



Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

**INFLUÊNCIA DO MATERIAL DA PEÇA E DO
TRATAMENTO TÉRMICO NA ELETROEROSÃO DOS
AÇOS AISI H13 E AISI D6**

Rogério Felício dos Santos

**Belo Horizonte
2007**

Rogério Felício dos Santos

**INFLUÊNCIA DO MATERIAL DA PEÇA E DO TRATAMENTO TÉRMICO
NA ELETROEROSÃO NOS AÇOS AISI H13 E AISI D6**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciências em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Wisley Falco Sales, Dr.

Co-Orientador: Prof. Ernani Sales Palma, Dr. – Ing.

Belo Horizonte

2007

FICHA CATALOGRÁFICA
Elaborada pela Biblioteca da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

S237i Santos, Rogério Felício dos
Influência do material da peça e do tratamento térmico na eletroerosão dos
aços AISI H13 e AISI D6 / Rogério Felício dos Santos. Belo Horizonte, 2007.
122p.

Orientador: Wisley Falco Sales
Co-orientador: Ernani Sales Palma
Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

1. Usinagem por eletroerosão. 2. Aço para ferramentas. 3. Materiais –
Remoção – Taxas. I. Sales, Wisley Falco. II. Palma, Ernani Sales. III. Pontifícia
Universidade Católica de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica. IV. Título.

CDU: 621.7

Rogério Felício dos Santos

Influência do Material da Peça e do Tratamento Térmico na Eletroerosão dos Aços AISI H13 e AISI D6

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciências em Engenharia Mecânica.

Belo Horizonte, 2007.

Prof. Wisley Falco Sales, Dr. (Orientador) – PUC Minas

Prof. Ernani Sales Palma, Dr – Ing. (Co-Orientador) – PUC Minas

Prof. Marcelo Becker, Dr. (Membro Interno) – PUC Minas

Prof. Alexandre Mendes Abrão, PhD. (Membro externo) – UFMG

A Deus,
aos meus pais, Felício Timóteo dos Santos e
Terezinha de Jesus Santos,
à minha esposa, Sandra Santos Barbaro dos Santos,
aos meus filhos, Arthur e Bárbara,
à minha família,
a todos meus amigos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Professor Wisley Falco Sales pelo apoio e pela orientação neste trabalho.

Ao Professor Ernani Sales Palma pela dedicação e co-orientação na dissertação.

Ao Professor José Rubens Gonçalves Carneiro pelos ensinamentos em Metalurgia Física e em Tratamentos Térmicos.

Ao Professor Marcelo Becker pelas orientações na apresentação e pela formatação do pré-projeto.

À FAPEMIG – Fundo de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais pela disponibilização de recursos do Projeto TEC 798/2005 para o desenvolvimento deste projeto.

Ao amigo Ernane Rodrigues da Silva pelo companheirismo e pela ajuda nos testes experimentais e nas análises estatísticas dos resultados.

À Secretária do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da PUC Minas, Valéria Aparecida Gomes, e à estagiária, Letícia da Anunciação Silva, pela ajuda e apoio recebidos.

Aos Técnicos dos laboratórios e das oficinas da PUC Minas, Carlos Eduardo dos Santos, Leandro César da Silva, Marceline Nardi Torrecilhas, Misael Fernandes Barbosa, Pedro Kapler, Roberto Moura Lara e Vinícius Maia de Sá, presentes em vários momentos.

Aos professores e funcionários da Coordenação do Curso Técnico de Mecânica do CEFET MG, em especial ao Prof. Ivan José de Santana, pela confiança depositada.

Ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais pela concessão da bolsa parcial para o custeio destes estudos.

Aos colegas de aula que cursaram as disciplinas do mestrado, principalmente aos alunos Joel Lima e Claudinei José de Oliveira.

À Professora Alcione Gonçalves, que colaborou na revisão do texto.

Aos Professores, Elaine Carballo Siqueira Corrêa e Sidnei Nicodemos da Silva, pelas preciosas ajudas nos testes e nas informações metalográficas.

À Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais – CETEC – pela ajuda nas medições de microdureza das amostras, em especial à Prof.^a Dr.^a Cynthia Serra Batista Castro e às Técnicas de Laboratório, Elaine dos Reis e Rita de Cássia dos Santos Ribeiro.

Ao Centro de Desenvolvimento de Tecnologia Nuclear – CDTN, em especial ao Técnico Eduardo Antônio de Carvalho pela ajuda nas investigações com o MEV.

Ao CNPQ – Centro Nacional de Pesquisas – pelo apoio e pelo fornecimento de recursos para aquisição de materiais.

Enfim, agradeço a todos que, de alguma forma, ajudaram na realização deste trabalho.

RESUMO

O objetivo deste trabalho é avaliar a influência das propriedades do material da peça e do tratamento térmico na usinagem por eletroerosão do aço ferramenta para trabalho a quente, AISI H13, e do aço ferramenta para trabalho a frio, AISI D6. Cada aço estudado foi submetido aos tratamentos térmicos de normalização e de beneficiamento. Foram investigadas as integridades superficiais, como os defeitos na zona resolidificada, e também a taxa de remoção de material e o desgaste dos eletrodos, com variação de parâmetros do processo, como frequência e corrente elétrica. A integridade superficial das peças usinadas foi avaliada por meio de análises de rugosidade, micrografias, utilizando microscopia ótica e eletrônica de varredura, e microdureza. Além disso, foram monitoradas a taxa de remoção de material e a relação de desgaste das peças submetidas a eletroerosão. Os resultados mostraram que o aço AISI D6 apresentou melhor desempenho do que o AISI H13, enquanto que o tratamento térmico pouco influenciou no processo de EDM para os dois aços.

Palavras-chave: Eletroerosão, Aço-ferramenta, Taxa de remoção de material, Zona resolidificada.

ABSTRACT

The goal of this work is to evaluate the influence of material workpiece properties and of heat treatment in the electrical discharge machining (EDM) of two commercial steels: AISI H13 (for hot work) and AISI D6 (for cold work). Both steels were submitted to two heat treatments: normalizing and quenching followed by tempering. The influences of process parameters, frequency and electric current on surface integrity (as the damages in the recast layer), material removal rate and on electrode wear were investigated. Measurements and observations of roughness, micrographs, using optical and scanning electronic microscopy, and microhardness for EDMed samples were evaluated. Moreover, material removal rate and tool wear were monitored. The results showed that the AISI D6 steel presented better performance than the AISI H13. Besides, the influence of heat treatment on the process of EDM for both steels was not significant.

Key words: Electrical discharge machining, Tool steel, Material removal rate, Recast layer.

LISTA DE SÍMBOLOS

\hat{U}_i - tensão em aberto;	[V]
U_e - tensão média da descarga;	[V]
U - tensão média de trabalho durante a usinagem;	[V]
t_d - tempo de retardo de ignição da descarga;	[μ s]
t_e - duração da descarga;	[μ s]
t_i - duração do pulso de tensão ($t_d + t_e$)	[μ s]
t_o - duração do intervalo entre duas sucessivas descargas;	[μ s]
t_p - duração do período do ciclo de uma descarga;	[μ s]
\hat{I}_e - corrente máxima durante a descarga;	[A]
\bar{I}_e - corrente média durante a descarga;	[A]
V_w - Taxa de Remoção de Material	[mm ³ / min]
TS - Densidade de Corrente Média	[A]
R_a - Média Aritmética das Rugosidades	[μ m]
R_z - Média Aritmética dos cinco valores da Rugosidade Parcial	[μ m]

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 Justificativa	15
1.2 Objetivos	16
2 ESTADO DA ARTE	17
2.1 Usinagem	17
2.1.1 Qualidade da superfície usinada	19
2.2 Eletroerosão	20
2.2.1 Material do eletrodo-peça	33
2.2.2 Materiais para eletrodos-ferramenta	42
2.2.3 Fluidos dielétricos	45
3 METODOLOGIA	47
3.1 Material do eletrodo-peça	48
3.2 Máquina de eletroerosão	53
3.3 Eletrodo-ferramenta	55
3.4 Parâmetros de usinagem	58
3.5 Avaliação da topografia das peças eletroerodidas	59
3.6 Análise micrográfica	60
3.7 Análise de microdureza	63
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	64
4.1 Variação do material do eletrodo-peça	64
4.1.1 Remoção de material do eletrodo-peça	64
4.1.2 Remoção de material do eletrodo-ferramenta	69
4.1.3 Taxa de remoção de material	73
4.1.4 Desgaste do eletrodo-ferramenta	75
4.1.5 Relação de desgaste	78
4.2 Variação do tratamento térmico	80

4.2.1 Remoção de material do eletrodo-peça	80
4.2.2 Remoção de material do eletrodo-ferramenta	85
4.2.3 Taxa de remoção de material	89
4.2.4 Desgaste do eletrodo-ferramenta	91
4.2.5 Relação de desgaste	94
4.3 Rugosidade	97
4.3.1 Variação do material do eletrodo-peça	97
4.3.1.1 <u>Rugosidade média aritmética R_a</u>	98
4.3.1.2 <u>Rugosidade R_z</u>	100
4.3.2 Variação do tratamento térmico	102
4.3.2.1 <u>Rugosidade média aritmética R_a</u>	102
4.3.2.2 <u>Rugosidade R_z</u>	104
4.4 Micrografia	107
4.5 Caracterização topográfica	112
4.6 Microdureza	120
5 CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	125
5.1 Conclusão	125
5.2 Sugestões para trabalhos futuros	127
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	128

1 INTRODUÇÃO

Os processos não tradicionais de fabricação de peças têm sido amplamente utilizados pelas indústrias e pelos laboratórios de pesquisa, principalmente para atender à demanda de construção de peças de alta complexidade e de materiais de difícil usinabilidade. Os processos que são considerados não tradicionais são, entre outros, usinagem eletroquímica, usinagem por eletroerosão por penetração e a fio, usinagem por fluxo abrasivo, usinagem por jato de água e jato de água abrasivo, usinagem ultrasônica, etc. Todos esses processos têm suas vantagens e desvantagens. A escolha vai depender de inúmeros fatores, como disponibilidade de equipamentos, custos operacionais e de manutenção e mão-de-obra qualificada (MCGEOUGH, 1988). Ao longo dos últimos anos, o processo de usinagem por fresamento tem se destacado como um dos mais utilizados na confecção de matrizes e de moldes metálicos. As pesquisas sobre novos materiais e revestimentos têm proporcionado a utilização de ferramentas de corte cada vez mais eficientes, com possibilidade de grandes remoções de material em altíssimas velocidades. Também é válido destacar que as máquinas operatrizes vêm sofrendo inúmeras modificações tecnológicas, como o uso do comando numérico computadorizado, motores de alta velocidade e de baixo consumo de energia e estruturas mais estáveis e rígidas. Acabamentos superficiais, com rugosidades cada vez menores e integridades superficiais, são conseguidos com a combinação de parâmetros de corte como velocidade de corte, avanços e profundidades. Como exemplo, a figura 1 mostra o centro de usinagem ROM, I modelo Discovery 560, com comando numérico computadorizado, pertencente ao Laboratório de Usinagem da PUC Minas.



Figura 1 – Centro de usinagem marca ROMI Bridgeport Discovery 560.

Um dos problemas encontrados nesse processo é o corte de materiais extremamente duros, principalmente no caso de aços submetidos ao beneficiamento. Essa elevada dureza da peça pode comprometer a vida da ferramenta, causando-lhe inúmeros defeitos que afetam diretamente no acabamento e na forma geométrica da peça, na rugosidade e na precisão dimensional. Trocas de ferramentas de corte danificadas, durante o processo, prejudicam a usinagem, aumentam os custos e atrasam a produção (GUITRAU, 1997). Mesmo com o uso de ferramentas de corte eficientes para esse aço, ocorrem transformações metalúrgicas e interações químicas que modificam a superfície, provocando alterações micro estruturais como a formação da camada branca. Na figura 2, mostra-se uma matriz usinada no centro de usinagem ROMI dos laboratórios de fabricação da PUC Minas.



Figura 2 – Matriz fabricada pelo processo de usinagem, em aço AISI H13.

Outro processo também bastante utilizado na fabricação de matrizes é a usinagem por eletroerosão, EDM, que consiste na remoção de material pelo bombardeamento de elétrons ou íons contra a superfície da peça, produzindo a retirada dos resíduos por sublimação, gerando cavidades profundas e tridimensionais. A usinagem pode ser feita em qualquer material condutor elétrico, em operações de desbaste e de acabamento. De acordo com a teoria da eletroerosão, as propriedades mecânicas da peça e do eletrodo, que é a ferramenta de corte, têm pouca influência no desempenho desse processo. No entanto, as propriedades termofísicas, como a condutividade térmica e elétrica, a expansão térmica, a temperatura de fusão e de ebulição, influenciam consideravelmente no processo. Escolha do material do eletrodo, polaridade, corrente e pulsação são parâmetros significativos que influenciam na taxa de remoção de material e no acabamento superficial. Também em eletroerosão, ocorrem defeitos e falhas, principalmente na superfície, como, por exemplo, a formação da camada branca devido à resolidificação de material e à presença de zona termicamente afetada. Essa região de camada branca apresenta integridade deficiente e, freqüentemente, vem acompanhada de formação de micro trincas. Na figura 3, mostra-se uma máquina de eletroerosão com o fluido dielétrico utilizado durante o processo no Laboratório de Usinagem da PUC Minas.

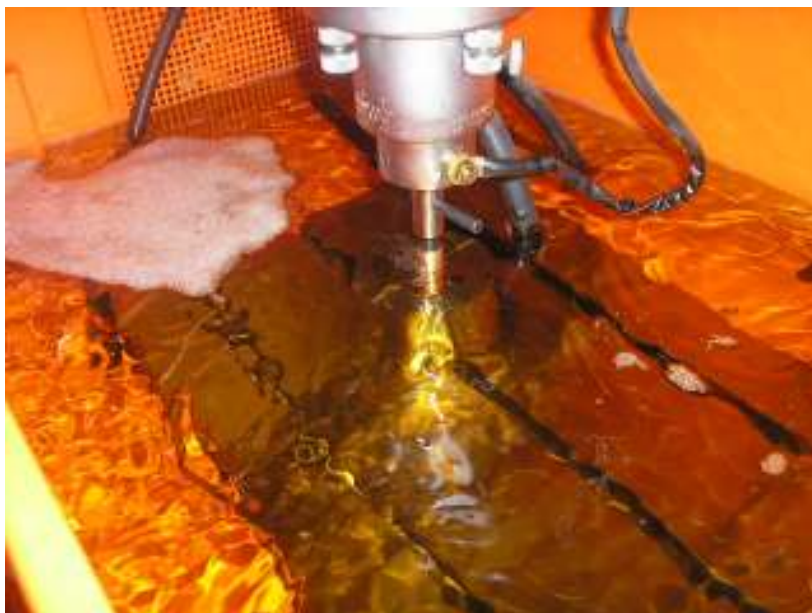


Figura 3 – Processo de eletroerosão por penetração, realizado na Máquina Engemac 440 NC do Laboratório de Usinagem da PUC Minas.

1.1 Justificativa

Os aços escolhidos para o trabalho de pesquisa e para avaliação são o aço AISI H 13, que é um aço-ferramenta para trabalho a quente e apresenta dureza a quente média de aproximadamente 50 HRc, e o aço AISI D6, que é um aço-ferramenta para trabalho a frio, utilizado na fabricação de matrizes. Outras características como resistência ao choque, usinabilidade razoável, resistência à temperatura de serviço, resistência à erosão às temperaturas de serviço, resistência ao trincamento devido ao calor e grande profundidade de endurecimento são necessárias. A dureza desses materiais, em estado temperado, pode ser da ordem de 51 a 54 HRc. A forma da martensita nesses aços-ferramenta, quando em condições de resfriamento e endurecimento, são suficientes para prevenir a transformação controlada-difusão para carbonetos proeutetóide, perlita e bainita. A composição da matriz austenítica determina a morfologia da microestrutura martensítica. Esses aços apresentam composições químicas e microestruturas bem diferentes que lhes conferem propriedades mecânicas que atendem às necessidades da indústria de produção de peças. A usinagem por eletroerosão é um dos processos mais indicados, nesses casos, devido à alta dureza desses aços, alcançada após têmpera ou beneficiamento.

1.2 Objetivos

Geral: Comparar e avaliar a influência do material da peça e do tratamento térmico, para os aços-ferramenta AISI H13 e AISI D6 no processo de usinagem por eletroerosão por penetração.

Específicos:

- Avaliar a taxa de remoção de material da peça e a relação de desgaste;
- Verificar a integridade da superfície das peças usinadas por meio de medições de microdureza, rugosidade e análises metalográficas;

Este documento foi organizado e subdividido em capítulos da seguinte forma: no Capítulo, 1 faz-se uma introdução ao trabalho, enfocando o estudo e mostrando os principais objetivos. No Capítulo 2, apresenta-se a “Revisão Bibliográfica” do assunto, no qual foram abordados temas sobre usinagem convencional e usinagem por eletroerosão. Este capítulo tem como objetivo proporcionar aprofundamento nos temas pesquisados, dando um maior entendimento nos testes experimentais. O Capítulo 3 trata dos procedimentos experimentais como a metodologia, os materiais, os equipamentos e os instrumentos de medição utilizados nos ensaios. As análises e as discussões dos resultados são apresentadas no Capítulo 4, onde são confrontados os resultados. O Capítulo 5 apresenta as conclusões do presente trabalho e sugere temas para futuros estudos. As referências bibliográficas compõem o final do trabalho.

2 ESTADO DA ARTE

Este capítulo trata dos tópicos relevantes para o desenvolvimento do projeto. Foi dividido da seguinte forma: inicialmente, foi dado destaque em usinagem e em qualidade da superfície usinada para, posteriormente, focar a eletroerosão, dando ênfase ao material da peça, ao eletrodo e ao fluido dielétrico.

2.1 Usinagem

A usinagem dos metais é um dos mais antigos e mais utilizados processos de fabricação de peças que o homem conhece. Define-se usinagem como a transformação do material em bruto, seja em forma de barras, chapas ou semi-acabados como fundidos e forjados, seja em peças úteis, com geometria, dimensões e acabamentos superficiais conforme projeto inicial. Essa transformação acontece por meio do cisalhamento, provocado pela ação de uma ferramenta de corte montada em uma máquina ferramenta ou pela utilização de processo manual. Segundo Sales (2005), *“O material removido é denominado de cavaco e adquire diversas formas, tamanhos e configurações, dependendo do processo utilizado, ferramenta de corte, material da peça, máquina e parâmetros de corte. O controle do cavaco se faz necessário para evitar problemas como riscos de danos à peça, à máquina e ao operador.* Na figura 4, mostra-se um torno CNC, usado na usinagem de peças.



Figura 4 – Torno CNC Centur 30D.

Torneamento, fresamento, furação, rosqueamento, mandrilhamento, brochamento e retificação são exemplos de processos de usinagens convencionais. Para o estudo em questão, a abordagem será feita no processo de fresamento que é bastante empregado na fabricação de matrizes e de moldes metálicos, dentre outras peças. Ferraresi (1977) afirma que fresamento é o processo mecânico de usinagem destinado à obtenção de superfícies quaisquer, com o auxílio de ferramenta geralmente multicortante. Para tanto, a ferramenta gira e a peça ou ferramenta se deslocam segundo uma trajetória qualquer.

Grande avanço em usinagem por fresamento é atribuído a Whitney que, por volta de 1818, usava para manufatura de armas de fogo. Através do avanço da peça contra a rotação da ferramenta de corte, acontece o fresamento de metais com formas complexas, abertura de canais retos, em forma de rabo de andorinha, em forma de T e desbaste de superfícies planas. A primeira fresadora universal foi construída por J. R. Brown, em 1862, e era empregada para cortar canais helicoidais em brocas.

A contribuição de Taylor foi decisiva para o aumento da produtividade nos processos de fabricação, principalmente nos que envolviam a usinagem. Pode-se destacar de sua obra o desenvolvimento do aço rápido, o uso dos fluidos de corte e a elaboração da equação para determinar a vida das ferramentas de corte.

Com a perspectiva histórica de que a cada dia a ciência e a engenharia dos materiais estejam preocupadas com a estrutura, com as propriedades, com o processamento e com o desempenho de novos materiais, surge, como um desafio, a possibilidade de usinagem desses novos materiais. Para isto, a pesquisa avança no desenvolvimento no campo dos materiais de fabricação de ferramenta de corte, de revestimentos, de fluidos de corte e de máquinas operatrizes.

Para Shaw (1984), Trent e Wright (1999), Diniz *et al.* (1999), Marcondes (1999) e Machado e Da Silva (1999) fatores como: dureza do material a ser usinado, tipo de cavaco, processo de usinagem, condições da máquina, forma e dimensão da ferramenta de corte, custo do material da ferramenta, parâmetros de usinagem como velocidade de corte, profundidade e avanço, características finais do produto são relevantes na seleção do material da ferramenta de corte. Propriedades como alta dureza à quente, tenacidade, alta resistência ao desgaste, alta resistência à compressão e cisalhamento, boas propriedades mecânicas e térmicas, boa condutividade térmica, alta resistência ao choque térmico, baixo índice de expansão volumétrica, alta resistência ao impacto e quimicamente inertes devem ser destacadas no processo de escolha da ferramenta.

2.1.1 Qualidade da superfície usinada

As peças fabricadas por usinagem convencional ou não convencional apresentam as superfícies com danos provocados pelo processo. Segundo Sales e Santos (2007), “o termo integridade superficial foi citado pela primeira vez em 1964 por Field e Kahles (1964), como definição para o conjunto de alterações na superfície das peças devido à ação de ferramenta de corte ou a outros processos de fabricação. As alterações superficiais podem ser de natureza mecânica, metalúrgica, química ou outros tipos de transformações. A integridade superficial tornou-se oficialmente um campo de estudos durante a 21ª Assembléia Geral do CIRP (setembro de 1971). De acordo com Oliveira (2004), “a natureza de uma superfície é caracterizada pela textura

superficial e pelas transformações metalúrgicas ocorridas na região sub superficial da peça. As superfícies geradas nos processos de fabricação não são superfícies perfeitas, existem detalhes que só podem ser observados quando estas são ampliadas várias vezes em relação ao seu tamanho original. Quando são observadas com recursos apropriados, estas superfícies apresentam irregularidades e as orientações das irregularidades dependem do tipo de processo que deu origem à superfície. Em uma superfície podem ser encontradas muitas outras marcas como trincas produzidas por impacto térmico, transferência de material e crateras produzidas por fratura de grão. As características de uma superfície são definidas em três níveis: erros de forma, ondulação e rugosidade, de acordo com a altura e/ou a distância entre as irregularidades". Os erros de forma são verificados por meio de instrumentos convencionais de medição, como micrômetros, relógios comparadores, projetores de perfil, etc. Entre esses erros, incluem-se divergências de ondulações, ovalização, retilineidade, planicidade, circularidade, etc. As principais causas desses erros são: defeitos em guias da máquina-ferramenta, desvios da máquina ou da peça, fixação errada da peça e distorções devido ao tratamento térmico. A rugosidade é o conjunto de irregularidades, isto é, pequenas saliências e reentrâncias que caracterizam uma superfície. Essas irregularidades podem ser avaliadas com aparelhos denominados rugosímetros. A rugosidade desempenha um papel importante no comportamento das peças produzidas pela indústria eletromecânica e tem influência direta na qualidade de deslizamento, na resistência ao desgaste, na possibilidade de ajustes, na resistência oferecida pela superfície ao escoamento de fluidos e lubrificantes, na resistência à corrosão e à fadiga, na vedação e na aparência.

2.2 Eletroerosão

A proposta deste projeto é avaliar o processo de usinagem por eletroerosão – EDM (*Electrical Discharge Machining*) por penetração. A descoberta da EDM se deve ao químico inglês Joseph Priestly que, em 1770, descobriu o efeito erosivo da descarga elétrica ou centelha. Durante aproximadamente 100 anos, esse fenômeno

passou a ser usado para desintegração de vários metais para produção de soluções coloidais. Somente em 1943, na Universidade de Moscou, os Lazarenko exploraram as propriedades destrutivas da descarga elétrica para uso construtivo. Eles desenvolveram um processo controlado de usinagem para metais com dificuldade de corte, com vaporização de material na superfície do metal. O sistema EDM dos Lazarenko usava resistência e capacitância da alimentação de energia e era amplamente usado nas máquinas de EDM até 1950 e posteriormente serviu de modelo para os sucessivos desenvolvimentos.

A figura 5 mostra uma máquina de eletroerosão da década de 1970 pertencente ao Laboratório de Fabricação do CDTN – Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear.



Figura 5 – Máquina de Eletroerosão por penetração ELOX – MICRO PS do Laboratório de Fabricação do CDTN.

O processo EDM é bastante complexo e muito tem sido estudado sobre esse tema. Consiste no mecanismo de erosão do material feito, primeiramente, pelo uso de energia elétrica e modificando internamente para energia térmica, completando uma série de descargas elétricas discretas, ocorrendo entre o eletrodo e a peça imersa em um fluido dielétrico. A energia térmica gera um canal de plasma entre o catodo e anodo

com temperaturas elevadíssimas, iniciando substancialmente o aquecimento e a fusão na superfície de cada pólo. Quando a pulsação direta da corrente é interrompida, o canal de plasma entra em colapso e causa redução repentina da temperatura, permitindo a circulação do dielétrico, retirando do canal de plasma e transportando o material fundido para o pólo da superfície em forma de partículas microscópicas. A figura 6 mostra desenhos de representação esquemática das fases do fenômeno que ocorre em eletroerosão.

Fase de ignição da centelha:

- a) No início da ignição, forma-se um campo elétrico entre os eletrodos, sendo que, no ponto do menor intervalo, o campo é mais intenso.
- b) Sobre a ponte de íons, começa a fluir uma corrente intensa.
- c) O fluxo de corrente ordena as partículas por um canal de plasma com gás ionizado. Com isso, a fase de ignição se encerra.

