

ANÁLISE MICROESTRUTURAL DOS AÇOS AISI H-13 E AISI 1045 APÓS O PROCESSO DE ELETROEROSÃO PARA VERIFICAÇÃO DA CONDIÇÃO DA ESTRUTURA CRISTALINA NA REGIÃO TERMICAMENTE AFETADA.

MICRO-STRUCTURAL ANALYSIS OF AISI H-13 AND AISI 1045 STEEL POST ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING PROCESS CRYSTALLINE STRUCTURE TO CHECK THE CONDITION IN THE THERMICALLY AFFECTED REGION.

¹GUIMARÃES, Douglas Orlando Teixeira; ¹FOZ, Murilo Rodrigues;
¹GONÇALVES, Gustavo José Corrêa; ¹MENDES, Cláudia Luisa;
¹RIBEIRO, Fernando Sabino Fontequ

¹Departamento de Engenharia Mecânica – Centro Universitário das Faculdades Integradas de Ourinhos-Unifio/FEMM

RESUMO

Uma análise microestrutural de um componente metálico é necessária para que possíveis falhas sejam previstas no projeto em relação aos detalhes observados em laboratório e como eles interferem na aplicabilidade do material. A usinagem por eletroerosão é, entre os métodos não convencionais de usinagem, um dos processos mais utilizados, principalmente na indústria fabricante de ferramentas e moldes. O objetivo deste trabalho foi comparar a microestrutura dos aços AISI 1045 e AISI H-13 após serem submetidos a usinagem por descargas elétricas. As amostras usinadas foram cortadas e as pequenas seções de estudo foram embutidas, lixadas, polidas e passaram pelo ataque químico, de forma a revelar a estrutura cristalina dos metais. Os resultados foram muito além de imagens, a atividade laboratorial foi relevante para adicionar capacidades técnicas à pesquisa, além de apresentar os detalhes dos materiais afetados termicamente.

Palavras-chave: Metalografia; Usinagem Não Convencional; Eletroerosão; Aços.

ABSTRACT

A micro-structural analysis of a metallic component is necessary so that possible failures can be predicted in the project, in relation to the details observed in laboratory and how they interfere in the materials applicability. Electrical Discharge Machining (EDM) is, among non-conventional machining processes, one of the most used, mainly in the tool and mold industry. The objective of this paper is to compare the micro-structures of AISI 1045 and AISI H-13 steel after being submitted to Electrical Discharge Machining. The machined samples were cut, and the small study sections were embedded, sanded, polished and put through a chemical attack, in order to reveal the crystalline structure of these metals. The results were many beyond the images, the lab activity was relevant in adding technical capacities to the research, other than presenting the details of the thermally affected materials.

Keywords: Metallography; Non-Conventional Machining; Electrical Discharge Machining; Steels.

INTRODUÇÃO

A humanidade precisou de alguns séculos para começar a expandir seu portfólio de materiais usados na engenharia de maneira geral. A madeira era o principal material utilizado em construções, ferramentas e máquinas até meados do século XVIII.

Como muito se sabe, as guerras impulsionaram a indústria, fazendo com que a ciência dos materiais avançasse em busca de novos recursos e métodos de fabricação. Com a Revolução Industrial, novos e mais resistentes materiais apareceram, impulsionando o desenvolvimento dos aços-liga como ferramentas de corte (MACHADO *et al.*, 2011).

Tais ferramentas de corte são amplamente utilizadas na indústria, principalmente na usinagem, entretanto, mesmo com ligas metálicas de características específicas aplicadas às ferramentas, processos de usinagem convencionais não suprem todas as atividades que a indústria necessita. Seja pelo custo, pela quantidade de peças e/ou pelo tempo, a tecnologia evoluiu ao longo dos anos e processos de usinagem não convencionais ganharam espaço.

A usinagem por descargas elétricas, ou EDM (*Electrical Discharge Machinig*), ou, como é conhecida ainda na indústria, usinagem por eletroerosão, é um processo indicado na usinagem de formas complexas em materiais condutores elétricos. (CRUZ, 1999 apud ARANTES *et al.*, 2003).

Recurso muito utilizado principalmente na indústria fabricante de moldes, porém existem poucas informações sobre como os materiais se comportam quando submetidos às altas temperaturas impostas pela descarga elétrica da máquina.

Isto posto, o presente trabalho tem como objetivo realizar uma análise microestrutural de aços AISI H-13 e AISI 1045 submetidos a usinagem por descargas elétricas em regimes de desbaste e acabamento, comparando a zona termicamente afetada destes materiais em consequência do processo.

MATERIAL E MÉTODOS

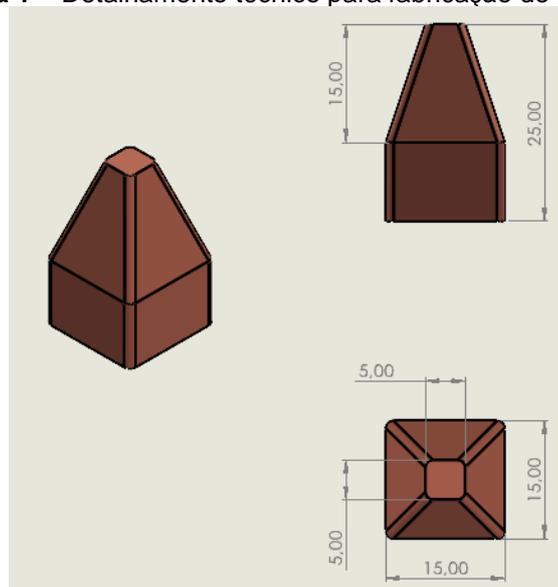
Para a realização deste trabalho foram utilizados materiais, ferramentas, máquinas e equipamentos laboratoriais de análise metalográfica. Teses de doutorado e artigos científicos serviram de embasamento teórico para a idealização do projeto.

