelhecido. |

Os ensaios de deposição do filme de TiN foram necessários para determinar, não só os mais adequados padrões de ajustes do equipamento, como também para a implementação de rotinas de controle do reator.

Para o uso da deposição não reativa, com alvo de TiN foi necessária a aplicação de uma rampa de potência, de forma que a potência aplicada no *magnetron* atinja seu valor máximo de forma gradativa, visando a integridade do alvo. Para isso foi implementado uma rotina que eleva a potência com uma razão de 17,5W/min. O aquecimento e resfriamento também foi gradativo. Entretanto seu controle foi realizado de forma manual a uma razão de 50°C a cada 15 minutos (3,35°C/min).

Para o recobrimento da ferramenta os valores de taxas de deposição apresentados na Tabela 12 foram utilizados como referência de forma a obter um filme com espessura suficiente a aplicação, uso no processo FSW/FSP. Com isso o tempo de deposição adotado foi de 480 minutos, (8 horas), o que resultou em uma espessura para o filme de TiN, estimada, de 576nm.

2.3.8. Espectroscopia de fotoelétrons por Raio X (XPS)

O uso da técnica de XPS permitiu analisar a composição química superficial das amostras, após a realização da deposição do filme de TiN. O uso da análise realizada por XPS em conjunto com informações obtidas através das técnicas de DRX permitem obter uma descrição completa do material na superfície das amostras. Composição química, elementar e/ou molecular e estrutura/arranjo atômico definem propriedades importantes do material depositado, TiN.

Foi utilizado o equipamento XPS pertencente ao Instituto de Física da PUC/RIO, Figura 23, e a análise dos dados foi realizada através do software CASAXPS.

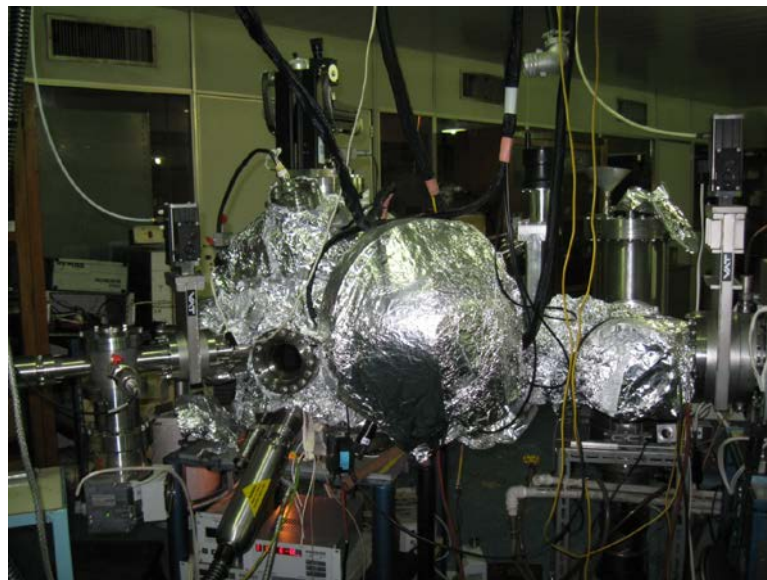


Figura 23 – Equipamento XPS utilizado para realização de análise química superficial, PUC/RIO.

2.3.9. Ensaio de soldagem FSW/FSP

A utilização de um material de baixo custo, aço AISI1045, recoberto com TiN, para produção de ferramenta aplicada ao processo de soldagem FSW, de ligas de Al, é o objetivo proposto e foi apresentado neste trabalho. Como forma de avaliar o comportamento da ferramenta foi realizado ensaios com a técnica FSP, *Friction Stir Process*, que consistem na utilização do equipamento para a realização da solda, FSW, entretanto a soldagem entre chapas não é realizada. Nesta técnica, FSP, a ferramenta é penetrada em 0,3mm em uma chapa única de Al, corpo de provas, com velocidade de penetração de 4mm/min e realiza um percurso de 20mm.

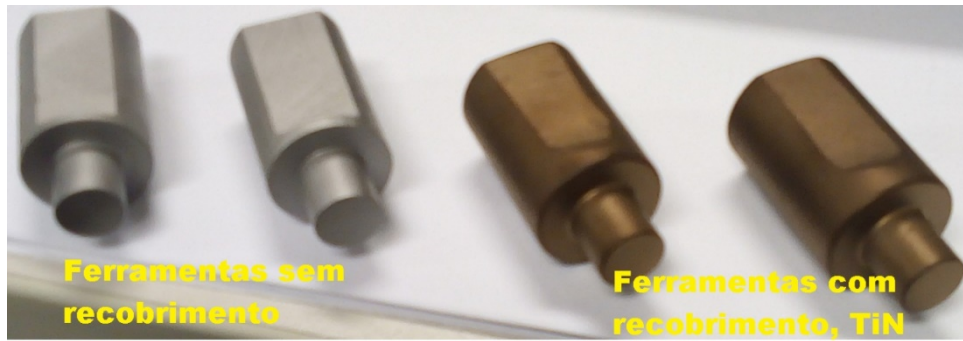


Figura 25 – Conjunto de ferramentas com e sem recobrimento de TiN utilizadas para a realização dos ensaios de FSP.

Já a Figura 26 e Figura 27 mostram a montagem da ferramenta com o mandril de fixação no equipamento e os dispositivos de fixação/medição de esforços necessários para a obtenção dos resultados. Os componentes são formados por uma placa base, dois elementos de fixação e dois topadores necessários para evitar a movimentação do corpo de provas durante o processo FSP.

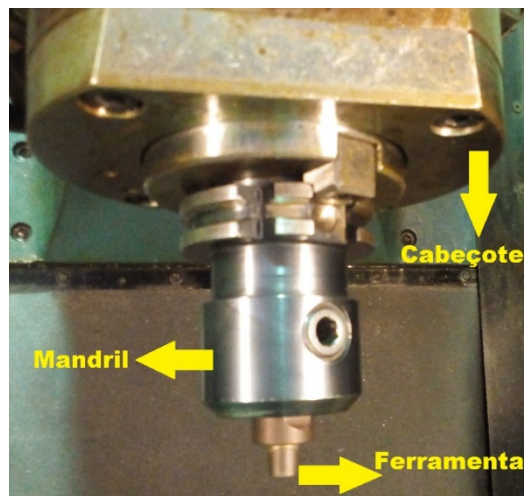


Figura 26 – Cabeçote, mandril de fixação e ferramenta acoplados no centro de usinagem CNC Polaris V400, CEFCON COPPE/UFRJ.

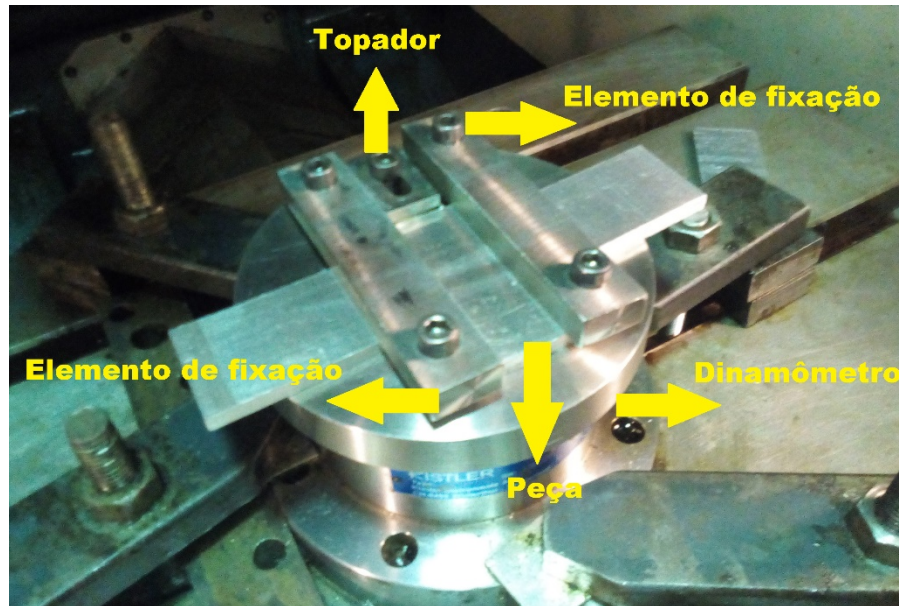


Figura 27 – Dinamômetro e conjunto de fixação da peça (corpo de provas) para a execução do processo FSP.

2.3.10. Análise dimensional

A análise dimensional nas ferramentas foi realizada com o uso de paquímetro analógico, marca Mitutoyo, modelo 530-101 com precisão de 0,05mm, Figura 28. O controle dimensional respeitou as informações apresentadas no anexo 7.1.



Figura 28 - Paquímetro utilizado para realização da verificação dimensional.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados e discussões das etapas de caracterização, desenvolvidas durante as atividades, bem como após os processos necessários para a fabricação da ferramenta. Como descrito na revisão bibliográfica com o revestimento de TiN espera-se um aumento no período de vida da ferramenta, em torno de 6 (seis) vezes, conforme [39]. Características como esforços resultantes durante o processo FSP e análise dimensional das ferramentas foram avaliados.

3.1. Rugosidade

As medidas de rugosidade foram obtidas em conformidade com [45], sendo realizadas 10 medidas em cada amostra, e estão apresentadas na Figura 29. São importantes para o controle do processo produtivo, verificando a influência de cada etapa de tratamento para a obtenção da ferramenta, com o revestimento de TiN.

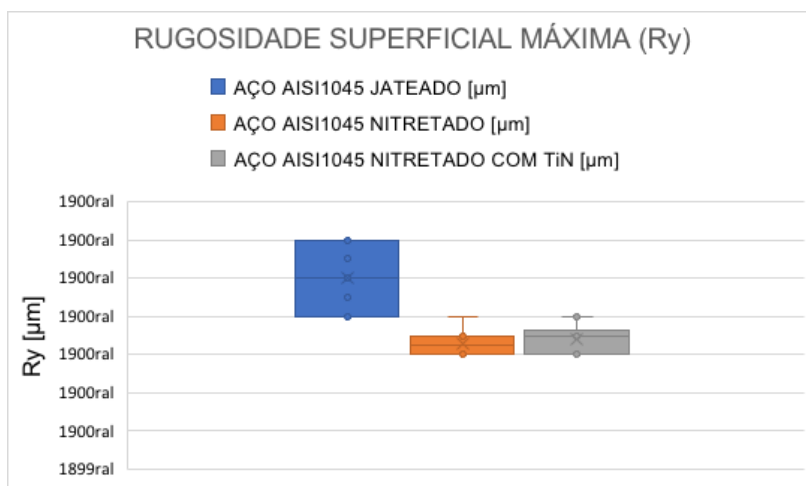


Figura 29 – Valores de rugosidade para as diferentes etapas do processo de fabricação.

Os valores de rugosidade obtidos estão compatíveis com os processos de acabamento superficial, jateamento com esfera de vidro ao metal branco, grau Sa3. Variações na rugosidade superficial foram observadas após o processo de nitretação e revestimento com TiN. Estas variações podem ser resultantes do ciclo de aquecimento/resfriamento utilizado durante a nitretação iônica e/ou consequência da formação de óxidos. Também a camada de TiN depositada contribui para a redução no valor da rugosidade máxima, Ry.

3.2. Dureza

Os resultados obtidos nos ensaios de dureza, são apresentados na Figura 30. O processo de medição de dureza foi realizado conforme [46] com a realização de 10 medidas por amostra.

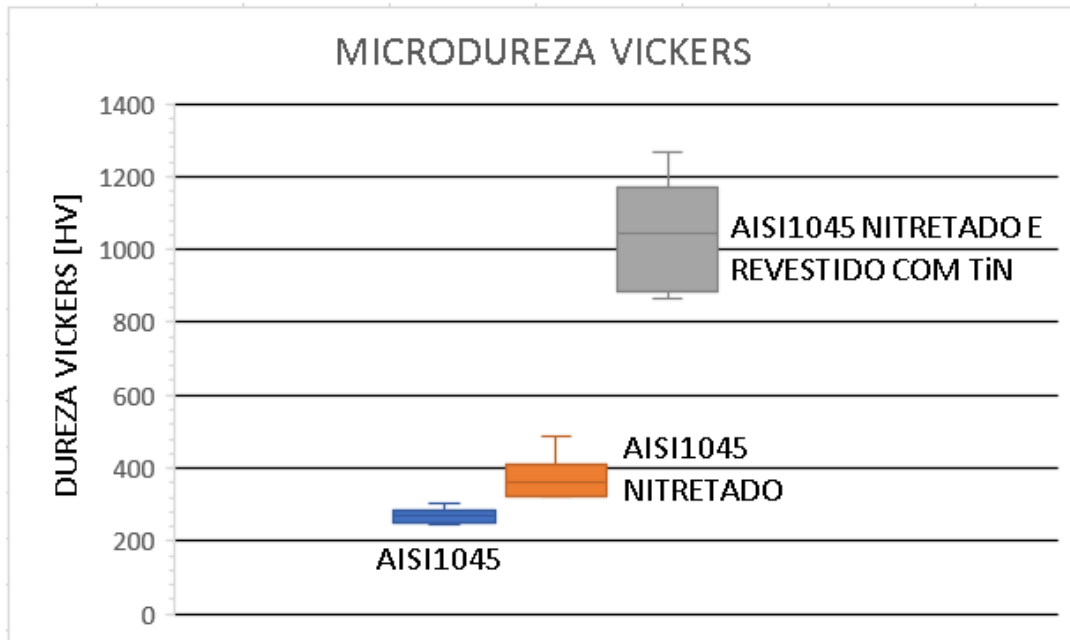


Figura 30 – Valores de microdureza *Vickers* para as amostras ensaiadas.

Para as amostras de aço AISI 1045, com e sem o processo de nitretação, os valores são compatíveis com os valores encontrados nas referências [15, 17]. Já para a amostra que recebeu o filme de TiN, os valores são cerca de 40% menores do que o normalmente encontrado em referências para filmes de TiN, depositado em aço. Tal discrepância pode ser resultado da rugosidade elevada, resultando em crescimento não homogêneo do filme sobre o substrato além da formação de TiN_xO_y e $TiN_xO_yC_z$ durante a deposição do filme.

3.3. Difração de Raios X (DRX)

Os resultados obtidos através das análises de DRX foram processados e analisados, nas amostras ensaiadas, com o uso dos softwares *HightScore* (Pannalitical) e *Topas* (Bruker) de forma a obter resultados qualitativos e quantitativos, respectivamente. As análises foram realizadas nos computadores do NanoFab/UERJ.

Para a análise fichas cristalográficas dos bancos de dados *Inorganic Cristal Structure Database* (ICSD) e *International Center for Diffraction Data* (ICDD) foram utilizadas. Todas as fichas consultadas apresentavam qualidade *Star*, *Indexed* ou *Calculated*, de forma a garantir

qualidade dos dados de referência para a análise. As fichas 03-065-5759 e 03-065-4899 foram respectivamente utilizadas para a comparação e análise do TiN e aço AISI1045.

A Figura 31 apresenta o resultado da DRX para as amostras após cada uma das etapas de fabricação: preparo superficial (jateamento abrasivo), nitretação a plasma e deposição de filme de TiN por *magnetron sputtering*.

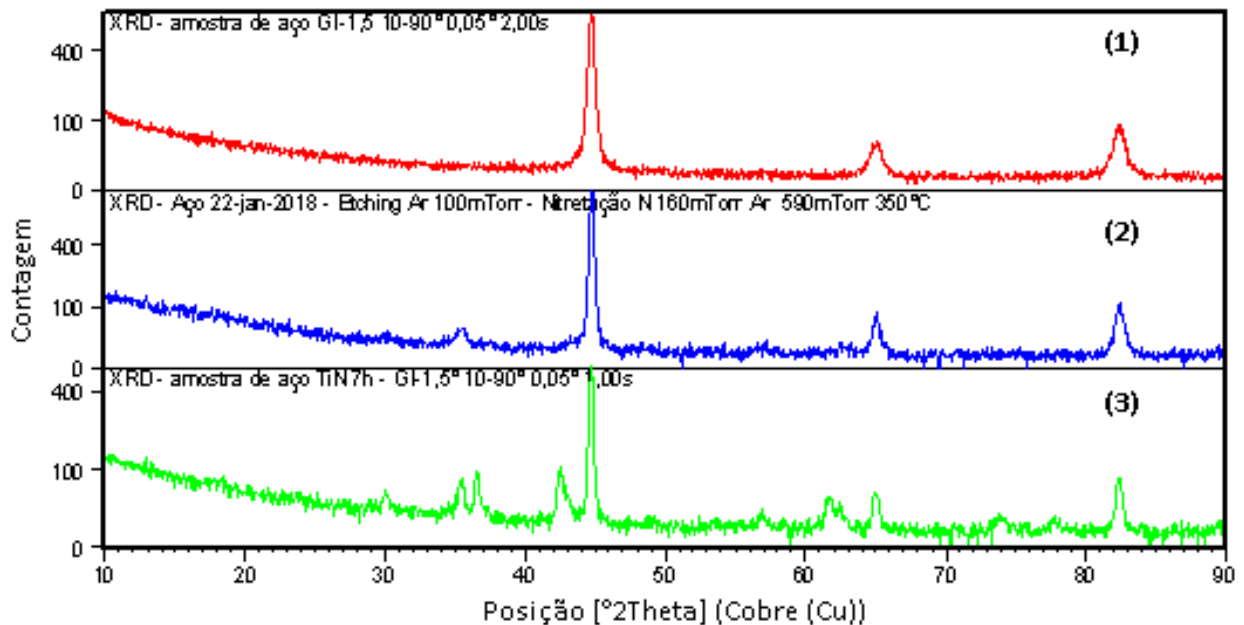


Figura 31 – DRX das amostras após as etapas de produção. Em vermelho (1) aço AISI 1045 jateado, em azul (2) após a nitretação a plasma e em verde (3) deposição do filme de TiN.

O resultado da análise apresentou resultado compatível com o esperado para os processos aplicados, exceto para o filme de TiN.

Após a realização do processo de nitretação a plasma não foram observados nitretos característicos da formação de camada branca, fase ϵ ($\text{Fe}_2\text{-}_3\text{N}$). Assim o aumento da dureza superficial comprova que houve a difusão de N na microestrutura do material, de forma que o processo de nitretação a plasma atendeu o objetivo.

A determinação das fases da amostra, após a deposição do filme de TiN, pelo Método de *Rietveld*, utilizando o programa *TOPAS Academic, versão 4.1*, mostrou a presença de fases diversas da esperada, o TiN. Uma possível justificativa é a contaminação por O_2 e C que resultaram na formação de compostos TiN_xO_y e $\text{TiN}_x\text{O}_y\text{C}_z$, fases ajustadas. Uma provável causa da contaminação, por O_2 e C, é a possível presença de O na linha de alimentação de Ar para a câmara e/ou impurezas superficiais resultantes do processo de jateamento e não

eliminado pelas etapas de limpeza, conforme apresentado em 3.3.1. A Figura 32 apresenta o resultado da análise e o percentual em peso, para os constituintes.

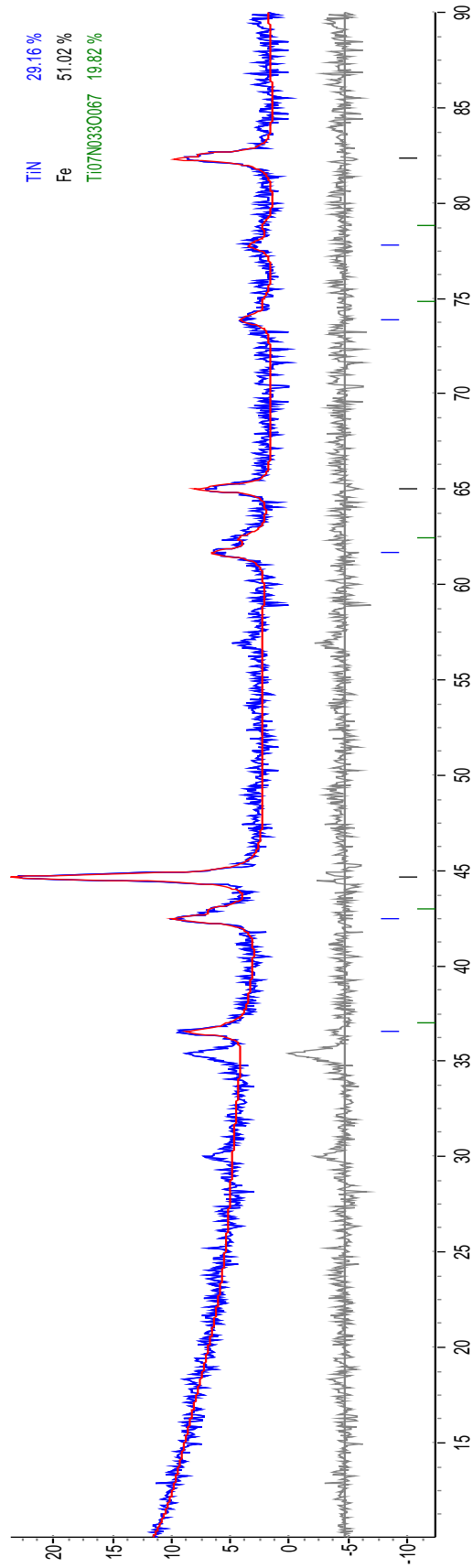


Figura 32 – Ajuste para a determinação das fases pelo Método de *Rietveld* da amostra com a deposição do revestimento.

3.4. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A microscopia eletrônica de varredura foi aplicada na superfície das amostras após cada etapa de produção, visando verificar características morfológicas superficiais dos processos aplicados sobre o substrato, aço AISI1045.

Visando uma análise comparativa da morfologia as imagens foram divididas em grupos de magnificação. A Figura 33 apresenta magnificação de 1.000X para as amostras de aço AISI1045 jateado, nitretado e com o filme de TiN depositado, a Figura 34 apresenta para a magnificação de 5.000X amostras de aço AISI1045 jateado e nitretado e a Figura 35 amostras do filme de TiN com magnificações de 60.000X e 100.000X.