Fase da descarga:

- d) O sistema gerador elétrico da máquina limita o fluxo de corrente, primeiramente, num estreito canal de plasma. O calor, no momento de maior densidade de corrente, surge atuando somente em uma pequeníssima área do eletrodo, o que desgasta o material, para ambos os eletrodos.
- e) Através da condução do dielétrico, o canal de plasma distancia-se e a densidade de corrente e a temperatura diminuem.
- f) O canal de plasma estabiliza-se. O dielétrico torna-se condutor. O material ainda fundido, especialmente na peça, é sublimado.

Fase de interrupção:

- g) Com a interrupção, a tensão corta a pressão no canal de plasma, o dielétrico flui para o metal fundido. Ambos os eletrodos afastam-se para uma explosão, atingindo o metal fundido. Uma nova cratera origina-se.
- h) A bolha de gás entra em colapso. Através da queda de temperatura, diminui-se a condutibilidade do canal de plasma até a desionização.
- i) Sobre a bolha de gás, solidificam as partículas fundidas, formadas pela descarga (BENEDICT, 1987).

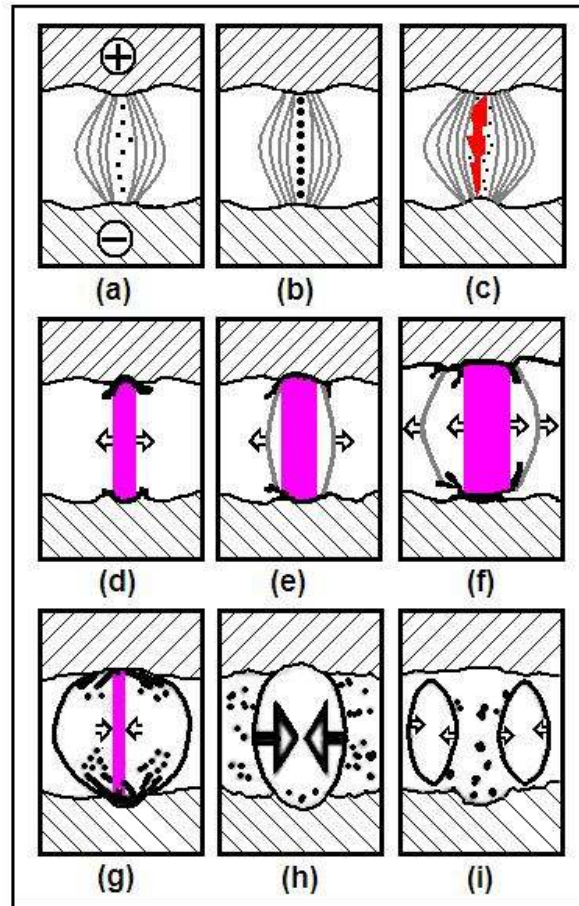


Figura 6 - Representação esquemática do fenômeno da EDM (BENEDICT, 1987).

O processo de fusão e de sublimação do material da superfície da peça é um contraste com o processo de usinagem convencional, pois os cavacos não são produzidos mecanicamente. A taxa do material removido era na faixa de $20 \text{ a } 250 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, no período de 1950 a 1960. A temperatura na centelha é estimada em até mais de $20.000 \text{ }^\circ\text{C}$. O tempo de duração é curto, e a área sobre a aplicação é pequena. A centelha funde e vaporiza uma pequena porção da peça, com pequenos efeitos nas regiões adjacentes (MCGEOUGH, 1988).

Para explicar o fenômeno da eletroerosão, várias teorias foram criadas. Atualmente, a que apresenta melhores explicações para o efeito de retirada de materiais pela descarga elétrica é a teoria termoelétrica. Para isto, o estudo que se faz é baseado na divisão do ciclo de uma descarga elétrica em quatro etapas distintas e em seqüência: ignição, criação do canal de plasma, fusão e sublimação dos resíduos

da peça e eletrodo e limpeza dos materiais que se fundiram. (KAHNG, 1977). Essas etapas do fenômeno, para uma descarga elétrica entre dois condutores submersos em fluido dielétrico, são mostradas na figura 7, elaborada por König & Klocke, (1997).

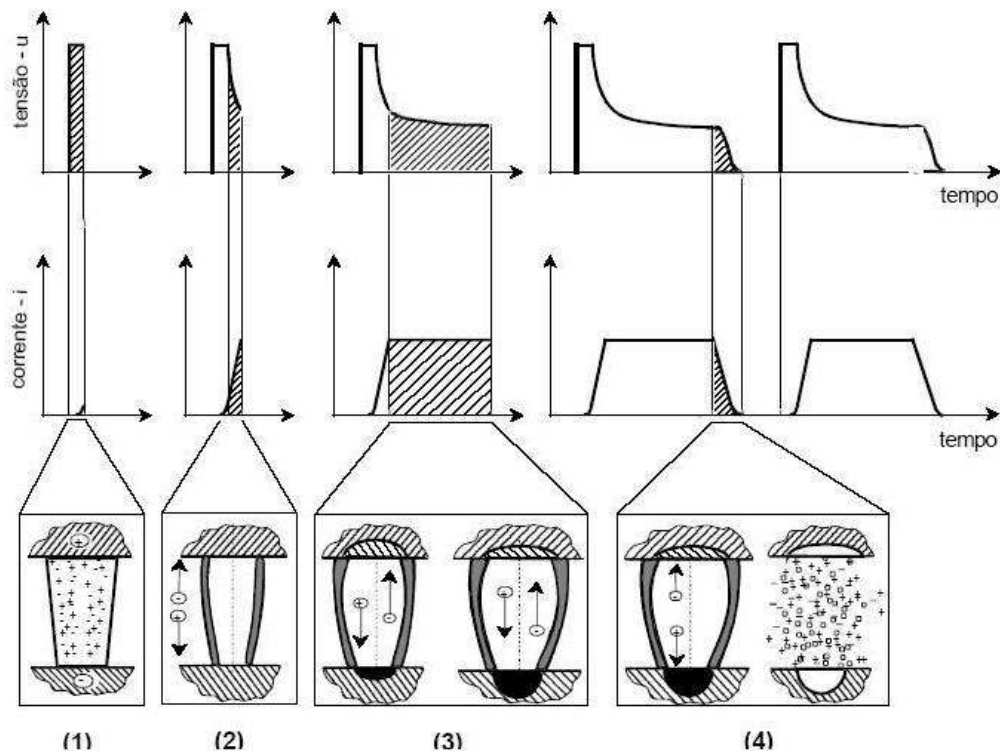


Figura 7 – As quatro fases de uma descarga elétrica no processo de eletroerosão: 1) Ignição. 2) Formação do canal de plasma. 3) Sublimação dos materiais da peça e eletrodo. 4) Limpeza dos resíduos produzidos no processo (KÖNIG & KLOCKE, 1997).

De acordo com Amorim (2002), essas fases foram destacadas para detalhar e explicar o fenômeno da eletroerosão. A figura 8 mostra o início da descarga chamada de ignição. Na prática, é quando existe um distanciamento entre a peça e o eletrodo de aproximadamente 0,05 a 1,00mm. Devido à resistência do fluido dielétrico, não tem fluxo de corrente, mesmo com a tensão variando em aberto de até 300V. O eletrodo avança contra a superfície da peça devido a um sistema automático até formar uma distância que possibilita o trabalho. Essa distância é denominada de *gap* e seu controle é fundamental para o êxito do processo. A teoria da ionização por impacto explica que os elétrons liberados no catodo se aceleram e colidem com as moléculas

do dielétrico, favorecendo a liberação de mais elétrons e íons positivos, iniciando uma reação de alta energia.

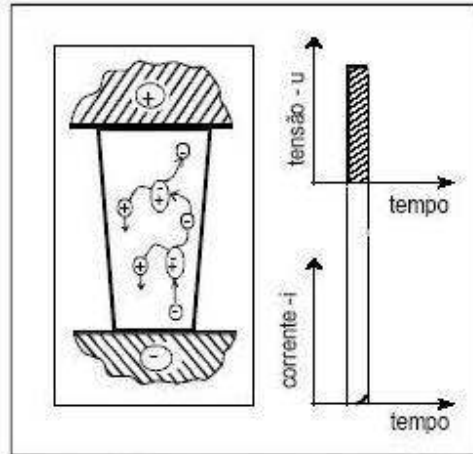


Figura 8 – Representação da ignição (KÖNIG & KLOCKE, 1997).

A figura 9 mostra a formação do canal de plasma que é decorrente da energia provocada pela colisão dos elétrons em alta velocidade. Como afirmam Silva (2006) e Amorim (2002), *“inicia-se a ionização por impacto, tendo na seqüência a multiplicação em altíssima velocidade deste fenômeno, gerando um superaquecimento seguido de evaporação de uma pequena quantidade do dielétrico. Desta maneira é provocado, simultaneamente, um aumento da corrente elétrica e um decréscimo da resistência do dielétrico. Podem ser observadas nesse instante a formação e a intensificação de túneis transportadores de energia elétrica (streamers) tanto para o anodo quanto para o catodo, resultando na queda da tensão em aberto (U_i) para a tensão de ruptura do dielétrico, havendo na seqüência um grande aumento da corrente elétrica (i_e), até atingir o nível especificado pelo operador.”* Esse canal fica contornado por uma bolha de vapor e pelo dielétrico que faz com que a energia da descarga fique concentrada em um pequeno volume. A formação do canal de plasma também é conhecida como colapso da tensão em aberto (U_i) e é nesse instante em que a tensão (U_i) decai rapidamente para tensão de ruptura do dielétrico, a qual depende da combinação do material utilizado no eletrodo e na peça. O intervalo de tempo entre a aplicação da

tensão (U_i) e a formação do canal de plasma é conhecido como tempo de retardo (t_d) o qual pode ser usado para análise da abertura do *gap*.

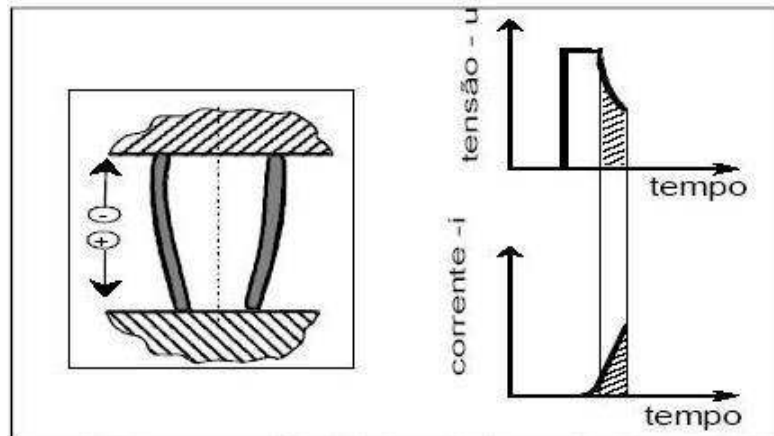


Figura 9 – Canal de plasma (KÖNIG & KLOCKE, 1997).

O canal de plasma formado é mantido por um período de duração (t_e) conforme regulagem do operador. Durante a aplicação da descarga, o sistema de controle do servomecanismo da máquina controla e mantém em equilíbrio a amplitude do *gap* a qual depende do nível de energia da corrente de descarga (i_e). Assim, evita-se a formação de curtos circuitos. De acordo com a duração da descarga elétrica (t_e), o plasma de alta energia funde continuamente por condução térmica uma certa quantidade de material do eletrodo e da peça. A fase de fusão e de sublimação dos materiais estão representadas na figura 10. A alta pressão do plasma faz com que pouca quantidade desse material líquido seja evaporada (DIBITONTO, 1989). Isso ocorre porque a densidade de corrente decresce bruscamente com o aumento da profundidade da cavidade da superfície do eletrodo e da peça. Durante a duração da descarga elétrica (t_e), ocorre a continuação da fusão e também há um aumento constante do diâmetro do canal de plasma. As superfícies do catodo e do anodo são intensamente bombardeadas por elétrons e íons positivos. Essa energia cinética é transformada em calor, pois esses elétrons penetram no anodo, fundindo o material. Os íons positivos transformam a sua energia cinética em calor ao colidirem com o

catodo. A intensidade de corrente (i_e), a duração de descarga (t_e) utilizada e as propriedades físicas do eletrodo e da peça estão diretamente relacionados à quantidade de material fundido. A influência da mobilidade dos íons positivos e dos elétrons sobre o início da fusão de material no catodo e no anodo são relevantes e influenciam o ciclo de descarga. A maior inércia dos íons positivos, junto com sua maior massa em relação aos elétrons, faz com que eles precisem de mais tempo para atingir certa velocidade. Logo no início da descarga, acontece um maior bombardeamento de elétrons no anodo que o de íons positivos no catodo. Por causa desse fenômeno, a fusão de material ocorre primeiramente no anodo, enquanto que no catodo ocorrerá alguns microsegundos depois.

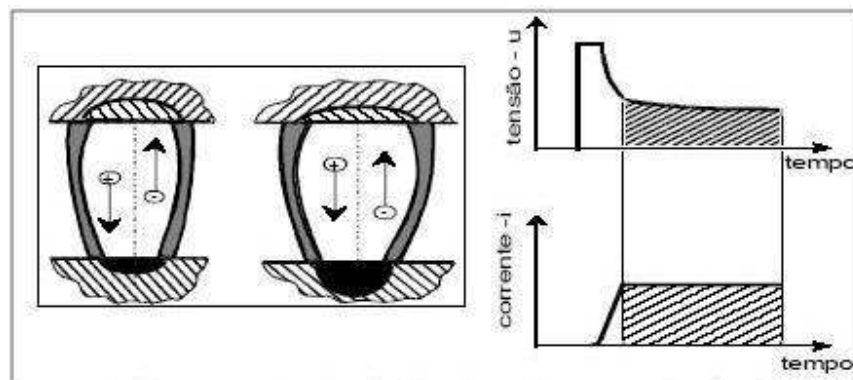


Figura 10 – Sublimação ocorrida no canal de plasma (KÖNIG & KLOCKE, 1997).

De acordo com Silva (2006) e Eubank (1993), o aumento do diâmetro do canal de plasma se dá pelo fato de haver transferência de energia para as regiões vizinhas, como para as cavidades fundidas, influenciando consideravelmente a quantidade de material fundido no eletrodo e na peça. Enquanto acontece a descarga (t_e), a irradiação de energia do plasma provoca a vaporização, a dissociação e a ionização de um pequeno volume de dielétrico líquido que circunda o canal, resultando em um aumento da massa e do diâmetro do plasma e gases. Acontece, então, queda da pressão e da temperatura nas cavidades. A cavidade fundida do anodo inicia um processo de solidificação em consequência da expansão e da diminuição do fluxo de energia. No catodo, a cavidade fica mais profunda. Conforme Dibitonto (1989), a

energia total de uma descarga elétrica é dividida em três parcelas e pode ser estimada em 18%, consumida na fusão de material do catodo, 8% para fundir o anodo e 74% gastos no aumento da massa e do diâmetro do canal de plasma para converter o dielétrico líquido em plasma.

Van Dijk (1973), e posteriormente comprovado por Eubank (1993), afirmou que o principal mecanismo de remoção de material na eletroerosão está associado ao fenômeno de superaquecimento do metal fundido nas cavidades do eletrodo e da peça. Durante o tempo de aplicação da descarga, as superfícies das cavidades fundidas estão superaquecidas, com temperaturas próximas às de ebulição do material, correspondente ao estado de sobrepressão do plasma. A figura 11 representa, que ao final da duração de descarga (t_c), o sistema de controle do gerador da máquina interrompe instantaneamente a corrente elétrica, estabelecendo um intervalo de tempo (t_o) até o início do novo ciclo. Devido à alta pressão que o plasma exerce sobre as cavidades, pouco material se evapora. Com a suspensão da descarga, uma pequena cratera é formada nas superfícies da peça e do eletrodo devido à queda instantânea da pressão que extingue a bolha de gás e o canal de plasma, com forças associadas ao superaquecimento para separar o material fundido das cavidades. Uma parte do material fundido fica solidificada na cratera e a outra parte é removida pelo efeito limpeza do dielétrico.

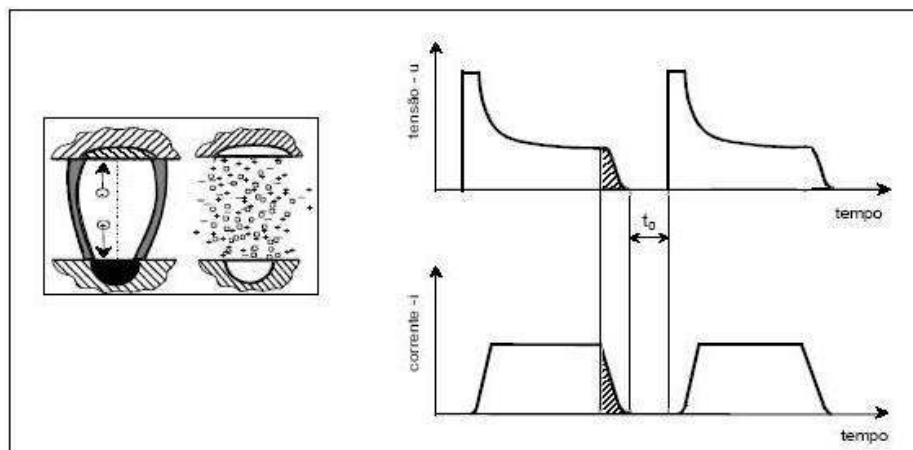


Figura 11 – Final do canal de plasma com a limpeza dos resíduos (KÖNIG & KLOCKE, 1997).

A figura 12 mostra a evolução da tensão e a corrente elétrica durante o ciclo de uma descarga elétrica que ocorre na eletroerosão. A simbologia empregada foi retirada da norma alemã VDI 3402 de 1990.

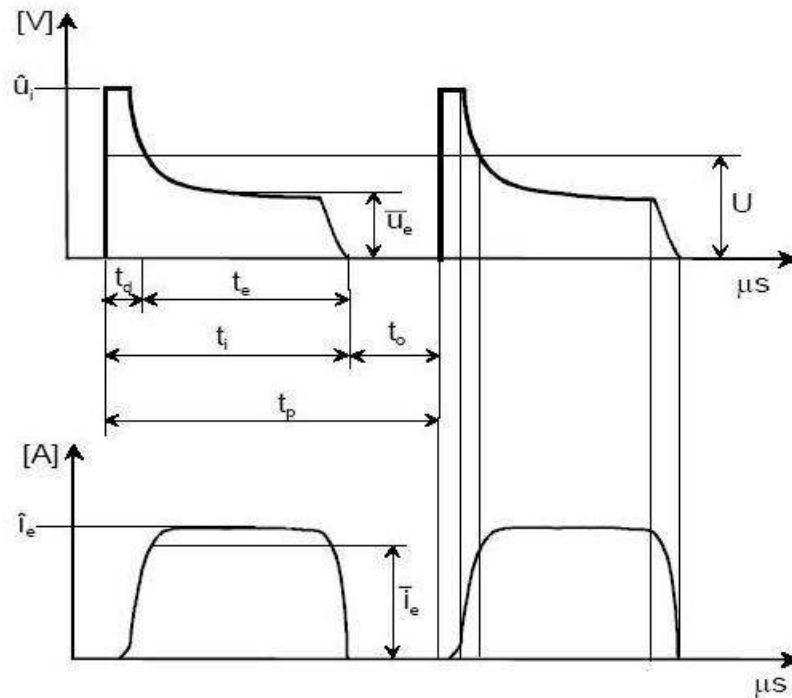


Figura 12 – Evolução da Tensão e Corrente Elétrica durante o ciclo de uma descarga.
(AMORIM, 2002).

\hat{U}_i - tensão em aberto;

U_e - tensão média da descarga;

U - tensão média de trabalho durante a usinagem;

t_d - tempo de retardo de ignição da descarga;

t_e - duração da descarga;

t_i - duração do pulso de tensão ($t_d + t_e$)

t_o - duração do intervalo entre duas sucessivas descargas;

t_p - duração do período do ciclo de uma descarga;

\hat{I}_e – corrente máxima durante a descarga;

\bar{I}_e – corrente média durante a descarga;

τ - relação de contato: representa a razão entre a duração do pulso (t_i) e a duração do período do ciclo da descarga (t_p)

A corrente de descarga consumida no processo de eletroerosão é um parâmetro de extrema importância na qualidade e no rendimento da operação. O limite da quantidade de corrente envolvida no processo está diretamente ligado à condição de operação existente no *gap*. À medida que o eletrodo usina a peça, a geometria do *gap* está em constante modificação, alternando a troca de calor e o equilíbrio térmico deste ponto. A seleção da corrente depende da rugosidade esperada, do máximo desgaste do eletrodo permitido, da velocidade, das características térmicas do eletrodo, das condições de *gap* e da área de contato eletrodo/peça.

A frequência é a medida usada para determinar o número de vezes que a corrente passa de ligada para desligada na unidade de tempo. Para operações de desgaste, o t_e é geralmente estendida para se obter altas taxas de remoção de material e desde que haja alguns ciclos por segundo, essa poderia ser uma regulação de baixa frequência. Nas operações de acabamento, nos quais tem-se t_e e t_o bem menores, haverá vários ciclos por segundo e poderia ser considerada uma regulação de alta frequência (ARANTES, 2001).

As figuras 13, 14 e 15 mostram as formas das superfícies usinadas por eletroerosão, de forma representativa, em diferentes frequências e os efeitos representativos no perfil da superfície. Na figura 13, o acabamento com t_e longo é bem grosseiro, devido ao fato de que a longa duração da descarga é suficiente para fundir uma grande cratera. Na figura 14, a duração da descarga cai, produzindo crateras menores e menos material fundido. O acabamento melhora, mas a velocidade de usinagem diminui e aumenta o desgaste do eletrodo. A figura 15 mostra a característica da superfície em operações de acabamento. O perfil da descarga é muito mais denso, com uma intensidade de descargas maior pela mesma unidade de

tempo. As descargas de curta duração produzem pouco material erodido, gerando pequenas crateras.

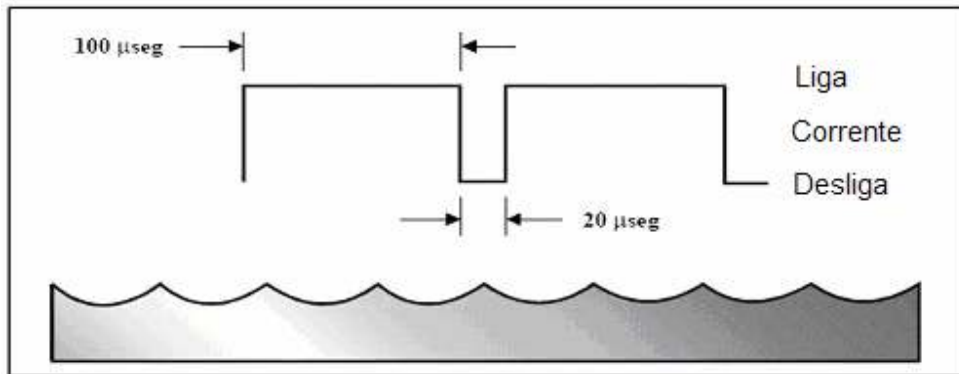


Figura 13 – Baixa Frequência / Desbaste (GUITRAL, 1997).

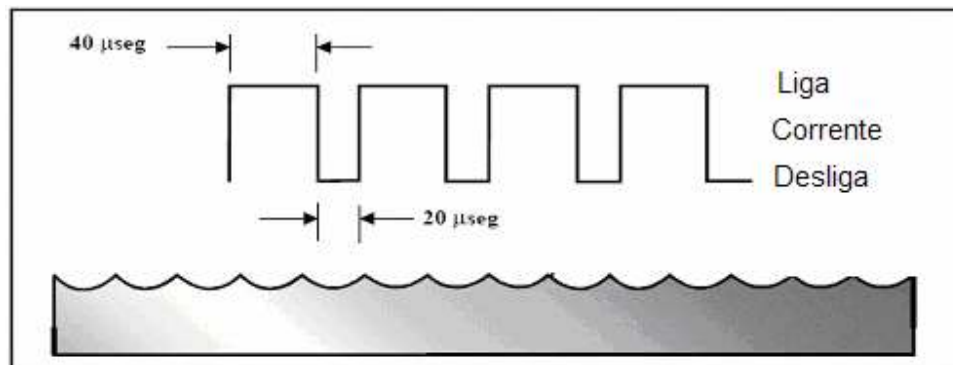


Figura 14 – Frequência Moderada / Semi-acabamento (GUITRAL, 1997).

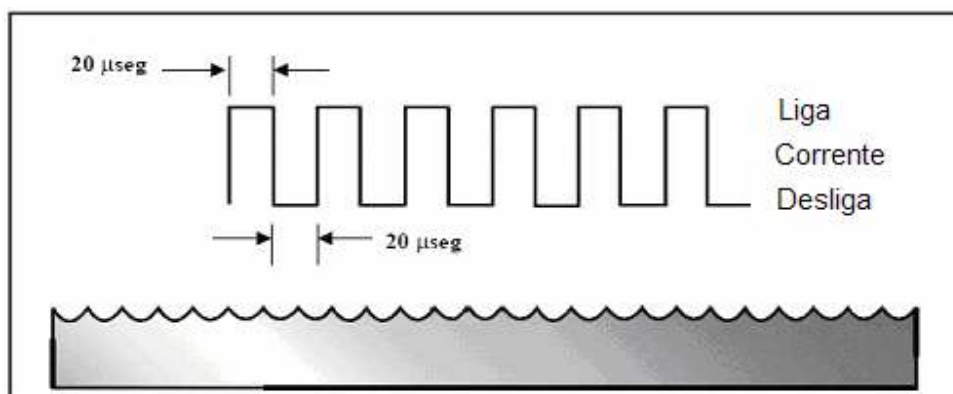


Figura 15 – Alta Frequência / Acabamento (GUITRAL, 1997).