Existem diversos métodos de usinagem considerados não tradicionais, como o corte a laser, corte a plasma, usinagem por ultrassom, entre outros, porém a fabricação de componentes com determinadas geometrias, de alta precisão e com dimensões pequenas, é possível a partir da eletroerosão, também conhecida como EDM (*Electrical Discharge Machining*). Apenas materiais condutores elétricos podem ser submetidos ao método, sendo possível a criação de ranhuras, furos e superfícies,

nas formas mais complexas. A literatura apresentou que existem dois métodos de usinagem por descargas elétricas que se diferenciam principalmente no formato e movimentos da ferramenta e, conseqüentemente, no modelo de máquina empregada: eletroerosão por penetração e eletroerosão a fio. A segunda funcionando com uma espécie de corte, onde o fio é passado por entre a peça e preso entre duas polias, realizando o movimento contínuo, eliminando o material pela fusão em altas temperaturas e permitindo a criação de variadas geometrias com precisão milimétrica. A máquina de eletroerosão a fio também possui comando numérico e existem equipamentos de até sete eixos, permitindo a criação de perfis extremamente complexos (MOREIRA; COELHO, 2009).

A eletroerosão por penetração foi a máquina utilizada para a fabricação dos objetos estudados neste trabalho. Com ela, obteve-se êxito em executar a usinagem de cavidades em formato piramidal em dois tipos de materiais diferentes, aço AISI 1045 e aço AISI H-13. A ferramenta formadora da cavidade é conhecida como eletrodo, comumente manufaturada em cobre ou grafite, mas que neste trabalho optou-se pelo primeiro elemento. O formato de pirâmide escolhido se deve ao fato da necessidade de se obter uma superfície de estudo homogênea em relação ao sentido de execução da usinagem. A máquina utilizada trabalha com movimentos em um único eixo, vertical, e a cavidade possuindo tal formação contribuiu para que o resultado superficial da peça se mantivesse verticalmente e horizontalmente.

Figura 1 – Detalhamento técnico para fabricação do eletrodo



Fonte: Próprios autores

A Figura 1 apresenta o projeto do eletrodo idealizado em um software de desenho CAD (Computer Aided Design). Executou-se a fabricação da ferramenta utilizando um método de usinagem tradicional, o fresamento, em uma máquina CNC. Todos os processos de fabricação, tanto da ferramenta quanto dos blocos de aço, foram obtidos na planta fabril da empresa Trimetal Máquinas para Baterias, que gentilmente permitiu a utilização de seu ferramental e doou os materiais necessários. A ferramenta recém-fabricada é apresentada na Figura 2.

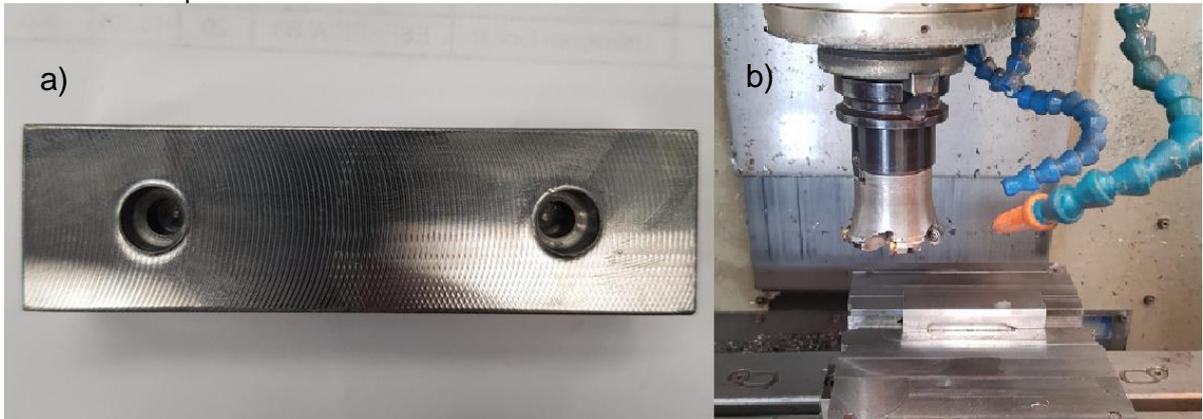
Figura 2 – Eletrodo finalizado em cobre



Fonte: Próprios autores

Após a obtenção do eletrodo em cobre, deu-se início a manufatura dos blocos em aço AISI 1045 e AISI H-13. A Figura 3 mostra detalhes de execução e os produtos fresados, prontos para serem encaminhados para a eletroerosão, com furações feitas para acelerar o tempo de trabalho das descargas elétricas.

Figura 3 – a) Modelo final de bloco usinado por fresamento; b) Bloco no momento da usinagem na máquina



