

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

MARCELO RODRIGO MUNHOZ

**ESTUDO DE CASO DE UMA PASTA ABRASIVA UTILIZANDO ÓLEO DE
OITICICA EM UM EQUIPAMENTO DE USINAGEM POR FLUXO ABRASIVO**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**CORNÉLIO PROCÓPIO
2017**

MARCELO RODRIGO MUNHOZ

**ESTUDO DE CASO DE UMA PASTA ABRASIVA UTILIZANDO ÓLEO DE
OITICICA EM UM EQUIPAMENTO DE USINAGEM POR FLUXO ABRASIVO**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de mestre em Engenharia Mecânica, do Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Área de concentração: Caracterização de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Elias da Silva Júnior

Co-Orientadora: Prof^a. Dra Janaina Fracaro de Souza Gonçalves

**CORNÉLIO PROCÓPIO
2017**

FOLHA DE APROVAÇÃO



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Câmpus Cornélio Procopio
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica



Título da Dissertação N° 020:

“Estudo de Caso de uma Pasta Abrasiva Utilizando Óleo de Oiticica em um Equipamento de Usinagem por Fluxo Abrasivo”.

por

Marcelo Rodrigo Munhoz

Orientador: Prof. Dr. Carlos Elias da Silva Junior

Esta dissertação foi apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de **MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA** – Área de Concentração: Ciências Mecânicas, linha de pesquisa: **Caracterização dos Materiais Aplicados em Engenharia**, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – PPGEM – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR – Câmpus Cornélio Procopio, às 09h do dia 25 de agosto de 2017. O trabalho foi aprovado pela Banca Examinadora, composta pelos professores:

Prof. Dr. Carlos Elias Da Silva Junior
(Orientador – UTFPR-CP)

Prof. Dra. Janaina Fracaro De Souza Gonçalves
(UTFPR-LD)

Prof. Dr. Ricardo Breganon
(IFPR – Câmpus Jacarezinho)

Visto da coordenação:

Prof. Dr. Rogério Akihide Ikegami
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
UTFPR Câmpus Cornélio Procopio

Dedicatória

Dedico este trabalho à minha família que sempre me apoiou e acreditou que eu era capaz de atingir meus objetivos, aos meus amigos que acreditaram em mim e ao meu orientador que esteve sempre presente, me auxiliando para que essa vitória fosse possível.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Carlos Elias da Silva Júnior, pela sabedoria com que me guiou nesta trajetória.

À minha Co-Orientadora Profa. Dra. Janaina Fracaro de Souza Gonçalves, pela valiosa contribuição nessa dissertação.

À Dra Elizabeth Mie Hashimoto que desenvolveu a Análise Estatística de Dados quanto à rugosidade superficial.

À Profa. Yáskara Marques da Universidade Estadual do Rio Grande do Norte pelo fornecimento do óleo de oiticica.

Aos meus colegas de sala, em especial ao Ricardo Benez que me ajudou com o equipamento de Usinagem por Fluxo Abrasivo para a minha dissertação.

Ao Dr. Fábio Bossoi Vicente da Unesp de Bauru e ao professor Dr. Alysson Cristiano Beneti, que me ajudaram nos ensaios de Microscopia Eletrônica de Varredura.

Ao secretário do PPGEM-CP, Thiago Henrique Leme, pela cooperação.

Gostaria de deixar registrado também, o meu reconhecimento à minha família, pois acredito que sem o apoio deles seria muito difícil vencer esse desafio.

Enfim, a todos os que por algum motivo contribuíram para a realização desta pesquisa.

Procure sempre fazer as coisas do modo mais simples que você puder.

Albert Einstein

RESUMO

MUNHOZ, Marcelo Rodrigo. **Estudo de caso de uma pasta abrasiva utilizando óleo de oiticica em um equipamento de Usinagem por Fluxo Abrasivo.** 2017. 156 f. Dissertação de Mestrado – Engenharia Mecânica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2017.

A utilização do equipamento de Usinagem por Fluxo Abrasivo (AFM) e desenvolvimento de pasta abrasiva utilizando óleo de oiticica, apresentam-se como uma necessidade diante dos problemas referentes ao processo de acabamento superficial de peças com pastas já existentes. O acabamento e polimento adequado da superfície, melhora a qualidade e a eficiência de desempenho do trabalho. Com isto, o presente trabalho, teve como objetivo principal, utilizar um equipamento e uma pasta alternativa para a usinagem de peças de liga de alumínio 6061-T6 e aço SAE 1045. Uma formulação preparada de pasta abrasiva com óleo de oiticica e partículas sólidas de carbetto de silício foi proposta e comparada com uma pasta convencional na usinagem dos dois metais em questão. Nos ensaios, foram analisados a massa, a rugosidade, a superfície dos corpos de prova e o diâmetro antes e após a usinagem. Ficou estabelecida a variação do número de ciclos na Usinagem por Fluxo Abrasivo, mantendo-se constante o tamanho e a concentração das partículas de metal nas pastas em estudo. A formulação da pasta com óleo de oiticica mostrou-se uma nova opção de pasta comercial em fase de desenvolvimento que pode vir a contribuir para um melhor desempenho na micro-usinagem de peças metálicas.

Palavras-chave: Usinagem por Fluxo Abrasivo. Óleo de Oiticica. Rugosidade. Análise tribológica.

ABSTRACT

MUNHOZ, Marcelo Rodrigo. **Case study of an abrasive paste using oiticica oil in an abrasive flow machining equipment.** 2017. 156 f. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2017.

The use of Abrasive Flow Machining (AFM) equipment and the development of abrasive paste using oiticica oil, objects of this dissertation, are a necessity in the face of the problems related to the surface finishing process of pieces with existing pastes. Proper surface finishing and polishing improves the quality and performance efficiency of the work. With this, the main objective of this work was to use an alternative equipment and paste for the machining of 6061-T6 aluminum alloy and SAE 1045 steel pieces. A prepared formulation of abrasive paste with oiticica oil and solid particles of silicon carbide was proposed and compared with a conventional paste in the machining of the two metals in question. In the tests, the mass, the roughness, the surface of the specimens and the diameter before and after the machining were analyzed. The variation of the number of cycles in the Abrasive Flow Machining was established, keeping the size and concentration of the metal particles in the studied pastes constant. The paste formulation with oiticica oil has proved to be a new commercial paste option in the development phase that may contribute to a better performance in the micro-machining of metal pieces.

Keywords: Abrasive Flow Machining. Oiticica oil. Roughness. Tribological analysis.

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Perda de massa n = 20 ciclos com a pasta convencional (g).....	47
Gráfico 2: Perda de massa n = 20 ciclos com a pasta desenvolvida (g).....	48
Gráfico 3: Perda de massa n = 60 ciclos com a pasta convencional (g).....	48
Gráfico 4: Perda de massa n = 60 ciclos com a pasta desenvolvida (g).....	49
Gráfico 5: Perda de massa n = 100 ciclos com a pasta convencional (g).....	49
Gráfico 6: Perda de massa n = 100 ciclos com a pasta desenvolvida (g).....	50
Gráfico 7: Rugosidade do alumínio n = 20 ciclos com a pasta convencional (µm).....	56
Gráfico 8: Rugosidade do alumínio n = 20 ciclos com a pasta desenvolvida (µm).....	56
Gráfico 9: Rugosidade do alumínio n = 60 ciclos com a pasta convencional (µm).....	57
Gráfico 10: Rugosidade do alumínio n = 60 ciclos com a pasta desenvolvida (µm).....	57
Gráfico 11: Rugosidade do alumínio n = 100 ciclos com a pasta convencional (µm).....	58
Gráfico 12: Rugosidade do alumínio n = 100 ciclos com a pasta desenvolvida (µm).....	58
Gráfico 13: Rugosidade do aço n = 20 ciclos com a pasta convencional (µm)...	63
Gráfico 14: Rugosidade do aço n = 20 ciclos com a pasta desenvolvida (µm)...	63
Gráfico 15: Rugosidade do aço n = 60 ciclos com a pasta convencional (µm)...	64
Gráfico 16: Rugosidade do aço n = 60 ciclos com a pasta desenvolvida (µm)...	64
Gráfico 17: Rugosidade do aço n = 100 ciclos com a pasta convencional (µm)..	65
Gráfico 18: Rugosidade do aço n = 100 ciclos com a pasta desenvolvida (µm)..	65
Gráfico 19: Diâmetro do alumínio n = 20 ciclos com a pasta convencional (mm).....	76
Gráfico 20: Diâmetro do alumínio n = 20 ciclos com a pasta desenvolvida (mm).....	76
Gráfico 21: Diâmetro do alumínio n = 60 ciclos com a pasta convencional (mm).....	77
Gráfico 22: Diâmetro do alumínio n = 60 ciclos com a pasta desenvolvida (mm).....	77
Gráfico 23: Diâmetro do alumínio n = 100 ciclos com a pasta convencional (mm).....	78
Gráfico 24: Diâmetro do alumínio n = 100 ciclos com a pasta desenvolvida (mm).....	78
Gráfico 25: Diâmetro do aço n = 20 ciclos com a pasta convencional (mm).....	79
Gráfico 26: Diâmetro do aço n = 20 ciclos com a pasta desenvolvida (mm).....	79
Gráfico 27: Diâmetro do aço n = 60 ciclos com a pasta convencional (mm).....	80

Gráfico 28: Diâmetro do aço n = 60 ciclos com a pasta desenvolvida (mm).....	80
Gráfico 29: Diâmetro do aço n = 100 ciclos com a pasta convencional (mm)....	81
Gráfico 30: Diâmetro do aço n = 100 ciclos com a pasta desenvolvida (mm)....	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Valores de Φ em função do número de repetições.....	43
Tabela 2: Número de repetições de acordo com o poder do teste.....	43
Tabela 3: Análise de variância do R_q para o alumínio.....	91
Tabela 4: Estimativas do R_q para os tipos de pastas para o alumínio.....	92
Tabela 5: Estimativas do R_q para os tipos de ciclos para o alumínio.....	92
Tabela 6: Análise de variância do R_z para o alumínio.....	92
Tabela 7: Estimativas do R_z para os tipos de pastas para o alumínio.....	92
Tabela 8: Estimativas do R_z para os tipos de ciclos para o alumínio.....	93
Tabela 9: Análise de variância do R_a para o aço.....	93
Tabela 10: Estimativas do R_a para os tipos de pastas para o aço.....	93
Tabela 11: Estimativas do R_a para os tipos de ciclos para o aço.....	93
Tabela 12: Análise de variância do R_q para o aço.....	94
Tabela 13: Estimativas do R_q para os tipos de pastas para o aço.....	94
Tabela 14: Estimativas do R_q para os tipos de ciclos para o aço.....	94
Tabela 15: Análise de variância do R_z para o aço.....	95
Tabela 16: Estimativas do R_z para os tipos de pastas para o aço.....	95
Tabela 17: Estimativas do R_z para os tipos de ciclos para o aço.....	95

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Plano de experimentos.....	44
Quadro 2: Massa das peças antes da AFM (g).....	46
Quadro 3: Massa das peças após a AFM (g).....	46
Quadro 4: Remoção média de material: Alumínio (g).....	50
Quadro 5: Remoção média de material: Aço (g).....	50
Quadro 6: Rugosidade média (Ra) do Alumínio (μm).....	51
Quadro 7: Rugosidade média (Rq) do Alumínio (μm).....	51
Quadro 8: Rugosidade média (Rz) do Alumínio (μm).....	51
Quadro 9: Rugosidade média (Ra) do Aço (μm).....	51
Quadro 10: Rugosidade média (Rq) do Aço (μm).....	51
Quadro 11: Rugosidade média (Rz) do Aço (μm).....	51
Quadro 12: Rugosidade das peças de alumínio antes da usinagem (μm).....	52
Quadro 13: Rugosidade (Ra) das peças de alumínio após a usinagem (μm).....	53
Quadro 14: Rugosidade (Rq) das peças de alumínio após a usinagem (μm).....	54
Quadro 15: Rugosidade (Rz) das peças de alumínio após usinagem (μm).....	55
Quadro 16: Rugosidade das peças de aço antes da usinagem (μm).....	59
Quadro 17: Rugosidade (Ra) das peças de aço após a usinagem (μm).....	60
Quadro 18: Rugosidade (Rq) das peças de aço após a usinagem (μm).....	61
Quadro 19: Rugosidade (Rz) das peças de aço após a usinagem (μm).....	62
Quadro 20: Diâmetro antes da AFM (mm).....	75
Quadro 21: Diâmetro após a AFM (mm).....	75
Quadro 22: Diâmetro médio das peças de Alumínio (mm).....	82
Quadro 23: Diâmetro médio das peças de Aço (mm).....	82

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Árvore oiticica (Licânia rígida Benth).....	20
Figura 2: Fruto de oiticica.....	21
Figura 3: Mecanismo de remoção de material do processo AFM.....	26
Figura 4: Processo unidirecional AFM.....	27
Figura 5: Processo de Usinagem por Fluxo Abrasivo em dois sentidos.....	27
Figura 6: AFM Orbital: (a) antes do término e (b) terminado.....	28
Figura 7: Diagrama esquemático do MAFM.....	29
Figura 8: Diagrama esquemático do MRAFF.....	30
Figura 9: Diagrama esquemático do CFAAFM.....	30
Figura 10: Diagrama esquemático do ECAFM.....	31
Figura 11: Diagrama esquemático do DBG-AFF.....	32
Figura 12: Diagrama esquemático do R-AFF.....	33
Figura 13: Diagrama esquemático do UAAF.....	33
Figura 14: Diagrama esquemático do R-MRAFF.....	34
Figura 15: O fluxo do material pode ser variado para conseguir resultados diferentes de acabamento superficial.....	34
Figura 16: O fluxo do material nas bordas da peça de trabalho.....	35
Figura 17: Equipamento de Usinagem por Fluxo Abrasivo.....	40
Figura 18: Rugosímetro utilizado.....	40
Figura 19: Balança utilizada para medir as massas das peças.....	41
Figura 20: Peças de Alumínio.....	42
Figura 21: Peças de Aço.....	42
Figura 22: Efeito do número de ciclos sobre a textura da superfície do alumínio 1 (n = 20) com a pasta convencional.....	67
Figura 23: Efeito do número de ciclos sobre a textura da superfície do alumínio 11 (n = 100) com a pasta convencional.....	68
Figura 24: Efeito do número de ciclos sobre a textura da superfície do alumínio 16 (n = 20) com a pasta desenvolvida.....	69
Figura 25: Efeito do número de ciclos sobre a textura da superfície do alumínio 26 (n = 100) com a pasta desenvolvida.....	70
Figura 26: Efeito do número de ciclos sobre a textura da superfície do aço 1 (n = 20) com a pasta convencional.....	71
Figura 27: Efeito do número de ciclos sobre a textura da superfície do aço 11 (n = 100) com a pasta convencional.....	72

Figura 28: Efeito do número de ciclos sobre a textura da superfície do aço 16 (n = 20) com a pasta desenvolvida.....	73
Figura 29: Efeito do número de ciclos sobre a textura da superfície do aço 26 (n=100) com a pasta desenvolvida.....	74
Figura 30: Efeito do número de ciclos sobre a variação do diâmetro da peça de alumínio 1 (n = 20) com a pasta convencional.....	83
Figura 31: Efeito do número de ciclos sobre a variação do diâmetro da peça de alumínio 11 (n = 100) com a pasta convencional.....	84
Figura 32: Efeito do número de ciclos sobre a variação do diâmetro da peça de alumínio 16 (n = 20) com a pasta desenvolvida.....	85
Figura 33: Efeito do número de ciclos sobre a variação do diâmetro da peça de alumínio 26 (n = 100) com a pasta desenvolvida.....	86
Figura 34: Efeito do número de ciclos sobre a variação do diâmetro da peça de aço 1 (n = 20) com a pasta convencional.....	87
Figura 35: Efeito do número de ciclos sobre a variação do diâmetro da peça de aço 11 (n = 100) com a pasta convencional.....	88
Figura 36: Efeito do número de ciclos sobre a variação do diâmetro da peça de aço 16 (n = 20) com a pasta desenvolvida.....	89
Figura 37: Efeito do número de ciclos sobre a variação do diâmetro da peça de aço 26 (n = 100) com a pasta desenvolvida.....	90

LISTA DE ABREVIATURAS

AFF	Acabamento por fluxo abrasivo
AFM	Usinagem por fluxo abrasivo
c	Concentração de partículas abrasivas
C	Convencional
CFAAFM	Usinagem por fluxo abrasivo por força centrífuga
D	Desenvolvida
DBG-AFF	Processo de acabamento por fluxo abrasivo – guia abrasivo
ECAFM	Usinagem por fluxo abrasivo eletroquímico
ECM	Usinagem eletroquímica normal
g	Grama
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
mm	milímetro
MAFM	Usinagem por fluxo abrasivo magnético
MRAFF	Processo de acabamento por fluxo abrasivo magnetorreológico
MRR	Taxa de remoção de material
n	Número de ciclos
R-AFF	Acabamento por fluxo abrasivo rotativo
RM	Remoção de material
R-MRAFF	Processo de acabamento por fluxo abrasivo magnetorreológico rotativo
t	Tamanho das partículas abrasivas
UAAFMM	Usinagem por fluxo abrasivo com ultra-som
v	Velocidade de fluxo da pasta
μm	micrometro

LISTA DE SÍMBOLOS

a	Número de níveis do fator A
b	Número de níveis do fator B
D	Diferença entre duas médias (na linha)
H ₀	Hipótese nula
n	Número de repetições
P	Probabilidade
R _a	Desvio médio aritmético
R _q	Desvio médio quadrático
R _z	Altura das irregularidades dos 10 pontos
v ₁	Grau de liberdade de fator A
v ₂	Grau de liberdade do resíduo
β	Poder do teste
φ	Parâmetro do curso operacional
φ ²	Número de repetições para um delineamento fatorial
σ ²	Variância
>	Maior que

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	18
1.1	Objetivos.....	22
1.1.1	Objetivo geral.....	22
1.1.2	Objetivos específicos.....	22
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	23
2.1	Usinagem por Fluxo Abrasivo (AFM).....	23
2.2	Pasta Abrasiva.....	35
2.3	Grãos Abrasivos.....	36
2.3.1	Concentração de partículas abrasivas (c).....	36
2.3.2	Tamanho das partículas abrasivas (t).....	37
2.4	Rugosidade Superficial.....	38
2.4.1	Rugosidade Média Aritmética (Ra).....	38
2.4.2	Rugosidade Máxima (Rq).....	38
2.4.3	Rugosidade (Rz).....	38
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	39
3.1	Configuração do Equipamento e Procedimento de Ensaios.....	39
3.2	Procedimento Experimental.....	41
3.3	Planejamento Experimental.....	42
3.4	Número de ciclos (n)	45
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	46
4.1	Remoção de Material (RM)	46
4.1.1	Número de ciclos (n).....	46
4.2	Rugosidade Superficial.....	51
4.2.1	Número de ciclos (n).....	51
4.2.2	Rugosidade superficial em função número de ciclos e da pasta abrasiva.....	63
4.3	Análise da Superfície Usinada.....	65
4.3.1	Número de ciclos (n).....	66
4.4	Variação do Diâmetro das Peças.....	75
4.4.1	Número de ciclos (n).....	82
4.5	Análise Estatística de Dados.....	91
4.5.1	Análise dos dados de rugosidade para o alumínio.....	91

4.5.1.1	Rugosidade R_q	91
4.5.1.2	Rugosidade R_z	92
4.5.2	Análise dos dados de rugosidade para o aço.....	93
4.5.2.1	Rugosidade R_a	93
4.5.2.2	Rugosidade R_q	94
4.5.2.3	Rugosidade R_z	94
5	CONCLUSÕES.....	96
5.1	Sugestões para Trabalhos Futuros.....	97
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	98
7	APÊNDICE A.....	104

1 INTRODUÇÃO

A precisão dimensional e de alinhamento, bem como a qualidade do acabamento da superfície, são levados em conta por processos como a usinagem, polimento, afiação (ou seja, métodos tradicionais de acabamento). Essas operações de acabamento representam uma fase crítica e de alto custo para os processos globais de produção. A maioria desses trabalhos são intensivos, e essas áreas incontroláveis na fabricação de peças de precisão envolvem operações de acabamentos finais, que geralmente exigem tanto quanto 15% do custo total de fabricação. É necessário prestar atenção à otimização do processo de usinagem (MULLER, 2014; NOVAK, 2012).

As aplicações de processos de acabamento tradicionais são abrasivas, limitadas à produção de peças de formas básicas, como plana, cilíndrica, etc. Existem acabamentos de peças de difíceis usinagens para seus limites de desempenho, especialmente em componentes de materiais de formas complicadas (GUPTA, 2015).

Com isso, existe a necessidade de desenvolver um processo de acabamento com limites mais amplos de áreas de aplicação, melhor desempenho de qualidade, maior produtividade e possibilidade de automatização da operação. A Usinagem por Fluxo Abrasivo (AFM) é um processo que atende estes requisitos.

O processo AFM está em seus estágios iniciais de desenvolvimento e a literatura publicada disponível trata de uma descrição qualitativa do processo e suas aplicações. A capacidade de abrasão do abrasivo é influenciada por muitos fatores, especialmente por tamanho de grão, concentração abrasiva, pressão de extrusão e dureza do material da peça de trabalho. A fim de se analisar a influência de tais parâmetros e outras condições de AFM após a remoção do material e rugosidade da superfície usinada, investigações experimentais foram realizadas por muitos pesquisadores (JAIN, 1999; BARLETTA, 2005).

Estudos mostraram que na Usinagem por Fluxo Abrasivo, após alguns ciclos iniciais, ocorrem as remoções de materiais (RM) e melhoria na rugosidade da superfície da peça de trabalho (McCARTY, 1970), (SHAN, 1997), (JAIN, 1999) e (SINGH, 2002).

GORANA et al. (2004) estudaram a pasta na Usinagem por Fluxo Abrasivo, e parâmetros como a pressão da pasta, a concentração e o tamanho da malha do

carboneto de silício no processo. Mostraram a influência desses parâmetros sobre a rugosidade superficial resultante.

A Usinagem por Fluxo Abrasivo é um processo de usinagem não tradicional que remove o material da superfície da peça e produz tensões residuais compressivas. Este processo tem sido usado em todo o mundo desde 1960 e está ganhando grande atenção devido à capacidade da pasta de produzir acabamento em áreas de difícil acesso, seguir contornos complexos e trabalhar simultaneamente em vários cantos e superfícies, fazendo com que este processo seja mais versátil do que os outros processos de acabamento, produzindo resultados previsíveis, reproduzíveis e consistentes (JAIN, 1999; RAJESHA, 2010).

As aplicações deste processo incluem o acabamento de precisão de componentes médicos e aeroespaciais, matrizes para produção de alto volume de peças eletrônicas e automotivas (JAIN, 2002). Vários materiais têm alcançado sucesso na micro-usinagem com este processo, variando desde materiais macios como o alumínio até às duras ligas de níquel, as cerâmicas e carbonetos (RHOADES, 1987). Materiais como o aço também foram estudados (FANG, 2009 e UHLMANN, 2005).

A Usinagem por Fluxo Abrasivo pode produzir acabamentos de superfícies de até $0,05 \mu\text{m}$, desbastar furos pequenos com diâmetros de $0,2 \text{ mm}$, gerar superfícies curvas com raios variando de $0,025 \text{ mm}$ à $1,5 \text{ mm}$ e tolerâncias de furos de até $\pm 5 \text{ mm}$ (JAIN, 1999).

A qualidade de acabamento da superfície pode melhorar drasticamente o desempenho do produto e o tempo de vida da peça, removendo concentradores de tensão em cantos afiados, produzindo raios controlados nas bordas e pode também melhorar substancialmente as resistências mecânica e à fadiga dos componentes a serem utilizados. Nos primeiros ciclos resulta em cerca de 90% da melhoria total do acabamento superficial.

Na Usinagem por Fluxo Abrasivo um composto abrasivo semi-sólido e flexível ("pasta") é carregado e forçado a passar, por um processo de extrusão, sobre a superfície a ser usinada de uma ou mais peças de trabalho, removendo pequenas quantidades de material a cada passada. A pasta é composta pelo semi-sólido transportador e pelos grãos abrasivos, ou seja, ela funciona como uma lixa e suas partículas atuam como ferramentas de corte. A ação abrasiva durante o processo depende da pressão de extrusão, do volume e da velocidade do fluxo da pasta

determinada pela configuração da máquina (equipamento) e pela área de passagem da pasta, considerando o tipo de pasta que vai ser utilizada, a sua formulação inclui a viscosidade, o tipo e o tamanho dos abrasivos (MALI, 2012). Contudo, a influência de três variáveis controláveis (pressão de extrusão, concentração e tamanho de grão abrasivo) são respostas para a remoção de material (valor RM) e redução na rugosidade da superfície (valor Ra).

Portanto, um equipamento que seja capaz de realizar o processo de Usinagem por Fluxo Abrasivo, em conjunto com o desenvolvimento de uma pasta abrasiva com óleo de oiticica seria de grande importância.

A *Licânia rígida Benth*, vegetação conhecida regionalmente como oiticica, pertence à família Crysobalanaceae, típica de matas ciliares da caatinga, cresce em aluviões profundos das bacias hidrográficas dos rios e riachos que se encontram nas regiões do Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte e Paraíba, principalmente no sertão (SILVA FILHO, 2010).

Segundo Bayma (1957) é da amêndoa que se extrai o maior teor de óleo, utilizado em larga escala pelas indústrias produtoras de tintas automotivas, de impressoras, vernizes, esmaltes finos e lonas. A Figura 1 apresenta a árvore de oiticica.

Figura 1: Árvore oiticica (*Licânia rígida Benth*).



Fonte: Obaudemacau (1957).

A oiticica tem seu potencial subutilizado, sendo muitas vezes empregada somente na indústria de sabão, é uma espécie que apresenta elevado rendimento em relação a outras na produção de óleo. De acordo com Pinto (1963), a amêndoa ocupa cerca de 70% da constituição do fruto e possui um teor de 60 % a 63 % de óleo.

Figura 2: Fruto de oiticica.



Fonte: Lideragronomia (1963).

Para otimizar as propriedades de superfícies geradas, é muito importante analisar o uso de recursos, custos e sustentabilidade do processo global (LINKE, 2012).

Com a utilização do equipamento pretende-se garantir a precisão do componente em trabalho, a eficiência do processo, economia e automação eficaz. Os benefícios alcançados que se deseja são de grande importância em relação aos métodos tradicionais, com economia de tempo e um melhor controle na precisão das superfícies de rolamento que estão sendo trabalhadas.

Assim, propõe-se nesse trabalho a qualificação e utilização do equipamento para realização da Usinagem por Fluxo Abrasivo e o desenvolvimento de uma pasta alternativa para ser empregada neste processo de usinagem.

1.1 Objetivos

O presente trabalho possui como objetivos:

1.1.1 Objetivo geral

- Qualificar um equipamento de Usinagem por Fluxo Abrasivo (AFM) e desenvolver uma pasta abrasiva com óleo de oiticica por meio da realização de ensaios experimentais.

1.1.2 Objetivos específicos

- Desenvolver uma pasta abrasiva alternativa a fim de comparar o seu desempenho com uma pasta abrasiva convencional de mercado;
- Mensurar a melhor proporção dos componentes da pasta para melhorar a rugosidade superficial das peças de trabalho;
- Verificar comparativamente por meio da Análise Estatística de Dados, a influência do número de ciclos e da pasta abrasiva sobre os valores de rugosidade (parâmetros Ra, Rq e Rz) das peças de trabalho;
- Analisar os resultados dos ensaios com o auxílio de imagens das superfícies usinadas das peças de trabalho por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV);
- Fotografar as diferenças notáveis entre os padrões das marcas de abrasão produzidas sobre as superfícies das peças de trabalho antes e após o emprego do processo AFM, para comprovar a eficácia do equipamento;
- Registrar a variação dimensional dos diâmetros internos das peças de trabalho, antes e após o emprego do processo AFM.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para isso, a primeira etapa foi a da revisão bibliográfica, focando em temas relacionados ao equipamento de Usinagem por Fluxo Abrasivo, desenvolvimento de pasta, qualidade de acabamento, além de estudos sobre o processo de usinagem.

Levantamento de literatura foi realizado para explorar os vários parâmetros de processo de Usinagem por Fluxo Abrasivo e seus efeitos sobre as variáveis de saída (GUPTA, 2013 e 2014), (CHERIAN, 2013), (SOMASHEKHAR, 2013) e (SAAD, 2010). A usinagem abrasiva é um processo que envolve a utilização de produtos abrasivos no acabamento superficial de objetos e peças metálicas mais endurecidas. Os produtos abrasivos, com grânulos, ou pequenos grãos, servem para a remoção de materiais que formam camadas sobrepostas às superfícies metálicas. Os grãos permitem o trabalho de usinagem abrasiva, e com isso é possível conseguir o corte de materiais duros e enrijecidos. As partículas dos grãos, quando sofrem pressão e são friccionadas na peça, desgasta a superfície pouco a pouco. O processo acaba tendo como variáveis de saída à remoção de material superficial, o suficiente para criar um corte ou uma fenda na parte metálica, ou o polimento na peça de trabalho melhorando o acabamento superficial. Os grãos na pasta são ideais para trabalhar em grandes superfícies ou com superfícies de difícil alcance. As cavidades internas, ou diâmetros, podem ser suavizados por esse processo.

2.1 Usinagem por Fluxo Abrasivo (AFM)

O processo de usinagem é utilizado em todas as indústrias de fabricação mecânica para garantir as dimensões e o nível de acabamento superficial dos componentes produzidos. As indústrias estão gastando uma enorme quantidade de dinheiro para obter o acabamento e a textura da superfície necessária após os componentes serem usinados (SANTHOSH, 2016). Isso exigirá avançados processos de acabamento não convencional. A Usinagem por Fluxo Abrasivo (AFM) é um dos processos de acabamento não convencionais em que um meio semi-sólido consistindo de um polímero viscoelástico e partículas abrasivas são misturadas em proporção definida. Esta pasta é extrudida sob pressão através da superfície para obter o acabamento necessário.

O desenvolvimento em engenharia e tecnologia precisa de alta precisão em produtos miniaturizados estão sendo constantemente estudados. Uma pequena rebarba ou arranhão causará grandes perdas, como perda de energia no motor, falha de dispositivos aeroespaciais, mau funcionamento de componentes, etc. As indústrias estão se esforçando muito e gastando grande quantidade de dinheiro no acabamento desses componentes para minimizar as rebarbas ou polimentos desses componentes. Nas últimas quatro décadas, as indústrias estão usando um tipo tradicional de processos de acabamento necessário nos componentes usinados. Mas estes processos tradicionais de acabamento são limitados a geometrias particulares e não podem ser aplicáveis a geometrias complexas e irregulares. Limitações dos processos tradicionais de acabamento levam ao desenvolvimento de processos avançados de acabamento – (AFM), usado para usinar peças com características internas difíceis.

A Usinagem por Fluxo Abrasivo é um processo estritamente mecânico, derivado do processo de usinagem por jato de água usado para alisar, polir e remover as rachaduras e as rebarbas de difícil acesso ou de superfícies internas de máquinas, peças e produtos (BREMERSTEIN, 2015; SHIMING, 2016).

O processo tem a capacidade de terminar qualquer geometria, permitindo que a pasta polimérica carregada com o abrasivo, flua sobre a superfície a ser usinada (PERRY, 1975; RHOADES, 1989).

Muitos pesquisadores avaliaram a relação de força de usinagem para correlacioná-la com a variação percentual da rugosidade (R_a) da superfície da peça de trabalho usinada (SHAW, 1996; LAL, 1968).

O acabamento da superfície pode ser otimizado usando tamanho de grãos maiores nas concentrações das pastas (BORCHERS, 1980; KAR, 2009), ou seja, no material que contém maior dureza onde a usinagem primária é mais difícil, fazendo com que o acabamento superficial melhore.

A Usinagem por Fluxo Abrasivo trabalha com vários materiais metálicos como aço, aço inoxidável, alumínio, zinco, latão, ferro fundido, titânio e ligas de níquel, assim como em materiais termoplásticos, que não podem ser usinados pelos processos de usinagem convencionais de forma eficiente e econômica. O objetivo deste processo é produzir um acabamento de nível nano nos componentes usinados, com economia de tempo. Hoje a Usinagem por Fluxo Abrasivo é considerada como um dos melhores métodos para o acabamento de geometrias complexas não acessíveis pelas

ferramentas de acabamento convencionais. Muitos pesquisadores estão constantemente tentando melhorar o desempenho do processo AFM.

Utiliza-se uma pasta quimicamente inativa e não corrosiva, similar a uma argila macia, para melhorar o acabamento superficial e as condições das arestas.

A Usinagem por Fluxo Abrasivo é um processo de usinagem controlável. Pode-se controlar o tipo de pasta, a taxa de fluxo da pasta, a pressão, o volume e a temperatura da pasta e conseqüentemente, a quantidade de material que é removido. Existe a possibilidade de utilizar uma vasta gama de concentrações de partículas abrasivas nas pastas (RAJURKAR, 1999)

Williams e Rajurkar (1989), realizaram experiências para estudar o efeito da pressão e da viscosidade da pasta na remoção de material e no acabamento superficial. Com a ajuda da microscopia eletrônica de varredura (MEV), concluíram que existe uma melhora significativa no revestimento da superfície dentro de alguns ciclos de trabalho.

A Usinagem por Fluxo Abrasivo pode ser aplicada para conseguir uma grande variedade de resultados previsíveis e reproduzíveis. Materiais que vão desde alumínio macio, até os mais resistentes como ligas de níquel, cerâmica e carbonetos podem se “micro-usinados” com êxito neste tipo de processo (RHOADES, 1991).

Przylenk (1986), em seus estudos relatou que a pasta não deve ser colocado em trabalho em temperaturas superiores a 100°C.

A partir do levantamento da literatura, a Usinagem por Fluxo Abrasivo é um processo relativamente novo, embora cerca de 2000 máquinas estejam em uso em todo mundo.

Áreas de difícil acesso e passagens internas complexas podem ser trabalhadas de forma econômica e produtiva. Os sistemas automáticos de Usinagem por Fluxo Abrasivo podem lidar com milhares de peças por dia, reduzindo os custos do trabalho, eliminando a mão de obra e oferecendo cerca de 90% de redução de tempo em operações de acabamento manual (SINGH, 2002).

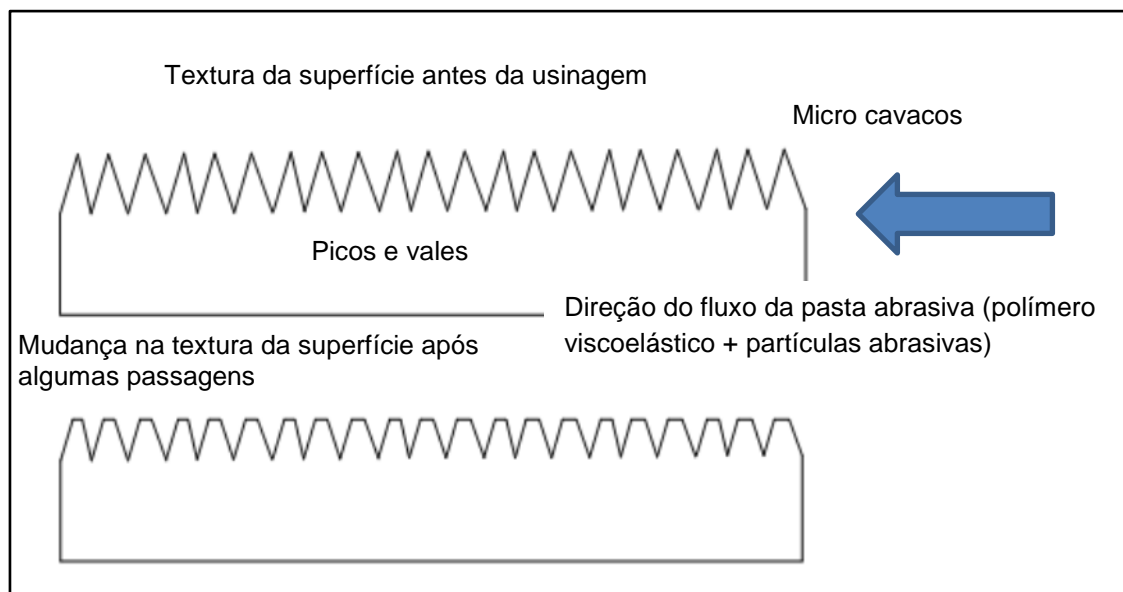
Para qualquer aplicação, melhoria do acabamento superficial, geração de raios de arredondamento e/ou remoção de material, é possível determinar e monitorar uma taxa de "corte" por unidade de volume, de modo a garantir a uniformidade.

Przylenk (1986) descreveu que com um pequeno diâmetro da geometria da peça, mais os grãos abrasivos que entram com contato com a superfície da peça a ser usinada ocorre a remoção do material (BRAR, 2014).

Perry (1989) relatou que a abrasão é elevada quando a velocidade do fluxo da pasta é alta. Nos experimentos deste trabalho, a velocidade do fluxo da pasta será imposta manualmente pelo acionamento da alavanca do equipamento.

Os principais componentes na Usinagem por Fluxo Abrasivo incluem a própria máquina, as peças de trabalho e a pasta abrasiva (RHOADES, 1991). O mecanismo de remoção de material inclui três modos de deformação: a deformação elástica, a deformação plástica e o micro corte do material. Estes modos de deformação dependem fortemente da magnitude do corte, das forças que agem sobre um grão abrasivo individual e da profundidade de corte do abrasivo na peça de trabalho (GORANA, 2006). A Figura 3 mostra o mecanismo de remoção de material do processo AFM.

Figura 3: Mecanismo de remoção de material do processo AFM.

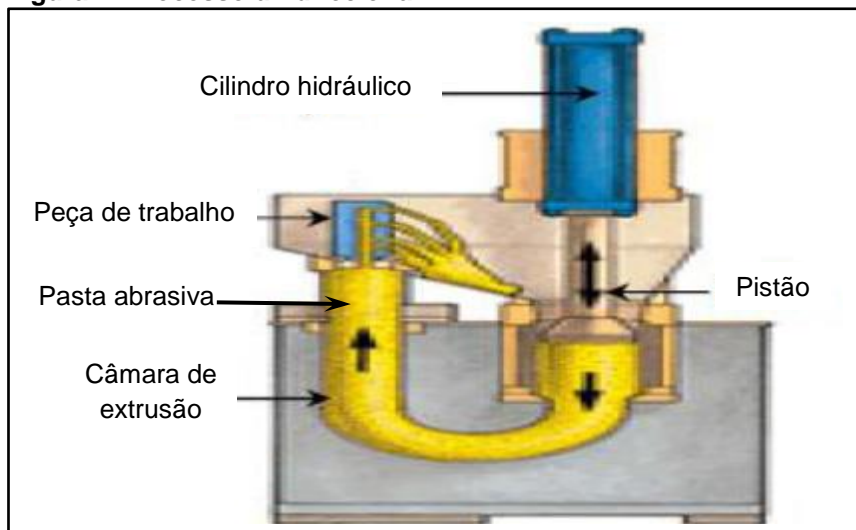


Fonte: Kumar (2016).

Com base no movimento das pastas abrasivas, as máquinas de fluxo abrasivo são classificadas em três tipos:

- a) AFM em um sentido: A pasta abrasiva é pressionada em uma direção como mostrado na Figura 4 (RHOADES, 1994).

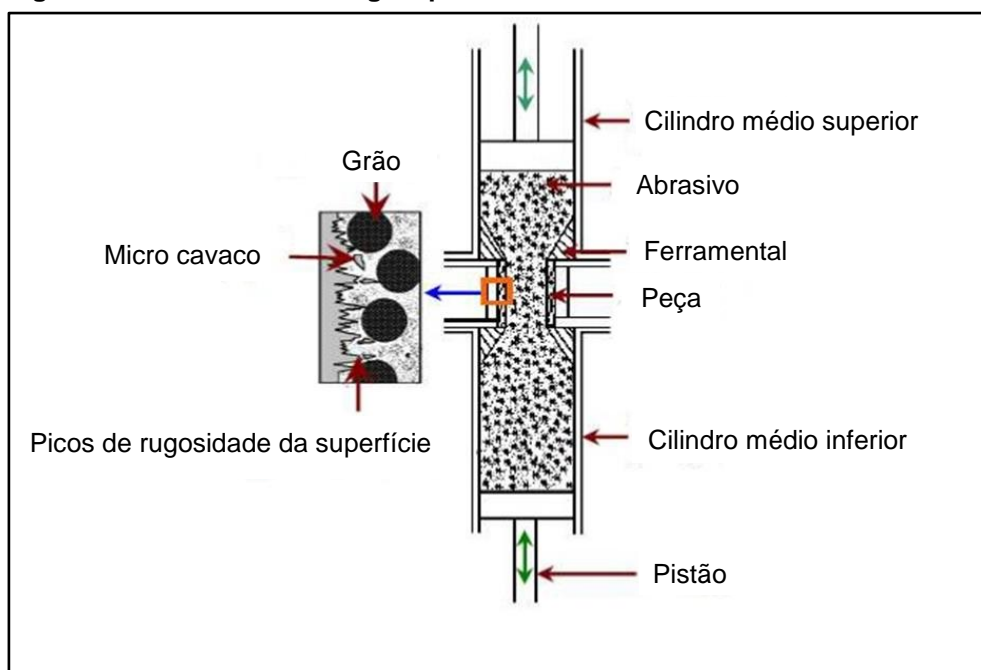
Figura 4: Processo unidirecional AFM.



Fonte: Rhoades (1994).

- b) AFM em dois sentidos: Um equipamento de Usinagem por Fluxo Abrasivo composto por dois cilindros verticalmente opostos, acionados hidráulicamente para cima e para baixo para expulsar a pasta abrasiva semi-sólida através das passagens formadas pela peça de trabalho e pela ferramenta é mostrado na Figura 5.

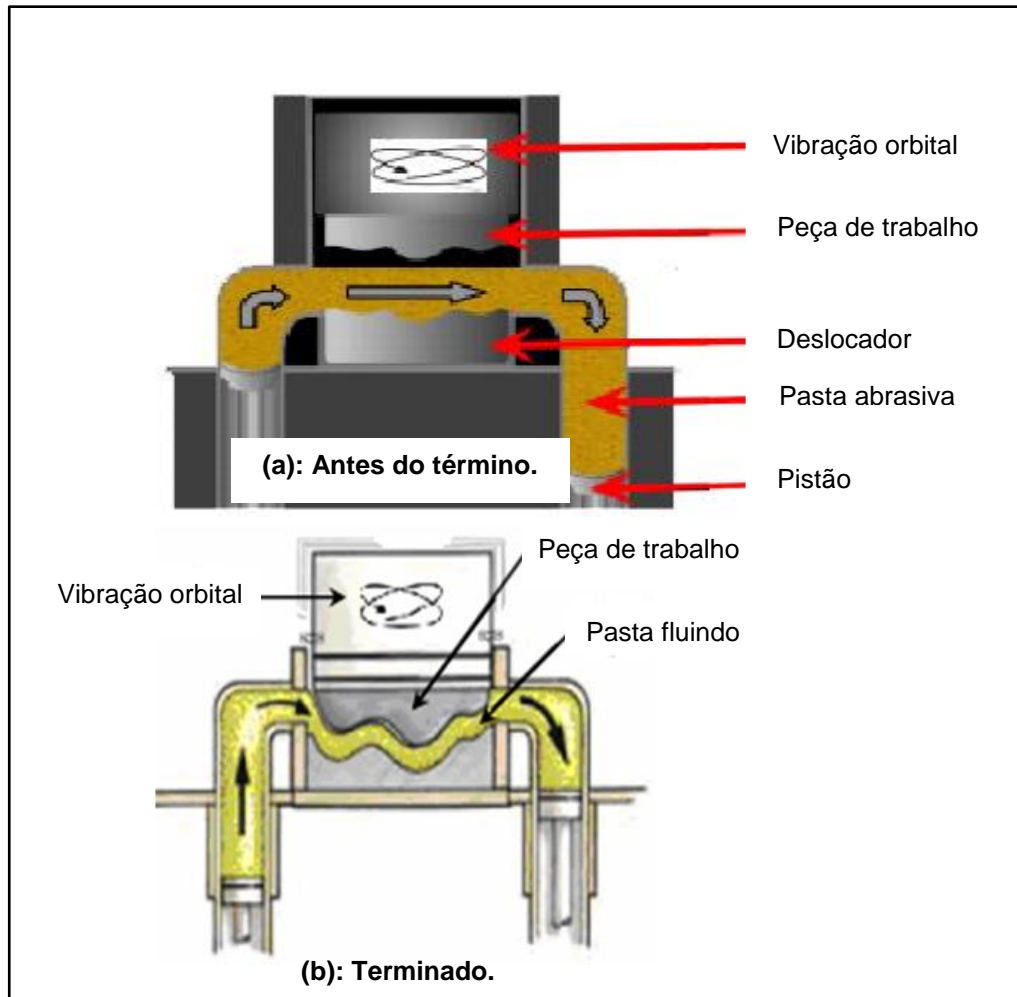
Figura 5: Processo de Usinagem por Fluxo Abrasivo em dois sentidos.



Fonte: Rhoades (1991).

- c) AFM Orbital: são aplicadas pequenas vibrações orbitais na peça de trabalho como mostrado na Figura 6 (GILMORE, 2001).

Figura 6: AFM Orbital (a) antes do término e (b) terminado.



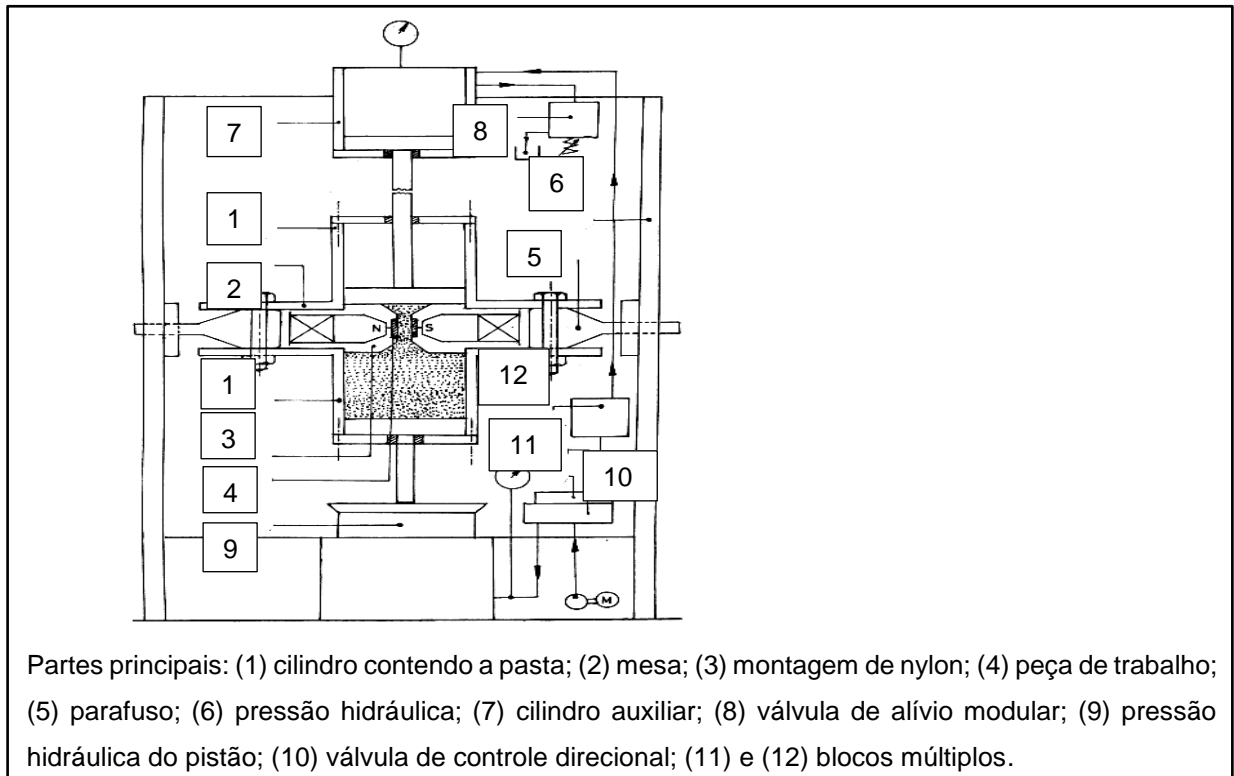
Fonte: Gilmore (2001).

A AFM é um processo lento porque tempo total para alcançar o acabamento exigido é longo e a taxa de remoção de material é menor. Para melhorar o desempenho do processo AFM, muitos pesquisadores desenvolveram os processos de usinagem híbridos em que vários processos de usinagem são combinados com o processo AFM para alcançar a maior Taxa de Remoção de Material (MRR) e o acabamento de superfície necessário em menor tempo. Alguns dos desenvolvimentos recentes híbridos nos processos AFM são apresentados.

Singh e Shan (2002) desenvolveram o processo de Usinagem por Fluxo Abrasivo Magnético (MAFM) para melhorar a taxa de remoção do material e reduzir a rugosidade da superfície aplicando um campo magnético em torno da peça de

trabalho. A técnica ANOVA tem sido usada para identificar os parâmetros mais significativos - densidade de fluxo magnético, fluxo de volume, número de ciclos, volume de fluxo médio, tamanho de grão abrasivo, concentração abrasiva e proporções de redução. O maior acabamento superficial e MRR é observado em MAFM sobre AFM. O diagrama esquemático do MAFM é mostrado na Figura 7.

Figura 7: Diagrama esquemático do MAFM.



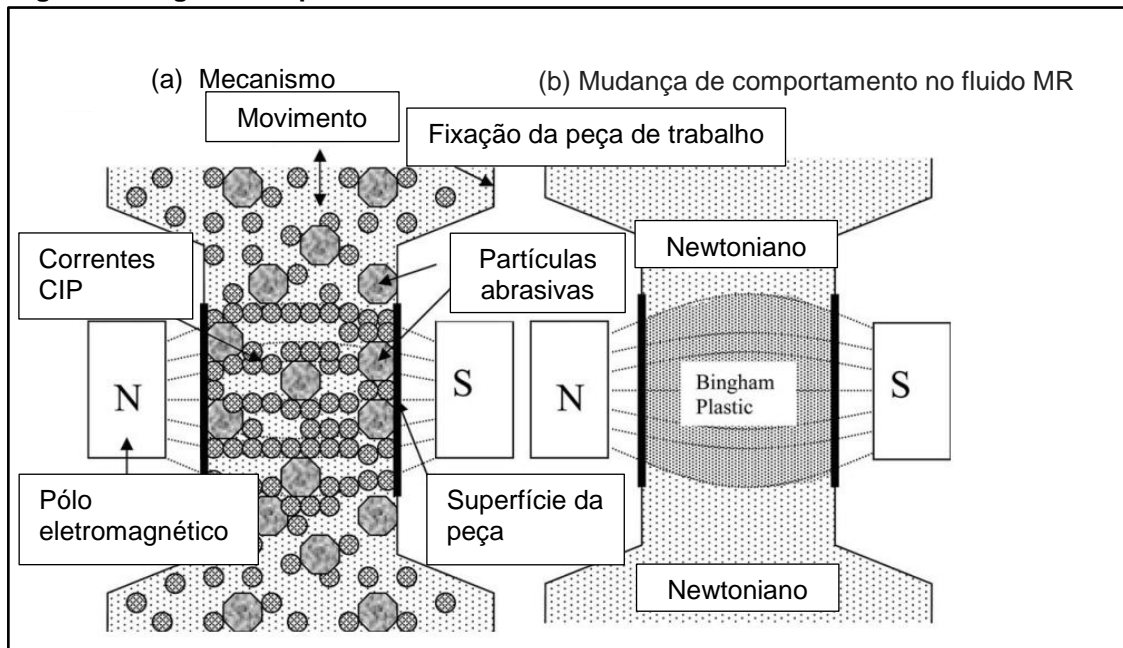
Fonte: Singh (2002).

Jha e Jain (2004) exploraram o processo de Acabamento de Fluxo Abrasivo Magnetorreológico (MRAFF) para o acabamento complexo de geometrias internas como mostrado na Figura 8. Neste processo, o fluido de polimento magnetorreológico consiste em ferro carbonílico onde os abrasivos em pó e em carboneto de silício são misturados com graxa de base viscoelástica e óleo mineral usado para o acabamento em peças de aço inoxidável. Nenhuma melhoria no acabamento superficial em condições de campo magnético zero e 30% de melhora foram observados nos acabamentos superficiais com alta intensidade de campo magnético.

Walia et al. (2006) tentaram melhorar o desempenho do processo AFM aplicando uma força centrífuga sobre a pasta abrasiva, através da introdução da força centrífuga rotativa pela haste na passagem da peça de trabalho. O processo é

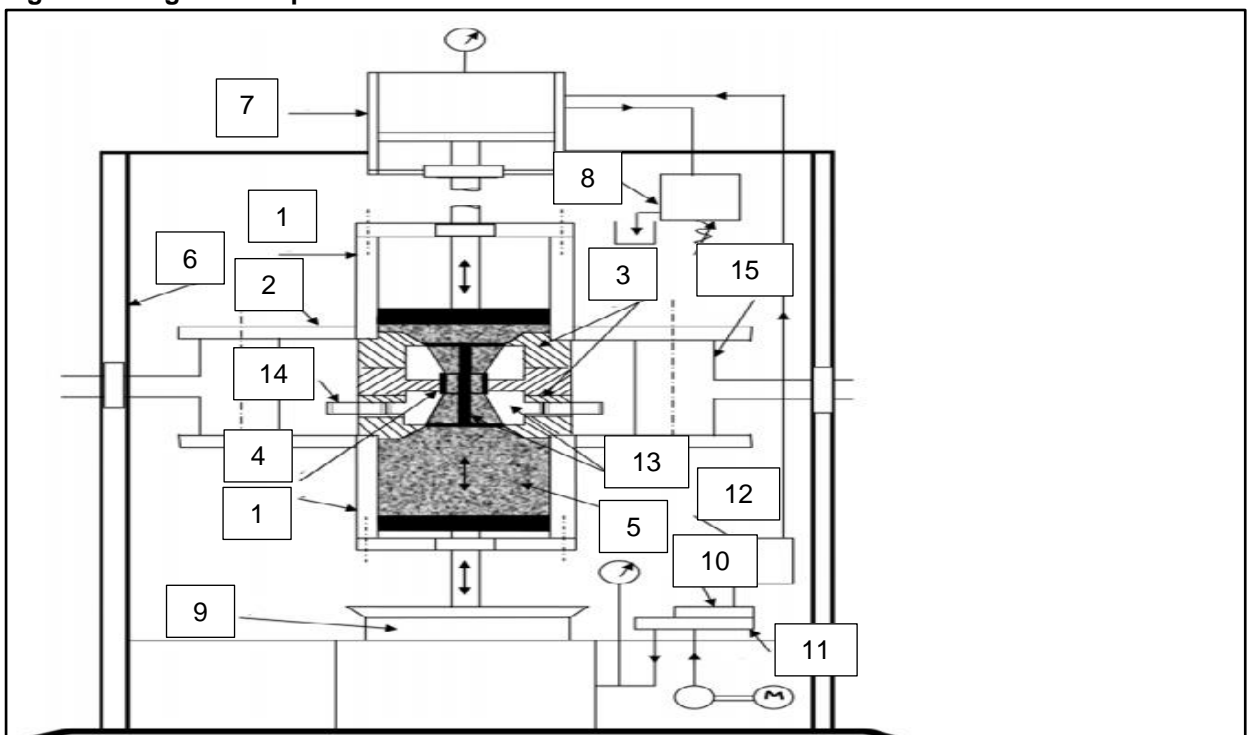
denominado Usinagem por Fluxo Abrasivo assistido por força centrífuga (CFAAFM) como mostrado na Figura 9.

Figura 8: Diagrama esquemático do MRAFF.



Fonte: Jha (2004).

Figura 9: Diagrama esquemático do CFAAFM.

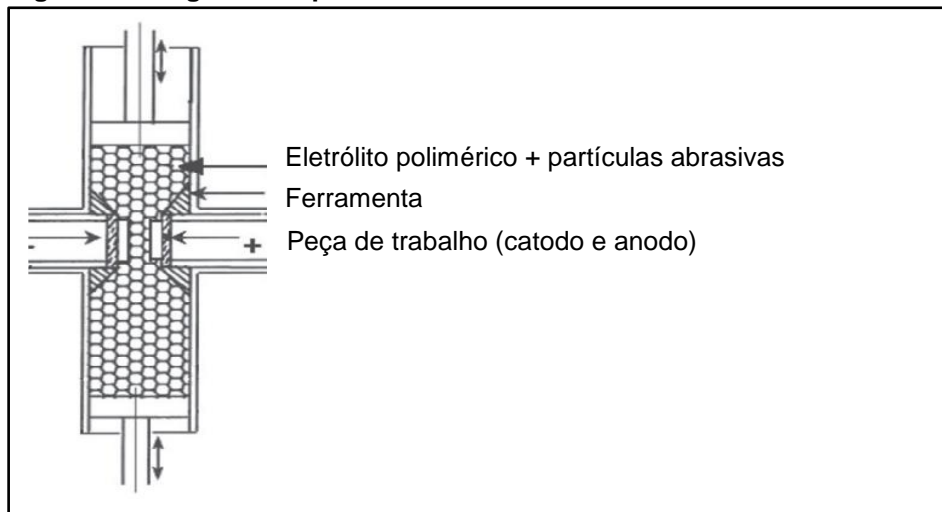


Partes principais: (1) cilindro contendo a pasta; (2) mesa; (3) montagem; (4) peça de trabalho; (5) carregamento de pasta abrasiva; (6) pressão hidráulica; (7) cilindro auxiliar; (8) válvula de alívio modular; (9) pressão hidráulica do pistão; (10) válvula de controle direcional; (11, 12) blocos múltiplos; (13) conjunto giratório de haste CFG; (14) engrenagem; (15) parafuso.

Fonte: Walia (2006).