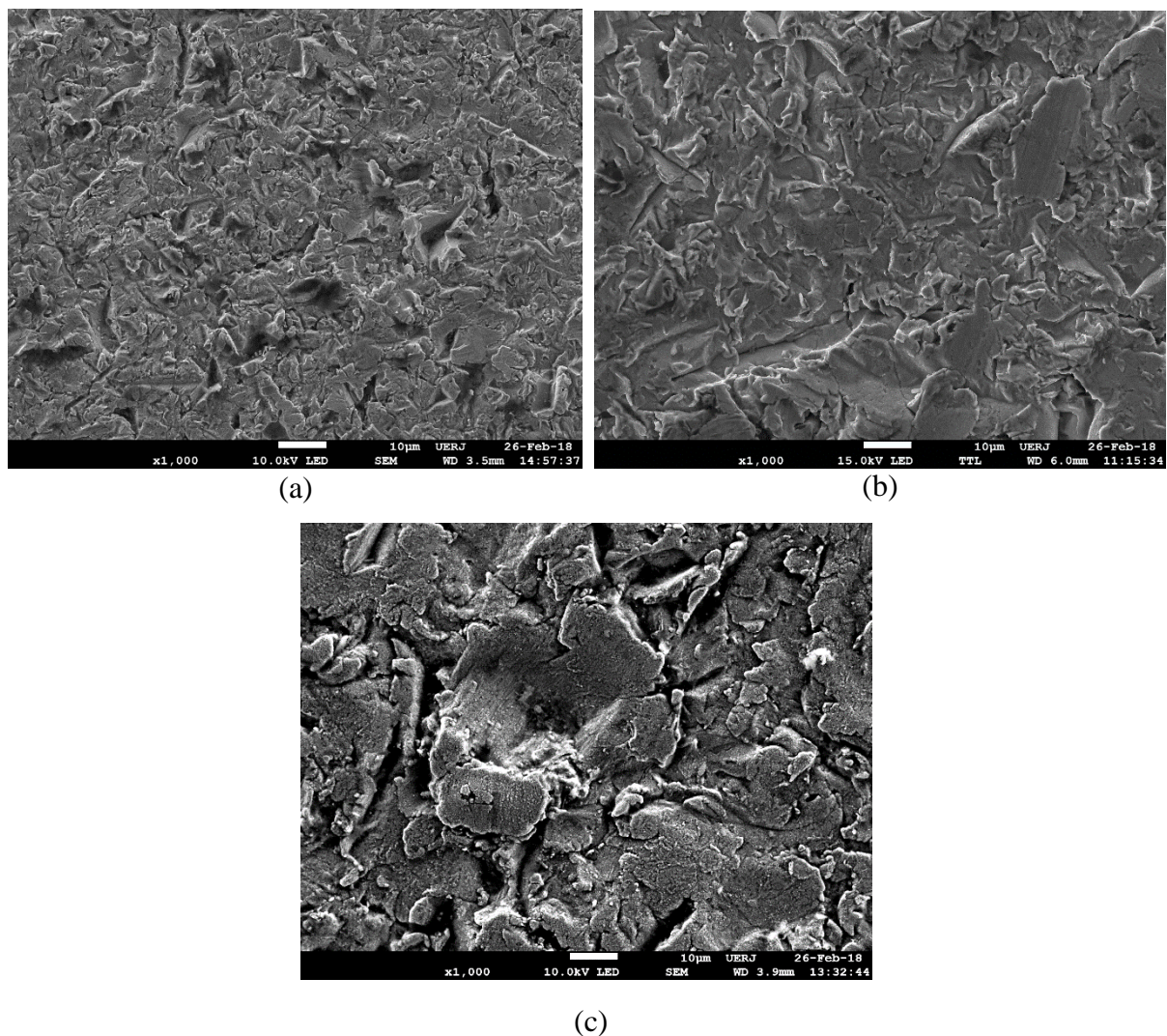


Figura 33 – Microscopia eletrônica de varredura das amostras com magnificação de 1.000X, (a) aço AISI1045 jateado, (b) nitretado e (c) com o revestimento de TiN, filme acompanhou a morfologia superficial depositando em “camadas”.

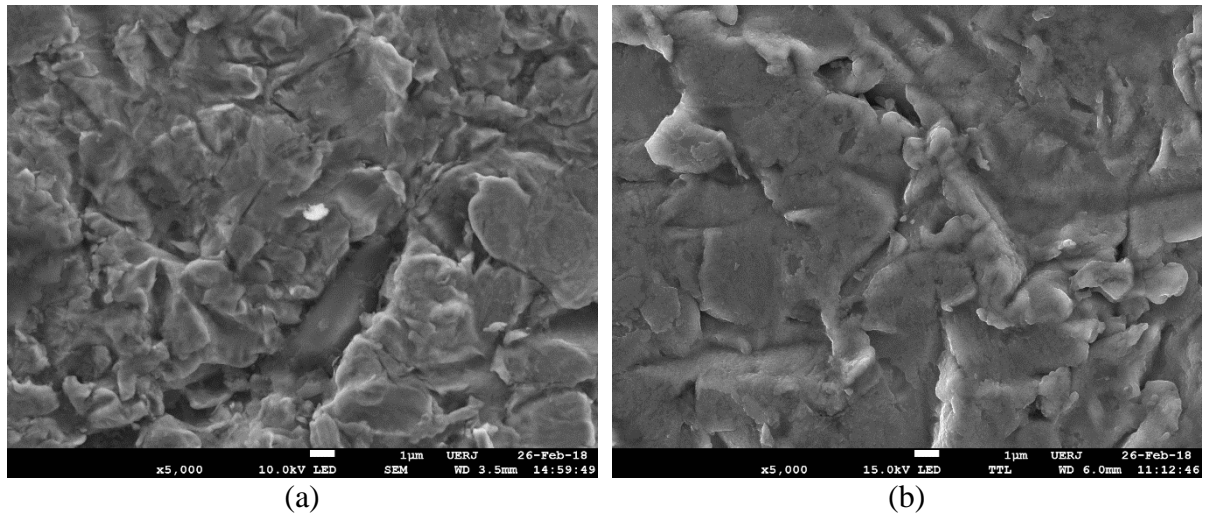


Figura 34 - Microscopia eletrônica de varredura das amostras com magnificação de 5.000X, (a) aço AISI1045 jateado e (b) nitretado.

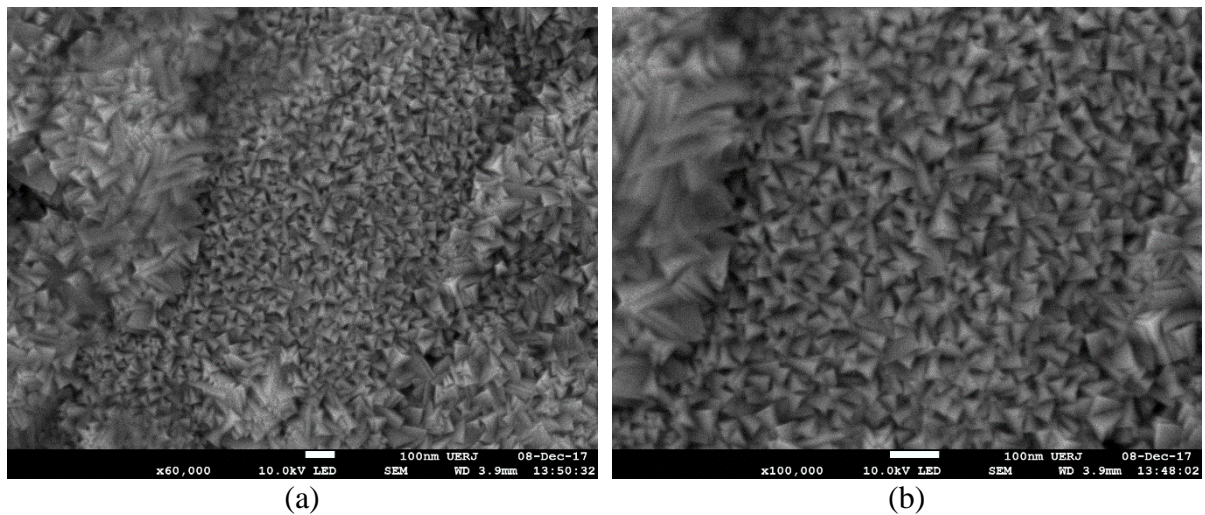


Figura 35 - Microscopia eletrônica de varredura das amostras com filme de TiN magnificação de 60.000X (a) e 100.000X (b).

A morfologia topográfica das amostras após a aplicação da deposição do filme de TiN apresenta o crescimento da estrutura do filme de TiN sobre a superfície do metal de base de forma irregular. O crescimento de forma não contínua, com a existência de irregularidades é um dos motivos para a variação no valor da dureza. A existência de “picos” e “vales” pode ser resultado da rugosidade superficial, do material de base, junto com a pouca espessura do filme aplicado, estimada em 576nm, não sendo suficiente para o revestimento total das irregularidades superficiais.

3.5. Espectroscopia de fotoelétrons por Raio X (XPS)

A análise de XPS teve como objetivo complementar o processo de caracterização do filme de TiN, ratificando os resultados obtidos por DRX. Sendo técnicas complementares os resultados obtidos estão em acordo com as referências bibliográficas [33, 34, 35, 36, 37, 38]. A Tabela 13 apresenta valores típicos de energia de ligação (*binding energie*) e de largura à meia altura (*FWHM*) para ligações entre Ti, N, O e C [35, 36].

Tabela 13 – Energias de ligação e *FWHM* pra ligações típicas para filmes de TiN depositados por técnicas industriais de *PVD* [35, 36, 38].

| Elemento | Ligação | Energia de ligação [eV] | FWHM [eV] |
|----------------------|----------------------------------|-------------------------|-----------|
| Ti 2p _{3/2} | Ti-N | 455,1 ± 0,2 | 1,9 ± 0,1 |
| | Ti-N _x O _y | 456,75 ± 0,2 | 2,0 ± 0,1 |
| | Ti-O ₂ | 458,4 ± 0,2 | 1,6 ± 0,1 |
| Ti 2p _{1/2} | Ti-N | 460,9 ± 0,2 | 2,1 ± 0,1 |
| | Ti-N _x O _y | 462,5 ± 0,2 | 2,2 ± 0,1 |
| | Ti-O ₂ | 464,2 ± 0,2 | 2,4 ± 0,1 |
| N 1s | N-TiO | 395,9 | 1,3 ± 0,1 |
| | N-Ti | 397,0 | 1,4 ± 0,1 |
| | N-C | 399,3 | 2,1 ± 0,1 |
| | N _{2ads} | 401,2 | 2,1 ± 0,1 |
| O 1s | TiNO | 531,0 | 2,1 ± 0,1 |
| | Ti oxidos | 532,5 | 2,1 ± 0,1 |
| | O-C | 533,4 | 2,3 ± 0,1 |
| C 1s | C-C | 284,4 | 1,3 |
| | C-C | 285,0 | 1,4 |
| | C-O | 287,5 ± 1,5 | - |
| | C=O | 287,5 ± 1,5 | - |
| | O-C=O | 287,5 ± 1,5 | - |
| | Ti-C | 281,86 ± 0,1 | - |
| | Ti-C _{sub} | 282,8 ± 0,1 | - |

Com base nos valores da Tabela 13 foi realizada análise dos espectros XPS obtidos da amostra que recebeu o filme de TiN. As figuras 34, 35, 36 e 37 apresentam os espectros XPS, plotados em gráficos de contagens por segundo (CPS) por energia de ligação (*binding energy*), obtidos para C1s, N1s, O1s e Ti2p, respectivamente.

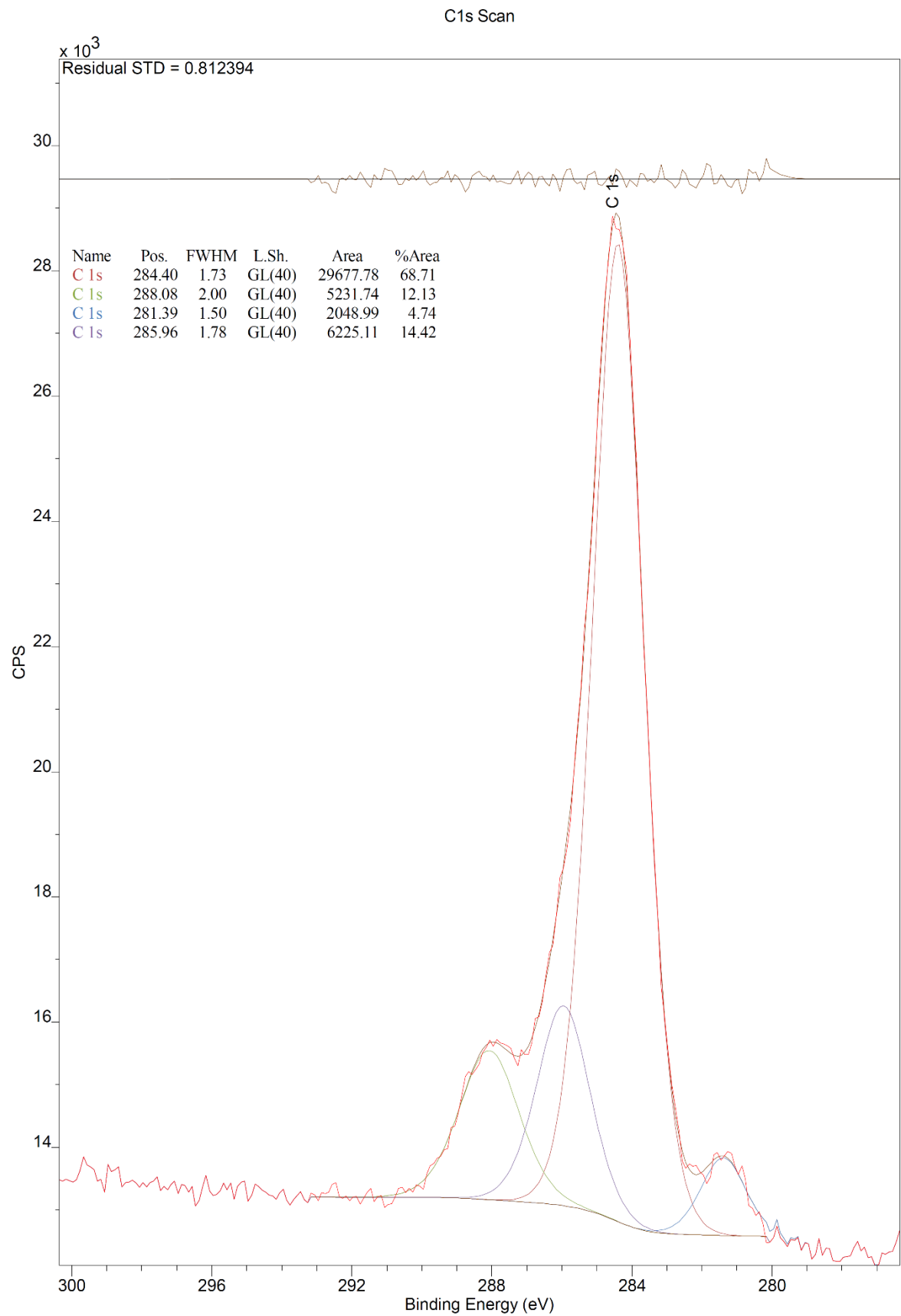


Figura 36 – Espectros XPS, C1s, para a amostra revestida com TiN.

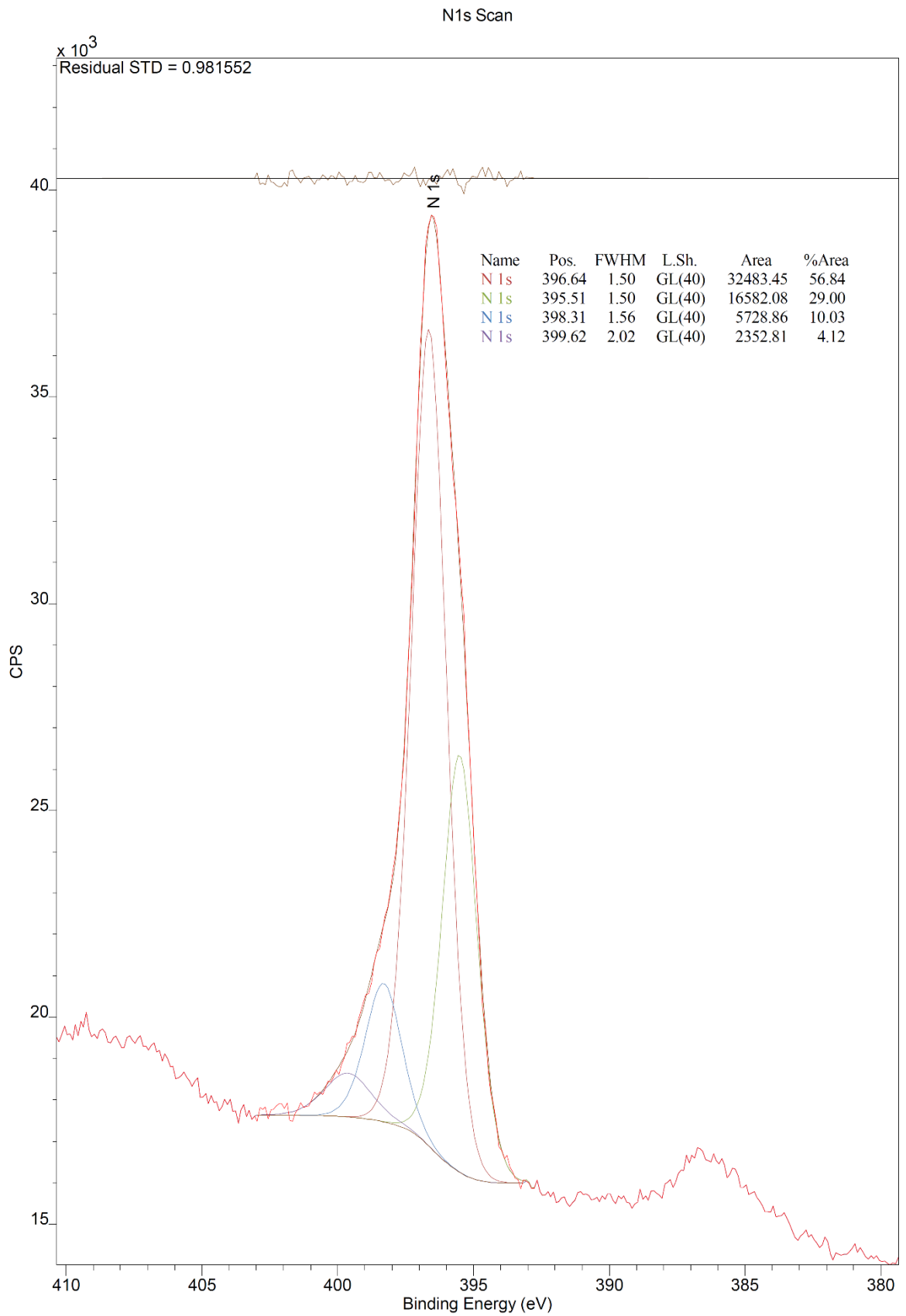


Figura 37 - Espectros XPS, N1s, para a amostra revestida com TiN.

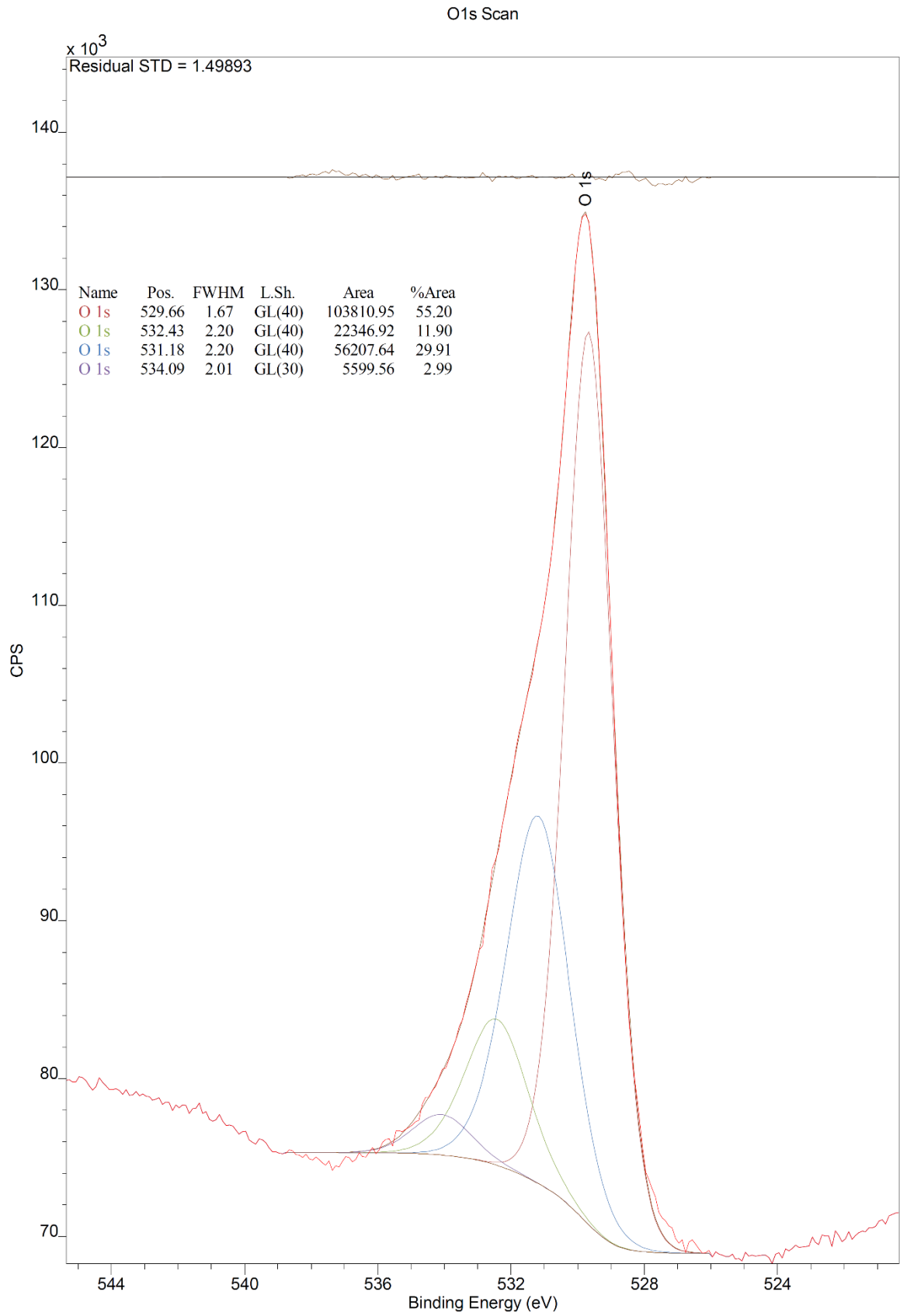


Figura 38 – Espectro XPS, O1s, para a amostra revestida com TiN.