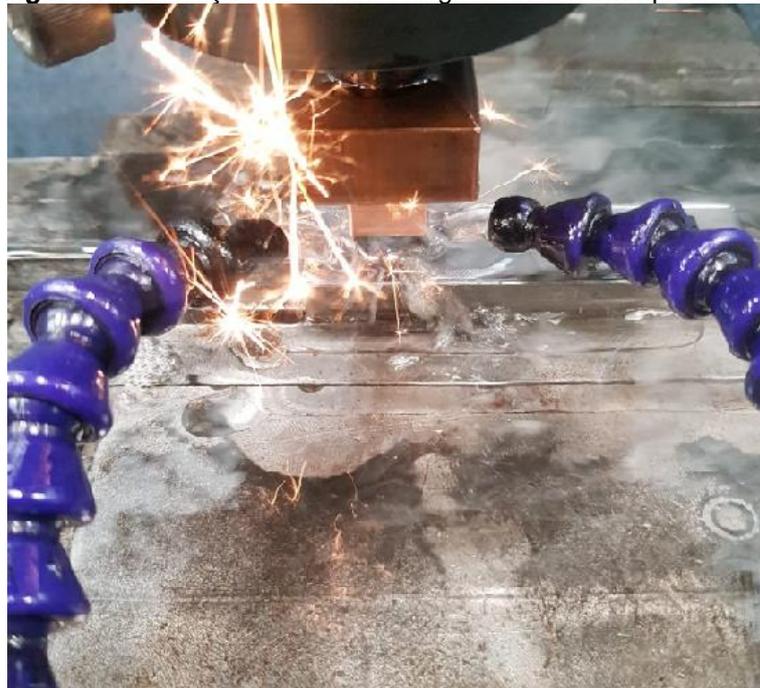
Fonte: Próprios autores

Ambos os materiais tiveram o mesmo formato após a usinagem, 90 mm de comprimento, 25 mm de largura e 25 mm de espessura, com espaço entre cavidades de 55 mm.

A máquina de EDM utilizada para o processo é da marca Suprasonic, modelo SS ZNC 50A, ou seja, o movimento no eixo Z é executado pelo sistema de comando numérico, e a máquina possui uma amperagem máxima de 50 amperes.

A Figura 4 apresenta o bloco de aço no momento exato da execução da descarga elétrica.

Figura 4 – Execução de uma descarga elétrica na máquina de EDM



Fonte: Próprios autores

Foram utilizadas duas rotinas de programação para a execução das cavidades em cada bloco, uma de desbaste, possuindo uma severidade nas descargas elétricas, outra de acabamento, resultando em uma rugosidade mais baixa e um regime mais brando de trabalho.

Figura 5 – Detalhes da programação: a) regime de desbaste; b) regime de acabamento



Fonte: Próprios autores

Observa-se na Figura 5 as variações de configuração da máquina quando se busca um acabamento de alta qualidade na peça usinada. Outro detalhe é o tempo

de trabalho, que no desbaste foi de aproximadamente 34 minutos por cavidade e no acabamento o tempo decorrido foi de 2 horas e 40 minutos.

Quadro 1 – Parâmetros utilizados no processo de EDM no regime de desbaste

PROG.	PROF.	L.V.	T-ON	T-OFF	GAP	H.V.	TEMP.	UP1	UP2
1	15.000	25	400	40%	1	3	6	0	6

O Quadro 1 apresenta os parâmetros utilizados para o regime de desbaste dos componentes.

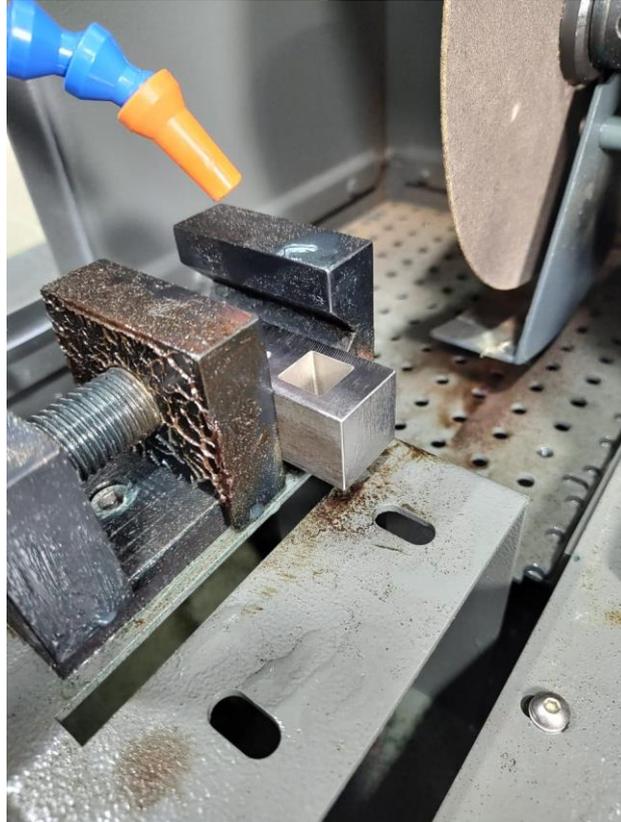
Quadro 2 – Parâmetros utilizados no processo de EDM no regime de acabamento

PROG.	PROF.	L.V.	T-ON	T-OFF	GAP	H.V.	TEMP.	UP1	UP2
1	0.100	2	80	80%	3	2	6	0	1
2	0.200	5	120	60%	2	3	8	0	1
3	0.500	7	180	40%	2	3	10	0	1
4	14.500	10	300	40%	1	3	10	0	6
5	14.700	6	150	60%	2	3	8	0	6
6	14.800	5	120	60%	2	2	8	0	6
7	14.900	4	100	80%	2	2	8	0	6
8	14.940	3	80	100%	2	2	8	0	6
9	14.970	2	70	150%	2	2	6	0	6
10	15.000	1	50	150%	3	1	4	0	6

No Quadro 2 pode-se observar que no regime de acabamento o programa necessita de mais linhas de parâmetros para se alcançar uma superfície de baixa rugosidade no processo de EDM.

Com o processo de EDM concluído, o próximo passo era cortar as peças com auxílio da serra metalográfica no laboratório de metalografia da UNIFIO. Pequenas amostras para serem embutidas (Figura 6).