Dabrowski et al. (2006) desenvolveram o Processo de Usinagem por Fluxo Abrasivo Eletroquímico (ECAFM), usando eletrólitos poliméricos para suavizar as superfícies planas como mostrado na Figura 10. A condutividade iônica dos eletrólitos é menor do que a condutividade de eletrólitos empregados na Usinagem Electroquímica Normal (ECM). Adições de enchimentos inorgânicos para os eletrólitos na forma de abrasivos diminuem ainda mais a condutividade. Essas considerações explicam porque o intervalo do eletrodo interno através do qual o eletrólito polimérico é forçado deve ser pequeno. Isto por sua vez resulta em maior resistência ao escoamento do eletrólito polimérico, que assume a forma de uma pasta semi-líquida. Polímeros eletrólitos como polímeros gelados e géis de água à base de acrilamida foram utilizados para investigações experimentais.

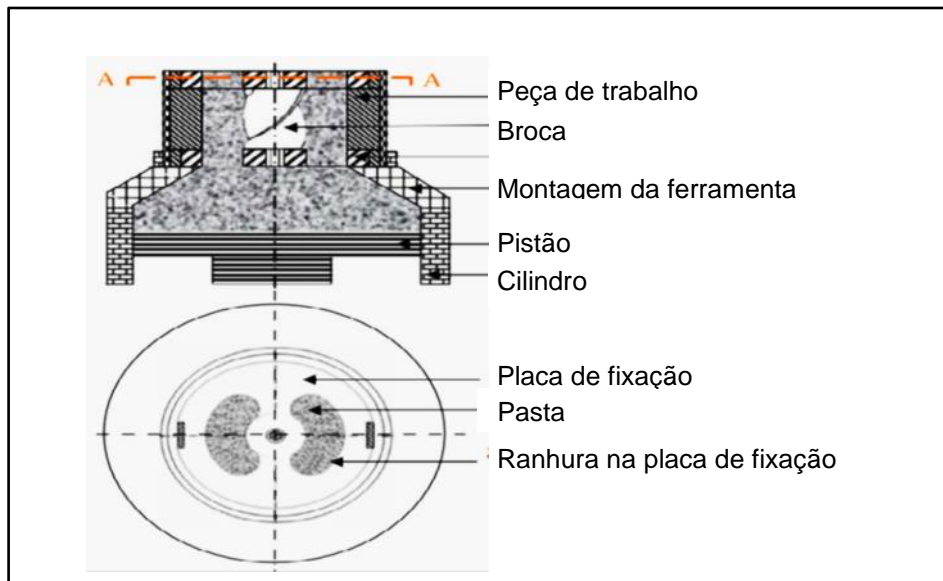
Figura 10: Diagrama esquemático do ECAFM.



Fonte: Dabrowski (2006)

Para melhorar o desempenho do processo de acabamento por fluxo abrasivo, (SANKAR et al., 2009) introduziram o conceito de girar a pasta ao longo de seu eixo para alcançar maior taxa de acabamento e remoção de material e esse processo é chamado de Processo de Acabamento por Fluxo Abrasivo-guia abrasivo (DBG-AFF), como mostrado na Figura 11. Os experimentos foram conduzidos nos materiais de peça AISI 1040 e AISI 4340. A taxa de acabamento e taxas de remoção de materiais mais altas são observadas no Processo DBG-AFF em comparação com o Processo de Acabamento por Fluxo Abrasivo (AFF).

Figura 11: Diagrama esquemático do DBG-AFF.



Fonte: Sankar (2009).

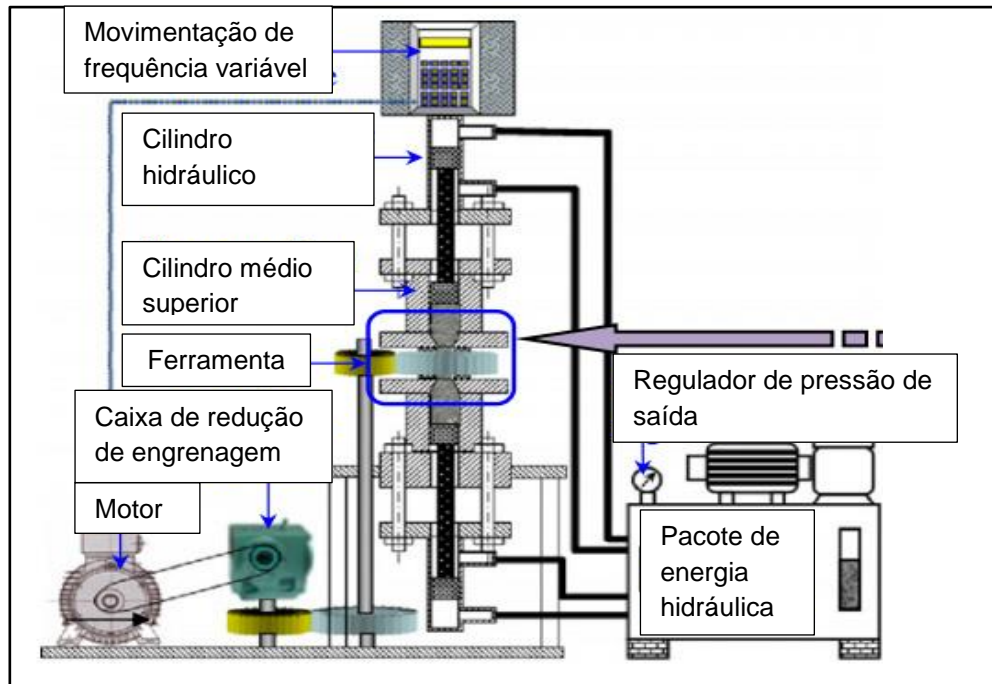
Sankar et al. (2009) desenvolveram o Processo de Acabamento por Fluxo Abrasivo Rotativo (R-AFF). Neste processo, uma peça de trabalho é girada a certa velocidade para melhorar o desempenho do processo de acabamento. As experiências foram conduzidas usando um projeto giratório composto central e as respostas são traçadas usando a técnica de Modelagem de Superfície de Resposta (RSM). O diagrama esquemático do processo R-AFF é mostrado na Figura 12.

Sharma et al. (2015) introduziram um processo de Usinagem por Fluxo Abrasivo assistido por ultra-som (UAAF) no qual a peça de trabalho é submetida a vibrações ultra-sônicas perpendiculares à direção do fluxo da pasta. A Figura 13 mostra o esquema do diagrama do processo UAAF.

Das et al. (2011) propuseram o Acabamento por Fluxo Abrasivo Magnetorheológico Rotativo (R-MRAFF), processo para melhorar o desempenho de acabamento do processo MRAFF. Neste processo, uma rotação e o movimento alternativo é proporcionado a pasta abrasiva por um campo magnético rotativo e a unidade hidráulica é mostrada na Figura 14.

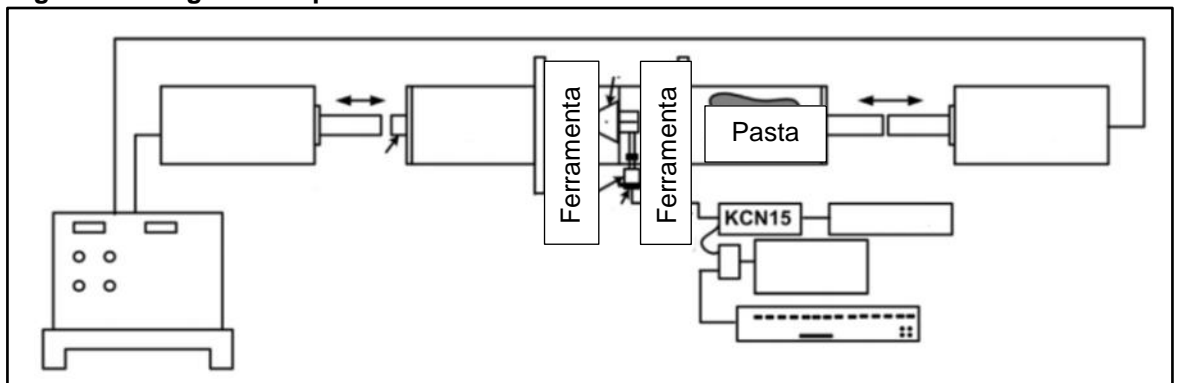
A máquina também controla a pressão de extrusão. A pressão do pistão aplicada variou de 10 bar a 16 bar (UHLMANN, 2009), enquanto que Gorana et al. (2004) variaram a pressão do pistão entre 40 bar e 80 bar para verificar a influência da mesma na melhoria do acabamento da superfície.

Figura 12: Diagrama esquemático do R-AFF.



Fonte: Sankar (2009).

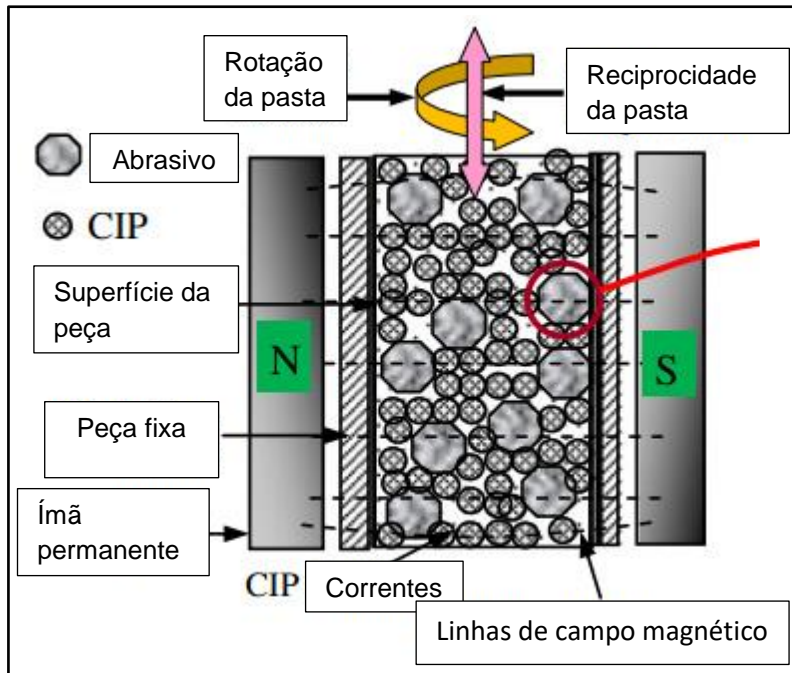
Figura 13: Diagrama esquemático do UAAFV.



Fonte: Sharma (2015).

O volume de fluxo depende do deslocamento (ou curso) de cada cilindro, da pasta e do número total de ciclos usados para concluir o trabalho. Essas variáveis são pré-ajustadas no equipamento.

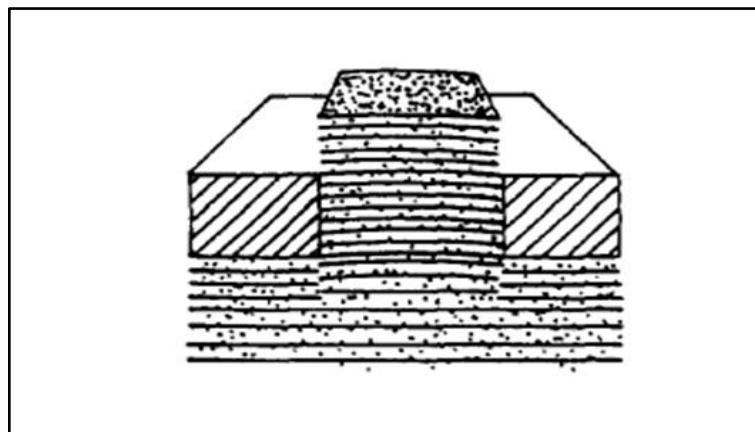
Figura 14: Diagrama esquemático do R-MRAFF.



Fonte: Das (2011).

O objetivo da Usinagem por Fluxo Abrasivo envolve polir uniformemente a superfície, onde deve manter uma taxa de fluxo uniforme, uma vez que é extrudada através da passagem (Figura 15).

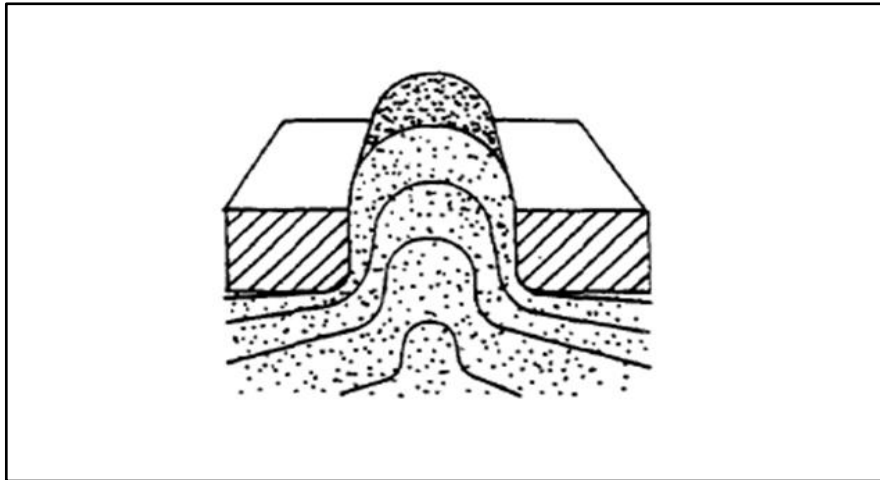
Figura 15: O fluxo do material pode ser variado para conseguir resultados diferentes de acabamento superficial.



Fonte: Rhoades (1991).

Para rebarbação de bordas, uma pasta menos viscosa que aumenta a taxa de fluxo deverá ser usada (Figura 16).

Figura 16: O fluxo do material nas bordas da peça de trabalho.



Fonte: Rhoades (1991).

O tipo padrão de fluxo que ocorre durante o processo depende das configurações do equipamento, da formulação da pasta e da configuração da peça e do ferramental.

2.2 Pasta Abrasiva

A pasta abrasiva é a principal componente do processo AFM. A pasta consiste em um polímero viscoelástico reforçado com as partículas abrasivas. Este polímero viscoelástico atua como meio transportador e as partículas abrasivas atuam como uma ferramenta de corte que remove o material da peça de trabalho. As pastas poliméricas de uso comum são Poliborosiloxano e borracha de silicone e abrasivos comumente usados são os carbonetos de silício, óxido de alumínio, carboneto de boro e diamante policristalino. Muitos pesquisadores tentaram desenvolver pastas AFM alternativas além de pastas comercialmente disponível da *Extrude Hone Corporation* e *Kennametals* para atender às suas exigências e para estudar a caracterização da pasta.

2.3 Grãos Abrasivos

O termo grão abrasivo pode ser definido como uma partícula (ou grão) capaz de causar rápido e eficiente desgaste em uma superfície sólida (STACHOWIAK e BATCHELOR, 1993).

Definem-se abrasivos como aqueles materiais que possuem uma dureza superior a sete, como avaliado na escala Mohs de dureza. Esta é uma classe de materiais que inclui alumina eletrofundida e alumínio, óxidos, carbonetos verde e preto, coríndon natural, mulitas sintéticas, carbonetos de boro e materiais naturais e sintéticos que tenham valor na escala Mohs (SHACKELFORD, 2004).

Os grãos abrasivos possuem arestas de corte aleatórias, com orientação e geometria indefinidas para a remoção do material para formar os micro-cavacos (SHAN, 1997).

2.3.1 Concentração de partículas abrasivas (c)

Com a concentração do abrasivo no meio, a textura da peça de trabalho sofre alterações. As marcas abrasivas na direção do fluxo do meio são visíveis.

Khrushchov e Bavichov (1960) identificaram dois processos que ocorrem quando os grãos abrasivos fazem contato com a superfície:

- 1º) Formação de sulcos impressos plasticamente;
- 2º) Separação de partículas de material na forma de micro-cavacos.

O processo AFM é considerado uma ação de “arranhões” realizados pelos grãos abrasivos da pasta. A força normal aplicada a um grão esférico fará com que ele penetre na superfície da peça de trabalho (SHAW, 1971).

O atrito e o desgaste não são propriedades intrínsecas aos materiais, mas sim características da interação desses materiais com variáveis operacionais, sendo estes responsáveis, respectivamente, por dissipação de energia e perda de matéria.

O atrito é a resistência ao deslocamento e é gerado a partir da interação de sólidos em determinadas áreas de contato. Desgaste é a perda progressiva de material da superfície de um corpo sólido devido ao contato e movimento relativo deste com outro corpo sólido, líquido ou gasoso (ZUM-GAHR, 1987).

Os tipos de processos de usinagem afetam significativamente a melhoria do acabamento superficial (LOVELESS, 1994).

A concentração de partículas abrasivas na composição da pasta abrasiva contribui para a remoção do material (RM), isto porque os grãos abrasivos entram em contato com a superfície a ser usinada. Além disso, a concentração de grãos abrasivos permite sustentar uma força de corte maior. Flether e Fioravanti (1996) concluíram que a concentração do abrasivo é um parâmetro mais dominante do que o tamanho de grão abrasivo da pasta.

2.3.2 Tamanho das partículas abrasivas (t)

O corte e o atrito na peça de trabalho dependem da forma das partículas abrasivas. Há formação de cavacos no meio e deformação da superfície da peça definida como a profundidade de penetração da partícula abrasiva (GRAHAM, 1972 e AGHAN, 1970).

O tamanho do abrasivo contribui na elevação da quantidade de material removido (RM). A razão para isto é que com a malha especificada do abrasivo, a profundidade de penetração dos grãos abrasivos na superfície dos materiais estudados aumenta, auxiliando na remoção do material.

Após a adição do carbetto de silício na pasta, a rugosidade (Ra) e a textura superficial apresentaram melhoras significativas (GRAHAM, 1972 e AGHAN, 1970).

Para a realização dos ensaios, variou-se o número de ciclos enquanto a concentração do abrasivo (porcentagem em peso), o tamanho do abrasivo e a velocidade do fluxo da pasta foram mantidos constantes, para analisar os efeitos sobre a remoção de material e a rugosidade da superfície usinada.

Os resultados das análises foram comparados com as observações experimentais.

O efeito dos parâmetros de processo sobre a textura da superfície usinada será estudado usando imagens da superfície obtidas por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

O microscópio eletrônico de varredura é um equipamento muito importante para realizar a caracterização da morfologia dos materiais, pois é capaz de produzir imagens de alta ampliação e resolução da superfície dos materiais (CATONI, 2011).

Com a utilização do equipamento pretende-se garantir que a remoção de material possa ser realizada em locais específicos e difíceis de serem alcançados. Para produzir acabamentos com um único passe de usinagem, a pasta pode ser

customizada para atender aos requisitos da aplicação e o controle do processo fornece uma qualidade consistente e repetibilidade.

2.4 Rugosidade

As superfícies, por mais perfeitas que pareçam, são uma herança do método de usinagem empregado em sua obtenção. Essas superfícies apresentam irregularidades, com espaçamento regular ou irregular que tendem a formar um padrão ou textura característicos em sua formação. Portanto, o perfil das superfícies das peças usinadas deverá ser analisado para verificar a eficiência do processo AFM através dos resultados encontrados para os parâmetros de rugosidade Ra, Rq e Rz.

2.4.1 Rugosidade Média Absoluta (Ra)

Parâmetro de medição aplicável na maioria dos processos de usinagem devido a sua universalização. Controle da rugosidade continuamente nas linhas de produção, devido à sua facilidade de obtenção. Acabamentos para fins apenas estéticos. Este parâmetro é amplamente utilizado em componentes metálicos, por designar uma condição que afeta diretamente a aparência, a função e a conformabilidade do produto acabado.

2.4.2 Rugosidade Máxima (Rq)

Fornecer valores que na medição Ra não se consegue obter. É um verdadeiro indicador da distância máxima entre os limites de picos e vales de um comprimento medido.

2.4.3 Rugosidade (Rz)

É mais preciso na avaliação, pois considera todo o comprimento de avaliação e não só uma amostragem (“*cut off*”). É a distância média entre os 5 picos mais altos e os 5 vales mais profundos, dentro de um comprimento medido. Juntos os parâmetros Ry e Rz fornecem uma visão mais clara sobre as condições do acabamento superficial resultante em um processo de usinagem.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados o equipamento desenvolvido, os materiais empregados, as condições de usinagem, a metodologia proposta, assim como todos os dispositivos utilizados para a realização dos ensaios experimentais.

3.1 Configuração do Equipamento e Procedimento de Ensaios

A Figura 17 mostra o equipamento utilizado para a Usinagem por Fluxo Abrasivo.

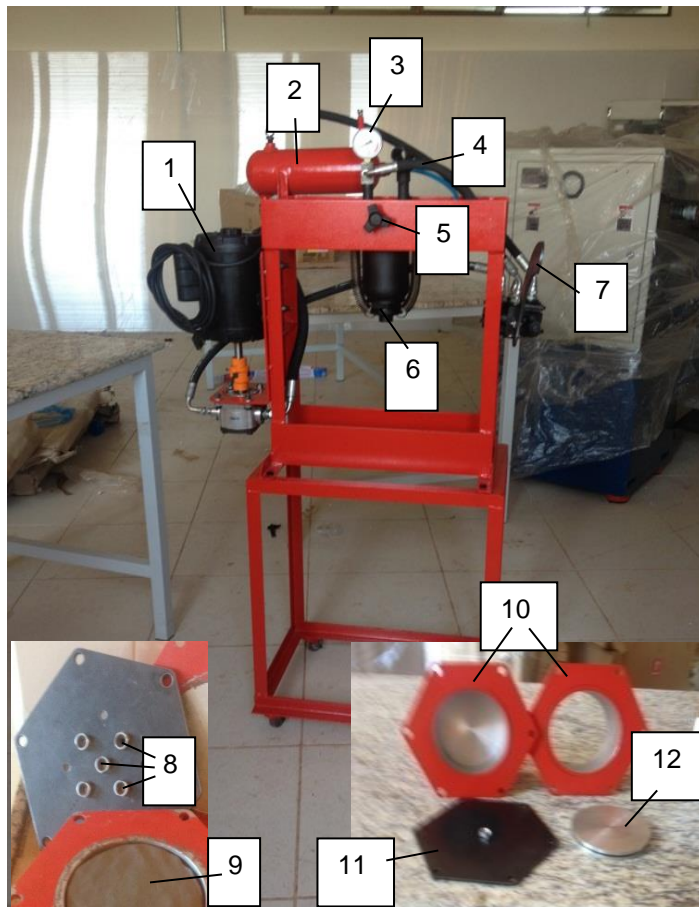
Durante o movimento de compressão, o pistão comprime a pasta abrasiva para baixo no interior do cilindro, forçando-a a passar pelo diâmetro interno das peças fixadas no suporte de trabalho. Em consequência, a pasta abrasiva desgasta as peças de trabalho (RHOADES, 1994).

Após o percurso linear inicial de 25 mm, os cilindros são invertidos manualmente. No sentido inverso, novamente completa-se o curso de 25 mm e a peça de trabalho se desgasta. Esta combinação de movimentos em sentidos opostos compõe um ciclo no processo de Usinagem por Fluxo Abrasivo.

A pressão aplicada foi de 50 bar. As peças de trabalho de alumínio e aço são usinadas para um número de ciclos pré-determinados. Para as peças de alumínio com a pasta convencional e desenvolvida e para as peças de aço com a pasta convencional e desenvolvida foram realizados 720 ciclos de compressão para o estudo de caso em questão.

Após a usinagem, as peças são retiradas do equipamento e uma limpeza com água, detergente e algodão é feita nas mesmas, antes que qualquer medição dimensional seja realizada.

Figura 17: Equipamento de Usinagem por Fluxo Abrasivo.



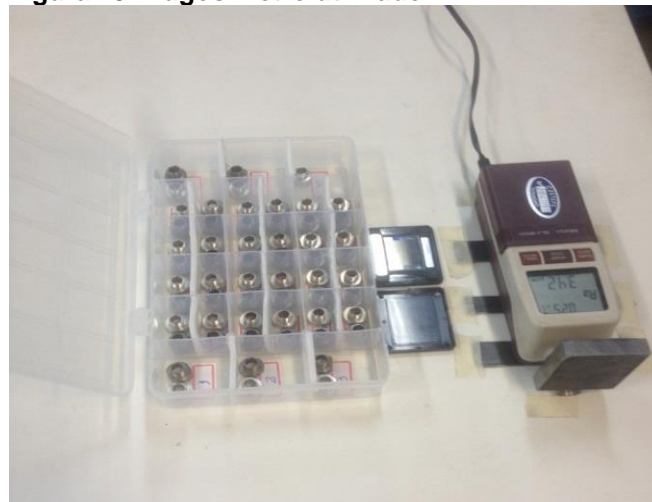
Legenda:

- 1 - Conjunto motor + bomba
- 2 - Reservatório de óleo
- 3 - Manômetro
- 4 - Mangueira de óleo
- 5 - Regulador de pressão
- 6 - Pistão
- 7 - Alavanca
- 8 - Peças de trabalho
- 9 - Pasta abrasiva
- 10 - Cilindros
- 11 - Suporte de trabalho
- 12 - Êmbolo

Fonte: Autoria própria.

Para medir a rugosidade superficial (R_a , R_q e R_z) das peças de trabalho usinadas utilizou-se um rugosímetro da marca Mitutoyo, modelo SJ-201, visto na Figura 18.

Figura 18: Rugosímetro utilizado.



Fonte: Autoria própria.

Para aferir as massas das peças de trabalho foi utilizada uma balança da marca Bel Engineering Mark, modelo M214A, com resolução de 0,0001 g. Na imagem da Figura 19 vê-se no visor da balança a massa da peça de aço n° 15, antes da realização da usinagem, sob as condições de temperatura de 33°C e umidade relativa do ar ambiente de 44%. Estimou-se a quantidade de material removido (RM) de cada peça por meio da diferença entre as suas massas, tomadas respectivamente antes e após a realização de cada operação de usinagem.

Figura 19: Balança utilizada para medir as massas das peças.



Fonte: Autoria própria.

3.2 Procedimento Experimental

Os ensaios de usinagem foram realizados com dois tipos de materiais de trabalho, a liga de alumínio 6061-T6 e o aço SAE1045, isto porque o alumínio apresenta maior leveza no transporte e maior resistência à corrosão e o aço é atualmente a liga metálica mais utilizada, sendo empregado de forma intensiva em numerosas aplicações tais como máquinas, ferramentas e na construção. Depois disto, as peças foram preparadas e transformadas nos formatos estabelecidos,

conforme mostram as Figuras 20 e 21, de forma a ser fixada por meio de roscamento nos orifícios do suporte de trabalho.

Figura 20: Peças de Alumínio.



Fonte: Autoria própria.

Figura 21: Peças de Aço.



Fonte: Autoria própria.

A pasta desenvolvida para a realização dos ensaios é uma mistura de pó de gesso (2.400 gramas), partículas abrasivas de carbeto de silício (500 gramas), óleo de oiticica (600 gramas) e óleo de linhaça (5 gramas). Realizou-se a mistura do pó de gesso, do óleo de oiticica e do óleo de linhaça com as partículas abrasivas em uma proporção definida (0,685: 0,171: 0,001: 0,143) respectivamente, sob as condições de temperatura de 27°C e umidade de 79% para conseguir a concentração desejada de porcentagem de partículas em peso [$\text{peso das partículas abrasivas} \times 100 / (\text{peso de massa de desenvolvida})$]. No entanto, a definição comum da porcentagem de concentração de partículas abrasivas é dada por: $\text{peso das partículas abrasivas} \times 100 / (\text{peso da pasta abrasiva})$. A homogeneização da pasta abrasiva foi realizada manualmente. Antes de começar as experiências reais, foi realizado um ensaio preliminar com 2 ciclos de usinagem para cada 5 peças de trabalho, com o objetivo de obter uma mistura homogênea nos cilindros do equipamento.

3.3 Planejamento Experimental

A segunda etapa consiste da definição do Planejamento Experimental para a coleta de dados, com os processos e produtos envolvidos para realizar a Análise Estatística de Dados.

Segundo Montgomery (2001), o número de repetições para um delineamento fatorial, se a diferença entre duas médias (na linha) é igual a D , então o mínimo valor de Φ^2 é dado pela equação (1):

$$\Phi^2 = \frac{naD^2}{2b\sigma^2}, \quad (1)$$

em que a é o número de níveis do fator A e b é o número de níveis do fator B. Por outro lado, o poder do teste da análise de variância é dado pela equação (2):

$$1 - \beta = P(\text{Rejeitar } H_0 | H_0 \text{ é falso}) \quad (2)$$

Então, considerando-se um nível de significância de 5 % para a rugosidade, tem-se as seguintes informações apresentadas nas Tabelas 1 e 2:

Tabela 1: Valores de Φ em função do número de repetições.

Desvio-padrão	D	
	3	4
1,6	$1,758n$	$3,125n$

Fonte: Autoria própria.

Tabela 2: Número de repetições de acordo com o poder do teste.

D	n	Φ^2	Φ	v_1	v_2	β	$1 - \beta$
3	3	5,274	2,297	1	8	0,200	0,800
	4	7,032	2,652	1	12	0,070	0,930
	5	8,790	2,965	1	16	0,030	0,970
4	3	9,375	3,062	1	8	0,040	0,960
	4	12,500	3,536	1	12	----	---
	5	15,625	3,953	1	16	----	---

Fonte: Autoria própria.

Portanto, para um poder do teste de hipóteses acima de 0,90, o mínimo número de repetições é de $n = 4$. Considerando o desvio-padrão de 1,6 e uma diferença mínima de 3 ou 4, logo o número de peças utilizadas nos ensaios será 5.

Foram estabelecidos o plano e os procedimentos experimentais para a determinação de critérios de aceitação. Em seguida a etapa de desenvolvimento da pasta abrasiva, compreendendo todas as fases que a circundam, além da coleta de dados, qualitativos e quantitativos.

Com estas configurações, os ensaios foram realizados.

Segundo a revisão bibliográfica, foram identificados quatro parâmetros importantes para o emprego do processo, ou seja, número de ciclos (n), a concentração de partículas abrasivas (c), o tamanho das partículas abrasivas (t) e a velocidade de fluxo da pasta (v). A concentração foi de 16,64% e o tamanho das partículas de carbeto de silício foi de malha 100. Os ensaios foram realizados de acordo com o plano de experimentos apresentado no Quadro 1.

Quadro 1: Plano de experimentos.

Variáveis	Parâmetros constantes	Pasta utilizada
Nº de ciclos, n (20) Peças de alumínio nº 1, 2, 3, 4 e 5	c; t; v	pasta convencional
Nº de ciclos, n (60) Peças de alumínio nº 6, 7, 8, 9 e 10	c; t; v	pasta convencional
Nº de ciclos, n (100) Peças de alumínio nº 11, 12, 13, 14 e 15	c; t; v	pasta convencional
Nº de ciclos, n (20) Peças de aço nº 1, 2, 3, 4 e 5	c; t; v	pasta convencional
Nº de ciclos, n (60) Peças de aço nº 6, 7, 8, 9 e 10	c; t; v	pasta convencional
Nº de ciclos, n (100) Peças de aço nº 11, 12, 13, 14 e 15	c; t; v	pasta convencional
Nº de ciclos, n (20) Peças de alumínio nº 16, 17, 18, 19 e 20	c; t; v	pasta desenvolvida
Nº de ciclos, n (60) Peças de alumínio nº 21, 22, 23, 24 e 25	c; t; v	pasta desenvolvida
Nº de ciclos, n (100) Peças de alumínio nº 26, 27, 28, 29 e 30	c; t; v	pasta desenvolvida
Nº de ciclos, n (20) Peças de aço nº 16, 17, 18, 19 e 20	c; t; v	pasta desenvolvida
Nº de ciclos, n (60) Peças de aço nº 21, 22, 23, 24 e 25	c; t; v	pasta desenvolvida
Nº de ciclos, n (100) Peças de aço nº 26, 27, 28, 29 e 30	c; t; v	pasta desenvolvida

Fonte: Autoria própria.

Os valores de remoção de material (RM), de rugosidade superficial (Ra, Rq e Rz) e dos diâmetros iniciais e finais das peças foram registrados em cada caso.

3.4 Número de ciclos (n)

Durante a realização dos ensaios, somente o número de ciclos (n) foi variado, enquanto que a concentração de partículas abrasivas (c), o tamanho das partículas abrasivas (t) e a velocidade de fluxo da pasta (v) foram mantidos constantes. Antes e ao final de cada ensaio, foram medidos a massa, o diâmetro interno e a rugosidade superficial de cada peça de trabalho.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos após a realizações dos ensaios de usinagem relativos à remoção de material, rugosidade superficial, textura superficial das superfícies internas e variação dos diâmetros internos das peças usinadas.

Durante os ensaios, avaliou-se a influência do número de ciclos e do tipo de pasta abrasiva empregada sobre a quantidade de material removido (RM), sobre a rugosidade superficial das peças usinadas (R_a , R_q e R_z), sobre a variação do diâmetro e sobre a textura superficial das peças, enquanto que a concentração e o tamanho dos abrasivos e a velocidade da pasta foram mantidos constantes.

Os resultados obtidos com a pasta abrasiva desenvolvida foram comparados com os obtidos nos ensaios realizados com uma pasta abrasiva convencional (comercial). A textura superficial das peças usinadas foram analisados por meio de imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV).

4.1 Remoção de Material (RM)

4.1.1 Número de ciclos (n)

O Quadro 2 apresenta a massa das peças antes do processo de AFM enquanto que o Quadro 3 apresenta a massa das peças após o processo de AFM.

Quadro 2: Massa das peças antes da AFM (g).

Nº	Alumínio	Aço
1	1,6833	5,1641
2	1,7086	5,6866
3	1,6995	5,2633
4	1,6935	4,8252
5	1,6922	5,7983
6	1,7000	5,2436
7	1,8616	5,3183
8	1,6934	5,4036
9	1,6791	5,2819
10	1,7003	5,2740
11	1,6827	5,3341
12	1,6962	5,3807

Quadro 3: Massa das peças após a AFM (g).

Nº	Alumínio	Aço
1	1,6820	5,1605
2	1,6970	5,6798
3	1,6924	5,2546
4	1,6916	4,8214
5	1,6920	5,7934
6	1,6928	5,2392
7	1,8578	5,3083
8	1,6913	5,3996
9	1,6777	5,2782
10	1,6991	5,2708
11	1,6799	5,3310
12	1,6895	5,3753

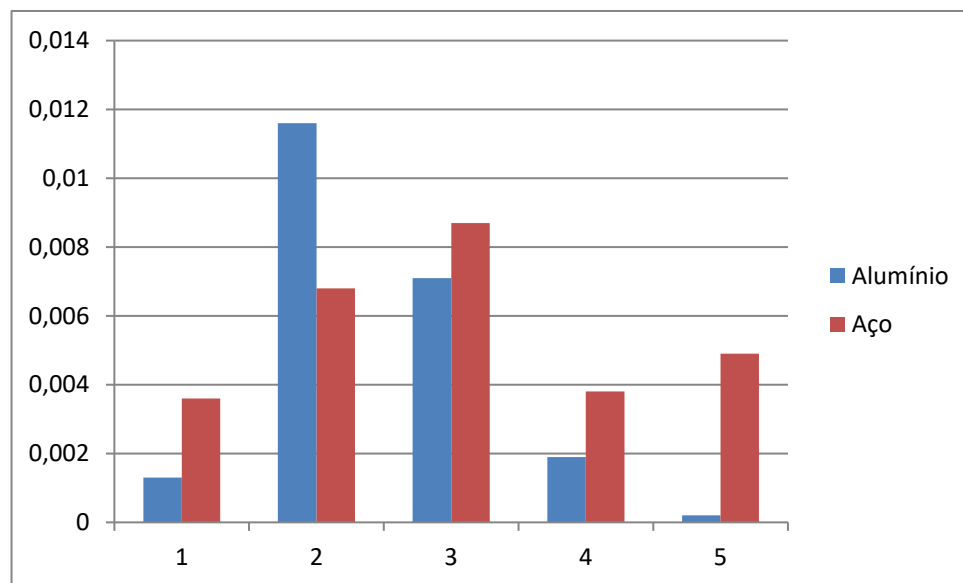
13	1,7078	5,8240
14	1,6889	5,2139
15	1,6871	5,4068
16	1,6848	5,3942
17	1,6920	5,6877
18	1,6948	5,4449
19	1,7075	5,3759
20	1,6934	5,3327
21	1,6810	5,4516
22	1,6877	5,4820
23	1,6962	5,6776
24	1,6876	5,5495
25	1,6928	5,6117
26	1,6813	5,5760
27	1,6974	5,4781
28	1,6978	5,4082
29	1,6908	5,4104
30	1,7020	5,9999

13	1,6966	5,8194
14	1,6876	5,2114
15	1,6850	5,4001
16	1,6838	5,3892
17	1,6892	5,6757
18	1,6942	5,4389
19	1,7046	5,3691
20	1,6908	5,3234
21	1,6781	5,4420
22	1,6855	5,4755
23	1,6896	5,6683
24	1,6865	5,5437
25	1,6917	5,6077
26	1,6779	5,5678
27	1,6913	5,4677
28	1,6946	5,4008
29	1,6885	5,4055
30	1,6839	5,9955

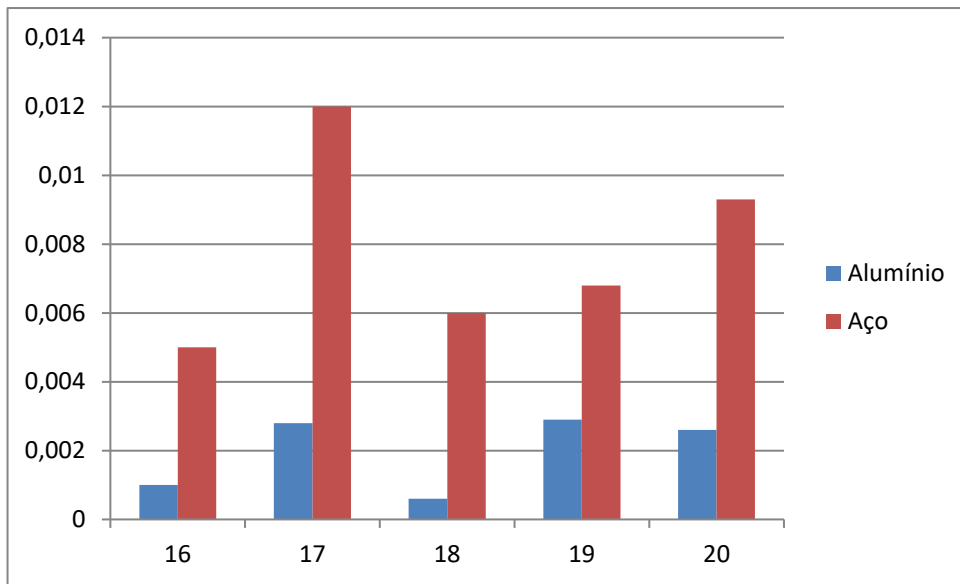
Fonte: Autoria própria.

Os Gráficos 1 à 6 apresentam as perdas de massa de cada uma das peças de alumínio e aço em função do número de ciclos com a pasta convencional e desenvolvida.

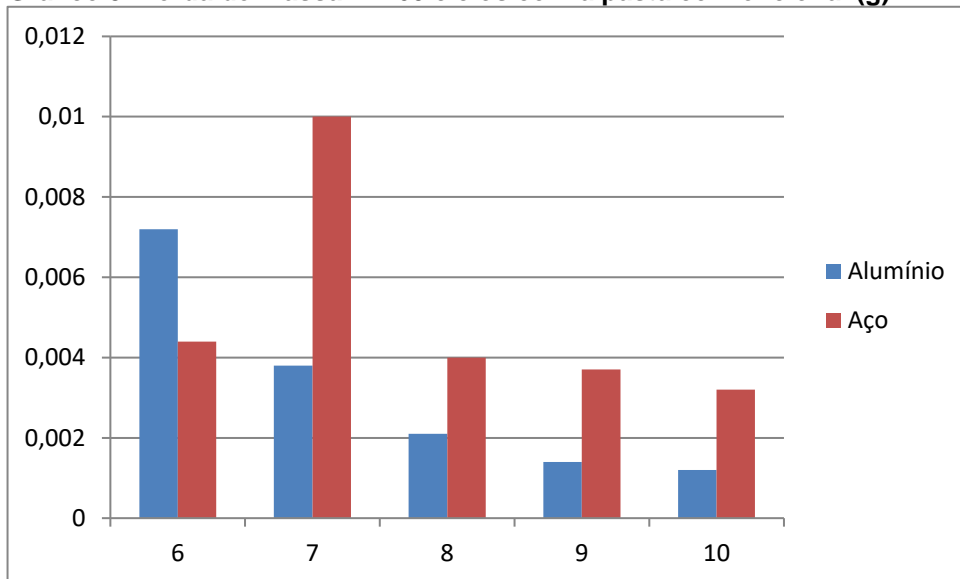
Gráfico 1: Perda de massa n = 20 ciclos com a pasta convencional (g).



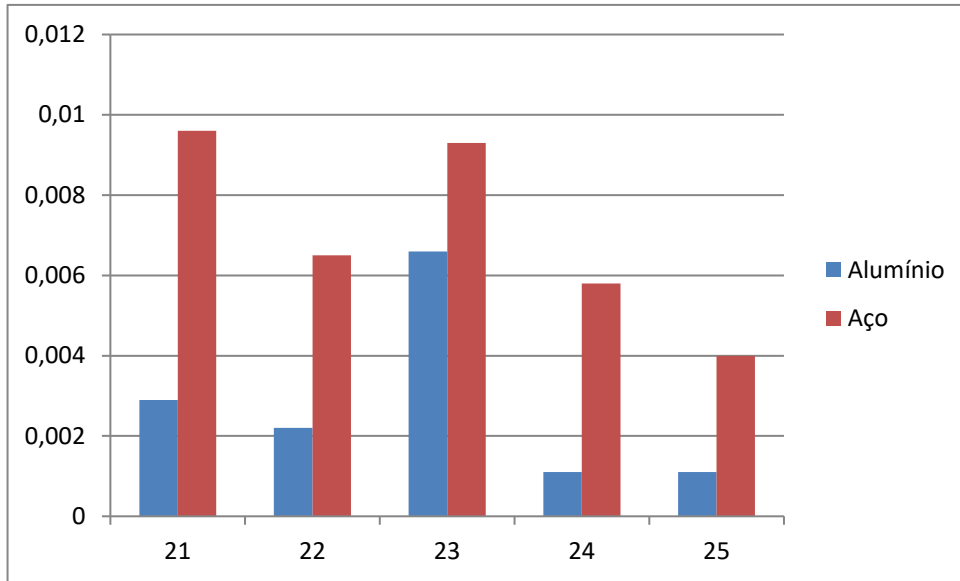
Fonte: Autoria própria.

Gráfico 2: Perda de massa n = 20 ciclos com a pasta desenvolvida (g).

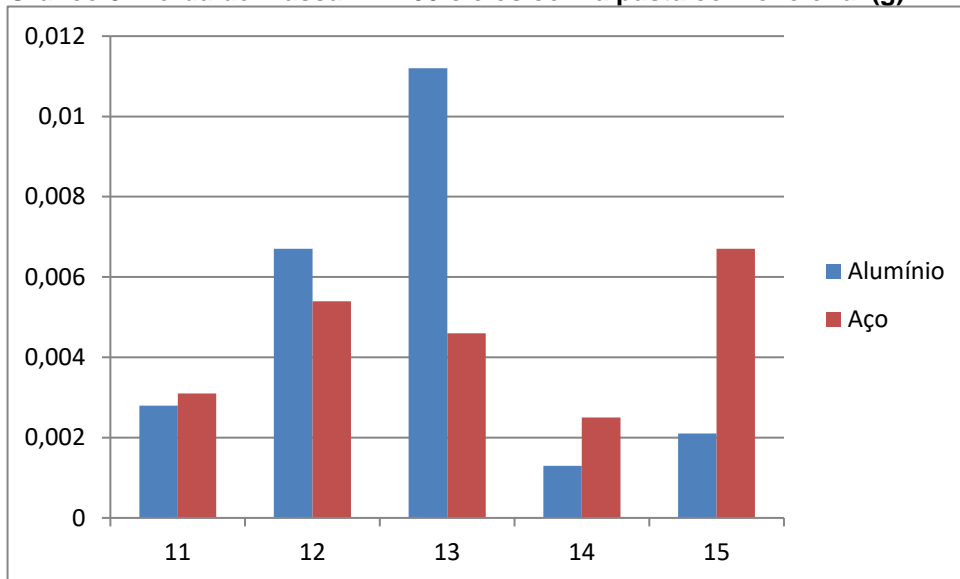
Fonte: Autoria própria.

Gráfico 3: Perda de massa n = 60 ciclos com a pasta convencional (g).

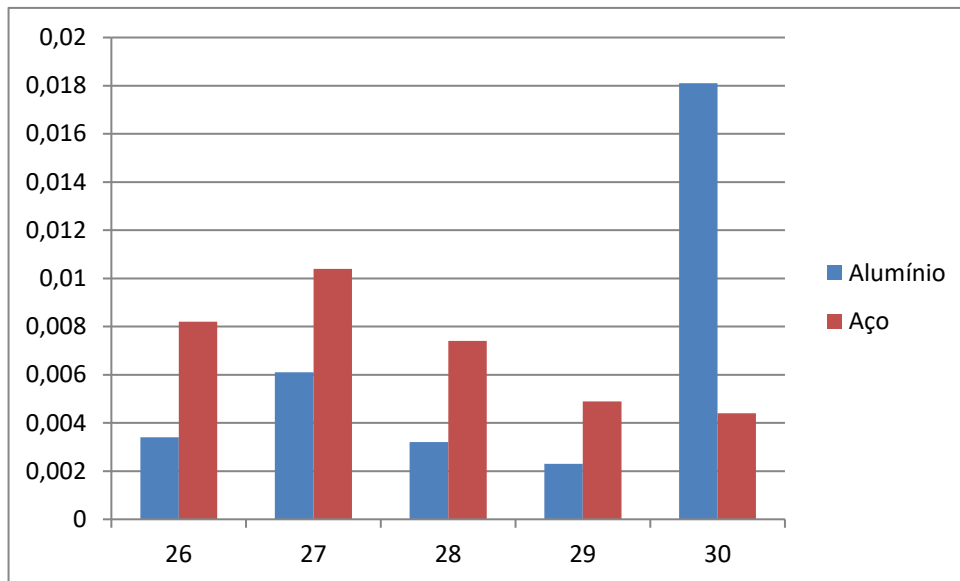
Fonte: Autoria própria.

Gráfico 4: Perda de massa n = 60 ciclos com a pasta desenvolvida (g).

Fonte: Autoria própria.

Gráfico 5: Perda de massa n = 100 ciclos com a pasta convencional (g).

Fonte: Autoria própria.

Gráfico 6: Perda de massa n = 100 ciclos com a pasta desenvolvida (g).

Fonte: Autoria própria.

O Quadro 4 apresenta a remoção média de material das peças de alumínio em função do número de ciclos com a pasta convencional e desenvolvida.

Quadro 4: Remoção média de material: Alumínio (g).

D(n100)	C(n100)	C(n20)	C(n60)	D(n20)	D(n60)
0,0331 >	0,0241 >	0,0221 >	0,0157 >	0,0153 >	0,0139

Fonte: Autoria própria.

O Quadro 5 apresenta a remoção média de material das peças de aço em função do número de ciclos com a pasta convencional e desenvolvida.

Quadro 5: Remoção média de material: Aço (g).

D(n20)	D(n100)	D(n60)	C(n20)	C(n60)	C(n100)
0,0391 >	0,0353 >	0,0352 >	0,0278 >	0,0253 >	0,0223

Fonte: Autoria própria.

A remoção de material (RM) ocorreu nas seis condições empregadas, resultantes da combinação de 3 números de ciclos e dois tipos de materiais. A taxa de remoção de material, por sua vez, variou com o número de ciclos. Isto pode ser explicado como segue. A superfície inicial antes da realização da Usinagem por Fluxo Abrasivo (AFM) possui picos agudos. Quando as partículas abrasivas movem-se contra esses picos, os picos usinados tornam-se um pouco mais planos do que antes. Durante a execução dos ciclos de usinagem, a taxa de remoção de material diminui continuamente. A remoção total é mais elevada no aço, apesar deste material oferecer maior resistência à abrasão em relação ao alumínio.

A remoção de material das peças de aço resultou maior em relação ao alumínio, devido ao fato de que na usinagem primária o acabamento superficial das peças de aço foi inferior comparado ao das peças de alumínio.

4.2 Rugosidade Superficial

4.2.1 Número de ciclos (n)

Os efeitos dos números de ciclos (n) no processo AFM sobre a rugosidade superficial (Ra, Rq e Rz) e a diferença entre os valores médios de rugosidade iniciais (antes da usinagem) e finais (após a usinagem) são relatados nesta seção, considerando as pastas convencional (indicada pela letra C) e desenvolvida (indicada pela letra D).

Os Quadros 6 à 11 apresentam os valores de rugosidade média (Ra, Rq e Rz) das peças de alumínio e aço em função do números de ciclos com a pasta convencional e desenvolvida.

Quadro 6: Rugosidade média (Ra) do Alumínio (μm).

C(n100) 0,32	D(n100) 0,44	D(n20) 0,54	D(n60) 0,59	C(n60) 0,62	C(n20) 0,65
--------------	--------------	-------------	-------------	-------------	-------------

Fonte: Autoria própria.

Quadro 7: Rugosidade média (Rq) do Alumínio (μm).

C(n100) 0,39	D(n100) 0,54	D(n20) 0,66	D(n60) 0,73	C(n60) 0,76	C(n20) 0,81
--------------	--------------	-------------	-------------	-------------	-------------

Fonte: Autoria própria.

Quadro 8: Rugosidade média (Rz) do Alumínio (μm).

C(n100) 1,45	D(n100) 2,22	D(n20) 2,53	D(n60) 2,80	C(n60) 3,12	C(n20) 3,17
--------------	--------------	-------------	-------------	-------------	-------------

Fonte: Autoria própria.

Quadro 9: Rugosidade média (Ra) do Aço (μm).

D(n60) 2,46	C(n20) 2,85	D(n20) 2,86	D(n100) 2,90	C(n60) 2,97	C(n100) 3,03
-------------	-------------	-------------	--------------	-------------	--------------

Fonte: Autoria própria.

Quadro 10: Rugosidade média (Rq) do Aço (μm).

D(n60) 3,01	C(n20) 3,46	D(n20) 3,46	D(n100) 3,51	C(n60) 3,63	C(n100) 3,71
-------------	-------------	-------------	--------------	-------------	--------------

Fonte: Autoria própria.

Quadro 11: Rugosidade média (Rz) do Aço (μm).

D(n60) 11,56	D(n20) 12,73	D(n100) 13,01	C(n20) 13,10	C(n60) 13,81	C(n100) 14,05
--------------	--------------	---------------	--------------	--------------	---------------

Fonte: Autoria própria.

O Quadro 12 apresenta os valores de rugosidade média (Ra, Rq e Rz) das peças de alumínio antes do processo de AFM.

Quadro 12: Rugosidade das peças de alumínio antes da usinagem (μm).

Nº	Ra	Ra	Rq	Rq	Rz	Rz	Ra médio	Rq médio	Rz médio
1	0,91	0,88	1,13	1,07	4,67	4,50	0,90	1,10	4,59
2	0,83	1,12	1,05	1,43	4,17	5,67	0,98	1,24	4,92
3	0,57	0,46	0,69	0,60	2,94	2,57	0,52	0,65	2,76
4	0,90	0,94	1,09	1,16	4,03	5,26	0,92	1,13	4,65
5	1,04	0,89	1,30	1,14	5,14	5,20	0,97	1,22	5,17
6	0,92	0,62	1,12	0,74	4,68	3,03	0,77	0,93	3,86
7	0,76	1,09	0,97	1,34	4,34	5,54	0,93	1,16	4,94
8	1,16	0,81	1,39	1,00	5,48	3,86	0,99	1,20	4,67
9	0,96	1,75	1,17	2,22	4,84	8,79	1,36	1,70	6,82
10	0,69	0,70	0,85	0,86	3,69	3,37	0,70	0,86	3,53
11	1,05	1,56	1,33	2,13	5,54	9,63	1,31	1,73	7,59
12	0,93	0,82	1,09	1,03	4,22	4,37	0,88	1,06	4,30
13	1,05	0,93	1,32	1,12	5,51	4,45	0,99	1,22	4,98
14	0,77	0,94	0,98	1,10	4,24	4,19	0,86	1,04	4,22
15	0,89	1,01	1,10	1,26	4,74	5,06	0,95	1,18	4,90
16	1,21	1,79	1,51	2,17	6,52	8,62	1,50	1,84	7,57
17	0,81	1,31	1,02	1,72	4,10	7,28	1,06	1,37	5,69
18	0,67	0,95	0,81	1,23	3,22	5,20	0,81	1,02	4,21
19	1,23	0,81	1,48	1,01	6,32	4,09	1,02	1,25	5,21
20	0,66	0,83	0,86	1,03	3,87	4,16	0,75	0,95	4,02
21	1,42	0,89	1,86	1,08	8,07	4,05	1,16	1,47	6,06
22	0,76	0,72	0,98	0,91	3,92	3,40	0,74	0,95	3,66
23	0,91	0,70	1,12	0,85	4,73	3,58	0,81	0,99	4,16
24	0,62	1,20	0,76	1,47	3,38	5,91	0,91	1,12	4,65
25	1,14	0,69	1,47	0,86	5,02	3,67	0,92	1,17	4,35
26	0,85	0,62	1,07	0,77	4,68	2,99	0,74	0,92	3,84
27	1,31	0,94	1,67	1,21	6,85	5,08	1,13	1,44	5,97
28	1,06	1,21	1,31	1,54	5,18	6,52	1,14	1,43	5,85
29	0,85	2,11	1,04	2,45	4,26	9,00	1,48	1,75	6,63
30	0,75	0,63	0,93	0,81	4,35	3,77	0,69	0,87	4,06

Fonte: Autoria própria.

O Quadro 13 apresenta os valores de rugosidade (Ra) das peças de alumínio após o processo de AFM.

Quadro 13: Rugosidade (Ra) das peças de alumínio após a usinagem (μm).

Nº	Ra	Ra	Ra	Ra médio
1	0,55	0,79	0,84	0,73
2	0,56	0,55	0,50	0,54
3	0,66	0,48	0,99	0,71
4	0,48	0,36	0,42	0,42
5	1,29	0,59	0,74	0,87
6	0,76	0,40	0,34	0,50
7	0,95	1,12	0,36	0,81
8	0,87	0,28	0,29	0,48
9	0,55	1,72	0,22	0,83
10	0,47	0,61	0,37	0,48
11	0,38	0,80	0,15	0,44
12	0,21	0,26	0,37	0,28
13	0,14	0,30	0,20	0,21
14	0,30	0,23	0,50	0,34
15	0,32	0,30	0,31	0,31
16	0,82	1,48	0,29	0,86
17	0,37	0,48	0,36	0,40
18	0,48	0,33	0,36	0,39
19	0,57	0,59	0,81	0,66
20	0,40	0,46	0,33	0,40
21	0,53	0,78	0,30	0,54
22	0,54	0,43	0,75	0,57
23	0,42	0,93	0,22	0,52
24	0,38	0,79	0,70	0,62
25	0,97	0,29	0,88	0,71
26	0,45	0,29	0,45	0,40
27	1,12	0,70	0,47	0,76
28	0,23	0,39	0,37	0,33
29	0,27	0,29	0,34	0,30
30	0,55	0,26	0,36	0,39

Fonte: Autoria própria.

O Quadro 14 apresenta os valores de rugosidade (Rq) das peças de alumínio após o processo de AFM.

Quadro 14: Rugosidade (Rq) das peças de alumínio após a usinagem (μm).

Nº	Rq	Rq	Rq	Rq médio
1	0,66	0,97	1,04	0,89
2	0,69	0,68	0,61	0,66
3	0,82	0,61	1,23	0,89
4	0,59	0,43	0,50	0,51
5	1,67	0,72	0,90	1,10
6	1,02	0,48	0,42	0,64
7	1,11	1,41	0,45	0,99
8	1,03	0,36	0,35	0,58
9	0,69	2,04	0,25	0,99
10	0,58	0,75	0,47	0,60
11	0,47	0,96	0,18	0,54
12	0,27	0,31	0,45	0,34
13	0,18	0,38	0,24	0,27
14	0,39	0,27	0,64	0,43
15	0,39	0,35	0,42	0,39
16	1,02	1,87	0,37	1,09
17	0,43	0,57	0,43	0,48
18	0,56	0,40	0,43	0,46
19	0,69	0,69	1,03	0,80
20	0,50	0,53	0,41	0,48
21	0,64	0,90	0,37	0,64
22	0,70	0,54	0,96	0,73
23	0,53	1,26	0,26	0,68
24	0,46	0,95	0,83	0,75
25	1,17	0,35	1,06	0,86
26	0,57	0,36	0,52	0,48
27	1,51	0,84	0,56	0,97
28	0,28	0,47	0,45	0,40
29	0,34	0,36	0,43	0,38
30	0,65	0,32	0,43	0,47

Fonte: Autoria própria.

O Quadro 15 apresenta os valores de rugosidade (Rz) das peças de alumínio após o processo de AFM.

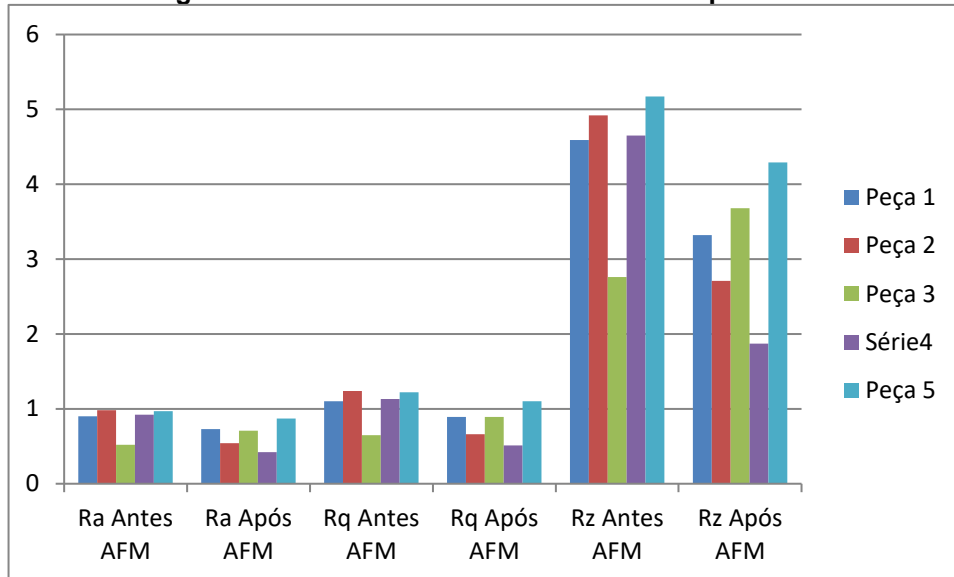
Quadro 15: Rugosidade (Rz) das peças de alumínio após usinagem (μm).