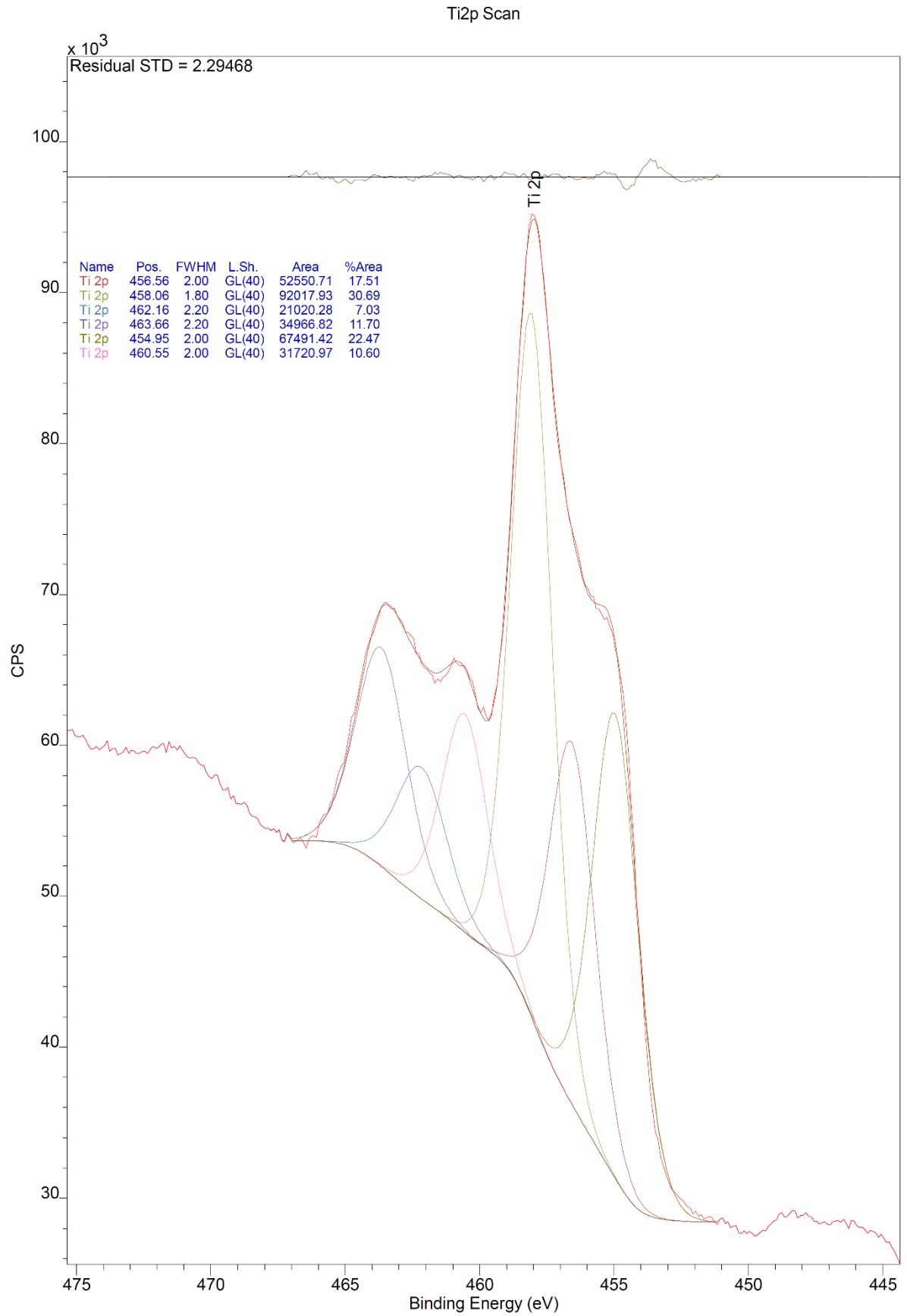


Figura 39 – Espectro XPS, Ti2p, para a amostra revestida com TiN.

A análise do percentual de áreas para cada dissociação da energia de ligação, apresentada nos espectros XPS, indica as prováveis ligações existentes nas superfícies da amostra. Desta forma, comparando com os valores apresentados na Tabela 13, foi possível avaliar a composição superficial da amostra. A Tabela 14 apresenta o resultado, em função do percentual de área e o tipo de ligação relacionado.

Tabela 14 – Resultado comparativo entre as áreas dos espectros XPS com os valores típicos de energia de ligação.

| Espectro | Área [%] | Energia de ligação [eV] | FWHM | Tipo de ligação |
|-------------|----------|-------------------------|------|-----------------------------------|
| C1s | 68,71 | 284,40 | 1,73 | C-C |
| | 14,42 | 285,96 | 1,78 | C-O / C=O |
| | 12,13 | 288,08 | 1,73 | C-O |
| N1s | 56,84 | 396,64 | 1,50 | N-TiO |
| | 29,00 | 395,51 | 1,50 | N-TiO |
| | 10,03 | 398,31 | 1,56 | N-Ti |
| O1s | 55,20 | 529,66 | 1,67 | Ti oxidos |
| | 29,91 | 531,18 | 2,20 | Ti-N-O |
| | 11,90 | 532,43 | 2,20 | Ti-oxidos |
| Ti2p | 30,69 | 458,06 | 1,80 | Ti-O ₂ |
| | 22,47 | 454,95 | 2,00 | Ti-N |
| | 17,51 | 456,56 | 2,00 | Ti-N _x -O _y |

3.6. Processo FSP

O processo FSP teve como objetivo avaliar o comportamento/desempenho da ferramenta através de medidas de esforços e de variações dimensionais, a Figura 40 apresenta corpos de prova após a realização do processo FSP.

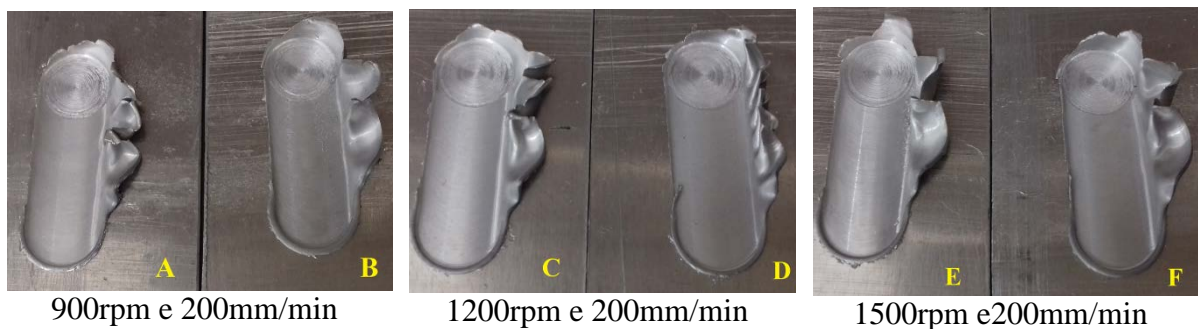


Figura 40 – Amostras após a realização do processo FSP. Amostras A, D e F sem recobrimento de TiN.

O uso de ferramentas com e sem o revestimento de TiN e com as mesmas características dimensionais, possibilitou a comparação entre o desempenho dinâmico do filme de TiN.

Para isso valores das grandezas torque, força axial, transversal e de avanço foram obtidos, plotados em gráficos versus tempo e comparados. As curvas foram obtidas através da plotagem de uma linha de tendência para os valores obtidos pelos dispositivos de medição. A frequência de captação de dados foi de 2000Hz e a linha de tendência foi obtida através da média móvel com frequência de 200 repetições, obtidas pela expressão 1:

$$F_t = \frac{A_{t-1} + A_{t-2} + \dots + A_{t-n+1}}{n} \quad (1)$$

A Figura 41 e a Figura 42 apresentam curvas típicas para as primeiras amostras com e sem revestimento, respectivamente, com velocidade de avanço de 200 mm/min e rotação de 1200 rpm, as demais curvas estão no anexo 7.2.

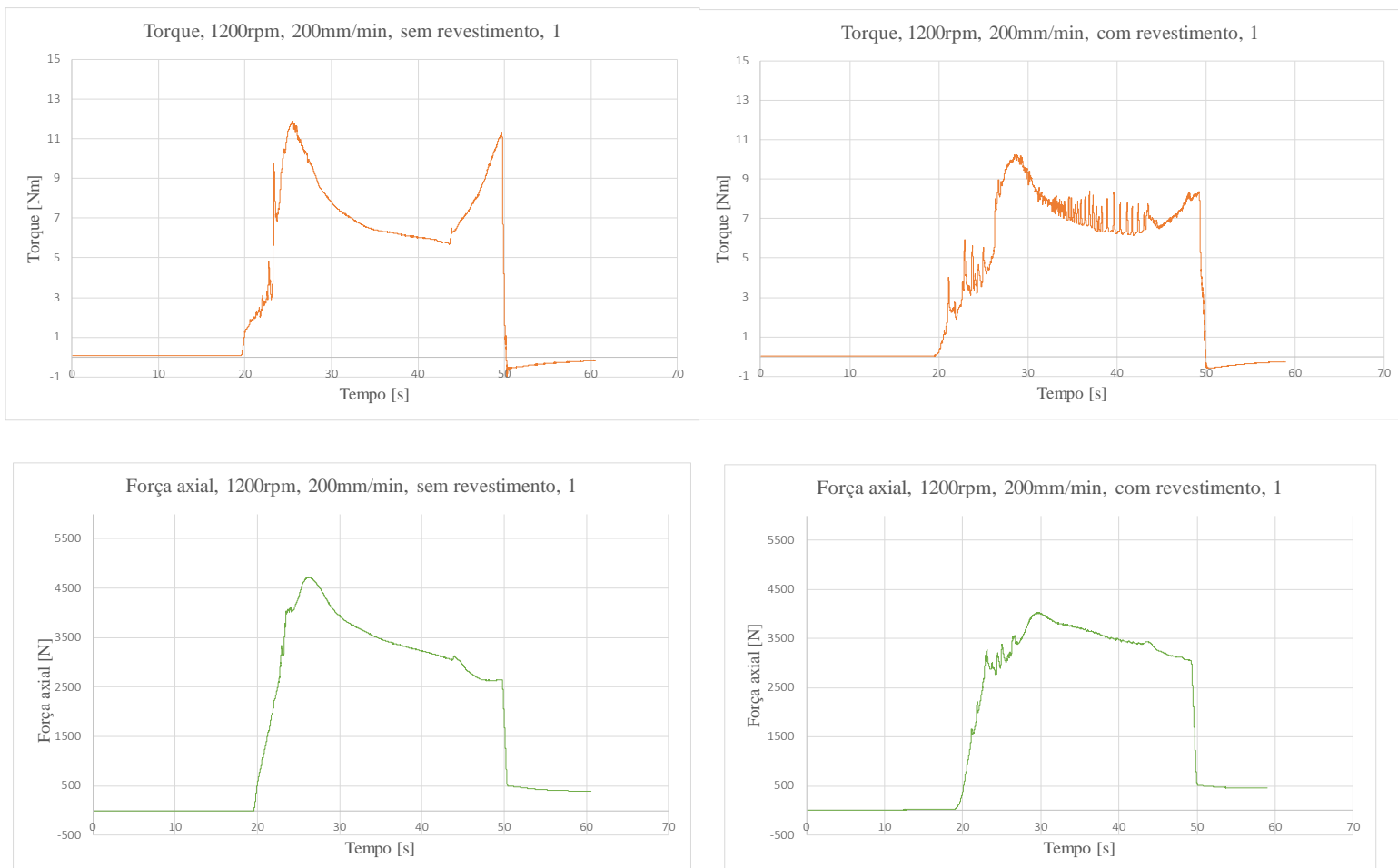


Figura 41 – Gráficos de torque e força axial das amostras número 1 com 1200rpm, 200mm/min, com e sem revestimento.

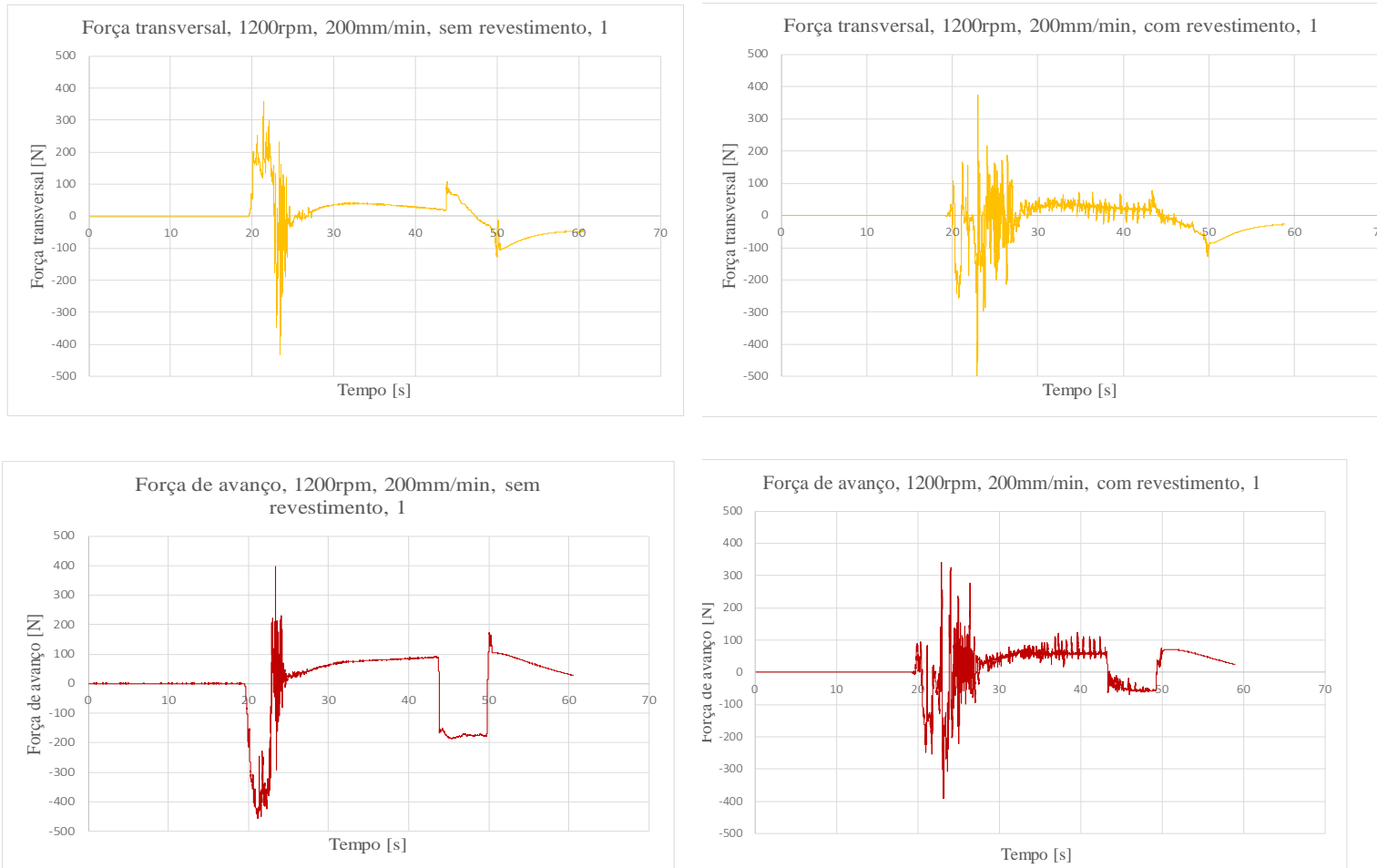


Figura 42 - Gráficos força transversal e de avanço das amostras número 1 com 1200rpm, 200mm/min, com e sem revestimento.

Como proposto e apresentado na Figura 24, foram realizados 36 experimentos e utilizados 2 pares de ferramentas, um revestido com TiN e outro sem. Cada ferramenta foi responsável pela realização de 9 experimentos. Em cada mudança na velocidade de avanço, 100 e 200 mm/min, uma nova ferramenta era utilizada e realizava o processo FSP para as rotações propostas, 1200, 900 e 1500 rpm, respectivamente. A sequência de rotações utilizada visou otimizar o tempo de realização dos experimentos, evitando aquecimento excessivo do conjunto dispositivos de fixação/dinamômetro.

Para a análise dos resultados gráficos foi utilizado o método da área sob a curva, da respectiva grandeza, através de integração, de forma a considerar não só os pontos de máximo da respectiva grandeza como também a tendência apresentada durante o processo. Desta forma foi possível obter a relação de desempenho, razão entre os resultados com recobrimento e sem recobrimento. Os valores foram obtidos através do cálculo da média entre os resultados das

amostras para cada condição, no processo FSP. A Tabela 15 apresenta os valores da relação de desempenho, para os experimentos realizados pelo processo FSP.

Tabela 15 – Relação de desempenho entre ferramentas com e sem o filme de TiN, processo FSP.

| Velocidade de penetração [mm/min] | Velocidade de avanço [mm/min] | Relação de desempenho, razão Com TiN/Sem TiN | | | | |
|-----------------------------------|-------------------------------|--|--------|-------------|-------------------|-----------------|
| | | Rotação [rpm] | Torque | Força axial | Força transversal | Força de avanço |
| 4 | 100 | 900 | 0,95 | 1,01 | 1,18 | 0,88 |
| | | 1200 | 0,85 | 0,92 | 0,94 | 0,95 |
| | | 1500 | 0,95 | 0,79 | 0,81 | 1,06 |
| | 200 | 900 | 0,91 | 0,95 | 0,81 | 0,98 |
| | | 1200 | 0,96 | 0,98 | 0,90 | 1,09 |
| | | 1500 | 0,87 | 0,93 | 0,88 | 0,78 |

Os resultados apresentados na Tabela 15 foram processados estatisticamente com o uso do Software *Excel* de forma que os valores de média, erro padrão da média, mediana e desvio padrão fossem obtidos. O uso da estatística na análise das grandezas permite uma avaliação do comportamento da relação do desempenho no processo FSP. Os resultados desta análise são apresentados na Tabela 16.

Tabela 16 – Análise estatística da relação de desempenho para as grandezas estudadas.

| Análise / Grandeza | Torque | Força axial | Força transversal | Força de avanço |
|----------------------|--------|-------------|-------------------|-----------------|
| Média | 0,9134 | 0,9298 | 0,9201 | 0,9566 |
| Erro padrão | 0,0181 | 0,0310 | 0,0554 | 0,0461 |
| Mediana | 0,9277 | 0,9423 | 0,8898 | 0,9631 |
| Desvio padrão | 0,0444 | 0,0760 | 0,1356 | 0,1129 |

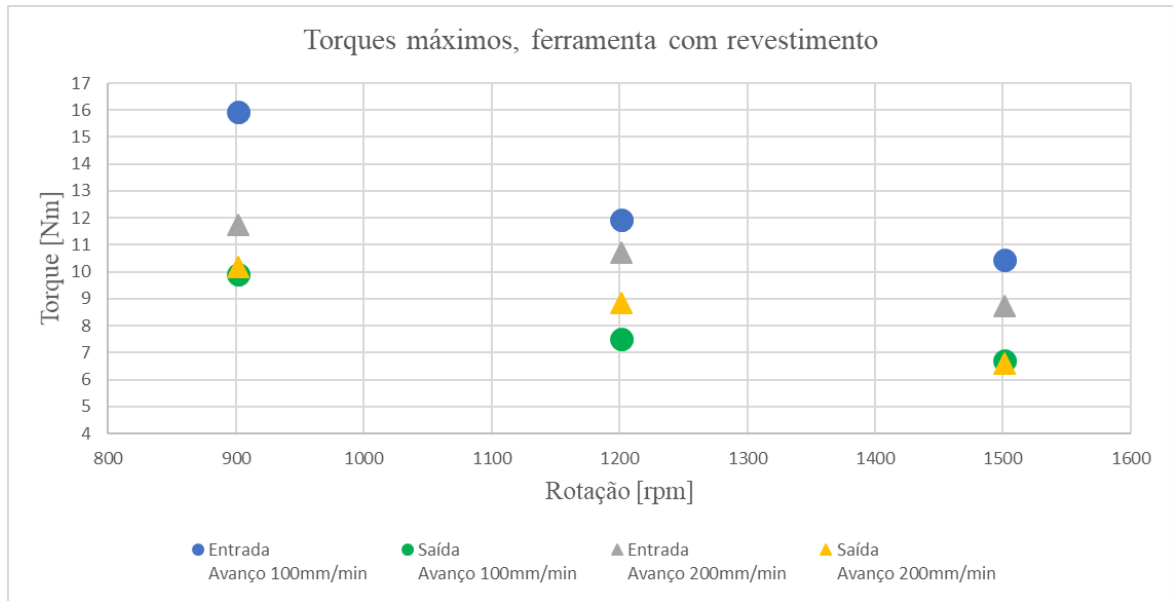
A análise dos valores de relação de desempenho, Tabela 15, evidencia que as variações de rotação e velocidade de avanço não são significativas entre a ferramenta com recobrimento de TiN e a sem recobrimento. Desta forma os valores apresentados na Tabela 16 foram obtidos considerando as grandezas como espaço amostral, para todas as velocidades de avanço e rotação. Os valores apresentados na Tabela 15 e Tabela 16 indicam que a presença do filme de TiN, na superfície da ferramenta resultou em redução nos esforços durante o processo FSP de aproximadamente: 8% para o torque, 6% força axial, 11% força transversal e 5% força de

avanço. Esta redução pode ser consequência do menor coeficiente de atrito/fricção do TiN ($\mu=0,5$) em relação ao aço ($\mu=0,7$).

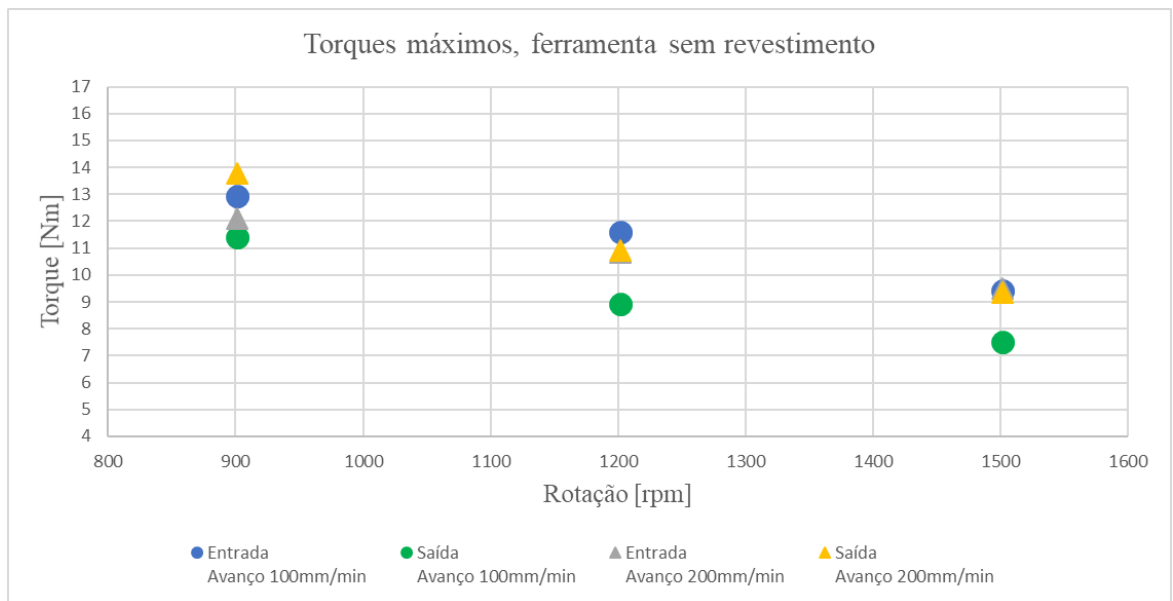
Também, foram analisados os valores máximos para as grandezas nas seguintes situações:

- 1) entrada da ferramenta, início do processo; e
- 2) saída da ferramenta, término do processo.

Os máximos foram obtidos através da média entre as três repetições para cada condição do processo FSP. Os resultados estão plotados nas Figura 43, Figura 44, Figura 45 e Figura 46. A análise das informações apresentadas nestas figuras é possível avaliar o comportamento das grandezas durante a realização dos ensaios além de verificar e identificar eventuais perdas/desgaste do filme de TiN durante o processo FSP.