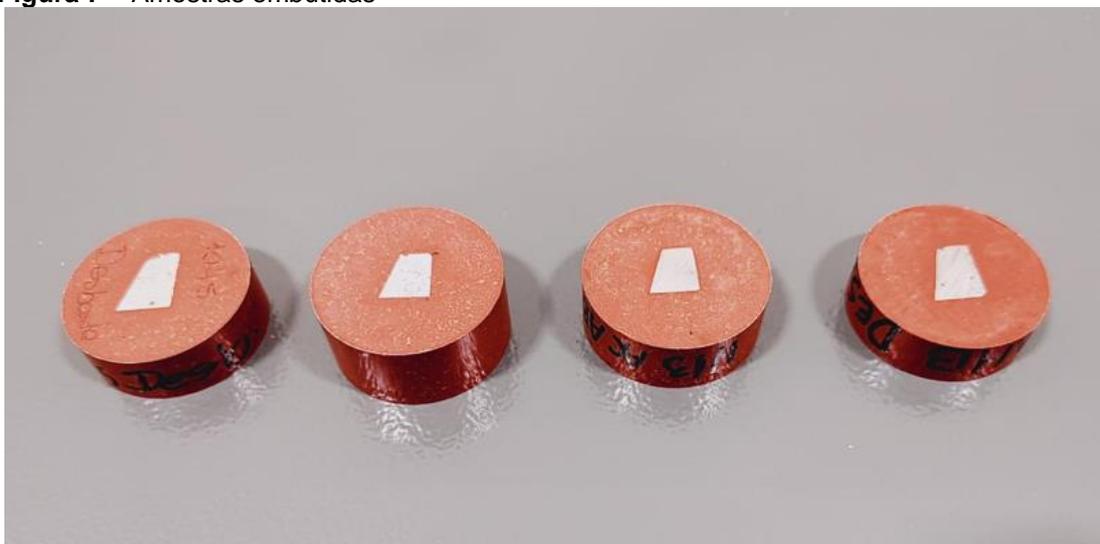
Figura 6 – Detalhe interno da serra metalográfica com a peça pronta para ser cortada



Fonte: Próprios autores

Embutiu-se quatro partes de material, uma para cada regime de usinagem de acordo com o metal: AISI 1045 desbaste, AISI 1045 acabamento, AISI H-13 desbaste e AISI H-13 acabamento. Utilizou-se uma máquina embutidora Fortel digital.

Figura 7 – Amostras embutidas



Fonte: Próprios autores

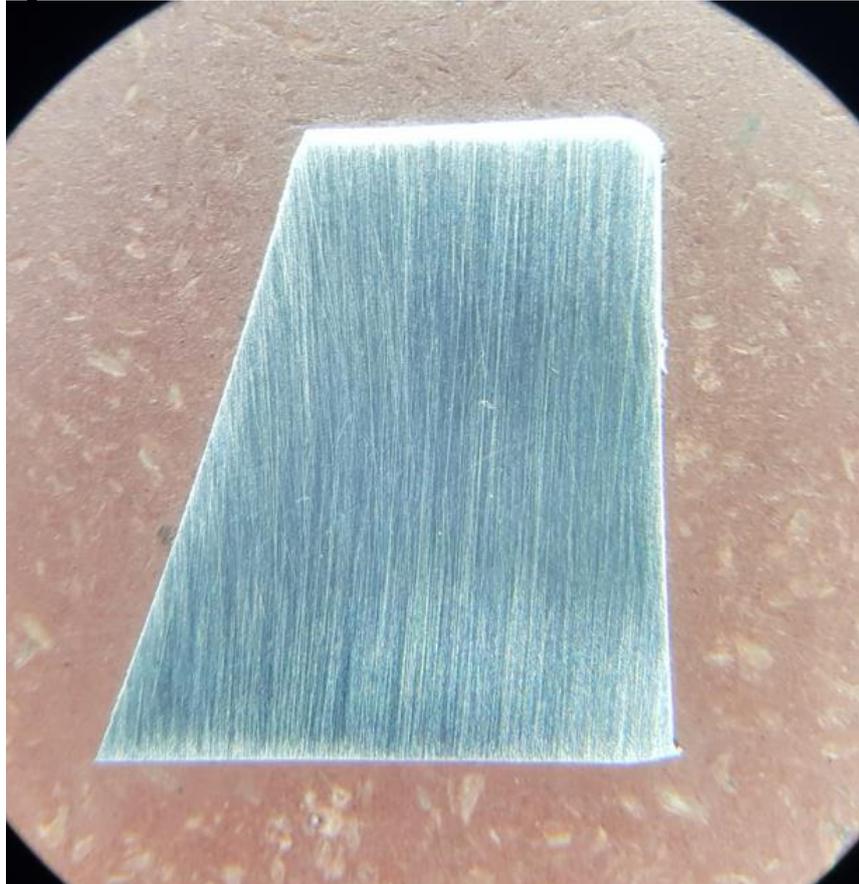
Com as amostras da Figura 9 prontas, deu-se início ao processo de lixamento, sendo a primeira lixa para se obter uma homogeneidade na face de estudo. A politriz da marca Fortel foi utilizada para este procedimento.

Após o primeiro lixamento na máquina politriz, os demais foram feitos na bancada de lixamento irrigados com água, com intuito de preservar a estrutura cristalina resultante da eletroerosão, sem que o calor proveniente do lixamento possa comprometer os resultados.

A sequência de granulometria de lixas foi: 120, 180, 200, 240, 300, 400, 600, 800, 1200, 1500 e 2000.

Após o último lixamento, os componentes voltaram a ser analisados em microscópio para avaliar riscos superficiais resultantes, como exemplifica a Figura 8.