Nº	Rz	Rz	Rz	Rz médio
1	2,62	3,62	3,72	3,32
2	2,88	2,52	2,73	2,71
3	3,39	2,49	5,16	3,68
4	2,12	1,71	1,78	1,87
5	6,66	2,49	3,73	4,29
6	4,22	1,77	1,68	2,56
7	4,20	6,21	1,65	4,02
8	4,11	1,56	1,10	2,26
9	3,40	8,96	0,92	4,43
10	2,10	3,06	1,78	2,31
11	1,66	3,48	0,93	2,02
12	1,03	1,09	1,66	1,26
13	0,63	1,31	0,99	0,98
14	1,78	1,04	1,96	1,59
15	1,24	1,19	1,76	1,40
16	3,54	7,63	1,7	4,29
17	1,61	1,99	1,45	1,68
18	1,92	1,36	1,73	1,67
19	2,47	1,99	4,55	3,00
20	2,11	2,03	1,93	2,02
21	2,33	2,66	1,59	2,19
22	3,03	2,22	4,13	3,13
23	2,14	5,25	1,02	2,80
24	1,88	3,58	2,78	2,75
25	4,12	1,37	3,83	3,11
26	2,30	1,50	1,81	1,87
27	6,76	3,80	2,03	4,20
28	1,23	1,69	2,06	1,66
29	1,59	1,53	1,97	1,70
30	2,35	1,31	1,40	1,69

Fonte: Autoria própria.

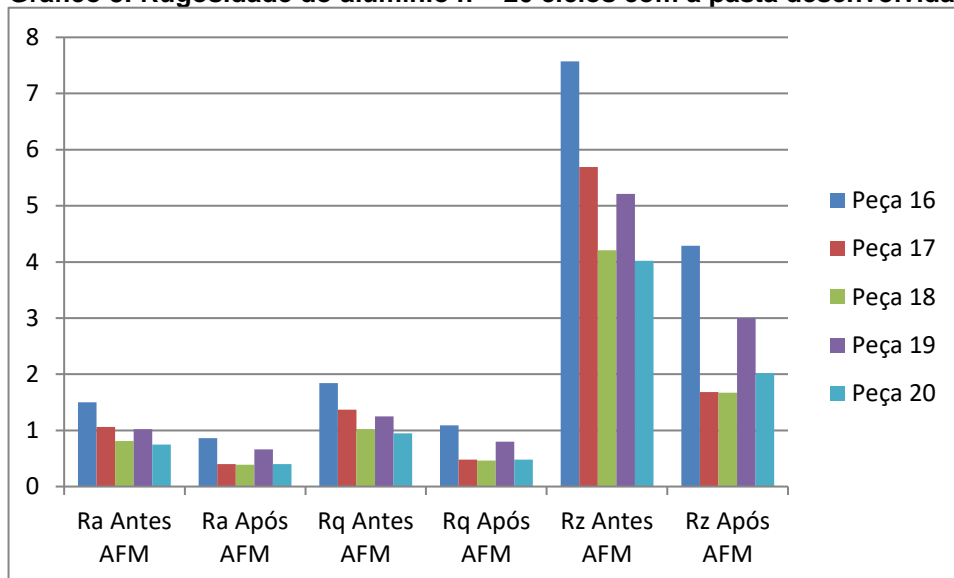
Os Gráficos 7 à 12 apresentam os valores de rugosidade (Ra, Rq e Rz) das peças de alumínio em função do número de ciclos com a pasta convencional e desenvolvida.

Gráfico 7: Rugosidade do alumínio n = 20 ciclos com a pasta convencional (μm).



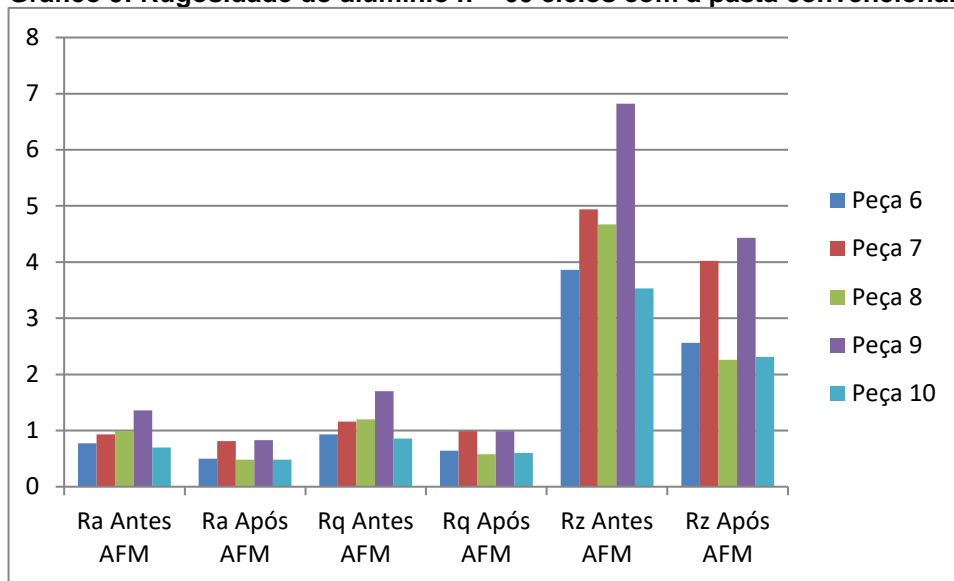
Fonte: Autoria própria.

Gráfico 8: Rugosidade do alumínio n = 20 ciclos com a pasta desenvolvida (μm).



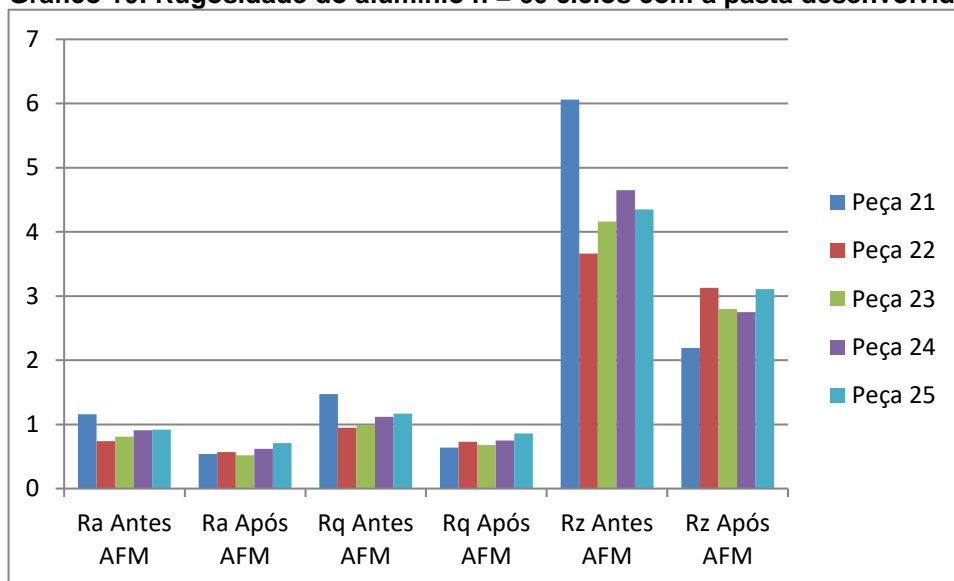
Fonte: Autoria própria.

Gráfico 9: Rugosidade do alumínio n = 60 ciclos com a pasta convencional (μm).



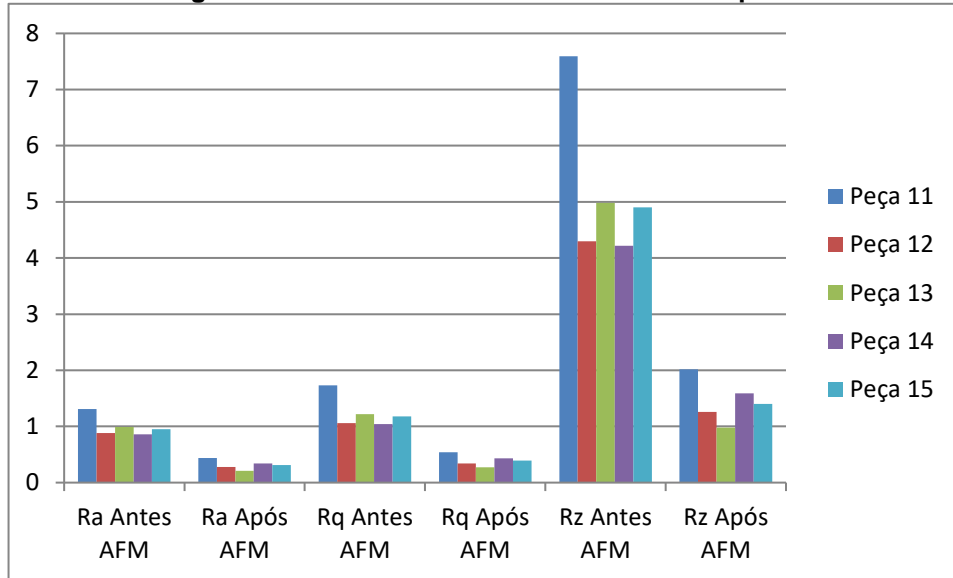
Fonte: Autoria própria.

Gráfico 10: Rugosidade do alumínio n = 60 ciclos com a pasta desenvolvida (μm).



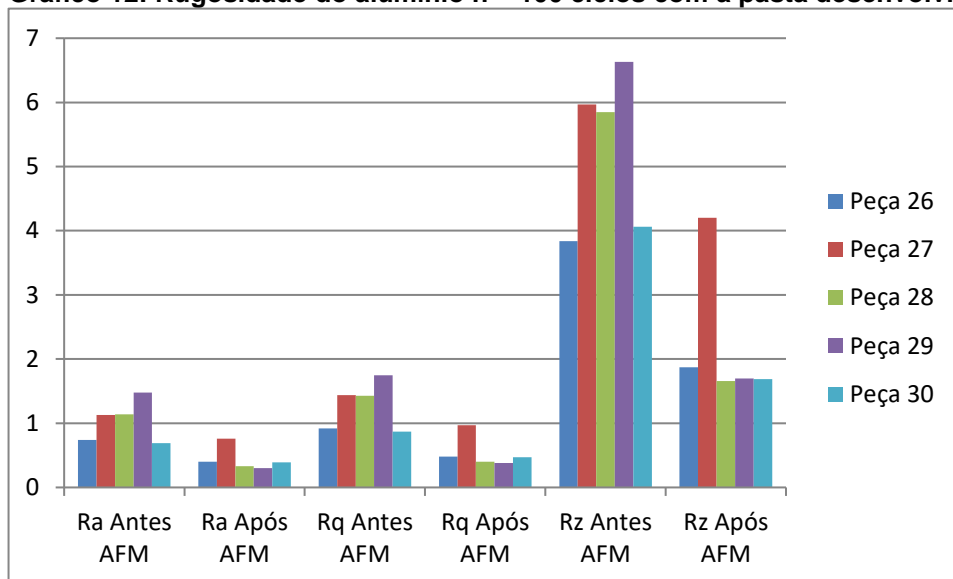
Fonte: Autoria própria.

Gráfico 11: Rugosidade do alumínio n = 100 ciclos com a pasta convencional (μm).



Fonte: Autoria própria.

Gráfico 12: Rugosidade do alumínio n = 100 ciclos com a pasta desenvolvida (μm).



Fonte: Autoria própria.

O Quadro 16 apresenta os valores de rugosidade média (Ra, Rq e Rz) das peças de aço antes do processo de AFM.

Quadro 16: Rugosidade das peças de aço antes da usinagem (μm).

Nº	Ra	Ra	Rq	Rq	Rz	Rz	Ra médio	Rq médio	Rz médio
1	1,45	3,28	1,82	3,85	7,62	13,87	2,37	2,84	10,75
2	3,12	2,69	3,76	3,16	12,99	11,40	2,91	3,46	12,20
3	1,38	1,07	1,79	1,28	7,970	4,95	1,23	1,54	6,46
4	3,45	3,33	4,19	4,28	15,79	15,42	3,39	4,24	15,61
5	2,77	4,35	3,30	5,23	12,67	19,07	3,56	4,27	15,87
6	2,78	2,27	3,56	2,74	13,66	10,95	2,53	3,15	12,31
7	3,28	2,39	4,22	2,98	17,97	12,45	2,84	3,60	15,21
8	2,97	2,63	3,67	3,41	15,30	13,18	2,80	3,54	14,24
9	2,85	3,57	3,41	4,52	12,72	17,41	3,21	3,97	15,07
10	3,48	2,65	4,50	3,16	16,84	13,03	3,07	3,83	14,94
11	2,17	2,82	2,66	3,53	10,06	14,49	2,50	3,10	12,28
12	2,94	3,86	3,58	4,74	12,65	16,80	3,40	4,16	14,73
13	3,37	2,42	3,95	2,91	14,42	12,04	2,90	3,43	13,23
14	3,47	3,05	4,31	3,77	16,76	14,75	3,26	4,04	15,76
15	2,14	2,96	2,84	3,60	11,01	13,00	2,55	3,22	12,01
16	3,50	2,11	4,16	2,57	15,34	10,00	2,81	3,37	12,67
17	2,81	2,21	3,39	2,67	12,53	10,10	2,51	3,03	11,32
18	4,08	2,41	4,79	3,08	17,18	11,15	3,25	3,94	14,17
19	2,47	3,97	3,01	5,01	10,79	18,13	3,22	4,01	14,46
20	3,53	3,81	4,23	4,87	15,72	19,59	3,67	4,55	17,66
21	2,80	2,76	3,49	3,33	13,69	13,38	2,78	3,41	13,54
22	4,38	1,93	5,64	2,37	21,97	9,34	3,16	4,01	15,66
23	2,21	2,63	2,6	3,24	10,09	12,84	2,42	2,92	11,47
24	1,59	2,83	2,03	3,43	8,520	13,49	2,21	2,73	11,01
25	3,22	2,52	3,98	2,94	15,33	10,86	2,87	3,46	13,10
26	4,40	3,46	5,08	4,22	16,88	15,86	3,93	4,65	16,37
27	2,87	2,91	3,50	3,64	14,37	12,91	2,89	3,57	13,64
28	2,82	2,82	3,61	3,40	12,88	13,47	2,82	3,51	13,18
29	2,61	2,19	3,12	2,90	11,52	11,96	2,40	3,01	11,74
30	1,93	3,42	2,38	4,39	9,68	16,54	2,68	3,39	13,11

Fonte: Autoria própria.

O Quadro 17 apresenta os valores de rugosidade (Ra) das peças de aço após o processo de AFM.

Quadro 17: Rugosidade (Ra) das peças de aço após a usinagem (μm).

Nº	Ra	Ra	Ra	Ra médio
1	2,80	1,38	1,88	2,02
2	3,41	2,58	2,58	2,86
3	2,26	3,82	2,46	2,85
4	4,26	3,43	3,15	3,61
5	2,25	3,05	3,45	2,92
6	3,11	2,74	2,11	2,65
7	3,05	3,48	3,54	3,36
8	2,94	3,01	2,61	2,85
9	3,51	2,67	2,29	2,82
10	3,49	2,66	3,30	3,15
11	3,15	2,45	3,36	2,99
12	2,97	2,78	4,42	3,39
13	2,47	4,03	3,43	3,31
14	2,28	2,52	3,34	2,71
15	3,25	2,56	2,47	2,76
16	3,21	2,53	3,05	2,93
17	2,73	3,04	3,13	2,97
18	2,14	1,82	2,03	2,00
19	2,93	2,92	2,52	2,79
20	2,63	4,86	3,30	3,60
21	1,55	3,43	1,99	2,32
22	2,19	2,61	3,11	2,64
23	2,18	2,93	1,78	2,30
24	1,89	2,99	2,79	2,56
25	2,67	2,51	2,21	2,46
26	3,24	2,95	2,91	3,03
27	2,84	1,23	3,39	2,49
28	3,84	3,12	3,59	3,52
29	2,68	2,14	2,36	2,39
30	3,15	3,14	2,96	3,08

Fonte: Autoria própria.

O Quadro 18 apresenta os valores de rugosidade (Rq) das peças de aço após o processo de AFM.

Quadro 18: Rugosidade (Rq) das peças de aço após a usinagem (μm).

Nº	Rq	Rq	Rq	Rq médio
1	3,34	1,71	2,20	2,42
2	4,06	3,16	3,11	3,44
3	2,81	4,85	2,89	3,52
4	5,13	4,20	3,97	4,43
5	2,66	3,66	4,22	3,51
6	3,96	3,26	2,70	3,31
7	3,57	3,94	4,34	3,95
8	3,65	3,55	3,33	3,51
9	4,33	3,55	2,90	3,59
10	4,21	3,20	4,02	3,81
11	3,93	2,87	4,08	3,63
12	3,74	3,26	5,29	4,10
13	2,91	4,82	4,19	3,97
14	2,72	3,27	4,13	3,37
15	3,83	3,44	3,19	3,49
16	4,06	3,07	3,63	3,59
17	3,29	3,54	3,89	3,57
18	2,63	2,30	2,31	2,41
19	3,79	3,62	3,00	3,47
20	3,18	5,85	3,78	4,27
21	2,00	4,03	2,44	2,82
22	2,63	3,26	3,58	3,16
23	2,65	3,60	2,35	2,87
24	2,44	3,47	3,40	3,10
25	3,33	3,13	2,77	3,08
26	3,96	3,56	3,71	3,74
27	3,44	1,47	4,20	3,04
28	4,57	3,88	4,31	4,25
29	3,19	2,78	2,81	2,93
30	3,71	3,69	3,41	3,60

Fonte: Autoria própria.

O Quadro 19 apresenta os valores de rugosidade (Rz) das peças de aço após o processo de AFM.

Quadro 19: Rugosidade Rz das peças de aço após a usinagem (μm).

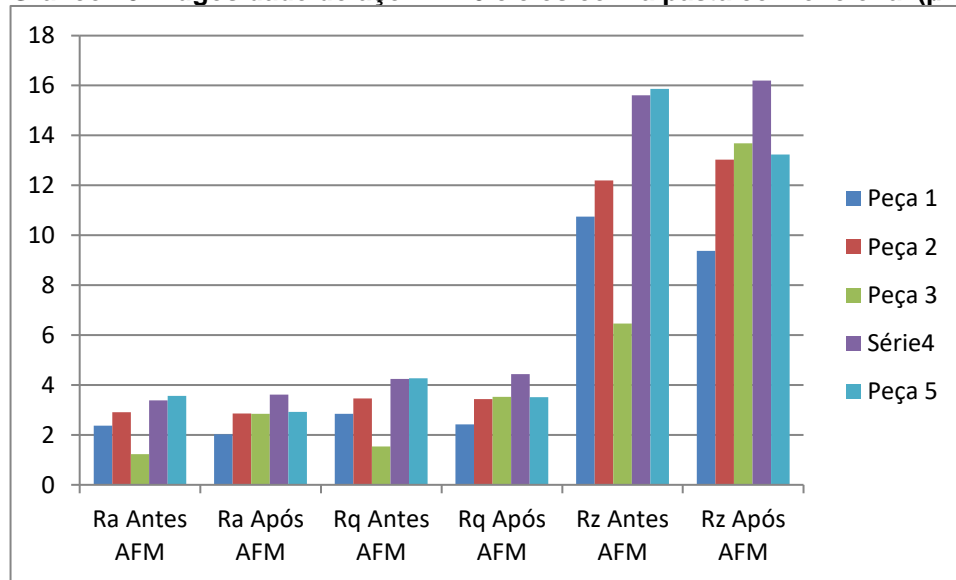
Nº	Rz	Rz	Rz	Rz médio
1	13,04	7,10	7,98	9,37
2	14,73	12,52	11,84	13,03
3	12,28	18,30	10,50	13,69
4	17,82	15,38	15,39	16,20
5	10,08	14,13	15,47	13,23
6	13,78	11,18	10,66	11,87
7	12,66	14,16	16,42	14,41
8	13,92	13,39	13,57	13,63
9	16,20	16,15	11,09	14,48
10	16,30	12,20	15,48	14,66
11	15,51	10,94	15,22	13,89
12	13,81	11,37	18,13	14,44
13	10,50	17,63	16,08	14,74
14	10,91	13,86	16,77	13,85
15	13,90	14,44	11,71	13,35
16	15,61	11,54	12,94	13,36
17	11,66	11,88	14,64	12,73
18	10,08	9,74	7,96	9,26
19	14,99	15,00	11,45	13,81
20	11,56	19,02	12,95	14,51
21	8,82	14,37	9,58	10,92
22	9,21	12,46	13,27	11,65
23	10,38	12,49	9,77	10,88
24	10,80	12,33	12,07	11,73
25	12,72	13,94	11,15	12,6
26	16,41	12,92	13,93	14,42
27	11,50	6,14	14,74	10,79
28	16,30	14,42	14,81	15,18
29	12,58	12,24	10,47	11,76
30	13,18	13,45	12,13	12,92

Fonte: Autoria própria.

4.2.2 Rugosidade superficial em função do número de ciclos e da pasta abrasiva

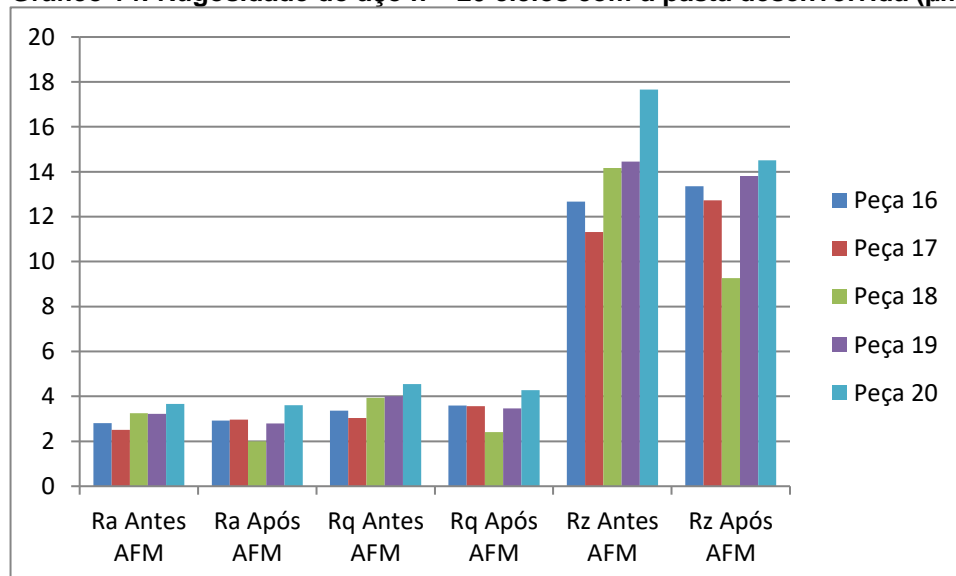
Os gráficos 13 à 18 mostram os efeitos do número de ciclos nos valores de rugosidade superficial (R_a , R_q e R_z) das peças de trabalho. À medida que o número de ciclos aumenta, os valores de rugosidade (R_a , R_q e R_z) para o alumínio com $n = 100$ ciclos diminuem com a pasta convencional, enquanto que os valores de rugosidade (R_a , R_q e R_z) diminuem para o aço com $n = 60$ ciclos com a pasta desenvolvida.

Gráfico 13: Rugosidade do aço $n = 20$ ciclos com a pasta convencional (μm).



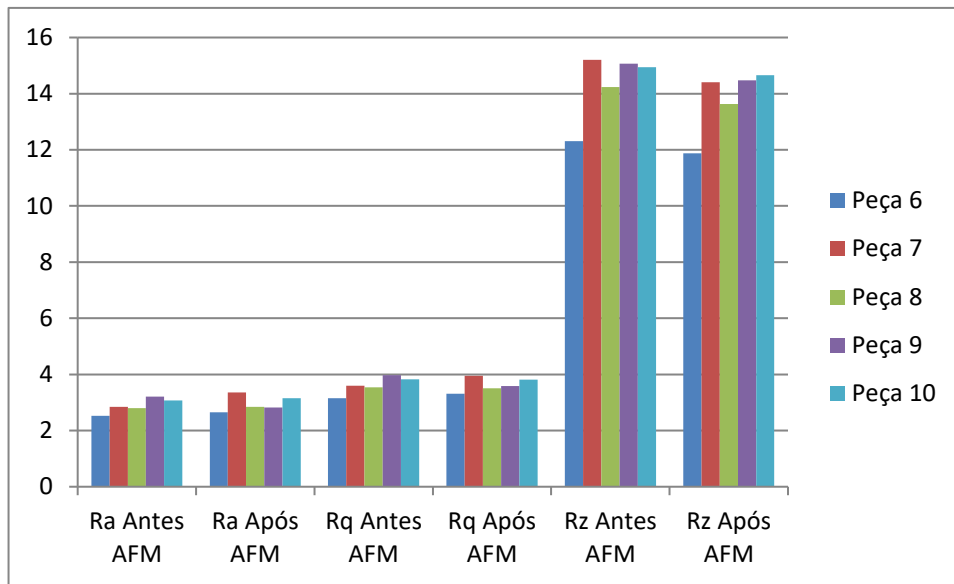
Fonte: Autoria própria.

Gráfico 14: Rugosidade do aço $n = 20$ ciclos com a pasta desenvolvida (μm).



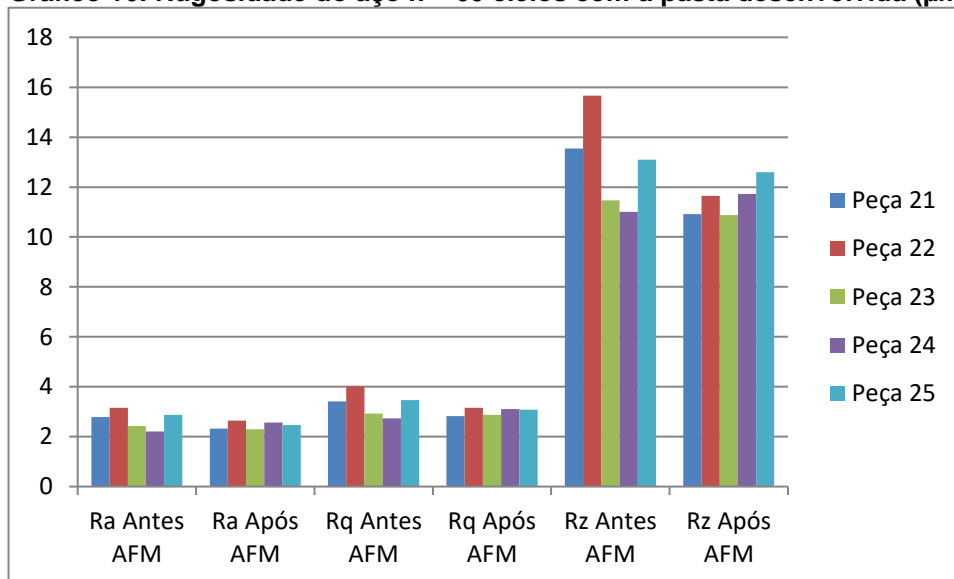
Fonte: Autoria própria.

Gráfico 15: Rugosidade do aço n = 60 ciclos com a pasta convencional (μm).

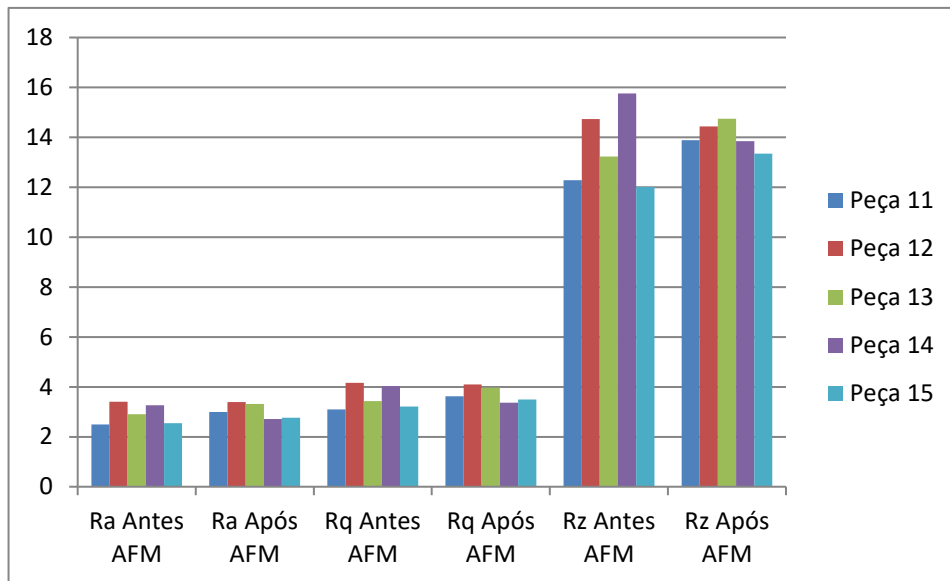


Fonte: Autoria própria.

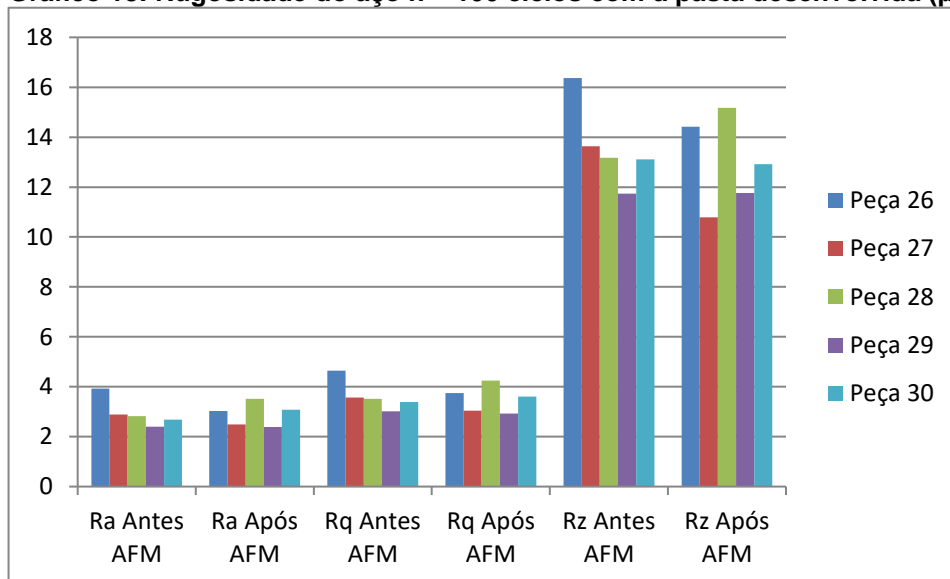
Gráfico 16: Rugosidade do aço n = 60 ciclos com a pasta desenvolvida (μm).



Fonte: Autoria própria.

Gráfico 17: Rugosidade do aço n = 100 ciclos com a pasta convencional (μm).

Fonte: Autoria própria.

Gráfico 18: Rugosidade do aço n = 100 ciclos com a pasta desenvolvida (μm).

Fonte: Autoria própria

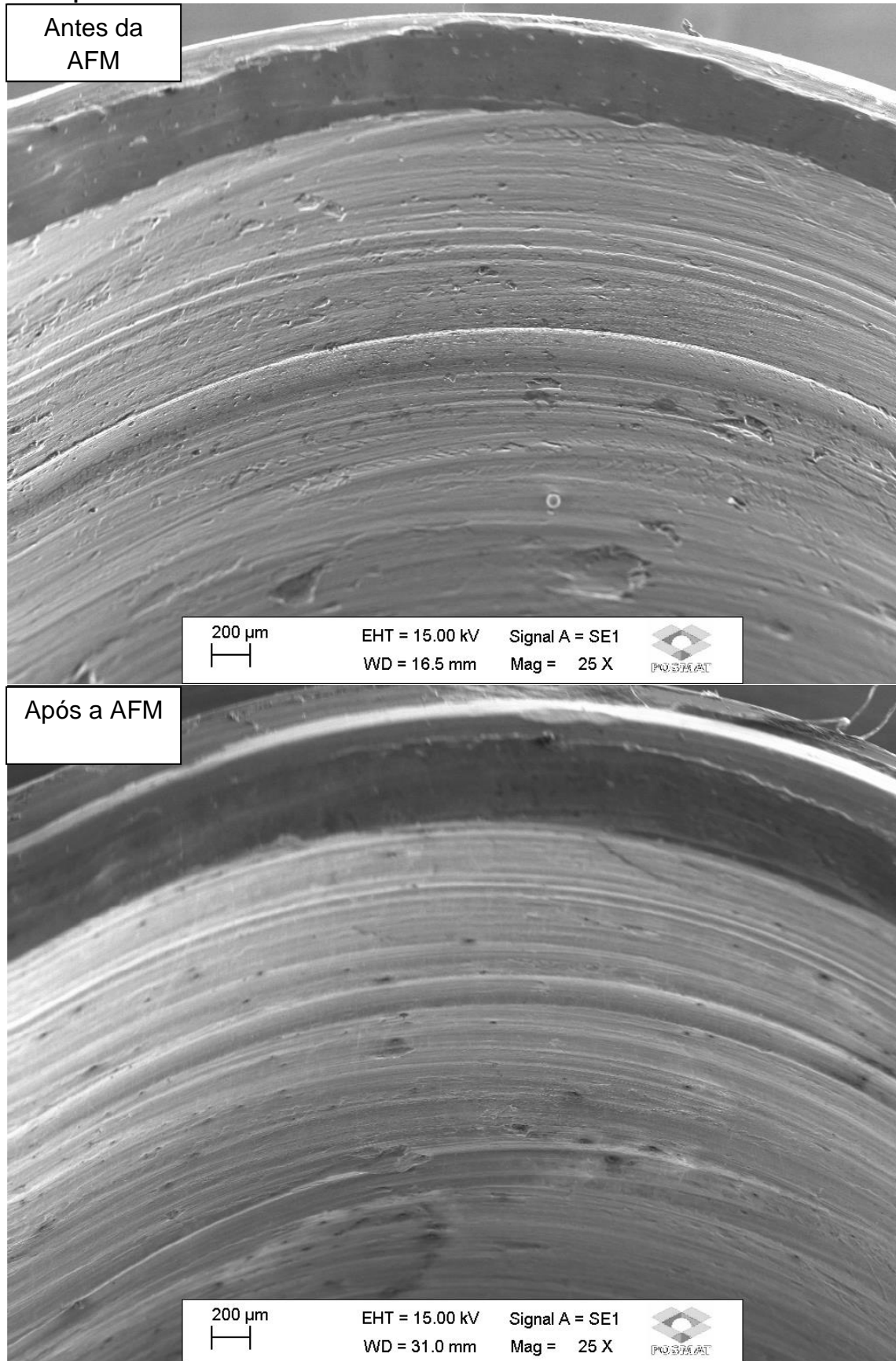
4.3 Análise da superfície usinada

Os efeitos dos vários parâmetros do processo sobre a textura da superfície foram estudados usando imagens obtidas por meio de microscópio eletrônico de varredura. O microscópio utilizado foi o da marca Zeiss, modelo EVO LS15.

4.3.1 Número de ciclos (n)

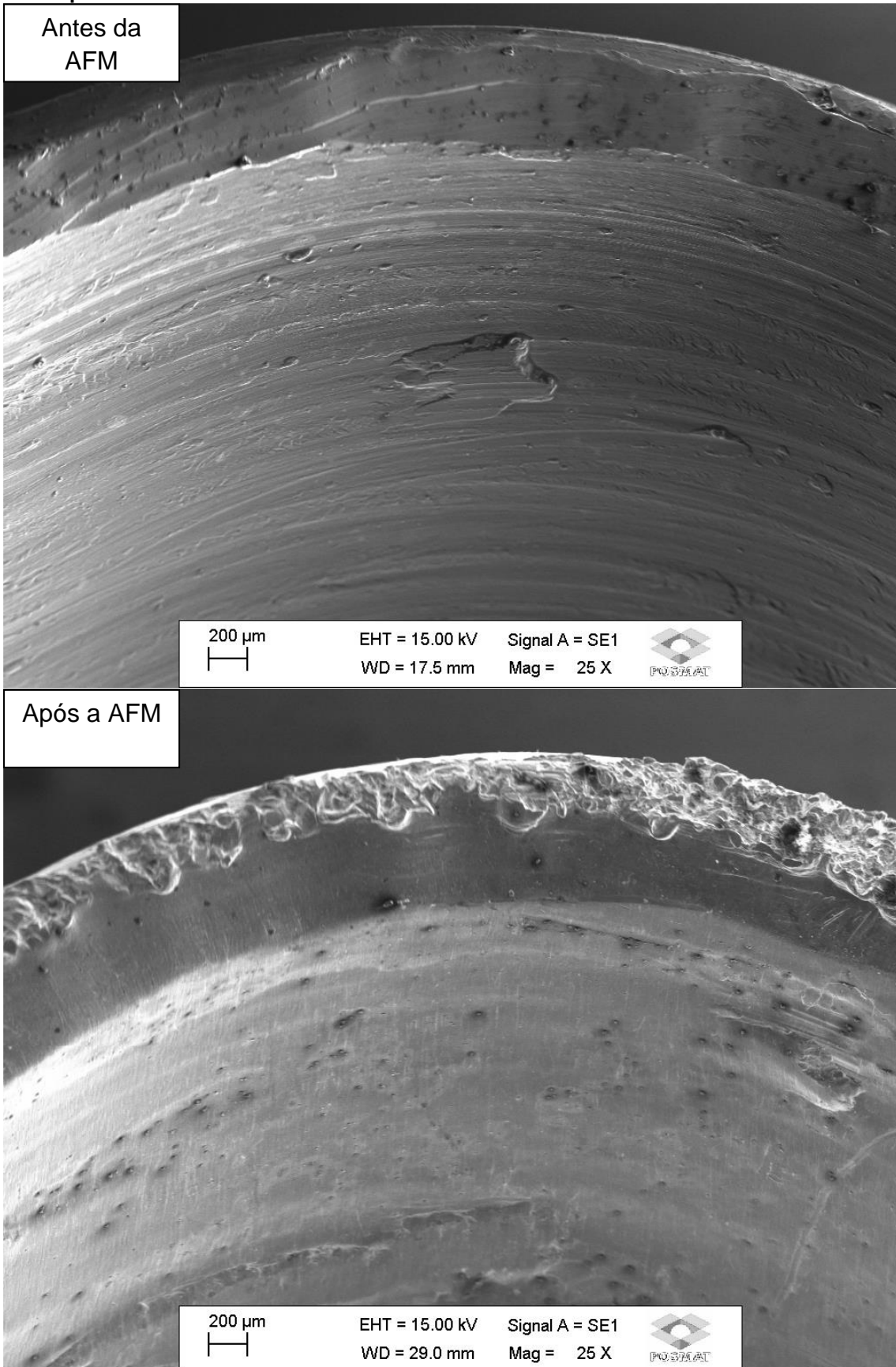
As Figuras 22 à 29 mostram o efeito da variação do número de ciclos sobre a textura superficial de algumas peças de alumínio e de aço, respectivamente antes e após a realização da Usinagem por Fluxo Abrasivo. Com o aumento do número de ciclos, as marcas abrasivas claras tornam-se mais visíveis. As imagens ampliadas indicam que o material é removido por uma ação abrasiva. As observações feitas para o alumínio são as mesmas feitas para o aço, com a diferença de que o aço, por ser mais difícil de usinar devido à sua maior dureza, apresentou marcas menos pronunciadas resultantes da ação dos grãos abrasivos.

Figura 22: Efeito do número de ciclos sobre a textura da superfície do alumínio 1 (n=20) com a pasta convencional.



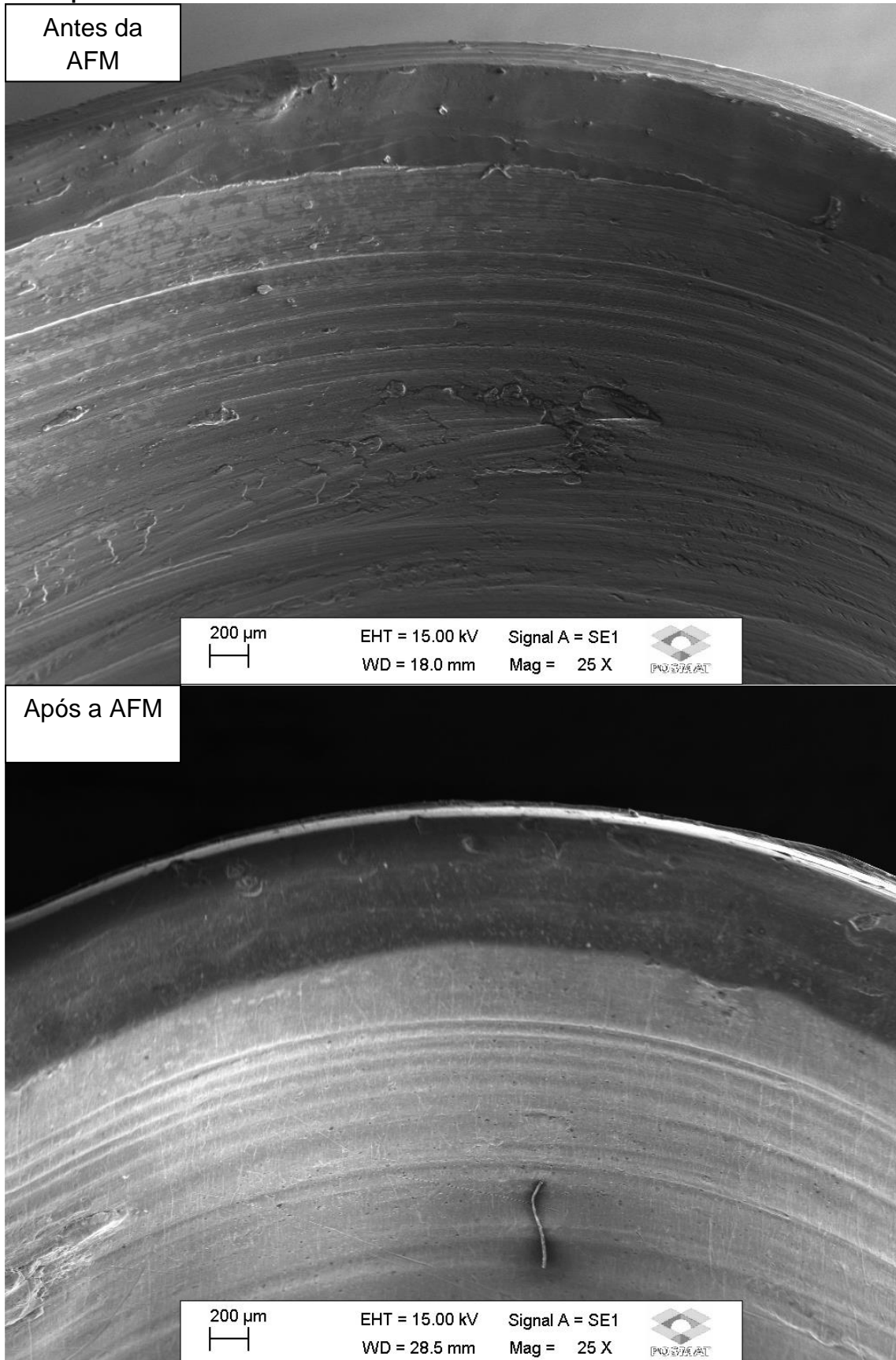
Fonte: Autoria própria.

Figura 23: Efeito do número de ciclos sobre a textura da superfície do alumínio 11 (n=100) com a pasta convencional.



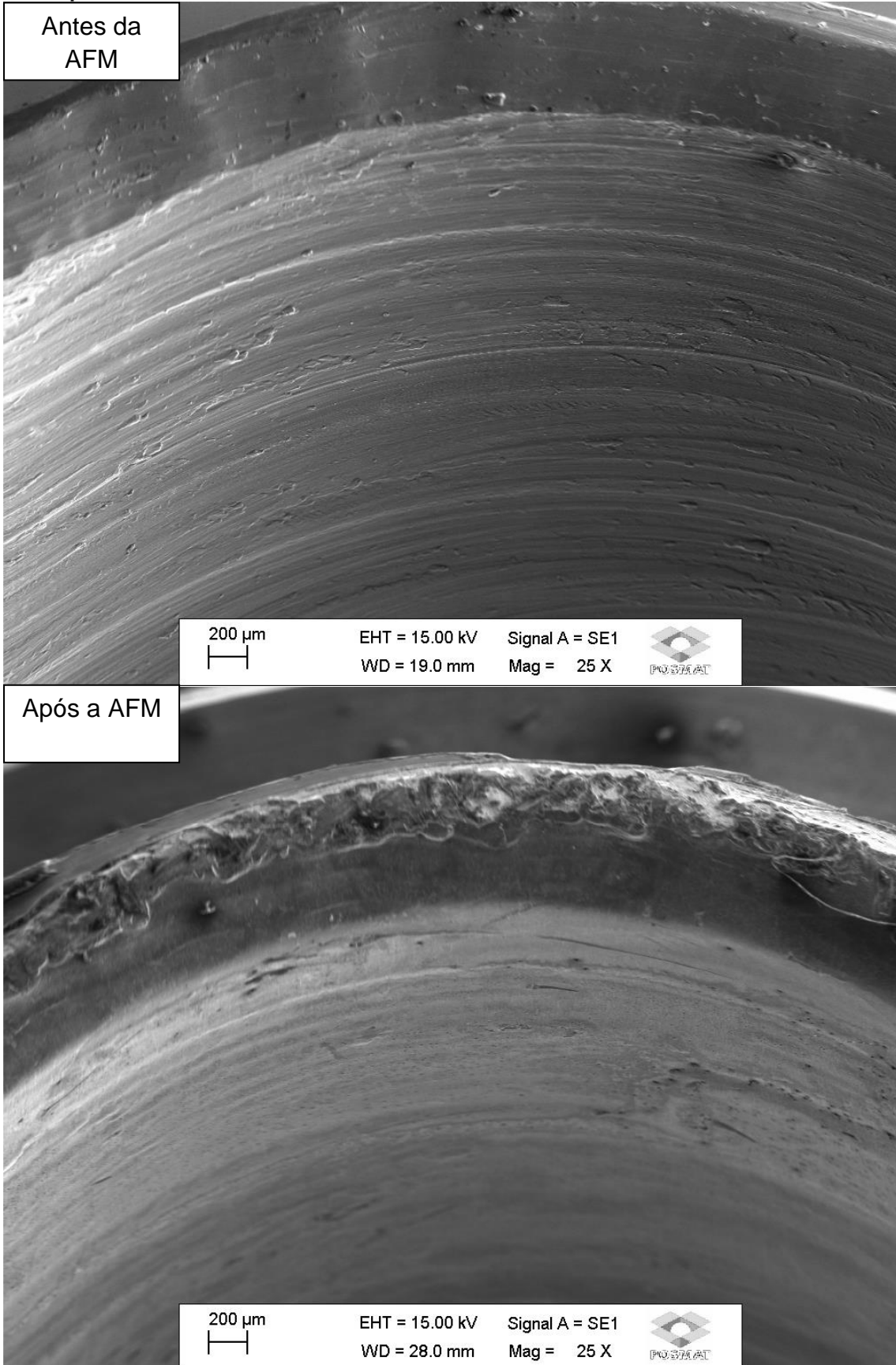
Fonte: Autoria própria.

Figura 24: Efeito do número de ciclos sobre a textura da superfície do alumínio 16 (n=20) com a pasta desenvolvida.



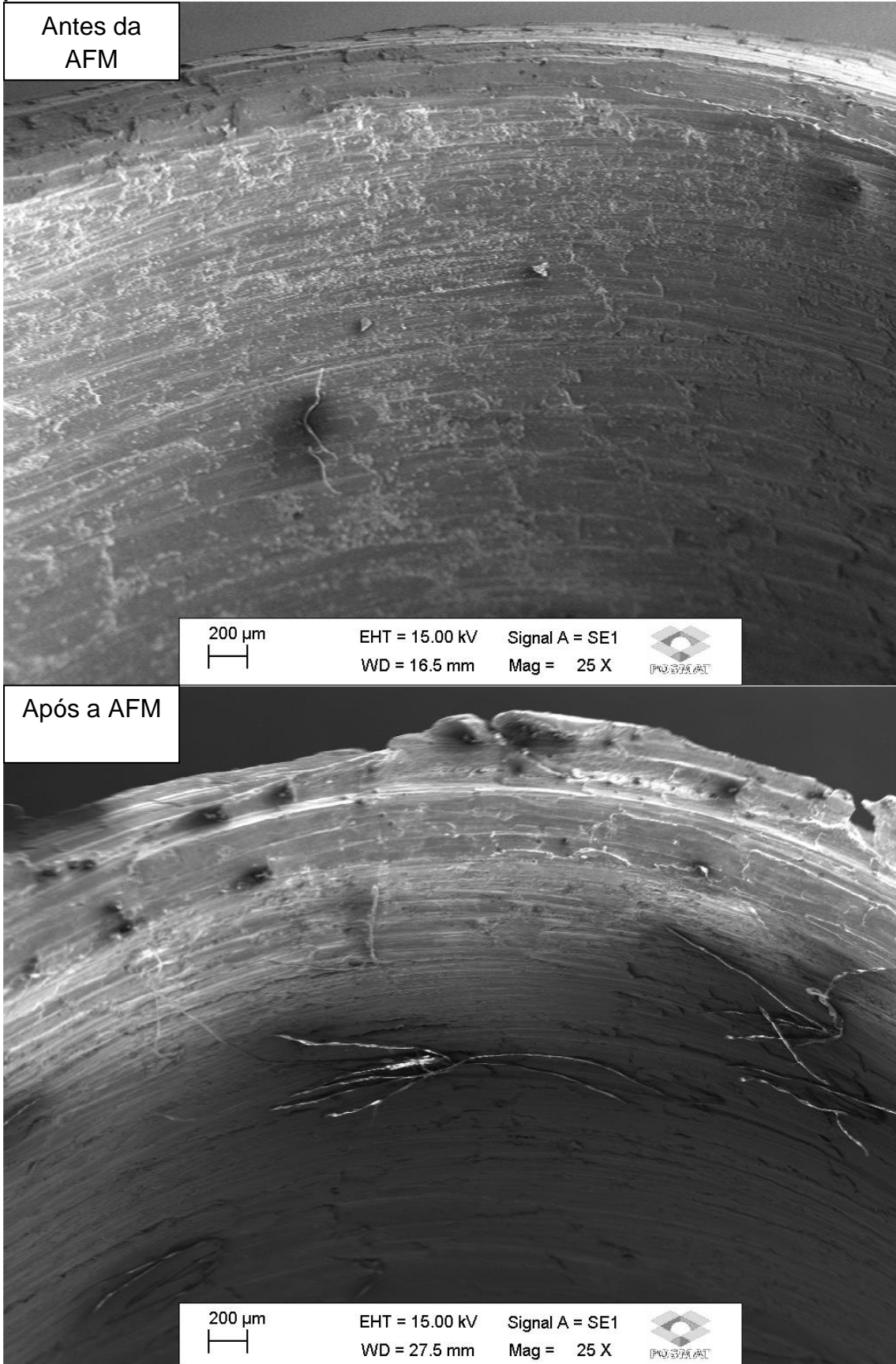
Fonte: Autoria própria.

Figura 25: Efeito do número de ciclos sobre a textura da superfície do alumínio 26 (n=100) com a pasta desenvolvida.



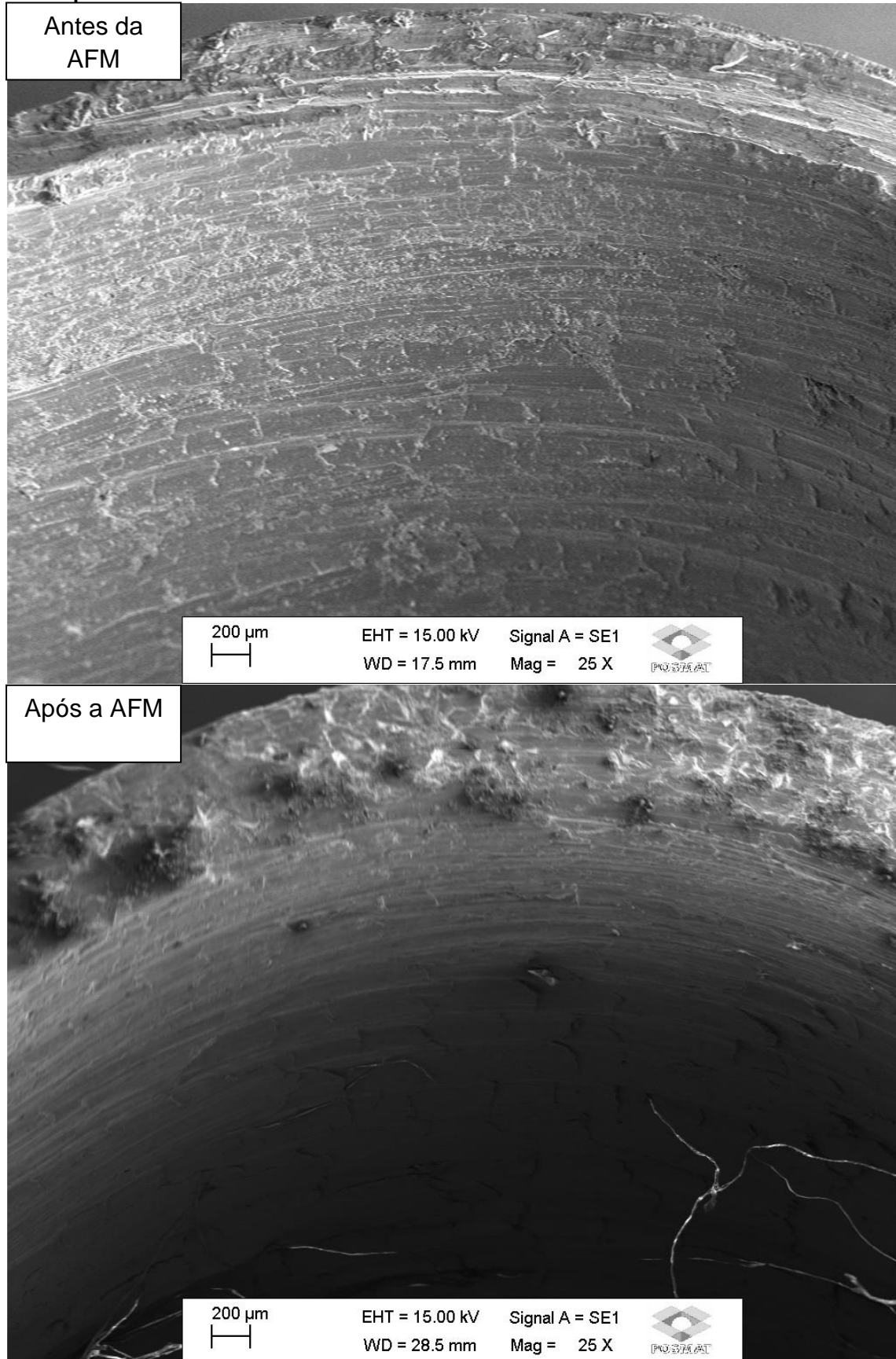
Fonte: Autoria própria.

Figura 26: Efeito do número de ciclos sobre a textura da superfície do aço 1 (n=20) com a pasta convencional.



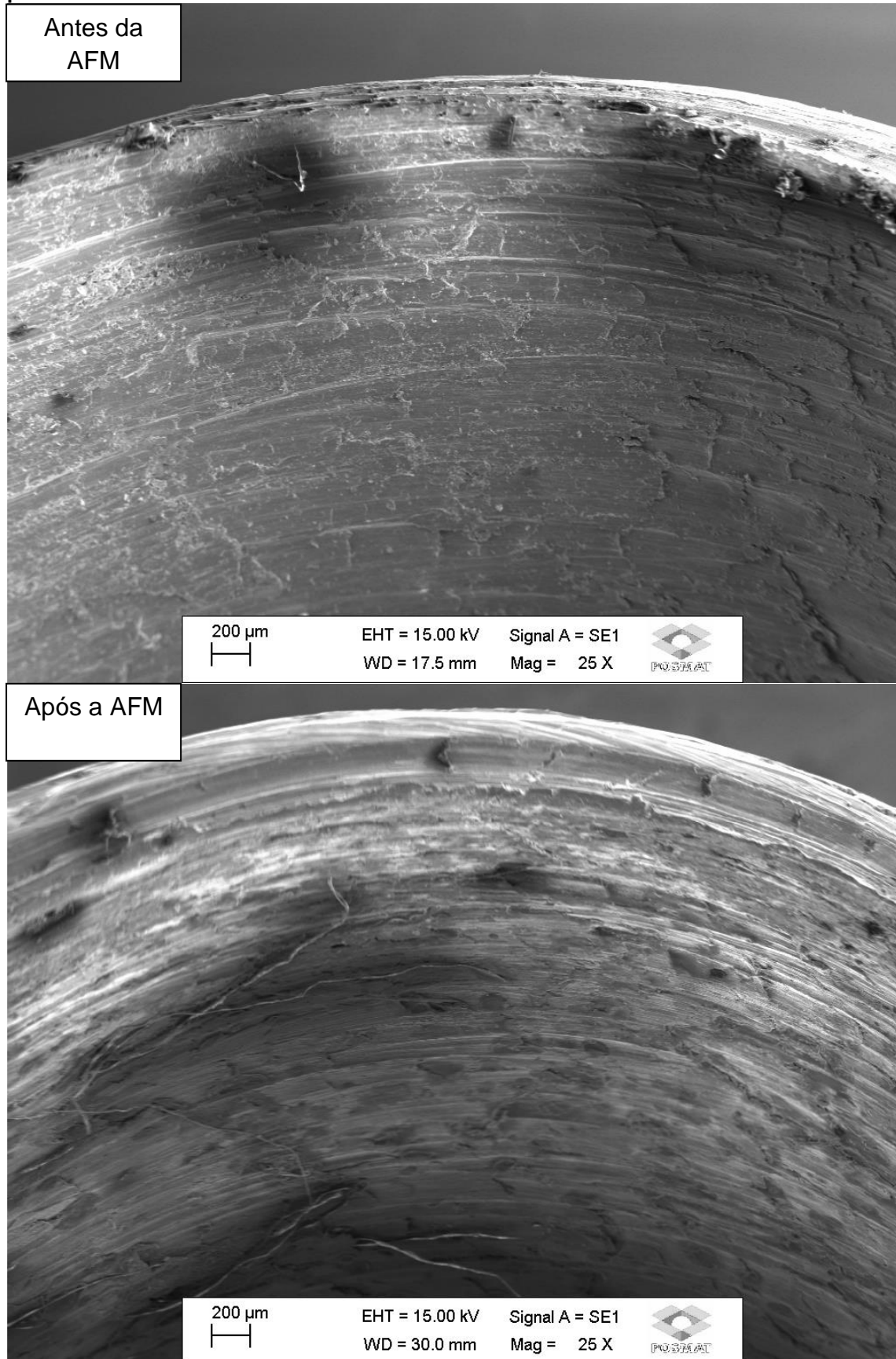
Fonte: Autoria própria.