O comprimento de onda t_e determina a duração do pulso (tempo de descarga) e possui como unidade de referência o microsegundo (μm). O tempo de pausa t_o relaciona-se ao tempo de pausa entre duas descargas consecutivas. Nesse tempo, ocorre a interrupção da descarga, mostrada na equação 2.1:

$$t_o \% = t_e / (t_e + t_d) \times 100 \quad (2.1)$$

O tempo de eletroerosão pode ser calculado com alguma precisão, pela fórmula abaixo, mostrado na equação 2.2, desde que não seja intermitente:

$$T = (A \cdot \text{Profundidade}) / V_w \quad (2.2)$$

Onde:

T = Tempo em minutos

A = área em mm^2

V_w = Taxa de remoção de material (valor retirado de tabelas)

Polaridade positiva significa o eletrodo no pólo positivo e a peça no pólo negativo. De acordo com Guitrau (1997), *“a polaridade pode afetar a velocidade, acabamento, desgaste e estabilidade. Máquinas verticais podem usar tanto polaridade positiva quanto negativa e vai depender da aplicação específica. A polaridade positiva usina mais devagar que a polaridade negativa, mas protege o eletrodo de desgaste excessivo. A polaridade negativa é usada para remoção de metal em alta velocidade usando eletrodo de grafite e na usinagem de carbonetos, titânio e metais refratários usando eletrodos metálicos. Na eletroerosão a fio, a polaridade usada é a negativa, isto é, o fio é negativo e a peça é positiva. Nesse caso o desgaste do eletrodo (fio) não é considerado, pois durante o processo ele é sempre renovado”*.

2.2.1 Material do eletrodo-peça

Na usinagem de aços tratados termicamente, como os aços-ferramenta, os processos convencionais de usinagem, como o torneamento e o fresamento, normalmente são economicamente viáveis para peças com dureza inferior a 60 HRc. Com EDM, a dureza da peça não é problema, principalmente para usinagens posteriores ao tratamento térmico de têmpera, seguida de revenimento, onde as peças apresentam problemas de variação dimensional. Na figura 16, mostra-se uma esfera de rolamento com um furo não passante, furada com eletrodo de cobre eletrolítico de 2 mm de diâmetro.



a) Esfera e eletrodo



b) Esfera perfurada pelo eletrodo

Figura 16 – Furo com diâmetro de 2mm x 40mm de profundidade, realizado por EDM, em uma esfera de rolamento com dureza de 740 HV.

Os recentes trabalhos de redução de tamanho nos produtos têm dado uma grande atenção nas pesquisas que utilizam a Micro EDM, principalmente na confecção de micro furos e micro entalhes com diâmetro em torno de 5 μm , além de micro cavidades tridimensionais complexas. Masuzawa *et al.* (1985) obtiveram sucesso na

produção de micro peças como micro pinos, micro bocais e micro cavidades, utilizando micro EDM.

EDM de cerâmicas avançadas tem sido amplamente aceita pelas indústrias de corte de metal, devido à usinagem com custos e características competitivas. O desenvolvimento de diferentes materiais compósitos modernos nas últimas décadas tem tido ampla aplicação em EDM.

A influência da composição da liga sobre a habilidade de uma liga de aço em se transformar em martensita para um tratamento de têmpera está relacionada a um parâmetro que é conhecido por endurecibilidade. Para cada liga de aço diferente, existe uma relação específica entre as propriedades mecânicas e a taxa de resfriamento (CALLISTER, 2000).

Os aços-ferramenta são um grupo muito grande de ligas complexas que evoluem para muitas formas de aplicações a quente e a frio. Detalhes de processo, como taxas recomendadas de resfriamento, tempo e temperatura de tratamento térmico, são encontrados na literatura e também informados pelos principais fabricantes. Para cada tipo de aço ferramenta existe um tratamento térmico que evolui e desenvolve microestruturas e propriedades mecânicas (KRAUSS, 1989).

Existe um consenso na literatura de que os aços-ferramenta são adequados para realizar suas tarefas como: usinagem de metais, fundição sob pressão, extrusão de metais, etc. devido à presença de carbonetos primários resistentes à abrasão, inseridos numa matriz termicamente resistente, que se precipitam durante tratamentos térmicos posteriores. Nos carbonetos secundários, o tamanho, a distribuição, a composição e a quantidade dos mesmos são parâmetros que influem na dureza, na resistência ao desgaste, na ductilidade, na resistência ao escoamento e, portanto nas propriedades dos aços-ferramenta. A resistência ao desgaste é normalmente atribuída à alta fração volumétrica de 10 a 20% dos carbonetos primários que, geralmente, têm dimensões de 1 a 5 μm . Quanto à ductilidade, os carbonetos primários serão benéficos quando estiverem finamente dispersos e se apresentarem em diâmetro de 1 μm . É também benéfica à ductilidade a ausência de carbonetos proeutetóides nos contornos de grãos. A dureza a quente depende basicamente da capacidade dos carbonetos secundários de não se engrossarem com tratamentos térmicos ou temperaturas de trabalho a

quente. Em aços onde se adicionam diversos elementos como Nb, V, Ti, Mo e W, mesmo que cada elemento precipite-se isoladamente, as tentativas de se prever a cinética de precipitação mostram-se insatisfatórias diante da mútua solubilidade dos carbonetos, pois normalmente conduz a precipitações em diferentes faixas de temperatura. Torna-se importante que sejam feitas nessas ligas análises microestruturais detalhadas, de modo a se obter conhecimentos que contribuam para a otimização do processamento das mesmas. Métodos indiretos como resistividade elétrica e dureza são utilizados para um possível discernimento considerável sobre o comportamento da precipitação (FREITAS, 1987).

Uma das características elétricas mais importantes de um material sólido é a facilidade com que ele transmite uma corrente elétrica. A lei de Ohm, mostrada na equação 2.3, relaciona a corrente, I , à voltagem aplicada, V

$$V = R \cdot I \quad (2.3)$$

onde R representa a resistência do material através do qual a corrente está passando. O valor de R (ohm) é influenciado pela configuração da amostra e, para muitos materiais, é independente da corrente. A resistividade, ρ , é independente da geometria da amostra, mas está relacionada a R e é mostrada na equação 2.4:

$$\rho = R \cdot A / l \quad (2.4)$$

onde l representa a distância entre dois pontos sendo medida a voltagem e A é a área da seção reta perpendicular à direção da corrente. A resistividade ρ é dada em ohm.metro ($\Omega \cdot m$). Algumas vezes, a condutividade elétrica, σ , é usada para especificar a natureza elétrica de um material. A condutividade elétrica, mostrada na equação 2.5, é o inverso da resistividade e é dada em $(\Omega \cdot m)^{-1}$:

$$\sigma = 1 / \rho \quad (2.5)$$

A figura 17 mostra um diagrama esquemático de um arranjo experimental empregado para medir a resistividade elétrica.

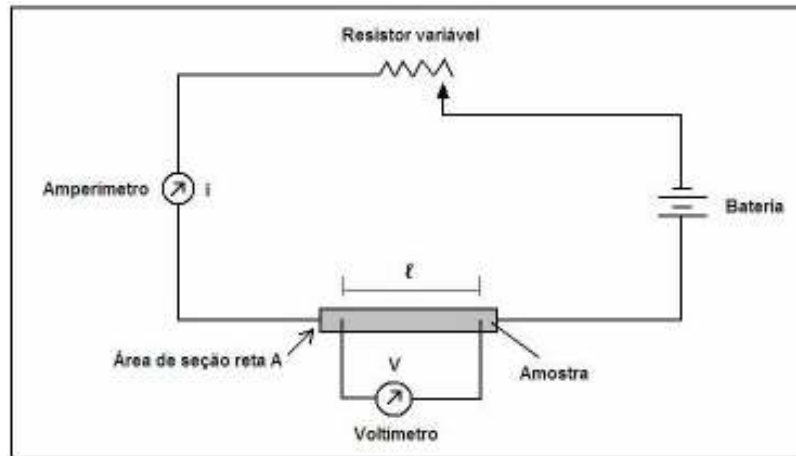


Figura 17 – Representação esquemática de um sistema usado para medir a resistividade elétrica.

Uma corrente elétrica resulta do movimento de partículas eletricamente carregadas em resposta às forças que atuam sobre elas a partir de um campo elétrico que é aplicado externamente. As partículas carregadas positivamente são aceleradas na direção do campo, enquanto as partículas carregadas negativamente são aceleradas na direção oposta. No interior da maioria dos materiais sólidos, uma corrente tem origem a partir do escoamento de elétrons, a qual é conhecida por condução eletrônica. Em todos os condutores, semicondutores e em muitos materiais isolantes, existe apenas a condução eletrônica, e a magnitude da condutividade elétrica é fortemente dependente do número de elétrons que está disponível para participar no processo de condução. O número de elétrons disponíveis para condução elétrica em um material em particular está relacionado ao arranjo dos estados ou níveis eletrônicos em relação à energia, e então à maneira segundo a qual esses estados são ocupados pelos elétrons.

Os elétrons estabelecem ondas permanentes em torno de um átomo individual. Esse modelo prevalece também nos elétrons mais internos ou subvalentes dos metais; entretanto os elétrons externos ou de valência são deslocáveis diante de um grande número de átomos coordenados. Como resultado, as órbitas de valência formam uma banda e a onda permanente é influenciada por todos os átomos com os quais está envolvido. Uma consequência disso é o fato de que uma banda possui tantas formas de onda permanente e níveis de energia discretos quantos são os átomos no sistema. Já que o número é excessivamente grande e as bandas de energia são usualmente de

apenas uns poucos elétrons-volt, conclui-se que os níveis de energia no âmbito de uma banda estão separados infinitesimalmente, permitindo assumir que a banda forme um contínuo.

O princípio da exclusão de Pauli estabelece que somente dois elétrons podem ocupar o mesmo nível (e devem ser de *spins* magnéticos opostos). Assim sendo, com sua multiplicidade de níveis, uma banda pode conter em elétrons o dobro da quantidade dos átomos correspondentes. Os níveis de energia incompletos, no âmbito da banda, são importantes para a condução, porque eles permitem que um elétron alcance um nível de energia mais alto quando ele se move no sentido do eletrodo positivo. Isso não seria possível se a banda de energia estivesse completamente preenchida e uma demasiada descontinuidade de energia estivesse presente. Os metais têm bandas de energia não totalmente preenchidas (VAN VLACK, 1984).

Embora esses elétrons não estejam ligados localmente a qualquer átomo particular, eles, no entanto, devem experimentar alguma excitação para se tornarem elétrons de condução que sejam realmente livres. Dessa forma, embora apenas uma fração desses esteja excitada, isso ainda dá origem a um número relativamente grande de elétrons livres e, conseqüentemente, uma alta condutividade.

Uma vez que os defeitos cristalinos servem como centros de espalhamento para os elétrons de condução nos metais, o aumento do número desses também aumenta a resistividade, ou diminui a condutividade. A concentração dessas imperfeições depende da temperatura, da composição e do grau de deformação a frio de uma amostra metálica. De fato, foi observado, experimentalmente, que a resistividade total de um metal é a soma das contribuições das vibrações térmicas, das impurezas e da deformação plástica; isto é, os mecanismos de espalhamento atuam independentemente uns dos outros. Isso pode ser representado matematicamente na equação 2.6 e é conhecido como “Regra de Matthiessen” (CEZAR, 2006).

$$\rho_{\text{total}} = \rho_t + \rho_i + \rho_d \quad (2.6)$$

onde ρ_t representa as contribuições das resistividades térmicas, ρ_i , as contribuições individuais devido às impurezas e ρ_d , devido à deformação.

A dependência do componente da resistividade térmica ρ_t , em relação à temperatura, deve-se ao aumento das vibrações térmicas e de outras irregularidades do

retículo, como por exemplo as lacunas que servem como centros de espalhamento de elétrons, com aumento da temperatura, representado na equação 2.7:

$$\rho_t = \rho_o + a T \quad (2.7)$$

onde ρ_o e a são constantes para cada metal específico.

Para adições de uma única impureza que forma uma solução sólida, a resistividade devida à impureza, ρ_i , está relacionada à concentração de impureza, c_i , em termos de fração atômica (%a/100), mostrada na equação 2.8:

$$\rho_i = A c_i (1 - c_i) \quad (2.8)$$

onde A representa uma constante independente da composição que é função tanto do metal de impureza como do metal hospedeiro. Para uma liga bifásica que consiste nas fases α e β , a expressão para a regra de misturas pode ser utilizada para aproximar a resistividade na equação 2.9:

$$\rho_i = \rho_\alpha V_\alpha + \rho_\beta V_\beta \quad (2.9)$$

onde os V e ρ representam as frações volumétricas e resistividades individuais para as respectivas fases.

A deformação plástica também aumenta a resistividade elétrica como resultado do maior número de discordâncias que causam o espalhamento dos elétrons. Os efeitos da temperatura, das impurezas e da deformação plástica sobre a resistividade elétrica são mostrados na figura 18 para o cobre e três ligas de cobre-níquel.

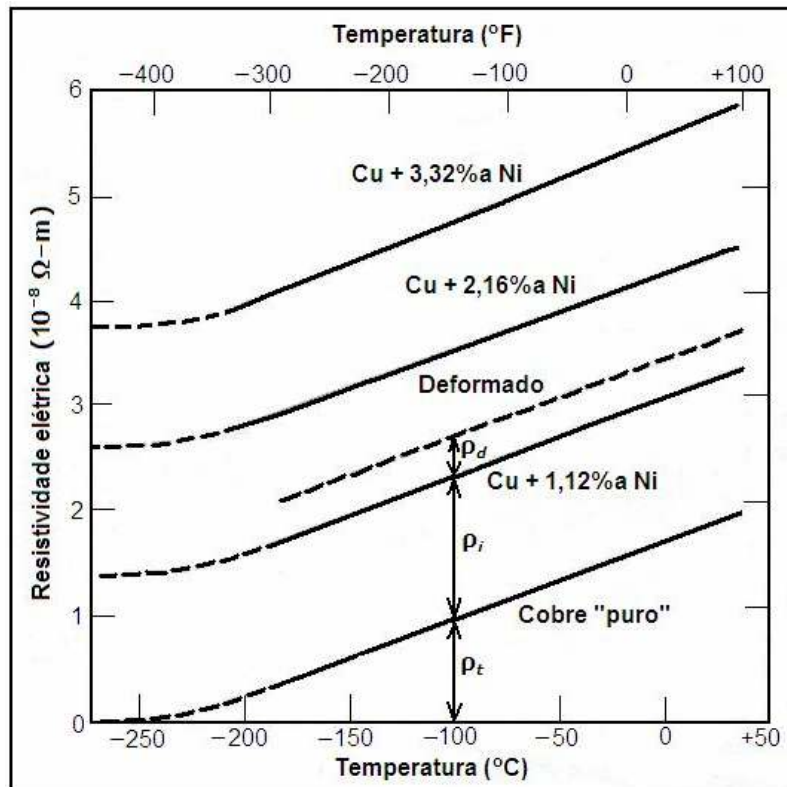


Figura 18 – A resistividade em função da temperatura para o cobre e três ligas cobre-níquel, uma das quais foi submetida à deformação. As contribuições térmicas, das impurezas e da deformação à resistividade estão indicadas para uma temperatura de $-100^{\circ}C$ (CALLISTER, 2002).

A influência de adições de impurezas de níquel sobre a resistividade à temperatura ambiente está demonstrada na figura 19. Os átomos de níquel no cobre atuam como centros de espalhamento, e um aumento da concentração de níquel no cobre resulta em um aumento da resistividade.

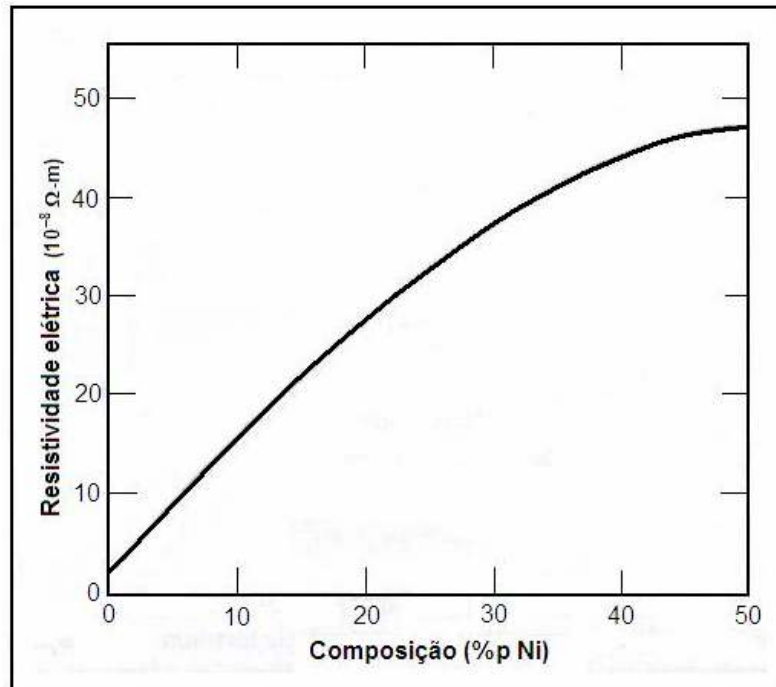


Figura 19 – Resistividade elétrica à temperatura ambiente em função da composição para ligas de cobre-níquel (CALLISTER, 2002).

A condução térmica é o fenômeno segundo o qual o calor é transportado das regiões de alta temperatura para as regiões de baixa temperatura em uma substância. A propriedade que caracteriza a habilidade de um material em transferir calor é a condutividade térmica. O calor é transportado em materiais sólidos tanto através das ondas de vibração do retículo (fônons), como através dos elétrons livres. Uma condutividade térmica está associada a cada um desses mecanismos, e a condutividade total é a soma dessas duas contribuições, representada na equação 2.10:

$$k = k_r + k_e \quad (2.10)$$

onde k_r e k_e representam as condutividades térmicas devidas à vibração do retículo e aos elétrons, respectivamente; em geral, uma forma ou outra predominante. A energia térmica que está associada aos fônons ou às ondas reticulares é transportada na direção do seu movimento. A contribuição de k_r resulta de um movimento líquido ou global dos fônons desde as regiões de alta temperatura para as regiões de baixa temperatura de um corpo, através dos quais existe um gradiente de temperatura. Os

elétrons livres ou condutores participam na condução térmica eletrônica. Aos elétrons livres em uma região quente da amostra, é concedido um ganho em energia cinética. Eles então migram para as áreas mais frias, onde uma parte dessa energia cinética é transferida para os próprios átomos (na forma de energia vibracional), como consequência de colisões com os fônons ou outras imperfeições no cristal. A contribuição relativa de k_e , para a condutividade térmica total, aumenta com o aumento das concentrações de elétrons livres, uma vez que mais elétrons estão disponíveis para participar nesse processo de transferência de calor. Em metais de alta pureza, o mecanismo eletrônico de transporte de calor é muito mais eficiente do que a contribuição dos fônons, pois os elétrons não são tão facilmente dispersos como são os fônons, além de possuírem maiores velocidades. Além do mais, os metais são condutores de calor extremamente eficientes, pois existem números relativamente grandes de elétrons livres que participam na condução térmica. Uma vez que os elétrons livres são responsáveis tanto pela condução elétrica quanto pela condução térmica nos metais, os tratamentos teóricos sugerem que as duas condutividades devem estar relacionadas de acordo com a lei de *Wiedemann-Franz*, mostrada na equação 2.11:

$$L = k / \sigma T \quad (2.11)$$

onde σ representa a condutividade elétrica, T é a temperatura absoluta, e L é uma constante. O valor teórico de L , $2,44 \times 10^{-8} \Omega \cdot W / (K)^2$ deve ser independente da temperatura e o mesmo para todos os metais se a energia calorífica for transportada inteiramente através de elétrons livres. A formação de ligas com metais pela adição de impurezas resulta em uma redução na condutividade térmica, pela mesma razão que a condutividade elétrica é reduzida; qual seja, os átomos de impurezas, especialmente se estiverem em solução sólida, atuam como centros de espalhamento ou dispersão, reduzindo a eficiência do movimento de elétrons. A figura 20 exhibe esse efeito de condutividade térmica em função da composição para ligas de cobre-zinco. Os aços inoxidáveis, que são materiais altamente ligados, tornam-se relativamente resistentes ao transporte de calor (CALLISTER, 2002).

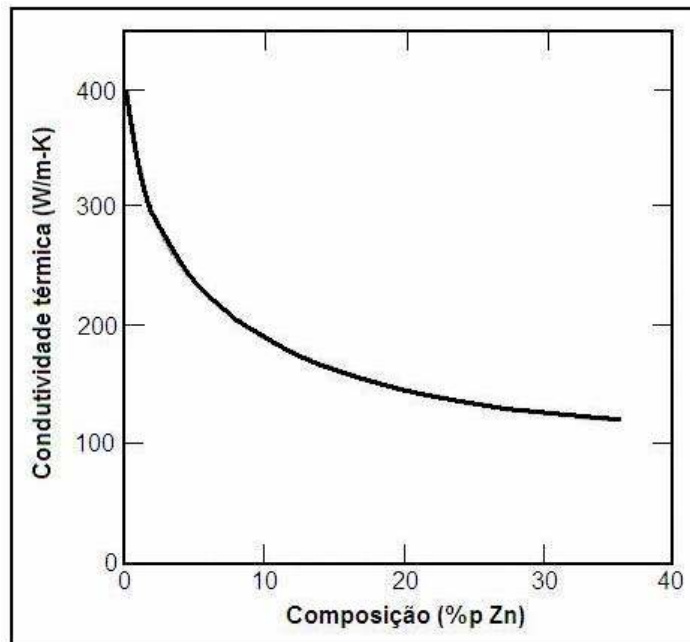


Figura 20 – Condutividade térmica em função da composição para ligas cobre-zinco (CALLISTER, 2002)

2.2.2 Materiais para eletrodos-ferramenta

O custo do eletrodo-ferramenta é sempre o fator mais crítico em operações de EDM. Material, fabricação, desgaste e custo de dressagem (remoção da camada carbonizada do eletrodo) devem ser cuidadosamente avaliados para determinar qual é o melhor material. Esse eletrodo ferramenta deve ter alta condutividade elétrica, facilidade para ser usinado, alto ponto de fusão e não apresentar deformações quando trabalhado pelos processos convencionais.

Conforme Drozda (1998) e Oarmolds (2007), o cobre funciona muito bem como material para eletrodo e é amplamente usado quando são necessárias baixas rugosidades na superfície da peça. O cobre pode ser usinado por todos os métodos convencionais, como furação, torneamento, fresamento, retificação, etc. Às vezes, a usinagem pode ser difícil, porque o cobre tende a aderir à ferramenta de corte de geometria definida e ao rebolo nas operações de retificação. Uma opção para solucionar esse problema é a utilização de liga de 2% de telúrio – cobre.

Outro material bastante empregado é a grafita que pode ser encontrada em diferentes classes, desde dimensões grandes de grãos (200 μm), para operações de alto desgaste, a grãos muito finos (1 μm), para operações de acabamento, especificamente em aço. A grafita apresenta elevada taxa de remoção de material e baixo desgaste, dependendo dos parâmetros utilizados. Para fabricação de grandes eletrodos-ferramenta, a grafita torna-se o melhor material devido à sua baixa densidade. Embora a grafita seja abrasiva, ela é relativamente fácil de ser usinada pelos processos convencionais. A principal desvantagem da grafita é o pó fino, condutor de eletricidade, que ela produz durante sua usinagem, que é capaz de influenciar o desempenho mecânico e eletro-eletrônico da máquina ferramenta. Na figura 21, mostra-se eletrodos de cobre eletrolítico e grafite que foram usados na usinagem por eletroerosão.



Figura 21 – Eletrodos-ferramenta de cobre e grafite utilizados em EDM.

Diferenças importantes relatadas por Vartaman e Rosenholm (1992) mostram que, por muitos anos, houve discussões sobre os méritos relativos dos diferentes materiais para eletrodos-ferramenta. Mas os principais debates discorrem sobre a utilização do cobre e da grafita. Há informações de que usuários de eletroerosão, em diferentes partes do mundo, têm utilizado diferentes materiais para eletrodos-

ferramenta para realizar exatamente mesmas tarefas. Normalmente, o cobre é usado na Europa e na Ásia por motivos históricos. A grafita é a opção de material de eletrodo-ferramenta da maioria de usuários de eletroerosão nos Estados Unidos. Os autores afirmam que qualquer operação que puder ser realizada com cobre também pode ser executada com grafita. O resultado final pode ser o mesmo, mas o custo para obtê-lo pode ser muito diferente.

Com relação à influência do material do eletrodo-ferramenta e do eletrodo-peça na eletroerosão, König & Klocke (1997) afirmam que alguns modelos termofísicos sugerem que o comportamento do processo, em se tratando de taxa de remoção de material, do desgaste relativo e da rugosidade é determinado pelas propriedades térmicas do eletrodo-peça e do eletrodo-ferramenta, como por exemplo o calor específico, a condutividade térmica e a temperatura de ebulição. Outros modelos propõem que a resistência elétrica, a relação entre a temperatura de evaporação e a fusão dos materiais, bem como uma combinação de constantes térmicas resumidas no termo “energia de ligação”, são as fontes de maior influência sobre o comportamento do processo. König & Klocke (1997) relatam também que, até o momento, os resultados das pesquisas não conseguem relacionar precisamente o desempenho do processo de eletroerosão dos metais puros com suas propriedades físicas. Da mesma forma, acrescentam que as influências dos elementos de liga sobre a erodibilidade das ligas metálicas ainda não é plenamente explicado. Como exemplo dessa avaliação complexa das propriedades termofísicas dos materiais, sobre o rendimento do processo, é possível comparar as taxas de remoção para o cobre e para o aço, sendo que o cobre, utilizado na confecção do eletrodo-ferramenta e o eletrodo-peça, fabricado em aço, relacionados simplesmente pela condutividade térmica e a temperatura de fusão desses metais. O cobre possui ponto de fusão de 1084 °C, no entanto, apresenta uma baixa taxa de remoção na eletroerosão. Isto é devido à elevada condutividade térmica que é de aproximadamente 388 W/m.K, na dissipação rápida de calor gerada pela descarga. Entretanto, o ponto de fusão do aço é bem superior ao do cobre, mas as taxas de remoção obtidas são bem mais elevadas que as do cobre. Segundo Amorim (2002), a explicação para esse resultado está na menor condutividade térmica do aço. Isso denota que a análise do rendimento do processo,

considerando apenas uma ou duas propriedades físicas do material, não permite obter conclusões significativas.