Figura 8 – Riscos residuais do lixamento em uma das amostras



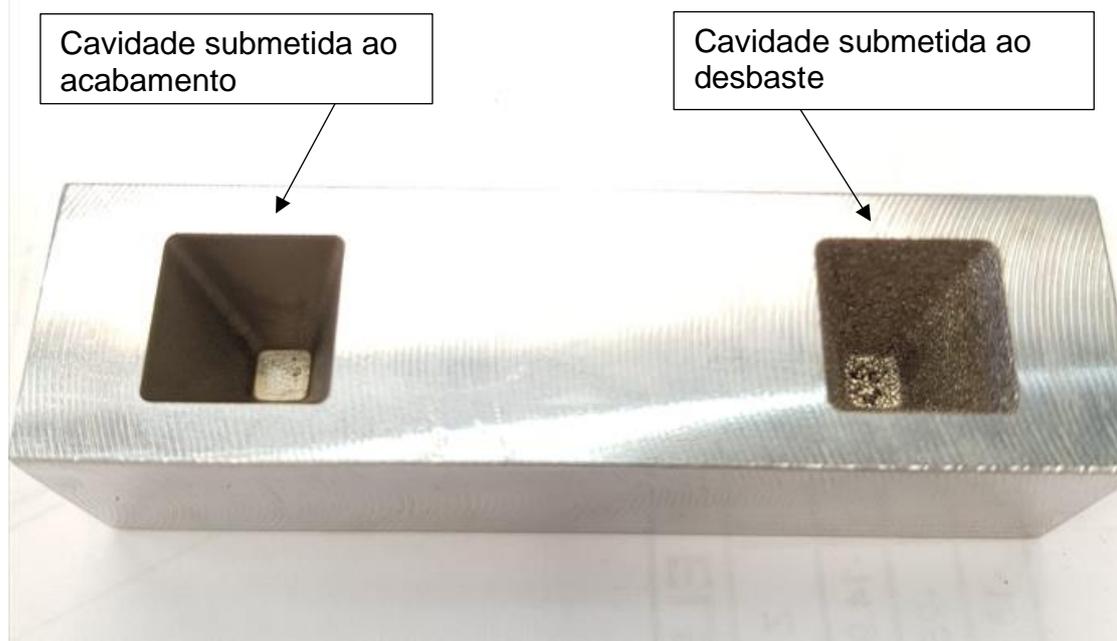
Fonte: Próprios autores

Um ataque químico com Nital 4%, precisou ser feito para que a estrutura do material polido fosse revelada para a análise em microscópio metalográfico.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Apesar de existirem diversos fabricantes e modelos de máquinas de eletroerosão, os parâmetros básicos para o processo se assemelham independente do dispositivo utilizado.