Figura 27: Efeito do número de ciclos sobre a textura da superfície do aço 11 (n=100) com a pasta convencional.



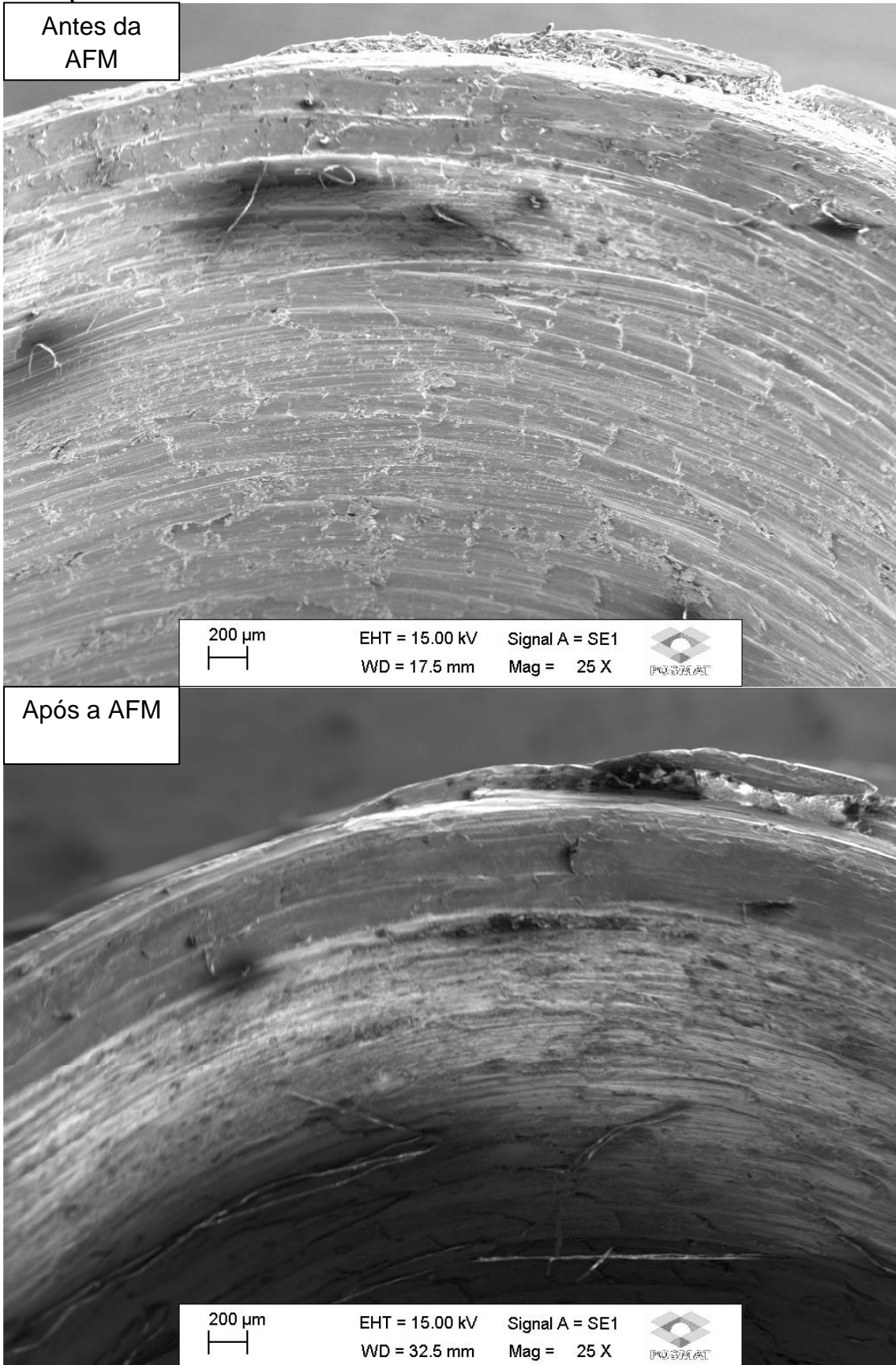
Fonte: Autoria própria.

Figura 28: Efeito do número de ciclos sobre a textura da superfície do aço 16 (n=20) com a pasta desenvolvida.



Fonte: Autoria própria.

Figura 29: Efeito do número de ciclos sobre a textura da superfície do aço 26 (n=100) com a pasta desenvolvida.



Fonte: Autoria própria.

4.4 Variação do Diâmetro das Peças

Os efeitos dos vários parâmetros do processo sobre a variação do diâmetro interno das peças e a diferença entre os seus valores iniciais e finais são relatados nesta seção.

O Quadro 20 apresenta os diâmetros das peças de alumínio e aço antes da AFM enquanto que o Quadro 21 apresenta os diâmetros das peças de alumínio e aço após a AFM.

Quadro 20: Diâmetro antes da AFM (mm).

Nº	Alumínio	Aço
1	7,631	8,208
2	7,872	7,683
3	7,746	7,564
4	7,998	7,689
5	8,325	7,334
6	8,101	7,884
7	7,975	7,757
8	7,625	7,861
9	7,679	7,437
10	7,860	7,475
11	7,310	7,509
12	7,757	7,620
13	7,116	7,769
14	7,700	7,757
15	7,701	7,654
16	7,682	7,585
17	7,689	7,288
18	7,706	7,288
19	7,710	7,552
20	7,758	7,766
21	7,620	7,689
22	7,979	7,449
23	7,769	7,402
24	7,934	7,563
25	7,680	7,940
26	7,906	7,414
27	7,808	7,139
28	7,702	7,643
29	7,654	7,562
30	7,379	7,519

Fonte: Autoria própria.

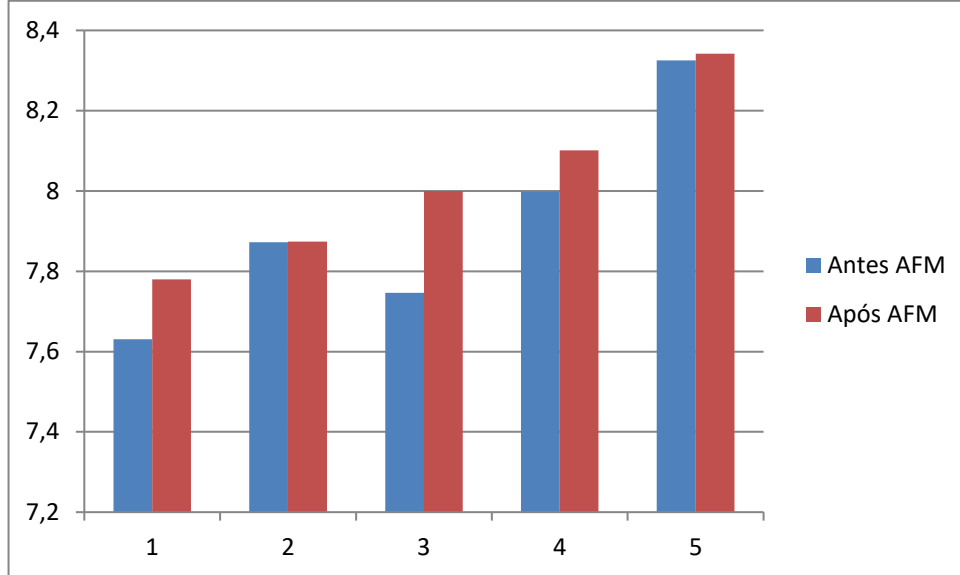
Quadro 21: Diâmetro após a AFM (mm).

Nº	Alumínio	Aço
1	7,780	8,295
2	7,874	8,330
3	8,000	8,443
4	8,101	8,253
5	8,342	8,232
6	8,383	8,511
7	8,309	8,297
8	8,217	8,275
9	8,263	7,964
10	8,253	7,987
11	8,124	8,232
12	7,919	7,837
13	7,965	7,939
14	7,895	7,879
15	7,793	8,331
16	7,747	8,071
17	7,800	8,102
18	7,885	7,550
19	7,928	8,117
20	7,873	8,181
21	7,833	8,273
22	8,126	7,969
23	8,021	8,213
24	8,134	8,392
25	8,228	8,337
26	8,115	8,251
27	8,457	8,264
28	8,300	8,103
29	8,582	8,296
30	8,242	7,723

Fonte: Autoria própria.

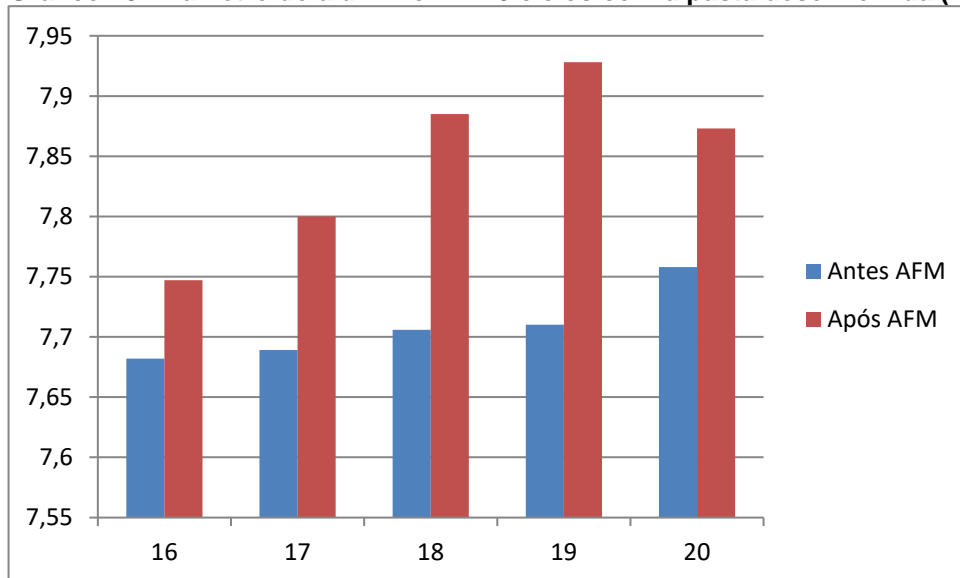
Os Gráficos 19 à 30 apresentam os valores dos diâmetros das peças de alumínio e aço em função do número de ciclos antes e após o processo de AFM com a pasta convencional e desenvolvida.

Gráfico 19: Diâmetro do alumínio n = 20 ciclos com a pasta convencional (mm).

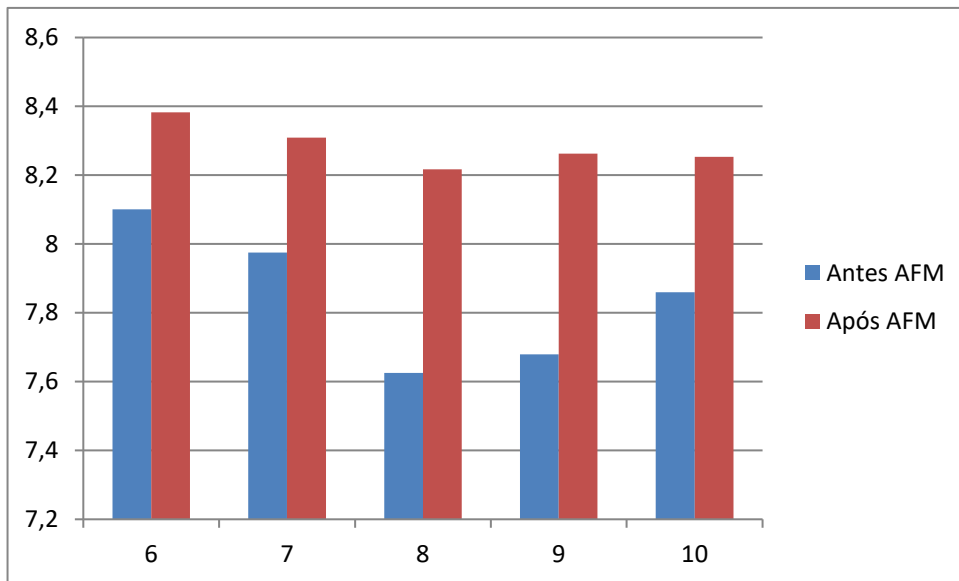


Fonte: Autoria própria.

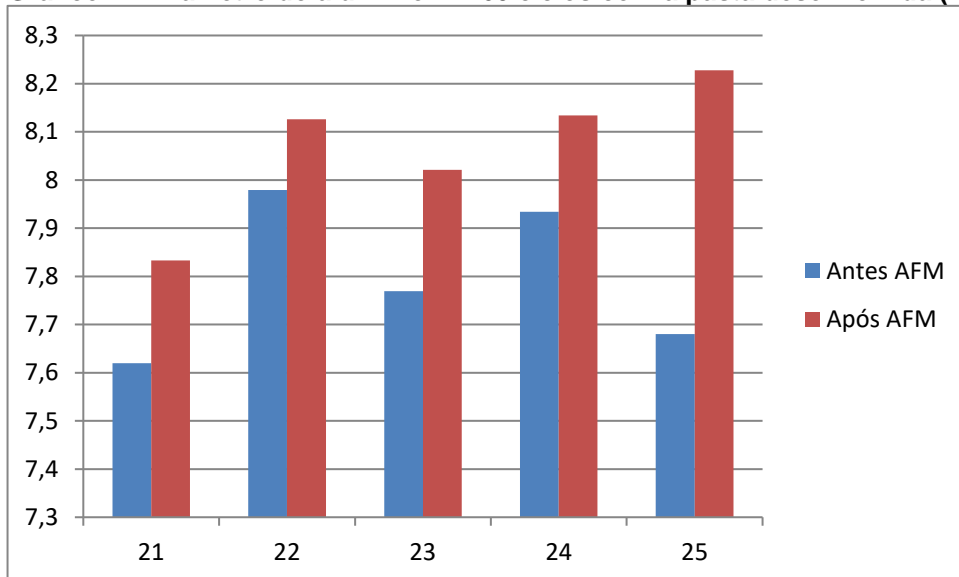
Gráfico 20: Diâmetro do alumínio n = 20 ciclos com a pasta desenvolvida (mm).



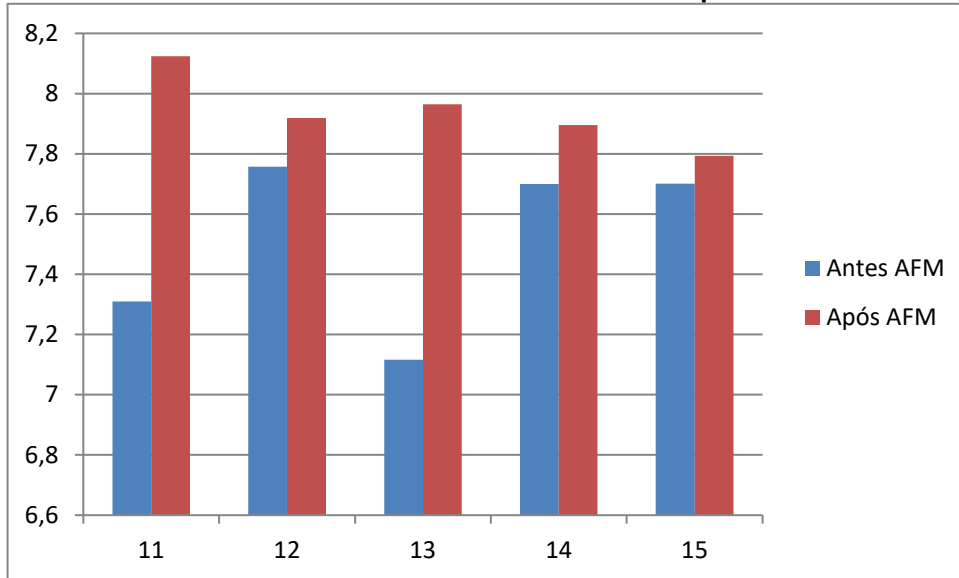
Fonte: Autoria própria.

Gráfico 21: Diâmetro do alumínio n = 60 ciclos com a pasta convencional (mm).

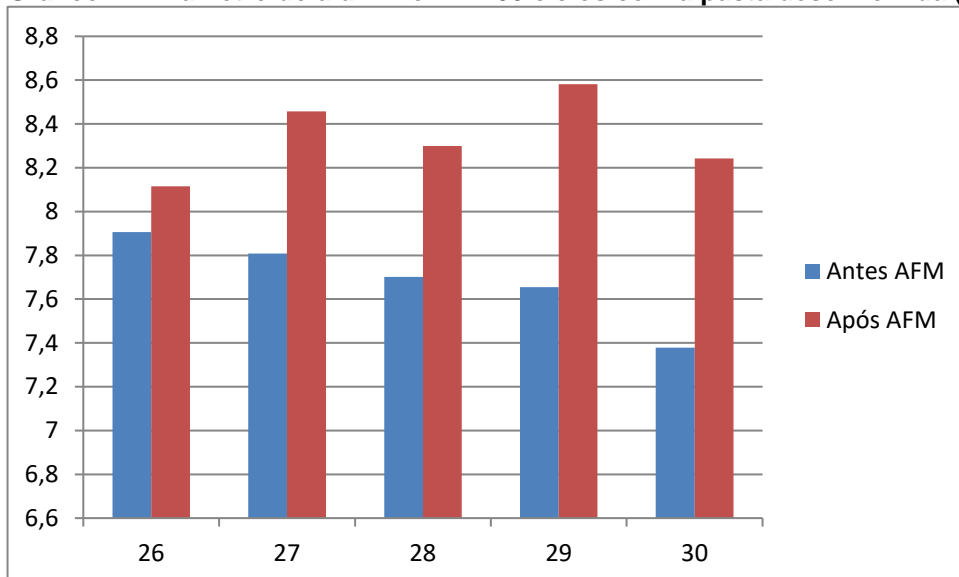
Fonte: Autoria própria.

Gráfico 22: Diâmetro do alumínio n = 60 ciclos com a pasta desenvolvida (mm).

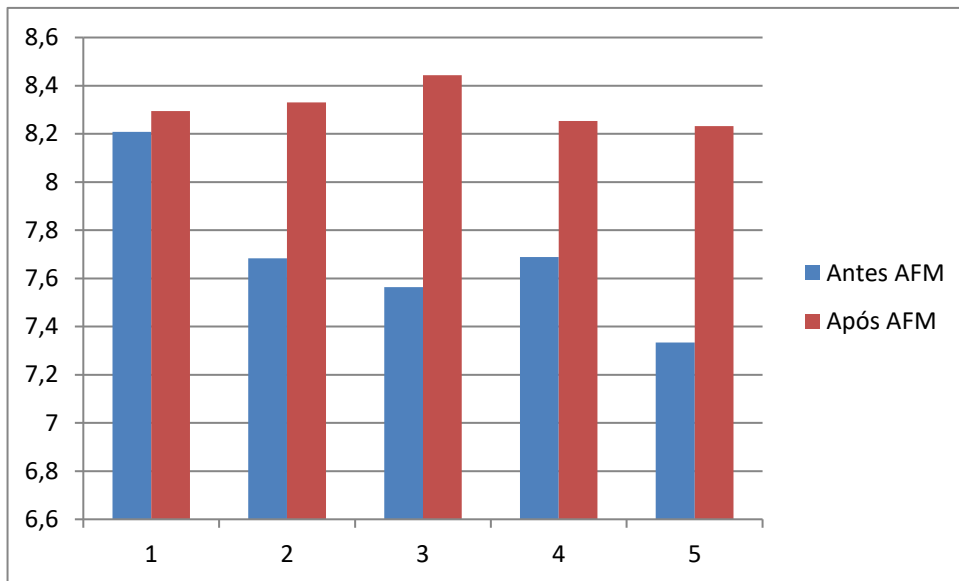
Fonte: Autoria própria.

Gráfico 23: Diâmetro do alumínio n = 100 ciclos com a pasta convencional (mm).

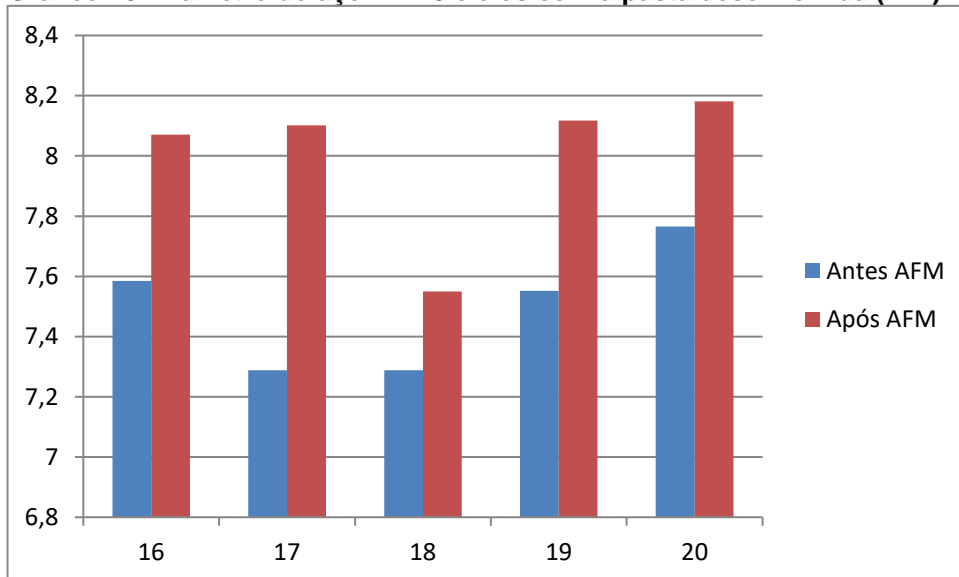
Fonte: Autoria própria.

Gráfico 24: Diâmetro do alumínio n = 100 ciclos com a pasta desenvolvida (mm).

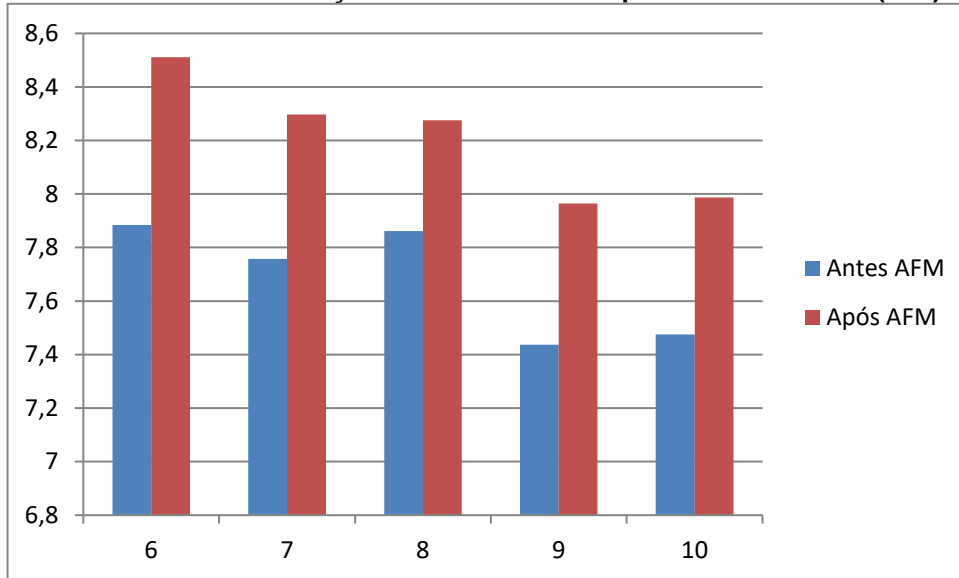
Fonte: Autoria própria.

Gráfico 25: Diâmetro do aço n = 20 ciclos com a pasta convencional (mm).

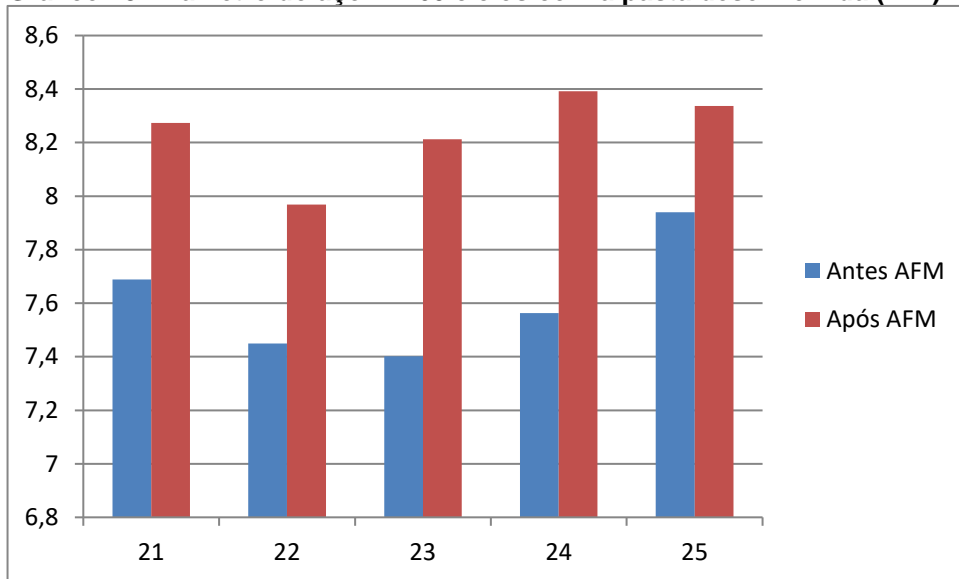
Fonte: Autoria própria.

Gráfico 26: Diâmetro do aço n = 20 ciclos com a pasta desenvolvida (mm).

Fonte: Autoria própria.

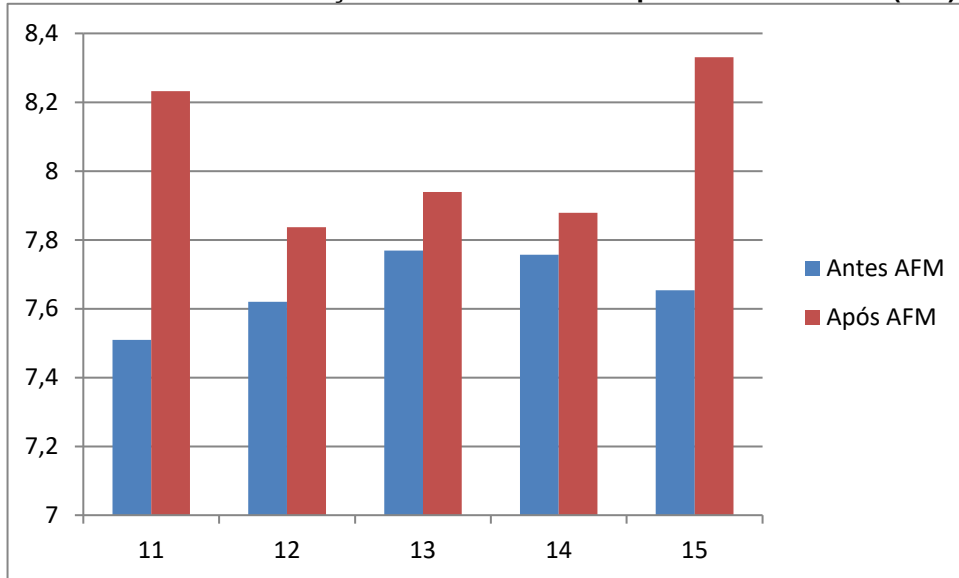
Gráfico 27: Diâmetro do aço n = 60 ciclos com a pasta convencional (mm).

Fonte: Autoria própria.

Gráfico 28: Diâmetro do aço n = 60 ciclos com a pasta desenvolvida (mm).

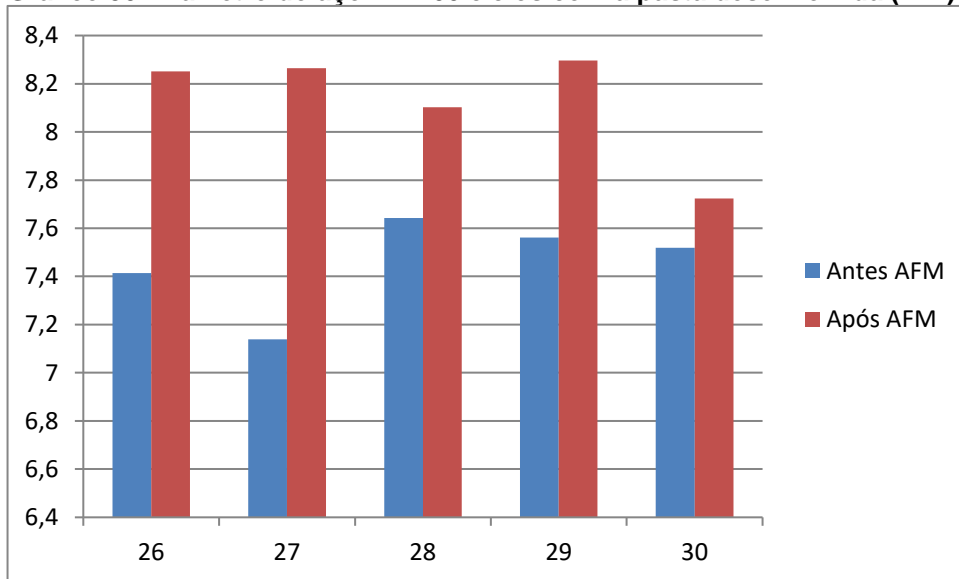
Fonte: Autoria própria.

Gráfico 29: Diâmetro do aço n = 100 ciclos com a pasta convencional (mm).



Fonte: Autoria própria.

Gráfico 30: Diâmetro do aço n = 100 ciclos com a pasta desenvolvida (mm).



Fonte: Autoria própria.

O Quadro 22 apresenta os valores de diâmetro médio das peças de alumínio após o processo de AFM com a pasta convencional e desenvolvida.

Quadro 22: Diâmetro médio das peças de Alumínio (mm).

D (n100)	C (n60)	C (n100)	D (n60)	D (n20)	C (n20)
0,649 >	0,437 >	0,422 >	0,272 >	0,138 >	0,105

Fonte: Autoria própria.

O Quadro 23 apresenta os valores de diâmetro médio das peças de aço após o processo de AFM com a pasta convencional e desenvolvida.

Quadro 23: Diâmetro médio das peças de Aço (mm).

D (n100)	D (n60)	C (n20)	C (n60)	D (n20)	C (n100)
0,672 >	0,628 >	0,615 >	0,524 >	0,508 >	0,382

Fonte: Autoria própria.

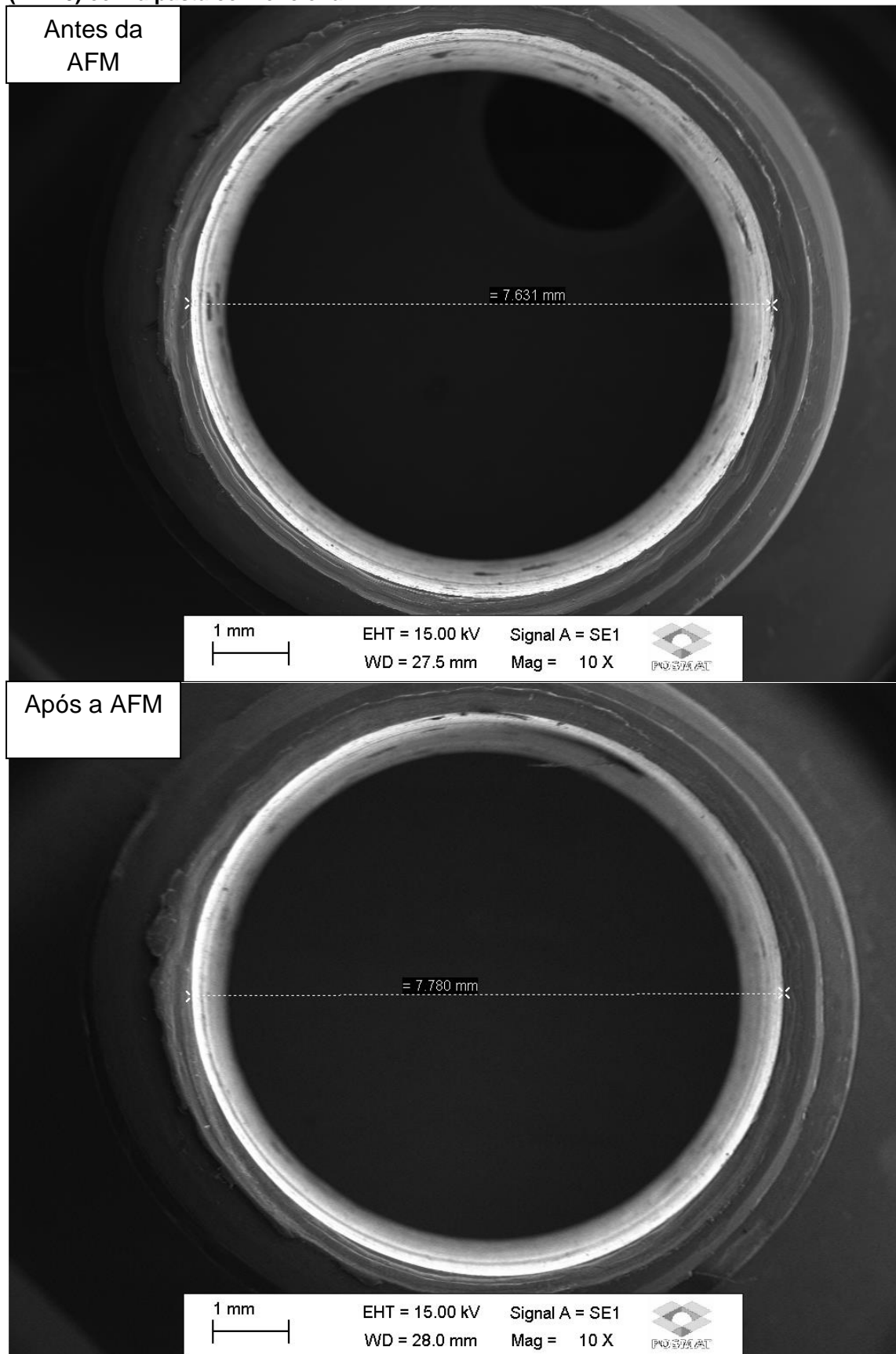
4.4.1 Número de ciclos (n)

A maior média de variação do diâmetro ocorreu para o alumínio e para o aço com $n = 100$ ciclos com a pasta desenvolvida (D), devido à maior quantidade de ciclos.

Foram fotografadas as 60 peças de trabalho de topo em MEV antes e após o emprego do processo AFM para verificar o aumento do diâmetro. Em todas as variações de número de ciclos com o alumínio e com o aço, ocorreu o aumento do diâmetro das peças.

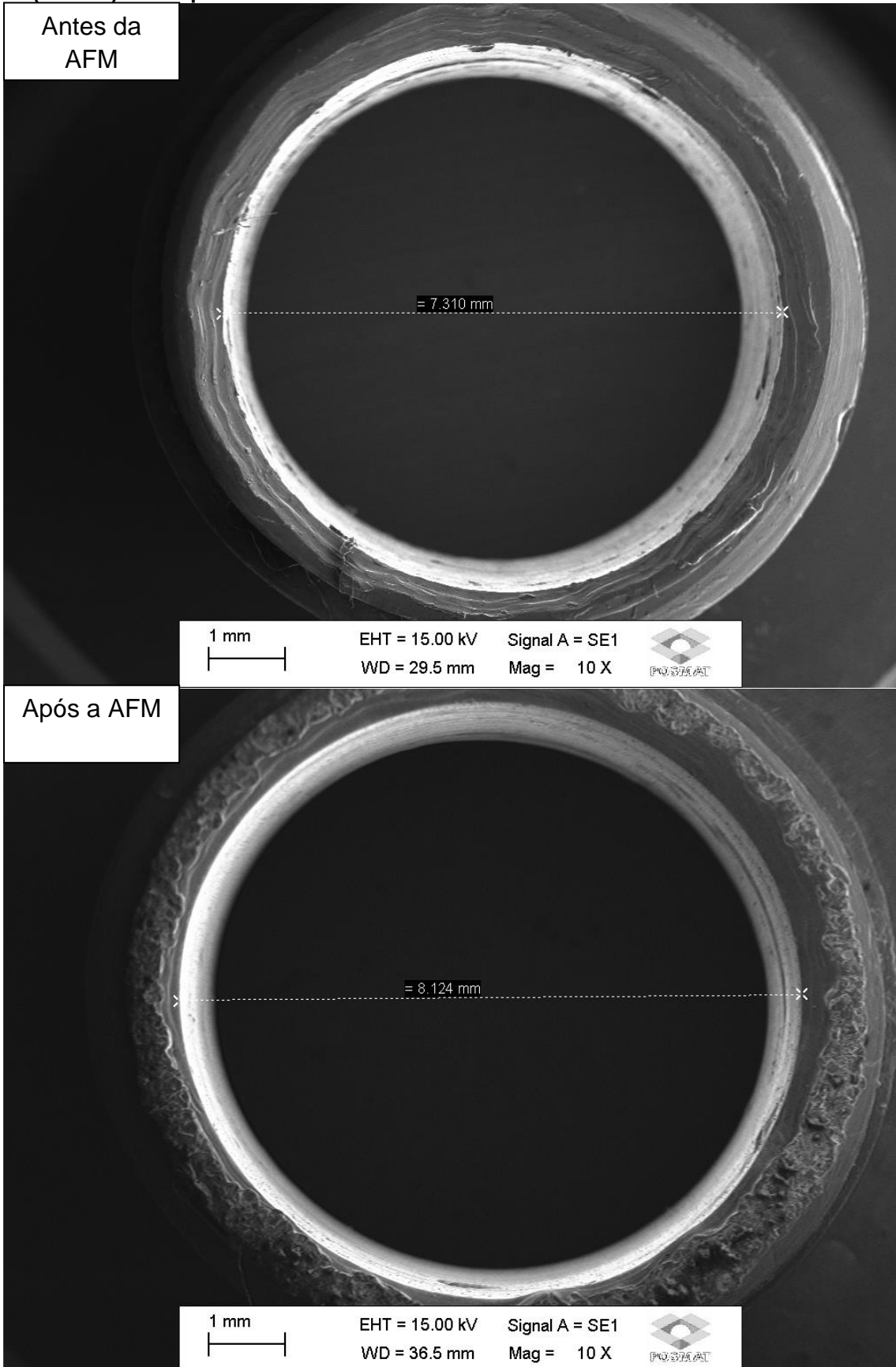
As Figuras 30 a 37 apresentam imagens em MEV para mostrar o efeito do número de ciclos de usinagem sobre a variação do diâmetro interno de 4 peças de alumínio e de aço (respectivamente as peças de números 1, 11, 16 e 26), antes e após a realização do processo AFM, empregando as pastas convencional e desenvolvida. As imagens MEV de todas as outras peças encontram-se no Apêndice A deste trabalho.

Figura 30: Efeito do número de ciclos sobre a variação do diâmetro da peça de alumínio 1 (n = 20) com a pasta convencional.



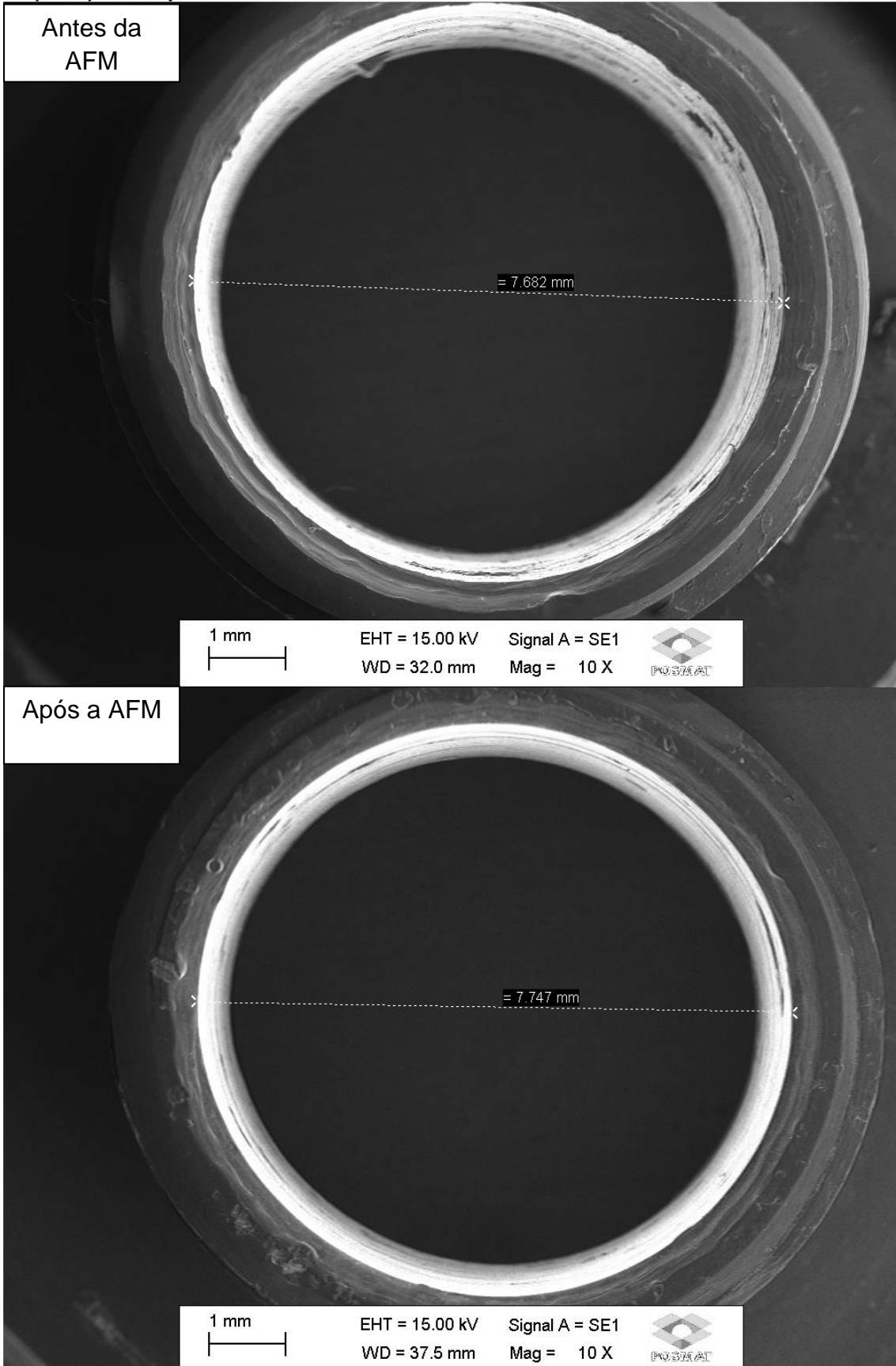
Fonte: Autoria própria.

Figura 31: Efeito do número de ciclos sobre a variação do diâmetro da peça de alumínio 11 (n = 100) com a pasta convencional.



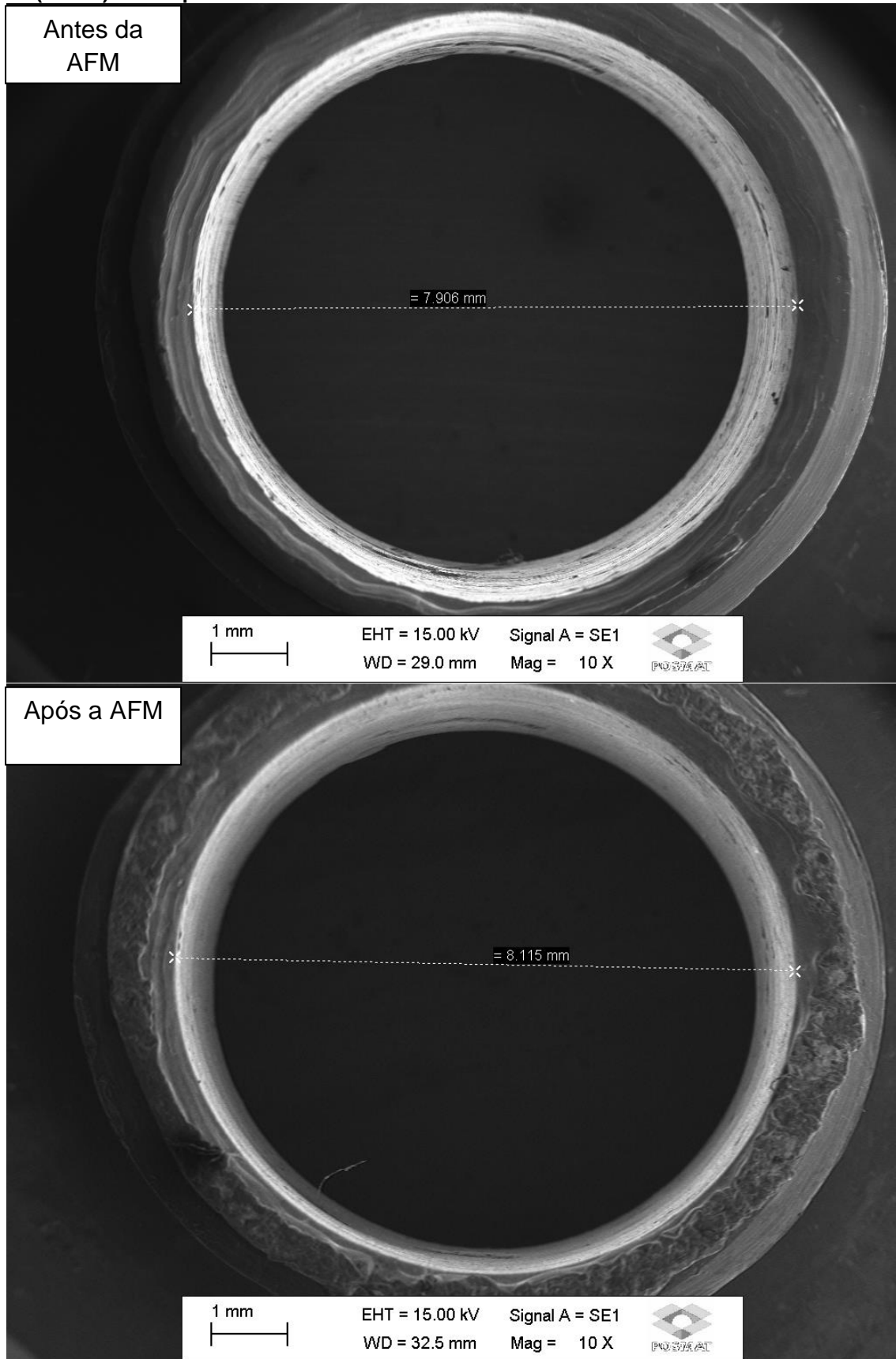
Fonte: Autoria própria.

Figura 32: Efeito do número de ciclos sobre a variação do diâmetro da peça de alumínio 16 (n=20) com a pasta desenvolvida.



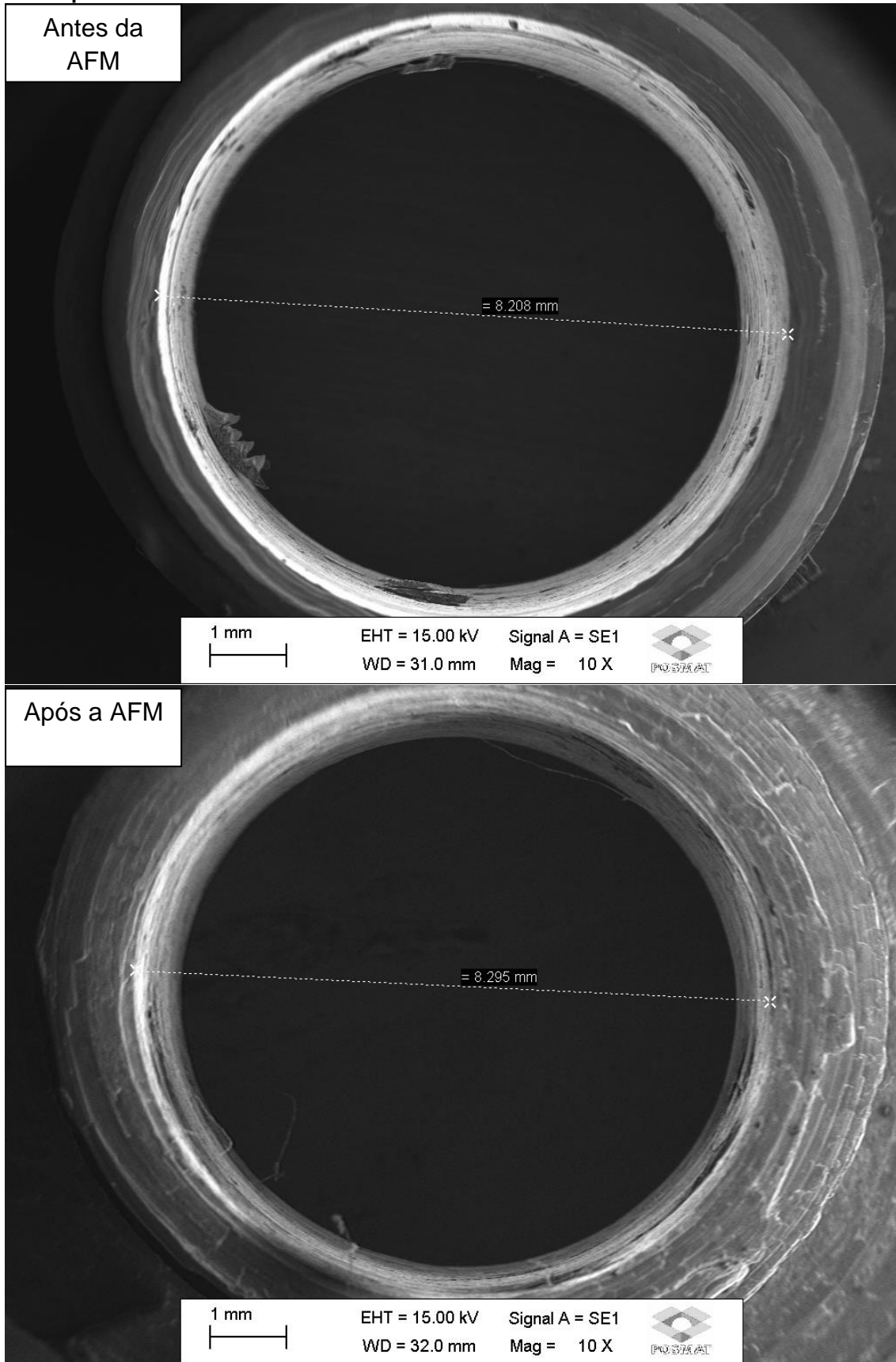
Fonte: Autoria própria.

Figura 33: Efeito do número de ciclos sobre a variação do diâmetro da peça de alumínio 26 (n=100) com a pasta desenvolvida.



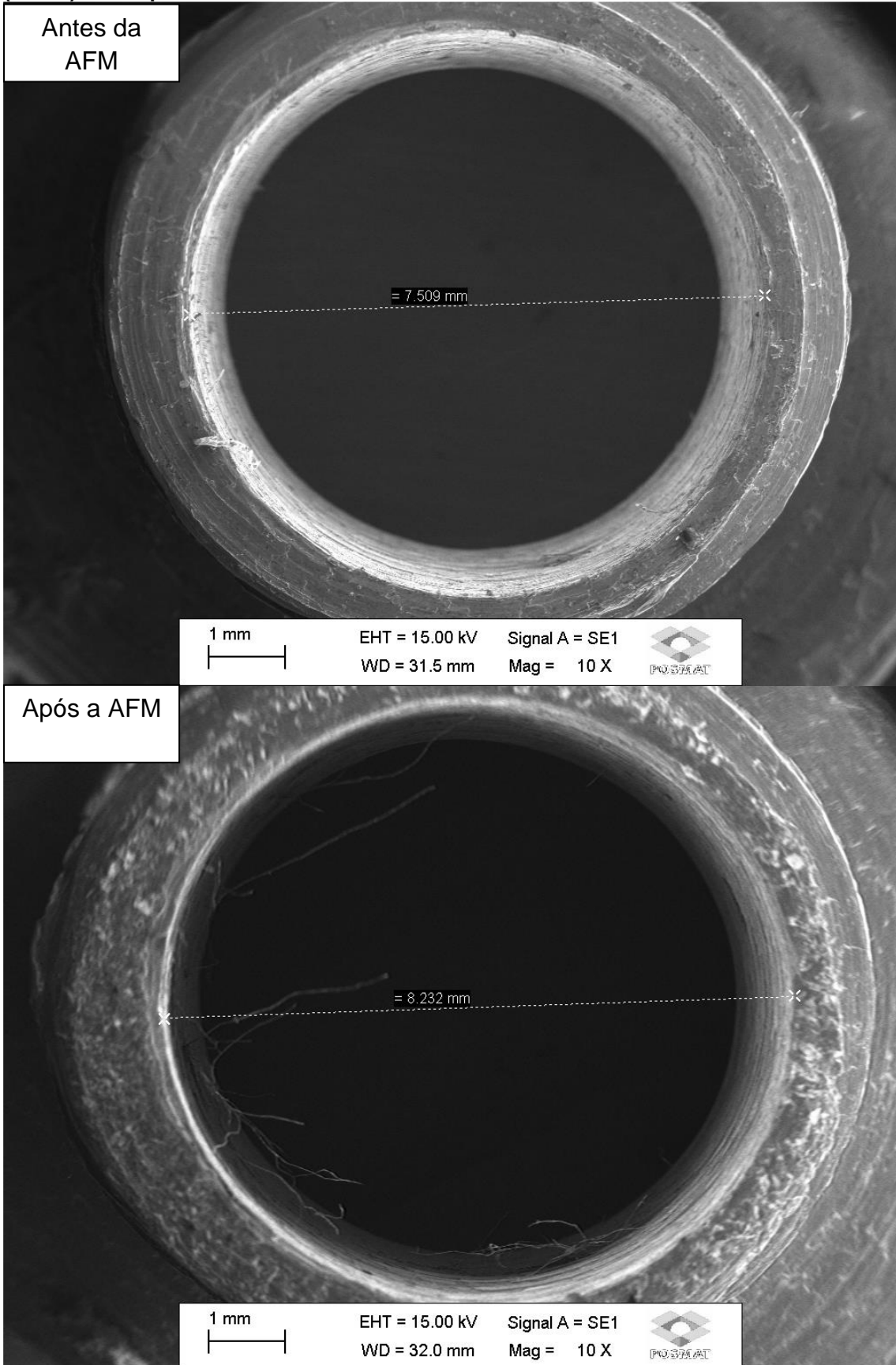
Fonte: Autoria própria.

Figura 34: Efeito do número de ciclos sobre a variação do diâmetro da peça de aço 1 (n = 20) com a pasta convencional.