2.2.3 Fluidos dielétricos

As qualidades requeridas para os fluidos dielétricos são as que podem ionizar rapidamente, após a descarga elétrica, e que possuem alta força dielétrica para permanecer como isolante até que ocorra a tensão de desequilíbrio, onde acontece o fenômeno da formação do canal de plasma. Líquidos, à base de hidrocarbonetos, são amplamente utilizados como fluidos dielétricos. No início, eram usados a parafina e os óleos de transformadores. A utilização do querosene teve grande aceitação devido ao seu baixo custo e ao bom desempenho na maioria das operações de EDM. Devido a problemas com a saúde ocupacional e a agressividade desse dielétrico, pesquisas apontam para modificações e substituição por óleos de origem mineral e sintética. Uma das exigências atuais é que esse fluido seja biodegradável. Com isso, já se utilizam óleos modificados de origem vegetal e água deionizada. As principais funções do dielétrico são: controle da potência de abertura do arco, provocado pela descarga elétrica, remoção das partículas sublimadas da peça, refrigeração da peça e do eletrodo e proteção contra oxidação e contaminação durante e após o processo. Uma das mais importantes propriedades do dielétrico é o ponto de fulgor, que deve ser observado para evitar sérios acidentes. A máquina de eletroerosão deve ter um sistema fechado de abastecimento de dielétrico que possa permitir uma boa filtragem e manter a temperatura desse fluido em torno de 50 °C.

Klocke *et al.* (2004) têm investigado os efeitos de pós em suspensão no dielétrico para influenciar a zona térmica em eletroerosão com pequenas descargas. ZhanBo Yu *et al.* (2004) pesquisaram a eletroerosão a seco na usinagem de carbonetos cementados. B. Casas *et al.* (2006) avaliaram o comportamento de fadiga e fratura em carbonetos cementados usinados por eletroerosão. Na figura 22, mostra-se o fluido dielétrico na cuba da máquina de EDM.



Figura 22 – Uso do fluido dielétrico em EDM.

3 METODOLOGIA

Neste trabalho, o foco é a usinagem por eletroerosão por penetração e este capítulo abordará os procedimentos experimentais conduzidos nos laboratórios de Engenharia Mecânica da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais e serão abordados temas como: material da peça, máquina de eletroerosão, ferramentas, variáveis no processo e avaliação das peças usinadas .

A figura 23 mostra o fluxograma com a seqüência de procedimentos que foram utilizados neste trabalho. Este esquema tem por finalidade planejar e organizar o trabalho investigativo.

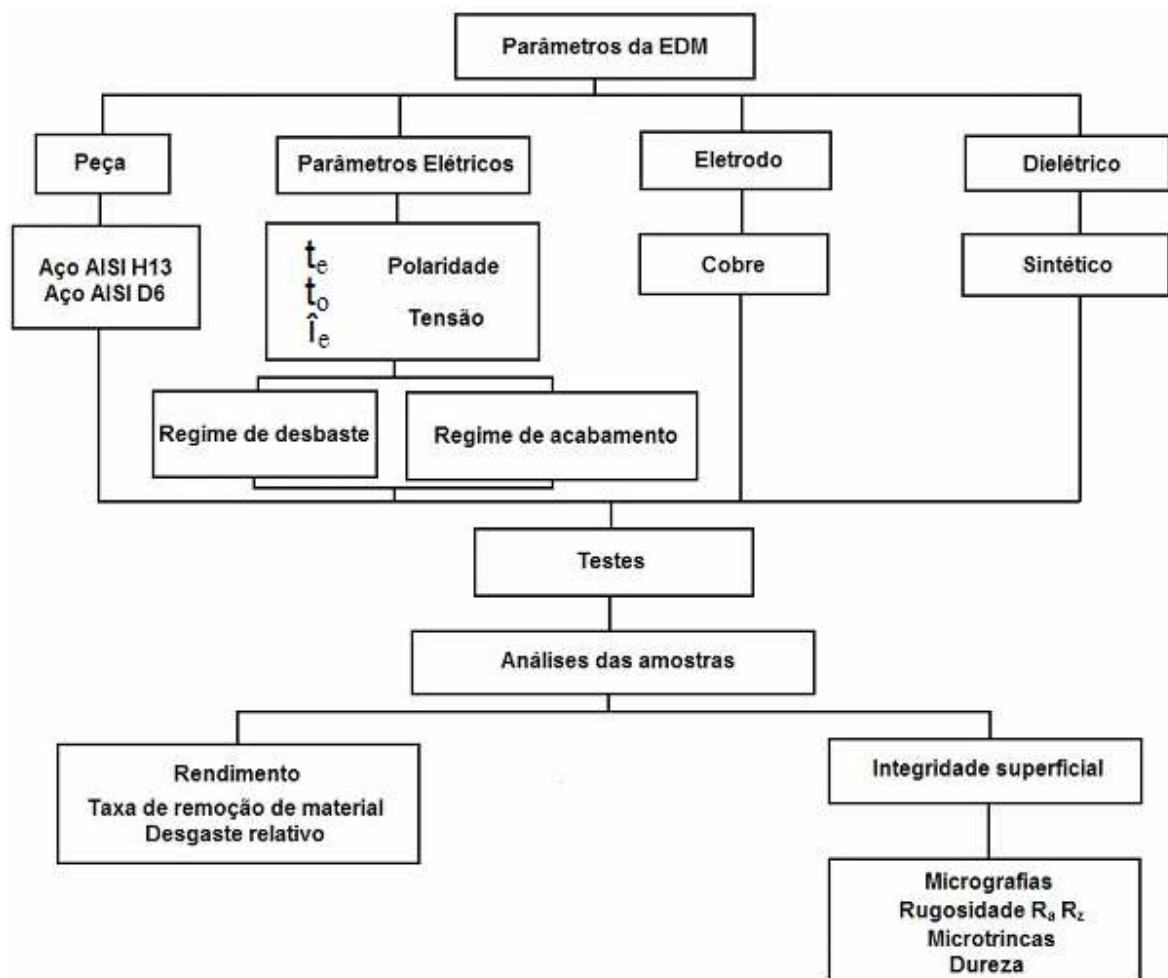


Figura 23 – Fluxograma de planejamento experimental.

3.1 Material do eletrodo-peça

Para a fabricação das amostras de aço AISI H13, foi utilizado material já existente no Laboratório de Usinagem da PUC Minas. Esse material encontrava-se em forma de blocos prismáticos com dimensões de 100mm x 100mm x 100mm, com marcas de corte de serra, não permitindo a identificação do sentido de laminação. Para solucionar esse problema, foi necessário retirar pedaços de material do bloco, preparar amostras e fazer metalografia para identificar o sentido de laminação como é mostrado na figura 24. É importante ressaltar que o outro material usado nos testes, o aço AISI D6, encontrava-se em forma de barras laminadas, o que facilitou a identificação do sentido de laminação.



Figura 24 – Material retirado do bloco prismático do aço AISI H13 para identificar o sentido de laminação.

A composição química do aço AISI H13 foi obtida do certificado de qualidade fornecido pelo fabricante e está mostrada na tabela 1.

Tabela 1

Composição química do aço AISI H13.

C	Mn	Cr	Mo	V	Si
0,40	0,35	5,00	1,5	1,00	1,00

Fonte: Aços Favorit.

A dureza do aço AISI H13 foi avaliada, utilizando o durômetro Vickers/Brinell Heckert. Utilizando carga de 30 Kgf e tempo de 30 segundos, o valor médio de 195 HV foi encontrado entre 5 medições.

O material das amostras do aço AISI D6 foi adquirido no mercado, em estado normalizado, com dureza média 207 HV, medida no durômetro Vickers/Brinell Heckert com carga de 30Kgf e tempo de 30 segundos. A composição química foi obtida no certificado de qualidade, fornecido pelo fabricante e mostrada na tabela 2.

Tabela 2
Composição química do aço AISI D6.

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	W	V
2,12	0,35	0,38	0,023	0,0011	11,50	0,42	0,50	0,70	0,210

Fonte: Aços Favorit.

A tabela 3 mostra a resistividade elétrica e a condutividade térmica de alguns metais e ligas metálicas comerciais que têm por objetivo fornecer valores comparativos na orientação do trabalho.

Tabela 3
Propriedades de materiais de engenharia selecionados [20°C].

MATERIAL	CONDUTIVIDADE TÉRMICA (°C / mm)	RESISTIVIDADE ELÉTRICA (Ω.m)
Aço SAE 1020	0,050	169×10^{-9}
Aço SAE 1040	0,048	171×10^{-9}
Aço SAE 1080	0,046	180×10^{-9}
Cobre eletrolítico	0,40	17×10^{-9}
Ferro (99,9)	0,072	98×10^{-9}
Aço SAE 4340 Beneficiado	–	248×10^{-9}
Aço SAE 4140 Beneficiado	–	220×10^{-9}
Aço inox SAE 304 Re cozido	–	720×10^{-9}

Fonte: Van Vlack, 1984.

A temperatura de fusão desses aços, consultada em catálogo de fabricante, é de aproximadamente 1538°C, não variando de liga para liga (AÇOS FAVORIT).

Inicialmente, foram cortadas 24 amostras do aço AISI D6, a partir de uma barra quadrada de 20mm e 24 amostras do aço AISI H13 do bloco prismático na serra de fita horizontal FRANHO FM 1600, com velocidade de corte de 30m/min, sem uso de fluido de corte, no sentido perpendicular ao de laminação, com dimensões de 20mm x 20mm x 17mm. Após o corte, foram fresadas na espessura de 13mm e rebarbadas. O material foi separado em 4 grupos iguais para tratamento térmico:

- 12 amostras normalizadas com alívio de tensão com aquecimento na temperatura de 650 °C, tempo de encharque de 20 minutos e resfriamento dentro do próprio forno do aço AISI D6.

- 12 amostras beneficiadas com têmpera com aquecimento na temperatura de 1000 °C, tempo de encharque de 20 minutos e resfriamento brusco em óleo de têmpera. Depois da têmpera, foi feito revenimento duplo a 500 °C, tempo de encharque de 20 minutos e resfriamento dentro do próprio forno do aço AISI D6.

- 12 amostras normalizadas com alívio de tensão, com aquecimento na temperatura de 650 °C, tempo de encharque de 20 minutos e resfriamento dentro do próprio forno do aço AISI H13.

- 12 amostras beneficiadas com têmpera, com aquecimento na temperatura de 1000 °C, tempo de encharque de 20 minutos e resfriamento brusco em óleo de têmpera. Depois da têmpera, foi feito revenimento duplo a 500 °C, tempo de encharque de 20 minutos e resfriamento dentro do próprio forno do aço AISI H13.

O tratamento térmico das amostras foi realizado no Laboratório de Materiais de Construção Mecânica, com as informações retiradas do diagrama de seqüência de processamento, mostrado nas figuras 25 e 26.

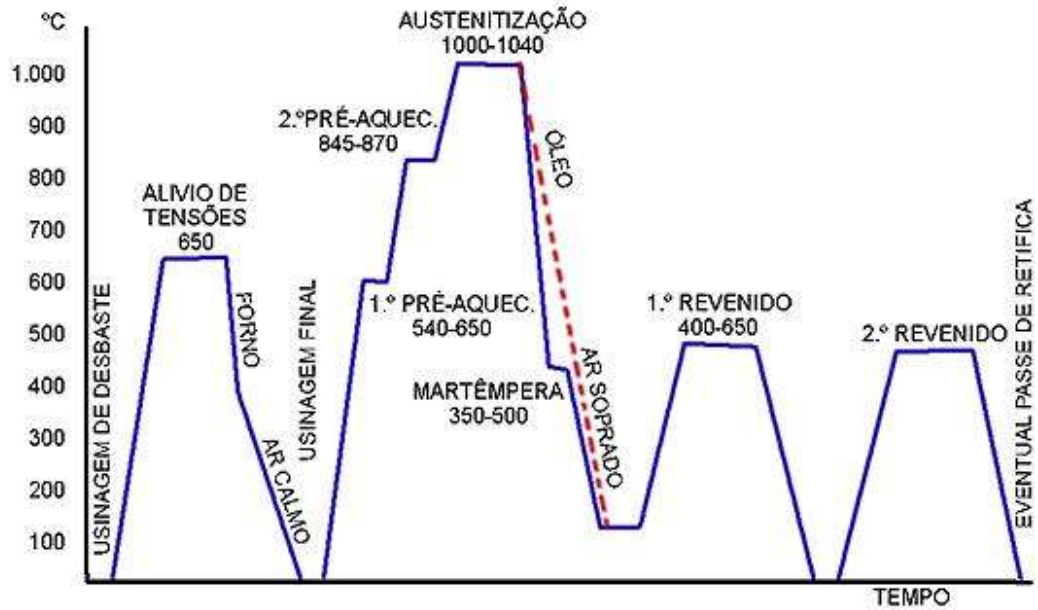


Figura 25 – Seqüência de processamento para tratamento térmico do aço AISI H13.

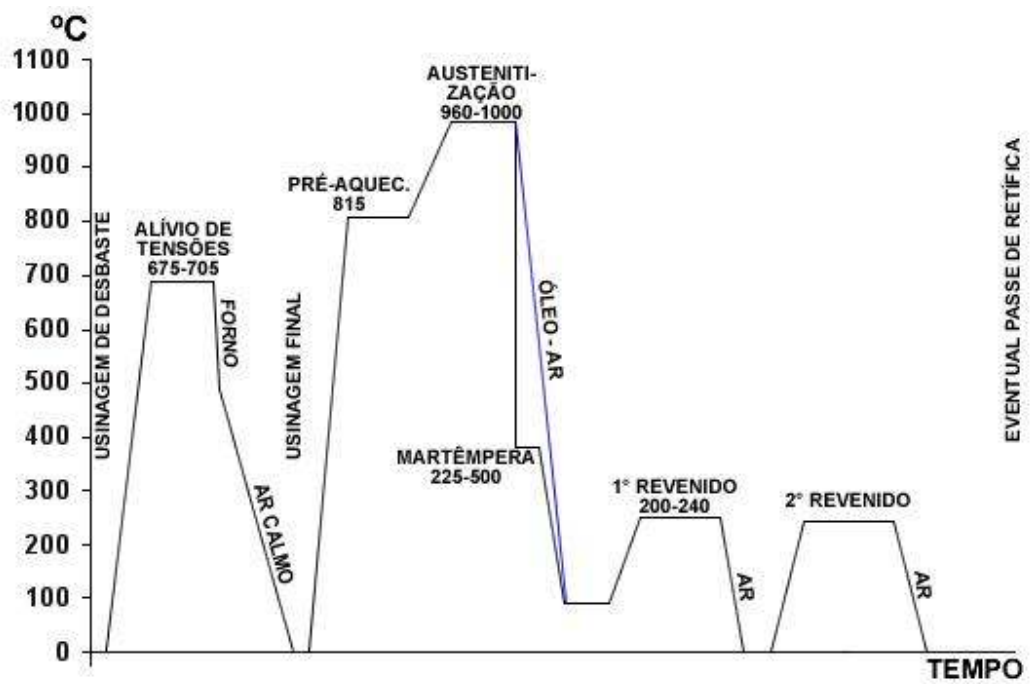


Figura 26 – Seqüência de processamento para tratamento térmico do aço AISI D6.

A figura 27 mostra o forno elétrico utilizado nos tratamentos térmicos das amostras.



Figura 27– Forno elétrico 400C LAVOISIER.

Após o tratamento térmico, as peças foram retificadas em uma retificadora plana tangencial marca Sulmecânica que usa um rebolo DA 46 L 5 V com diâmetro de 200mm e espessura de 19mm, como mostrado na figura 28, para garantir paralelismo e espessuras iguais.



Figura 28 – Processo de retificação plana tangencial. Foto retirada no Laboratório de Usinagem do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais.

Utilizando-se o durômetro Vickers/Brinell Heckert, com carga de 30Kgf e tempo de 30 segundos, foi medido a dureza média de 5 medições das amostras tratadas termicamente, informadas na tabela 4.

Tabela 4
Dureza Vickers da amostras tratadas termicamente.

Material	Dureza HV
Aço AISI D6 Normalizado	198
Aço AISI D6 Beneficiado	587
Aço AISI H13 Normalizado	145
Aço AISI H13 Beneficiado	526

3.2 Máquina de eletroerosão

A máquina de eletroerosão por penetração é fabricada pela Engemac modelo 440 NC série L. Essa máquina possui cabeçote porta-eletrodo-ferramenta com movimento no eixo Z através de guias lineares e fuso de esferas recirculantes, acionado por motor de passo e capacidade para eletrodos-ferramenta de até 60 kg. A programação da operação é feita no painel por meio de microprocessador, controlado pelo teclado de membrana que possui teclas individuais, *display* de cristal líquido e *display* de parâmetros para visualização. As mesas são apoiadas por meio de rolamentos lineares sobre guias temperadas e retificadas para garantir durabilidade e precisão dos movimentos e posicionamentos. A bandeja de trabalho, também denominada de cuba, tem abertura lateral e frontal e foi pintada com tinta epóxi. A potência total, informada no manual da máquina pelo fabricante, é de 6,5 KVA. A figura 29 mostra a máquina de eletroerosão por penetração do Laboratório de Usinagem da PUC Minas.



Figura 29 – Máquina de Eletroerosão por penetração ENGEMAQ 440 CN do Laboratório de Usinagem da PUC Minas.

O dispositivo de fixação das amostras foi construído em aço SAE 1020, utilizando os recursos de usinagem convencional e soldagem, sendo que sua base e sua superfície de apoio das amostras foram retificadas. É importante ressaltar que um dos fatores que influenciam nos resultados da eletroerosão é a fixação da peça. Problemas de contato elétrico e formação de carvão podem ser evitados se essa fixação for feita em conformidade.

Sobre a cuba da máquina, na mesa, foi montado o dispositivo para fixação das amostras, representado pelo desenho mostrado na figura 30.

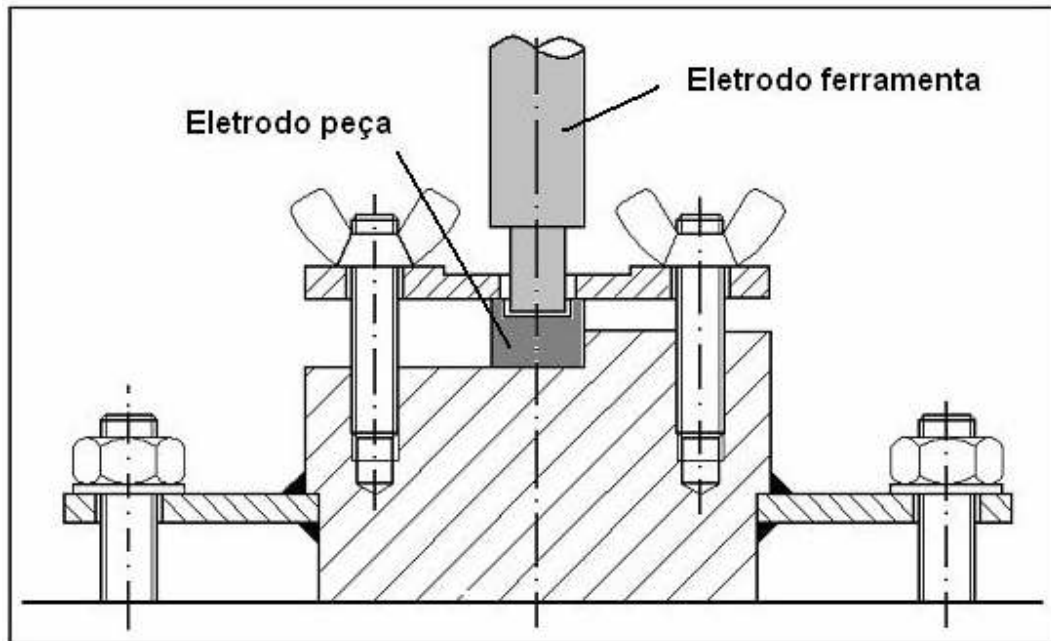


Figura 30 – Dispositivo de fixação das amostras (Escala 1:1,25).

Foi utilizado o fluido dielétrico ARCLEAN ELETRON da Archem, observando sua data de validade e suas propriedades, bem como as condições de armazenamento. A capacidade do tanque da máquina é de 420 litros de fluido dielétrico que trabalha em uma pressão máxima de $1,8 \text{ Kg / cm}^2$ por meio de uma bomba de que tem a potência de 0,75 CV (552 W) e vazão média de 4000 L/h. O sistema de filtragem é composto por dois filtros cartucho que têm capacidade de filtragem de $5 \mu\text{m}$, sendo que esses foram substituídos por novos no início dos testes.

3.3 Eletrodo-ferramenta

Os eletrodos-ferramenta, utilizados nos experimentos, são de cobre eletrolítico e foram usinados em formato cilíndrico com dimensões de 12,5mm de diâmetro por 30mm de comprimento, apresentando canto vivo e sem rebarbas, num total de 12 peças. Todo esse material foi adquirido em empresas especializadas que fornecem junto com o material o certificado de aprovação com a composição química

correspondente. Para fixação do eletrodo-ferramenta, no cabeçote da máquina de eletroerosão, foi fabricada uma pinça de latão fundido, mostrada na figura 31.

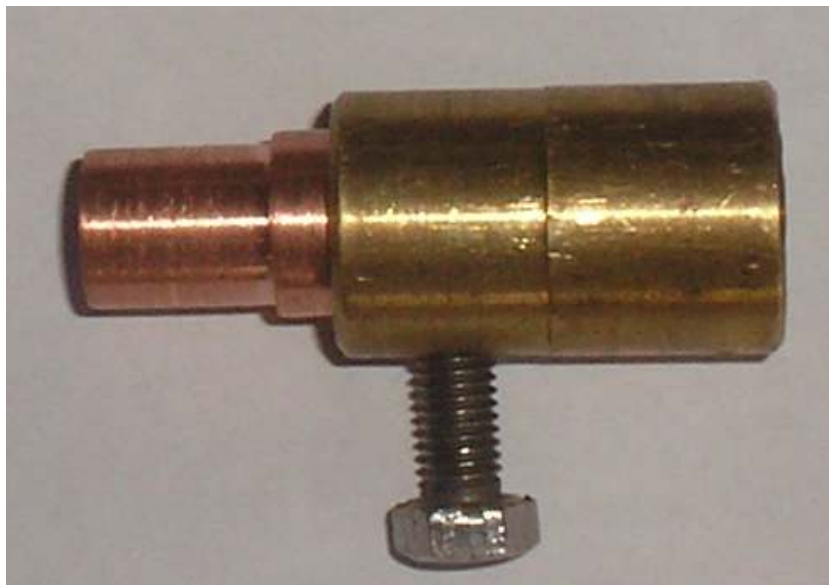


Figura 31 – Pinça de latão fundido para fixação do eletrodo-ferramenta (Escala 2:1).

Na tabela 5, mostram-se propriedades físicas do cobre eletrolítico (ARANTES, 2007).

Tabela 5
Propriedades físicas do cobre eletrolítico.

Propriedades	Valor	Unidade
Peso específico	8,9	g/cm ³
Ponto de fusão	1083	° C
Resistividade elétrica	0,0167	Ωmm
Condutividade térmica relativa	94,3	%
Condutividade elétrica relativa	96,3	%

Fonte: Arantes, 2007.

Todas as amostras e eletrodos-ferramenta foram pesados em uma balança eletrônica com resolução de 10^{-4} g, marca BIOPRECISA FA 2104N, mostrada na figura 32.



Figura 32 – Balança eletrônica BIOPRECISA FA 2104N, pertencente à PUC Minas – Contagem.

Essa balança foi utilizada durante todo o processo, com verificações periódicas de seu nivelamento. Para que não fosse afetada pelos campos eletromagnéticos gerados pela máquina de eletroerosão, ela foi mantida em outro ambiente distante da máquina de EDM.

Os resultados dos cálculos da taxa de remoção de material V_w foram obtidos a partir do volume removido da amostra, dado em mm^3 , dividido pelo tempo da operação, dado em minutos. Para transformar o peso removido em cada amostra em volume, foi utilizada a massa específica do aço que é de $0,00785 \text{ g/mm}^3$.

O desgaste do eletrodo-ferramenta foi calculado dividindo-se o volume gasto, dado em mm^3 , pelo tempo em minutos. Para se transformar o peso gasto do eletrodo ferramenta, dado em gramas, em volume gasto, foi usada a massa específica do cobre eletrolítico que é de $0,00889 \text{ g/mm}^3$.

O cálculo da relação de desgaste é feito dividindo-se o volume gasto do eletrodo-ferramenta pelo volume retirado do eletrodo-peça. Os resultados devem ser expressos em valores percentuais. Esses resultados são importantes para

acompanhamentos de processo de fabricação, principalmente para evitar consumo exagerado dos eletrodos.

3.4 Parâmetros de usinagem

Para a determinação de uma variabilidade estimada, o percentual de replicação deve ser de 75 a 88% e, para se obter esse valor, o número de testes deve ser de 6 a 12, no caso de testes de desenvolvimento e de pesquisa (LEE, 2005). Neste trabalho, os testes foram repetidos seis vezes e a quantidade de TS (*Transistor Standard*) define a quantidade de corrente \hat{I}_e e a densidade de corrente média é definida como mostrado na equação 3.1:

$$1TS = 3 \text{ Amperes (ENGEMAQ, 2006)}. \quad (3.1)$$

Na eletroerosão, foram adotados dois regimes de trabalho: Acabamento e Desbaste. Os parâmetros para se obter acabamento foram $t_e = 20 \mu s$, $t_o = 76$ e $TS = 2$ ($\hat{I}_e = 6$ Amperes). Os parâmetros para desbaste foram de $t_e = 100 \mu s$, $t_o = 89$ e $TS = 6$ ($\hat{I}_e = 18$ Amperes). Esses valores foram retirados do manual de operações da máquina de eletroerosão (ENGEMAQ, 2006).

Nos testes de eletroerosão, foi utilizado o eletrodo-ferramenta, com polaridade positiva e os tempos de eletroerosão foram de 10, 20, 30 e 40 minutos para acabamento e 5, 10, 15 e 20 minutos para desbaste. Para se chegar a esses valores de tempos, foram feitos testes preliminares com o objetivo de observar a formação de uma cavidade que possibilitasse as avaliações posteriores. As peças e os eletrodos nos testes foram submetidos a análises de pesagem 5 vezes, antes e depois da eletroerosão, para se obter um valor de peso confiável.