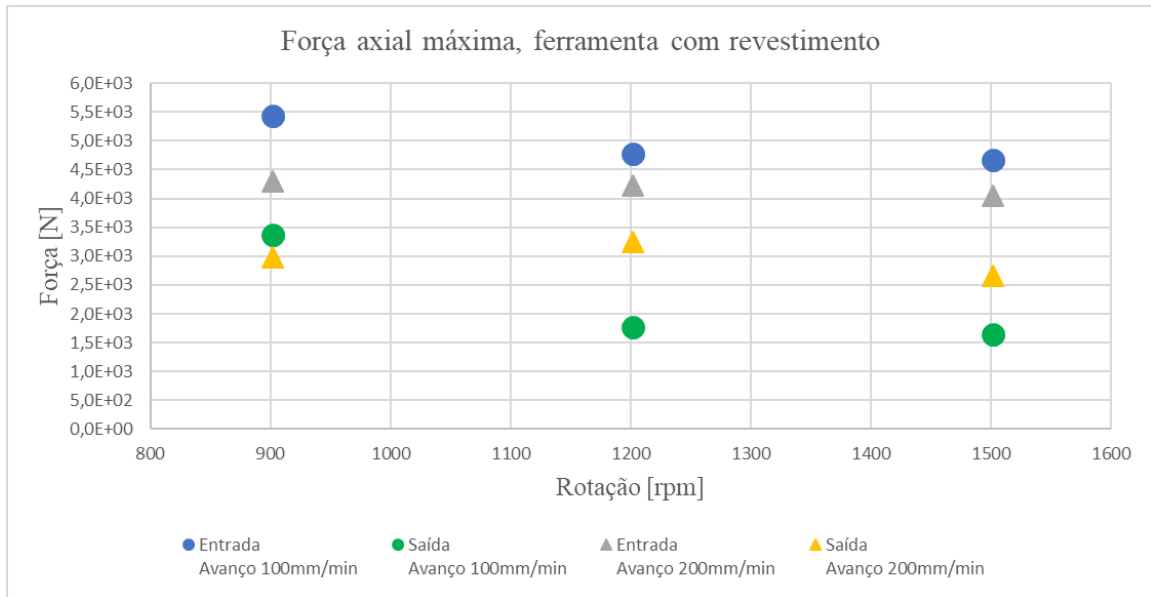


(a)

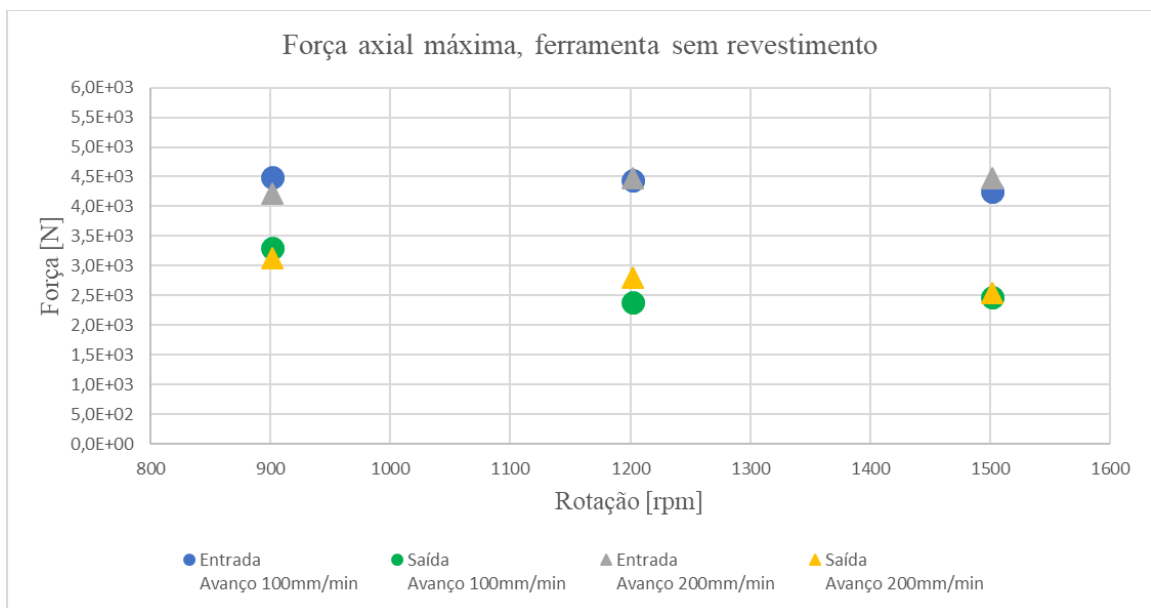


(b)

Figura 43 – Torque máximo em função da rotação e da velocidade de avanço para (a) ferramenta com revestimento e (b) ferramenta sem revestimento.

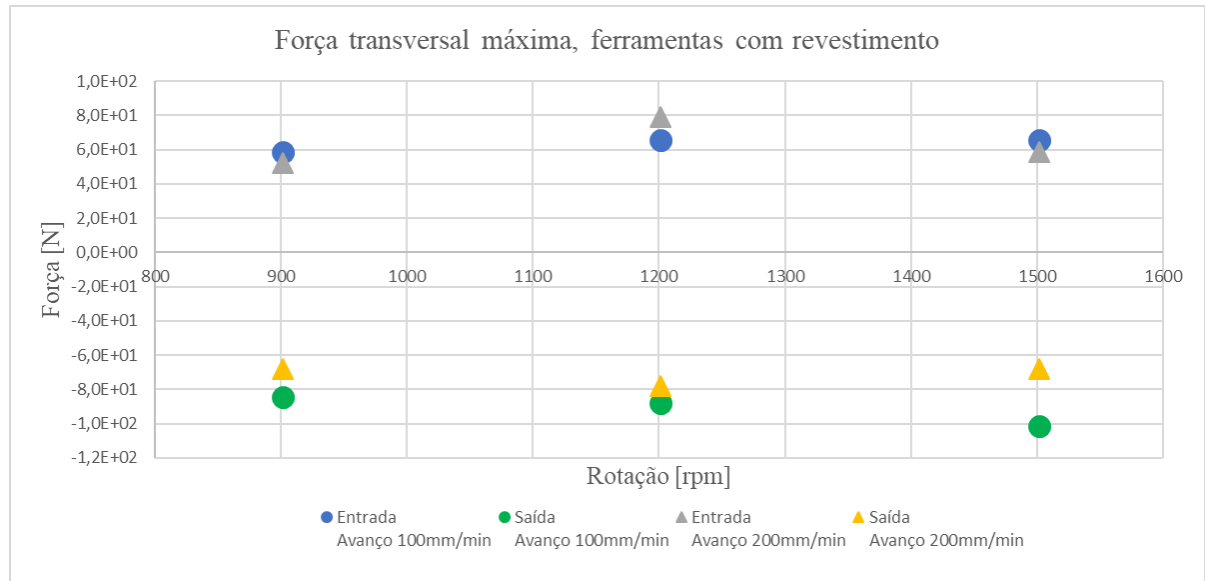


(a)

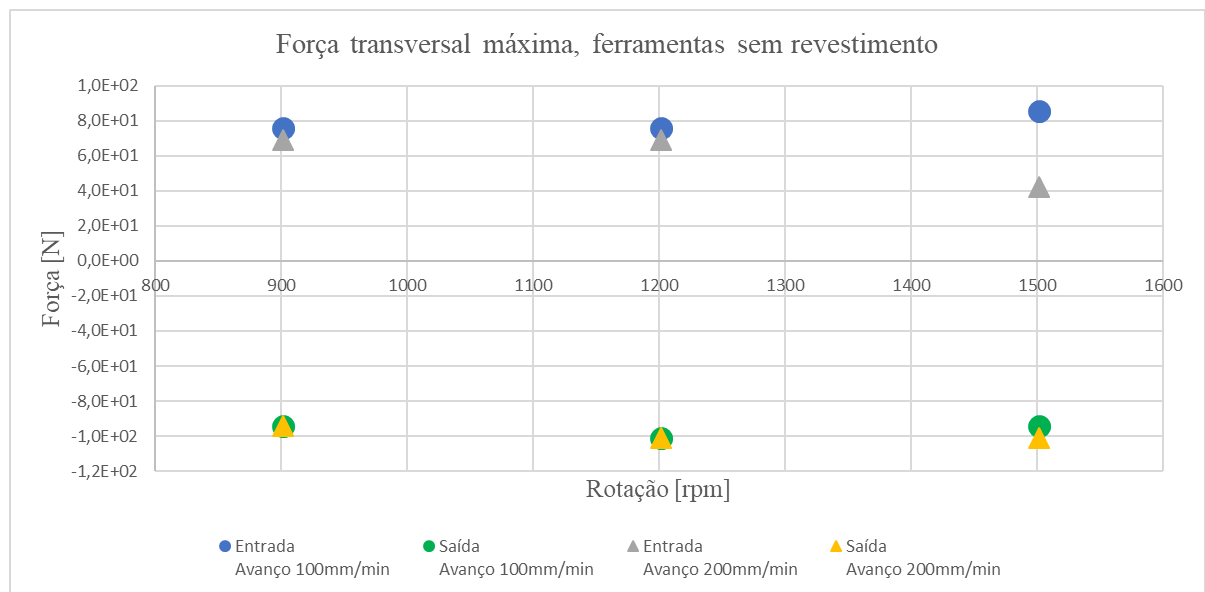


(b)

Figura 44 – Força axial máxima em função da rotação e da velocidade de avanço para (a) ferramenta com revestimento e (b) ferramenta sem revestimento.

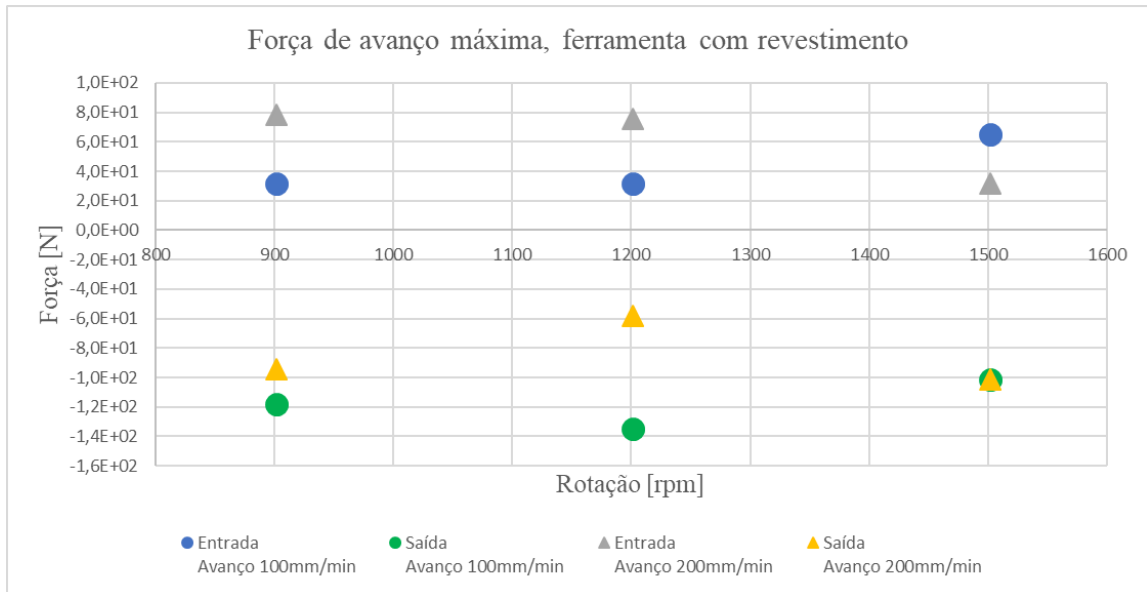


(a)

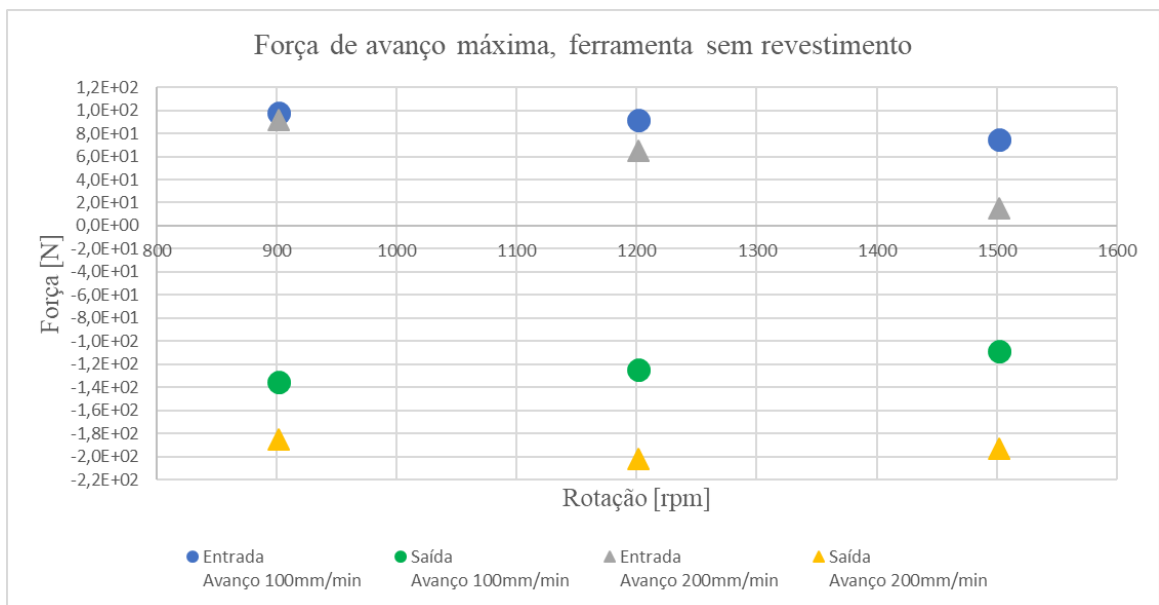


(b)

Figura 45 – Força transversal máxima em função da rotação e da velocidade de avanço para (a) ferramenta com revestimento e (b) ferramenta sem revestimento.



(a)



(b)

Figura 46 – Força de avanço máxima em função da rotação e da velocidade de avanço para (a) ferramenta com revestimento e (b) ferramenta sem revestimento.

Pela análise dos valores máximos das grandezas identificamos que o comportamento dos esforços pelo processo FSP é coerente com as referências bibliográficas [9], em que há redução de esforços com o aumento da rotação e da velocidade de avanço.

Para o torque e para a força axial observa-se que a variação entre os valores máximos de entrada (início do processo) e saída (final do processo) apresenta maior diferença para a ferramenta com o revestimento de TiN, o que indica que durante o processo FSP, com a ferramenta revestida, com TiN, os esforços são menores, confirmando os resultados da Tabela 15.

A força transversal e de avanço apresentam semelhança entre o comportamento das ferramentas com e sem o revestimento de TiN, durante o processo FSP. Entretanto para a ferramenta com o recobrimento de TiN, ambas as grandezas apresentam menores valores de máximos, durante a realização do processo FSP.

A análise dimensional nas ferramentas foi realizada e as medições realizadas antes e depois do processo FSP não indicaram variação, estando compatíveis com o desenho de construção das ferramentas, anexo 7.1.

4. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Neste tópico é apresentada a conclusão das etapas propostas para a realização do trabalho. A análise dos resultados apresentados, no capítulo 4, permitiram avaliar o processo proposto e o resultado esperado.

4.1. Conclusão

A proposta do trabalho, recobrimento com filme de TiN em uma ferramenta de aço AISI1045 para o processo de soldagem por FSW, foi realizada. Os resultados obtidos através dos processos de caracterização e de dinâmica de soldagem, pelo processo FSP, apresentaram resultados superiores quando comparado com a ferramenta sem revestimento.

O uso de uma câmara única para a realização das etapas de nitretação e de deposição do filme de TiN apresenta um menor custo na operação do equipamento além de evitar eventuais contaminações superficiais. O resultado das etapas de caracterização indica que o procedimento de nitretação atingiu o objetivo, em aumentar a dureza superficial sem a formação da chamada “camada branca”, favorecendo a adesão do filme de TiN. Entretanto o processo de deposição de TiN, em fonte RF com atmosfera inerte, apresentou baixa taxa de deposição, exigindo elevado tempo de operação. Além de ajustes nos parâmetros de deposição, eventual contaminação durante a deposição do filme de TiN, contribuiu para a formação de óxidos e carbeto de Ti. A formação destes compostos aliados a baixa espessura do filme e elevado valor de rugosidade superficial são fatores que, aliados, contribuíram para o valor baixo de dureza do filme de TiN depositado sobre as ferramentas.

A difusão de Ti e N na interface TiN / aço é um fator que contribui para o aumento da adesão química do filme depositado. A realização de novos experimentos com espessura de filme em torno de valores comerciais e posterior avaliação de desempenho auxiliará na avaliação da influência da adesão química do filme sobre o substrato.

Procedimentos para a eliminação de eventuais fontes de contaminação do recobrimento, durante a deposição do filme de TiN, devem ser implementados. Desta forma criteriosa verificação nas redes de alimentação de AR e N₂, para a câmara, devem ser efetuadas bem como procedimentos de limpeza e descontaminação, limpeza física e realização prévia de um filme de Ti, em atmosfera inerte, são propostas de linhas de ação a serem estudadas/aplicadas. A redução da rugosidade superficial junto com melhorias no processo de limpeza superficial das

amostras, pré nitretação/deposição, são ações que podem reduzir a presença de contaminantes oriundos do processo de jateamento/fabricação dos corpos de provas/ferramentas.

O processo FSP verificou o comportamento dinâmico, comparando resultados entre ferramentas com e sem o revestimento de TiN. A presença do filme de TiN contribuiu para redução dos esforços, principalmente durante o processo FSP, mantendo o comportamento dinâmico da ferramenta. Variações nos esforços após sequência de experimentos além da ausência de variações dimensionais indicam que o filme de TiN manteve sua integridade durante a execução do processo FSP, nas amostras.

A relação de desempenho apresenta melhorias da aplicação do filme de TiN na superfície das ferramentas, entretanto avaliação no tempo de vida das ferramentas não foi realizada, conforme referência [2, 12] desgastes em ferramentas de aço para a soldagem por FSW em ligas de Al são observadas somente após 200m de soldagem, neste trabalho foram simulados a soldagem de 0,27m.

4.2. Trabalhos Futuros

O desenvolvimento das manufaturas “verdes” e/ou “limpas” é uma necessidade. O processo FSW apresenta, além de características que o classificam como tecnologia “verde” e “limpa”, vantagens na qualidade da junta soldada, possibilitando redução de retrabalho na união de materiais com baixa soldabilidade, melhores condições para a realização de materiais dissimilares e utilização de equipamentos de manufatura já existentes.

Desta forma, com base nos resultados obtidos neste trabalho é importante a verificação dos seguintes aspectos:

1. Influência da rugosidade na aderência do filme de TiN e no desempenho da ferramenta para FSW/FSP;
2. Obtenção de filme de TiN com redução nos contaminantes e com alta taxa de deposição;
3. Verificação do processo difusivo do Ti e N na interface e sua contribuição para o aumento da adesão química entre o substrato e o filme;
4. Avaliação do tempo de vida da ferramenta do processo FSW, visando economia entre trocas e *set up* de equipamentos; e

5. Redução dos custos operacionais para a produção de ferramentas, uso de câmaras multi-função e de métodos de caracterização simples e efetivos.

REFERÊNCIAS

1. Mishra, R., S., Ma, Z., Y.; “*Friction Stir Welding and Processing*”, *Material Science and Engineering*, Vol. 50, 2005, 1-78.
2. Genicolo, M. A. C.; “Estudo de Viabilidade para Implementação de Uniões Soldadas pelo método *friction stir welding* em estruturas aeronáuticas”, Dissertação de Mestrado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2007.
3. G.K. Padhy, C.S. Wu, S. Gao; “*Friction stir based welding and processing technologies - processes, parameters, microstructures and applications: A review*”, *Journal of Materials Science & Technology*, Vol. 34, 2018, 1-38.
4. Honda Motor Co.; “*Honda Develops New Technology to Weld Together Steel and Aluminum and Achieves World’s First Application to the Frame of a Mass-production Vehicle - Hybrid-Structured Front Subframe Achieves Both Weight Reduction and Increased Rigidity*”, *Honda Worldwide*, SEP2012, <http://world.honda.com/news/2012/4120906beng.html>.
5. Oliviecki, N., J., Beskow, A., B.; “Análise dos Parâmetros do Processo de Solda por Fricção em uma Liga de Alumínio”, *Perspectiva Erechim*, Vol. 37, No. 138, 2013, 15-29.
6. Rai, R., De, A., Bhadeshia, H. K. D. H. and DebRoy, T.; “*Review: friction stir welding tools*”, *Science and Technology of Welding and Joining*, Vol. 16, No. 4, 2011, 325-342.
7. Cruz, M., F., Moura Neto, C.; “*Friction Stir Welding – Review: Potencial de Aplicação na Industria Aeroespacial*” Anais do XI Simpósio de Aplicações Operacionais em Áreas de Defesa, 2009, 6-10.
8. Diniz, C. E.; “Estudo de Revestimento de TiN em Substratos de Aço 15-5 PH com Interfaces Diluídas para Aplicações Aeroespaciais”, Dissertação de Mestrado – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2015.
9. Quintana Cuellar, K. J.; “MODELOS PARA FORÇAS E TORQUE NA SOLDAGEM POR ATRITO-MISTURA”, Tese de Doutorado – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2016.
10. Marques, P. V., Modenesi, P., J., Bracarense, A., Q.; “Soldagem Fundamentos e Tecnologia”, 3ª edição, Editora da UFMG, 2009, ISBN: 978-85-7041-748-0.
11. Cronologia dos processos de soldagem. Adaptado de www.welding.com, consulta realizada em 30 de agosto de 2016 as 20:30 em <http://welding.com/history/>.

12. De Souza, G., S.; “Influência da Geometria da Ferramenta na Soldagem da Liga de Alumínio 5052 pelo Processo *Friction Stir Welding*”, Dissertação de Mestrado – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2010.
13. Quintana Cuellar, K. J., Silveira, J. L., Mitrogiannopoulos, H., et al; “*A study on Intermetallic Defects in Friction Stir Welding of Aluminium Alloys*”, *Proceedings The 31st International Manufacturing Conference, Cork Institute of Technology 2014, 4th and 5th September 2014*, 69-74.
14. Osinski, G., Camargo, J., F., Lermen, R., T.; “Influência da Geometria da Ferramenta e Parâmetros na Soldagem de Chapas Sobrepostas de Alumínio pelo Processo *Friction Stir Welding*”, Anais do 7º Seminário Estadual de Engenharia Mecânica e Industrial, Horizontina/RS 16 a 18 de Outubro de 2013, 35-45.
15. Rodrigues, H. L.; “Relação Desgaste Acabamento Superficial em Ferramentas de Metal Duro com Revestimento Triplo no Torneamento de Aços”, Tese de Doutorado – Universidade Estadual Paulista, 2005.
16. Franco Júnior, A. R.; “Obtenção de Revestimento Dúplex por Nitretação a Plasma e PVD TiN em Aços Ferramenta AISI D2 e AISI H13”, Tese de Doutorado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2003.
17. Machado, N. T. B.; dos Passos, M. L. M.; Recco, A. A. C.; Riani, J. C.; “Análise das Propriedades Mecânicas do Aço 1045 Nitretado a plasma: Com e Sem Tratamento de Revenimento”, Anais do 21º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Cuiabá 09 a 13 de novembro de 2014, 5426-5433.
18. Da Mota, P. R.; “Investigação do Comportamento de Ferramentas de Aço Rápido no Processo de Rosqueamento Interno em Alta Velocidade de Corte”, Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Uberlândia, 2006.
19. Froehlich, A., R.; “Tratamento Superficial DUPLEX com TiN e CrN de Aços Ferramentas da Classe AISI H13 para Matrizes de Injeção de Ligas de Alumínio”, Tese de Doutorado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2003.
20. Santana Mendes, M. A. R., “Estudo do Desgaste de Ferramentas Com e Sem Revestimentos de Filmes Finos Utilizadas em Operações de Conformação a Frio”, Dissertação de Mestrado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2009.
21. Mellor, B. G.; “*Surface coatings for protection against wear*”, *Woodhead publishing limited*, CRC Press ISBN-10: 0-8493-2579-X, *Cambridge England*, 2006.