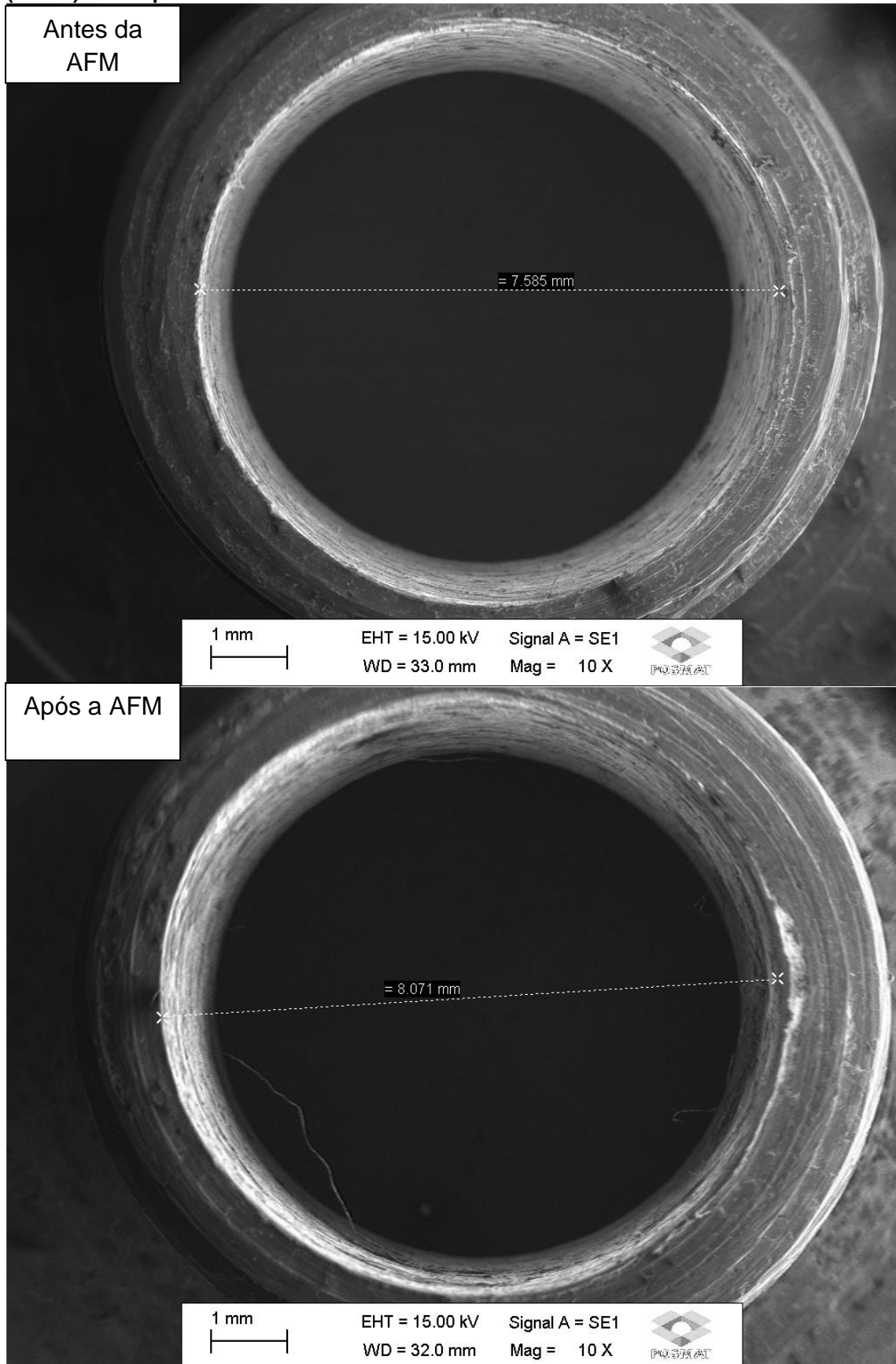
Fonte: Autoria própria.

Figura 35: Efeito do número de ciclos sobre a variação do diâmetro da peça de aço 11 (n=100) com a pasta convencional.



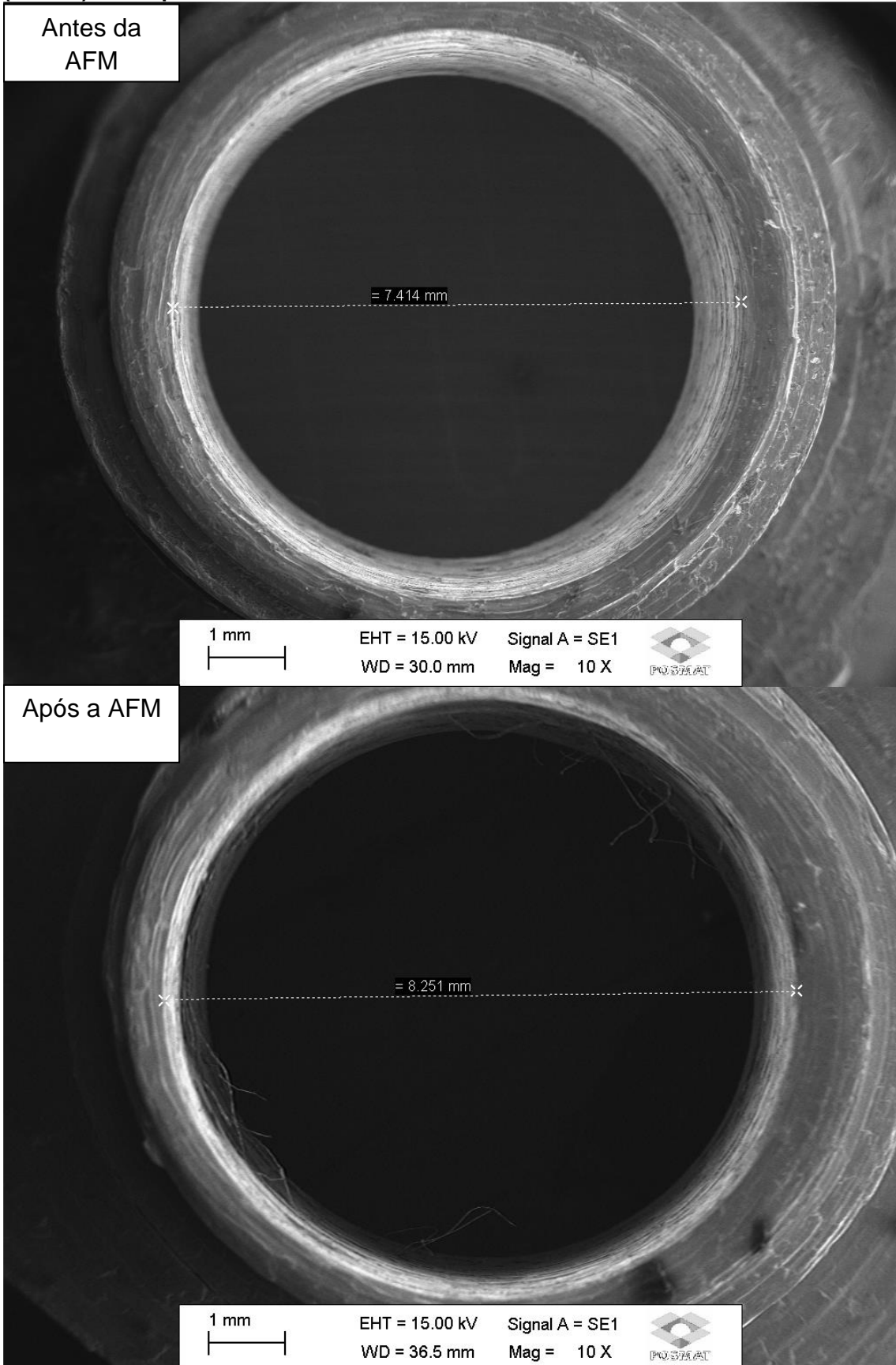
Fonte: Autoria própria.

Figura 36: Efeito do número de ciclos sobre a variação do diâmetro da peça de aço 16 (n = 20) com a pasta desenvolvida.



Fonte: Autoria própria.

Figura 37: Efeito do número de ciclos sobre a variação do diâmetro da peça de aço 26 (n = 100) com a pasta desenvolvida.



Fonte: Autoria própria.

4.5 Análise Estatística de Dados

Na análise estatística descrevemos a atividade de transformar um conjunto de dados coletados com o objetivo de poder verificá-los melhor, buscando a identificação de divergências ou de padrões e tendências para auxiliar na tomada de decisões mais assertivas.

4.5.1 Análise dos dados de rugosidade para o alumínio

Para o alumínio, a variabilidade foi bem maior do que para o aço. Por essa razão, no caso do parâmetro Ra, não é apropriado fazer uma análise de variância.

4.5.1.1 Rugosidade Rq

Ao nível de significância de 5%, observa-se que pela Tabela 3, não efeito de interação, pois não rejeitamos a hipótese nula de interação e, portanto, podemos analisar os fatores principais (Pastas e Ciclos) separadamente. Dessa forma, observamos que rejeitamos a hipótese nula de que não há efeito dos ciclos sobre o Rq e concluímos que existe diferença significativa entre os ciclos, ou seja, o ciclo de 100 apresentou menor rugosidade do que os outros ciclos (20 e 60) que apresentaram o mesmo desempenho (Tabela 5). Por outro lado, para as pastas, não rejeitamos a hipótese nula de que o fator não tem efeito sobre o Rq e, portanto, não há diferença significativa entre as pastas (Tabela 4).

Tabela 3: Análise de variância do Rq para o alumínio.

Causa de variação	Grau de liberdade	Soma de quadrados	Quadrado médio	F ₀	p-valor
Pasta	1	0,0008	0,0008	0,0179	0,8946
Ciclos	2	0,5010	0,2505	5,9865	0,0078
Interação	2	0,1093	0,0546	1,3055	0,2896
Resíduo	24	1,0043	0,0418		
Total	29	1,6153	0,0557		

Fonte: Autoria própria.

Tabela 4: Estimativas do Rq para os tipos de pastas para o alumínio.

Pasta	Média	Erro padrão	IC (95%)
Convencional	0,6547	0,0671	(0,5108; 0,7986)
Desenvolvida	0,6447	0,0565	(0,5235; 0,7659)

Fonte: Autoria própria.

Tabela 5: Estimativas do Rq para os tipos de ciclos para o alumínio.

Ciclos	Média	Erro padrão	IC (95%)
60	0,746 ^a	0,0481	(0,6372; 0,8548)
20	0,736 ^a	0,0798	(0,5555; 0,9165)
100	0,467 ^b	0,0608	(0,3295; 0,6045)

Fonte: Autoria própria.

4.5.1.2 Rugosidade Rz

Ao nível de significância de 5%, observa-se que pela Tabela 6, não efeito de interação, pois não rejeitamos a hipótese nula de interação e, portanto, podemos analisar os fatores principais (Pastas e Ciclos) separadamente. Dessa forma, observamos que rejeitamos a hipótese nula de que não há efeito dos ciclos sobre o Rz e concluímos que existe diferença significativa entre os ciclos, ou seja, o ciclo de 100 apresentou menor rugosidade do que os outros ciclos (20 e 60) que apresentaram o mesmo desempenho (Tabela 8). Por outro lado, para as pastas, não rejeitamos a hipótese nula de que o fator não tem efeito sobre o Rz e, portanto, não há diferença significativa entre as pastas (Tabela 7).

Tabela 6: Análise de variância do Rz para o alumínio.

Causa de variação	Grau de liberdade	Soma de quadrados	Quadrado médio	F ₀	p-valor
Pasta	1	0,0295	0,0295	0,0376	0,8479
Ciclos	2	7,6501	3,8251	4,8815	0,0166
Interação	2	2,7546	1,3773	1,7577	0,1939
Resíduo	24	18,8058	0,7836		
Total	29	29,2399	1,0083		

Fonte: Autoria própria.

Tabela 7: Estimativas do Rz para os tipos de pastas para o alumínio.

Pasta	Média	Erro padrão	IC(95%)
Convencional	2,5800	0,2917	(1,9543; 3,2057)
Desenvolvida	2,5173	0,2325	(2,0186; 3,0160)

Fonte: Autoria própria.

Tabela 8: Estimativas do Rz para os tipos de ciclos para o alumínio.

Ciclos	Média	Erro padrão	IC (95%)
60	2,9560 ^a	0,2374	(2,4190; 3,4930)
20	2,8530 ^a	0,3251	(2,1176; 3,5884)
100	1,8370 ^b	0,2791	(1,2057; 2,4683)

Fonte: Autoria própria.

4.5.2 Análise dos dados de rugosidade para o aço

4.5.2.1 Rugosidade Ra

Ao nível de significância de 5%, observa-se que pela Tabela 9, não efeito de interação, pois não rejeitamos a hipótese nula de interação e, portanto, podemos analisar os fatores principais (Pastas e Ciclos) separadamente. Entretanto, para os fatores principais, não rejeitamos a hipótese nula de que os fatores não tem efeito sobre o Ra, ou seja, não há diferença significativa entre as pastas (Tabela 10) e também, não diferença significativa entre os ciclos (Tabela 11).

Tabela 9: Análise de variância do Ra para o aço.

Causa de variação	Grau de liberdade	Soma de quadrados	Quadrado médio	F ₀	p-valor
Pasta	1	0,3350	0,3350	1,8969	0,1811
Ciclos	2	0,3294	0,1647	0,9326	0,4073
Interação	2	0,3576	0,1788	1,0124	0,3783
Resíduo	24	4,2386	0,1766		
Total	29	5,2605	0,1814		

Fonte: Autoria própria.

Tabela 10: Estimativas do Ra para os tipos de pastas para o aço.

Pasta	Média	Erro padrão	IC (95%)
Convencional	2,9500	0,0991	(2,7374; 3,1626)
Desenvolvida	2,7387	0,1168	(2,4882; 2,9892)

Fonte: Autoria própria.

Tabela 11: Estimativas do Ra para os tipos de ciclos para o aço.

Ciclos	Média	Erro padrão	IC(95%)
100	2,9670	0,1197	(2,6962; 3,2378)
20	2,8550	0,1693	(2,4720; 3,2380)
60	2,7110	0,1086	(2,4653; 2,9567)

Fonte: Autoria própria.

4.5.2.2 Rugosidade Rq

Ao nível de significância de 5%, observa-se que pela Tabela 12, não efeito de interação, pois não rejeitamos a hipótese nula de interação e, portanto, podemos analisar os fatores principais (Pastas e Ciclos) separadamente. Entretanto, para os fatores principais, não rejeitamos a hipótese nula de que os fatores não tem efeito sobre o Rq, ou seja, não há diferença significativa entre as pastas (Tabela 13) e também, não diferença significativa entre os ciclos (Tabela 14).

Tabela 12: Análise de variância do Rq para o aço.

Causa de variação	Grau de liberdade	Soma de quadrados	Quadrado médio	F ₀	p-valor
Pasta	1	0,5741	0,5741	2,4102	0,1336
Ciclos	2	0,4264	0,2132	0,8950	0,4218
Interação	2	0,5119	0,2560	1,0745	0,3573
Resíduo	24	5,7168	0,2382		
Total	29	7,2291	0,2493		

Fonte: Autoria própria.

Tabela 13: Estimativas do Rq para os tipos de pastas para o aço.

Pasta	Média	Erro padrão	IC (95%)
Convencional	3,6033	0,1161	(3,3543; 3,8523)
Desenvolvida	3,3267	0,1349	(3,0373; 3,6161)

Fonte: Autoria própria.

Tabela 14: Estimativas do Rq para os tipos de ciclos para o aço.

Ciclos	Média	Erro padrão	IC (95%)
100	3,6120	0,1356	(3,3053; 3,9187)
20	3,4630	0,2059	(2,9973; 3,9287)
60	3,3200	0,1216	(3,0449; 3,5951)

Fonte: Autoria própria.

4.5.2.3 Rugosidade Rz

Ao nível de significância de 5%, observamos que pela Tabela 15, não efeito de interação, pois não rejeitamos a hipótese nula de interação e, portanto, podemos analisar os fatores principais (Pasta e Ciclos) separadamente. Dessa forma, observamos que rejeitamos a hipótese nula de que não há efeito da pasta sobre o Rz e concluímos que existe diferença significativa entre as pastas, ou seja, a pasta

desenvolvida apresenta menor rugosidade do que a convencional (Tabela 16). Por outro lado, para os ciclos, não rejeitamos a hipótese nula de que o fator não tem efeito sobre o Rz e, portanto, não há diferença significativa entre os ciclos (Tabela 17).

Tabela 15: Análise de variância do Rz para o aço.

Causa de variação	Grau de liberdade	Soma de quadrados	Quadrado médio	F ₀	p-valor
Pasta	1	11,1870	11,1870	4,3052	0,0489
Ciclos	2	3,8600	1,9300	0,7427	0,4864
Interação	2	4,5600	2,2800	0,8774	0,4288
Resíduo	24	62,3630	2,5985		
Total	29	81,9710	2,8266		

Fonte: Autoria própria.

Tabela 16: Estimativas do Rz para os tipos de pastas para o aço.

Pasta	Média	Erro padrão	IC (95%)
Convencional	13,6560	0,3954	(12,8079; 14,5041)
Desenvolvida	12,4347	0,4251	(11,5229; 13,3465)

Fonte: Autoria própria.

Tabela 17: Estimativas do Rz para os tipos de ciclos para o aço.

Ciclos	Média	Erro padrão	IC (95%)
100	13,5340	0,4357	(12,5485;14,5196)
20	12,9190	0,6750	(11,3922;14,4459)
60	12,6830	0,4716	(11,6162;13,7498)

Fonte: Autoria própria.

5 CONCLUSÕES

As seguintes conclusões foram obtidas a partir dos ensaios realizados:

- A remoção de material (RM) é influenciada pela dureza e pelo acabamento superficial das peças de trabalho. O material com maior dureza apresentou maior remoção de material, porém a melhoria no acabamento superficial (rugosidade Ra) resultou melhor no material de menor dureza;
- A maior variação média de diâmetros ocorreu, tanto no alumínio quanto no aço, com a pasta desenvolvida para o maior número de ciclos ($n = 100$ ciclos);
- O menor valor médio de rugosidade Ra encontrado para o aço foi obtido com a pasta desenvolvida empregando 60 ciclos de usinagem;
- O menor valor médio de rugosidade Ra encontrado para o alumínio foi obtido com a pasta convencional empregando 100 ciclos de usinagem;
- Considerando a rugosidade Rq das peças de alumínio, conclui-se que existe diferença significativa entre os ciclos, uma vez que, a usinagem com 100 ciclos apresentou menor rugosidade do que as usinagens com os outros números de ciclos (20 e 60), que apresentaram níveis equivalentes de rugosidade;
- Considerando a rugosidade Rz das peças de alumínio, conclui-se que existe diferença significativa entre os ciclos, uma vez que, a usinagem com 100 ciclos apresentou menor rugosidade do que as usinagens com os outros números de ciclos (20 e 60), que apresentaram níveis equivalentes de rugosidade;
- Analisando a rugosidade Rz das peças de aço, conclui-se que existe diferença significativa entre as pastas empregadas, uma vez que a pasta desenvolvida apresentou melhor desempenho (menor rugosidade) do que a pasta convencional.

5.1 Sugestões para Trabalhos Futuros:

Como sugestão para trabalhos futuros, propõe-se:

- Realizar ensaios de desgaste de peças confeccionadas com outro material, como, por exemplo, o latão;
- Realizar ensaios de desgaste nas peças de alumínio 6061 - T6 e de aço SAE 1045, variando a concentração e o tamanho das partículas abrasivas;
- Desenvolver um equipamento para usinagem UFA que realize a prensagem unidirecional de duplo sentido.

REFERÊNCIAS

- AGHAN, R. L.; L. E. Samuels. **Mechanism of abrasive polishing**. *Wear* 16, 293–301, 1970.
- BARLETTA, M. 2005. **A new technology in surface finishing: Fluidized bed machining (FBM) of aluminum alloys**. *Journal of Materials processing Technology* 173-157-165, 2006.
- BAYMA, C. **Oiticica**. Ministério da Agricultura - SAI. Rio de Janeiro. (Produtos Rurais 1), 53p., 1957.
- BORCHES, J. **Why Abrasive Flow Deburring**. Technical Paper of the Society of Manufacturing Engineers (SME), MR80 - 101, 1980.
- BRAR, B. S.; WALIA, R. S.; SINGH, V. P. **Regression model for electro-chemical aided abrasive flow machining (eca2fm) process**. 5th International & 26th All India Manufacturing Technology, Design and Research Conference IIT Guwahati, Assam, India, 2014.
- BREMERSTEIN, T.; POTTHOFF, A.; MICHAELIS, A.; SCHMIEDEL, C.; UHLMANN, E.; BLUG, B.; AMANN, T. **Wear of abrasive media and its effect on abrasive flow machining results**. *Wear*, Vol. 342, Issues 343-15, p. 44 -51, 2015.
- CHERIAN, J.; JEOJU, M. I. **Effect of process variables in abrasive flow machining**. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, Volume 3, Issue 2, 2013.
- CATONI, M. E. S. **Biossíntese e obtenção de PHB e PHBV plastificados com PEG visando aplicação em liberação controlada de farmacos**. Dissertação (Mestre em Engenharia de Processos) – Joinville – Universidade da Região de Joinville, 2011.
- DABROWSKI, L.; MARCINIAK, M.; SZEWCZYK, T. **Analysis of abrasive flow machining with an electrochemical process aid**. *Proc IMechE, Part B: Journal of Engineering Manufacture*; 220: 397–403, 2006.
- DAS, M.; JAIN, V. K.; GHOSH DASTIDAR, P. S. **Nanofinishing of flat workpieces using rotational–magnetorheological abrasive flow finishing (RMRAFF) process**. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*; 62(1-4): 405–420, 2011.
- FANG, L.; ZHA, J.; SUN, K.; ZHENG, D.; MA, D. **Temperature as sensitive monitor for efficiency of work in abrasive flow machining**. *Wear*, Vol. 266, pp. 678-687, 2009.
- FLETHER, A. J.; FIORAVANTI, A. Polishing and honing processes: **An investigation of the thermal properties of mixture of polyborosiloxane and silicon carbide abrasive**. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 210, n. 3, p. 255-265, 1996.

GILMORE, J. R.; RHOADES, L. J. **Abrasive polishing method, apparatus and composition.** Patent number 6,273,787, USA, 14 August, 2001.

GORANA, V. K.; JAIN, V. K.; LAL, G. K. **Forces prediction during material deformation in abrasive flow machining.** 260: 128–139, 2006.

GORANA, V. K.; JAIN, V. K.; LAL, G. K. **Experimental investigation into cutting forces and active grain density during abrasive flow machining.** International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 44, n. 2-3, p. 201-211, 2004.

GRAHAM, D.; BAUL, R. M. **An investigation into the mode of material removal in the grinding process.** Wear, 19, 301–314, 1972.

GUPTA, R.; RAHUL, W. **Effect and optimization of Process Parameters on surface roughness in Abrasive Flow Machining Process.** IJITKM Special Issue (ICFTEM-2014), pp. 266-273, May, 2014.

GUPTA, R.; VAISHYA, R. O.; WALIA, R. S.; KALR, P. K. **Experimental Study of Process Parameters on Material Removal Mechanism in Hybrid Abrasive Flow Machining Process (AFM).** International Journal Of Scientific Research, Vol. 2, Issue 6 June, ISSN No 2277 – 8179, 2013.

GUPTA, R.; BALINDER, C. **Investigation and optimization of process parameters in electrochemical aid abrasive flow machining.** International Journal of Scientific and Engineering Research, Vol. 6, Issue 2, ISSN 2229-5518, February, 2015.

JAIN, R. K.; JAIN, V. K. **Simulation of abrasive flow machining process** (to be published).

JAIN, R. K.; JAIN, V. K. **Abrasive fine finishing processes - a review.** Int J. Manuf. Sci. Prod. 2(1):61–69, 1999.

JAIN, R. K.; JAIN, V. K.; DIXIT, P. M. **Modelling of material removal and surface roughness in abrasive flow machining process.** Int. J. Mach Tools Manuf. 39:1903–1923, 1999.

JAIN, V. K. **Advanced Machining Processes,** Allied Publishers, Mumbai (in press), 2002.

JAIN, V. K.; ADSUL, S. G. **Experimental investigations into abrasive flow machining process,** 40: 1003-1021, 2000.

JAIN, V. K.; ADSUL, S. G. **Experimental investigations into abrasive flow machining (AFM).** Machine tools & manufacture, November 1999.

JHA, S.; JAIN, V. K. **Design and development of magnetorheological abrasive flow finishing (MRAFF) process.** International Journal of Machine Tools & Manufacture 44, 1019-1029, 2004.

JI, S. M.; HUANG, X.; TAN, D.; TAN, Y. **Gas-liquid abrasive flow polishing and its process parameter optimization**. Optics and Precision Engineering, Vol. 24, Issue 4, p. 855-864, 2016.

KAR, K. K.; RAVIKUMAR, N. L.; TAILOR, P. B., RAMKUMAR, J.; SATHIYAMOORTHY, D. **Performance evaluation and rheological characterization of newly developed butyl rubber based media for abrasive flow machining process**. Journal of Materials Processing Technology, Vol. 209, pp. 2212-2221, 2009.

KHRUSHCHOV, M. M.; BAVICHOV, M. A. **Research on wear of metals**. Ch.8, NEL Translation No. 893, National Engineering Laboratory, East Kilbride, 1960.

KOHUT, Tom. **Surface finishing with abrasive flow machining**. SME technical paper 35-43, 1989.

KUMAR, S. S.; SOMASHEKHAR, S. H. **A review on abrasive flow machining (AFM)**. Procedia Technology 25; 1297-1304, 2016.

LAL, G. K. **Forces in vertical surface grinding**. International Journal of Machine Tool Design Research 8, 33–43, 1968.

LINKE, B.; DORNFELD, D. A. **Application of axiomatic design principles to identify more sustainable strategies for grinding**. Journal of Manufacturing Systems; 31: 412-419, 2012.

LINKE, B.; DAS, J. **Sustainability indicators for finishing operations based on process performance and part quality**. Procedia CIRP; 14:564- 569, 2014.

LOVELESS, T. R.; WILLAMS, R. E.; RAJURKAR, K. P. **A study of the effects of abrasive flow finishing on various machined surfaces**. Journal of Material Processing Technology, 47, 133–151, 1994.

MALI, H. S.; MANNA, A. **Simulation of surface generation during abrasive flow finishing Al/SiCp-MMC using neural networks**. International Journal of Advanced Manufacturing Technology (61): 1263-1268, 2012.

McCARTY, R. W. U S Patent 3,521,412, 1970.

MONTGOMERY, D. C. **Design and analysis of experiments**. New York: John Wiley & Sons, 5ed., 2001.

MULLER, M.; LEBEDEV, A.; SVOBODOVA, J.; NAPRSTKOVA, N.; LEBEDEV, P. **Abrasive-free ultrasonic finishing of metals**. Manufacturing Technology.vol. 14, pp. 366-370, 2014.

NOVAK, M. **Surfaces with high precision of roughness after grinding**. In: Manufacturing technology, vol. 12, pp. 66 -70, 2012.

PERRY, W. B. **Non-traditional Conference Proceedings**, pp. 121–127, 1989.

PERRY, W. B. **Properties and capabilities of low-pressure abrasive flow media**, Technical Paper of the society of Manufacturing Engineers (SME), MR75-831, 1975.

PINTO, G. P. **Características físico-químicas e outras informações sobre as principais oleaginosas do Brasil**. Recife: Instituto de Pesquisa e Experimentação Agropecuárias do Nordeste. P. 47- 49 (Boletim Técnico, 18), 1963.

PRZYLENK, K. **Abrasive flow machining: a process for surface finishing and deburring of workpiece with a complicated shape by means of an abrasive laden medium**. ASME, PED, 22, 101–110, 1986.

RAJESHA, S.; VENKATESH, G.; SHARMA, A. K.; KUMAR, P. **Performance study of a natural polymer based media for abrasive flow machining**, Indian Journal of Engineering & materials Sciences, 407-413, 2010.

RAJURKAR, K. P.; KOZAK, J. **Hybrid machining process evaluation and development**. 1999.

RHOADES, L. J. **Abrasive flow machining: a case study**. 1991.

RHOADES, L. J.; KOHUT, T. A. **Reversible unidirectional AFM**. Patent number 5, 070,652, USA, 10 December, 1991.

RHOADES, L. J. **Abrasive flow machining**. Manufacturing Engineering, November 75–78, 1988.

RHOADES, L. J. **Abrasive flow machining**. Technical Paper of the Society of Manufacturing Engineers (SME), MR89 – 145, 1989.

RHOADES, L. J. **Abrasive flow machining and its uses**. **Non-traditional Machining Conference Proceedings**, Cincinnati, OH, December, pp. 111 – 120, 1985.

RHOADES, L. J. **Abrasive flow machining with not-so-silly putty**. Metal Finishing, 27–29, 1987.

RHOADES, L. J.; KOHUT, T. A.; NOKOVICH, N. P. **Unidirectional abrasive flow machining**. Patent number 5,367,833,USA, 29 November, 1994.

SAAD, S.; HAMEEDULLAH, M. **Abrasive flow machining performance measures on work-piece surfaces having different vent/passage considerations for media outflow**. International Journal of Computer Communication and Information System Vol2. No1. ISSN: 0976–1349, Jul. - Dec., 2010.

SANKAR, M. R.; JAIN, V. K.; RAMKUMAR, J. **Experimental investigations into rotating workpiece abrasive flow finishing**. 267(1-4): 43–51, 2009.

SANKAR, M. R.; MONDAL S.; RAMKUMAR, J. **Experimental investigations and modelling of drill bit guided abrasive flow finishing (DBGAFF) process**. International Journal of Advanced Manufacturing Technology; 42: 678–688, 2009.

SANTHOSH, K. S.; SOMASHEKHAR, S. H. **A review on abrasive flow machining (AFM)**. Global Colloquium in Recent Advancement and Effectual Researches in Engineering, Science and Technology, 1297 – 1304, 2016.

SHACKELFORD, J. F. **Introduction to materials science for engineers**. Prentice Hall, 6 ed., 2004.

SHAN, H. S.; DUBEY, A. K. **Micro machining by flow of abrasives**. Proceedings 17th AIMTDR Conference, Warangal, India, pp 269–275, 1997.

SHARMA, A. K.; VENKATESH, G.; RAJESHA, S.; KUMAR, P. **Experimental investigations into ultrasonic-assisted abrasive flow machining (UAAF) process**. International Journal of Advanced Manufacturing Technology; 80: 477–493, 2015.

SHAW, M. C. **Principles of Abrasive Processing**, Clarendon Press, 1996.

SHAW, M. C. **A new theory of grinding**, in: Proc. of Institutions Conference on Production Science in Industry, Melbourne, pp. 73–78, 1971.

SILVA, F. J. P.; SILVA, R. A.; SILVA, M. J. S. **Potencial apícola para apismellifera 1. em área de caatinga no período da floração da oiticica (Licaniarigida Benth)**. Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável, v.5, n. 1, 2010.

SINGH, S. **Studies in metal finishing with magnetically assisted abrasive flow machining**. PhD thesis, IIT, Roorkee, 2002.

SINGH, S. SHAN, H. S.; KUMAR, P. **Wear behavior of materials in magnetically assisted abrasive flow machining**. J Mater Process Technol 128:155–156, 2002.

SINGH, S.; SHAN, H. S. **Development of magneto abrasive flow machining process**. Int Journal of Machine Tools and Manufacture; 42: 953–959, 2002.

SOMASHEKHAR, S. Hiremath; VIDYADHAR, H. M.; MAKARAM, S. **A novel approach for finishing internal complex features using developed abrasive flow finishing machine**. International Journal of Recent Advances in Mechanical Engineering (IJMECH) Vol.2, No.4, November, 2013.

STACHOWIAK, G. W.; BATCHELOR, A. W. **Engineering Tribology**. Amsterdam, Elsevier. 314p, 1993.

UHLMANN, E.; SZULCZYNSKI, H. **Precise finishing of inner contours with abrasive flow machining**. International Journal for Manufacturing Science & Technology, Vol. 7 (2), pp. 33-39, 2005.

UHLMANN, E.; MHOTOVIC, V.; COENEN, A. **Modelling the abrasive flow machining process on advanced ceramic materials**. Journal of Materials Processing Technology, Vol. 209, pp. 6062-6066, 2009.

WALIA, R. S.; SHAN, H. S.; KUMAR, P. **Abrasive flow machining with additional centrifugal force applied to the media**. Machining Science and Technology; 10(3): 341–354, 2006.

WILLIAMS, R. E.; RAJURKAR, K. P. **Stochastic modeling and analysis of abrasive flow machining**. Trans. ASME, J. Eng. Ind. 114, 74–81, 1992.

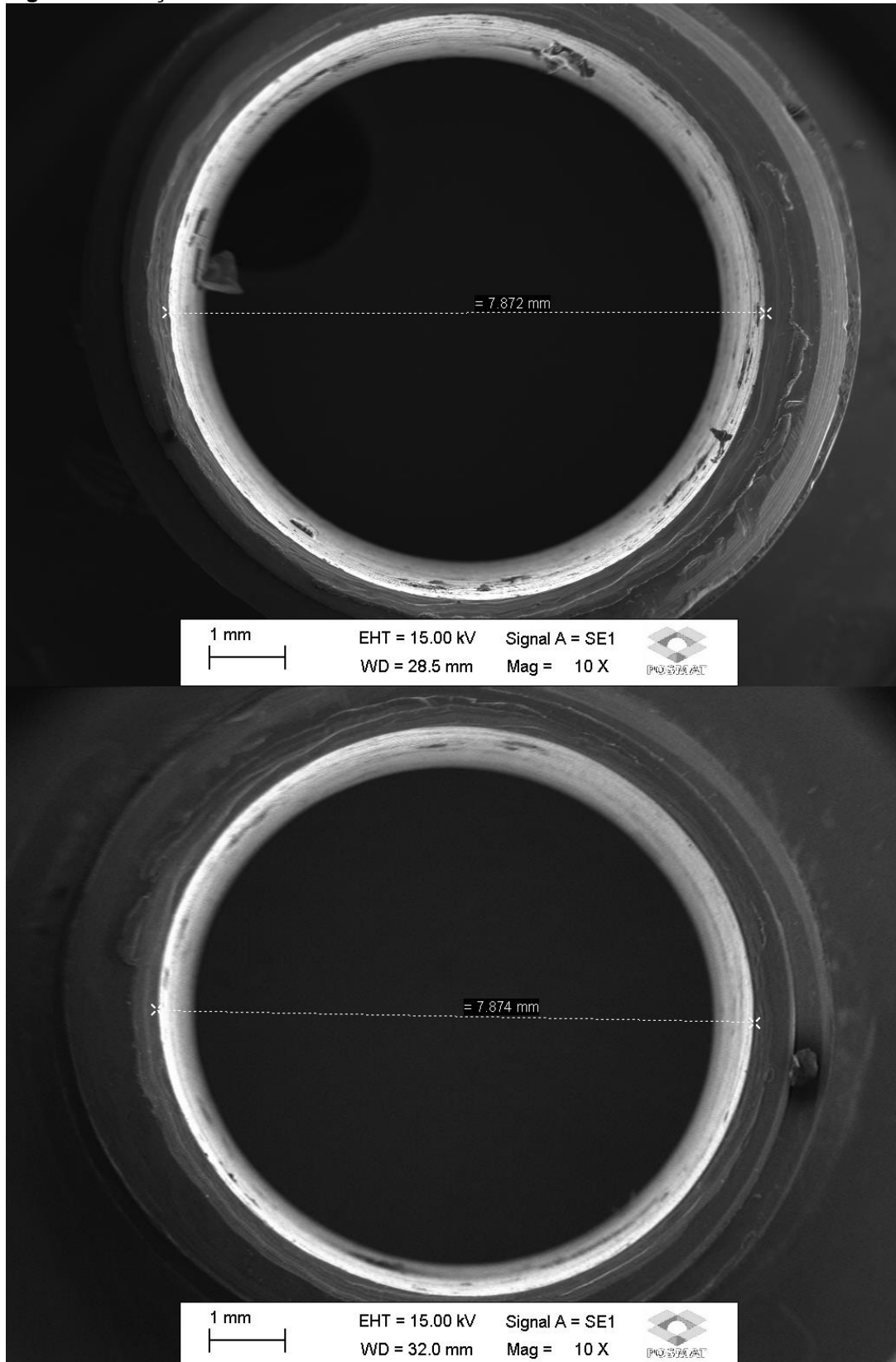
WILLIAMS, R. E.; RAJURKAR, K. P. **Metal removal and surface finish characteristics in abrasive flow machining.** ASME, PED, 38, 93–106, 1989.

WILLIAMS, R. E.; RAJURKAR, K. P.; RHOADES, L. J. **Performance characteristics of abrasive flow machining.** SME technical paper, 898–906, 1989.

ZUM-GAHR, K. H. **Microstructure and wear of materials.** Institute of Materials Technology. University of Siegen, Siegen, Federal Republic of Germany, v.10, 1987.

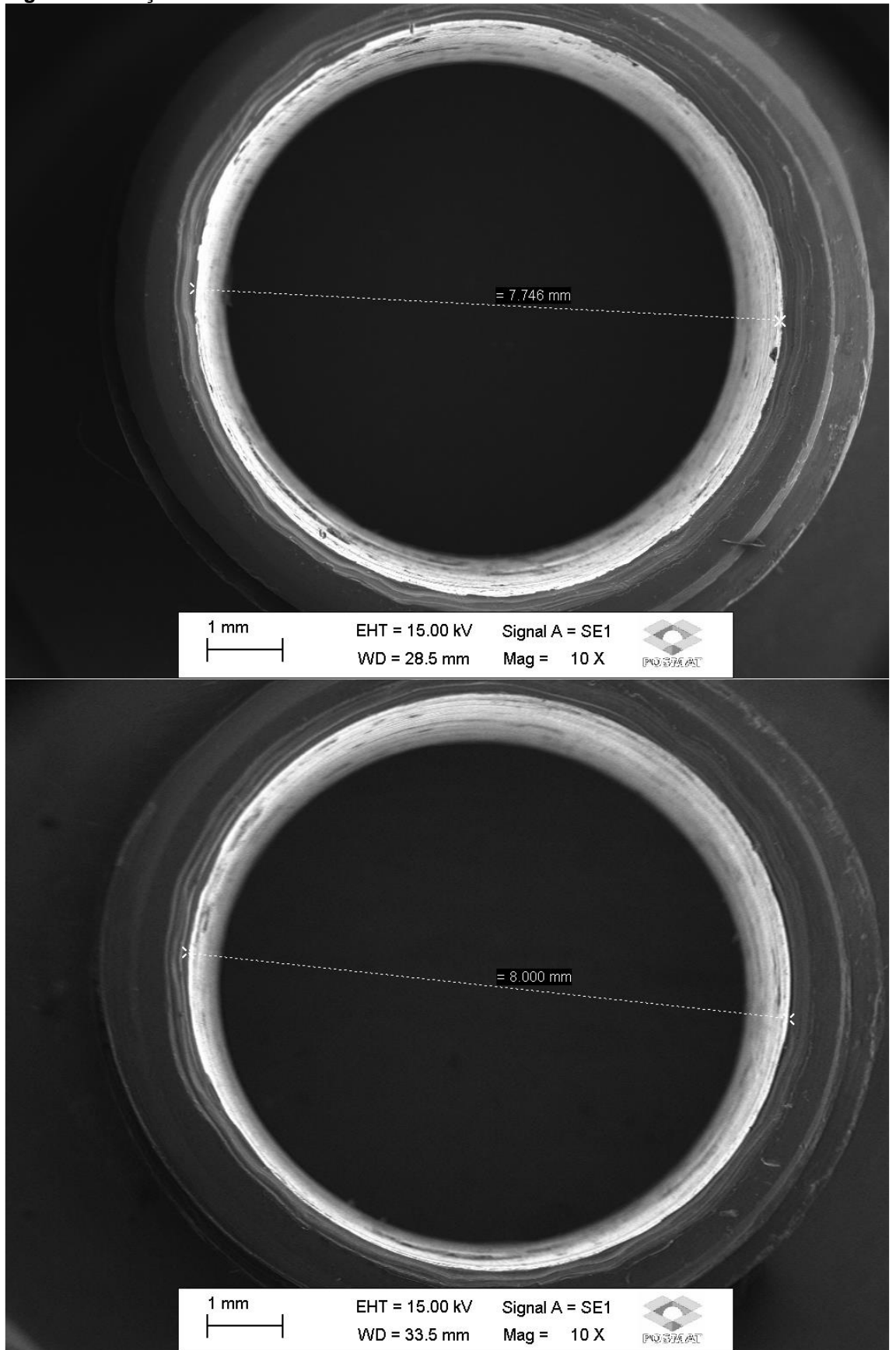
APÊNDICE A

Figura A.1: Peça de alumínio n. 2.



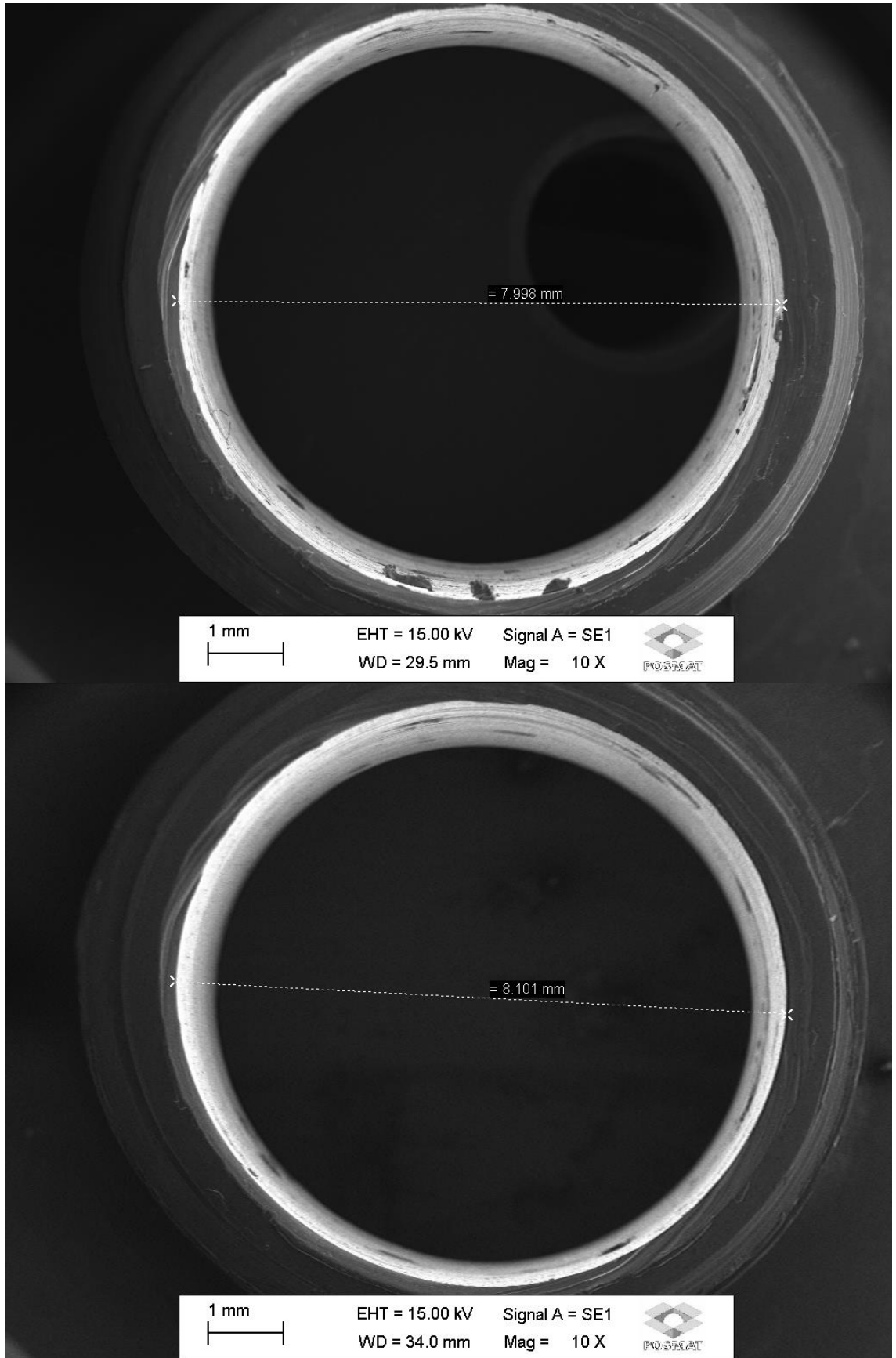
Fonte: Autoria própria.

Figura A.2: Peça de alumínio n. 3.



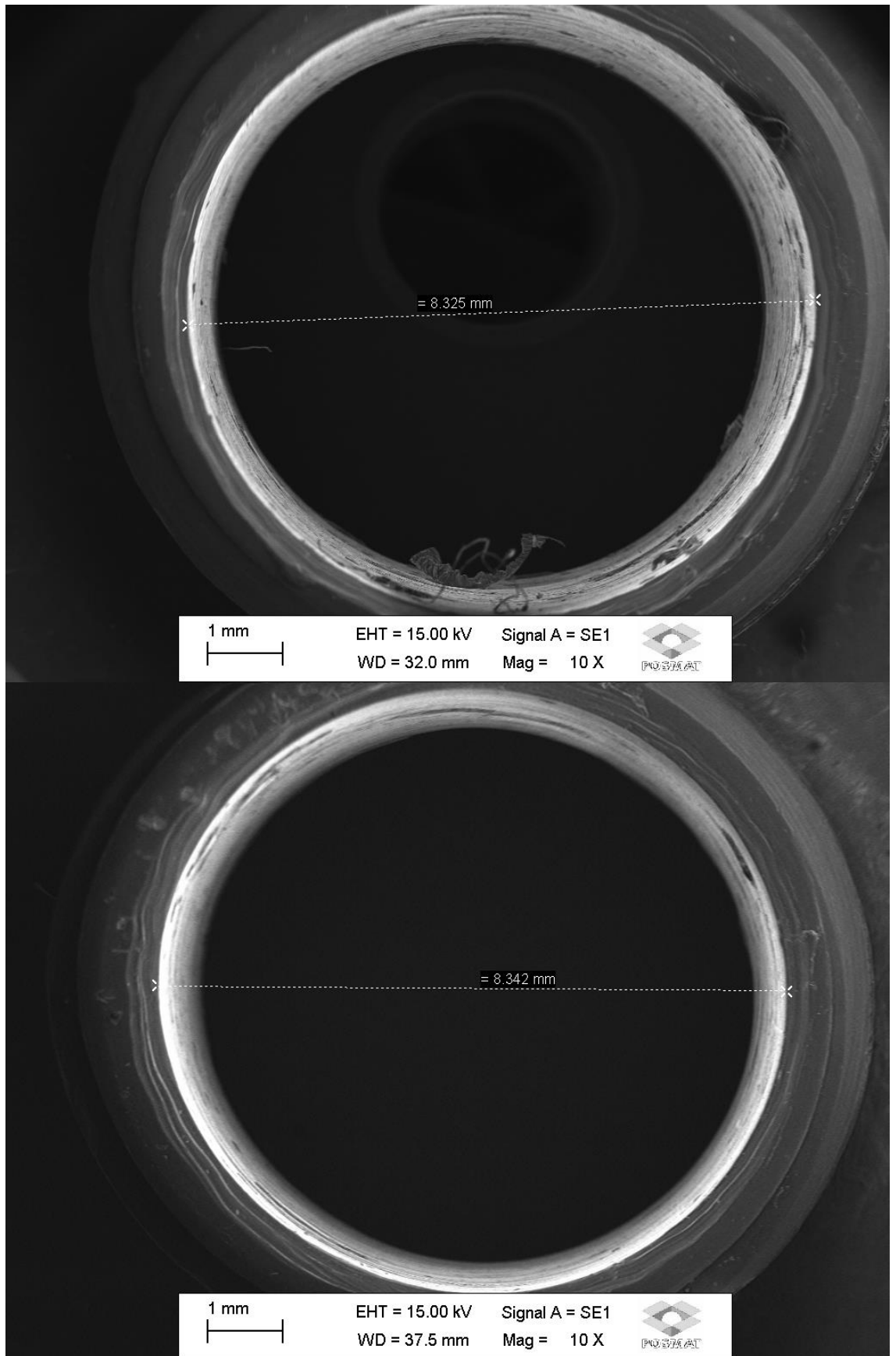
Fonte: Autoria própria.

Figura A.3: Peça de Alumínio n. 4.



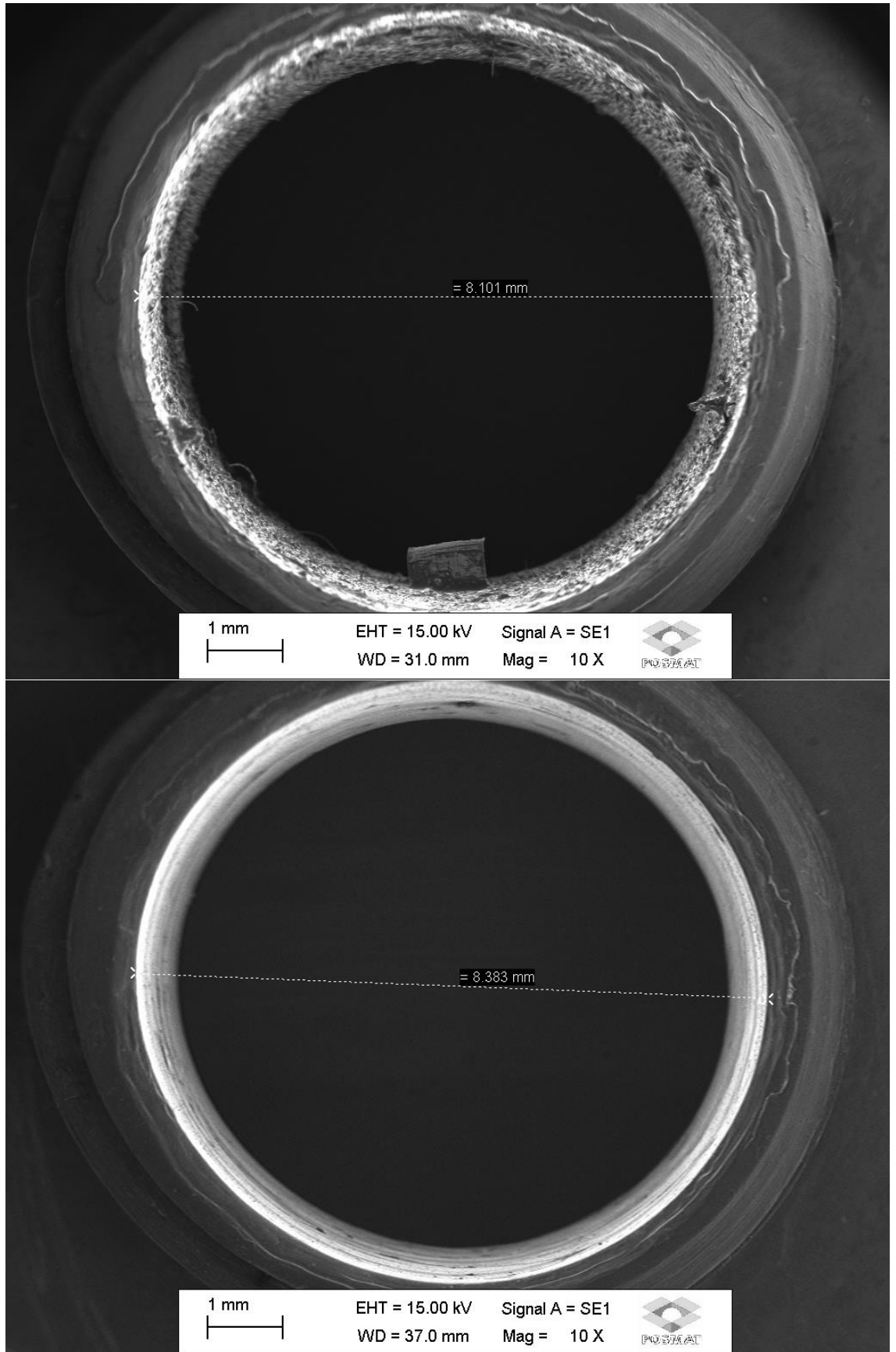
Fonte: Autoria própria.

Figura A.4: Peça de Alumínio n. 5.



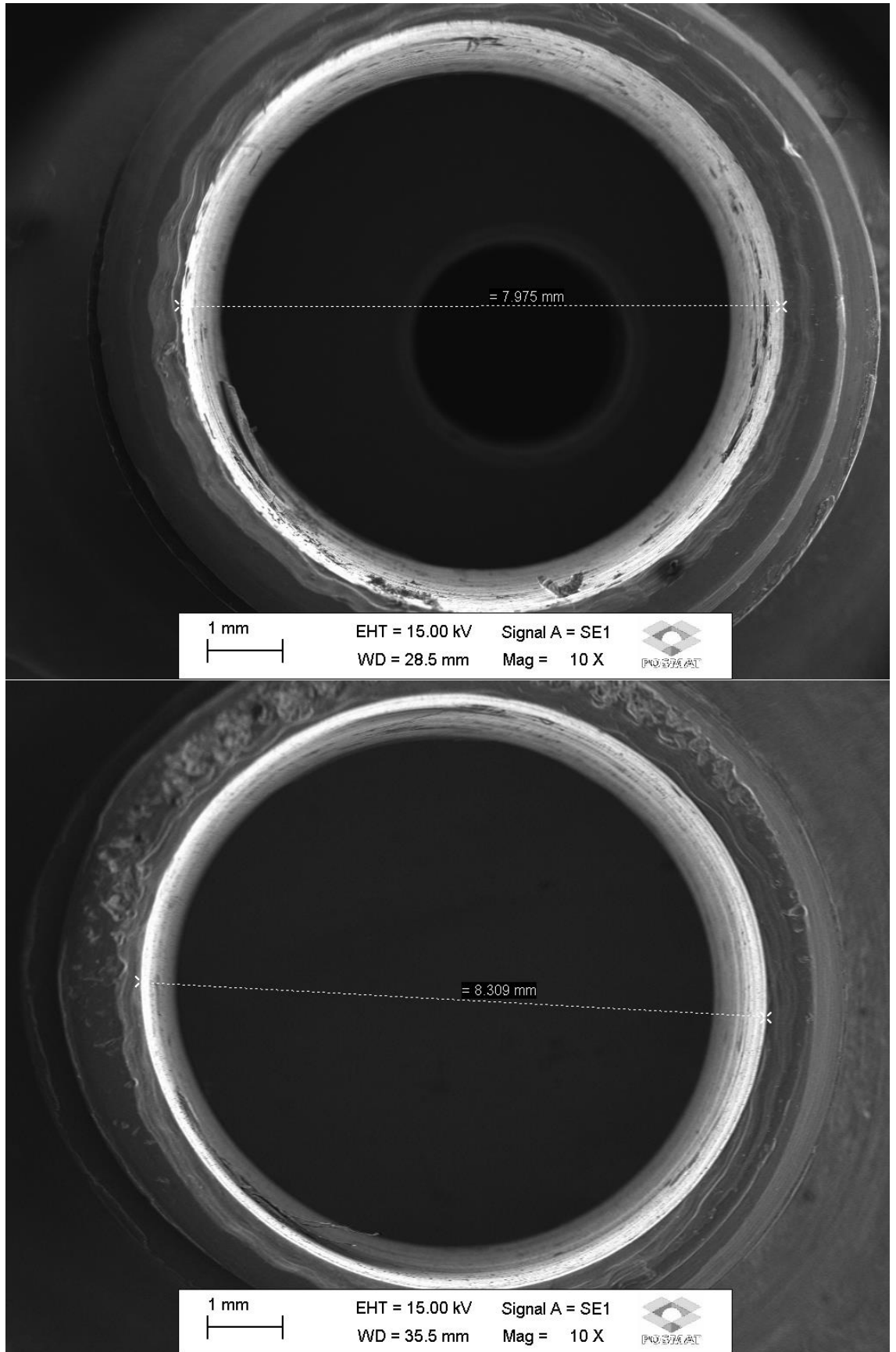
Fonte: Autoria própria.

Figura A.5: Peça de Alumínio n. 6.

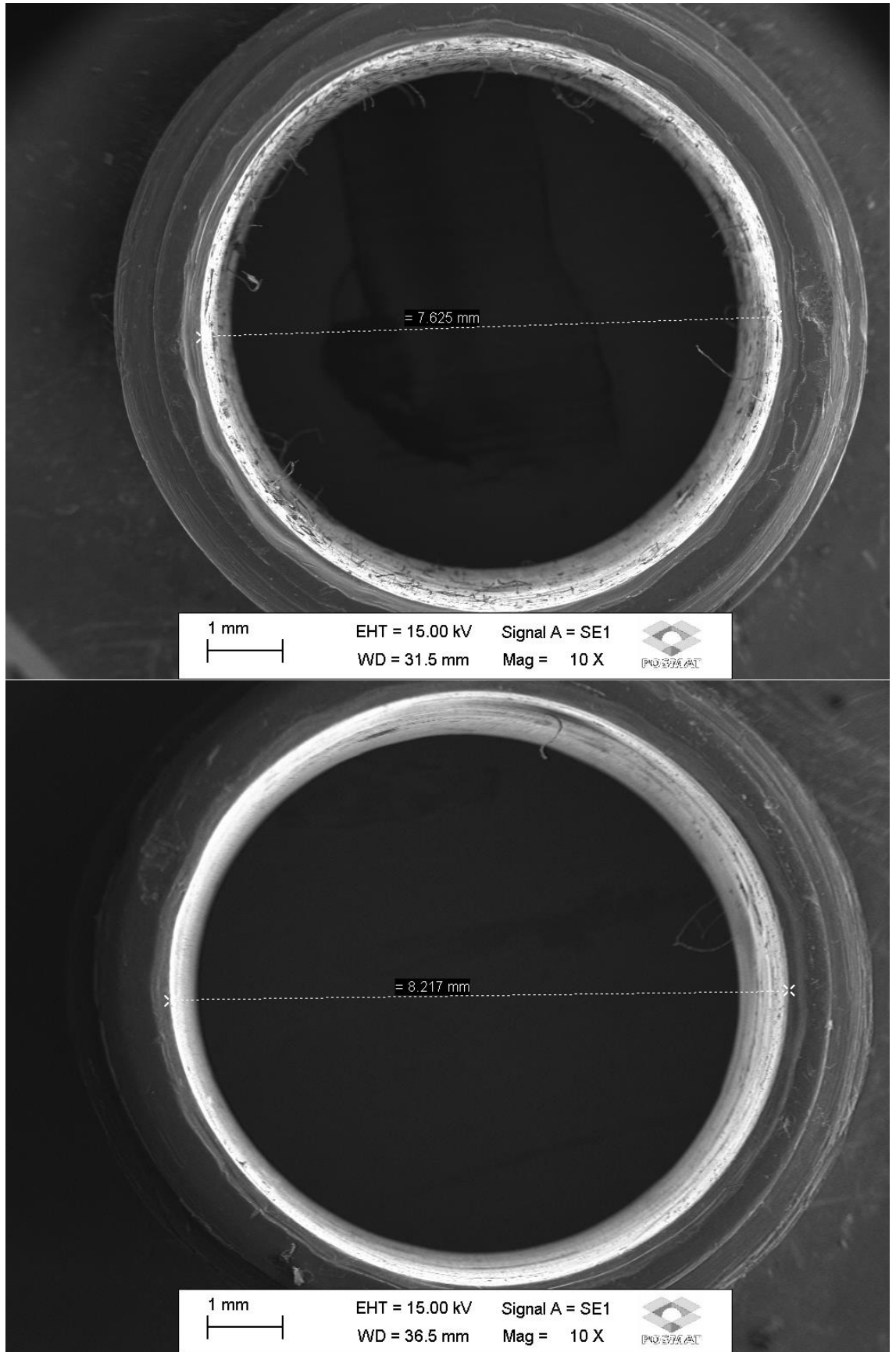


Fonte: Autoria própria.