A usinagem por eletroerosão por penetração foi feita no sentido perpendicular ao da espessura das amostras, sendo que, primeiramente, em uma das faces, foram adotados os parâmetros para proporcionar menor rugosidade e na outra face os

parâmetros usados foram os que produziram superfícies com maior rugosidade. Essas escolhas foram feitas diante dos resultados obtidos em testes anteriores.

Foram observados alinhamento e paralelismo na fixação das amostras no dispositivo e também na fixação do eletrodo e da pinça. Remoções de rebarbas, óxidos e impurezas foram feitas para que houvesse o mínimo de interferência nos trabalhos e nos resultados. O nível de fluido dielétrico na cuba ficou em uma altura acima da altura das amostras em aproximadamente 20mm e a pressão da bomba foi regulada em 0,5 Kgf/cm². A temperatura média do fluido dielétrico, durante todos os procedimentos experimentais, foi de 23° C.

3.4 Avaliação da topografia das peças eletroerodidas

Na figura 33, mostra-se a régua demonstrativa de rugosidade fixada no painel de comando da máquina de eletroerosão Engemaq EDM 440 NC que tem por finalidade relacionar alguns tipos de acabamento superficiais com alguns parâmetros de eletroerosão, fornecidos pelo fabricante do equipamento.



Figura 33 – Régua demonstrativa de rugosidade da Máquina de Eletroerosão por penetração ENGEMAC 440 NC.

A rugosidade das superfícies das amostras erodidas foi avaliada com o rugosímetro de contato Surtronic 3+ TAYLOR HOBSON, mostrado na figura 34.



Figura 34 – Rugosímetro Surtronic 3+ TAYLOR HOBSON.

De acordo com a norma alemã VDI 3402, os parâmetros de rugosidade coletados, e utilizados como referência, para avaliação da textura superficial em peças fabricadas por eletroerosão são: R_a , definida como a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamento dos pontos do perfil de rugosidade, em relação à linha média, dentro do percurso de medição, dada em μm ; R_z , definida como a média aritmética dos cinco valores da rugosidade parcial, dada em μm . Nos testes de avaliação da rugosidade, foi utilizado filtro Gaussiano com *cut-off* de 0,8 mm. Em cada amostra, a medida da rugosidade foi verificada três vezes em posições diferentes e calculada a média.

3.6 Análise micrográfica

A metodologia para a sequência de micrografia foi constituída de corte das amostras no Discotom com disco diamantado e refrigeração à água, embutimento a quente em resina à base de baquelite, com tempo de 10 minutos, na máquina de embutir, como mostrada na figura 35.



Figura 35 – Máquinas para embutimento Panpress 30 PANTEC.

As amostras embutidas foram submetidas a processo de lixamento em politriz, utilizando lixas d'água 220, 320, 400, 600 e 1000, respectivamente. Após o lixamento, as amostras passaram por um processo de polimento, utilizando o primeiro pano DUR, com pasta diamantada de $15\mu\text{m}$, o segundo pano MOL, com pasta diamantada de $7\mu\text{m}$ e o último pano NAP, com pasta diamantada de $1\mu\text{m}$. Para aços-ferramenta, o ataque químico deve ser com solução de Nital a 2%. Concentrações muito fortes aumentam a velocidade do ataque, dificultando o controle (ASM, 2004). Para visualização das amostras, foi feito ataque químico, usando Nital com 2%. A microscopia ótica foi realizada no banco metalográfico NEOPHOT 21, mostrada na figura 36.



Figura 36 – Banco metalográfico NEOPHOT 21.

A topografia das superfícies das amostras submetidas à eletroerosão por penetração foram avaliadas e fotografadas no Microscópio Eletrônico de Varredura MEV, JEOL JSM – 5310 do Laboratório de Microscopia Eletrônica do CDTN - Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear - mostrado na figura 37.



Figura 37 – Microscópio Eletrônico de Varredura JEOL JSM – 5310 Scanning Microscope do C.D.T.N Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear.

3.7 Análise de Microdureza

Na microscopia ótica, a zona branca e o substrato são evidentes nas amostras analisadas. No entanto, a extensão da zona termicamente afetada não é visualizada. Os ensaios de microdureza, com intervalos controlados das impressões, permitem uma melhor avaliação das dimensões dessa região. Foram utilizados, para esses testes, três amostras de cada tipo de aço, tanto normalizado quanto beneficiado e essas foram embutidas para garantir paralelismo e visualização. Esses testes não puderam ser realizados no Laboratório de Materiais de Construção Mecânica da PUC Minas, pois a menor carga do microdurômetro é de 200 gf que gera uma impressão maior que a espessura da zona branca.

Os ensaios de microdureza Vickers foram feitos no Microdurômetro FUTURE TECH FM 700 Microhardness Tester, mostrado na figura 38, com carga de 50 gf e tempo de aplicação de 15 segundos. Este equipamento está localizado no Laboratório de Metalografia / Microscopia do Setor de Tecnologia Metalúrgica / SDT do CETEC – Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais.



Figura 38 – Microdurômetro FUTURE TECH FM 700 do Setor de Tecnologia Metalúrgica do CETEC.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo tem por objetivo apresentar os efeitos da modificação e das variações do material da peça e dos tratamentos térmicos na taxa de remoção de material, no desgaste do eletrodo, na relação de desgaste, na qualidade e integridade superficial e na dureza das peças submetidas à eletroerosão por penetração. Realizaram-se avaliações e análises estatísticas das peças e eletrodos utilizados e todos esses dados foram avaliados e compilados para confecção de gráficos, cujos procedimentos estatísticos de métodos experimentais forneceram as informações para as análises e para as discussões dos resultados.

4.1 Variação do material do eletrodo-peça

4.1.1 Remoção de material do eletrodo-peça

Na figura 39, mostra-se gráfico que informa a quantidade de material removido das amostras dos aços AISI H13 e AISI D6, normalizados, com variação dos parâmetros do processo depois de 40 minutos de teste. São apresentadas tabelas com o desvio padrão, maior valor, menor valor e média em cada situação de teste.

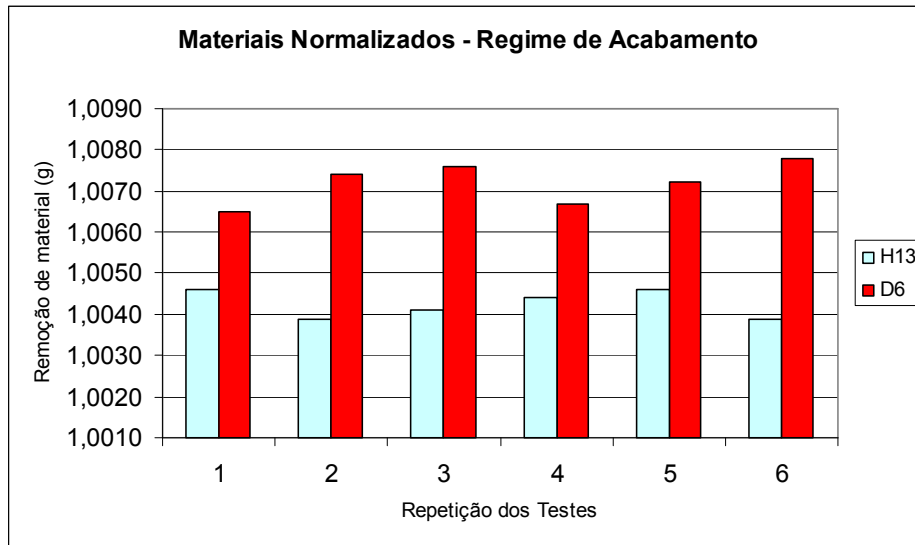


Figura 39 – Amostras dos aços AISI H13 e AISI D6 normalizadas, eletroerodidas no regime de acabamento durante 40 minutos.

Tabela 6

Dados estatísticos das amostras dos aços AISI H13 e AISI D6 normalizadas, eletroerodidas no regime de acabamento durante 40 minutos.

	Maior valor (g)	Menor valor (g)	Média (g)	Desvio padrão (g)
H13	1,0046	1,0039	1,0043	0,00032711
D6	1,0078	1,0065	1,0072	0,00050990

Os valores de variabilidade (dispersão em torno do valor médio) mostram que os resultados tiveram poucas oscilações durante os testes. Na figura 40 e na tabela 7, são mostrados os resultados da usinagem por eletroerosão de amostras dos aços AISI H13 e AISI D6, normalizadas, em regime de desbaste, depois de 20 minutos de teste.

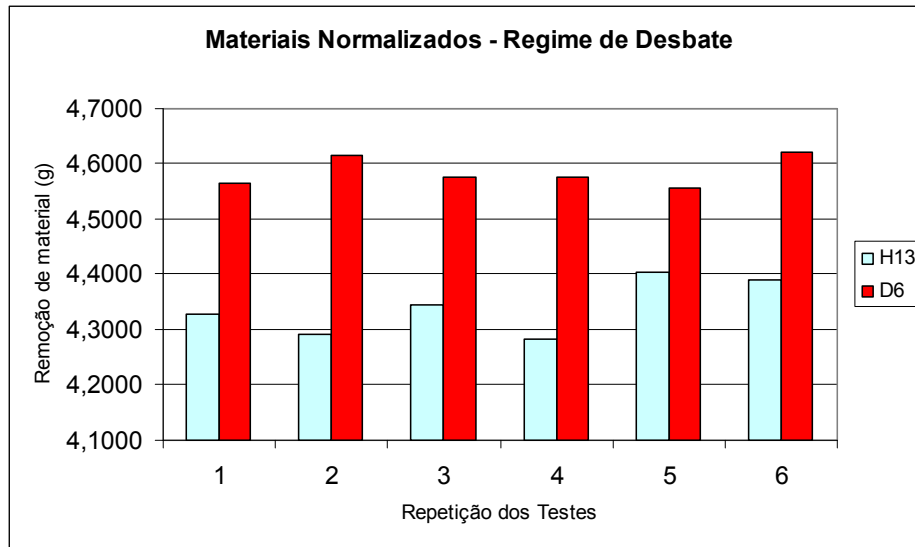


Figura 40 – Amostras dos aços AISI H13 e AISI D6, normalizadas, eletroerodidas no regime de desbaste durante 20 minutos.

Tabela 7

Dados estatísticos das amostras dos aços AISI H13 e AISI D6, normalizadas, eletroerodidas no regime de desbaste durante 20 minutos.

	Maior valor (g)	Menor valor (g)	Média (g)	Desvio padrão (g)
H13	4,4037	4,2838	4,3404	0,04923387
D6	4,621	4,5561	4,5848	0,02679700

Na figura 41 e na tabela 8, são mostrados resultados da pesagem das amostras dos aços AISI H13 e AISI D6, beneficiadas, usinadas por eletroerosão em regime de acabamento, depois de 40 minutos.

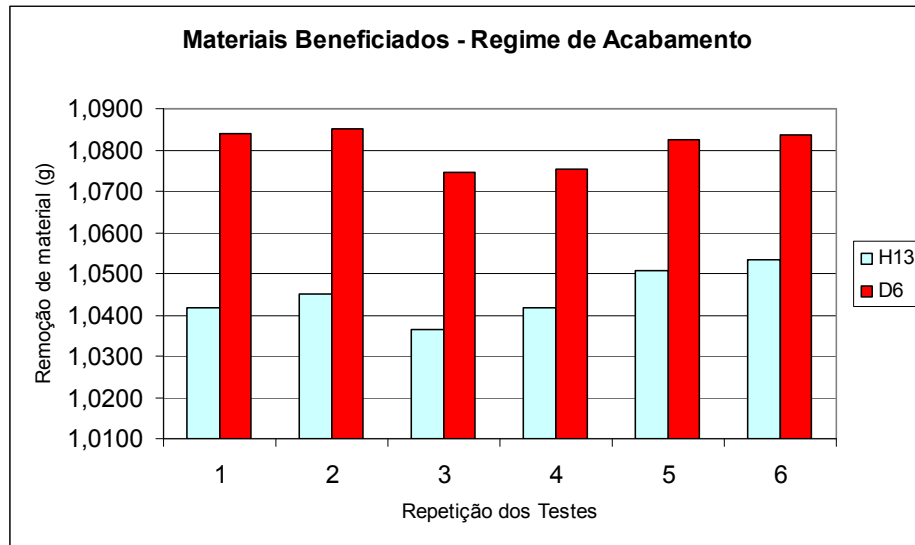


Figura 41 – Amostras dos aços AISI H13 e AISI D6 beneficiadas, eletroerodidas no regime de acabamento, durante 40 minutos.

Tabela 8

Dados estatísticos das amostras dos aços AISI H13 e AISI D6, beneficiadas, eletroerodidas no regime de acabamento, durante 40 minutos.

	Maior valor (g)	Menor valor (g)	Média (g)	Desvio padrão (g)
H13	1,0535	1,0365	1,0449	0,00633172
D6	1,085	1,0746	1,0808	0,00461346

A figura 42 e a tabela 9 mostram valores da pesagem das amostras dos aços AISI H13 e D6, beneficiadas, eletroerodidas, em regime de desgaste, por 20 minutos.

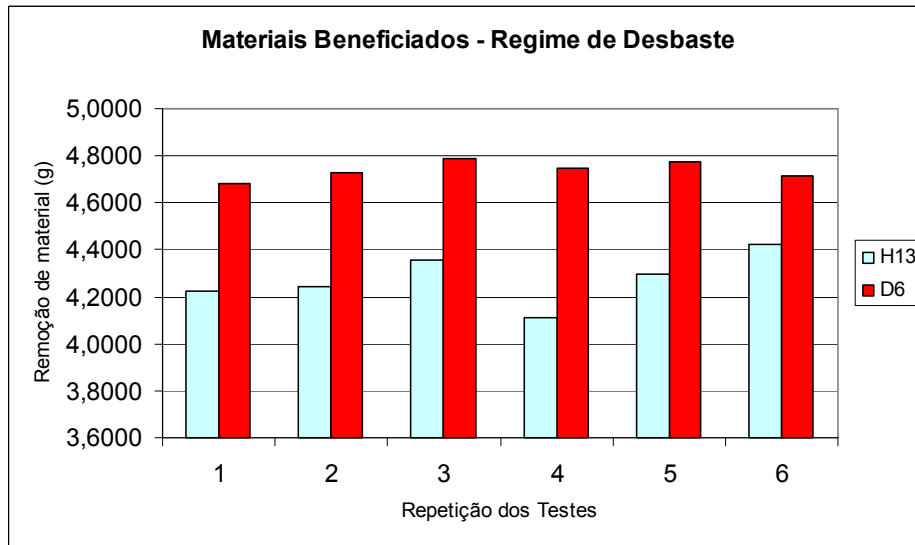


Figura 42 – Amostras dos aços AISI H13 e AISI D6 beneficiadas, eletroerodidas no regime de desbaste, durante 20 minutos.

Tabela 9

Dados estatísticos das amostras dos aços AISI H13 e AISI D6 beneficiadas, eletroerodidas no regime de desbaste, durante 20 minutos.

	Maior valor (g)	Menor valor (g)	Média (g)	Desvio padrão (g)
H13	4,4256	4,1137	4,2774	0,10868232
D6	4,7851	4,6801	4,7373	0,03915482

Nos regimes de desbaste e de acabamento, tanto para a condição de normalizado quanto beneficiado, o que se observou foi que o aço AISI D6, independente do tempo, teve uma maior quantidade de material removido. Esse fato pode ser atribuído à composição química deste material, que difere significativamente em percentual de carbono e cromo. Os carbonetos desse material são verificados na micrografia e têm formações diferenciadas. As contribuições das frações volumétricas destes constituintes afetam na resistividade elétrica que, segundo Amorim (2002), tem um papel fundamental no processo de eletroerosão. Outra discussão é em relação à evolução dos contaminantes que se formam durante o processo, passando a alterar as características iniciais do dielétrico. Em relação à temperatura de fusão dos dois materiais analisados, pouco pode ser atribuído a ela, pois as diferenças encontradas na literatura são de pouca relevância.

4.1.2 Remoção de material do eletrodo-ferramenta

Os eletrodos-ferramenta foram pesados antes e depois de efetuarem a usinagem por eletroerosão e os valores, em gramas, foram utilizados na confecção dos gráficos comparativos e na construção de tabelas para análise estatística. A figura 43 e a tabela 10 mostram esses dados na usinagem de amostras dos aços AISI H13 e AISI D6, normalizadas, em regime de acabamento.

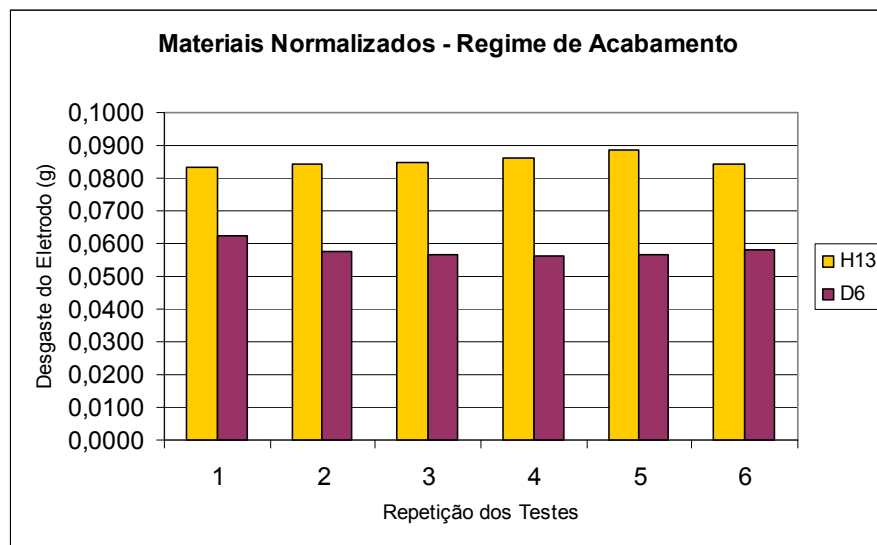


Figura 43 – Desgaste do eletrodo-ferramenta na usinagem por eletroerosão por penetração de amostras normalizadas dos aços AISI H13 e AISI D6, em regime de acabamento, durante 40 minutos.

Tabela 10

Dados estatísticos do desgaste dos eletrodos-ferramenta na eletroerosão dos aços AISI H13 e AISI D6, normalizados, em regime de acabamento, durante 40 minutos.

	Maior valor (g)	Menor valor (g)	Média (g)	Desvio padrão (g)
H13	0,0885	0,0831	0,0853	0,00189596
D6	0,0624	0,0562	0,0579	0,00229928

De acordo com a figura 44 e a tabela 11, observa-se que o desgaste do eletrodo-ferramenta manteve-se uniforme, tanto para as amostras de aço AISI H13 quanto para as dos aços AISI D6 durante todas as repetições dos testes. Na usinagem

por eletroerosão do aço AISI H13, o desgaste do eletrodo-ferramenta foi maior. A figura 44 e a tabela 11 apresentam resultados dos materiais normalizados usinados em regime de desbaste, durante 20 minutos.

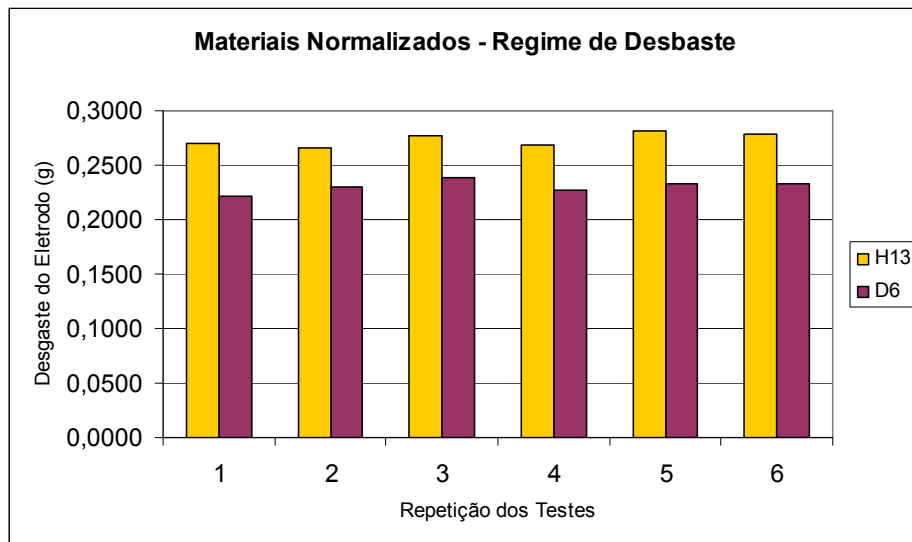


Figura 44 – Desgaste do eletrodo-ferramenta na usinagem por eletroerosão de amostras normalizadas dos aços AISI H13 e AISI D6 em regime de desbaste, durante 20 minutos.

Tabela 11

Dados estatísticos do desgaste dos eletrodos-ferramenta na eletroerosão dos aços AISI H13 e AISI D6 normalizados, em regime de desbaste, durante 20 minutos.

	Maior valor (g)	Menor valor (g)	Média (g)	Desvio padrão (g)
H13	0,2811	0,2664	0,2737	0,00612133
D6	0,2389	0,222	0,2305	0,00573495

Os resultados dos desgastes dos eletrodos-ferramenta continuam uniformes no regime de desbaste, mantendo-se maior quando usinando o aço AISI H13. A figura 45 e a tabela 12 mostram o desgaste dos eletrodos-ferramenta na usinagem por eletroerosão em amostras dos aços AISI H13 e AISI D6 beneficiados, em regime de acabamento, depois de 40 minutos.

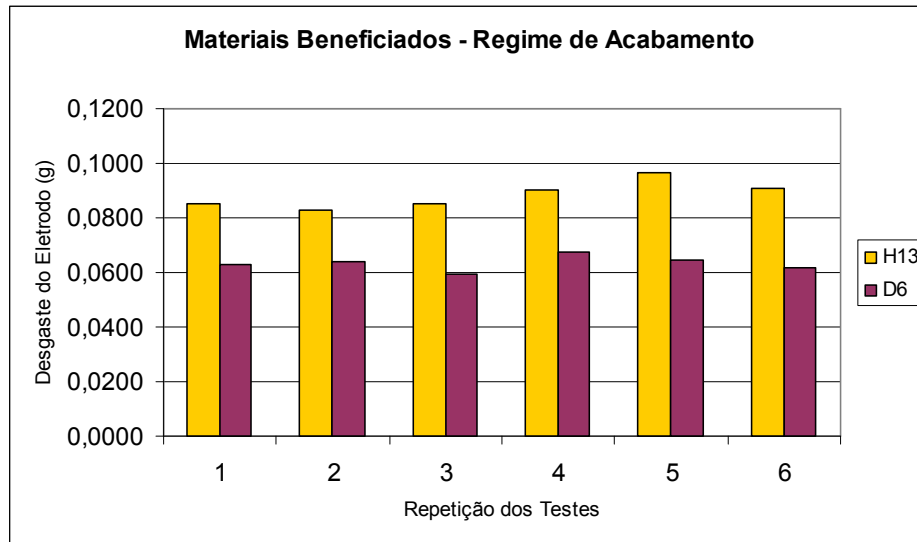


Figura 45 – Desgaste dos eletrodos-ferramenta na usinagem por eletroerosão de amostras beneficiadas dos aços AISI H13 e AISI D6 em regime de acabamento, durante 40 minutos.

Os resultados do gráfico indicam que na eletroerosão do aço AISI D6 Beneficiado o desgaste do eletrodo é linear e menor que quando usinando o aço AISI H13.

Tabela 12

Dados estatísticos do desgaste dos eletrodos-ferramenta na eletroerosão dos aços AISI H13 e AISI D6 beneficiados, em regime de acabamento, durante 40 minutos.

	Maior valor (g)	Menor valor (g)	Média (g)	Desvio padrão (g)
H13	0,0967	0,0829	0,0885	0,00507569
D6	0,0674	0,0595	0,0633	0,00265361

A variabilidade é maior no caso dos valores de desgaste do eletrodo-ferramenta quando se usina o aço AISI H13. São mostrados, nas figuras 46 e na tabela 13, resultados de desgaste dos eletrodos-ferramenta e dados estatísticos quando submetido a usinagem por eletroerosão dos aços AISI H13 e AISI D6, beneficiados, em regime de desgaste.

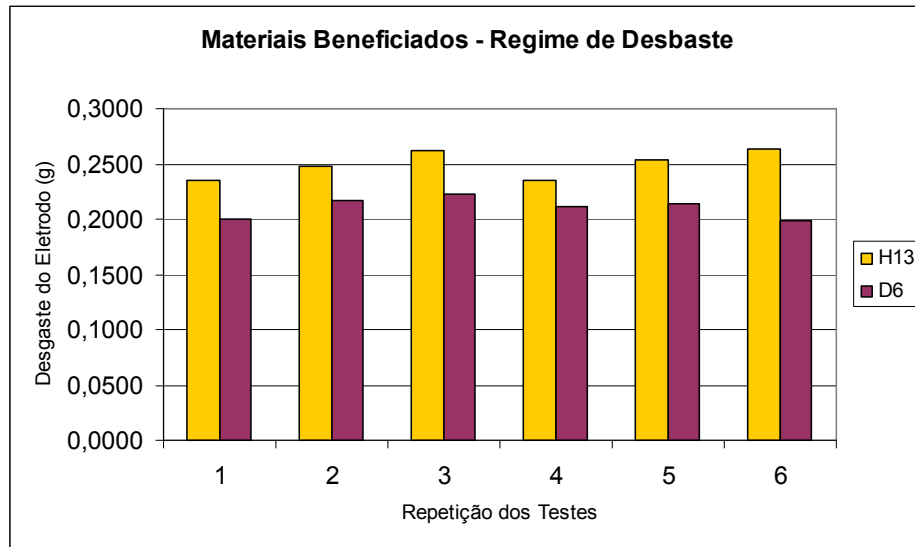


Figura 46 – Desgaste dos eletrodos-ferramenta na usinagem por eletroerosão de amostras beneficiadas dos aços AISI H13 e AISI D6, em regime de desbaste, durante 20 minutos.