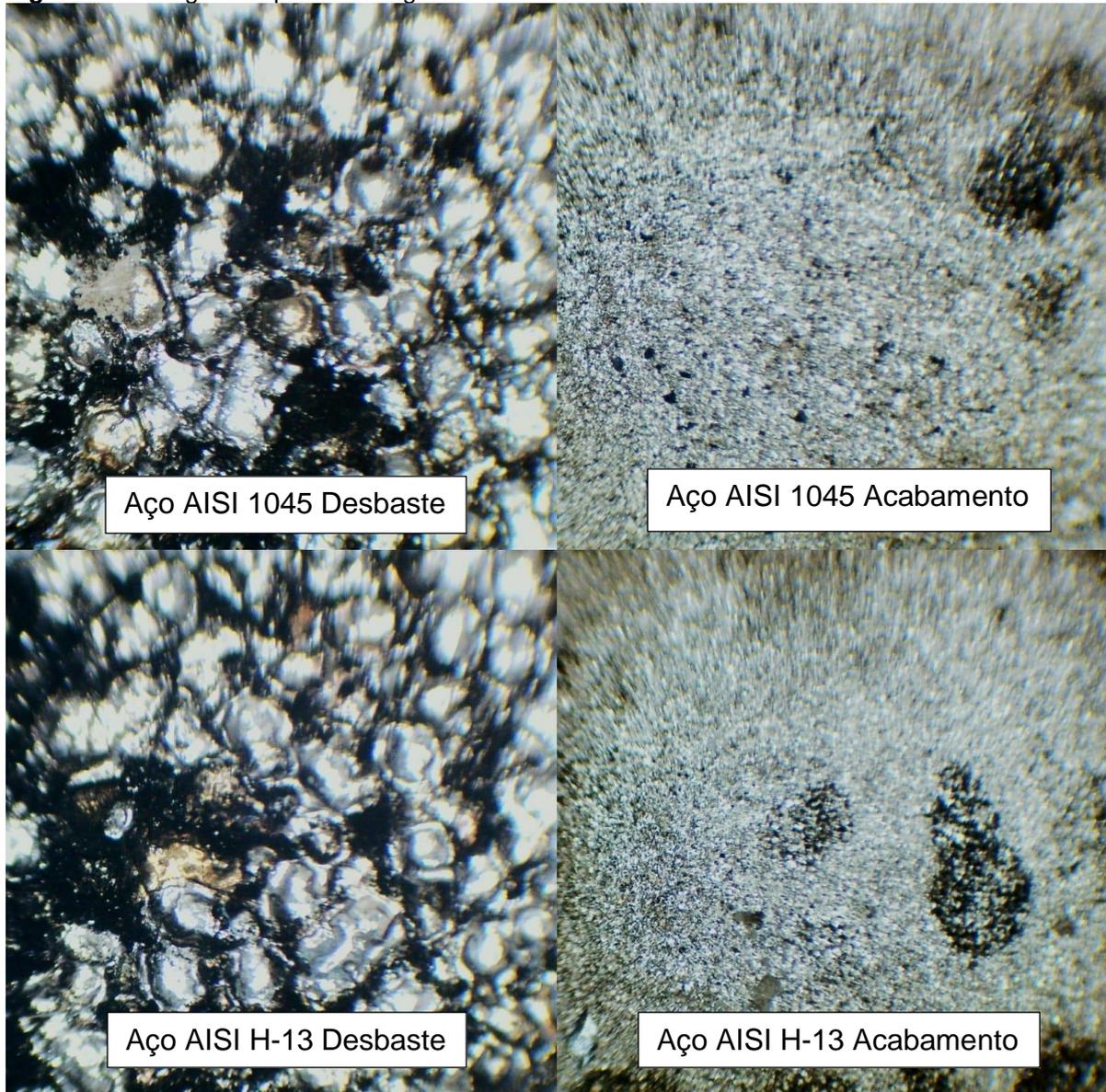
Figura 9 – Peça pronta para corte



Fonte: Próprios autores

Visualmente, as duas peças apresentaram rugosidade distintas. Tais detalhes foram evidenciados com auxílio do microscópio metalográfico do laboratório da UNIFIO, como mostram as Figuras 9 e 10.

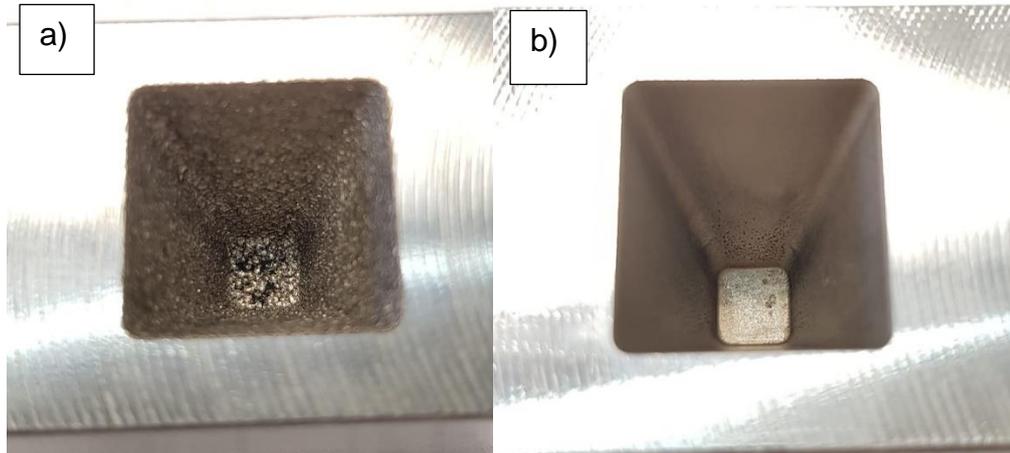
Figura 10 – Imagem ampliada da rugosidade



Fonte: Próprios autores

Nota-se na Figura 10 que o resultado superficial de rugosidade não teve disparidade em relação aos aços. Observa-se, também, a formação de crateras maiores em regime de desbaste, e tons de cor que são resultado da fusão do cobre do eletrodo em contato com o aço.

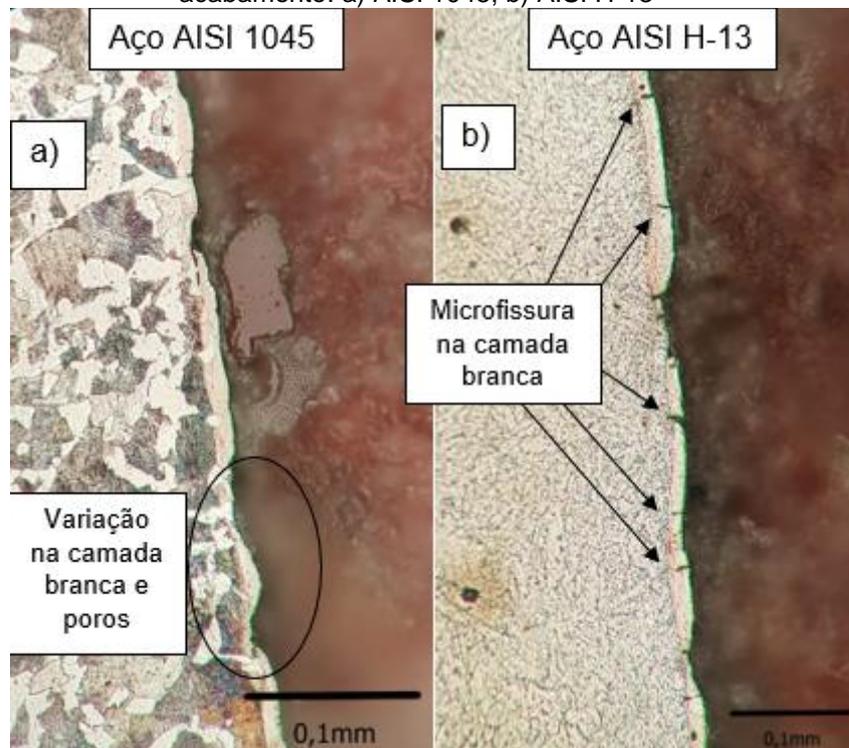
Figura 11 – Cavidades usinadas pela eletroerosão: a) desbaste com alta formação de poros; b) acabamento com baixa formação de poros