Figura A.6: Peça de Alumínio n. 7.

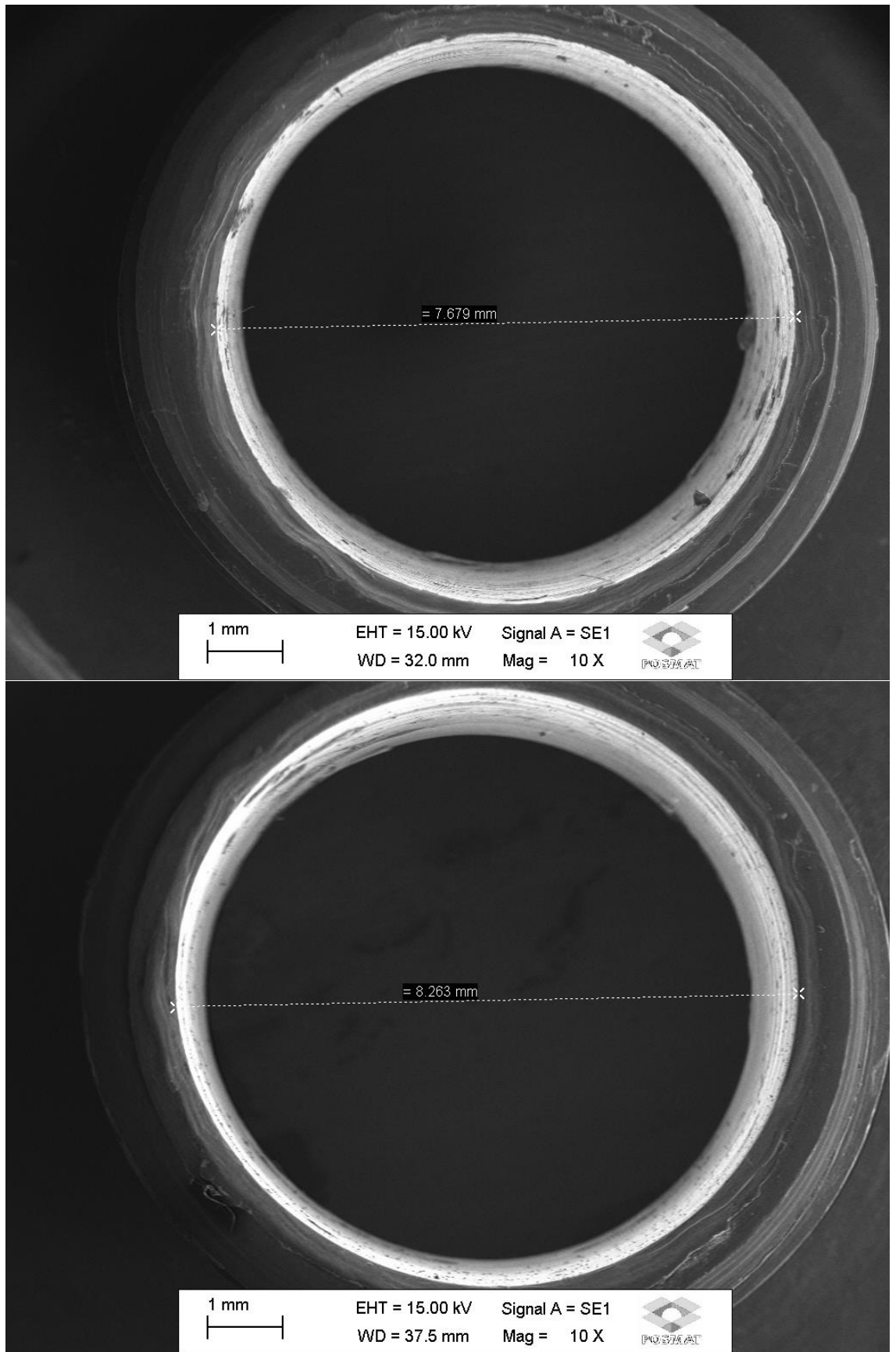


Fonte: Autoria própria.

Figura A.7: Peça de Alumínio n. 8.

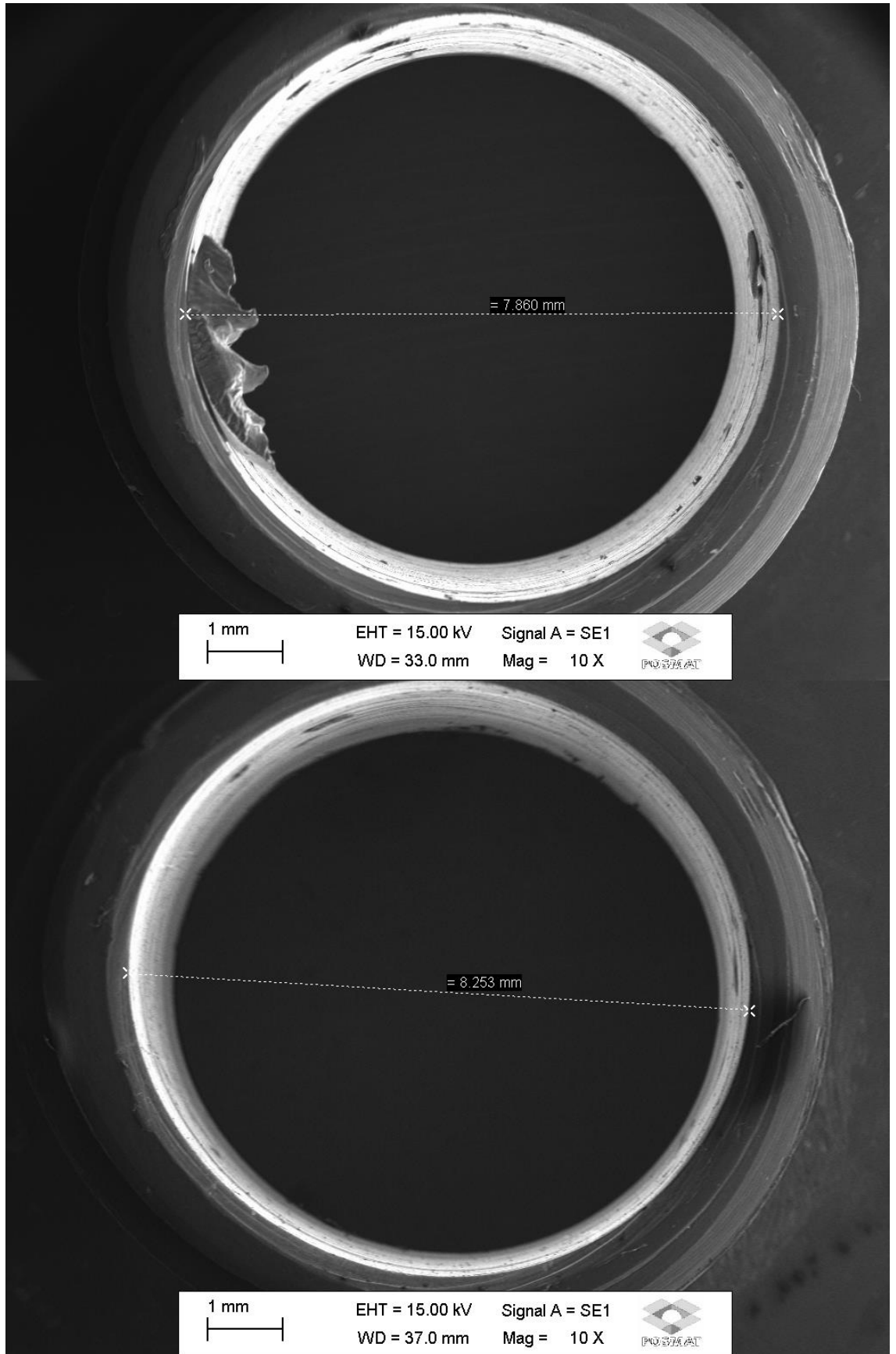
Fonte: Autoria própria.

Figura A.8: Peça de Alumínio n. 9.



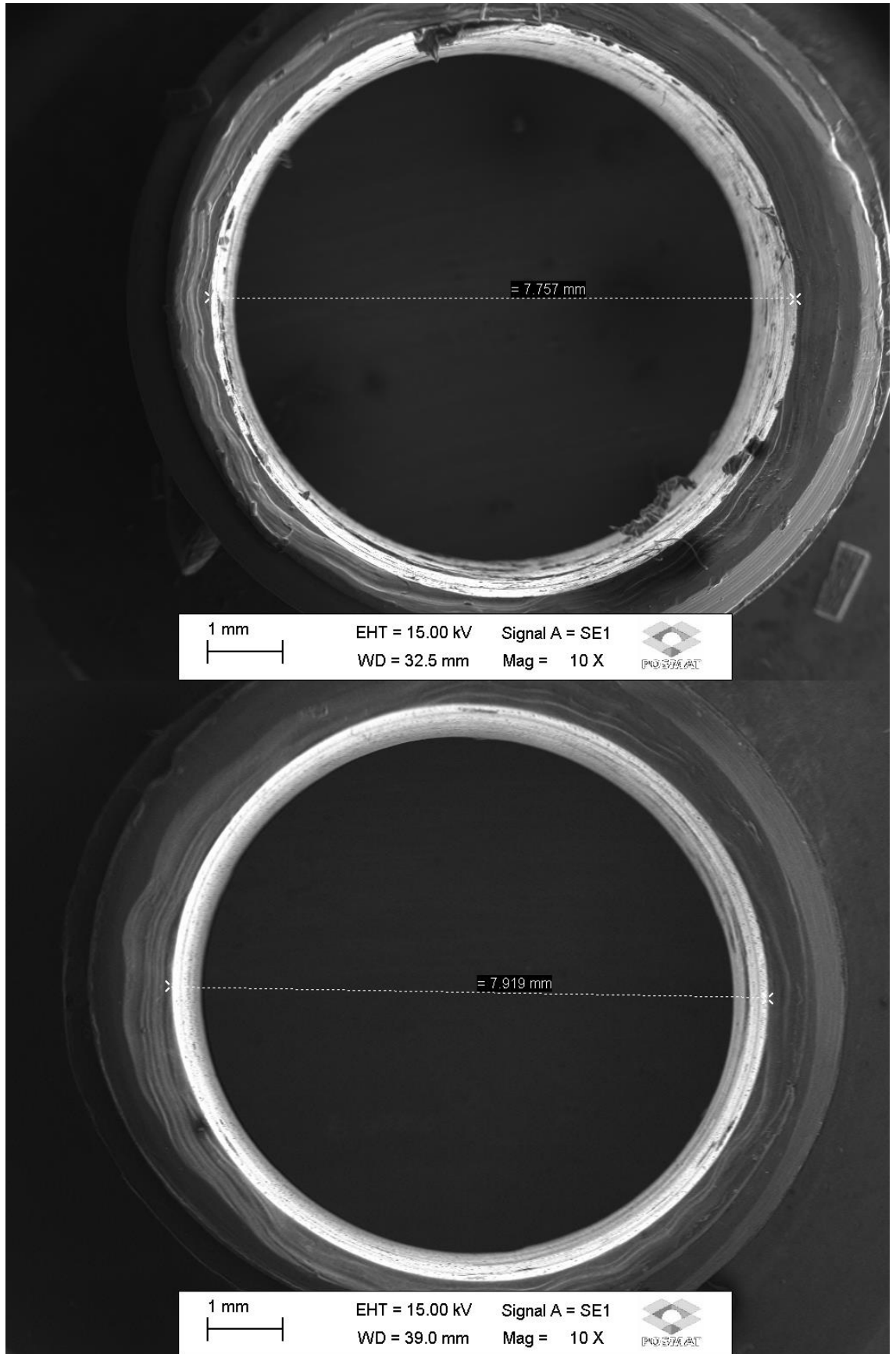
Fonte: Autoria própria.

Figura A.9: Peça de Alumínio n. 10.



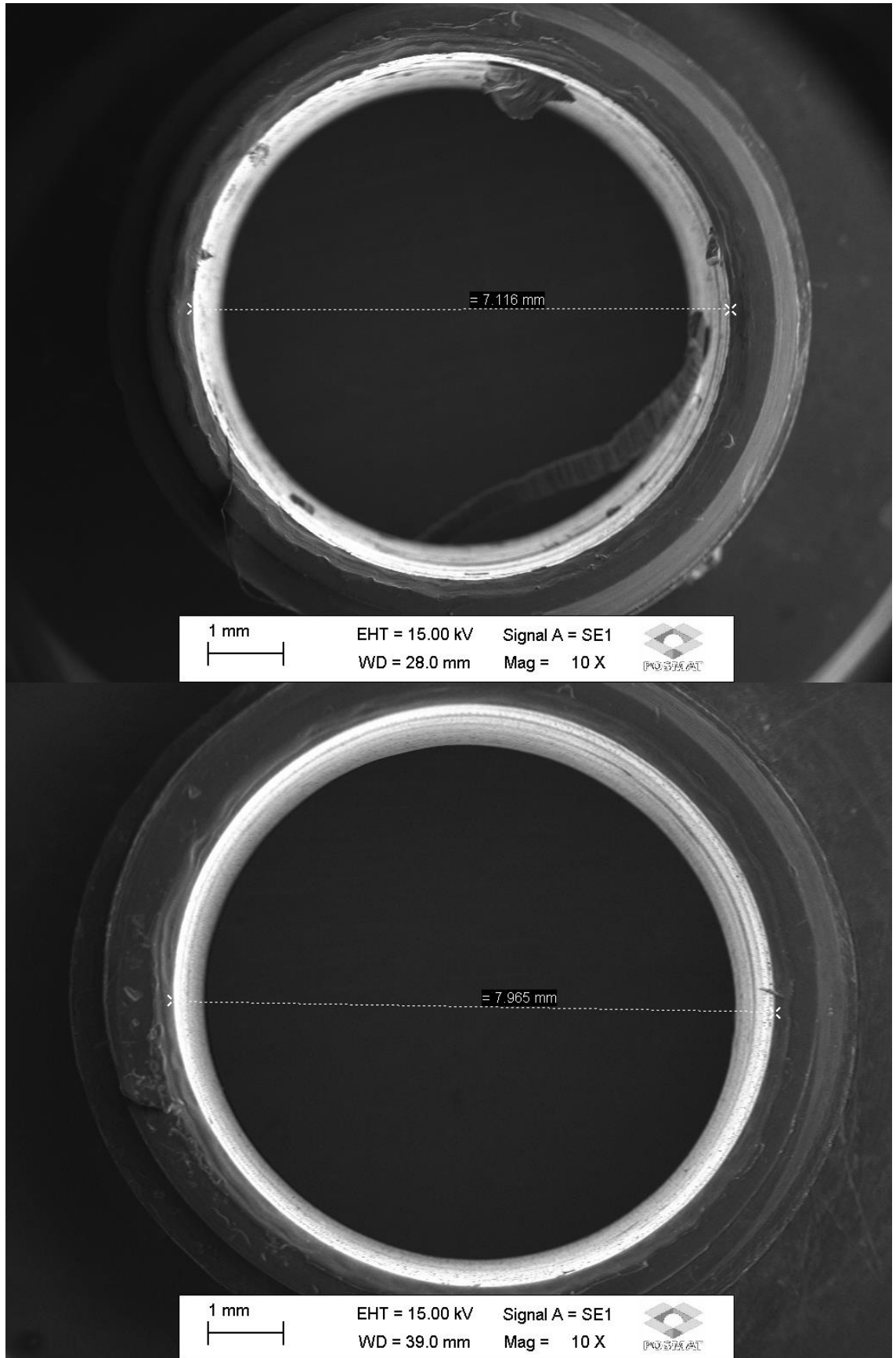
Fonte: Autoria própria.

Figura A.10: Peça de Alumínio n. 12.



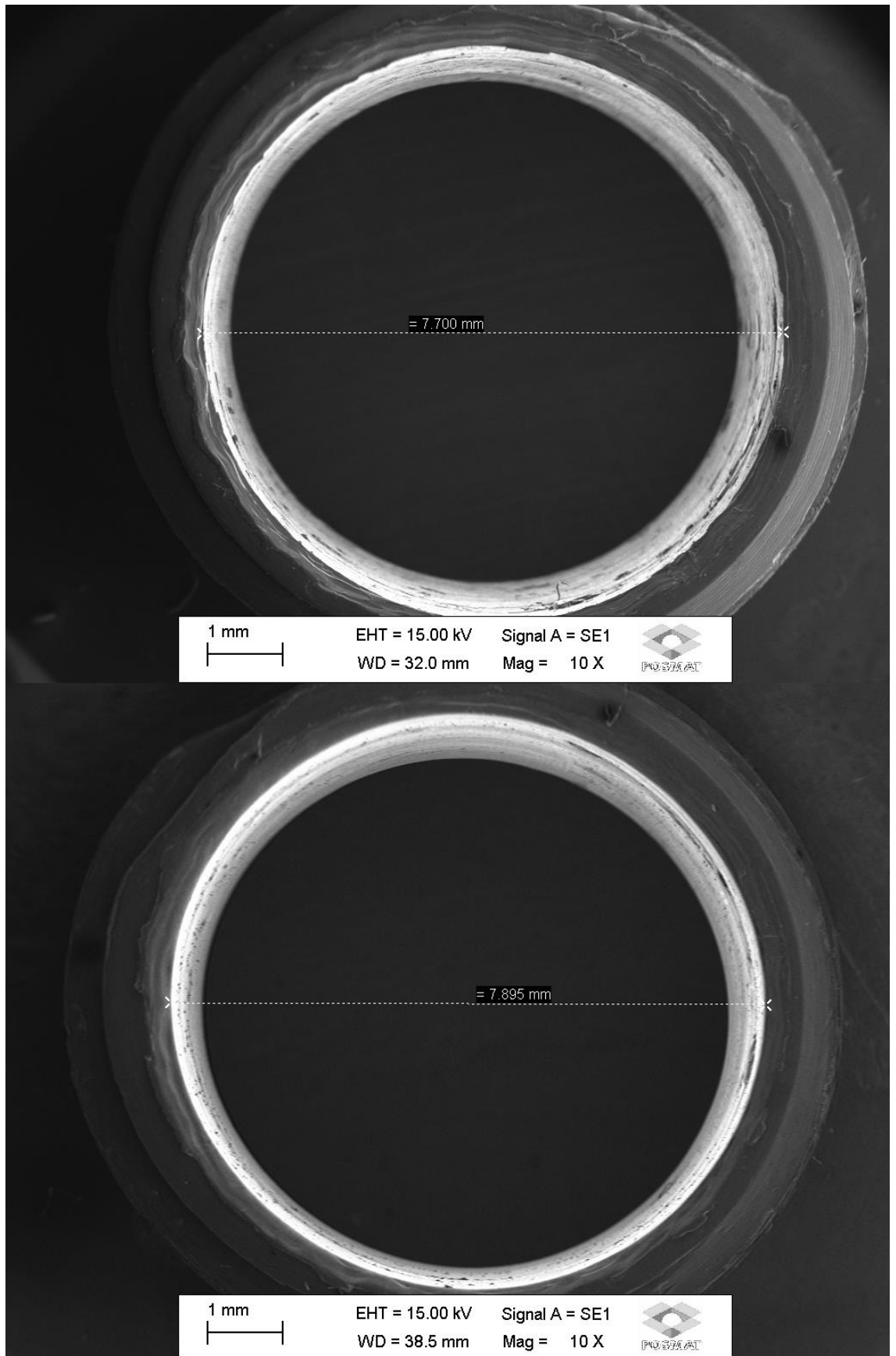
Fonte: Autoria própria.

Figura A.11: Peça de Alumínio n. 13.



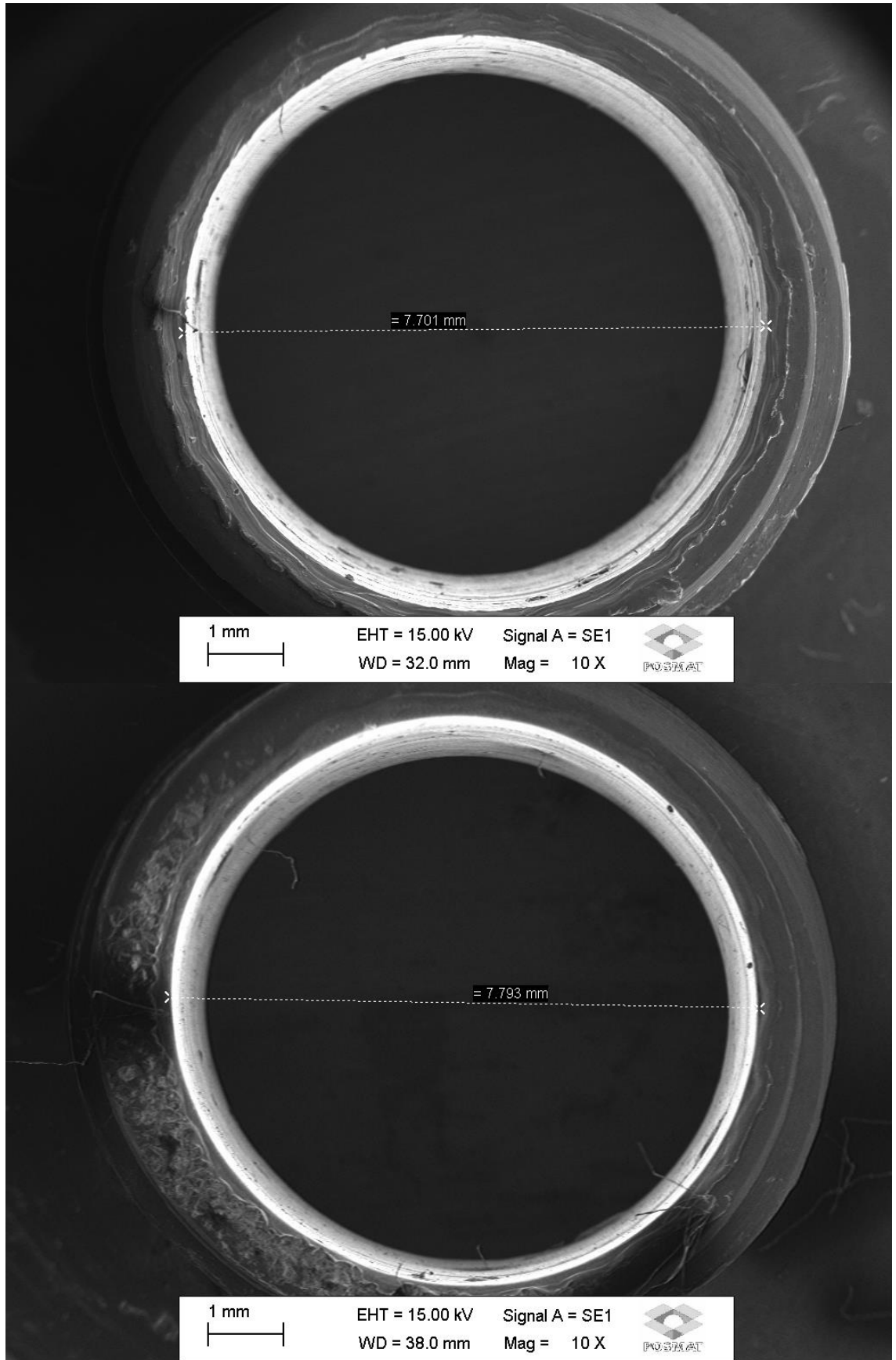
Fonte: Autoria própria.

Figura A.12: Peça de Alumínio n. 14.



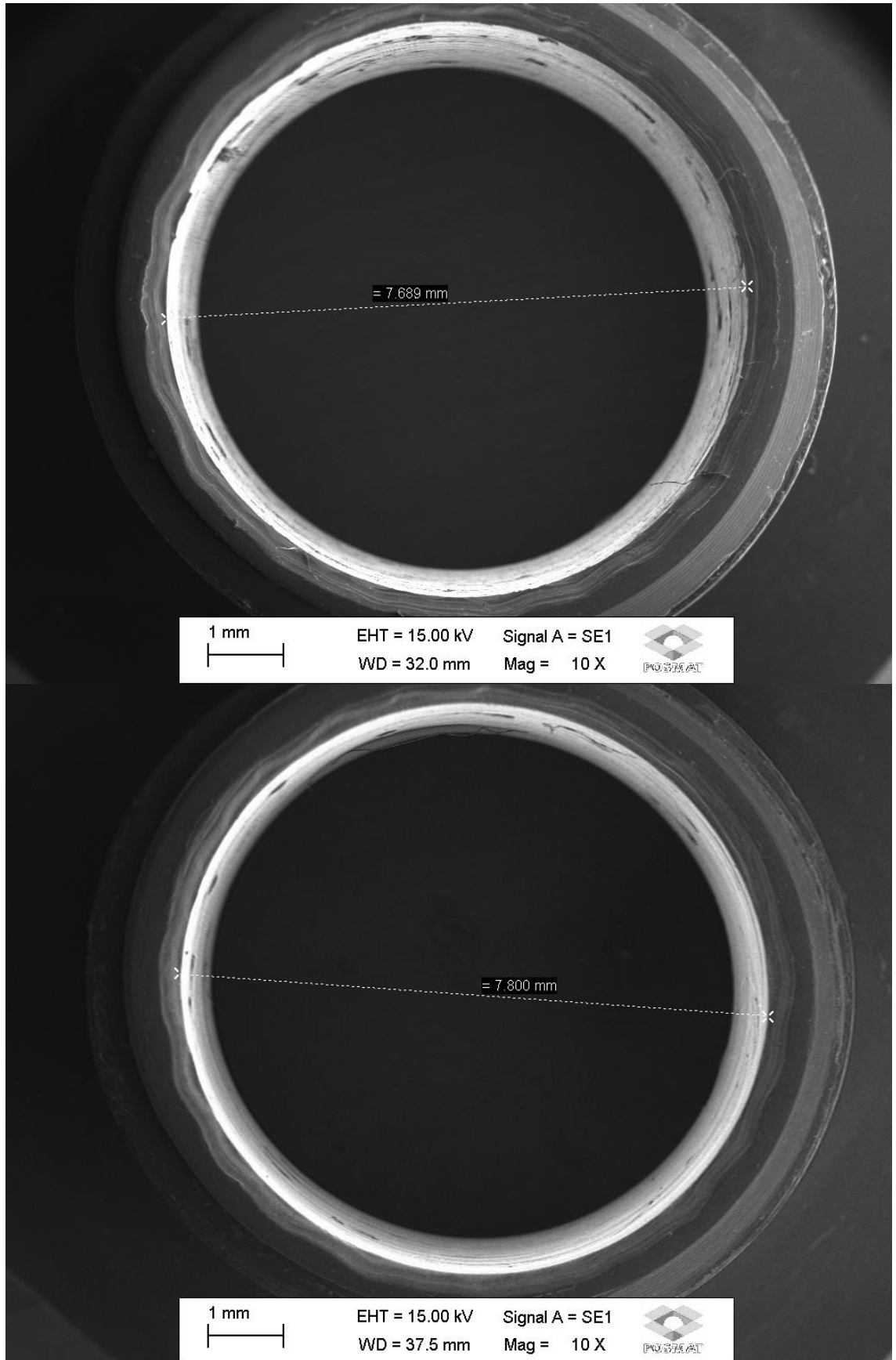
Fonte: Autoria própria.

Figura A.13: Peça de Alumínio n. 15.



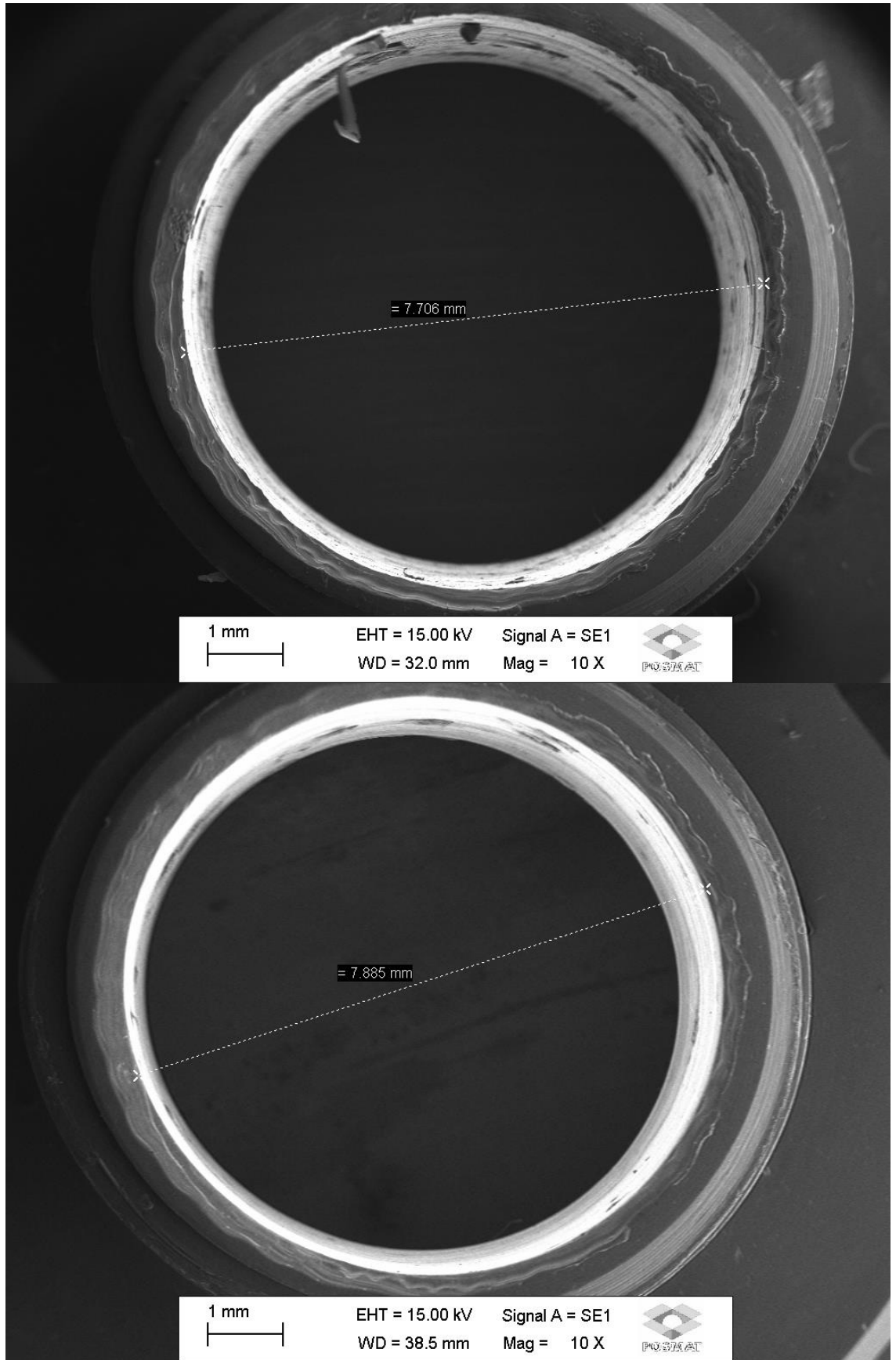
Fonte: Autoria própria.

Figura A.14: Peça de Alumínio n. 17.



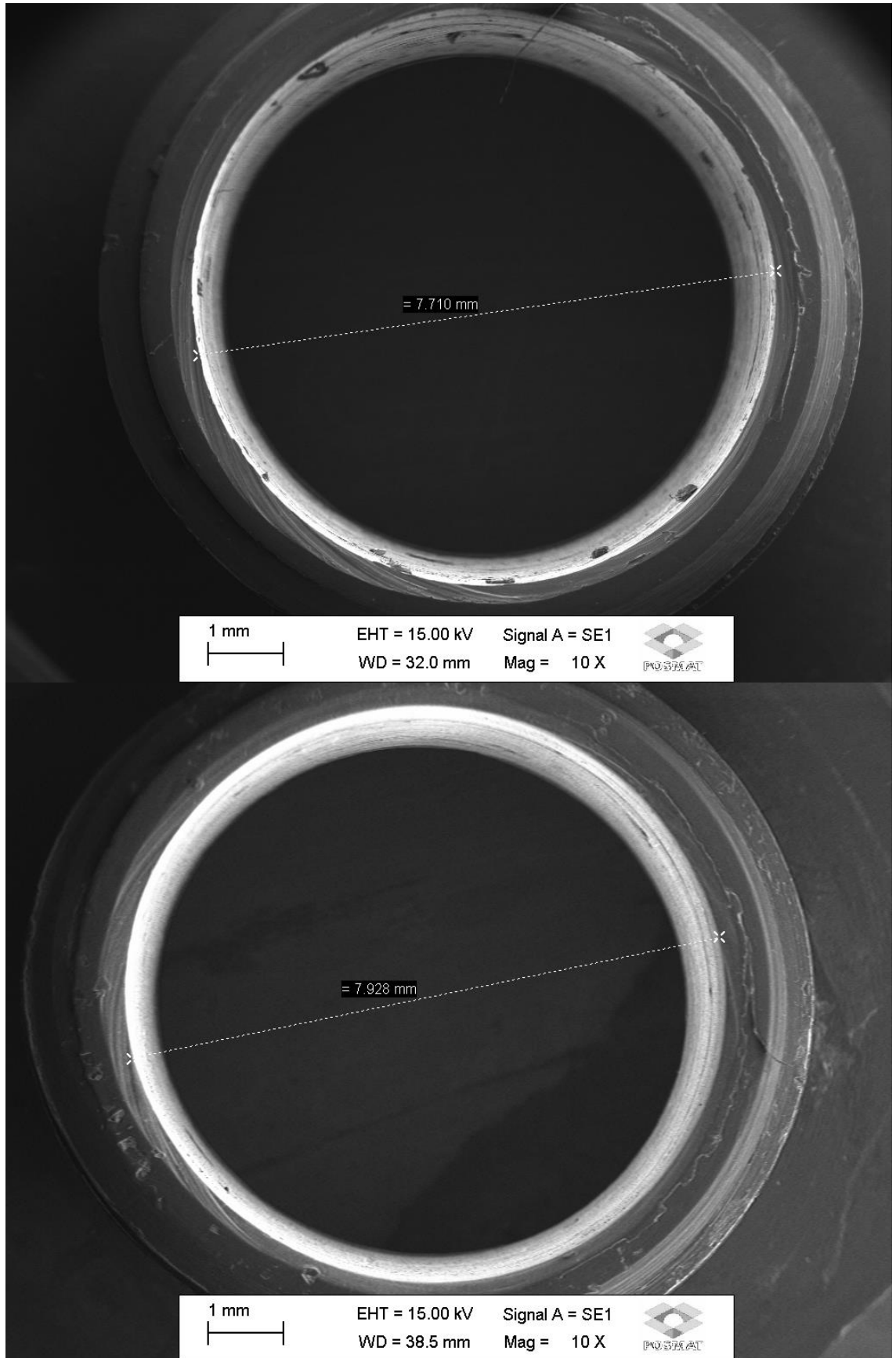
Fonte: Autoria própria.

Figura A.15: Peça de Alumínio n. 18.

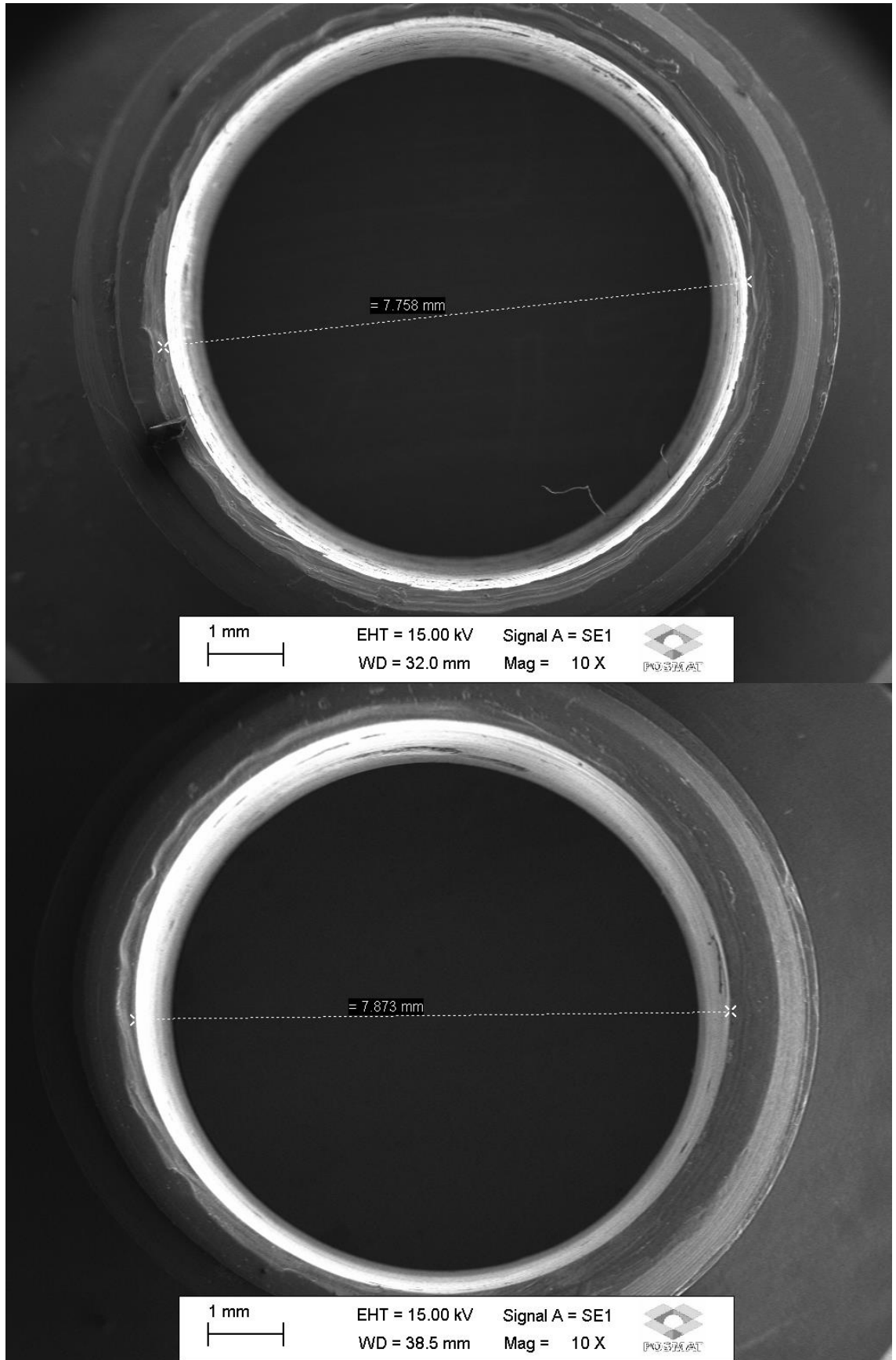


Fonte: Autoria própria.

Figura A.16: Peça de Alumínio n. 19.

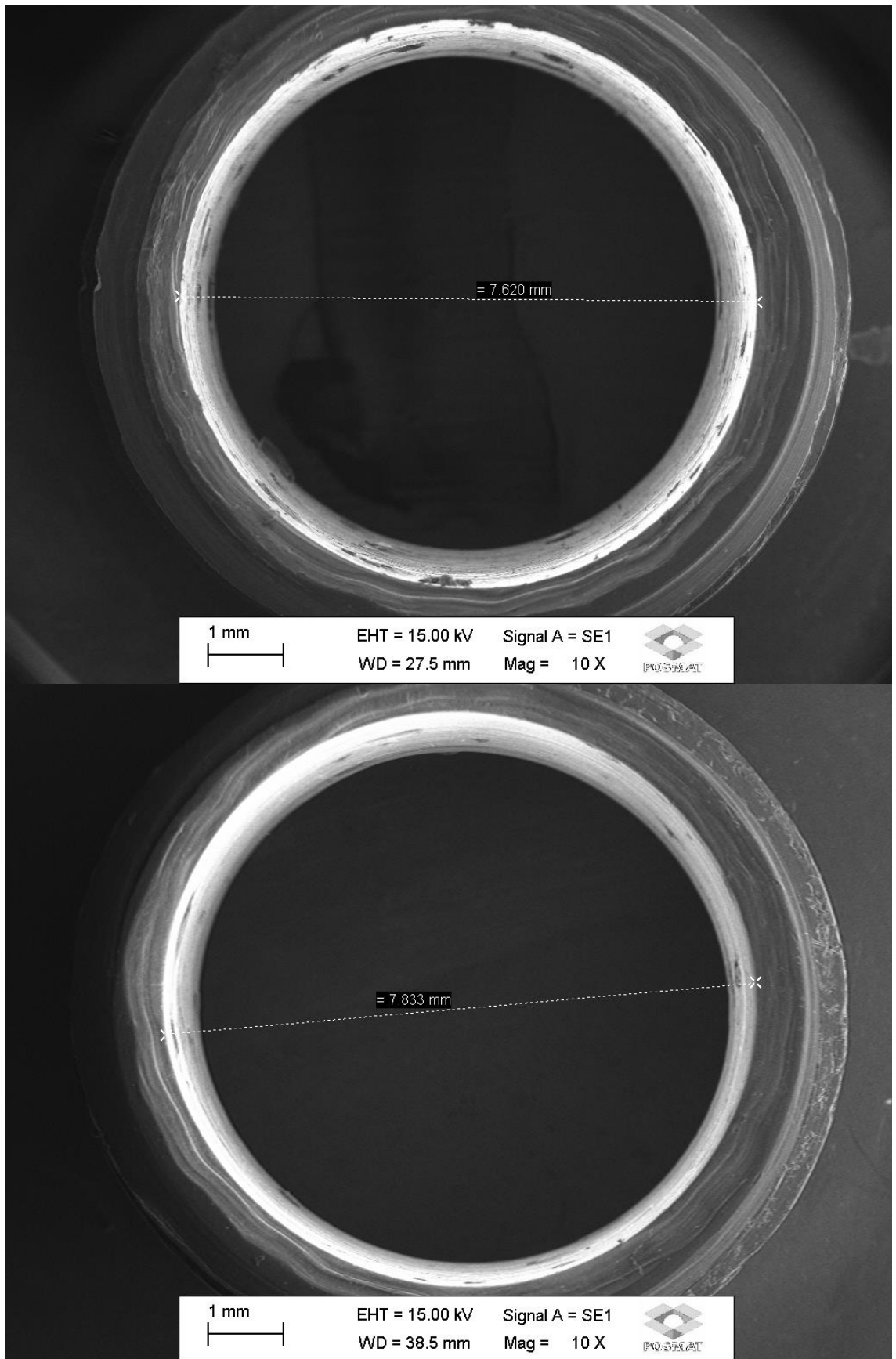


Fonte: Autoria própria.

Figura A.17: Peça de Alumínio n. 20.

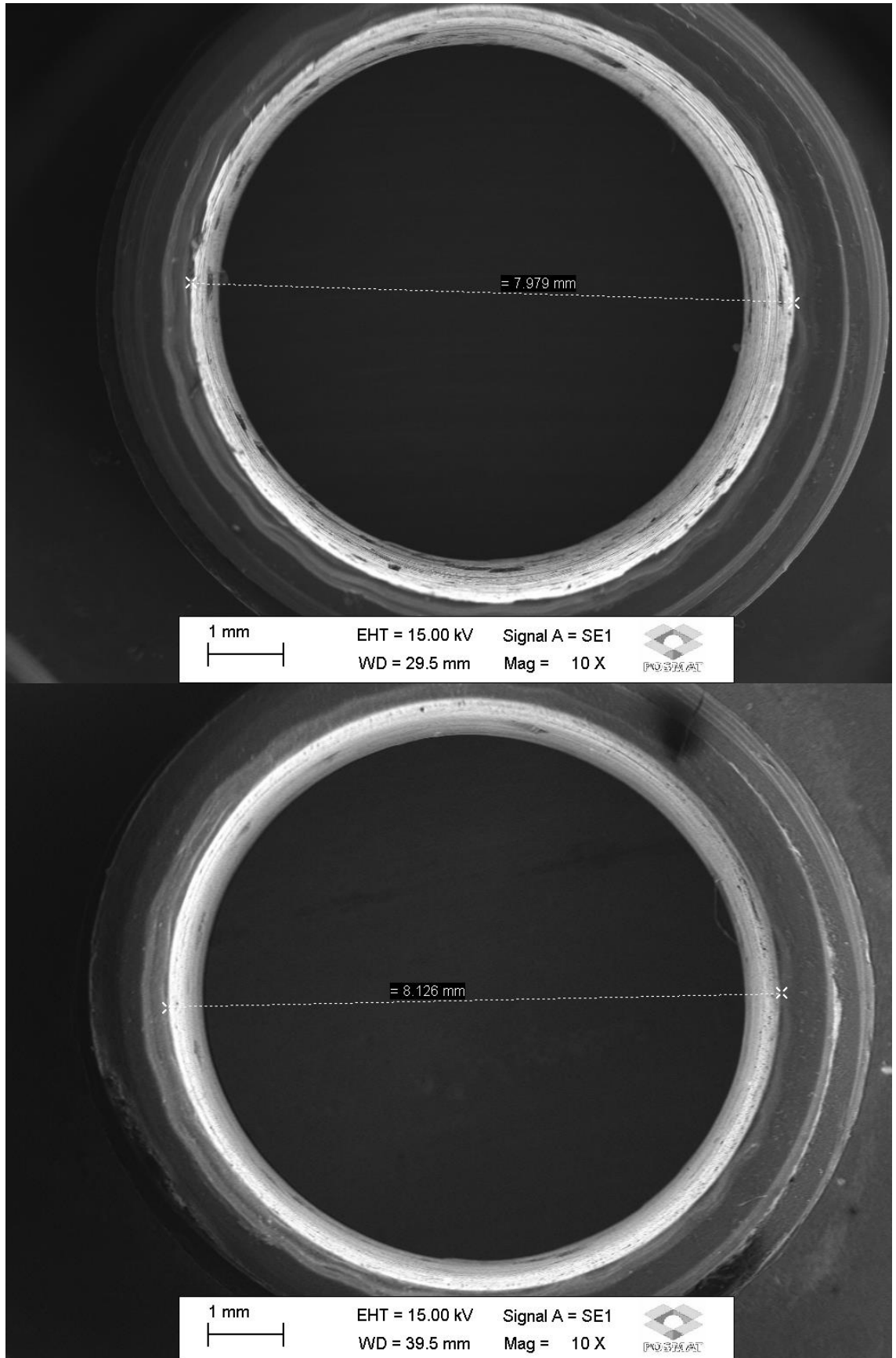
Fonte: Autoria própria.

Figura A.18: Peça de Alumínio n. 21.



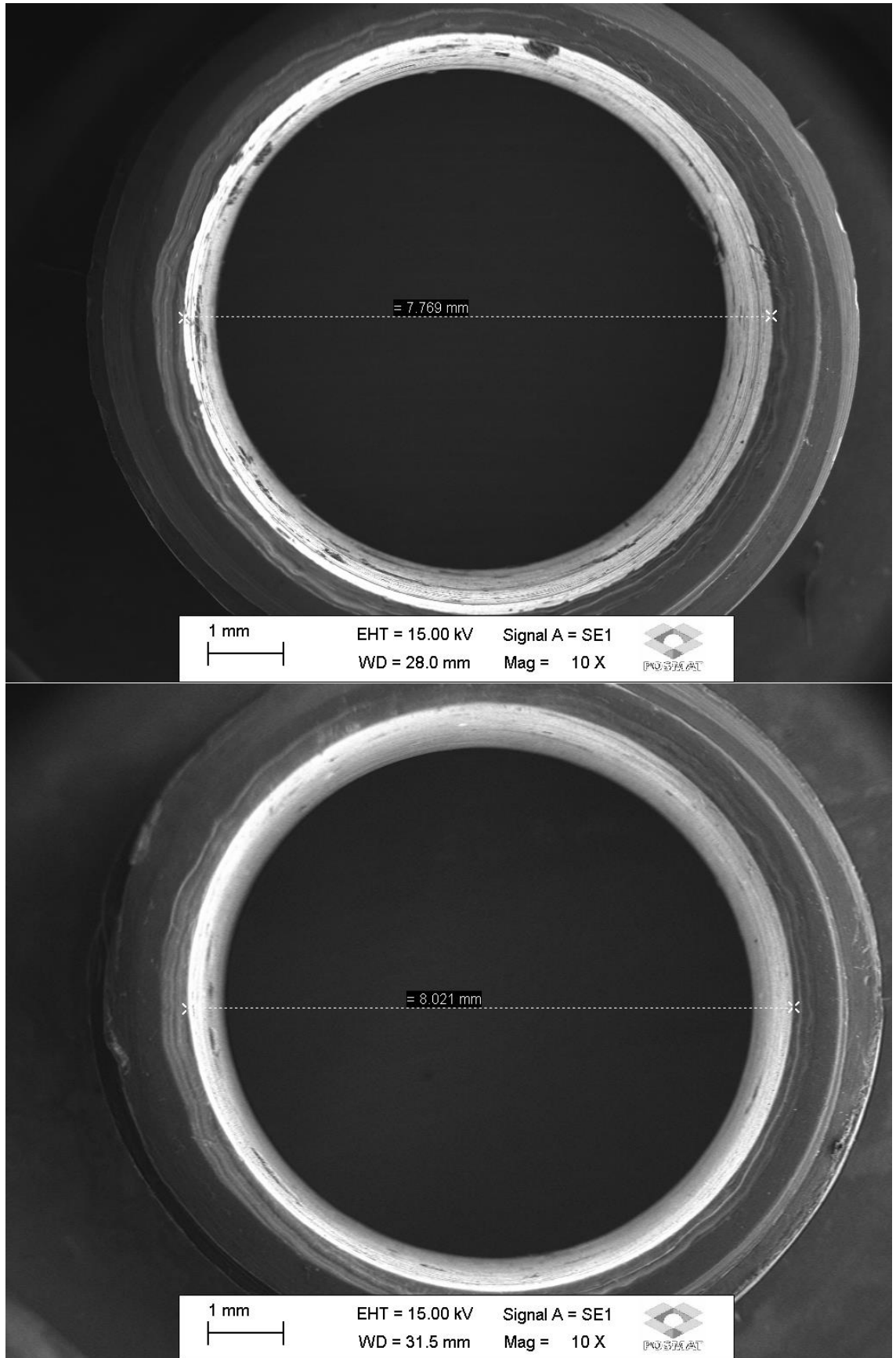
Fonte: Autoria própria.

Figura A.19: Peça de Alumínio n. 22.



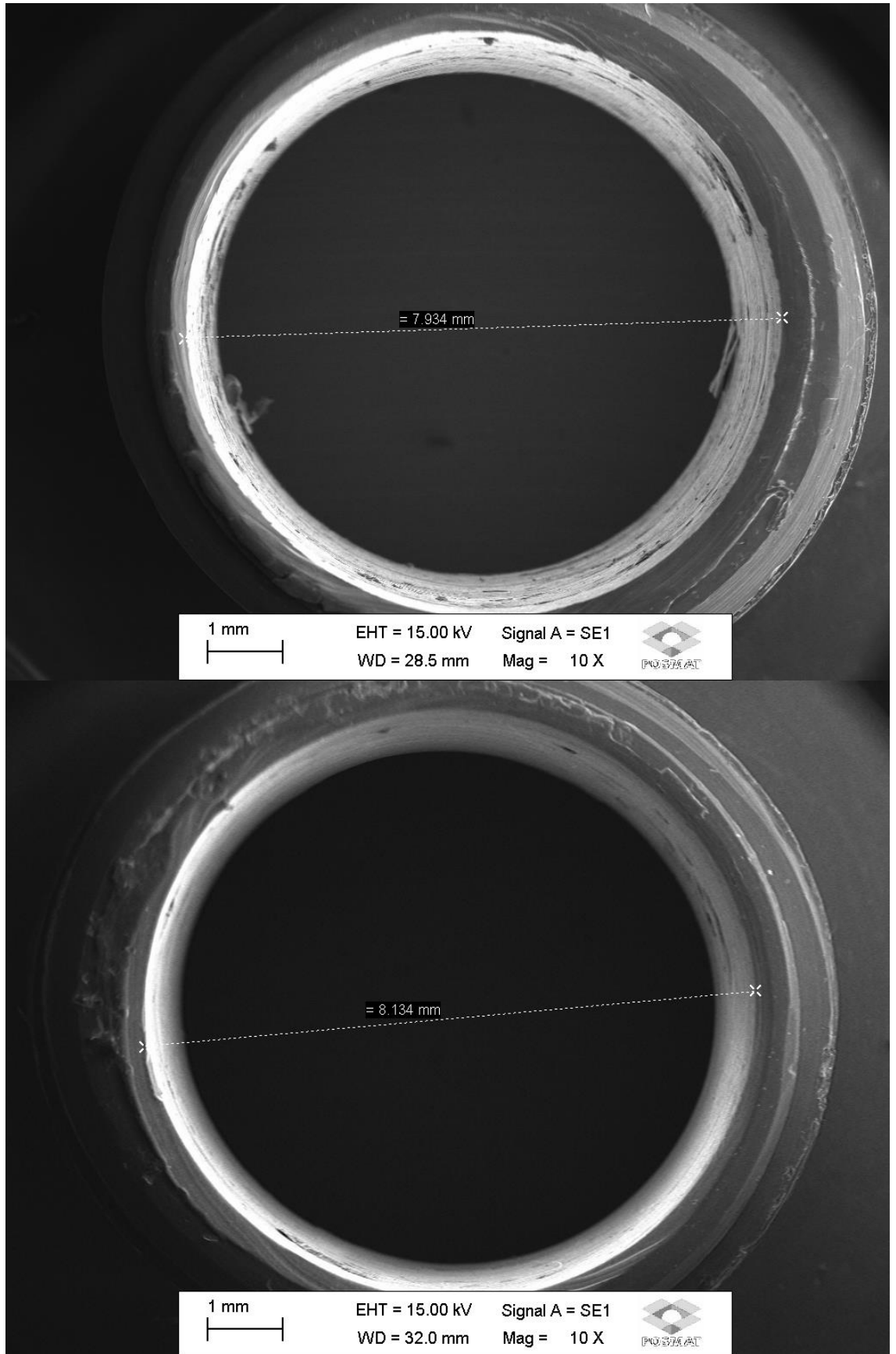
Fonte: Autoria própria.

Figura A.20: Peça de Alumínio n. 23.



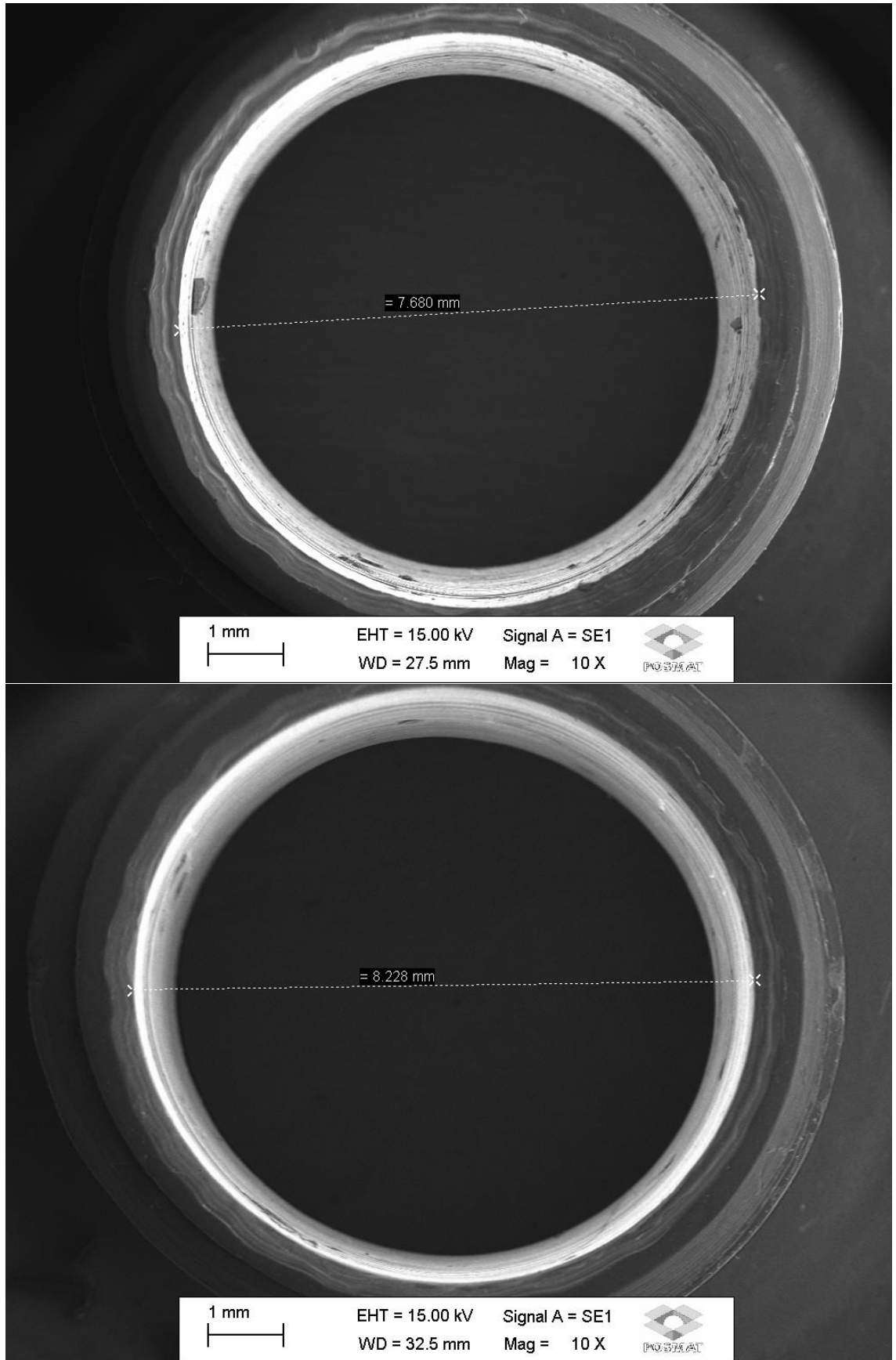
Fonte: Autoria própria.