O desgaste do eletrodo-ferramenta foi maior em todas as seis vezes do teste na usinagem do aço AISI H13, beneficiado, no regime de desbaste.

Tabela 13

Dados estatísticos do desgaste dos eletrodos-ferramenta na eletroerosão dos aços AISI H13 e AISI D6 beneficiados, em regime de desbaste, durante 20 minutos.

	Maior valor (g)	Menor valor (g)	Média (g)	Desvio padrão (g)
H13	0,2636	0,2348	0,2495	0,01271749
D6	0,2225	0,1979	0,2104	0,00980886

Foram encontrados índices de variabilidade maior nos resultados do desgaste do eletrodo-ferramenta na usinagem por eletroerosão por do aço AISI H13, conforme mostrado nas tabelas 12 e 13.

Nesses materiais testados, foi observado um desgaste mais uniforme do eletrodo-ferramenta, assim como pouca presença de subprodutos do dielétrico aderidos sobre a superfície da peça. Uma das possíveis causas do maior desgaste do eletrodo-ferramenta, ao usar o aço AISI H13, pode estar associado à microestrutura desse material, que apresenta frações volumétricas de constituintes químicos que alteram a condutividade elétrica e térmica. Para conseguir vencer a resistividade

desse aço, que tem teores de carbono inferiores ao do aço AISI D6, a energia fornecida é maior e faz com que se eleve a temperatura do canal de plasma. A consequência deste acréscimo de temperatura é a maior perda de massa que acontece no eletrodo-ferramenta.

4.1.3 Taxa de Remoção de Material

As figuras 47 e 48 mostram que nos regimes de desbaste e acabamento na usinagem por eletroerosão das amostras normalizadas, o aço AISI D6 teve uma taxa de remoção de material pouco acima do aço AISI H13. Nessas situações, as diferenças nas curvas dos gráficos são muito pequenas.

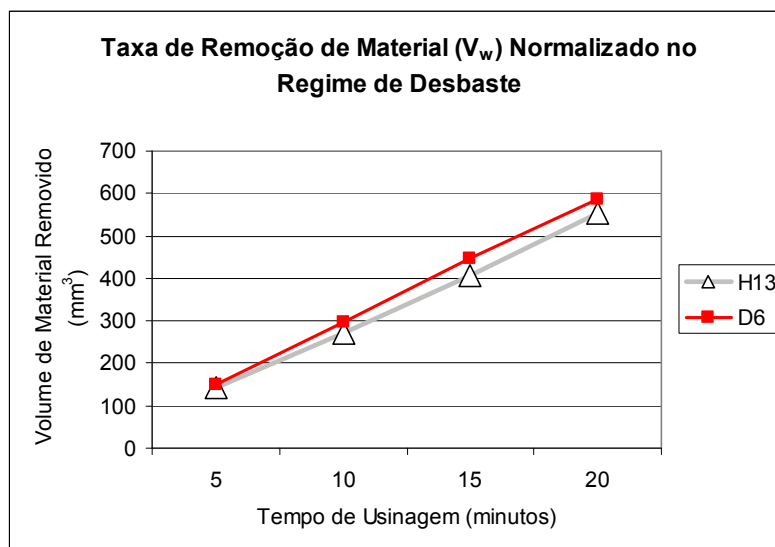


Figura 47 – Taxa de remoção de material normalizado no regime de desbaste.

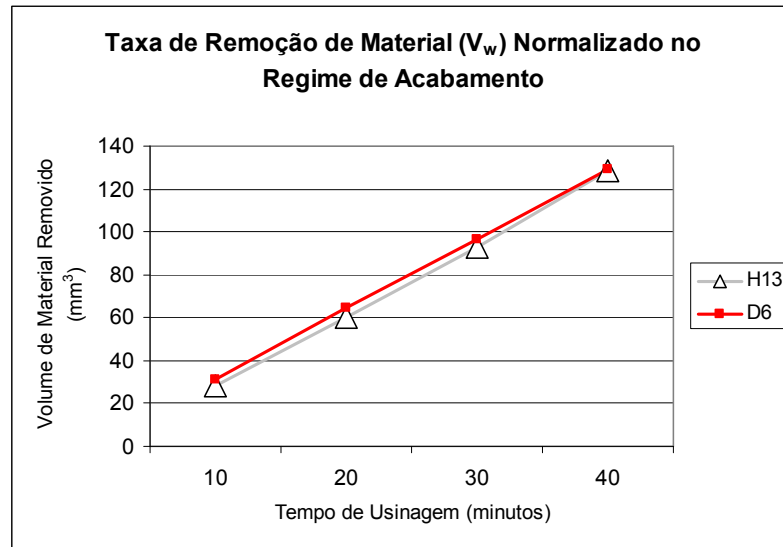


Figura 48 – Taxa de remoção de material normalizado no regime de acabamento.

No regime de desbaste das amostras beneficiadas o aço AISI D6, obteve-se um ganho na taxa de remoção de material em relação ao aço AISI H13 que se acentuou mais depois de 20 minutos de operação e isso é mostrado na figura 49. No regime de acabamento, praticamente não houve diferença na taxa de remoção das amostras beneficiadas, como é mostrado na figura 50.

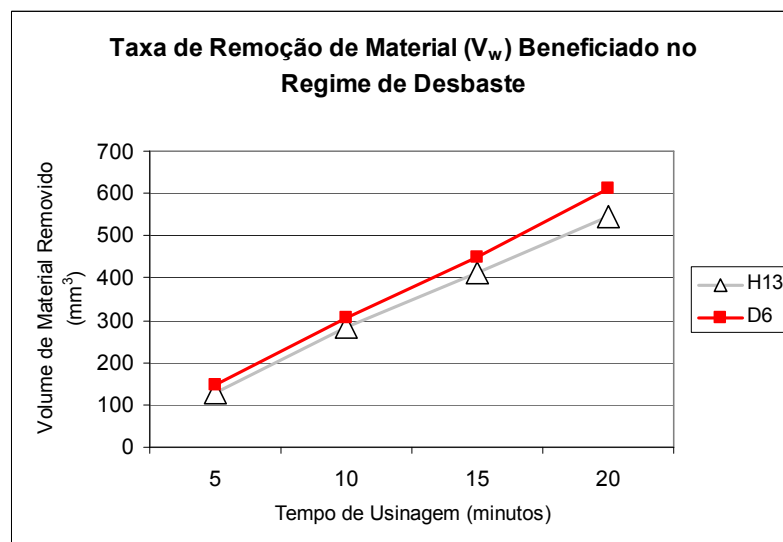


Figura 49 – Taxa de remoção de material beneficiado no regime de desbaste.

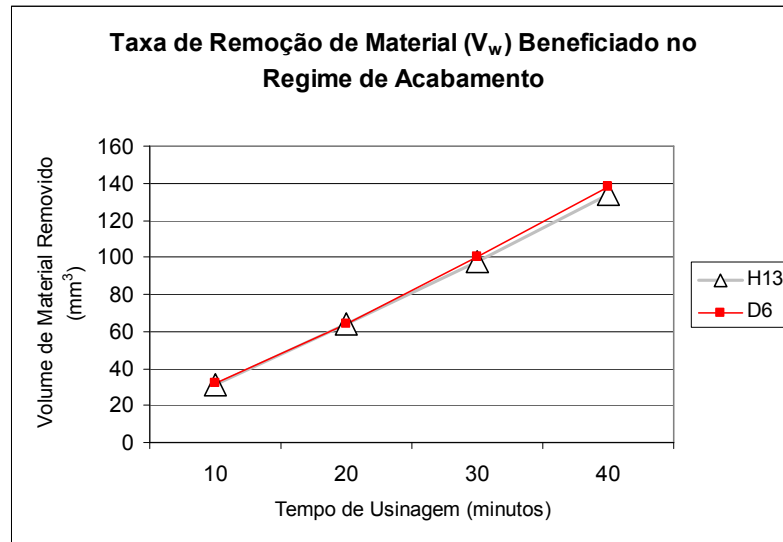


Figura 50 – Taxa de remoção de material beneficiado no regime de acabamento.

Em uma observação mais detalhada do comportamento das curvas das taxas de remoção de material, independente do regime de trabalho ou do tratamento térmico, verifica-se uma ascensão gradual nos dois aços, com diferenças pouco significativas. Normalmente, materiais que apresentam alta condutividade térmica exibem menores taxas de remoção de material. Isso se deve, em primeiro plano, ao fato de o material com maior condutividade térmica dispersar mais rapidamente a energia fornecida durante a descarga (AMORIM, 2002). Como segunda observação, sugere-se também que os elementos de liga presentes no aço AISI D6 também agem de forma a promover maiores valores de taxa de remoção de material, no entanto, cabe ressaltar que König & Klocke (1997) argumentaram que ainda não era possível explicar detalhadamente a influência dos elementos de liga em relação às características de erodibilidade dos materiais.

4.1.4 Desgaste do eletrodo-ferramenta

As figuras 51 e 52 mostram que na usinagem por eletroerosão, em regime de desbaste e acabamento das amostras normalizadas no aço AISI H13, o desgaste do eletrodo-ferramenta foi maior que no aço AISI D6.

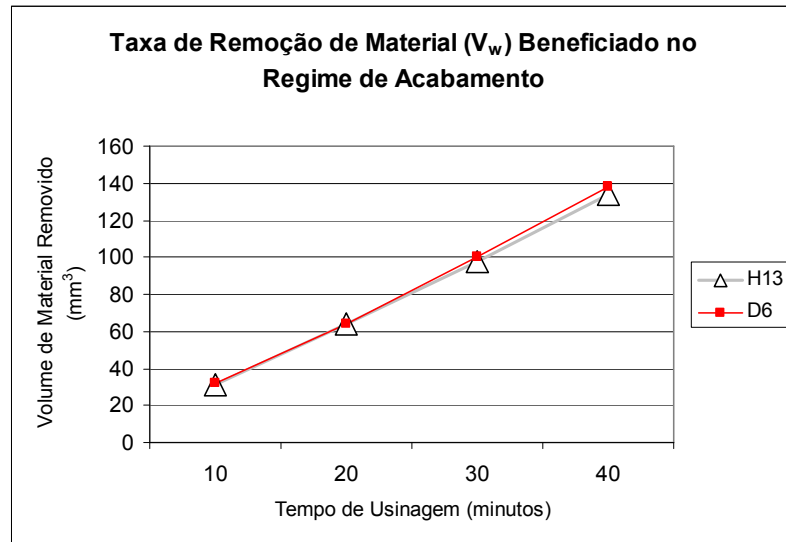


Figura 51 – Desgaste do eletrodo-ferramenta em usinagem por eletroerosão em materiais normalizados, em regime de desbaste.

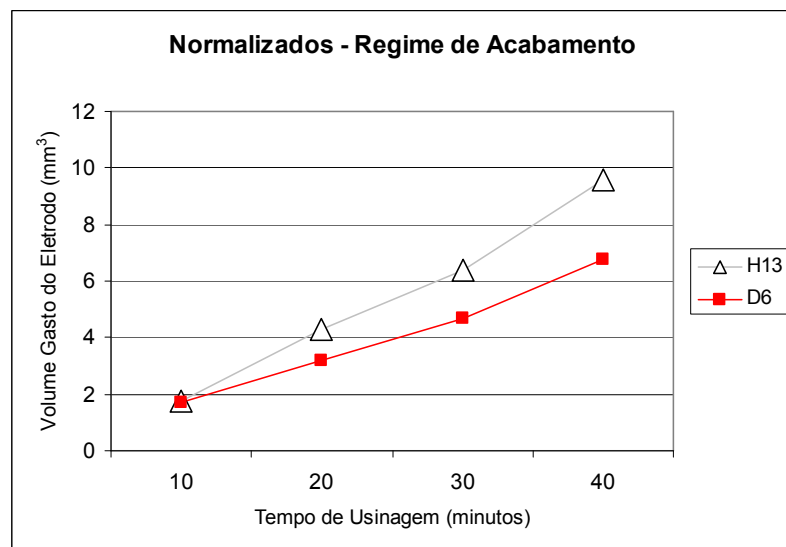


Figura 52 – Desgaste do eletrodo-ferramenta em usinagem por eletroerosão em materiais normalizados, em regime de acabamento.

Mesmo nas amostras beneficiadas, tanto em desbaste quanto em acabamento, o desgaste do eletrodo-ferramenta é maior quando se trabalhou com o aço AISI H13. Essas informações estão evidenciadas nas figuras 53 e 54.

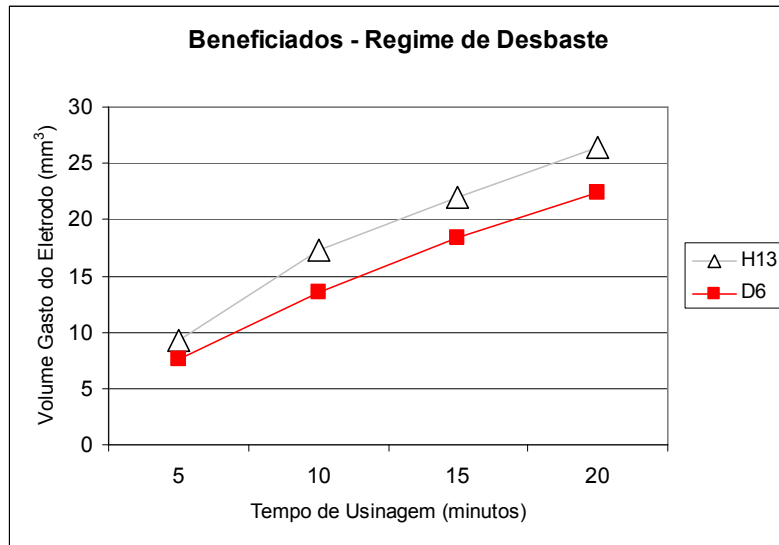


Figura 53 – Desgaste do eletrodo-ferramenta em usinagem por eletroerosão por penetração em materiais beneficiados, em regime de desbaste.

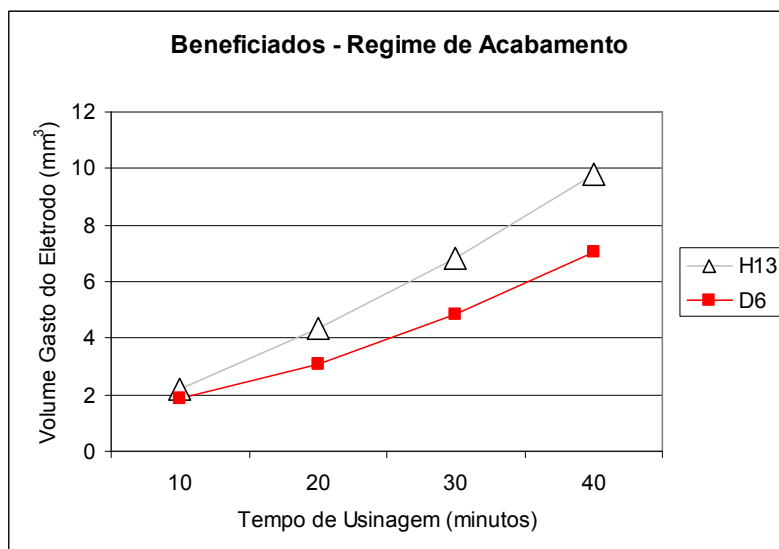


Figura 54 – Desgaste do eletrodo-ferramenta em usinagem por eletroerosão por penetração em materiais beneficiados, em regime de desbaste.

O desgaste volumétrico, relativo nos eletrodos, submetidos aos regimes de desbaste, apresentou valores maiores para os dois aços avaliados, tanto em condição de normalizado quanto beneficiado. Esse efeito é provocado pela quantidade de corrente fornecida durante o processo de desbaste. Em relação ao maior desgaste

relativo na usinagem do aço AISI H13, possivelmente isso ocorre devido à maior resistividade desse material.

4.1.5 – Relação de desgaste

A figura 55 mostra que o desgaste do eletrodo-ferramenta é mais acentuado no início da usinagem por eletroerosão por penetração em regime de desbaste das amostras normalizadas. No caso do aço AISI D6, há uma estabilidade após 15 minutos de operação.

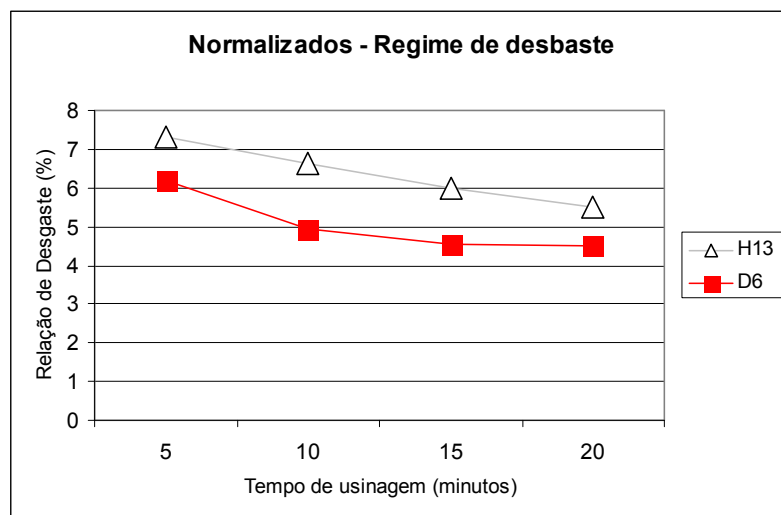


Figura 55 – Relação de desgaste em operações de desbaste na usinagem por eletroerosão dos aços AISI H13 e AISI D6 em estado de normalizados.

Nas operações de acabamento das amostras normalizadas, há uma tendência de estabilidade até os primeiros 30 minutos, mas depois a relação de desgaste aumenta para os dois materiais, mostrado no gráfico da figura 56.

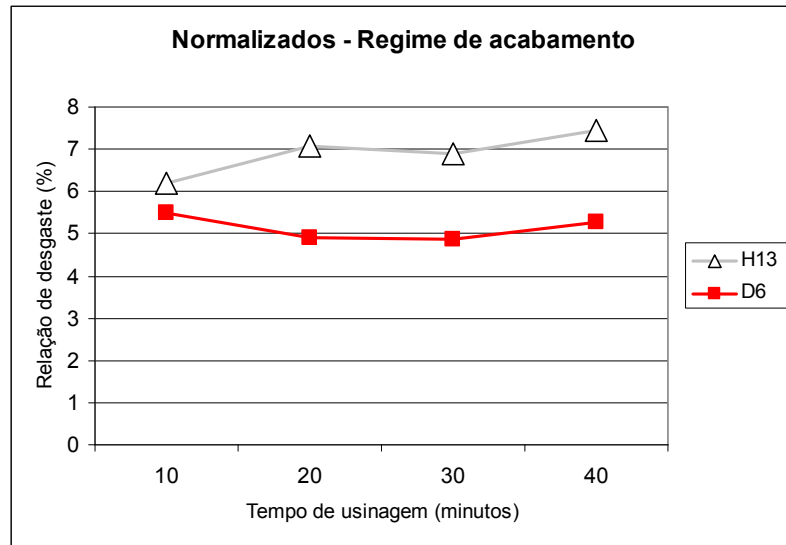


Figura 56 – Relação de desgaste em operações de acabamento na usinagem por eletroerosão dos aços AISI H13 e AISI D6 em estado de normalizados.

A figura 57 mostra que a relação de desgaste diminui ao longo de 20 minutos em operações de desbaste das amostras beneficiadas, sendo que no aço AISI H13 esse valor é acima do valor do aço AISI D6 em todo o teste.

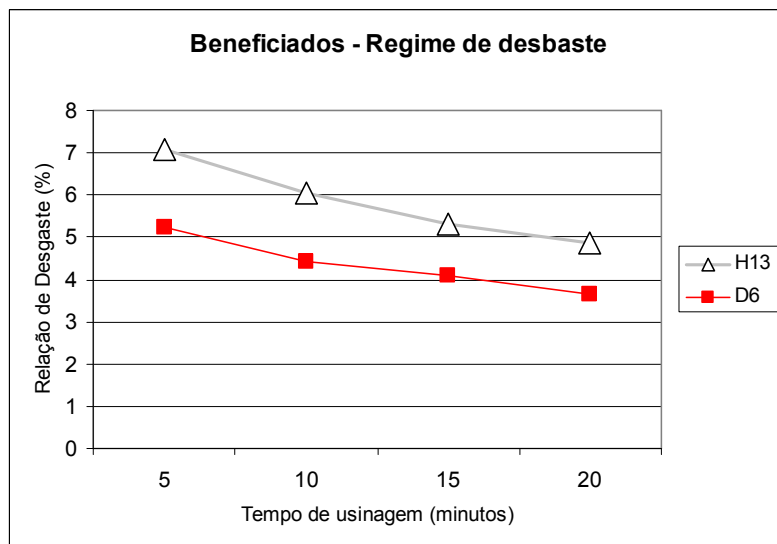


Figura 57 – Relação de desgaste em operações de desbaste na usinagem por eletroerosão dos aços AISI H13 e AISI D6 em estado de beneficiados.

Em regime de acabamento, os dois materiais apresentaram a mesma deflexão na curva do gráfico mostrado na figura 58, porém a relação de desgaste é mais alta em trabalhos no aço AISI H13.

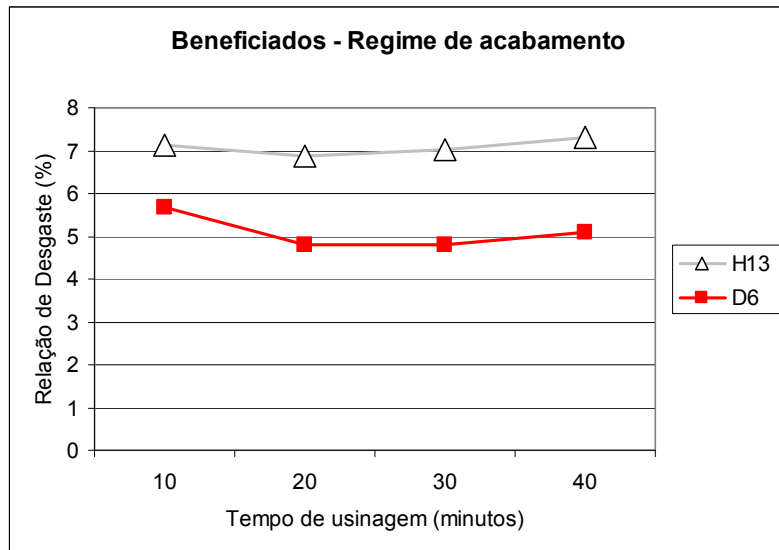


Figura 58 – Relação de desgaste em operações de acabamento na usinagem por eletroerosão dos aços AISI H13 e AISI D6 em estado de beneficiado.

Nas figuras 57 e 58, observa-se que o eletrodo-ferramenta desgasta mais do que o metal do eletrodo-peça em percentuais entre 4 e 7,5%. Com isso, torna-se evidente que os eletrodos se desgastam intensivamente, o que torna, na eletroerosão, o custo do ferramental relevante nos custos totais do processo.

4.2 Variação do tratamento térmico

4.2.1 Remoção de material do eletrodo-peça

Neste tópico são apresentadas análises estatísticas e comparações de pesagem no mesmo material com variações do tratamento térmico. As figuras 59 e 60 mostram que a remoção de material foi maior no caso do aço AISI D6 beneficiado,

submetido aos regimes de acabamento e desbaste. As tabelas 14 e 15 mostram dados estatísticos que representam homogeneidade nos resultados dos testes feitos com o aço AISI D6, normalizado em regime de desbaste e acabamento.

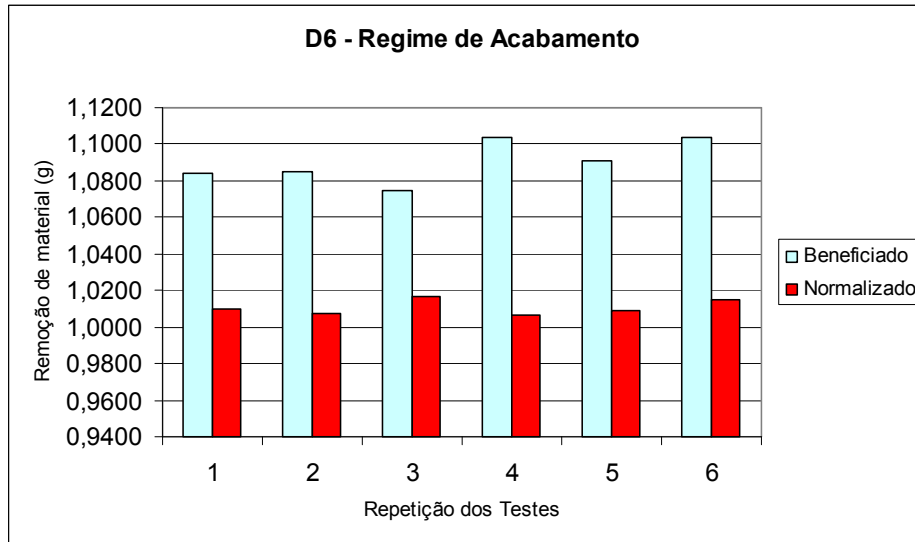


Figura 59 – Amostras do aço AISI D6 eletroerodidas no regime de acabamento, durante 40 minutos.

Tabela 14

Dados estatísticos das amostras do aço AISI D6 eletroerodidas no regime de acabamento, durante 40 minutos.