22. Gomes, A., M.; Freitas, F., G., R.; Santos, G.; Neto, J., B., A.; Silva, G., F; “Deposição e Caracterização de Revestimentos de (MEN/SI) Resistentes à Corrosão”, I Congresso Nacional de Energia de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, www.conepetro.com.br, 2016.
23. Fontana, L., C.; “Estudo da deposição de filmes de Ti e TiN e desenvolvimento do sistema modificado triodo-*magnetron-sputtering*”, tese de doutorado – Universidade Federal de Santa Catarina, 1997.
24. Informações sobre o processo sputtering obtidas em: <https://samaterials.wordpress.com/2015/10/28/what-is-sputtering/>.
25. Silva, A., M., P.; “Filmes Finos Cristalinos de Hidroxiapatita: uma Abordagem Original com *Magnetron Sputtering* de Alvos Opostos”, tese de doutorado – Instituto Militar de Engenharia, 2007.
26. Recco, A., C.; “Estudo da Obtenção e das Propriedades dos Filmes de TiN e TiC Depositados sobre Aços Ferramentas AISI H13 e D2 Nitretados e Não Nitretados”, tese de doutorado – Universidade de São Paulo, 2008.
27. Moura, J., A., S.; “Filmes Nanométricos de FeN e AlN Crescimento por *Sputtering* e Aplicações do Efeito *Peltier*”, tese de doutorado – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2010.
28. Mayrhofer, P., H.; Kunc, F.; Musil, J.; Mitterer, C.; “A *Comparative Study on Reactive and Non-Reactive Unbalancead Magnetron Sputter Deposition of TiN Coatings*”, *Thin Solid Films*, Vol. 415, 2002, 151-159.
29. Ficha técnica com dados físico químicos e mecânicos do aço AISI 1045 trabalhado a frio com espessura entre 19-32mm. Consulta realizada em 30 de agosto de 2016 as 20:30 em http://www.matweb.com/search/datasheet_print.aspx?matguid=cbe4fd0a7.
30. Ficha técnica com dados físico químicos e mecânicos do filme de TiN. Consulta realizada em 30 de agosto de 2016 as 20:35 em http://www.matweb.com/search/datasheet_print.aspx?matguid=ffbf753c5.
31. Ficha técnica com dados físico químicos e mecânicos do Alumínio comercialmente puro (Série AA 5XXX). Consulta realizada em 30 de agosto de 2016 as 20:35 em <http://www.infomet.com.br/site/metais-e-ligas>.
32. Clarke, T., G., R.; “Análise por Difração de Raios-X da Interface Plasma Superfície Durante a Nitretação a Plasma”, Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2004.

33. Zgrabik, C., M.; Hu, E., L.; “*Optimization os Sputtered Titanium Nitride as a Tunable Metal for Plamonic Applications*”, *Optical Materials Express*, Vol. 5, DEZ2015, No. 12, 2786.
34. Grosso, S.; Latu-Romain, S.; Berthomé, G.; Renou, G.; Le Coz, T.; Mantel, M.; “*Titanium and Titanium Nitride thin Films Grown by DC Reactive Magnetron Sputtering Physical Vapor Deposition in a Continuous Mode on Stainless Steel Wires: Chemical, Morphological and Structural Investigations*”, *Surface and Coatings Technology*, Vol. 324, SEP2017, 318-327.
35. Yousefi, E.; Ghorbani, M.; Dolati, A.; Yashiro, H.; Outokesh, M.; “*Preparation of New Titanium Nitride-Carbon Nanocomposites in Supercritical Benzene and their Oxygen Reduction Activity in Alcaline Medium*”, *Electrochimica Acta*, Vol. 164, 2015, 114-124.
36. Alawajji, R., A.; Kannarpady, G., K.; Nima, A., Z.; Kelly, N.; Watanabe, F.; Biris, A. S.; “*Electrical Properties of Multilayer (DLC-TiC) Films Produced by Pulsed laser Deposition*”, *Applied Surface Science*, Vol. 437, 2018, 429-440.
37. Dhandapani, V., S.; Subbiah, R.; Thangavel, E.; Arumugam, M.; Park, K.; Gasen, M., Z.; Veeraragavan, V.; Kim, E., D.; “*Tribological Properties, Corrosion Resistance and Biocompatibility of Magnetron Spputered Titanium-Amorphus Carbon Coatings*”, *Applied Surface Science*, Vol. 371, 2016, 262-274.
38. Huang, J.; Fan, X.; Xiong, D.; Li, J.; Zhu, H.; Huang, H.; “*Characterization and One-Step Synthesis of Hidroxyapatite-Ti(C,N)-TiO₂ Composite Coating by Cathodic Plasma Electrolytic Saturation and Accompanuing Electrochemical Deposition on Titanium Alloy*”, *Surface e Coatings Technology*, Vol. 324, 2017, 463-470.
39. Ferraresi, D, “*Fundamentos da Usinagem dos Metais*”, 1ª. Edição, 1970, editora Edgard Blucher.
40. ABNT NBR NM-ISO 2395; “*Peneiras de Ensaio e Ensaio de Peneiramento – Vocabulário*”, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 1997.
41. ABNT NBR NM-ISO 3310-1; “*Peneiras de Ensaio – Requisitos Técnicos e Verificação – Parte 1: Peneiras de Ensaio com telas de Tecidos Metálicos*”, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2011.
42. ABNT NBR NM-ISO 3310-2; “*Peneiras de Ensaio – Requisitos Técnicos e Verificação – Parte 2: Peneiras de Ensaio de Chapa Metálica Perfurada*”, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2010.

43. ABNT NBR 16184; “Sinalização Horizontal Viária – Esferas e Microesferas de Vidro – Requisitos e Métodos de Ensaio”, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2013.
44. ISO 8501-1; “*Preparation of steel substrates before application of paints and related products – Visual assessment of surface cleanliness – Part 1: Rust grades and preparation grades of uncoated steel substrates and of steel substrates after overall removal of previous coatings*”, International Organization for Standardization, Genebra, 2007.
45. ASTM D4417; “*Standard Test Methods for Field Measurement of Surface Profile of Blast Cleaned Steel*”, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, 2014.
46. ABNT/ISO 6507-1; “Materiais metálicos – Ensaio de dureza Vickers – Parte 1: Método de ensaio” Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2008.

ANEXOS

Ferramentas utilizadas

SEÇÃO A-A

2

27

5

4-40 UNC

20

10

40

12

Peso: 76.52

Dimensões em milímetros

Material: AISI 1045 Aço, trefilado

Quantidade: 2

Escala: 3:2

Aprov.: Tolerância: ± 0,1

Rebarbar e Quebrar arestas agudas

Observação:

CAT - LITMEC
Laboratório de Instrumentação e Tecnologia Mecânica

Projeto: Ferramenta de SPF

Solicitante: Alexandre Gerk
Dep: EXP

N° O.S: 455/17
Data: 14/11/2017

Versão: 1
Folha: 1/1
Desenhista: Rafael Esteves

Gráficos dos esforços, resultantes do processo FSP

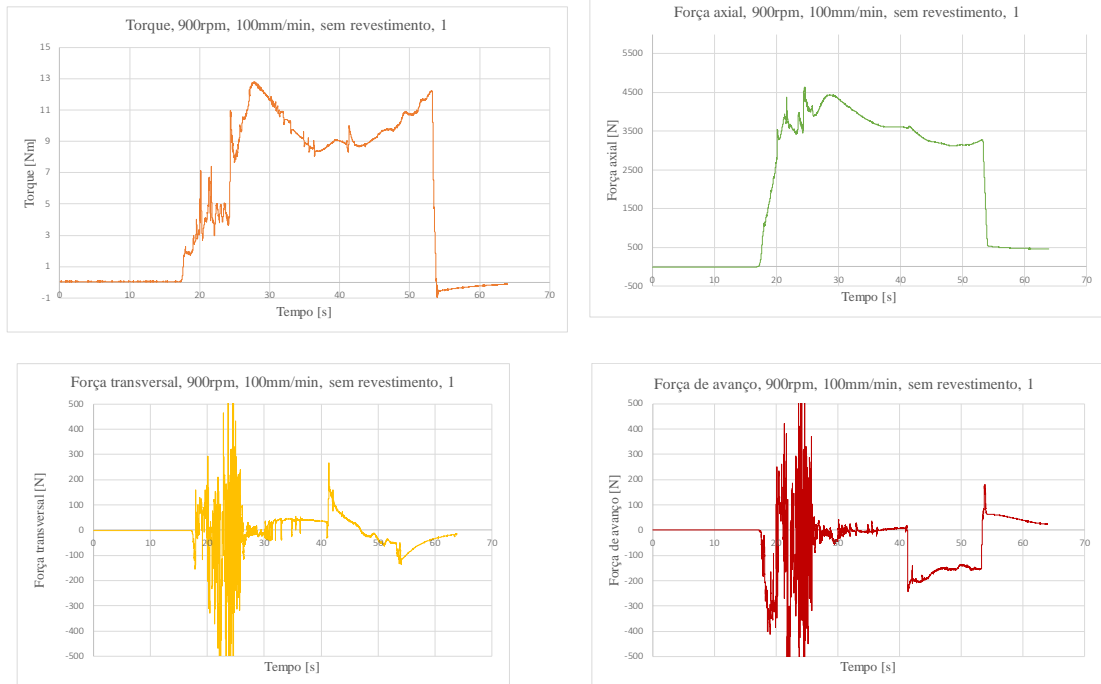


Gráfico 1 - 900rpm, 100mm/min, sem revestimento, amostra 1.

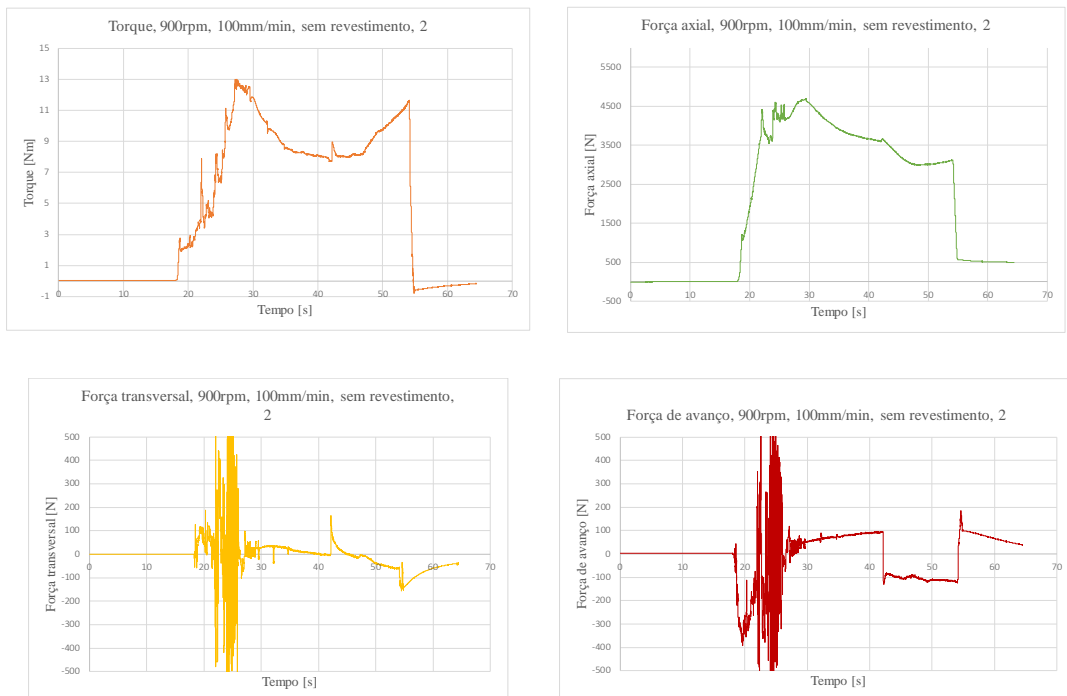


Gráfico 2 - 900rpm, 100mm/min, sem revestimento, amostra 2.

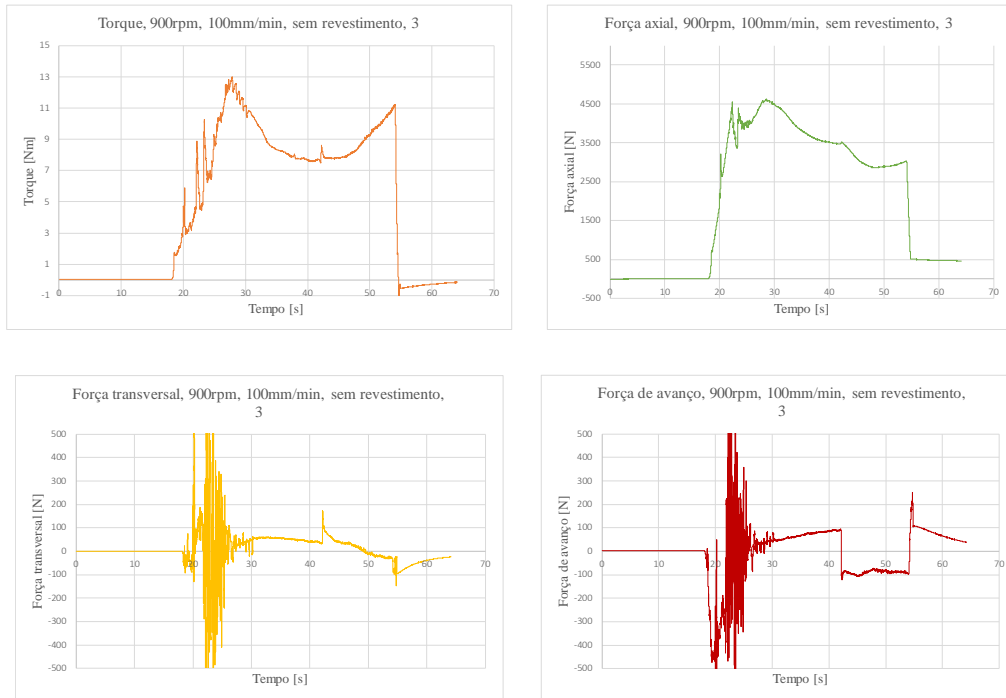


Gráfico 3 - 900rpm, 100mm/min, sem revestimento, amostra 3.

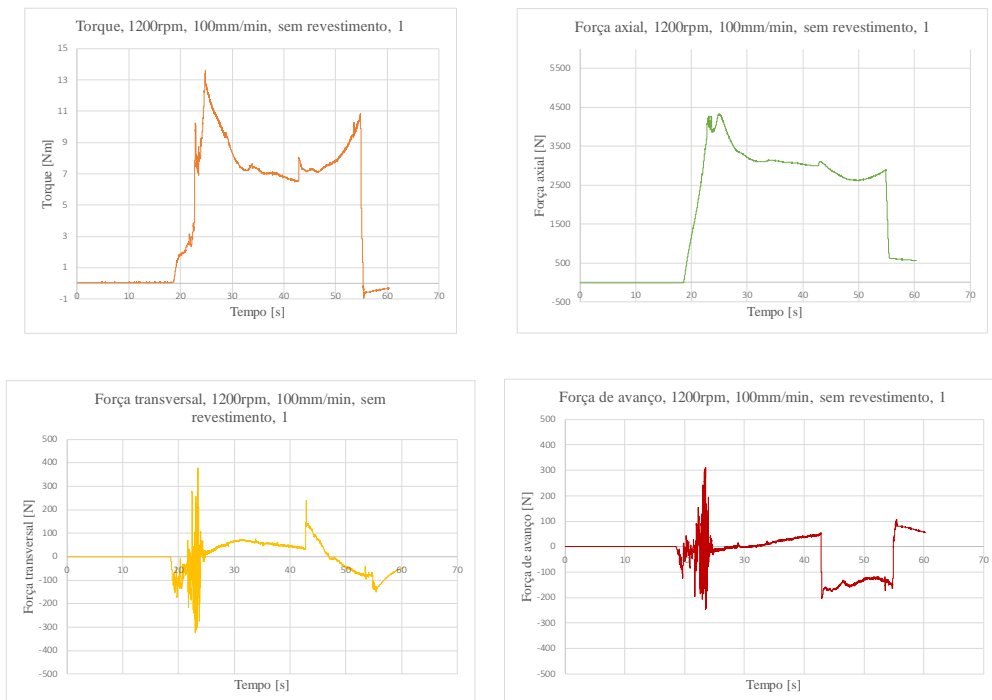


Gráfico 4 - 1200rpm, 100mm/min, sem revestimento, amostra 1.

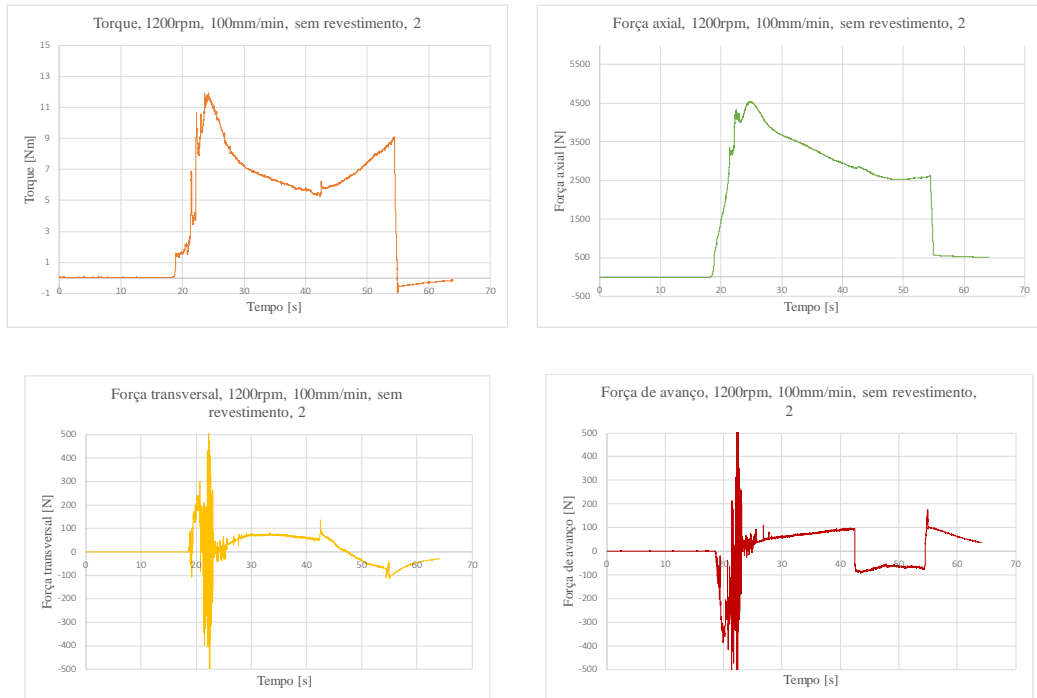


Gráfico 5 - 1200rpm, 100mm/min, sem revestimento, amostra 2.

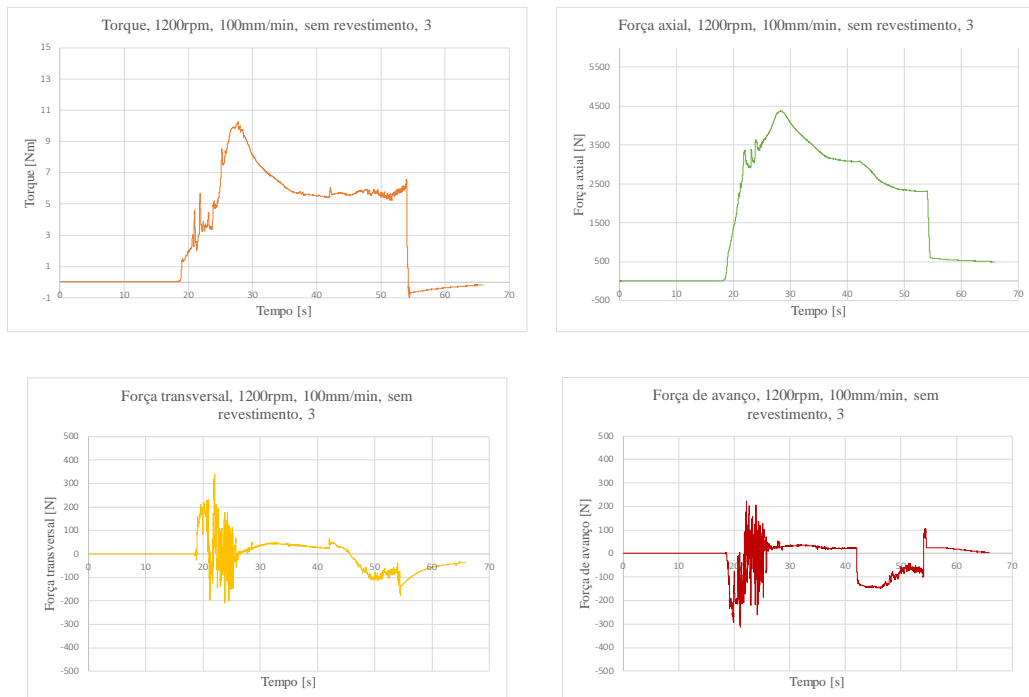


Gráfico 6 - 1200rpm, 100mm/min, sem revestimento, amostra 3.

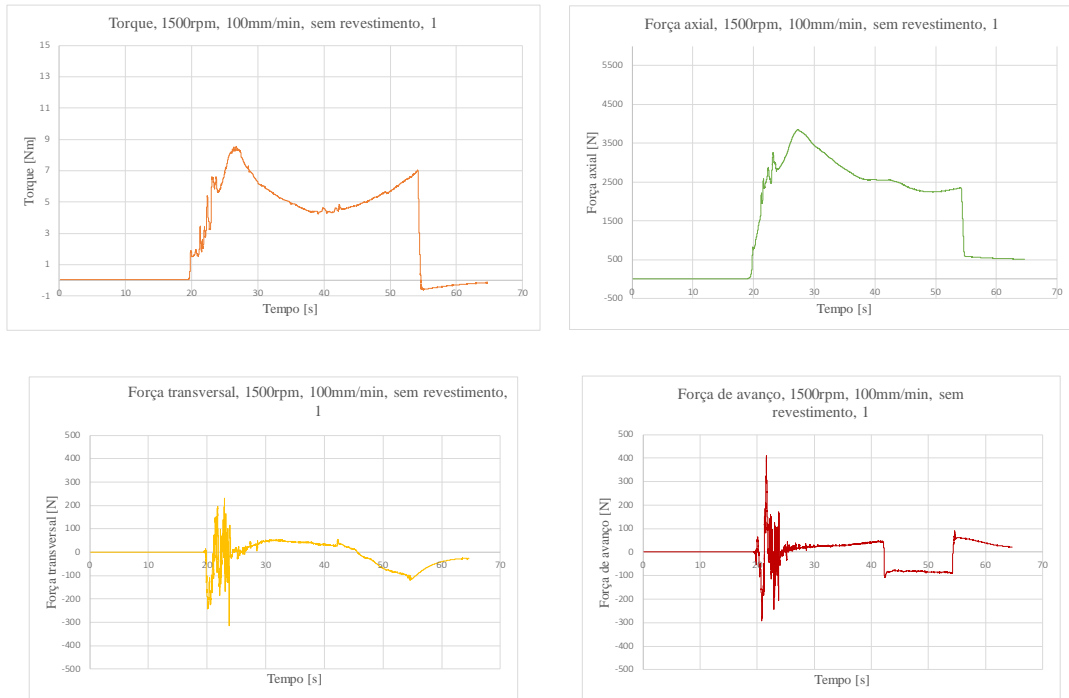


Gráfico 7 - 1500rpm, 100mm/min, sem revestimento, amostra 1.