Figura A.21: Peça de Alumínio n. 24.



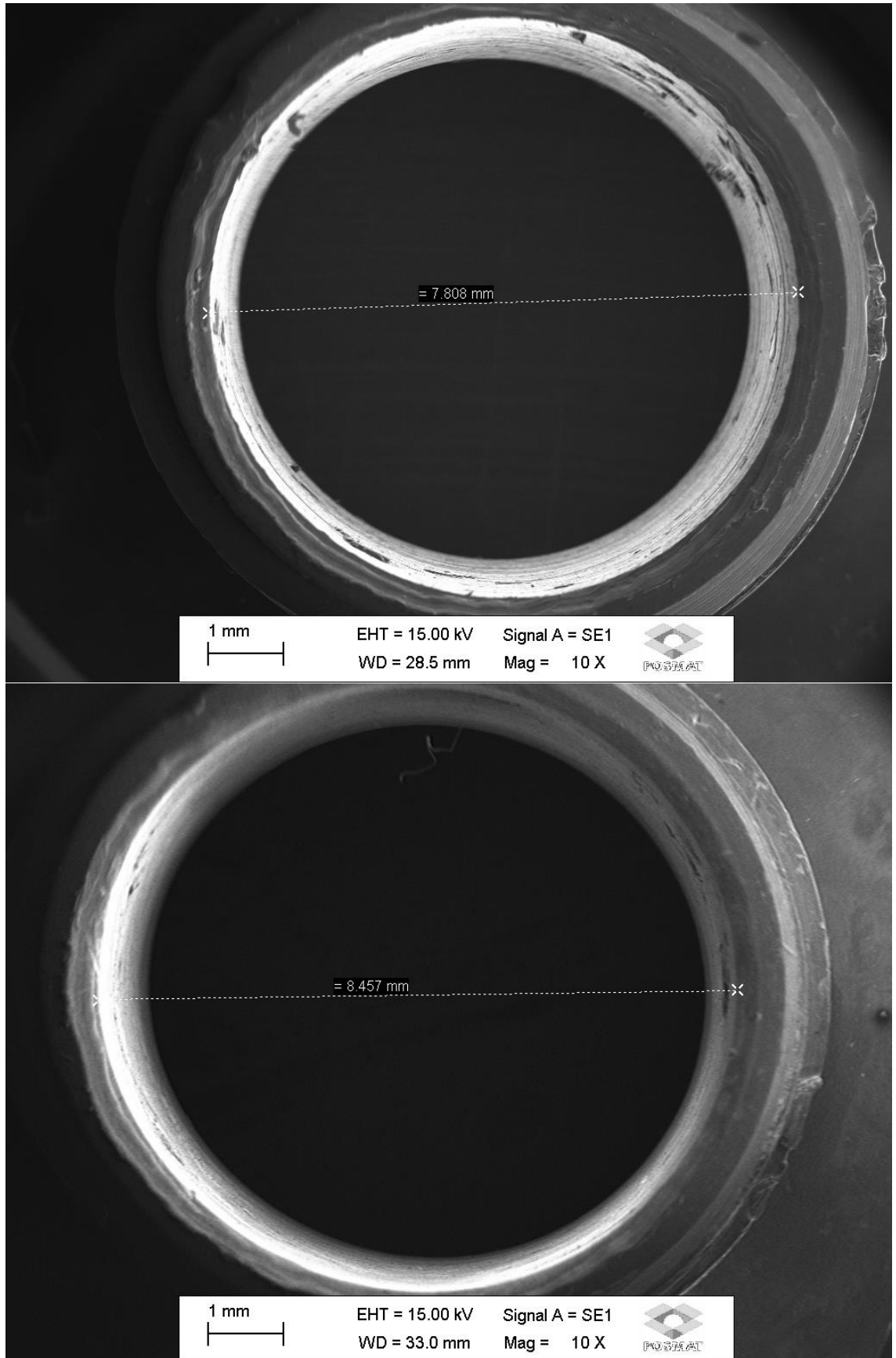
Fonte: Autoria própria.

Figura A.22: Peça de Alumínio n. 25.



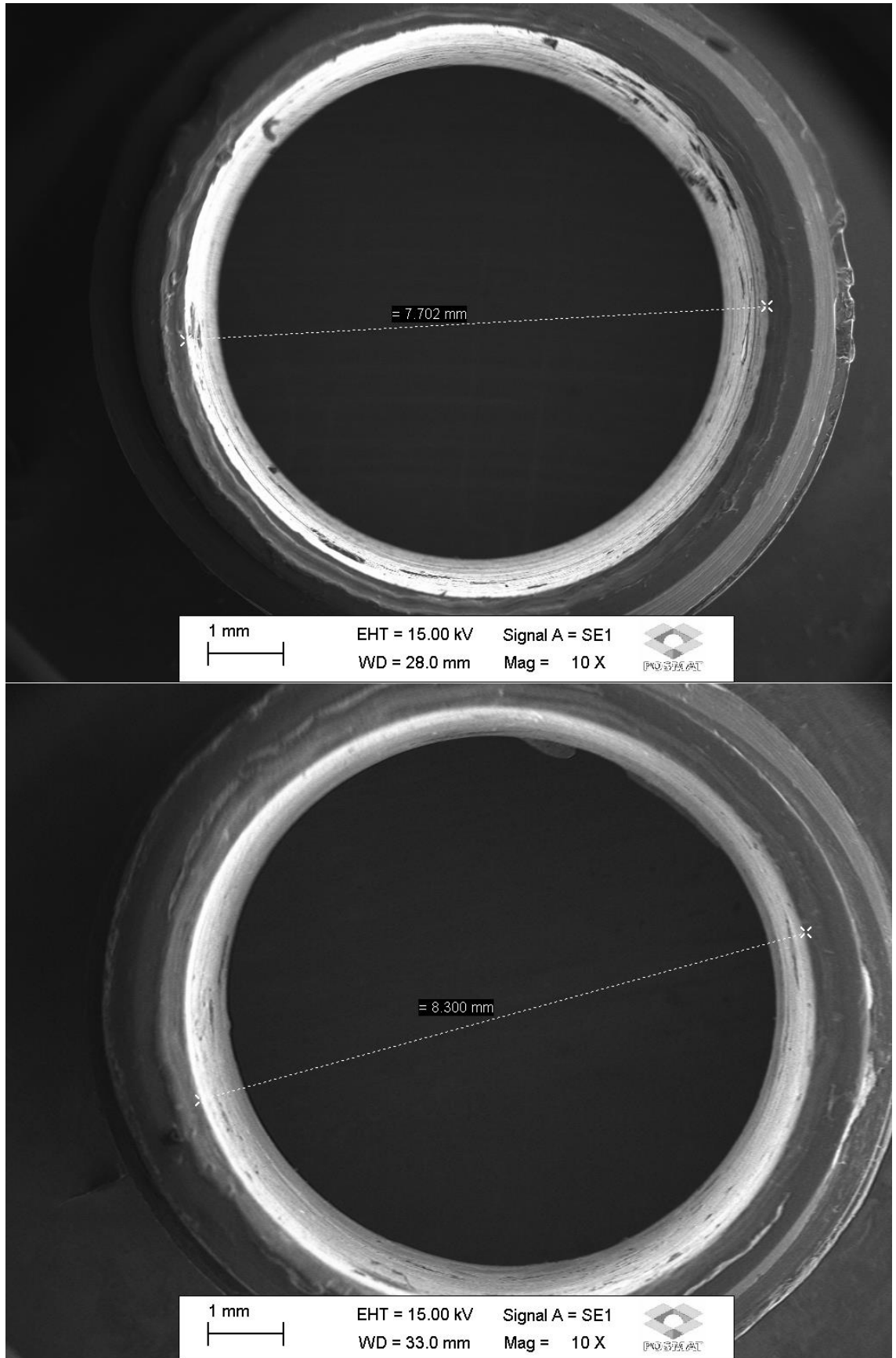
Fonte: Autoria própria.

Figura A.23: Peça de Alumínio n. 27.



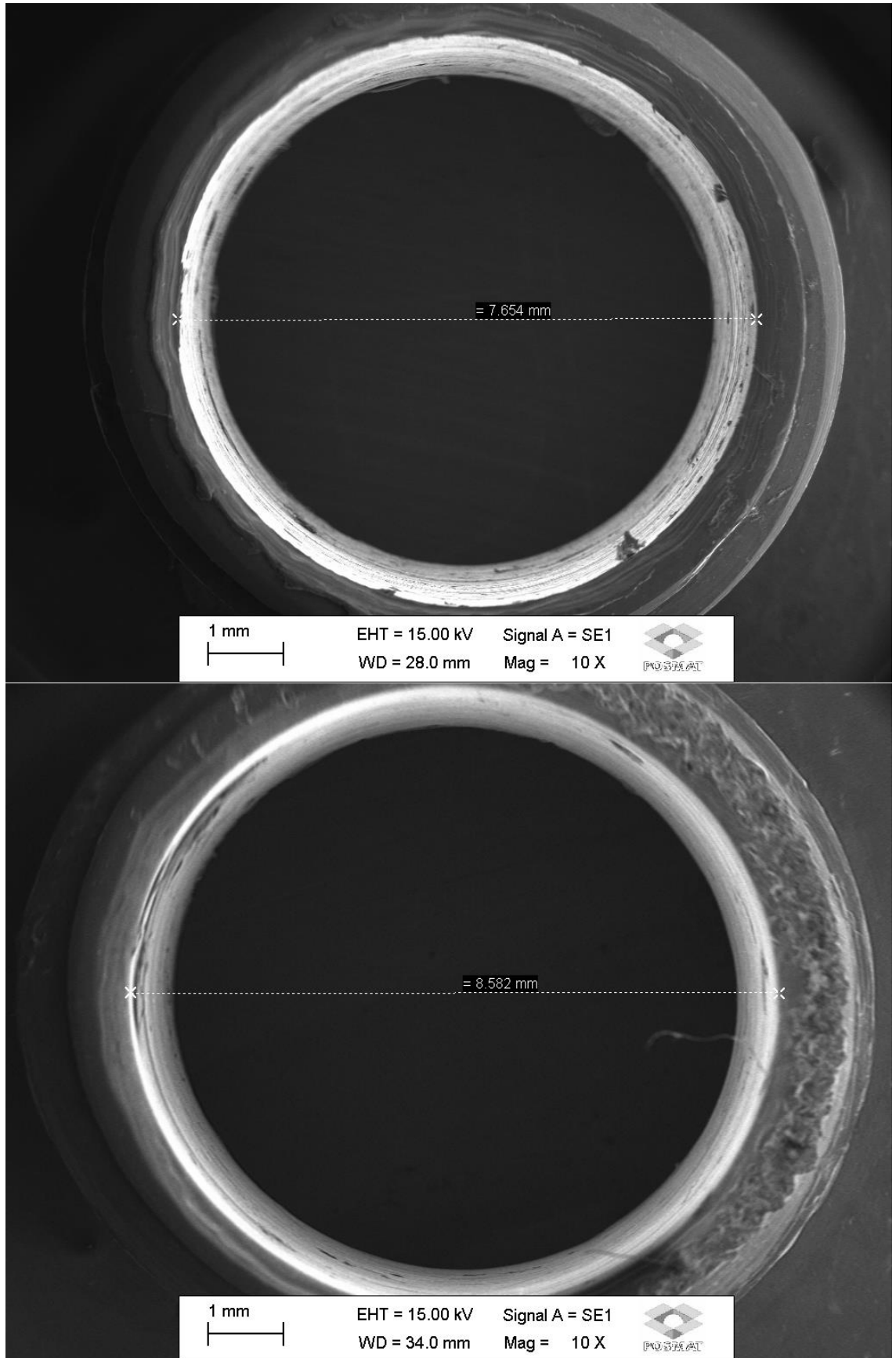
Fonte: Autoria própria.

Figura A.24: Peça de Alumínio n. 28.

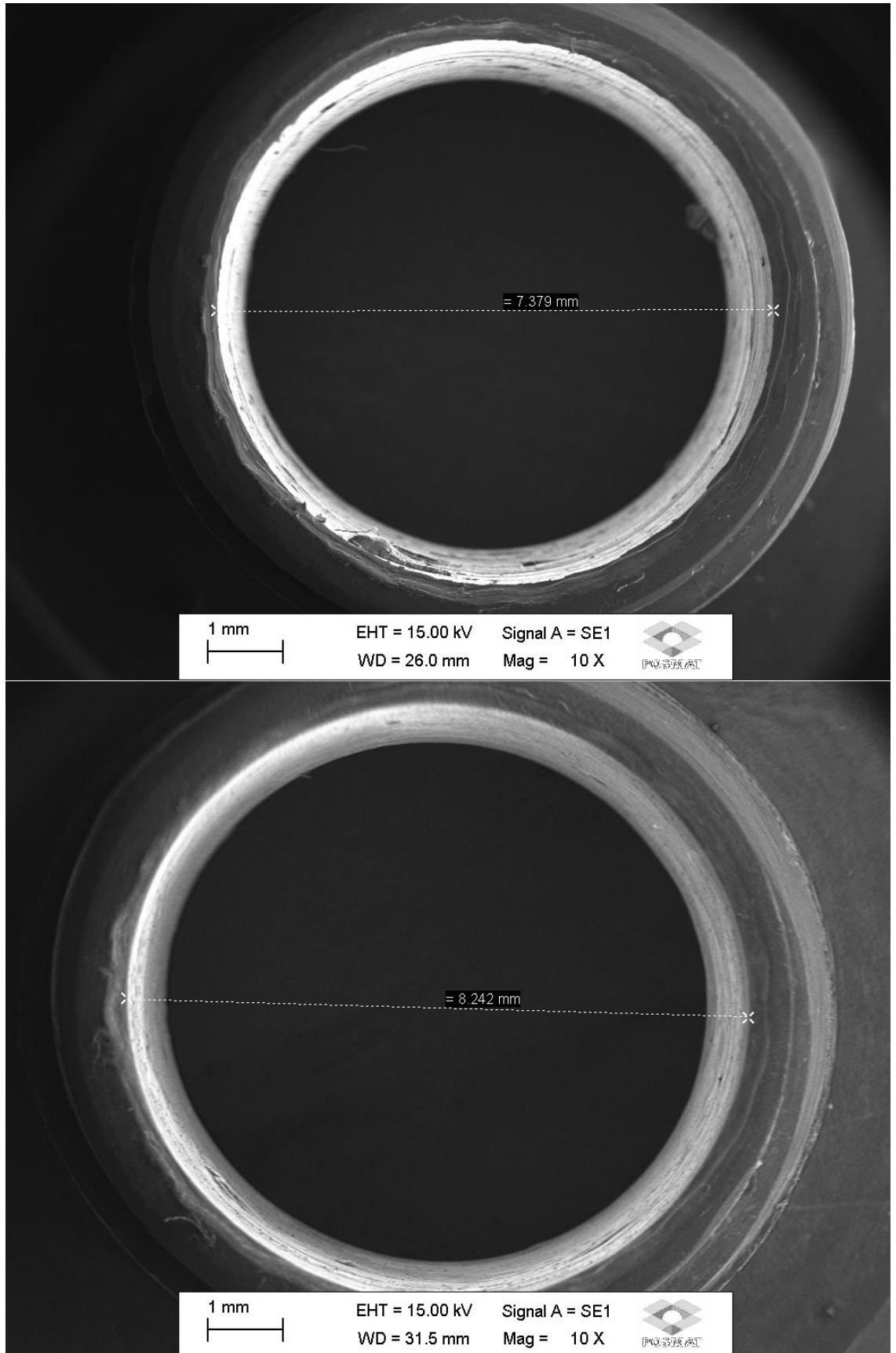


Fonte: Autoria própria.

Figura A.25: Peça de Alumínio n. 29.

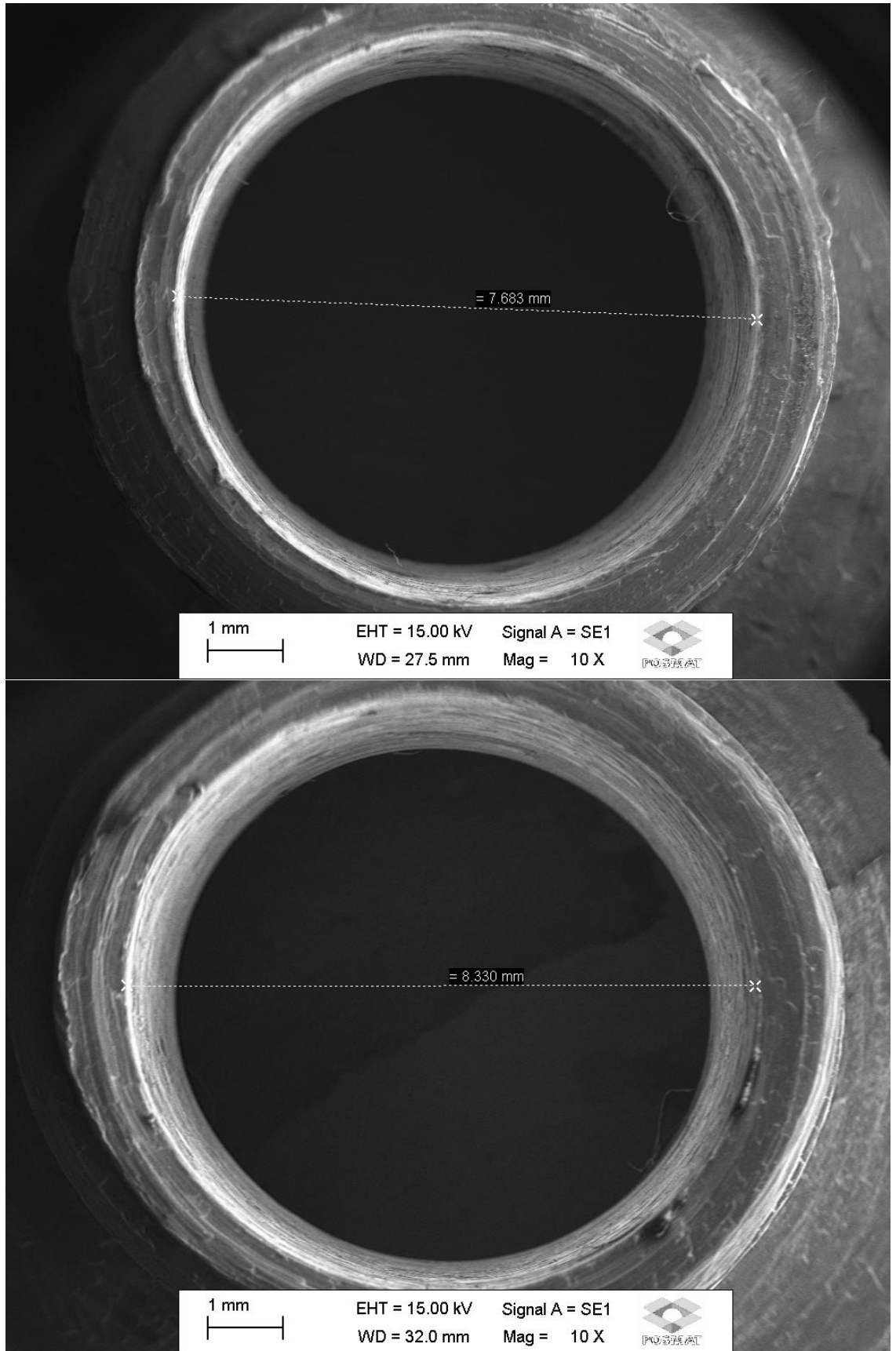


Fonte: Autoria própria.

Figura A.26: Peça de Alumínio n. 30.

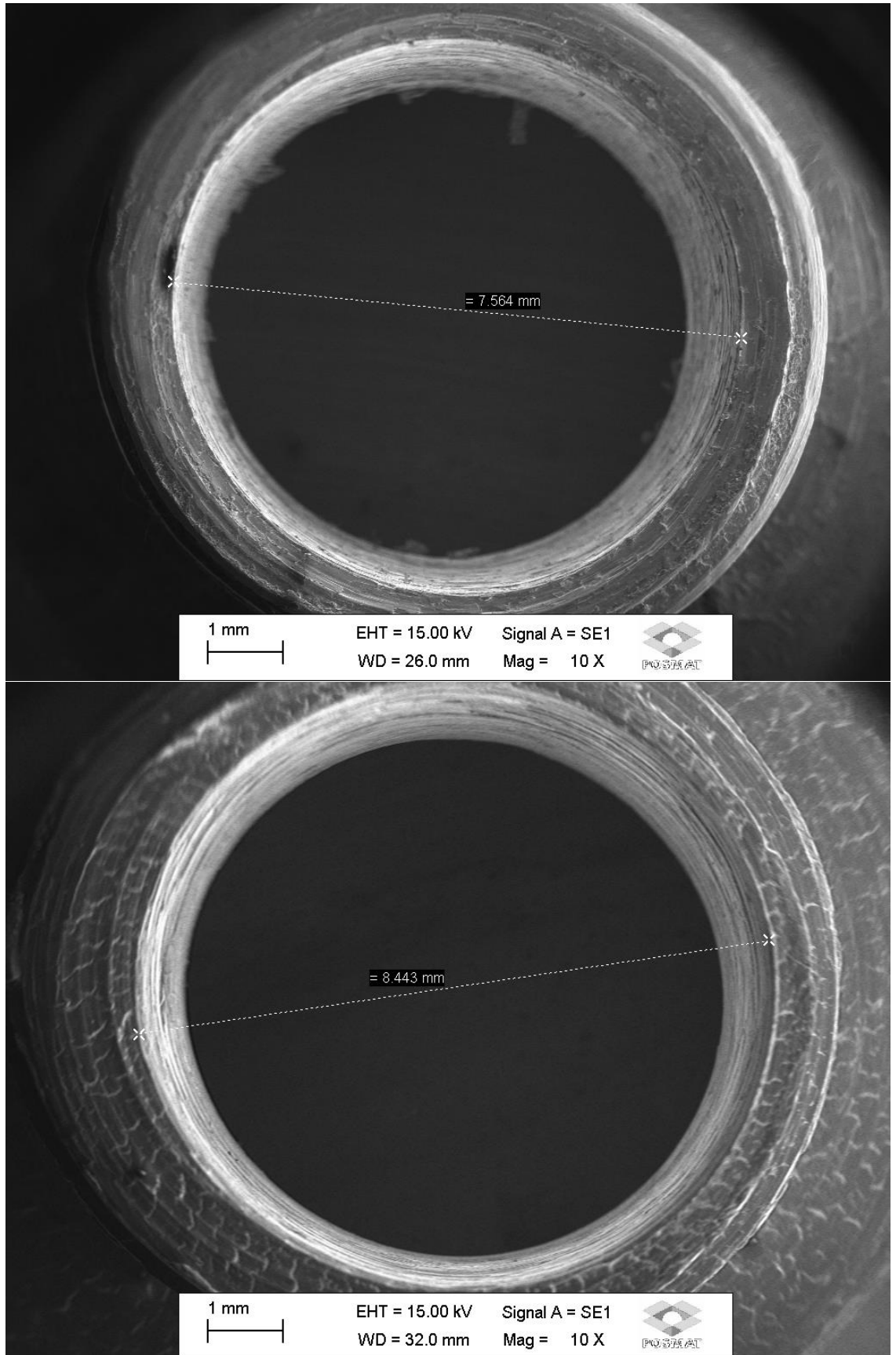
Fonte: Autoria própria.

Figura A.27: Peça de Aço n. 2.



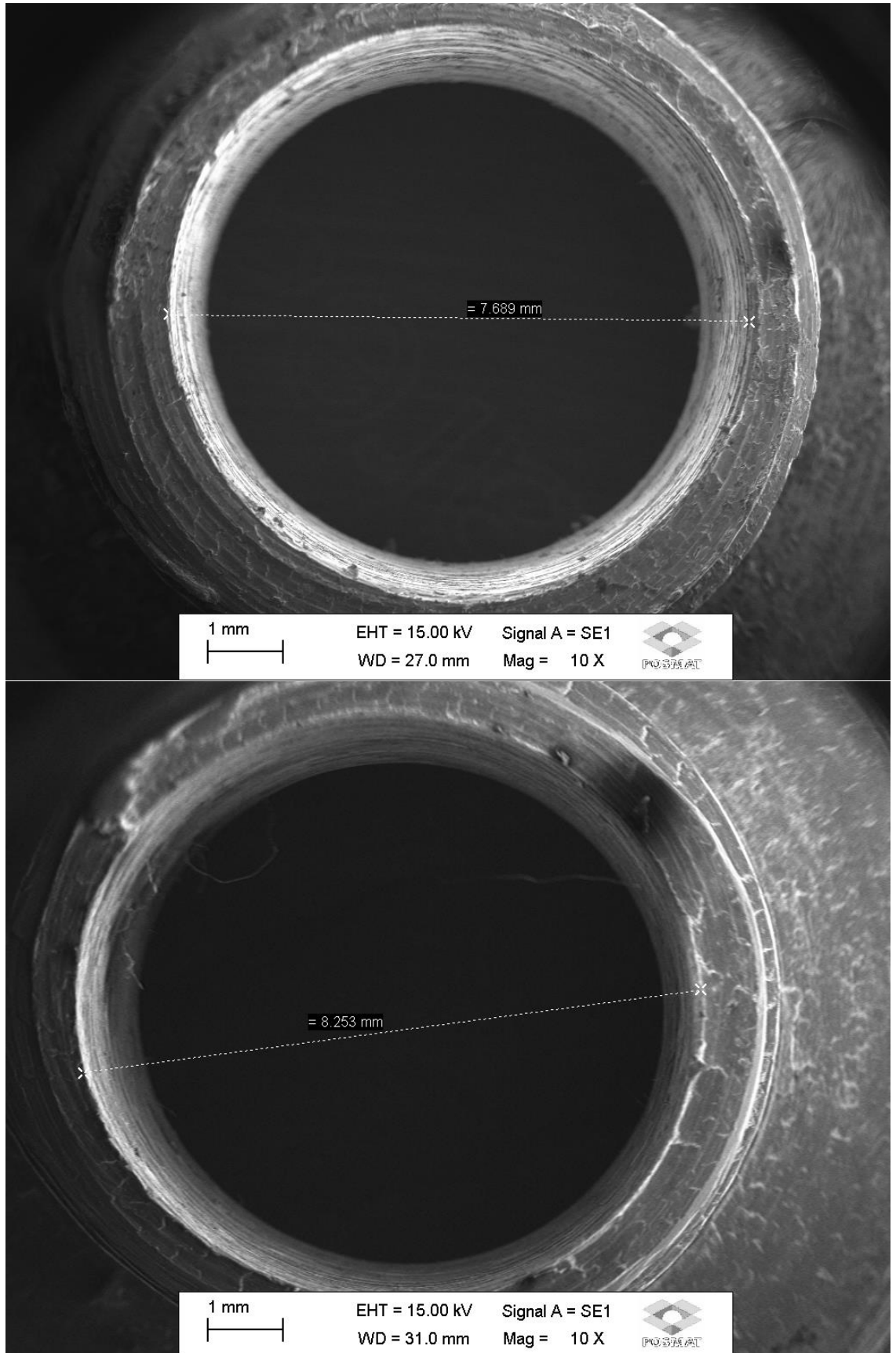
Fonte: Autoria própria.

Figura A.28: Peça de Aço n. 3.



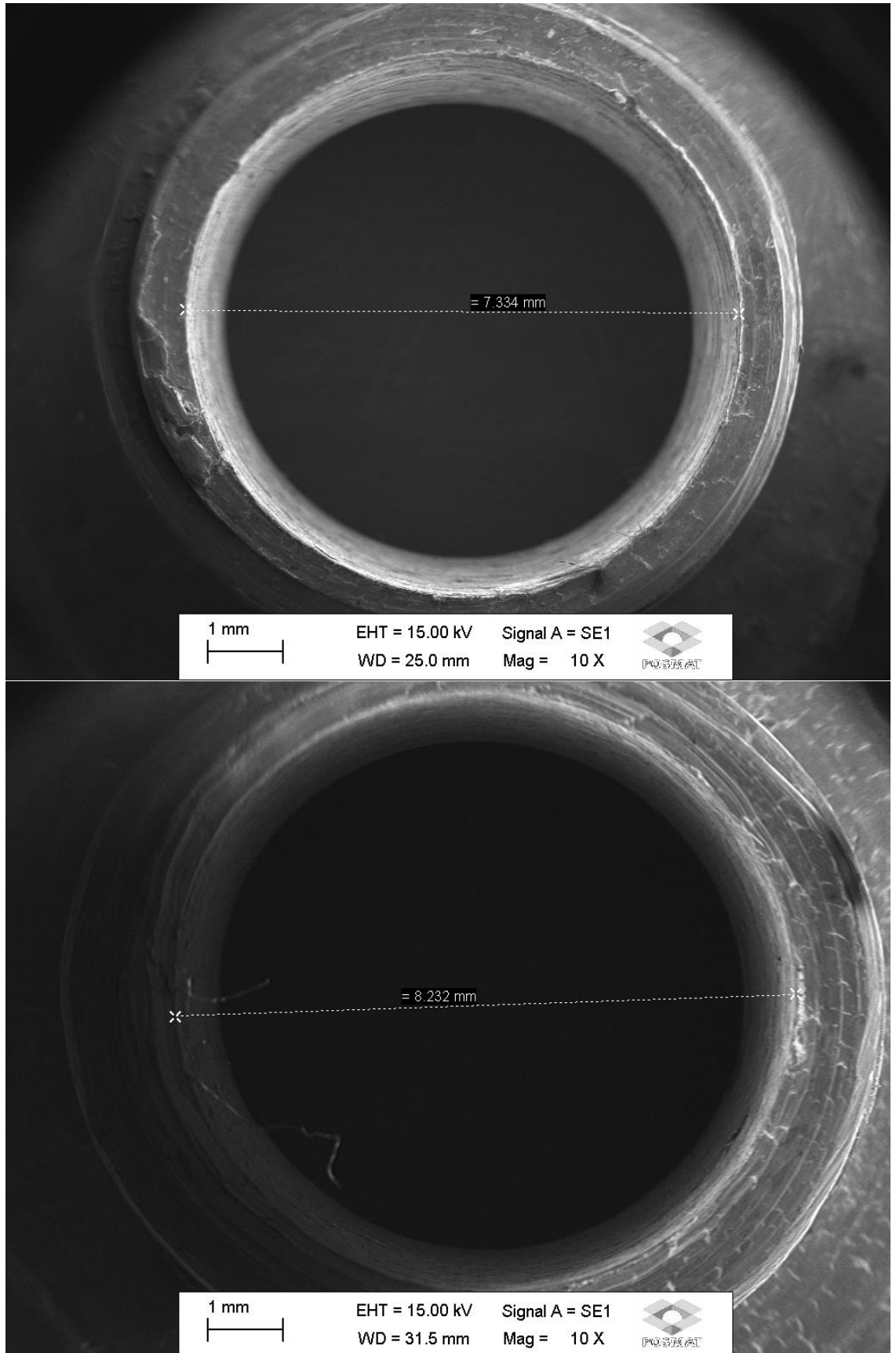
Fonte: Autoria própria.

Figura A.29: Peça de Aço n. 4.



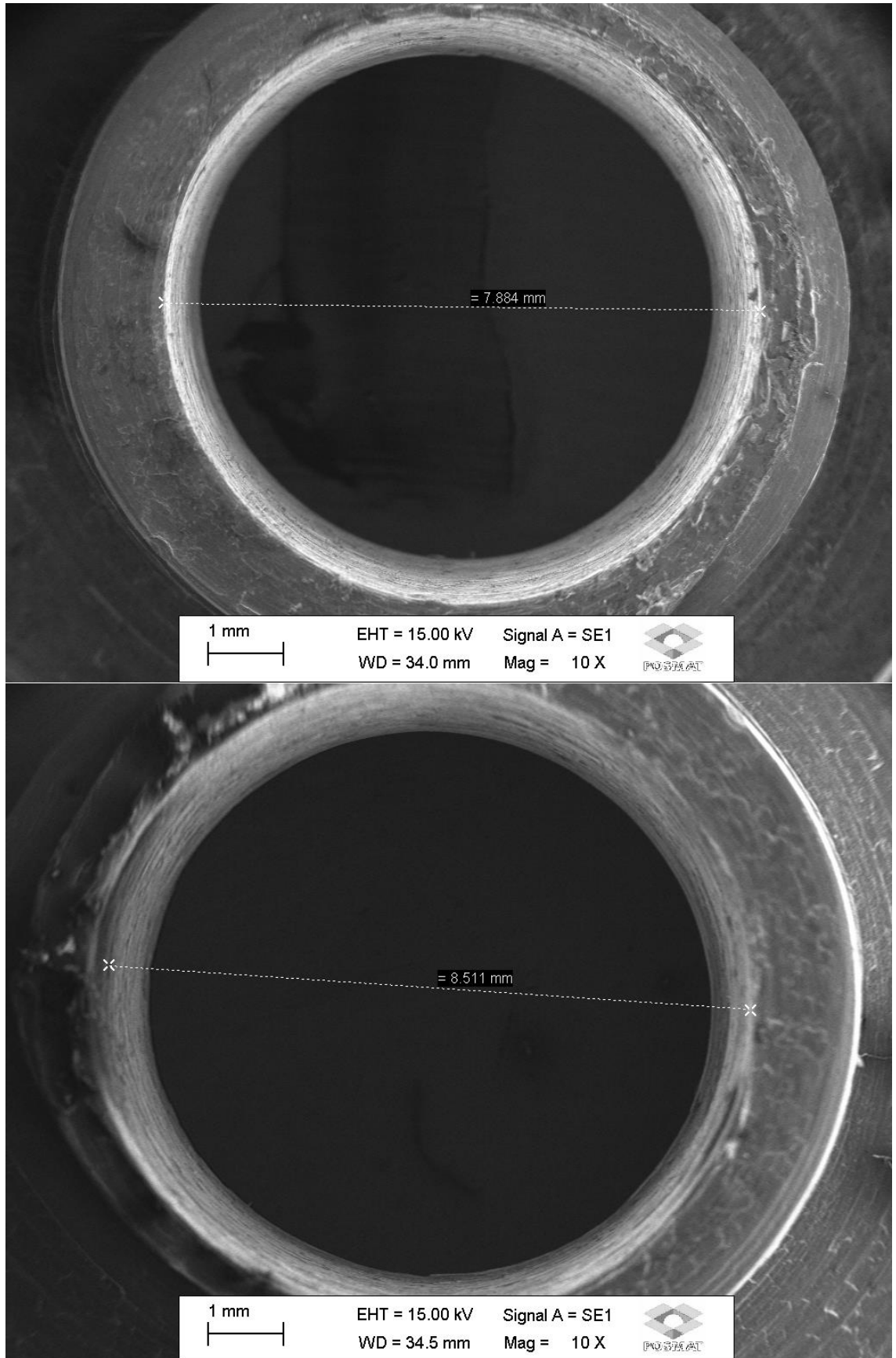
Fonte: Autoria própria.

Figura A.30: Peça de Aço n. 5.



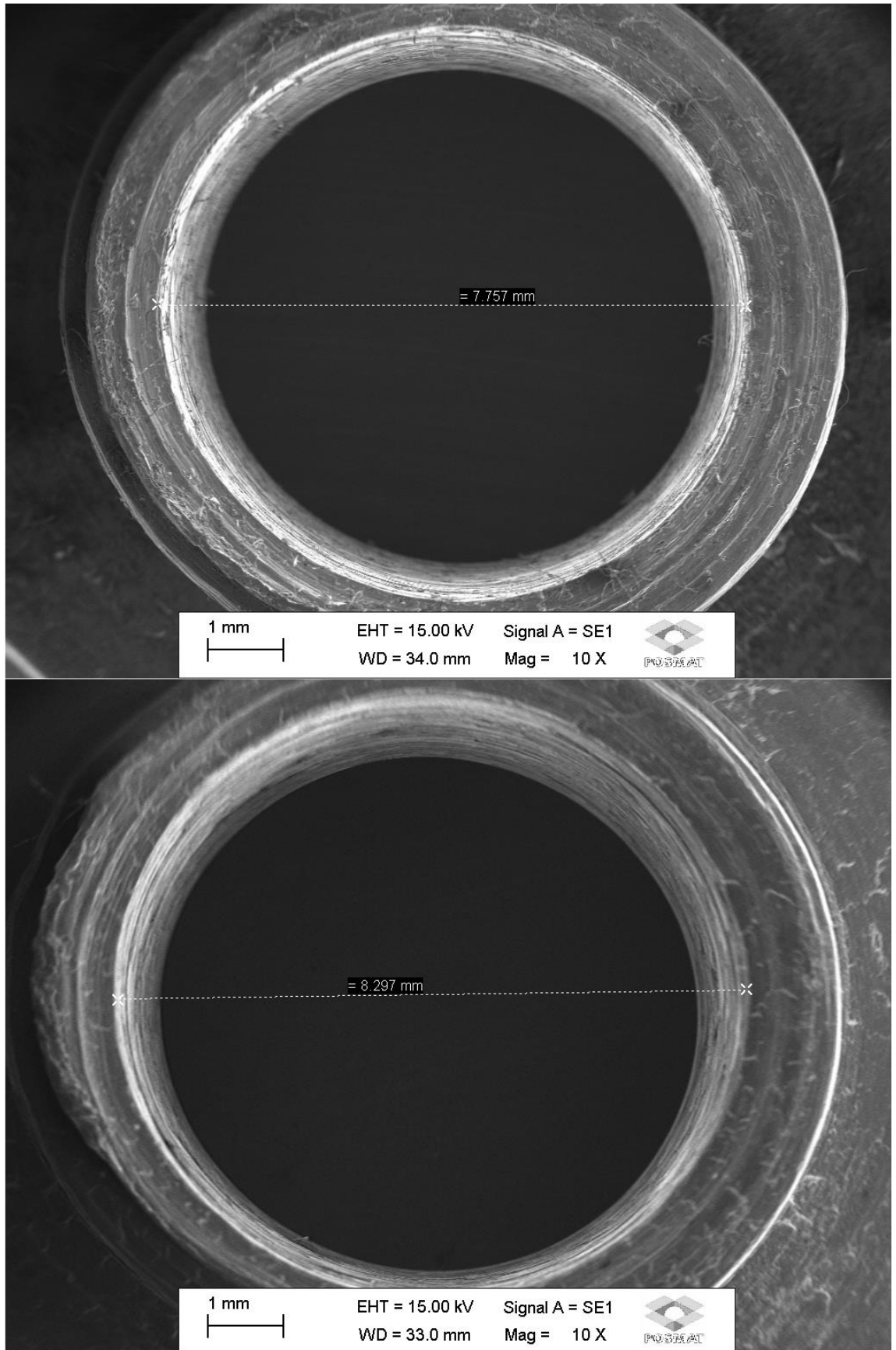
Fonte: Autoria própria.

Figura A.31: Peça de Aço n. 6.



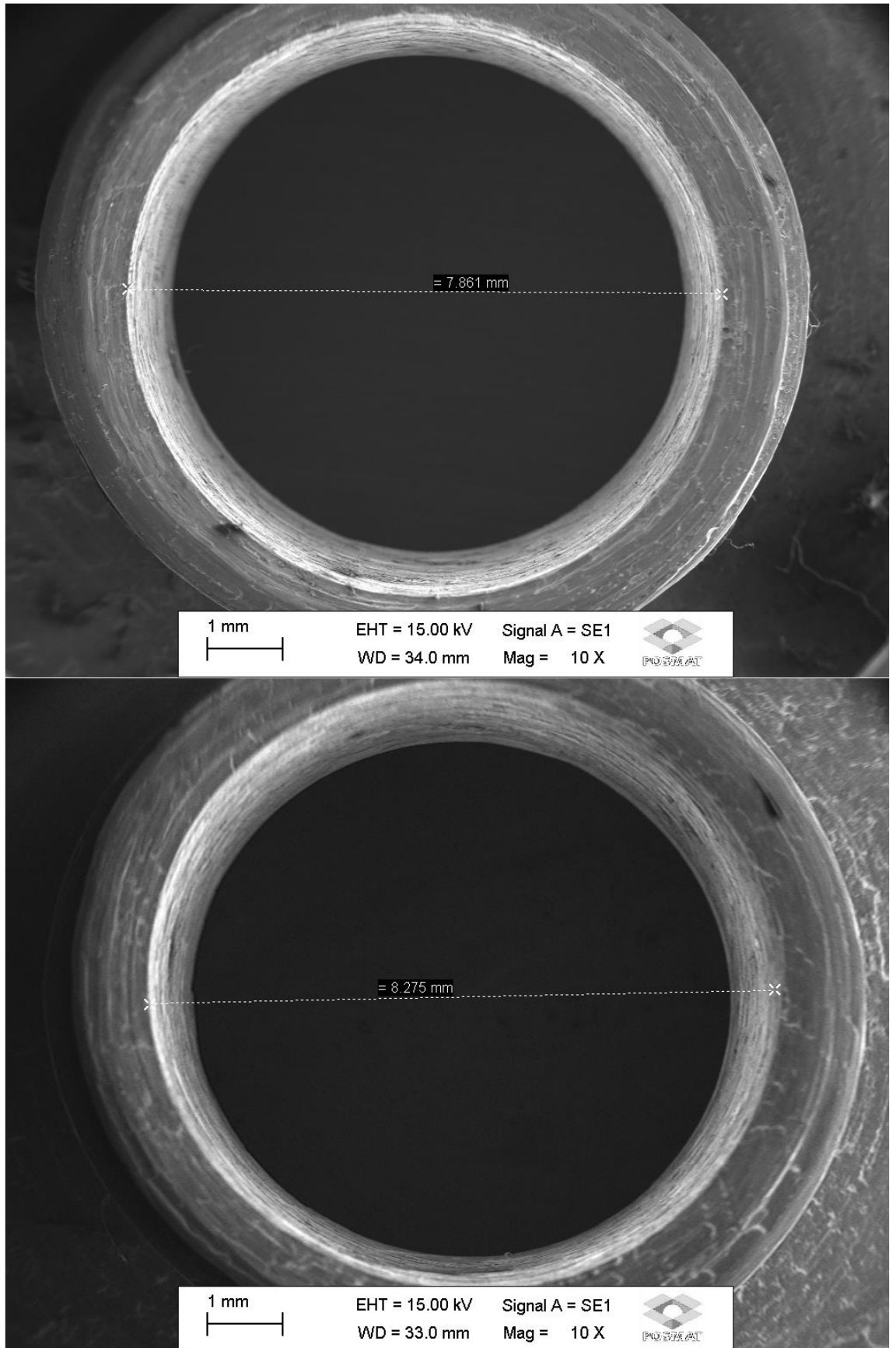
Fonte: Autoria própria.

Figura A.32: Peça de Aço n. 7.



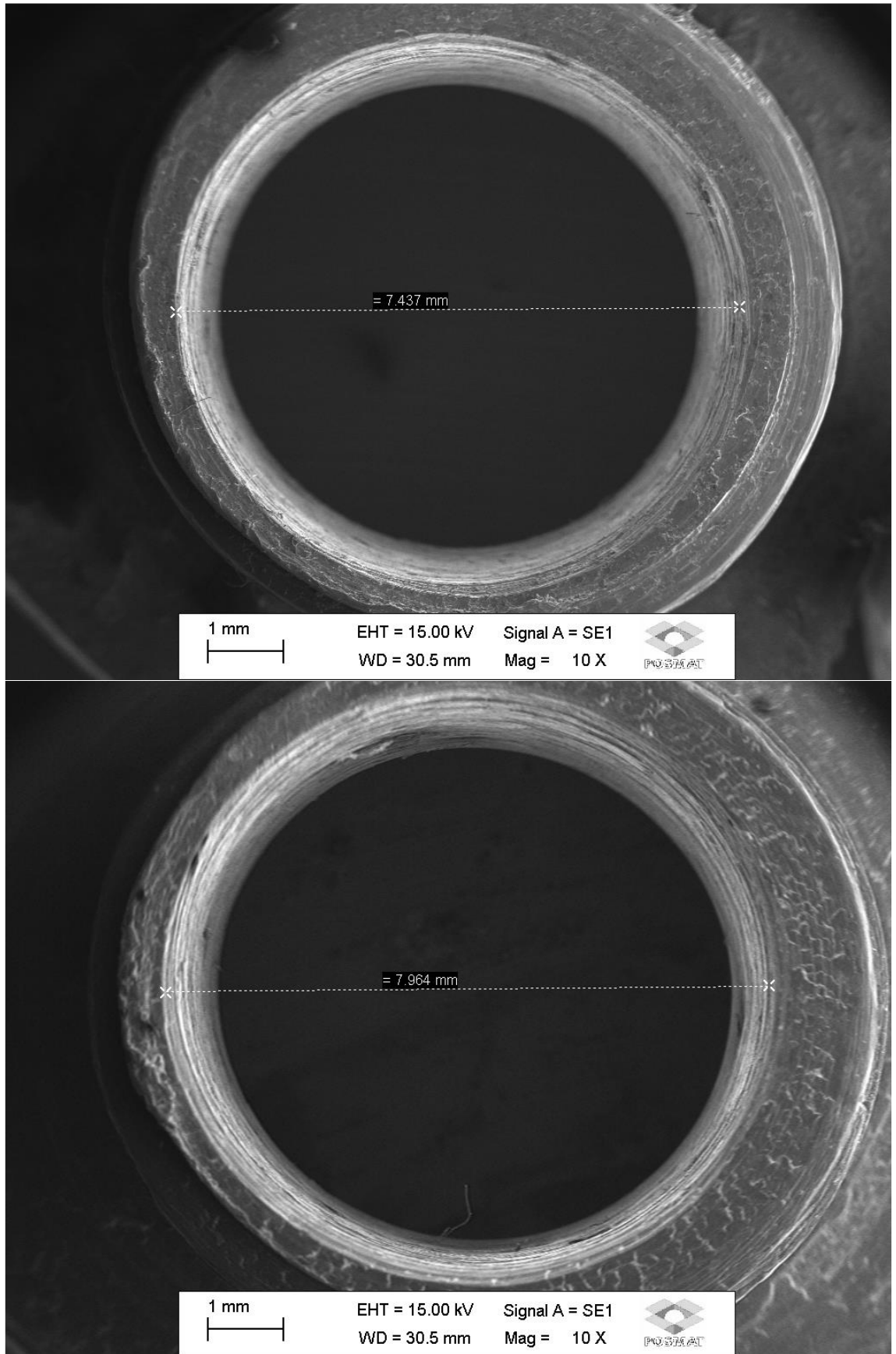
Fonte: Autoria própria.

Figura A.33: Peça de Aço n. 8.



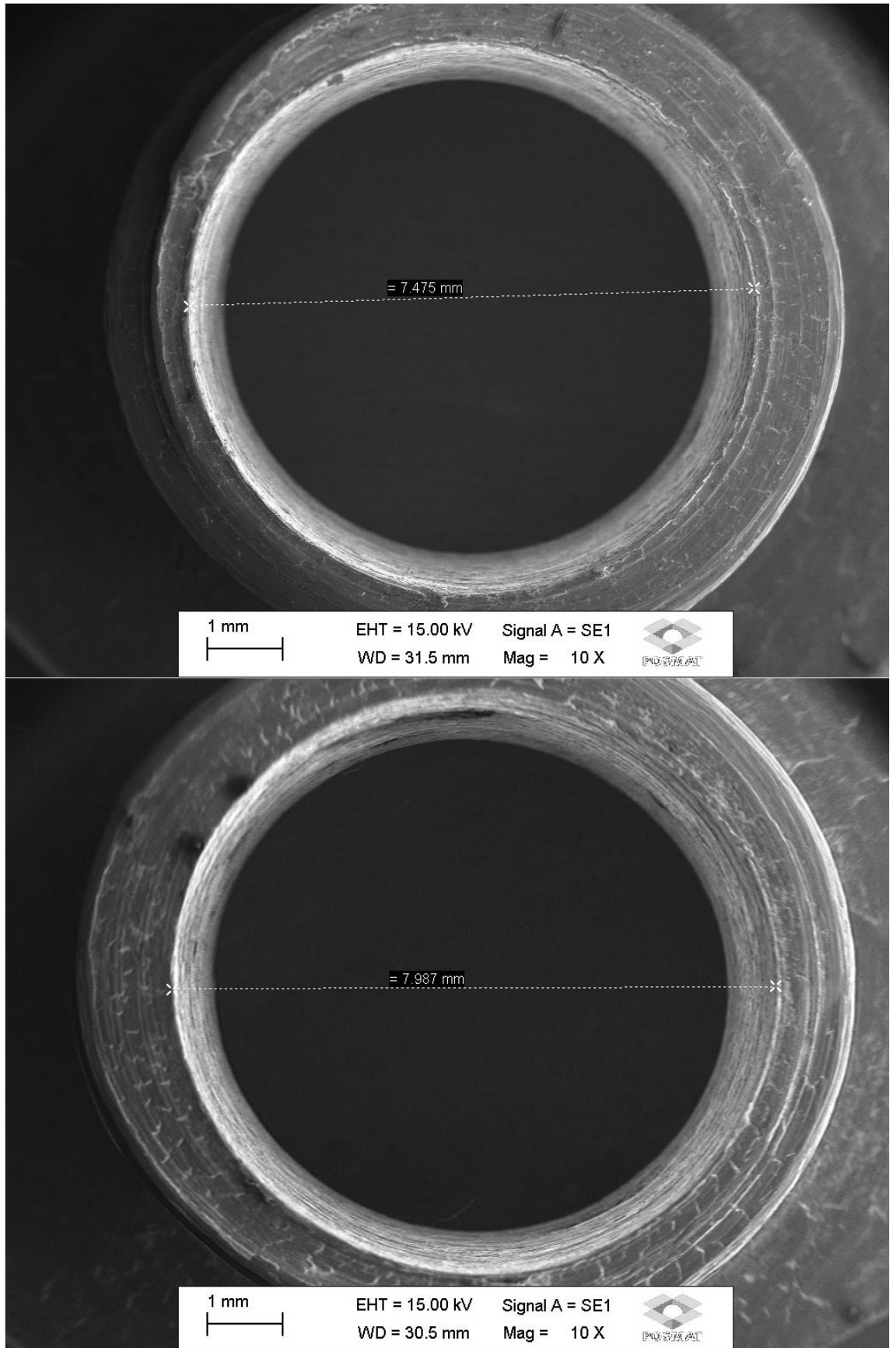
Fonte: Autoria própria.

Figura A.34: Peça de Aço n. 9.



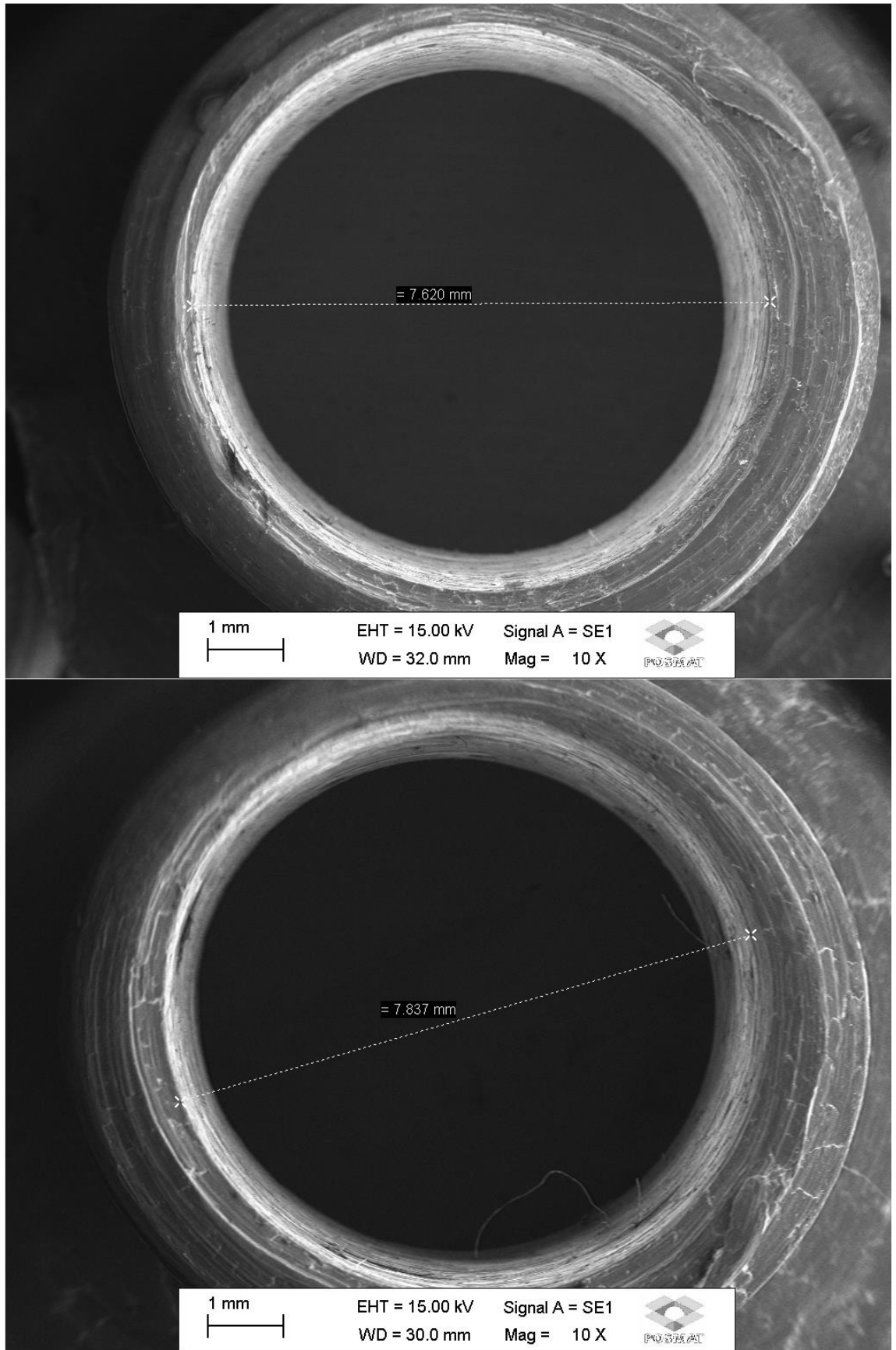
Fonte: Autoria própria.

Figura A.35: Peça de Aço n. 10.



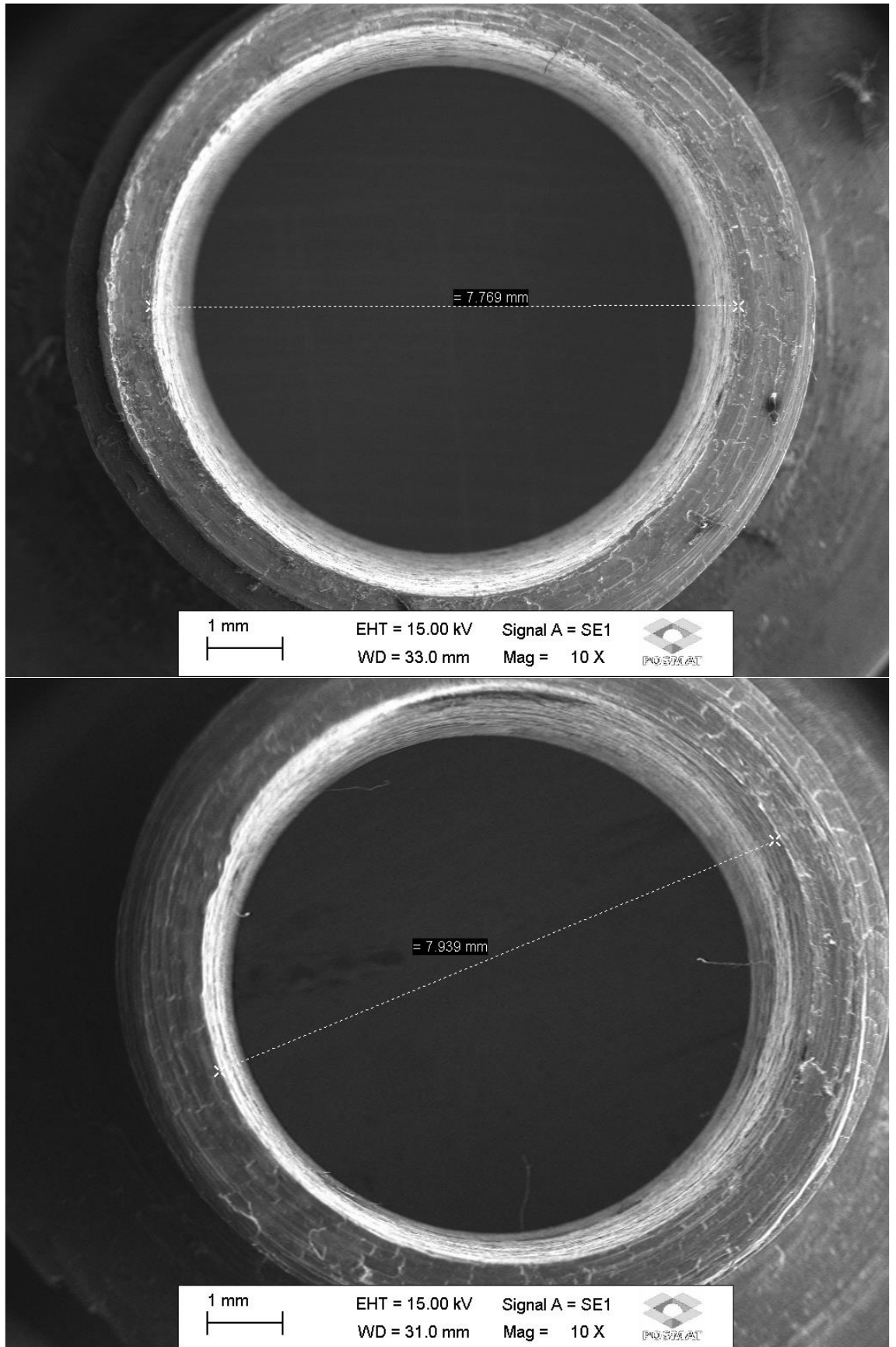
Fonte: Autoria própria.