	Maior valor (g)	Menor valor (g)	Média (g)	Desvio padrão (g)
Beneficiado	1,1042	1,0747	1,0904	0,01162923
Normalizado	1,0165	1,0067	1,0108	0,00410337

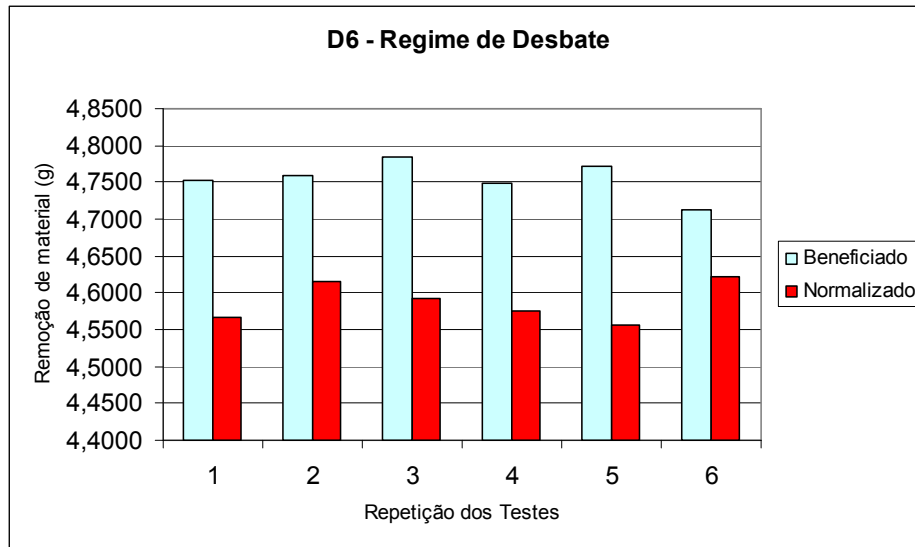


Figura 60 – Amostras do aço AISI D6 eletroerodidas no regime de desbaste, durante 20 minutos.

Tabela 15

Dados estatísticos das amostras do aço AISI D6 eletroerodidas no regime de desbaste, durante 20 minutos.

	Maior valor (g)	Menor valor (g)	Média (g)	Desvio padrão (g)
Beneficiado	4,7851	4,7117	4,7547	0,02508620
Normalizado	4,621	4,5561	4,5876	0,02651337

A quantidade de material removido no aço AISI H13 beneficiado é maior que em estado de normalizado em regime de acabamento, mostrado na figura 61.

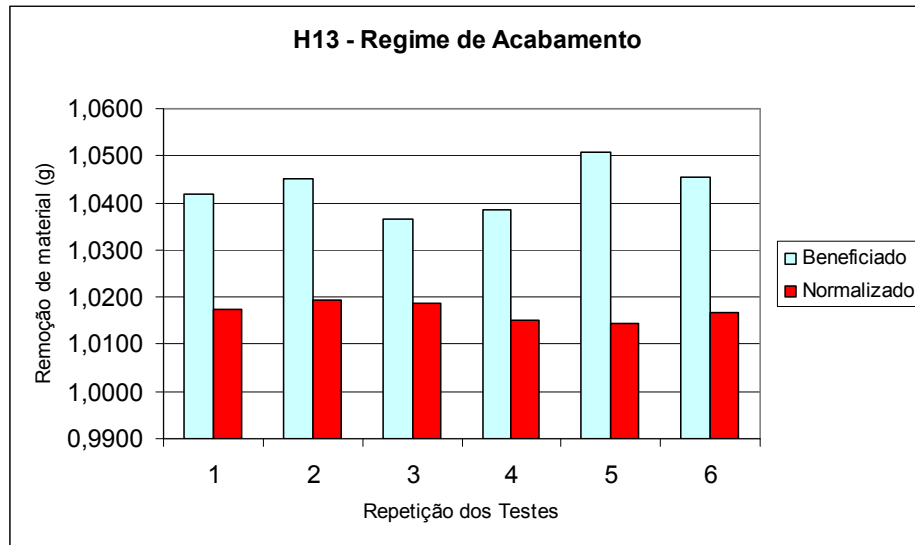


Figura 61 – Amostras do aço AISI H13 eletroerodidas no regime de acabamento, durante 40 minutos.

A tabela 16 mostra uma maior variabilidade para o aço AISI H13 normalizado.

Tabela 16

Dados estatísticos das amostras do aço AISI D6 eletroerodidas no regime de acabamento, durante 40 minutos.

	Maior valor (g)	Menor valor (g)	Média (g)	Desvio padrão (g)
Beneficiado	1,0509	1,0365	1,0430	0,00523819
Normalizado	1,0195	1,0143	1,0170	0,00201337

A figura 62 mostra que nos testes das amostras de aço AISI H13, em regime de desbaste, a remoção de material maior foi no estado de normalizado.

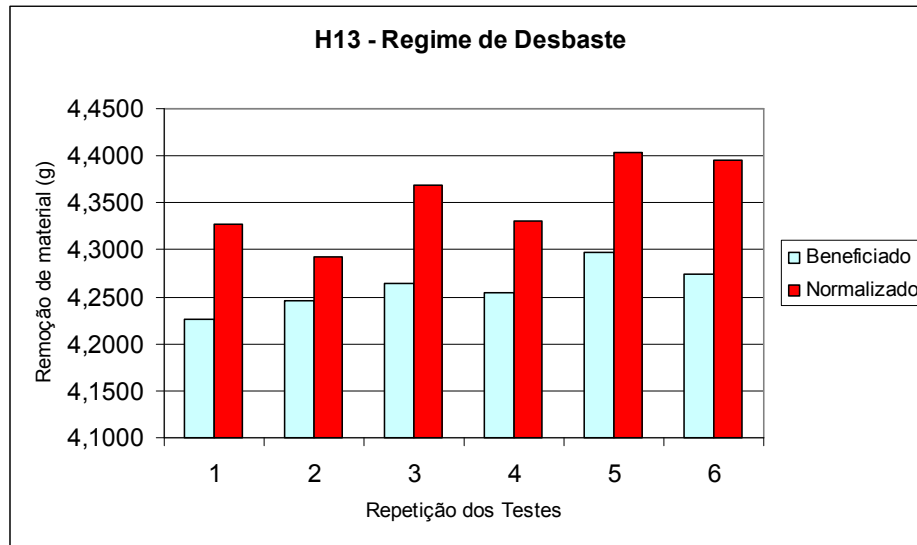


Figura 62 – Amostras do aço AISI H13 eletroerodidas no regime de desbaste, durante 20 minutos.

A tabela 17 mostra que o desvio padrão foi maior nos testes das amostras de aço AISI H13 beneficiadas, submetidas ao regime de desbaste.

Tabela 17

Dados estatísticos das amostras do aço AISI D6 eletroerodidas no regime de desbaste, durante 20 minutos.

	Maior valor (g)	Menor valor (g)	Média (g)	Desvio padrão (g)
Beneficiado	4,2971	4,2253	4,2601	0,02460150
Normalizado	4,4037	4,2923	4,3531	0,04367566

O tratamento térmico não alterou o comportamento do aço AISI D6 tanto em regime de desbaste quanto em acabamento. A quantidade de material removida nos testes de eletroerosão foi maior quando se usinou este aço em estado beneficiado, provavelmente porque este material sofre poucas alterações em sua resistividade elétrica quando submetido a esses tratamentos térmicos. Segundo Giroto (2002), existem vários métodos experimentais usados para a determinação da resistividade elétrica, que são freqüentemente de fácil compreensão e que não requerem conhecimentos aprofundados sobre Física do Estado Sólido. No Laboratório de Física da PUC Minas, foi feita montagem, mostrada anteriormente na figura 17, com o objetivo de medir a resistividade elétrica das amostras. A falta de um amperímetro com

capacidade de medição de 10^{-6} A e de um voltímetro com capacidade de medição de 10^{-6} V impediu que os testes apresentassem resultados confiáveis. Com os aparelhos disponibilizados pelo laboratório, os resultados de resistividade encontrados ficaram muito diferentes dos valores de alguns materiais conhecidos. Quanto ao aço AISI H13, em estado normalizado, teve um desempenho melhor que beneficiado, em regime de desgaste, devido à corrente maior utilizada. Esse efeito gera mais calor e o aumento da temperatura contribui para variar a resistividade dos materiais.

4.2.2 Remoção de material do eletrodo-ferramenta

O trabalho de pesagem dos eletrodos-ferramenta foi feito durante todos os testes, observando repetições para garantir maior confiabilidade nos resultados. A figura 63 mostra que em todas as repetições dos testes do aço AISI D6 o desgaste do eletrodo-ferramenta foi maior no estado de beneficiado, quando em regime de acabamento.

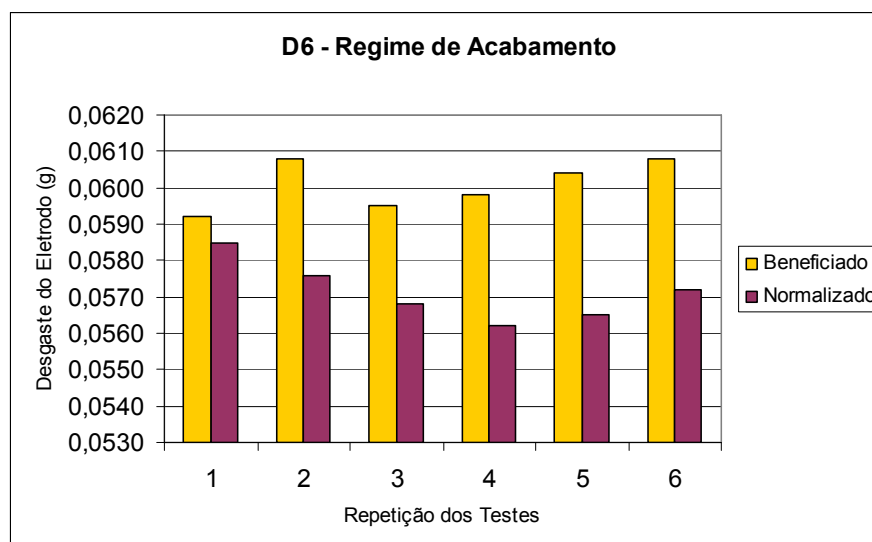


Figura 63 – Desgaste dos eletrodos-ferramenta na usinagem por eletroerosão por penetração de amostras do aço AISI D6 em regime de acabamento, durante 40 minutos.

A tabela 18 mostra pequena variância nos resultados dos testes dos dois tratamentos térmicos do aço AISI D6, submetidos ao regime de acabamento.

Tabela 18

Dados estatísticos do desgaste dos eletrodos-ferramenta na eletroerosão por penetração do aço AISI D6 em regime de acabamento, durante 40 minutos

	Maior valor (g)	Menor valor (g)	Média (g)	Desvio padrão (g)
Beneficiado	0,0608	0,0592	0,0601	0,00068240
Normalizado	0,0585	0,0562	0,0571	0,00083347

É mostrado, na figura 64, que o desgaste dos eletrodos-ferramenta ficou em níveis próximos em todos os testes no regime de desgaste do aço AISI D6, tanto para as amostras normalizadas quanto para as beneficiadas. Nota-se que é maior o desgaste ocorrido no eletrodo-ferramenta em trabalhos com esse material normalizado.

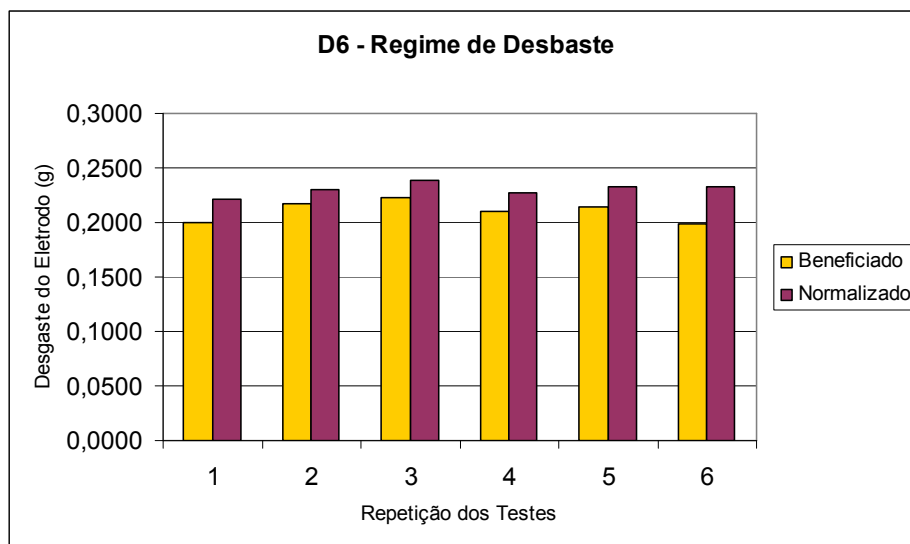


Figura 64 – Desgaste dos eletrodos-ferramenta na usinagem por eletroerosão por penetração de amostras do aço AISI D6 em regime de desbaste, durante 20 minutos.

A tabela 19 mostra um equilíbrio entre a variabilidade dos testes efetuados.

Tabela 19

Dados estatísticos do desgaste dos eletrodos-ferramenta na eletroerosão por penetração do aço AISI D6 em regime de desbaste, durante 20 minutos.

	Maior valor (g)	Menor valor (g)	Média (g)	Desvio padrão (g)
Beneficiado	0,2225	0,1979	0,2104	0,00980886
Normalizado	0,2389	0,222	0,2305	0,00573495

Em todos os teste de eletroerosão por penetração do aço AISI H13, em regime de acabamento, o desgaste do eletrodo-ferramenta foi maior na usinagem das amostras beneficiadas e é mostrado na figura 65.

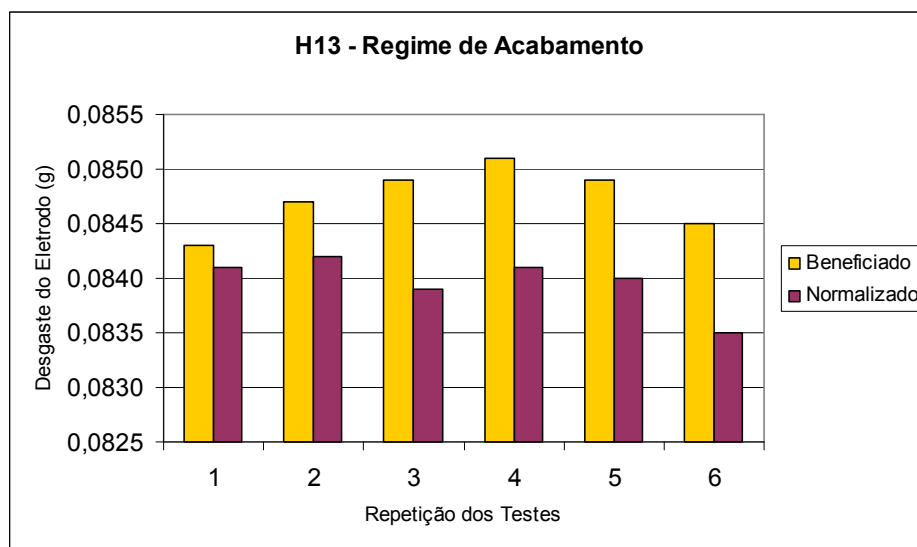


Figura 65 – Desgaste dos eletrodos-ferramenta na usinagem por eletroerosão por penetração de amostras do aço AISI H13 em regime de acabamento, durante 40 minutos.

Pequenas variâncias são mostradas na tabela 20 que representa o desgaste dos eletrodos-ferramenta na usinagem por eletroerosão por penetração de amostras do aço AISI H13 em regime de desbaste.

Tabela 20

Dados estatísticos do desgaste dos eletrodos-ferramenta na eletroerosão por penetração do aço AISI H13 em regime de acabamento, durante 40 minutos.

	Maior valor (g)	Menor valor (g)	Média (g)	Desvio padrão (g)
Beneficiado	0,0851	0,0843	0,0847	0,00029439
Normalizado	0,0842	0,0835	0,0840	0,00025033

A figura 66 mostra maior desgaste do eletrodo-ferramenta em operações de desbaste de amostras de aço AISI H13 normalizado.

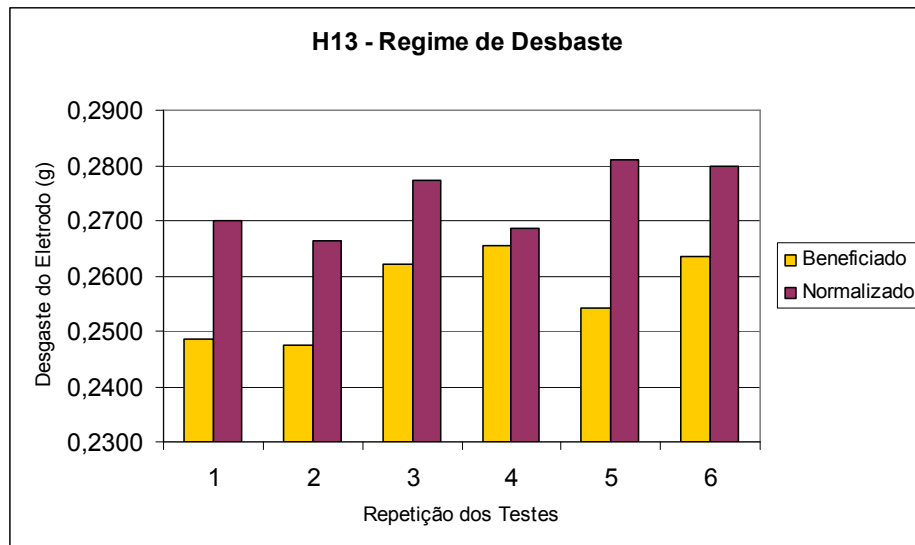


Figura 66 – Desgaste dos eletrodos-ferramenta na usinagem por eletroerosão por penetração de amostras do aço AISI H13 em regime de desbaste, durante 20 minutos.

O desvio padrão, indicado na tabela 21, mostra dispersão acentuada e variabilidade grande entre os dois tipos de tratamentos térmicos das amostras submetidas aos testes.

Tabela 21

Dados estatísticos do desgaste dos eletrodos-ferramenta na eletroerosão por penetração do aço AISI H13 em regime de desbaste, durante 20 minutos.

	Maior valor (g)	Menor valor (g)	Média (g)	Desvio padrão (g)
Beneficiado	0,2654	0,2476	0,2569	0,00786217
Normalizado	0,2811	0,2664	0,2739	0,00628504

Os materiais normalizados, em regime de desbaste, produziram maior desgaste dos eletrodos-ferramenta, possivelmente devido à microestrutura. No regime de acabamento, os aços beneficiados provocaram maior desgaste dos eletrodos-ferramenta. Modificações nos processamentos das ligas metálicas, como tratamentos térmicos, modificam as propriedades mecânicas e elétricas, principalmente na resistividade elétrica, e essa, sem dúvida parece ser a mais relevante para os dois materiais.

4.2.3 Taxa de Remoção de Material

As figuras 67 e 68 mostram que na usinagem por eletroerosão, por penetração das amostras do aço AISI D6, nos regimes de desbaste e acabamento, o tratamento térmico pouco influenciou na taxa de remoção de material.

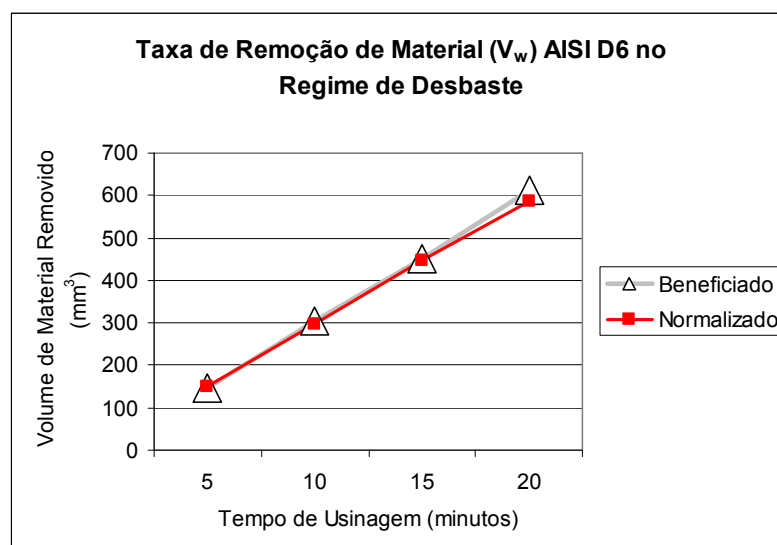


Figura 67 – Taxa de remoção de material do aço AISI D6 no regime de desbaste.

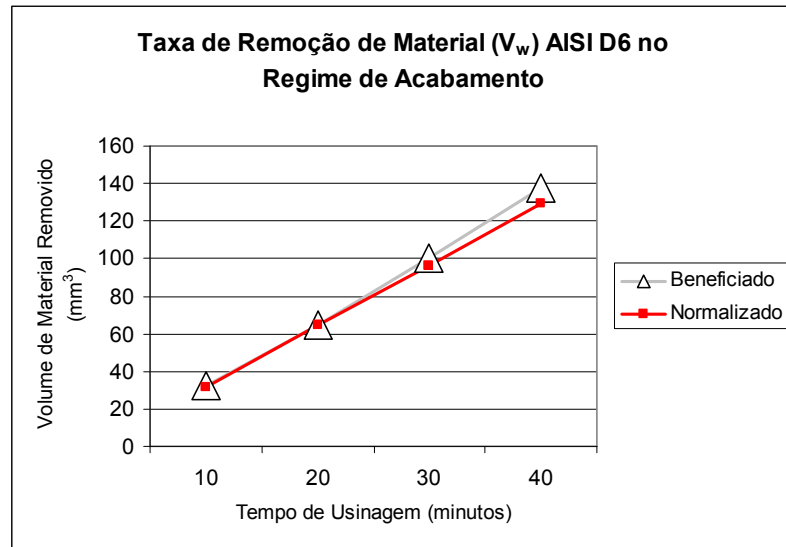


Figura 68 – Taxa de remoção de material do aço AISI D6 no regime de acabamento.

Como é mostrada nas figuras 69 e 70, a taxa de remoção de material se manteve estável, com pequena variação e proporcionalidade, nos dois tipos de tratamentos térmicos, das amostras do aço AISI H13, submetidas aos regimes de desbaste e acabamento na eletroerosão.

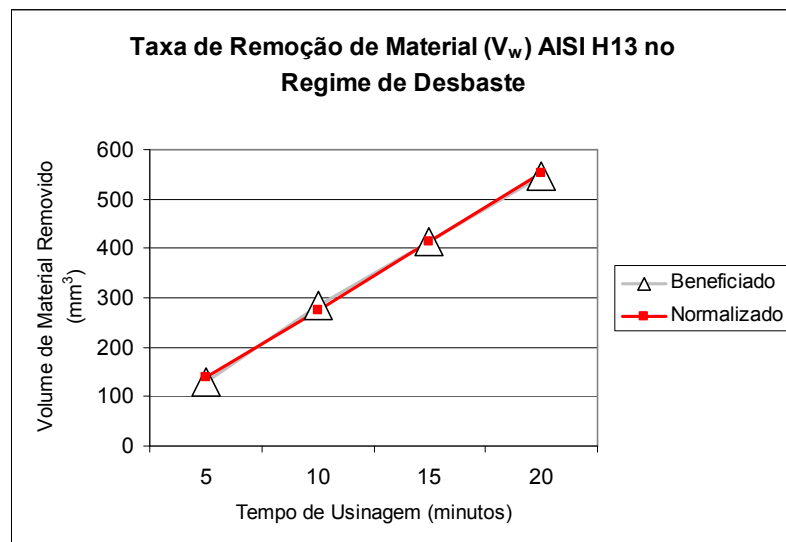


Figura 69 – Taxa de remoção de material do aço AISI H13 no regime de desbaste.

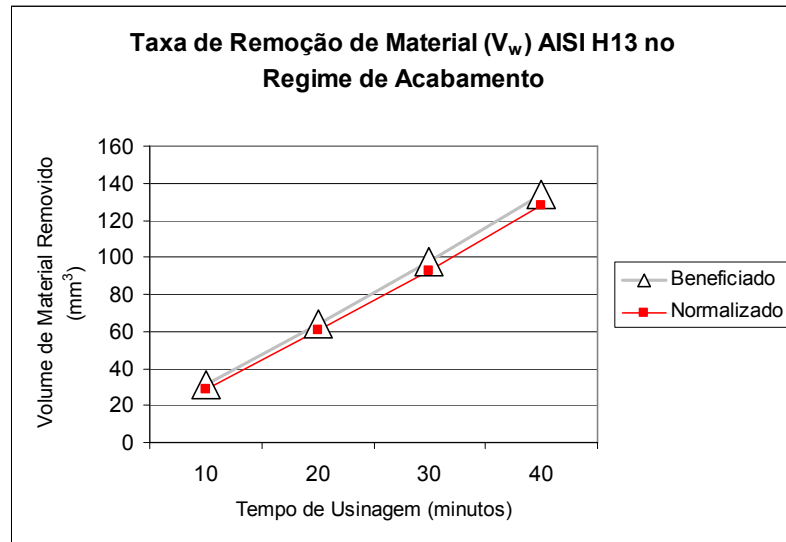


Figura 70 – Taxa de remoção de material do aço AISI H13 no regime de acabamento.

Pelos resultados encontrados, a taxa de remoção de material não foi influenciada significativamente pelo tratamento térmico, independente se em regime de desbaste ou de acabamento. Uma tentativa de explicar esse fato é que as propriedades mecânicas do material, como dureza, não interferem na taxa de remoção de material na eletroerosão.

4.2.4 Desgaste do eletrodo-ferramenta

O desgaste do eletrodo-ferramenta passa a aumentar na usinagem de amostras normalizadas do aço AISI D6, após 10 minutos de testes, no regime de desbaste, conforme é mostrado na figura 71.

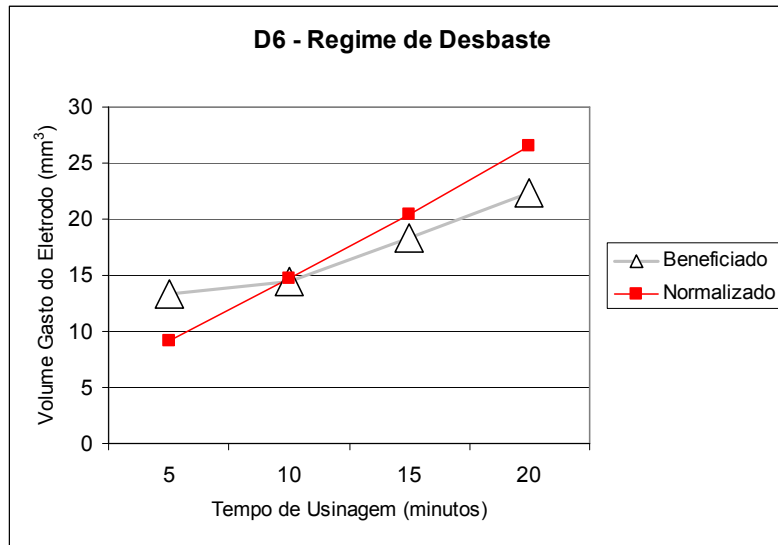


Figura 71 – Desgaste do eletrodo-ferramenta em usinagem por eletroerosão por penetração no aço AISI D6 no regime de desbaste.