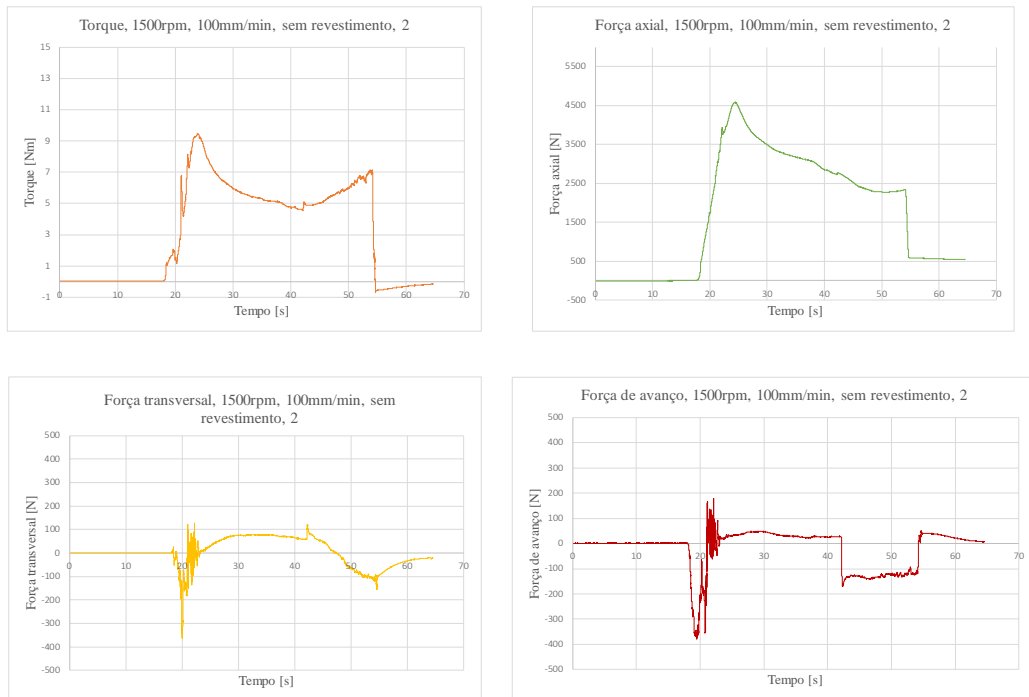


Gráfico 8 - 1500rpm, 100mm/min, sem revestimento, amostra 2.

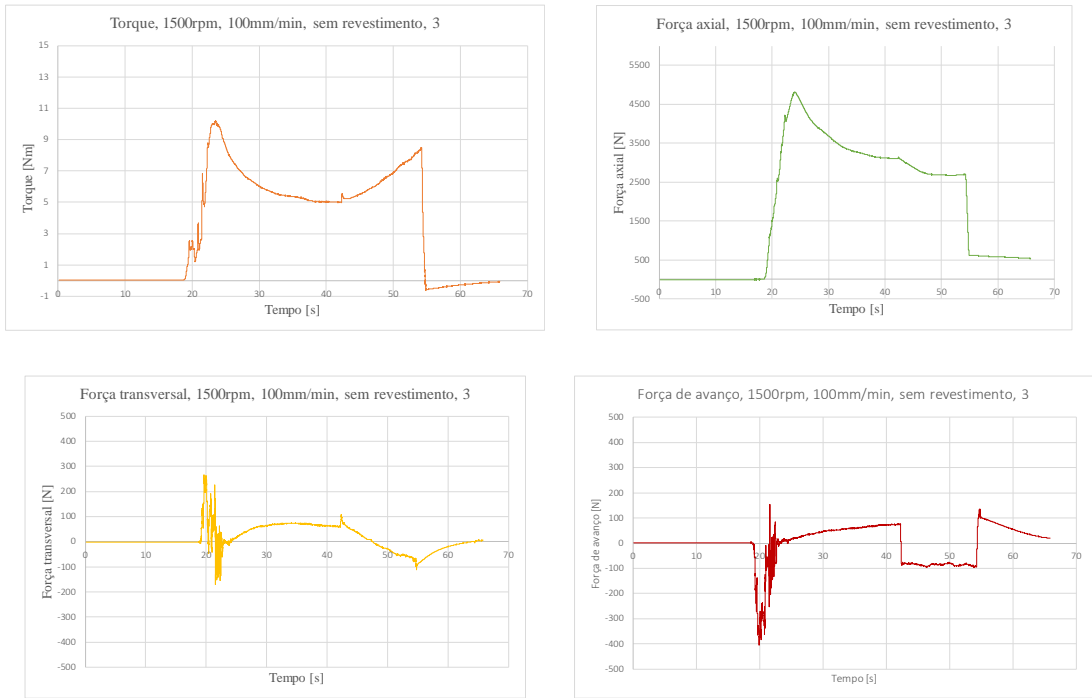


Gráfico 9 - 1500rpm, 100mm/min, sem revestimento, amostra 3.

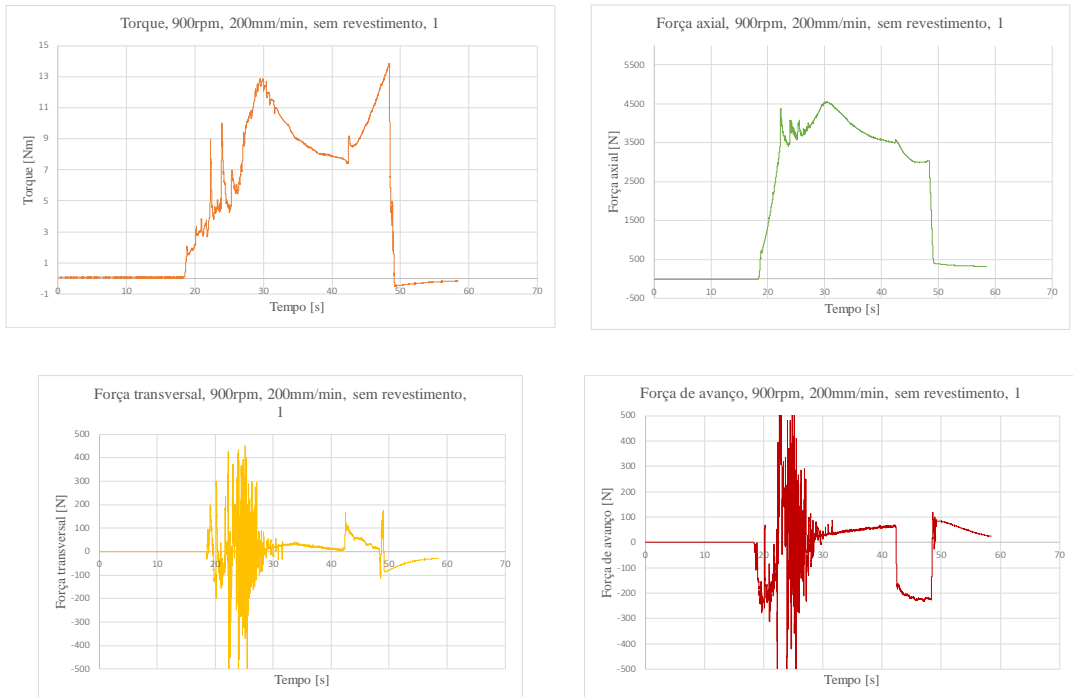


Gráfico 10 - 900rpm, 200mm/min, sem revestimento, amostra 1.

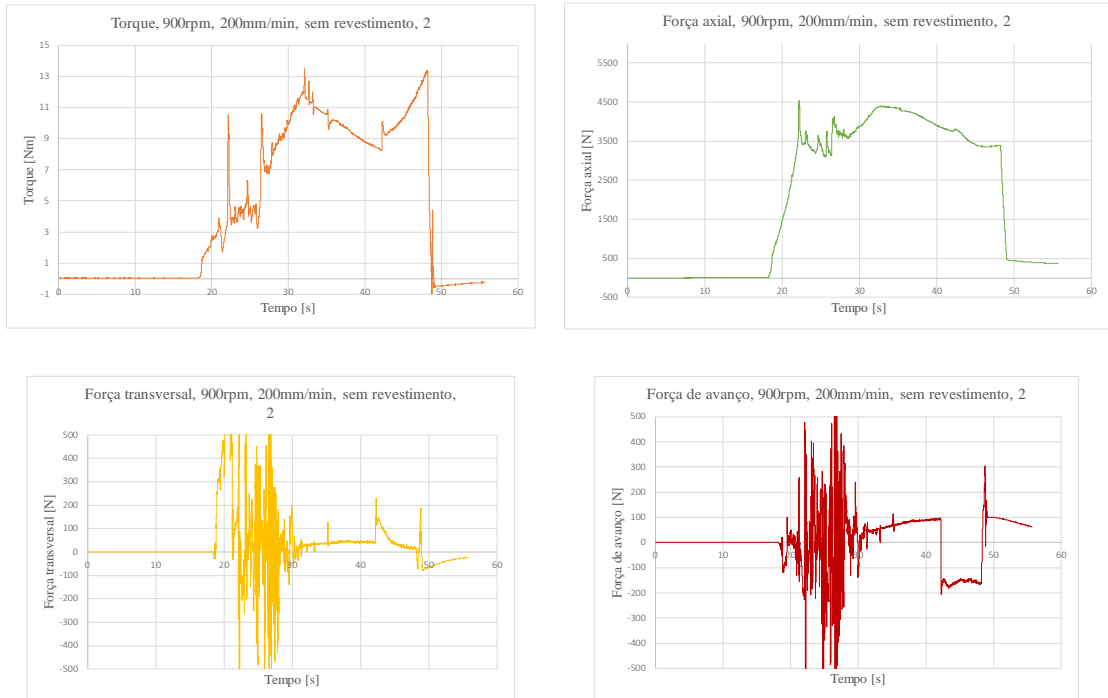


Gráfico 11 - 900rpm, 200mm/min, sem revestimento, amostra 2.

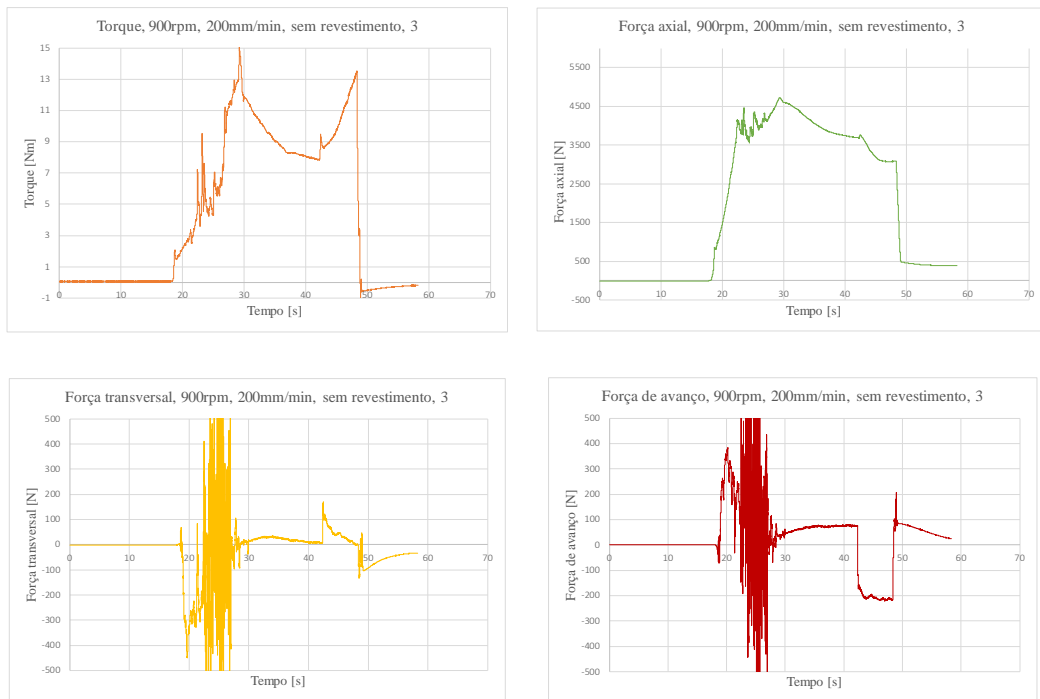


Gráfico 12 - 900rpm, 200mm/min, sem revestimento, amostra 3.

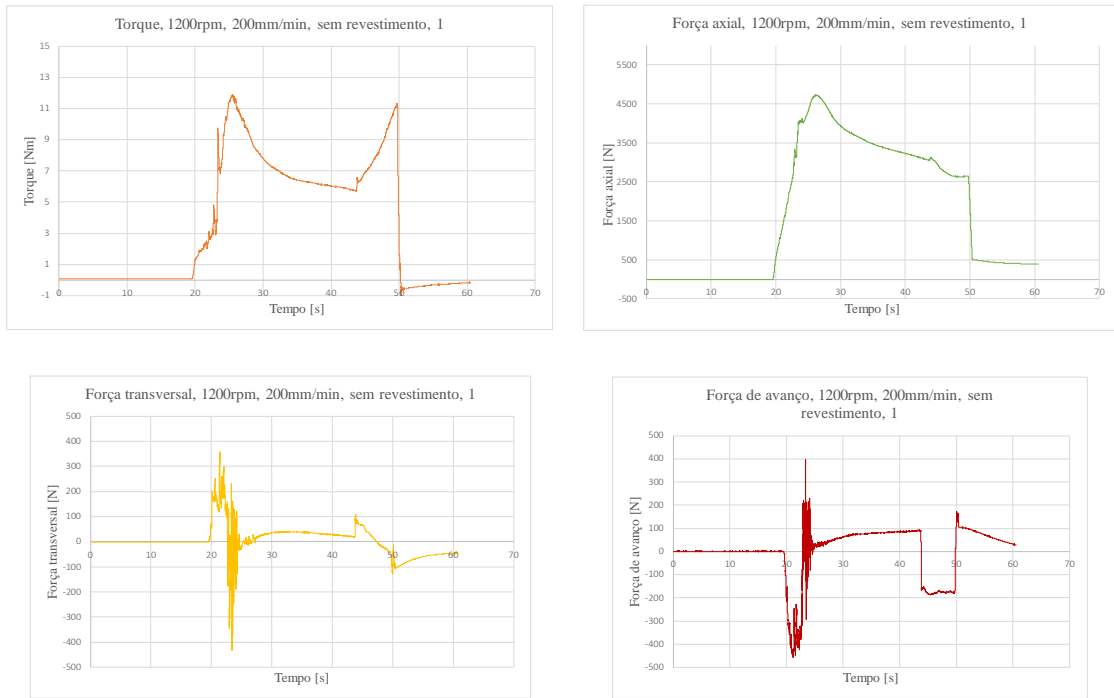


Gráfico 13 - 1200rpm, 200mm/min, sem revestimento, amostra 1.

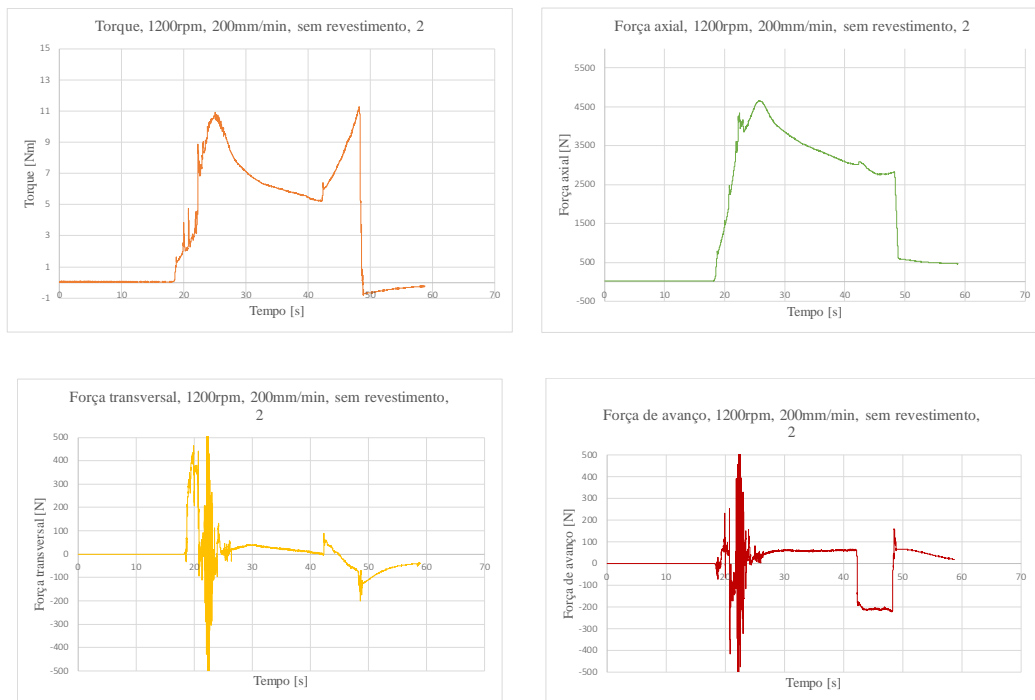


Gráfico 14 - 1200rpm, 200mm/min, sem revestimento, amostra 2.

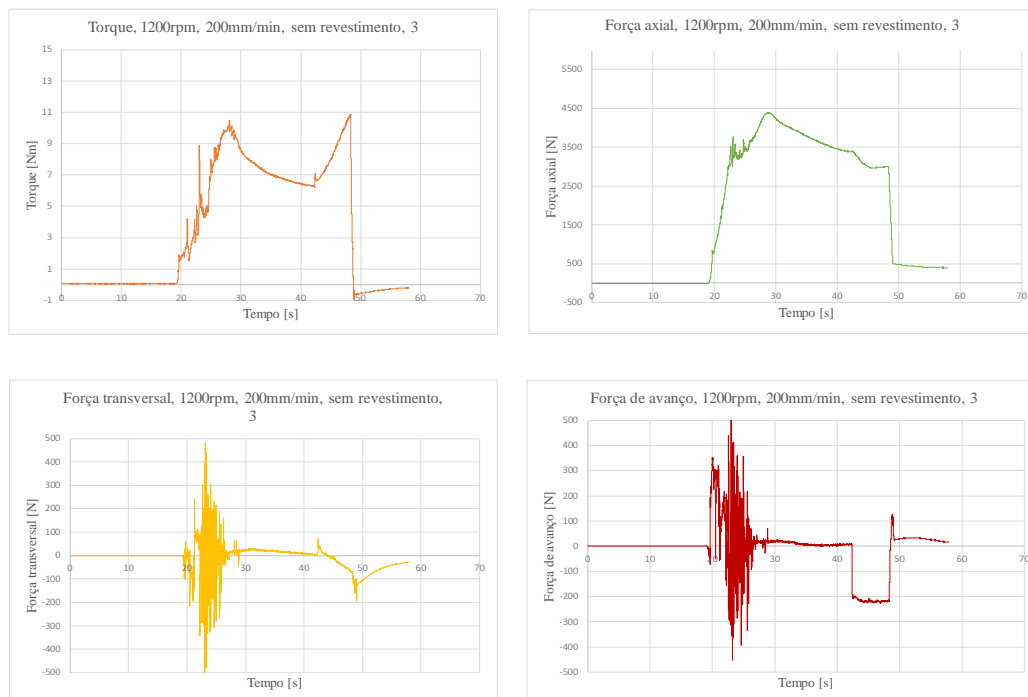


Gráfico 15 - 1200rpm, 200mm/min, sem revestimento, amostra 3.

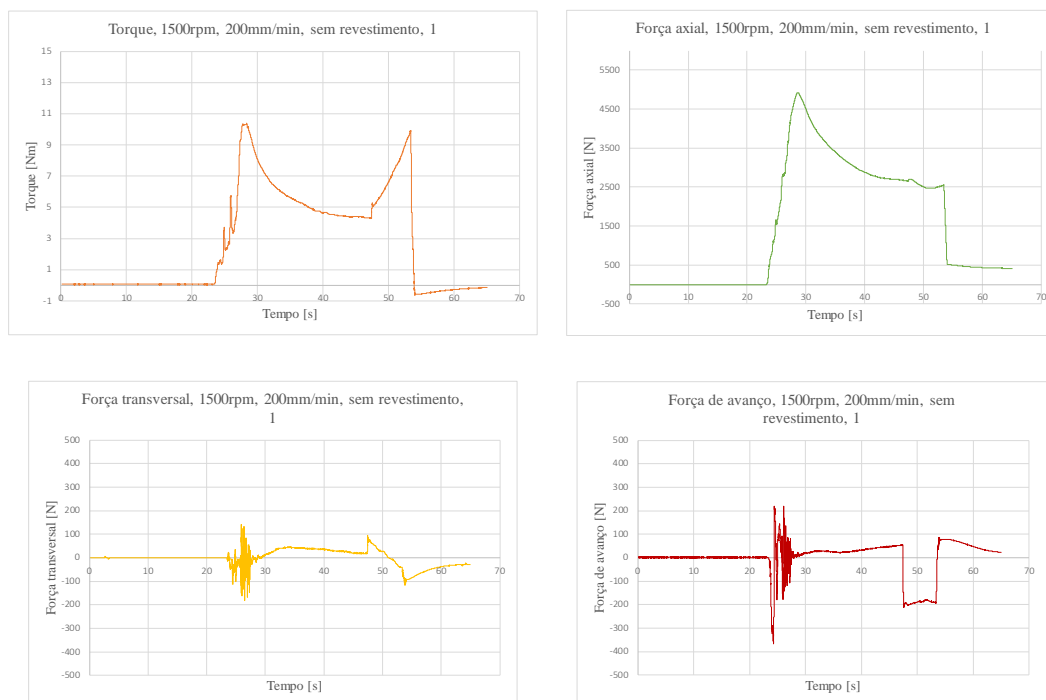


Gráfico 16 - 1500rpm, 200mm/min, sem revestimento, amostra 1.

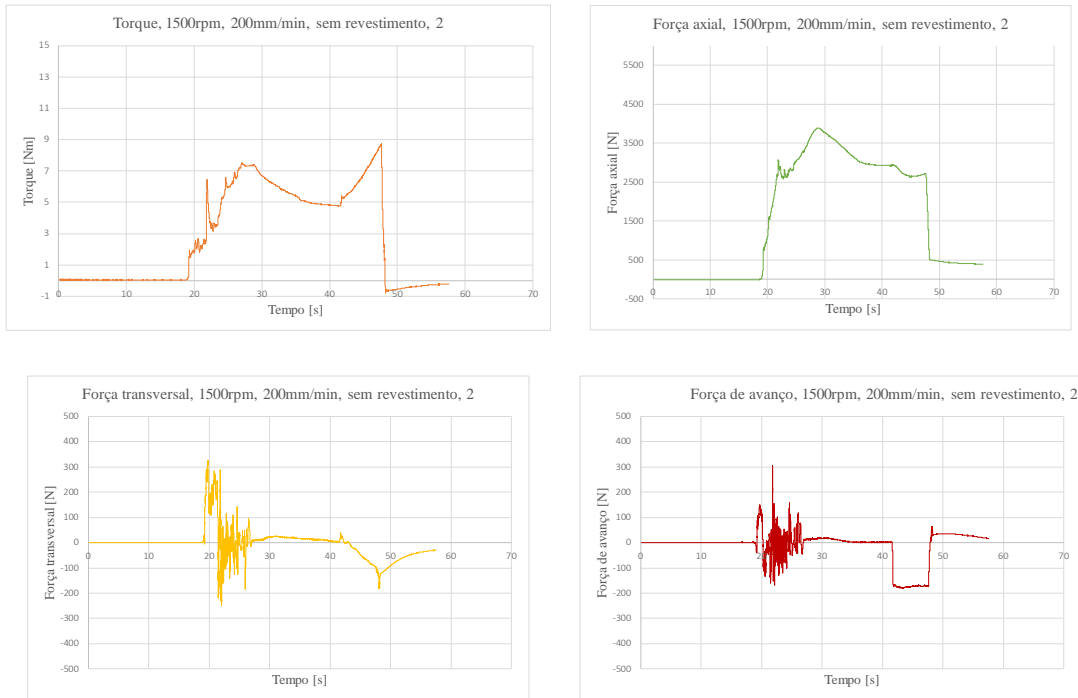


Gráfico 17 - 1500rpm, 200mm/min, sem revestimento, amostra 2.