Fonte: Próprios autores

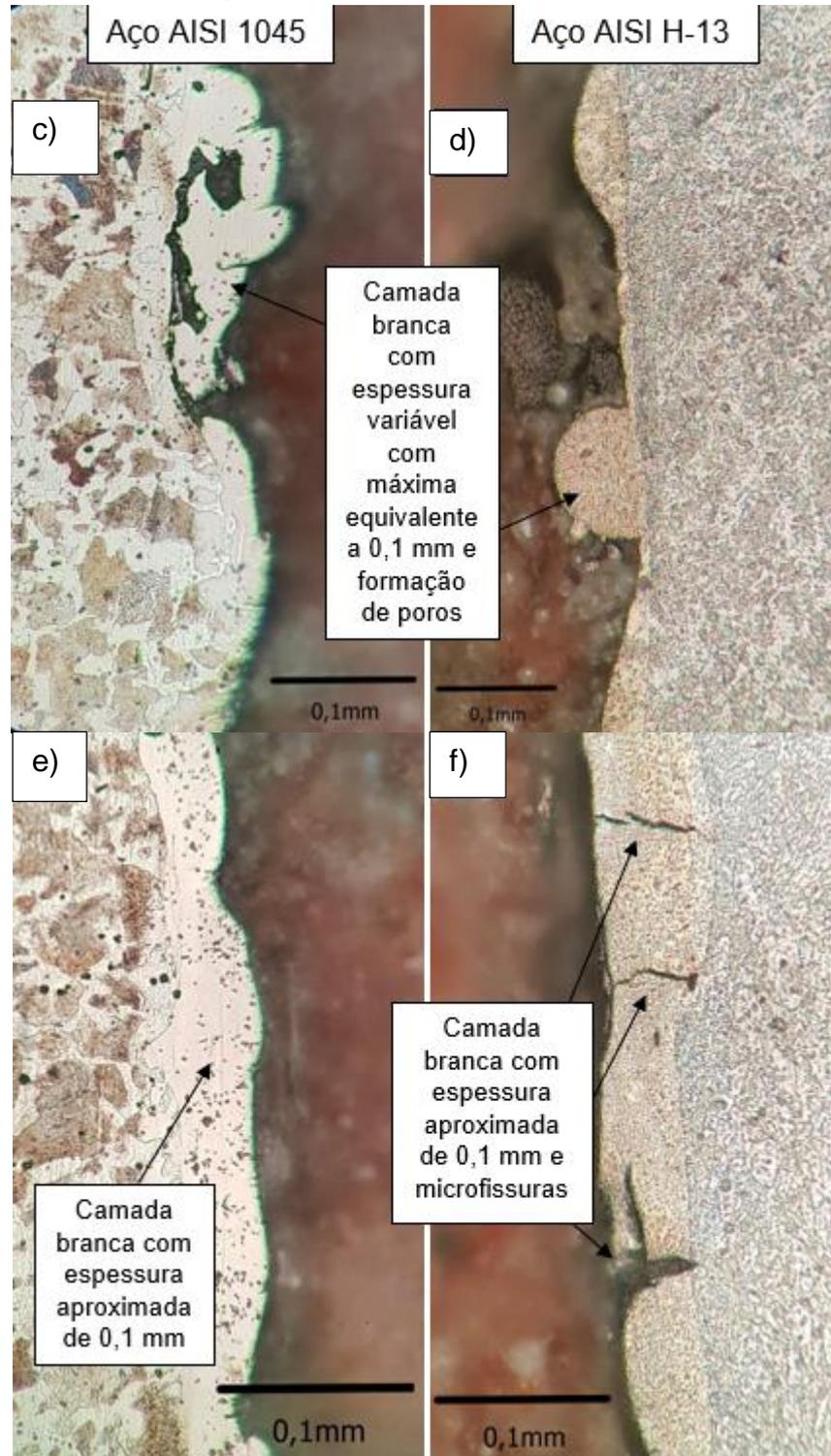
O resultado superficial a olho nu, se mantém idêntico no aço AISI 1045 e no aço AISI H-13. A diferença aparece quando a análise é feita na observação da microestrutura dos componentes devidamente preparados, como visto na Figura 12.

Figura 12 – Comparação dos resultados microestruturais no regime de acabamento: a) AISI 1045; b) AISI H-13



Fonte: Próprios autores

Figura 12 – Comparação dos resultados microestruturais no regime de desbaste: c) AISI 1045; d) AISI H-13; e) AISI 1045; f) AISI H-13



Fonte: Próprios autores

Ao se analisar as amostras no microscópio metalográfico, observou-se que as imperfeições resultantes da usinagem por EDM variam de um regime para outro e entre os aços.

O ciclo térmico na qual os materiais são expostos durante a usinagem resultaram em um surgimento da camada branca, visível somente em escala microscópica. Podem ser vistos outros tipos de intercorrências como trincas, poros, crateras, variações na espessura da camada branca e a variação no surgimento de trincas entre o aço AISI 1045 e AISI H-13.

Ramos (2016), explica que a camada branca é resultado do ciclo térmico na qual o material é exposto durante o processo de eletroerosão, sendo aquecido a temperaturas elevadas e imediatamente resfriado pelo óleo dielétrico. Ramos (2016) expõe também que as maiores tensões residuais estão presentes na camada branca, que possui maior dureza e, conseqüentemente, pode apresentar microfissuras.

CONCLUSÃO

Conclui-se que um processo mais severo de usinagem por EDM pode ocasionar microfissuras nos materiais por consequência da fadiga térmica na qual o metal é exposto. A camada branca resultante na superfície está sujeita à variação de espessura com surgimento de poros e crateras provenientes da alta taxa de remoção de material durante a usinagem.

No processo de acabamento, a camada branca diminui de espessura em ambos os metais observados, porém as falhas e poros ainda aparecem nas imagens metalográficas.

REFERÊNCIAS

AGIE CHARMILLES. **Máquina de eletroerosão a fio**. 1 fotografia. Disponível em: <https://www.gfms.com/content/dam/gfms/pdf/edm/wire-cut/cut-x000/en/GF%20MS-Brochure%20CUT%20X-EN.pdf>. Acesso em: 29 março 2023.