Figura A.36: Peça de Aço n. 12.



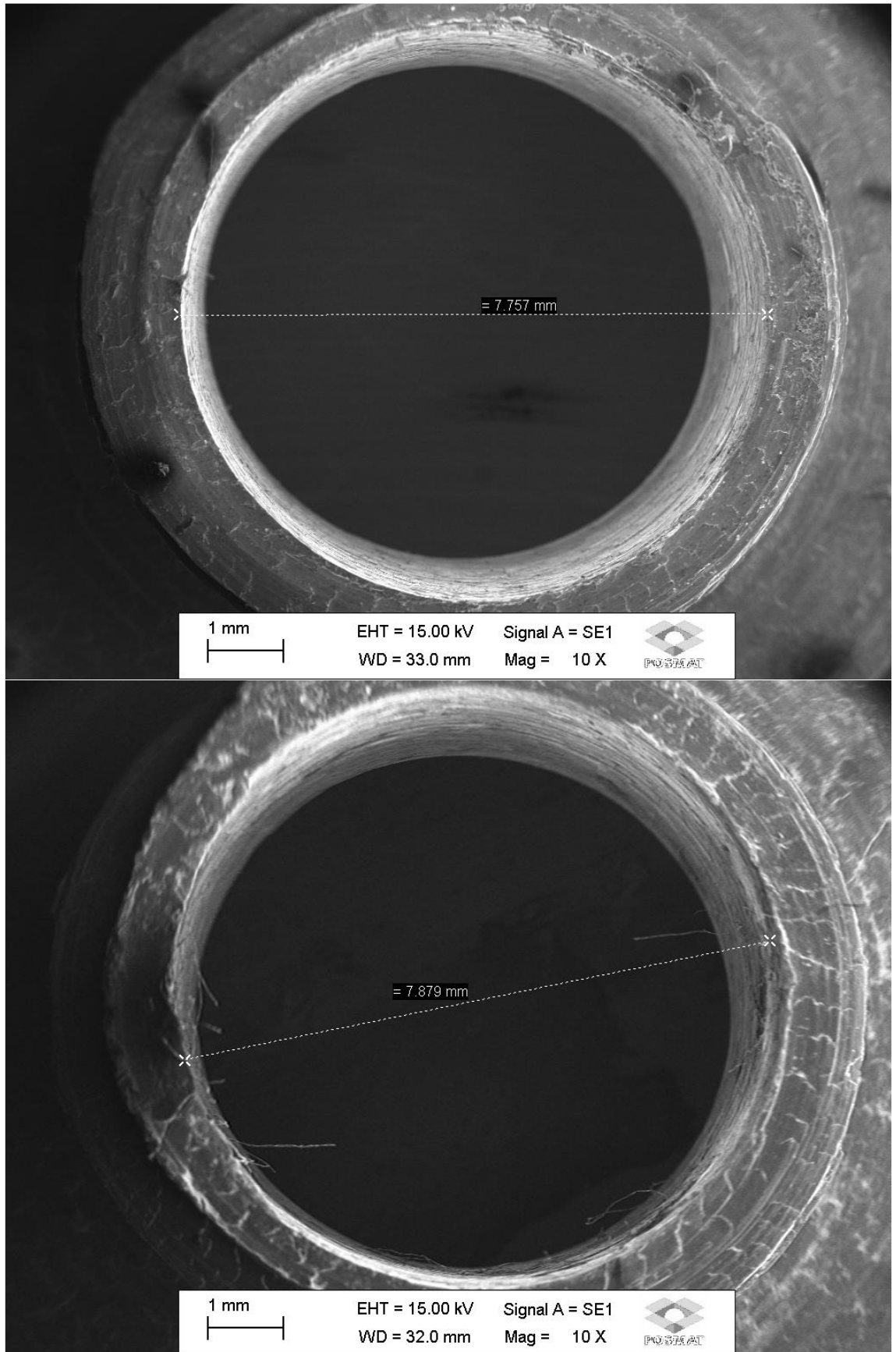
Fonte: Autoria própria.

Figura A.37: Peça de Aço n. 13.



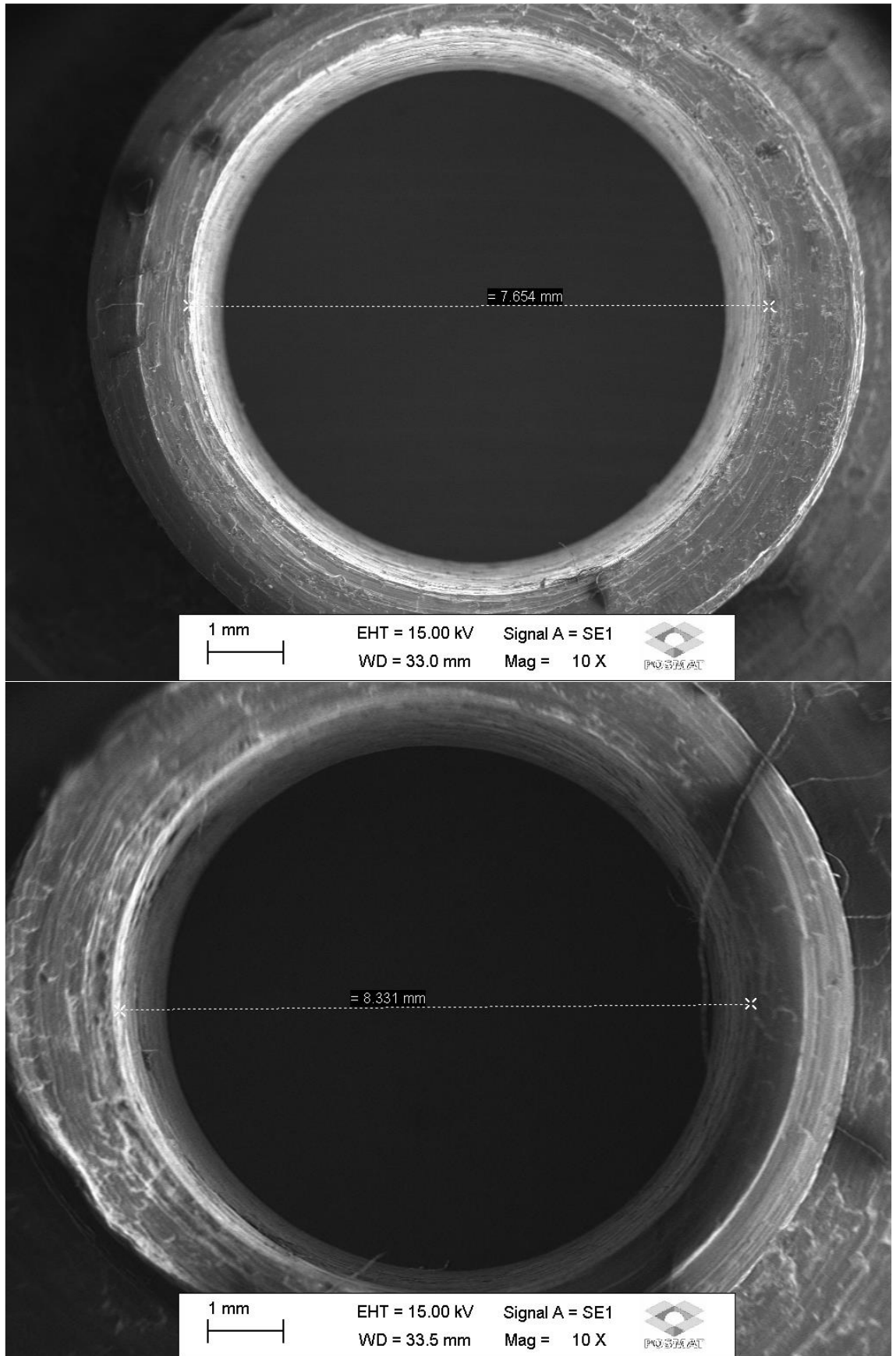
Fonte: Autoria própria.

Figura A.38: Peça de Aço n. 14.



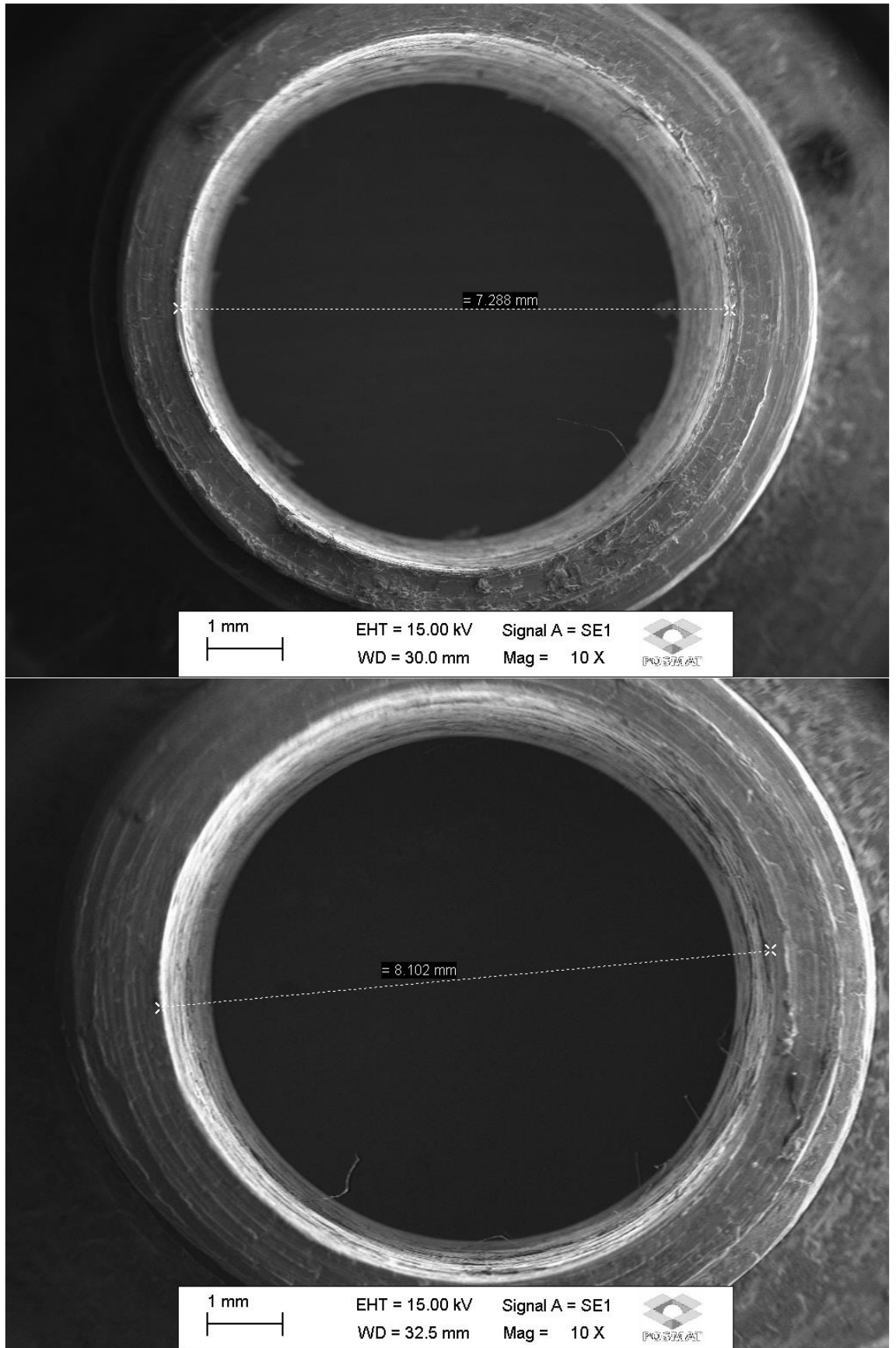
Fonte: Autoria própria.

Figura A.39: Peça de Aço n. 15.



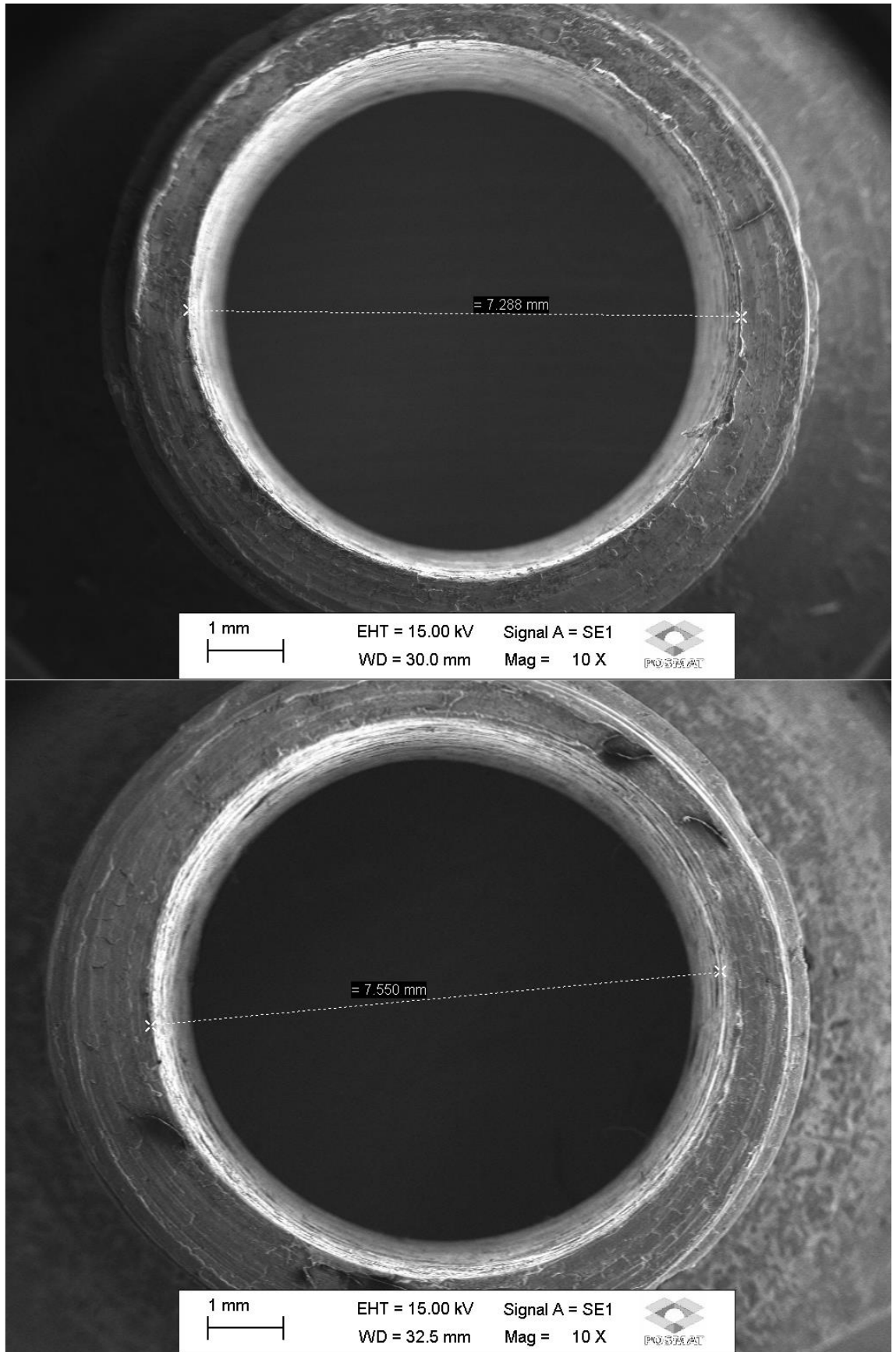
Fonte: Autoria própria.

Figura A.40: Peça de Aço n. 17.



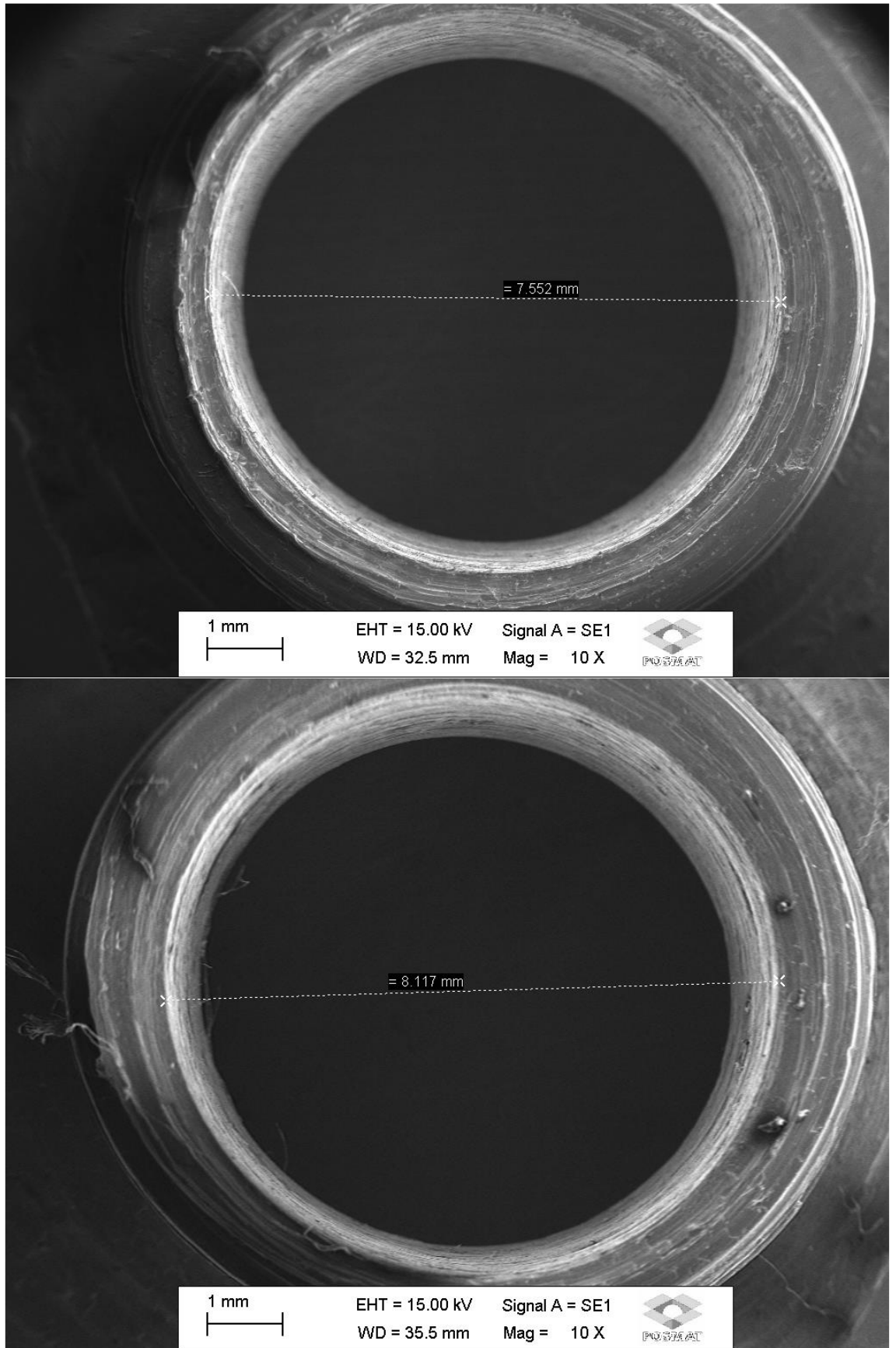
Fonte: Autoria própria.

Figura A.41: Peça de Aço n. 18.



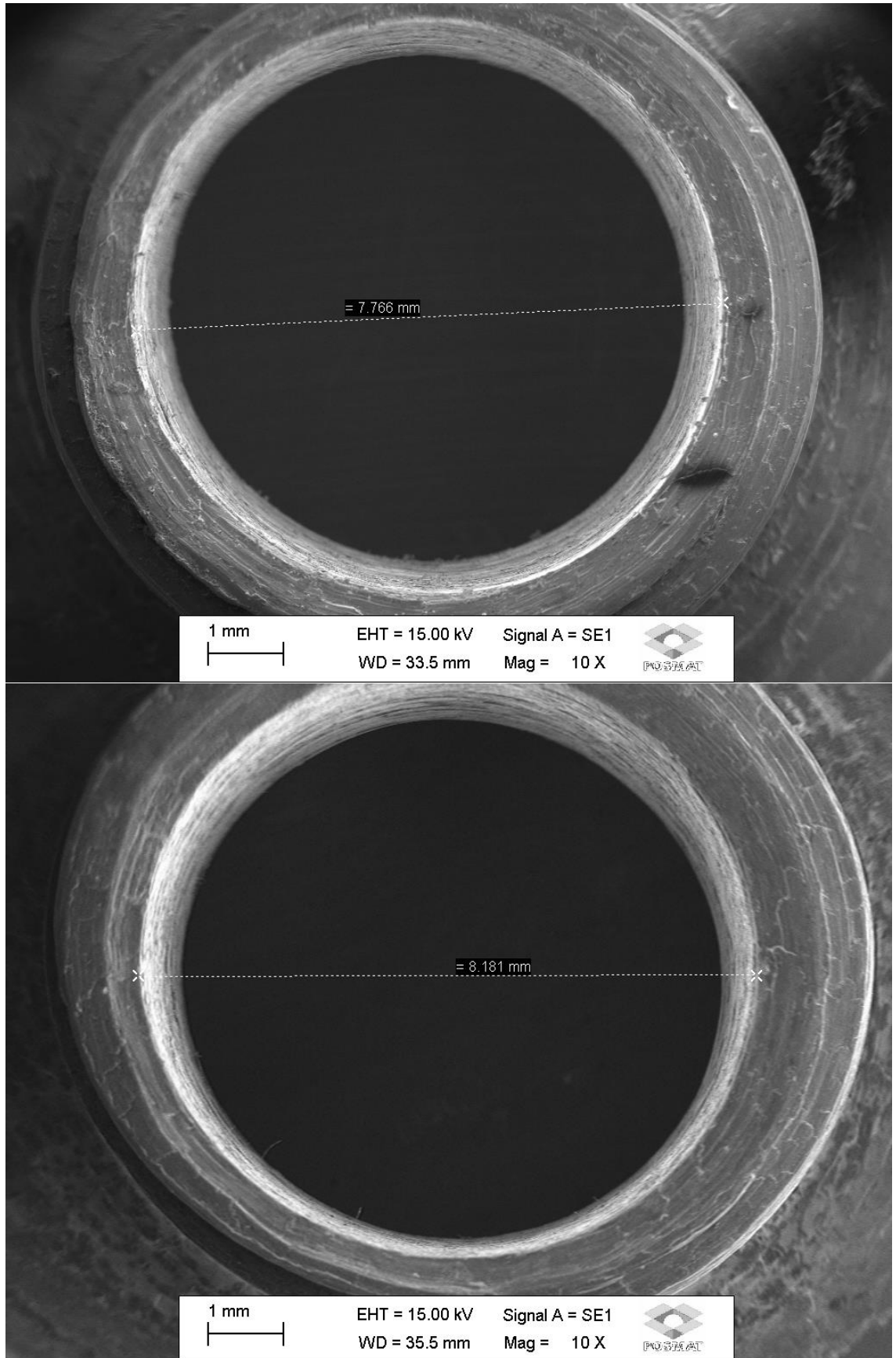
Fonte: Autoria própria.

Figura A.42: Peça de Aço n. 19.



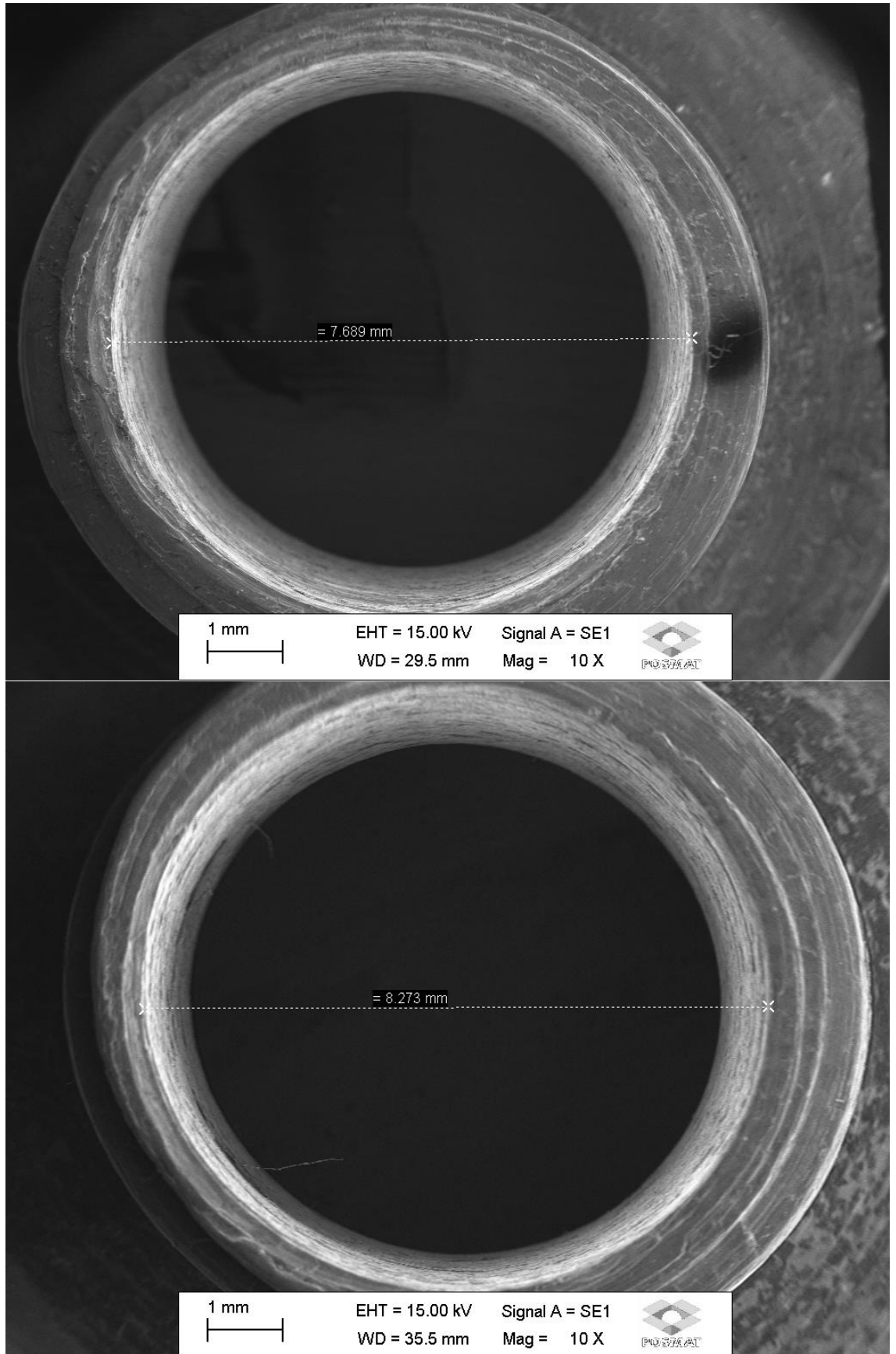
Fonte: Autoria própria.

Figura A.43: Peça de Aço n. 20.



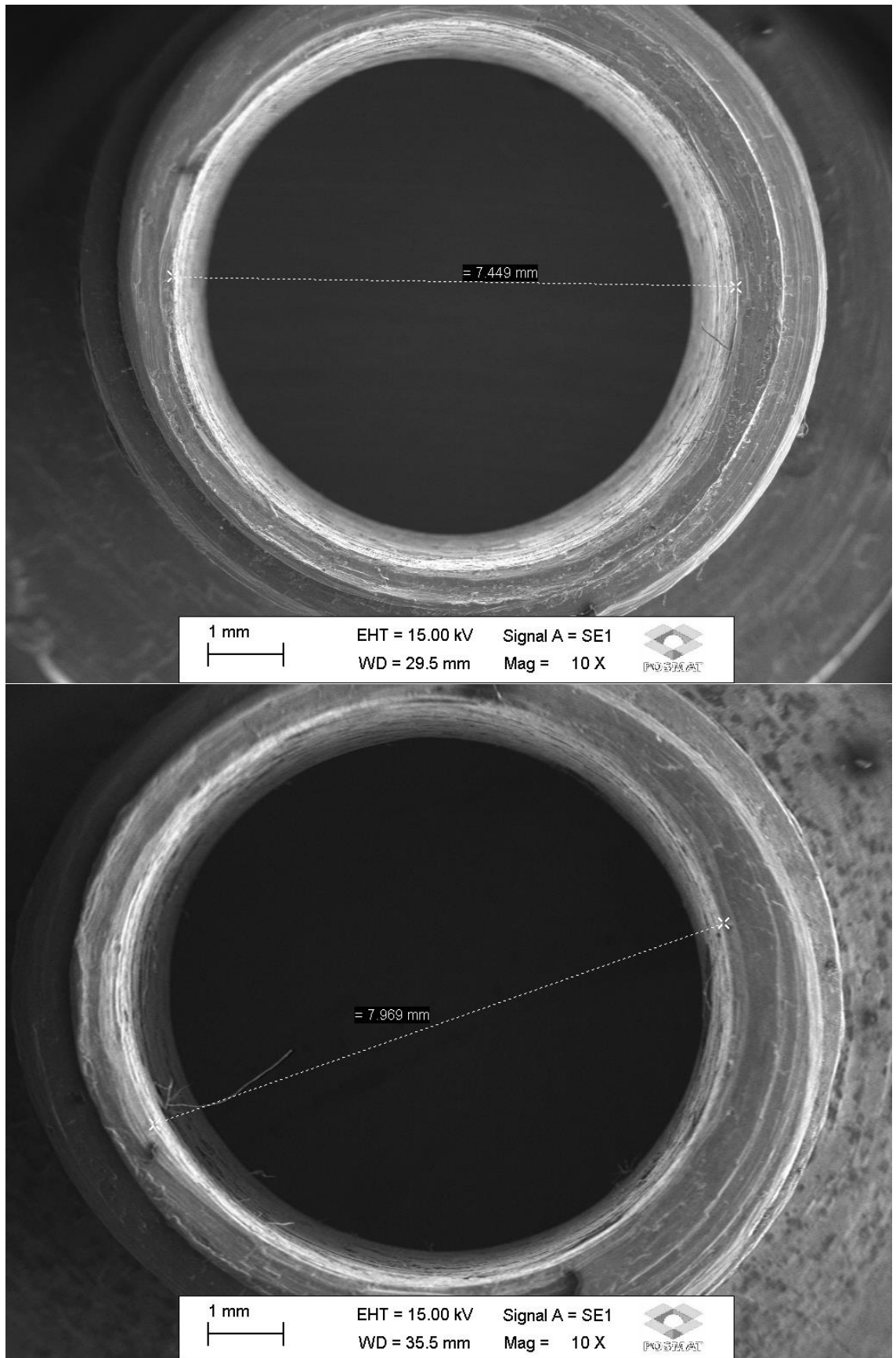
Fonte: Autoria própria.

Figura A.44: Peça de Aço n. 21.



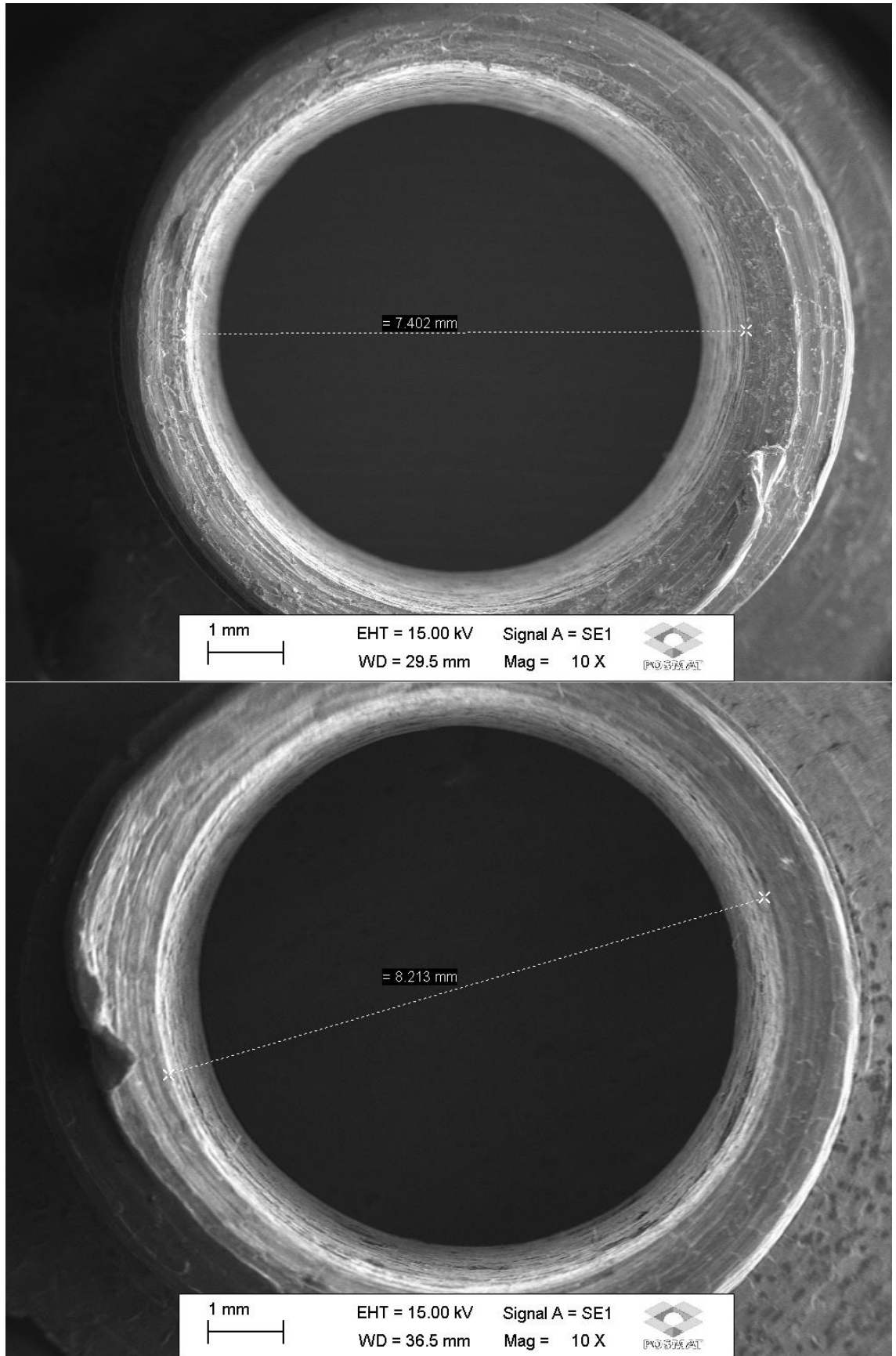
Fonte: Autoria própria.

Figura A.45: Peça de Aço n. 22.



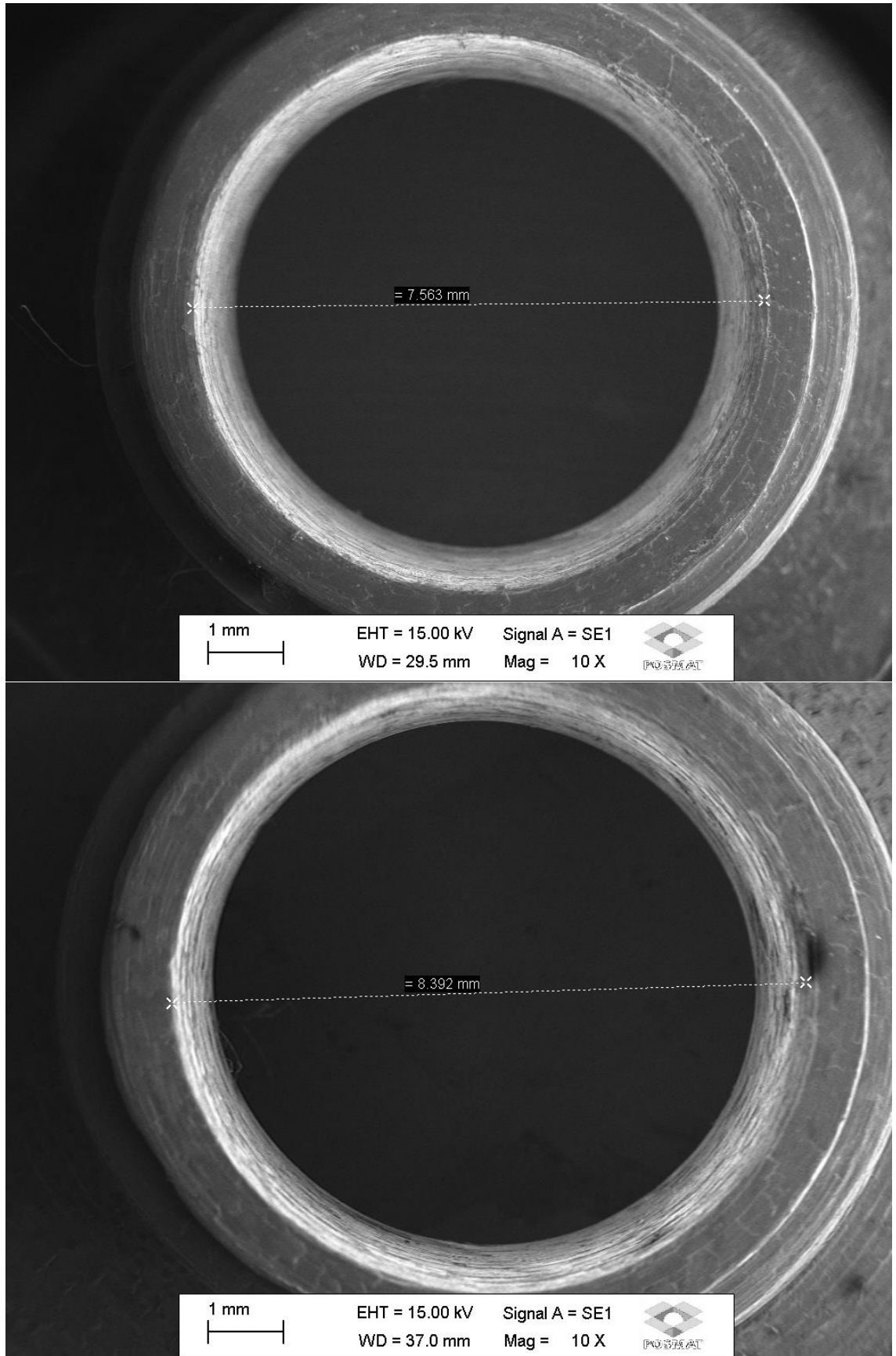
Fonte: Autoria própria.

Figura A.46: Peça de Aço n. 23.



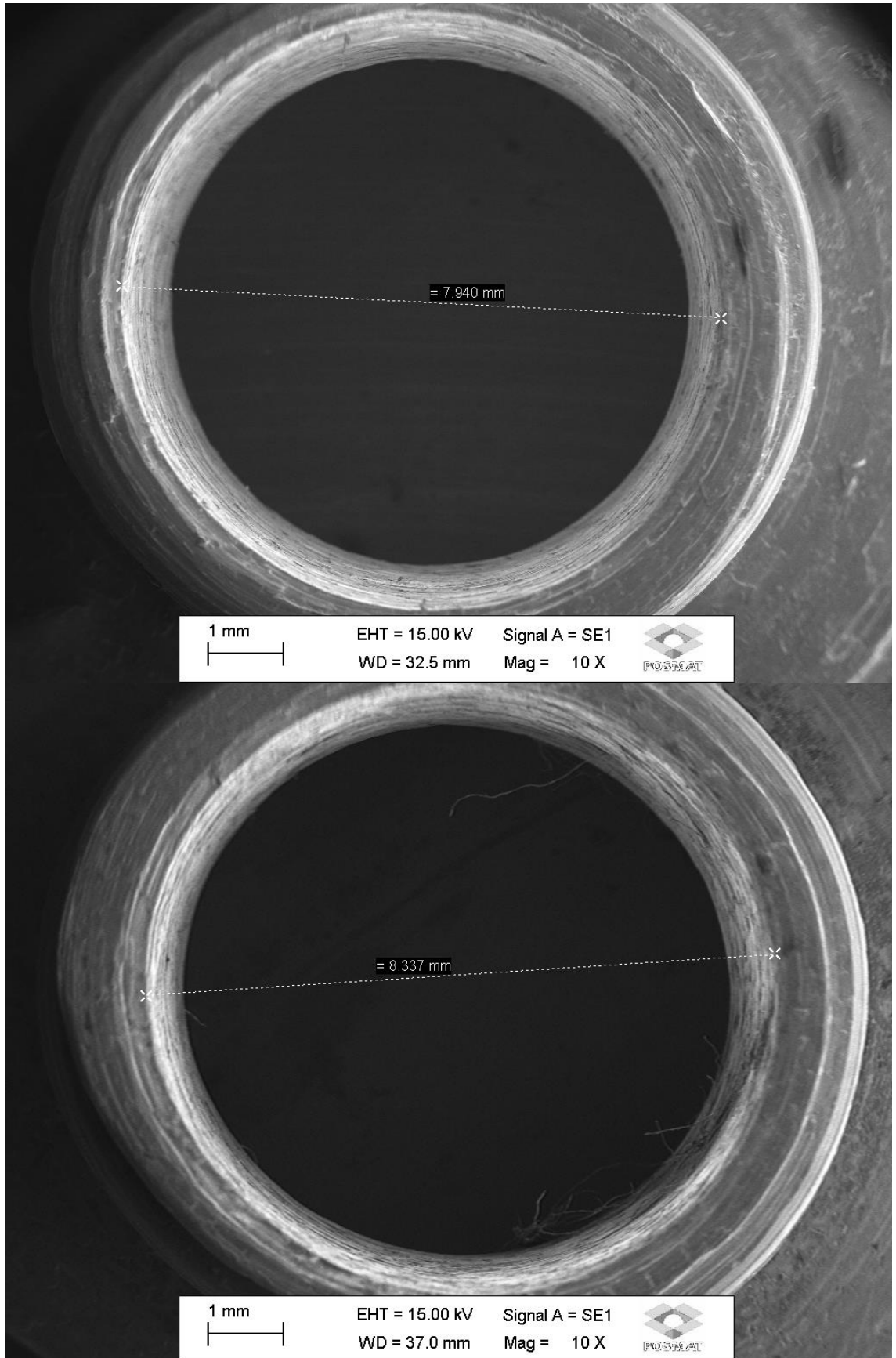
Fonte: Autoria própria.

Figura A.47: Peça de Aço n. 24.



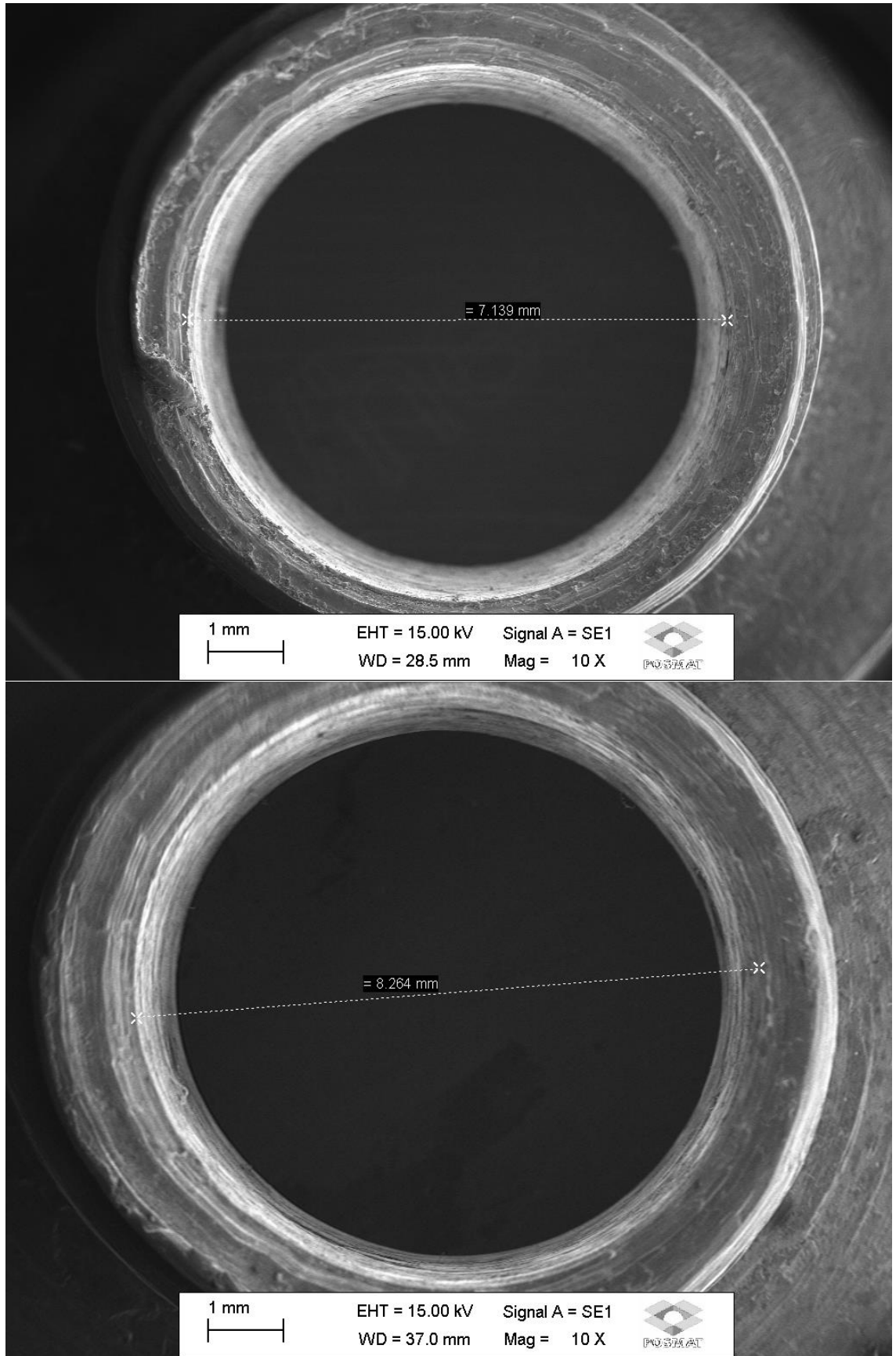
Fonte: Autoria própria.

Figura A.48: Peça de Aço n. 25.



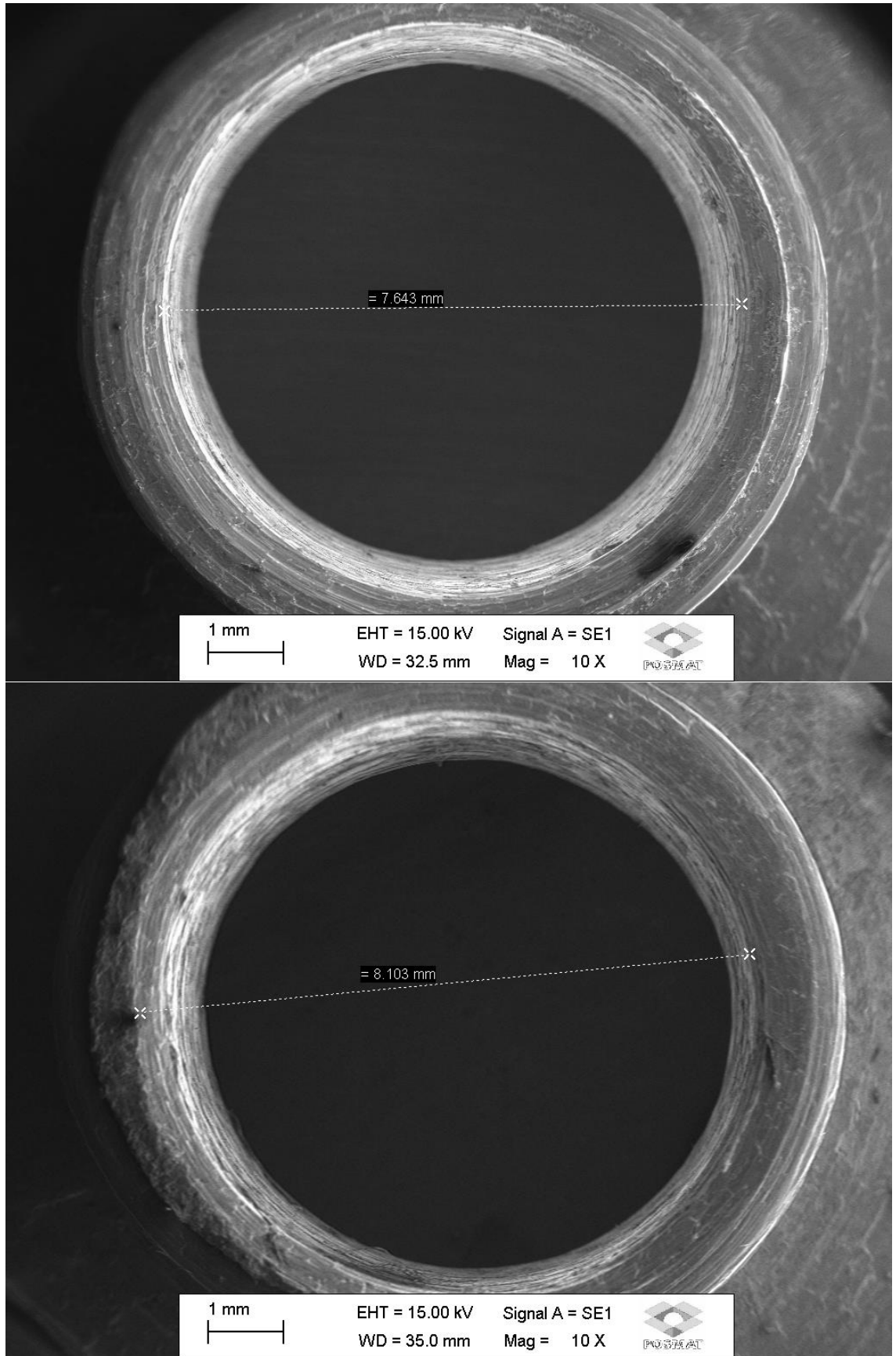
Fonte: Autoria própria.

Figura A.49: Peça de Aço n. 27.



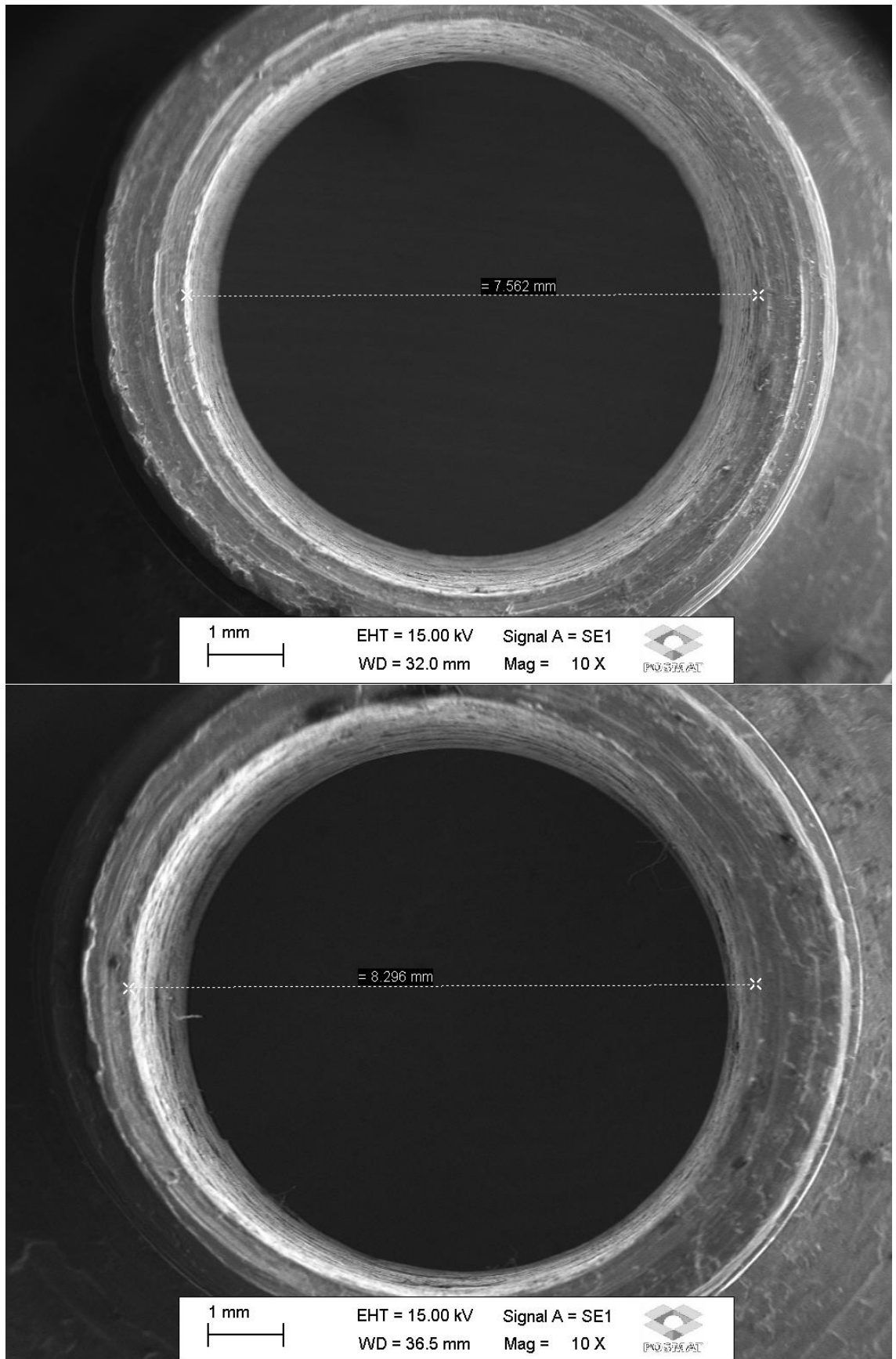
Fonte: Autoria própria.

Figura A.50: Peça de Aço n. 28.



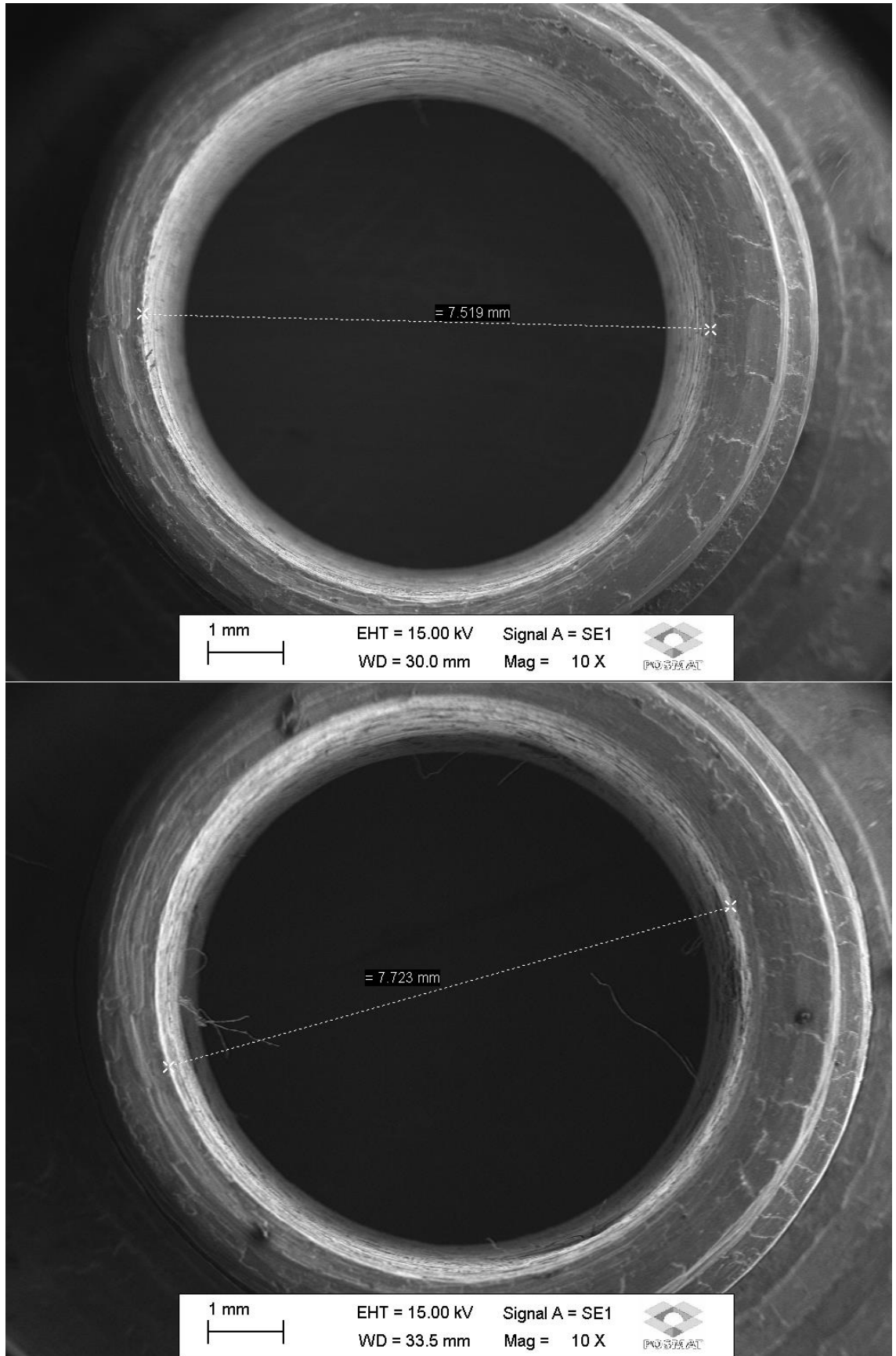
Fonte: Autoria própria.

Figura A.51: Peça de Aço n. 29.



Fonte: Autoria própria.

Figura A.52: Peça de Aço n. 30.



Fonte: Autoria própria.