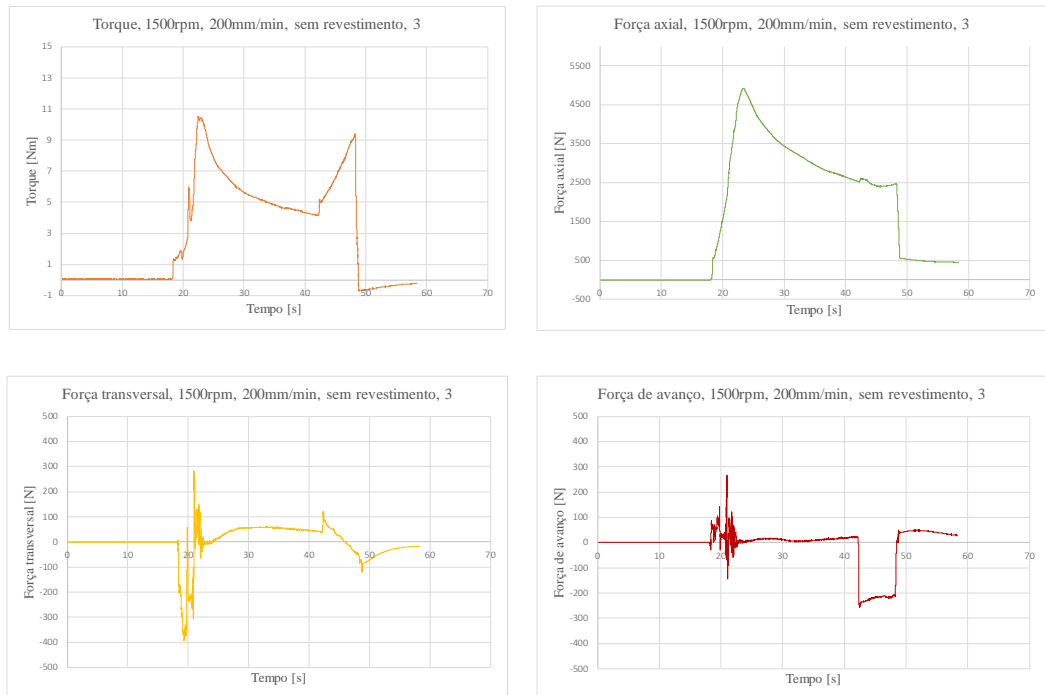


Gráfico 18 - 1500rpm, 200mm/min, sem revestimento, amostra 3.

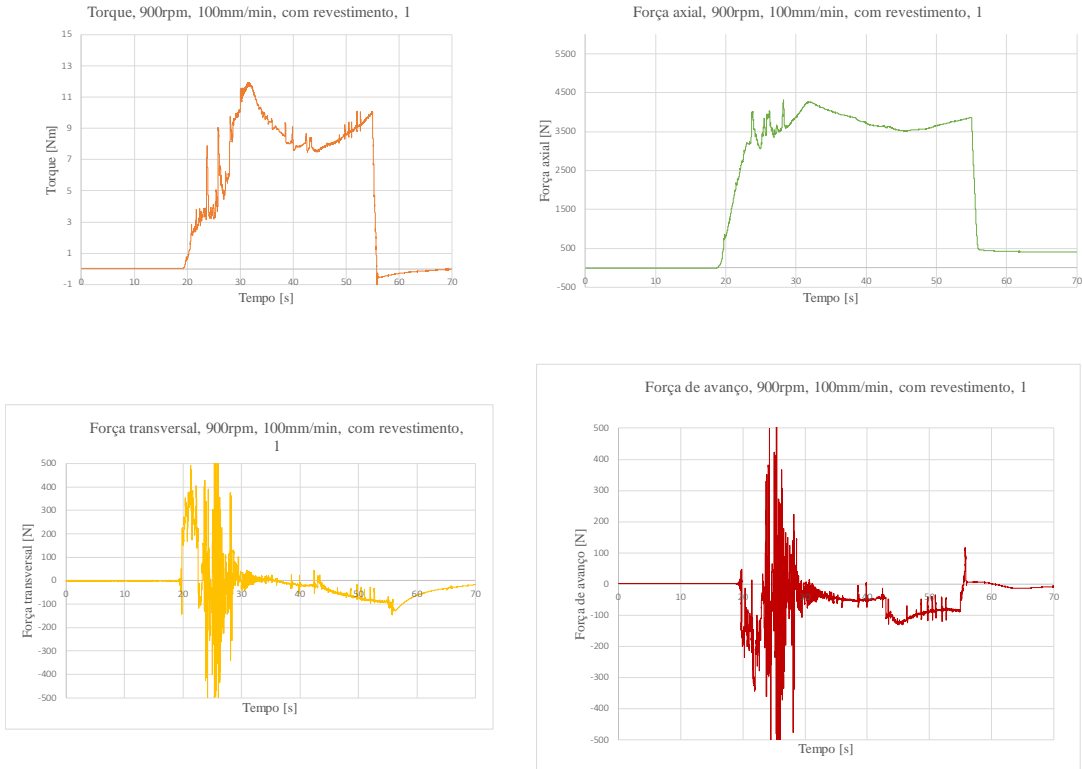


Gráfico 19 - 900rpm, 100mm/min, com revestimento, amostra 1.

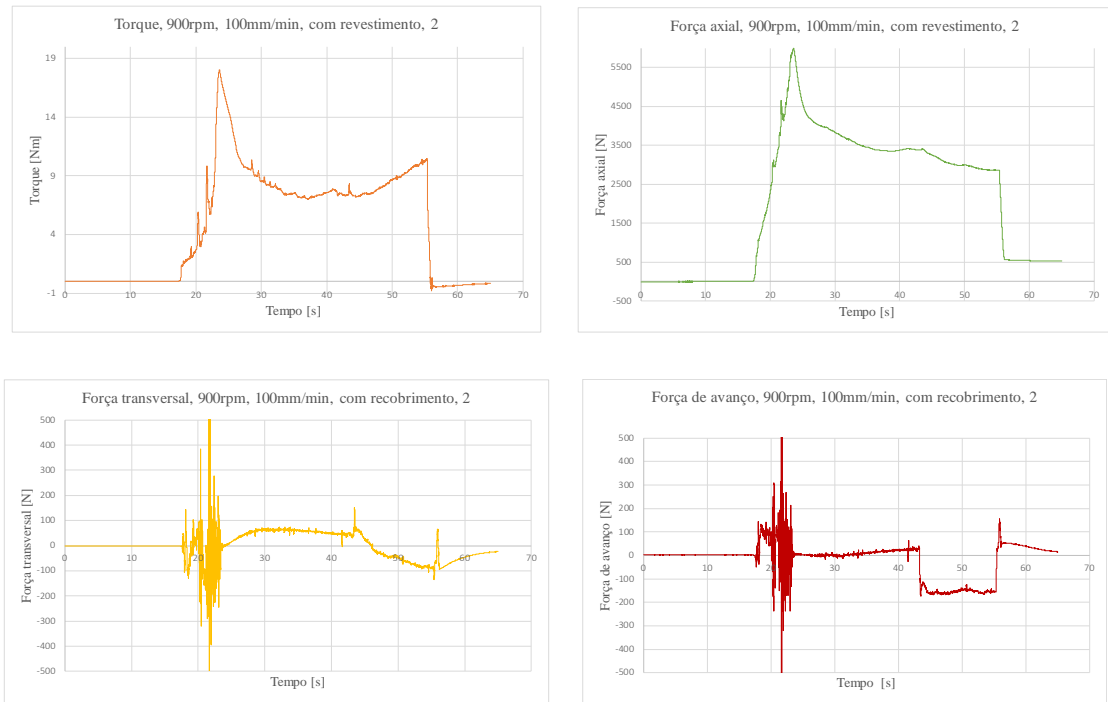


Gráfico 20 - 900rpm, 100mm/min, com revestimento, amostra 2.

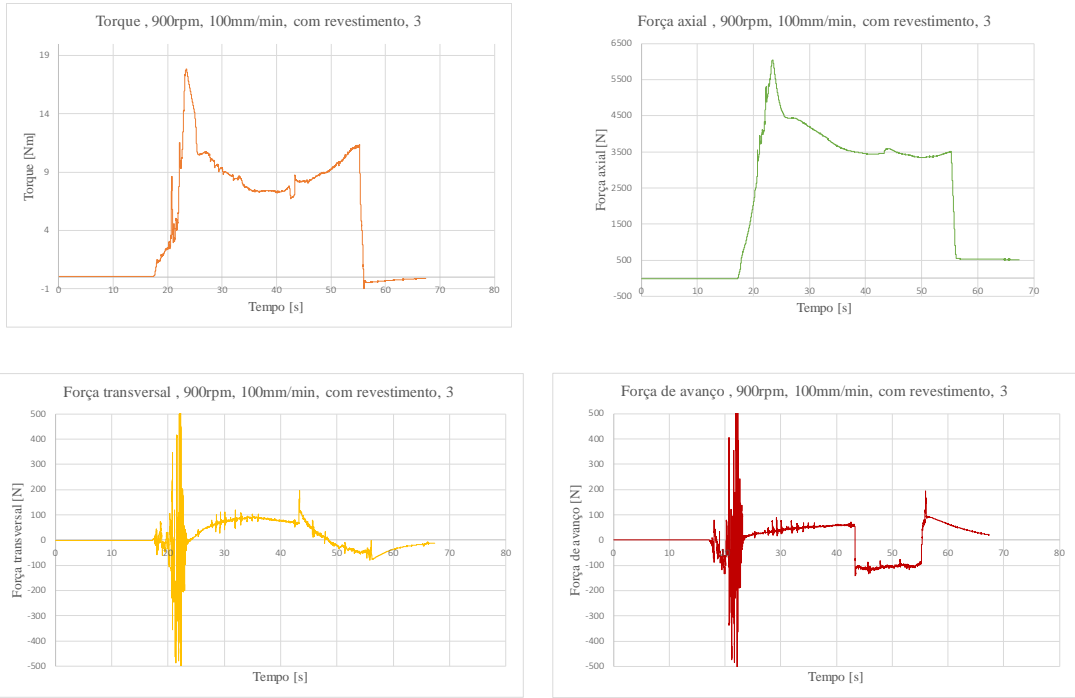


Gráfico 21 - 900rpm, 100mm/min, com revestimento, amostra 3.

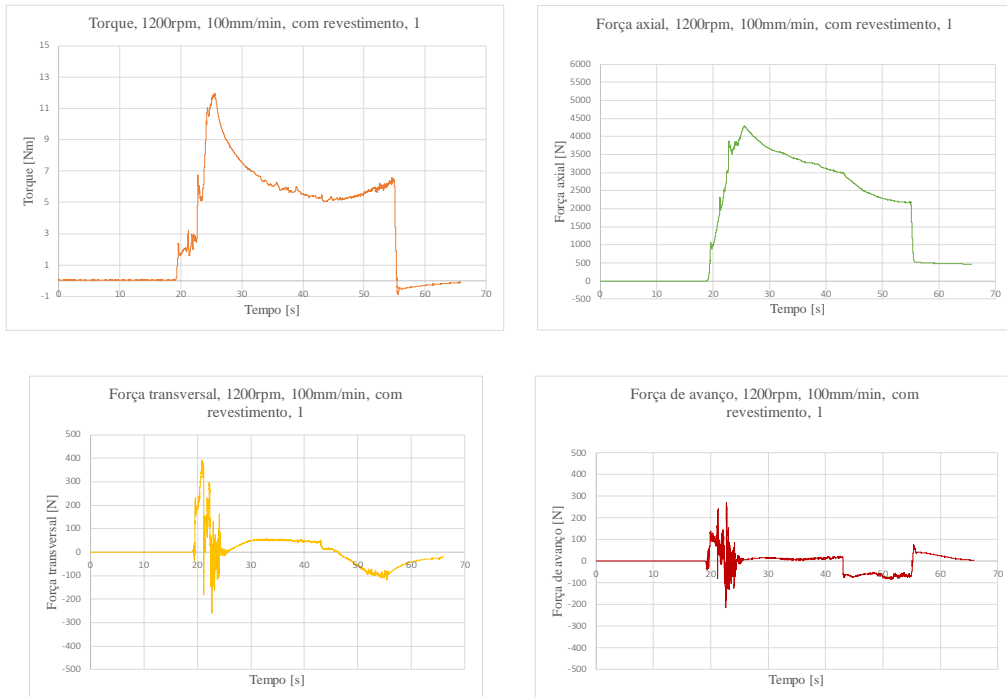


Gráfico 22 - 1200rpm, 100mm/min, com revestimento, amostra 1.

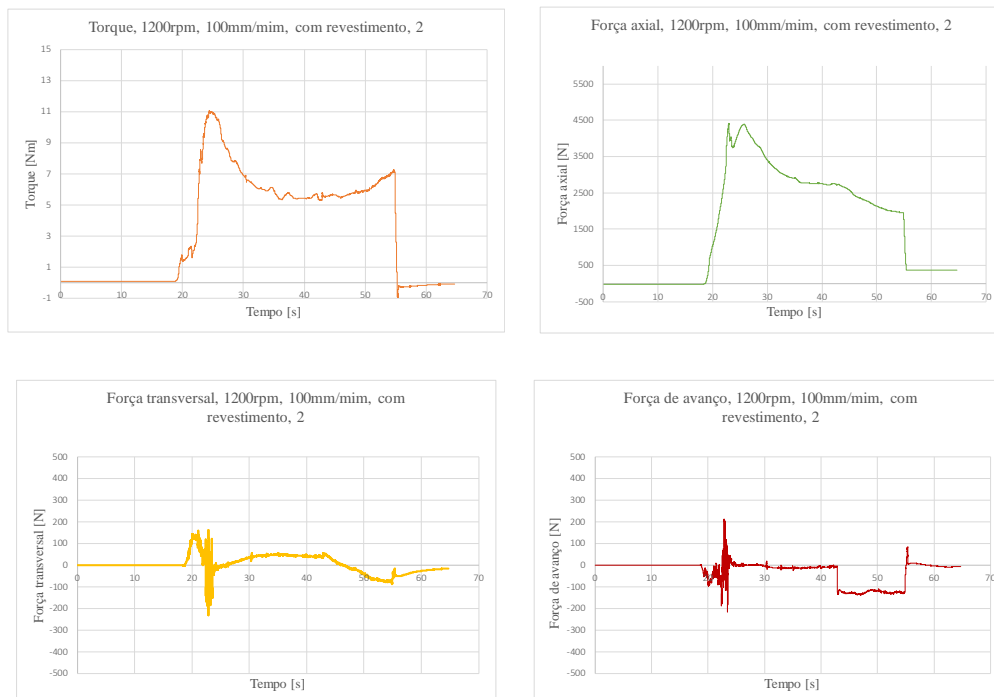


Gráfico 23 - 1200rpm, 100mm/min, com revestimento, amostra 2.

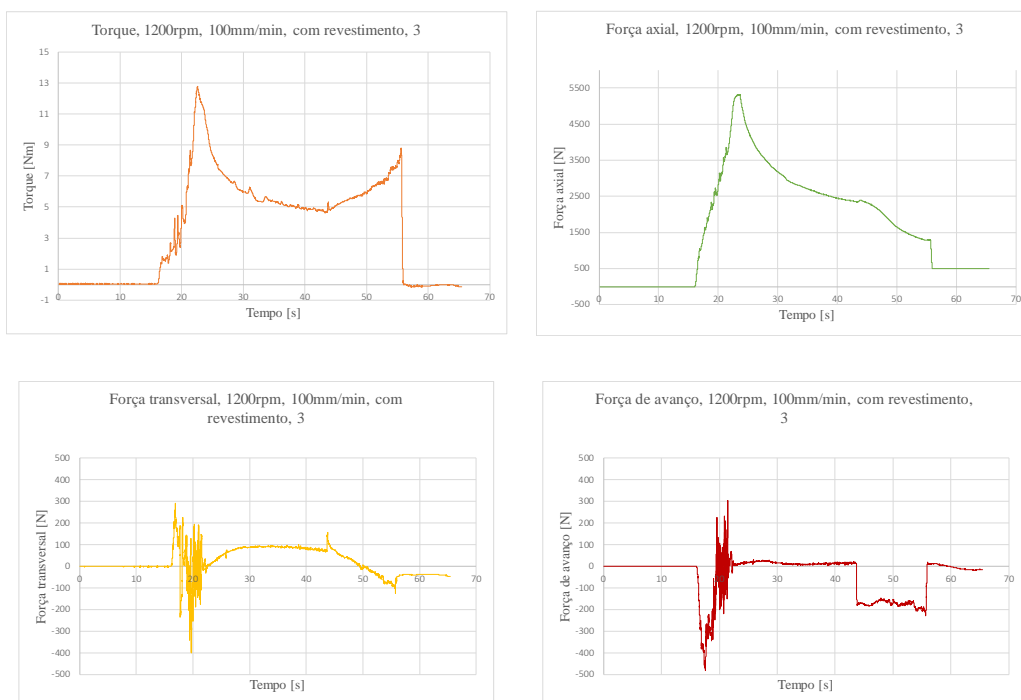


Gráfico 24 - 1200rpm, 100mm/min, com revestimento, amostra 3.

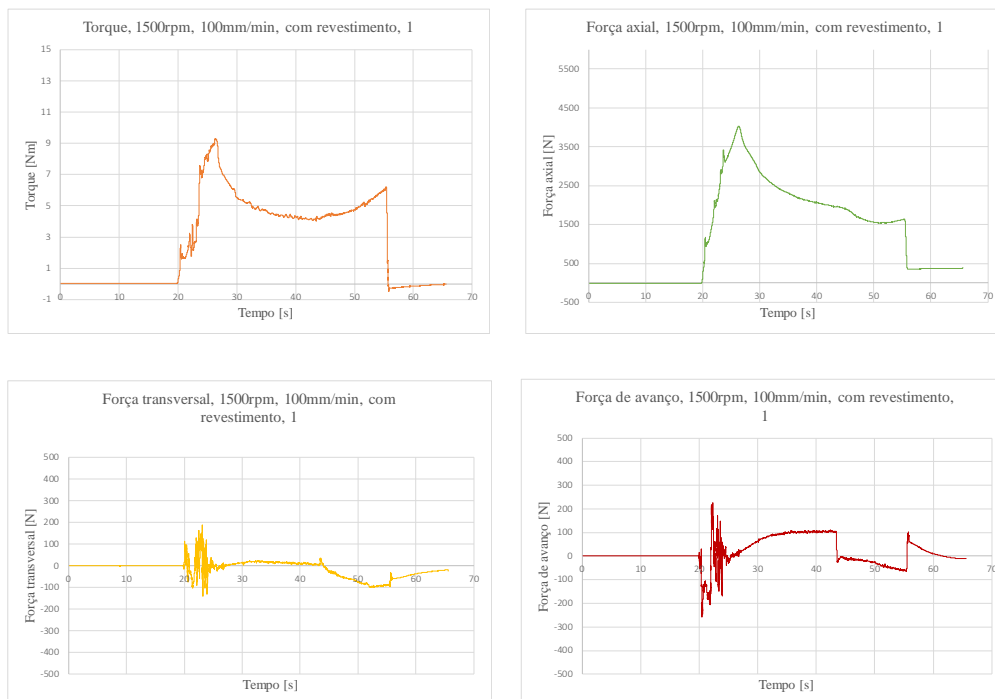


Gráfico 25 - 1500rpm, 100mm/min, com revestimento, amostra 1.

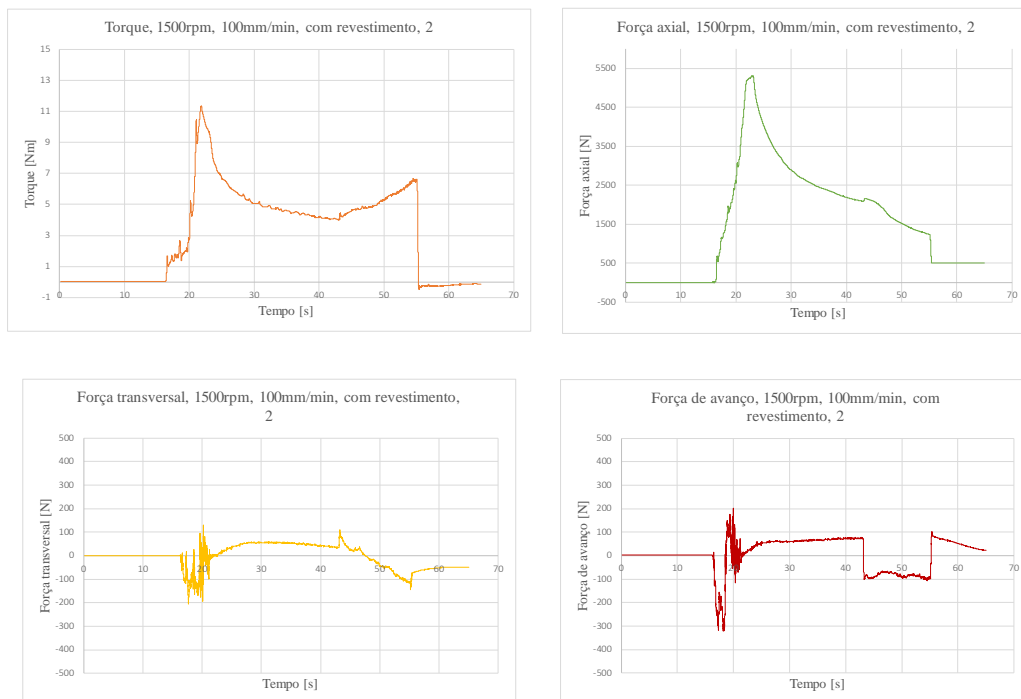


Gráfico 26 - 1500rpm, 100mm/min, com revestimento, amostra 2.