AMORIM, Fred L. **Tecnologia de eletroerosão por penetração da liga de alumínio AMP 800 e da liga de cobre CuBE para ferramentas de moldagem de materiais plásticos**. Junho 2002. 175f. Tese de doutorado – Universidade Federal de Santa Catarina, 2002.

ARANTES, Luciano J. **Avaliação do desempenho de fluidos dielétricos no processo de usinagem por descargas elétricas**. Dezembro de 2001. 67f. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2001.

ARANTES, Luciano J. *et al.* Avaliação de superfícies usinadas por diferentes fluidos dielétricos no processo de usinagem por eletroerosão. **Revista escola Minas**, Ouro Preto, n. 56, p. 91-96, 2003.

AZEVEDO, Cesar R. F.; CAMPOS, Beatriz A. **BREVE HISTÓRIA DA METALOGRAFIA**. 2007. Laboratório de Caracterização Microestrutural Prof. Hubertus Colpaert, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2007.

BARCELOS, Eduardo J. B. V.; FILHO, Francisco A.; CUNHA, Ricardo C. **METALOGRAFIA QUANTITATIVA AUTOMÁTICA. ALGUMAS APLICAÇÕES**. 1976. Instituto de Energia Atômica. São Paulo, 1976.

BORTOLOTTI, Felipe C. **Análise da influência dos parâmetros do processo de eletroerosão por penetração sobre o tempo de processo e qualidade superficial da peça**. 2019. 56f. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado) – Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2019.

BRUNATTO, Silvio F. **Introdução ao estudo dos aços**. 21f. 2016.

CANADIAN METALWORKING. **Understanding the power of wire EDM**. 1 fotografia. Disponível em: <https://www.canadianmetalworking.com/canadianmetalworking/article/metalworking/understanding-the-power-of-wire-edm>. Acesso em: 29 março 2023.

CANÇADO, Roberta B. L. **Efeito das condições de têmpera e revenimento na dureza e na microestrutura dos aços AISI H-11 e AISI H-13 empregados para trabalho a quente**. 2018. 72f. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.

CRUZ, Claudionor; SILVA, Evaldo M. da; FERNANDES, Luciano A. **Introdução à usinagem não tradicional: Um texto para cursos de graduação em Engenharia**. Maio 1999. 51f. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 1999.

DESCRIÇÃO dos aços segundo a sua composição química. Rio Grande do Sul: Instituto Federal Sul-Rio-Grandense. 4 p.

FAORO, Giovanni. **Avaliação da qualidade superficial do aço AISI H-13 após processo de eletroerosão por penetração**. 2019. 71f. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado) – Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2019.

GGD METALS. **GGD H-13**. Disponível em: <https://www.ggdmetals.com.br/produto/aisi-h13/>. Acesso em: 3 abril 2023.

ITO, Hamilton L. **Metalografia faz 100 anos no Brasil**. 2007. Laboratório de Equipamentos Mecânicos e Estruturas do Centro de Integridade de Estruturas e Equipamentos Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT. São Paulo, 2007.

IVANISKI, Thiago M. Avaliação da integridade do material AISI H-13 após usinagem por eletroerosão EDM. XXIII Encontro de Jovens Pesquisadores / V Mostra Acadêmica de Inovação e Tecnologia, 2015. Caxias do Sul. **Proceedings...** Caxias do Sul, 2015.

IVANISKI, Thiago M. *et al.* Integridade superficial do aço AISI H-13 usinados por EDM na fabricação de matrizes de conformação a quente. 71º CONGRESSO ANUAL DA ABM – INTERNACIONAL / 16º ENEMET, 2016. Rio de Janeiro. **Proceedings...** Rio de Janeiro: ABM Week, 2016.

LEITE, Matheus C. *et al.* ENSAIO DE TRAÇÃO MECÂNICA E ANÁLISE METALOGRÁFICA DO AÇO SAE 1045. **Revista Engenharia em Aço UniToledo**. Araçatuba, SP, v. 02, n. 01, p. 83-93, jan./ago. 2017.

MACHADO, Álisson R. *et al.* Introdução à teoria da usinagem dos materiais. **Teoria da usinagem dos materiais**. 2 ed. São Paulo: Blucher, 2011.

MOLDES INJEÇÃO PLÁSTICOS. **Peça e eletrodo de EDM**. 2 fotografias. Disponível em: <http://moldesinjecaoplasticos.com.br/processos-de-eletroerosao/>. Acesso em: 28 março 2023.

MOREIRA, Flávio C.; COELHO, Prof. Dr. Reginaldo T. **Introdução aos métodos não-convencionais de fabricação**. USP, Departamento de Engenharia de Produção, São Carlos, 2009.

OLIVEIRA, Claudia S. de; DENTI, Guilherme B. **Avaliação da tenacidade ao impacto da região revenida pelo passe duplo em soldagem smaw do aço aisi 1045**. 2007. 48f. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2007.

RELIABLE EDM. **About wire EDM**. 1 fotografia. Disponível em: <https://reliableedm.com/wire-edm.php>. Acesso em: 29 março 2023.

ROHDE, Regis A. **METALOGRAFIA PREPARAÇÃO DE AMOSTRAS: Uma abordagem pratica**. Santo Ângelo, 2010.

SILVA, Anderson M. da. **Análise do processo de usinagem eletroquímica**. Dezembro 2011. 57f. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado) – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Panambi, 2011.

SILVEIRA, Michele L. **Avaliação da integridade superficial do aço ABNT H-13 submetido à operação de fresamento frontal**. Fevereiro 2021. 187f. Tese de doutorado – Universidade Federal de Minas Gerais, 2021.

VIECELLI, Alexandre. **Laboratório de Materiais e Metalografia**. UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL. Caxias do Sul, 2008.