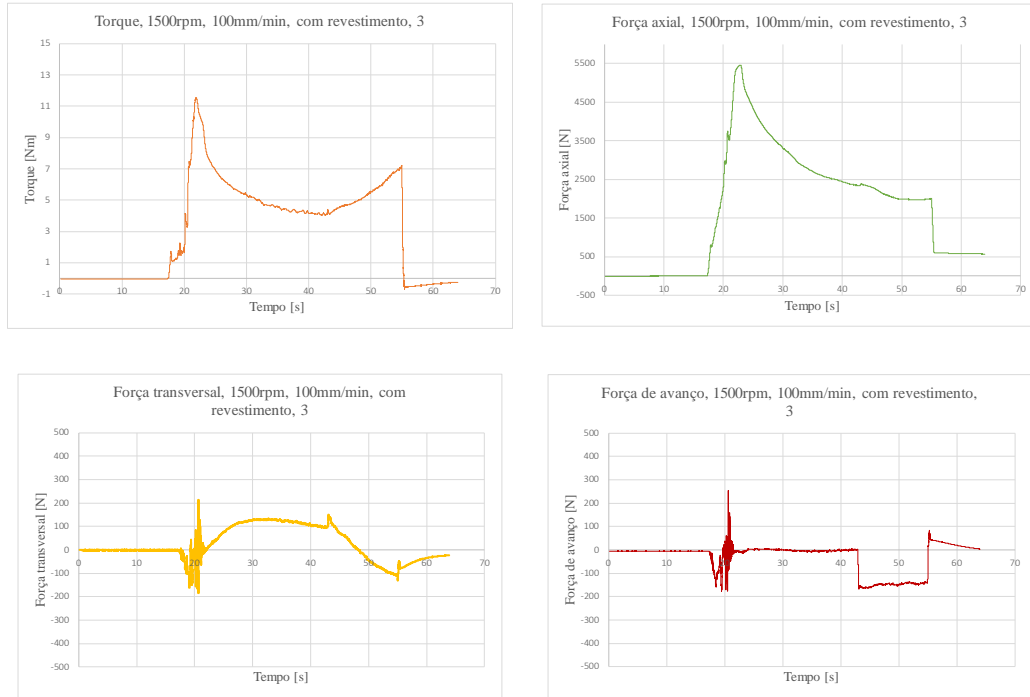


Gráfico 27 - 1500rpm, 100mm/min, com revestimento, amostra 3.

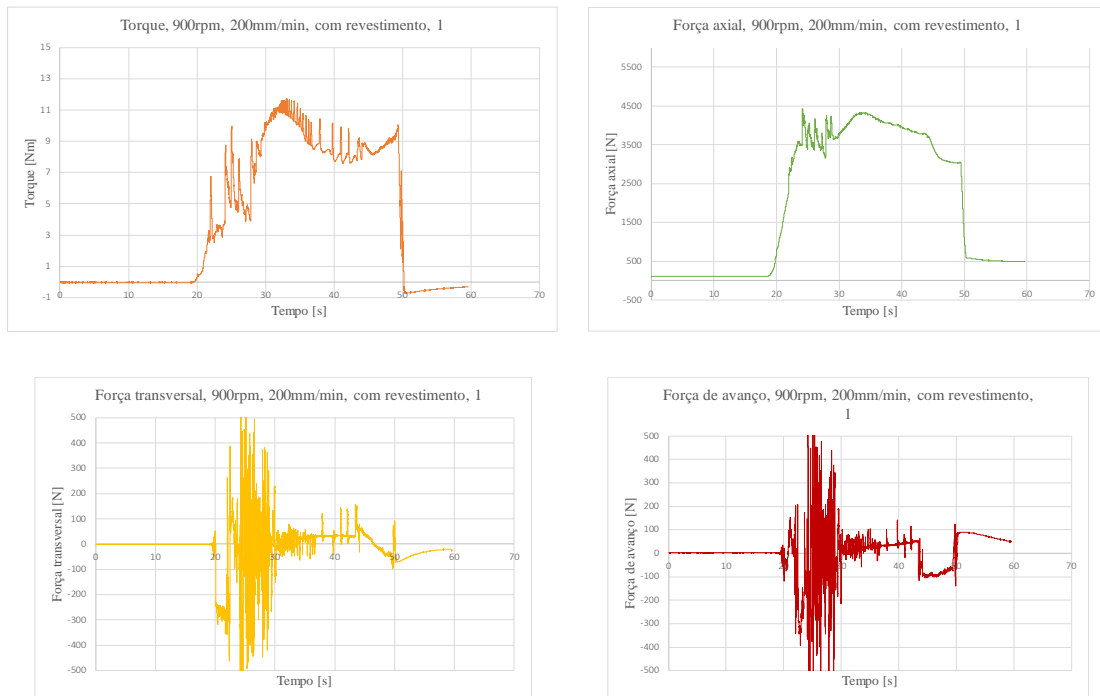


Gráfico 28 - 900rpm, 200mm/min, com revestimento, amostra 1.

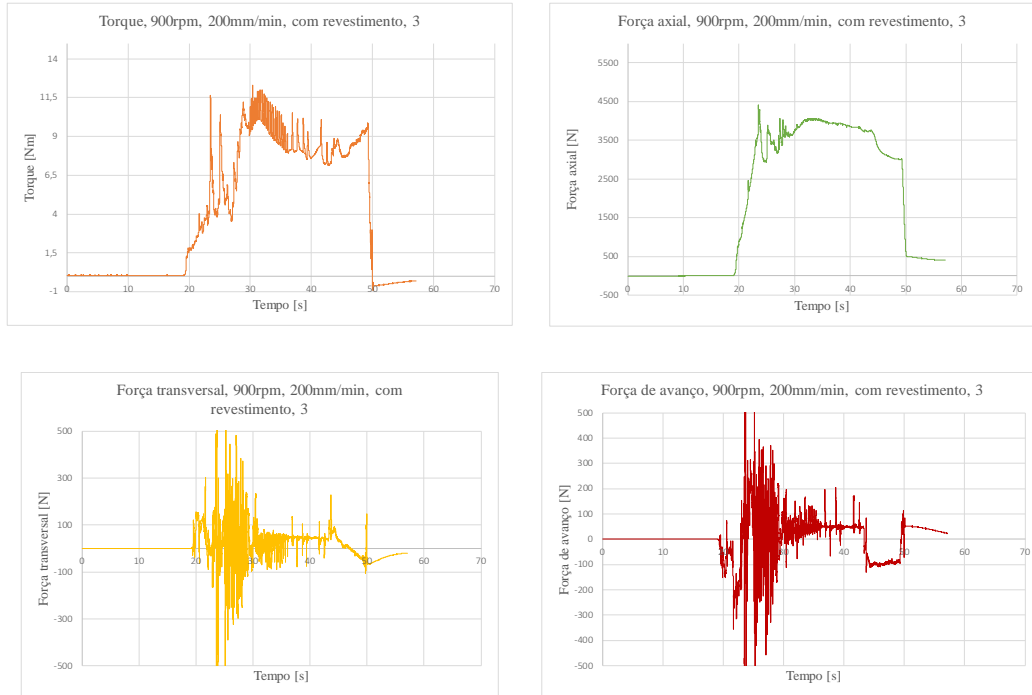


Gráfico 29 - 900rpm, 200mm/min, com revestimento, amostra 2.

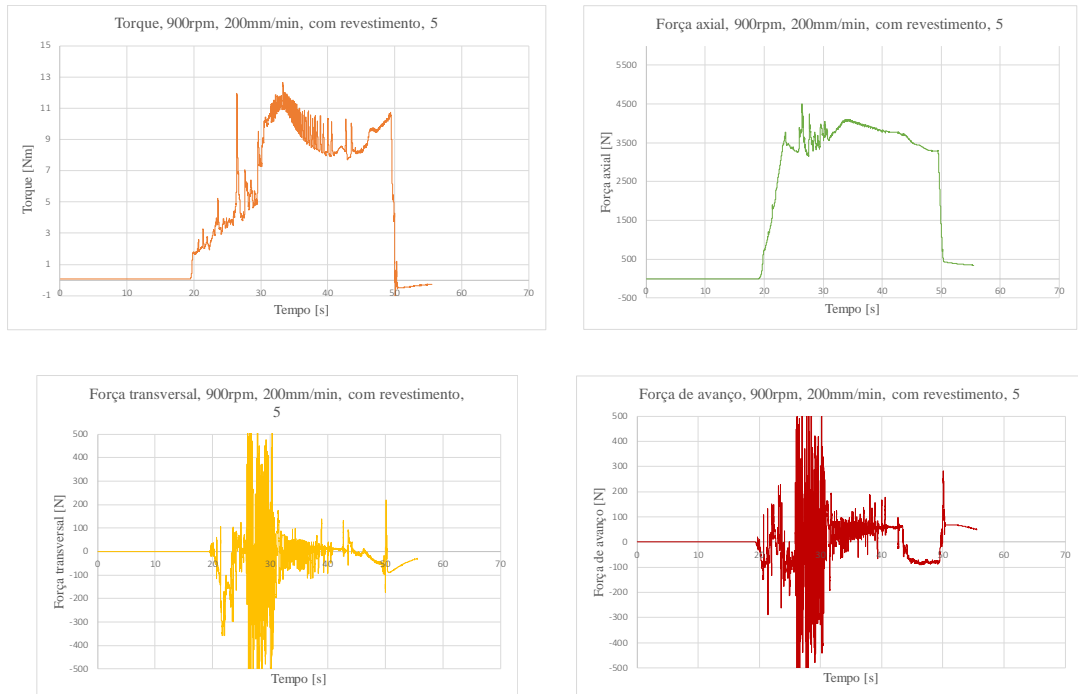


Gráfico 30 - 900rpm, 200mm/min, com revestimento, amostra 3.

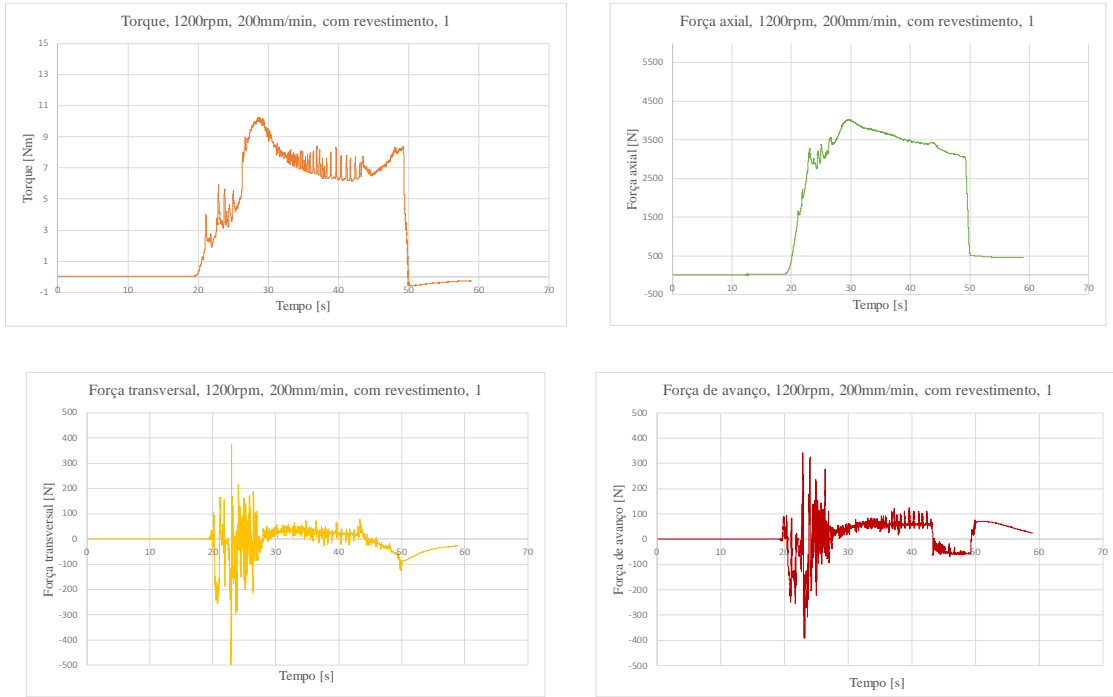


Gráfico 31 - 1200rpm, 200mm/min, com revestimento, amostra 1.

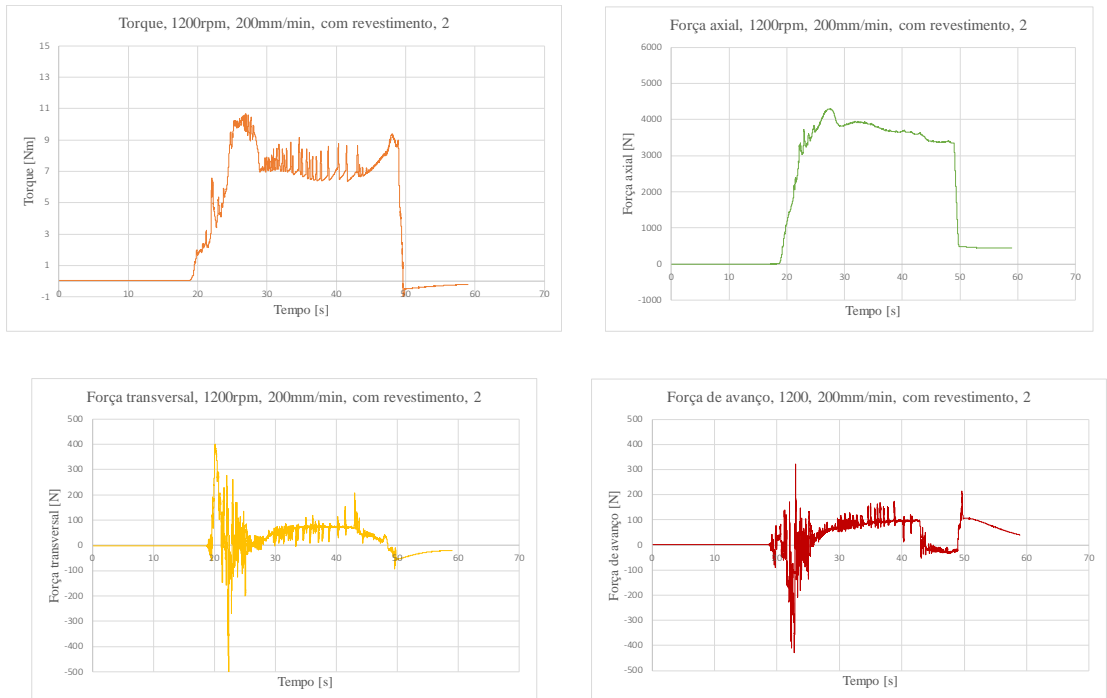


Gráfico 32 - 1200rpm, 200mm/min, com revestimento, amostra 2.

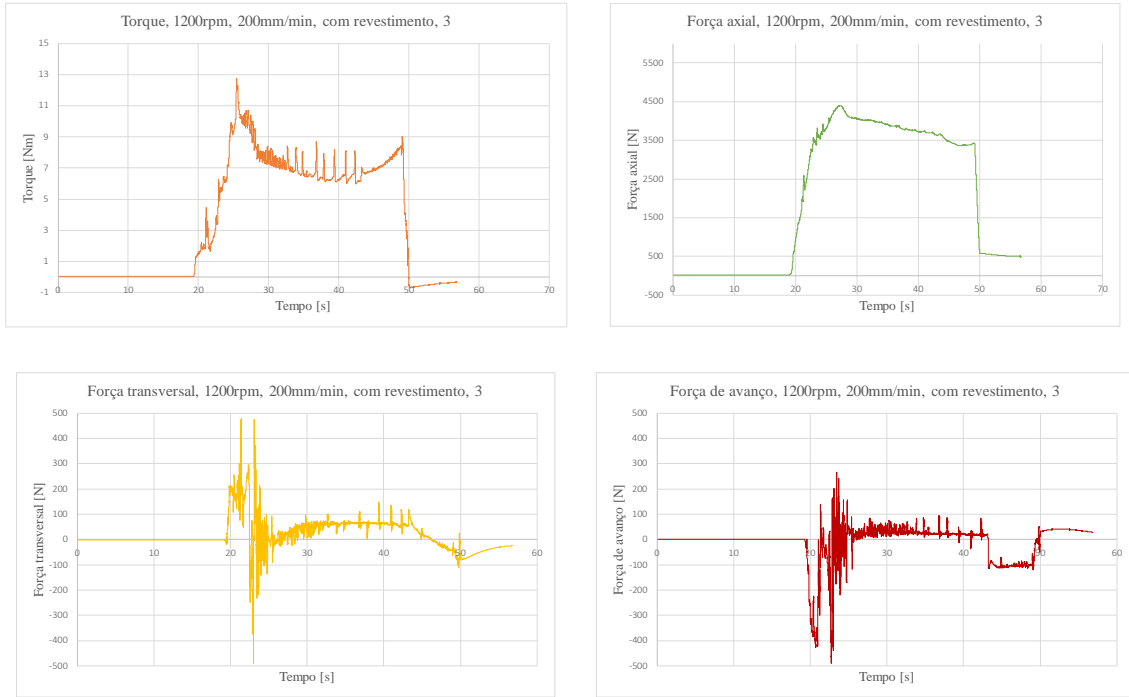


Gráfico 33 - 1200rpm, 200mm/min, com revestimento, amostra 3.

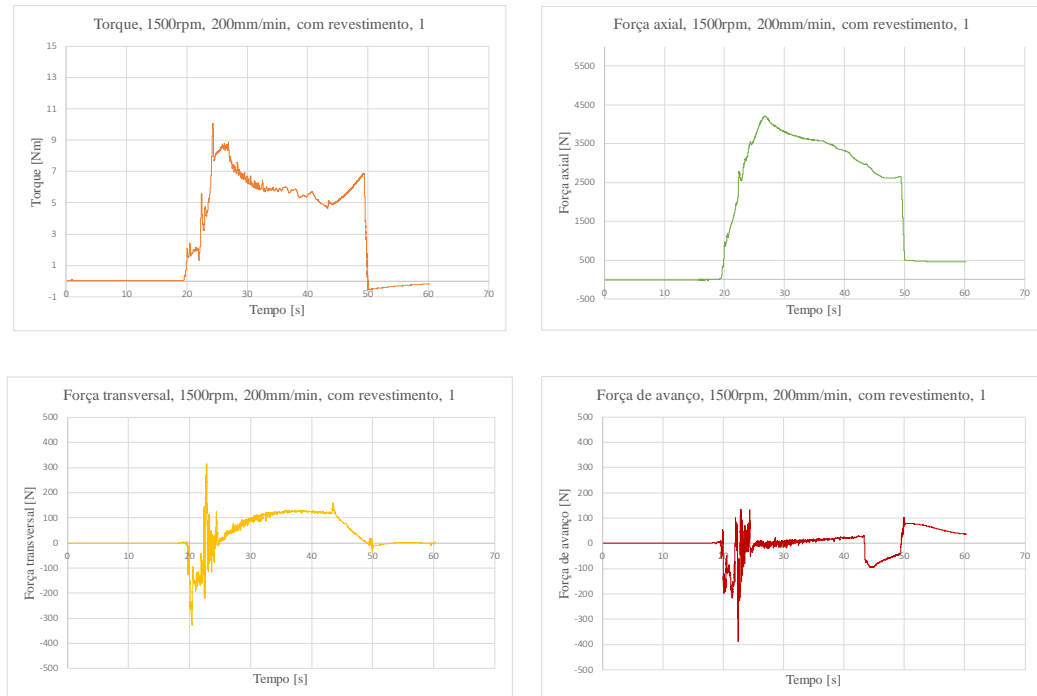


Gráfico 34 - 1500rpm, 200mm/min, com revestimento, amostra 1.

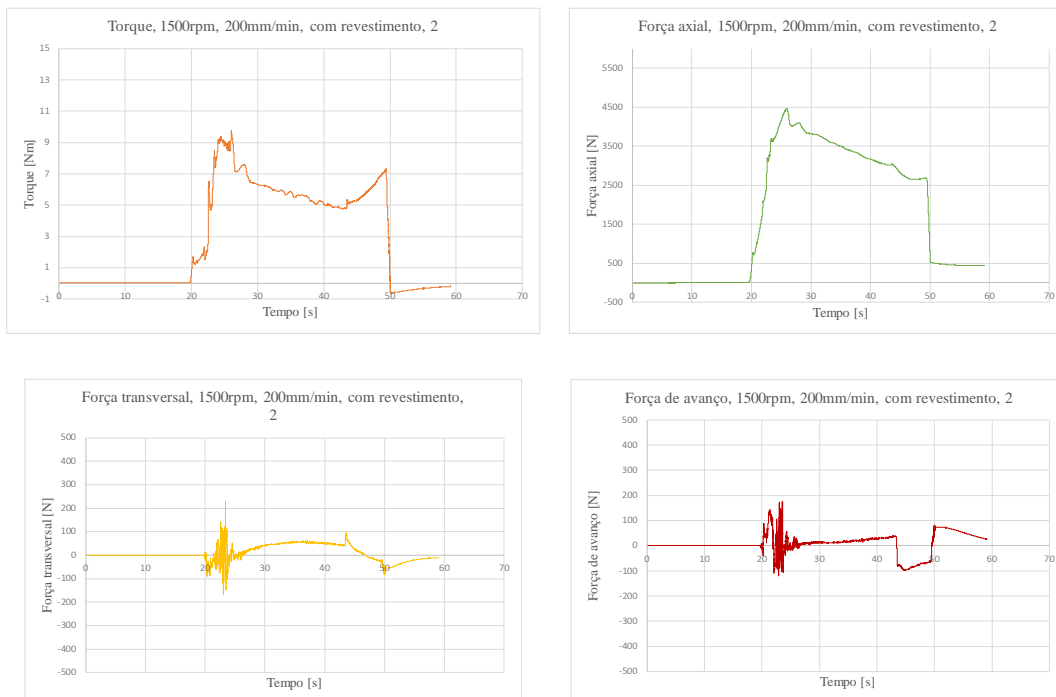


Gráfico 35 - 1500rpm, 200mm/min, com revestimento, amostra 2.

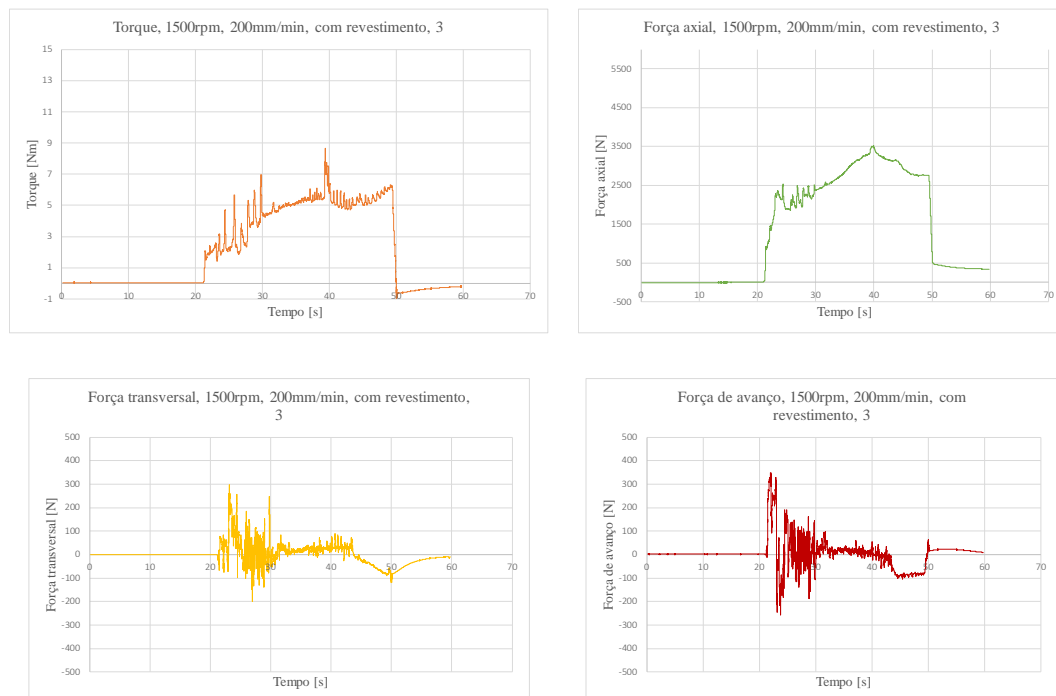


Gráfico 36 - 1500rpm, 200mm/min, com revestimento, amostra 3.