O desgaste do eletrodo-ferramenta foi o mesmo nas amostras beneficiadas e normalizadas do aço AISI D6, em regime de acabamento, e é mostrado na figura 72.

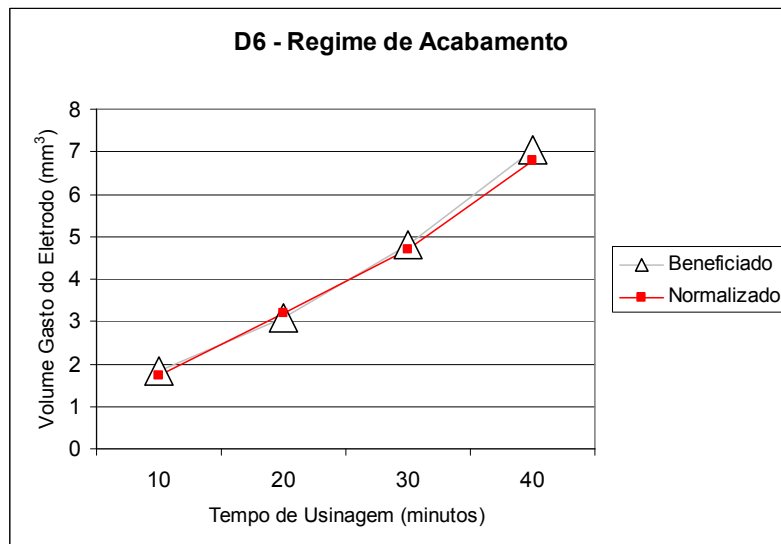


Figura 72 – Desgaste do eletrodo-ferramenta em usinagem por eletroerosão por penetração no aço AISI D6 no regime de desbaste.

Na figura 73, observa-se que o desgaste do eletrodo-ferramenta aumentou sensivelmente na usinagem por eletroerosão das amostras de aço AISI H13, normalizado em regime de desbaste.

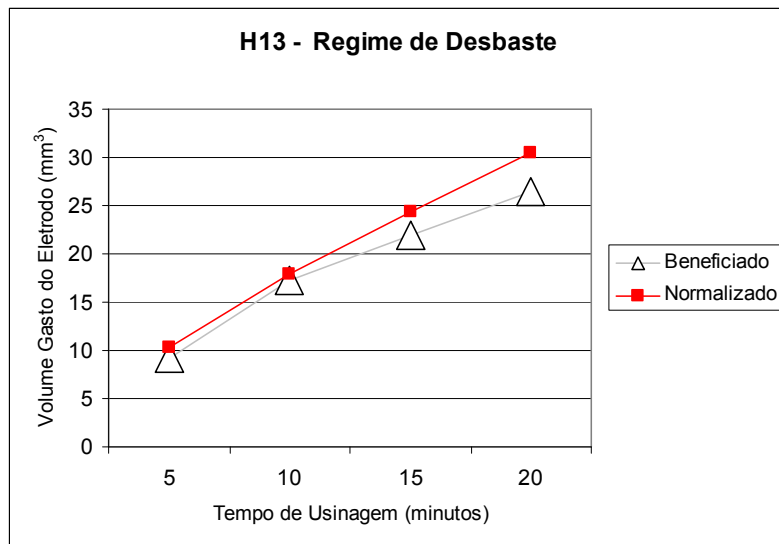


Figura 73 – Desgaste do eletrodo-ferramenta em usinagem por eletroerosão por penetração no aço AISI H13 no regime de desbaste.

Para o regime de acabamento do aço AISI H13, o desgaste do eletrodo-ferramenta se manteve constante nas amostras normalizadas e beneficiadas, mostradas na figura 74.

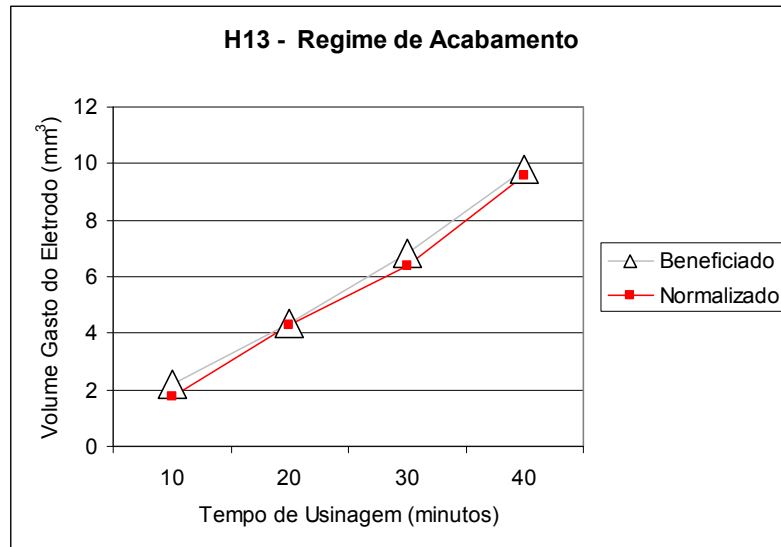


Figura 74 – Desgaste do eletrodo-ferramenta em usinagem por eletroerosão por penetração no aço AISI H13 no regime de desbaste.

As variações do desgaste do eletrodo-ferramenta podem estar ligadas aos efeitos de lavagem do material erodido que, durante a descarga elétrica, permanecem na folga de trabalho, alterando o campo elétrico e, conseqüentemente, o canal de plasma.

4.2.5 Relação de desgaste

A relação de desgaste tende-se a alinhar após 20 minutos de eletroerosão por penetração do aço AISI D6, no regime de desbaste, tanto para as amostras normalizadas quanto para as beneficiadas. Esse efeito é mostrado na figura 75.

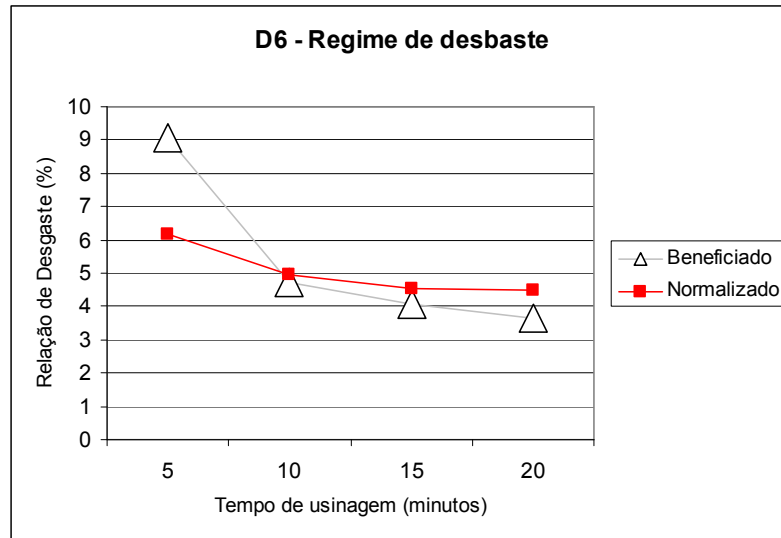


Figura 75 – Relação de desgaste em operações de desbaste na usinagem por eletroerosão por penetração do aço AISI D6.

A figura 76 mostra que a relação de desgaste cai do início dos testes até 20 minutos. De 20 a 30 minutos se mantém constante e, após esse tempo, tende a aumentar. Esses resultados são observados nas amostras normalizadas e beneficiadas do aço AISI D6, submetidas ao regime de acabamento na eletroerosão. Essas variações ocorrem provavelmente devido à contaminação do fluido dielétrico nas regiões da folga pelas partículas removidas da peça e do eletrodo, alterando as propriedades do fluido, como a resistividade elétrica e a rigidez dielétrica.

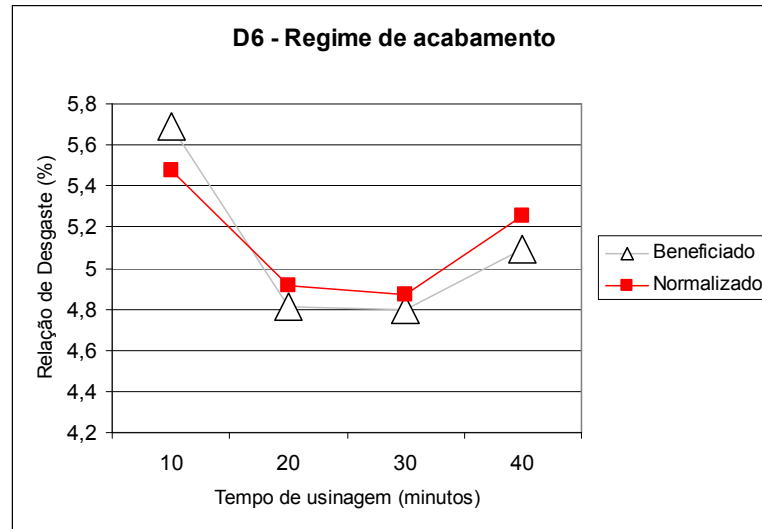


Figura 76 – Relação de desgaste em operações de acabamento na usinagem por eletroerosão por penetração do aço AISI D6,

Uma tendência de queda na relação de desgaste nas amostras normalizadas e beneficiadas do aço AISI H13 usinadas por eletroerosão em regime de desbaste é mostrada na figura 77.

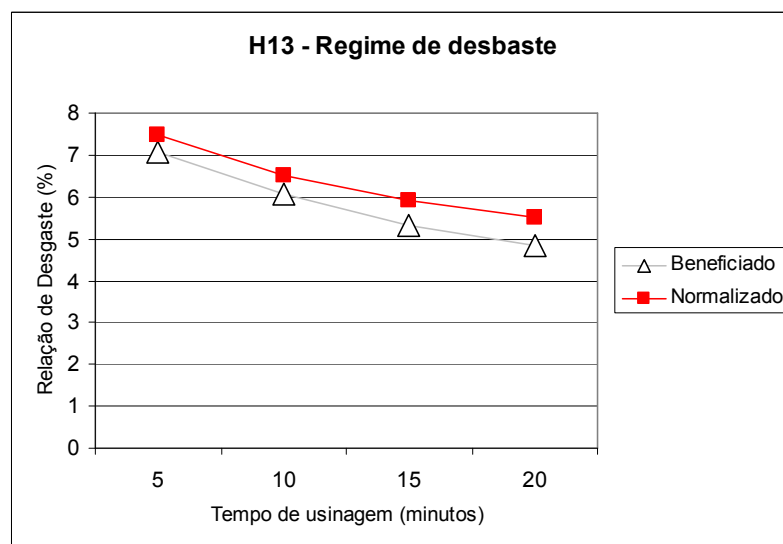


Figura 77 – Relação de desgaste em operações de desbaste na usinagem por eletroerosão por penetração do aço AISI H13,

Na figura 78, é mostrada a relação de desgaste do aço AISI H13, submetido ao regime de acabamento em usinagem por eletroerosão por penetração. Nos primeiros

10 minutos, diminui a relação de desgaste das amostras beneficiadas, enquanto que nas normalizadas aumenta essa relação. De 10 a 20 minutos, a relação de desgaste se mantém constante para as amostras com os dois tipos de tratamento térmico. Após 30 minutos, a relação de desgaste aumenta na mesma proporção para as amostras normalizadas e beneficiadas.

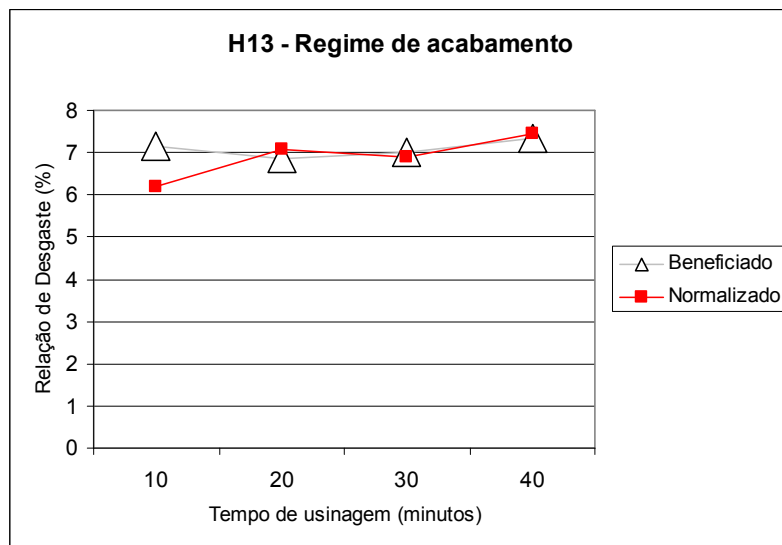


Figura 78 – Relação de desgaste em operações de acabamento na usinagem por eletroerosão por penetração do aço AISI H13.

As modificações da relação de desgaste, ao longo do tempo, podem ser explicadas pela variação de temperatura que ocorre no processo de eletroerosão. A contribuição da temperatura influencia diretamente na resistividade elétrica (CALLISTER, 2002). O fato de essa relação de desgaste não apresentar resultados homogêneos ao longo do processo pode estar relacionado aos efeitos dos contaminantes que agem no dielétrico, alterando suas propriedades.

4.3 Rugosidade

4.3.1 Variação do material do eletrodo-peça

4.3.1.1 Rugosidade média aritmética R_a

A figura 79 mostra que o comportamento da rugosidade R_a nos dois materiais, tanto beneficiados quanto normalizados. Em alguns pontos, as diferenças foram pequenas e a tendência das curvas foram praticamente as mesmas, com diferenças pontuais para os dois tratamentos térmicos.

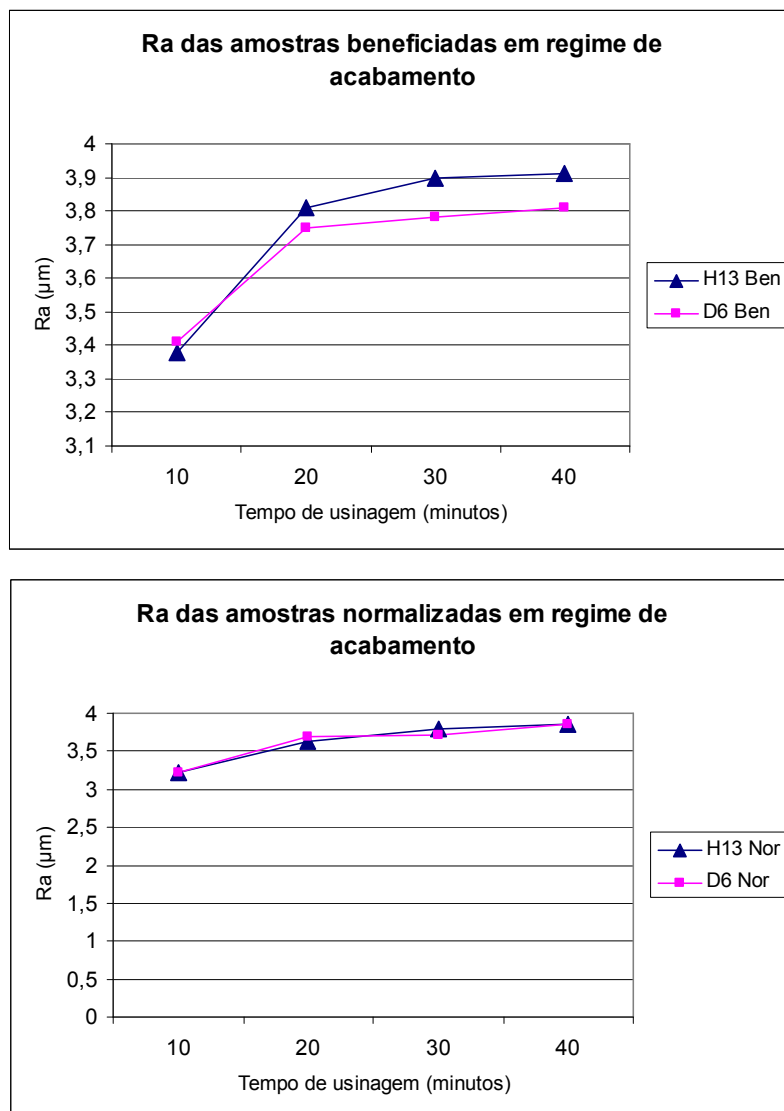


Figura 79 – Rugosidade R_a das amostras beneficiadas e normalizadas, em regime de acabamento.

No regime de desbaste dos dois materiais, com tratamentos térmicos de normalização e beneficiamento, a tendência das curvas que representam a rugosidade R_a é a mesma, com inflexões semelhantes, porém os valores rugosidade R_a do aço AISI H13 são maiores que do aço AISI D6 em todos os testes realizados. Esses efeitos são mostrados na figura 80.

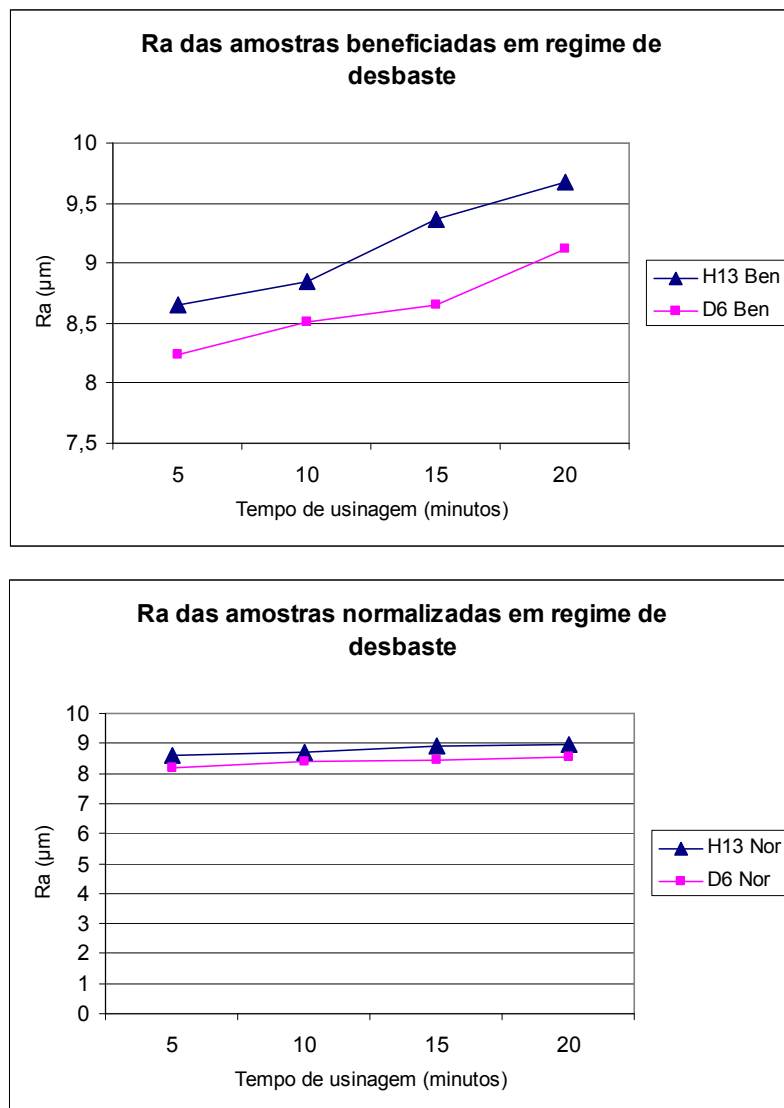


Figura 80 – Rugosidade R_a das amostras beneficiadas e normalizadas em regime de desbaste.

4.3.1.2 Rugosidade R_z

As curvas da rugosidade R_z dos dois materiais, em regimes de acabamento e desbaste, com tratamentos térmicos de normalização e beneficiamento se sobrepõem, mostrando que há uma igualdade nesses valores. Essas curvas são mostradas na figura 81. Praticamente não há diferença em regime de acabamento nos dois materiais quando submetidos ao mesmo tratamento térmico.

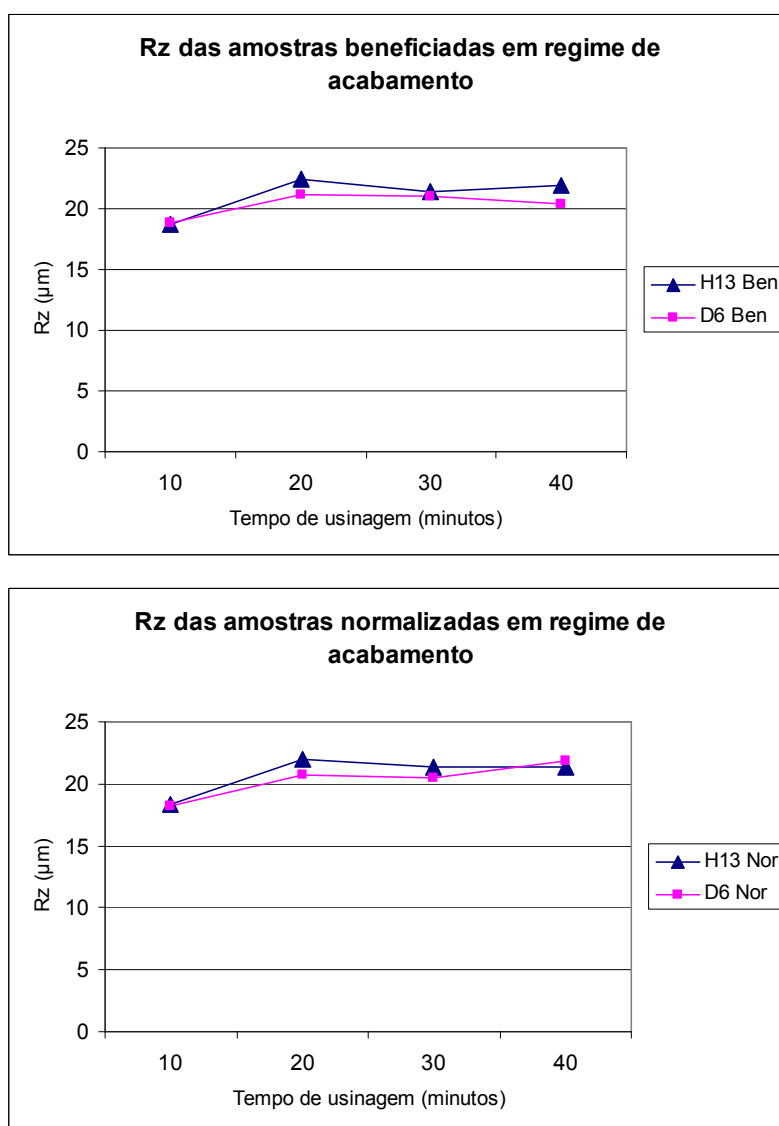


Figura 81 – Rugosidade R_z das amostras beneficiadas e normalizadas, em regime de acabamento.

Nos regimes de desbaste, mostrados na figura 82, as amostras beneficiadas e normalizadas do aço AISI H13 têm valores da rugosidade R_z acima das do aço AISI D6 em todas as etapas do teste realizado.

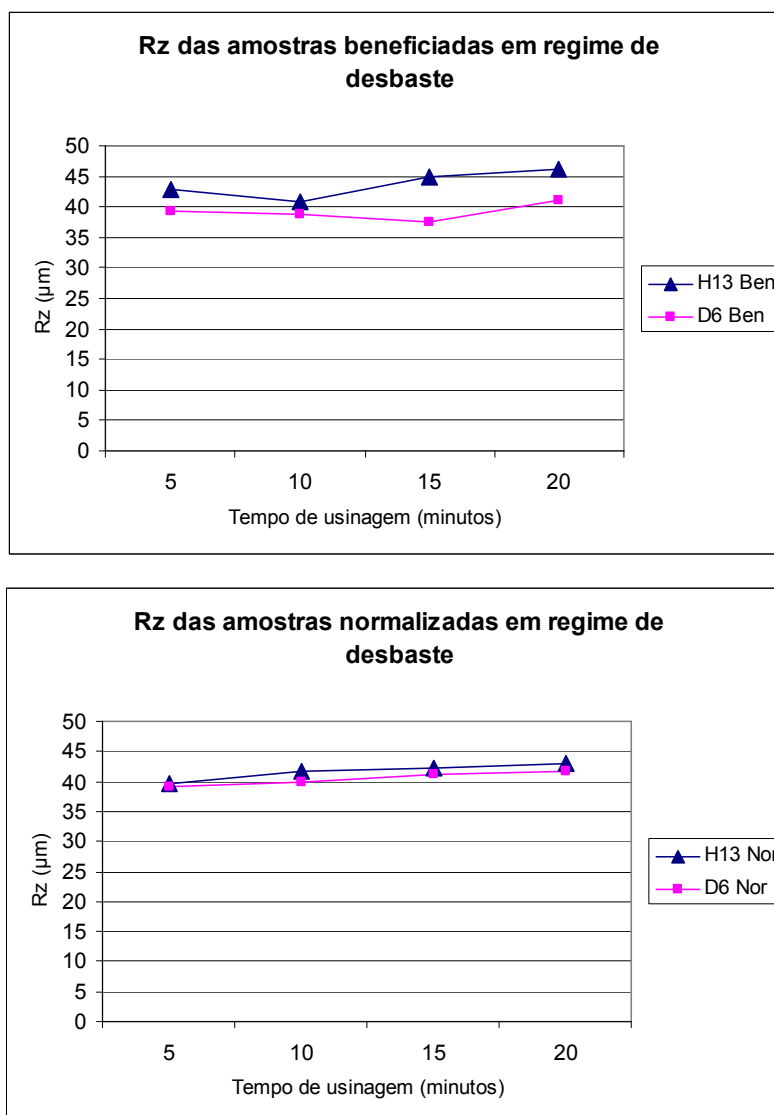


Figura 82 – Rugosidade R_z das amostras beneficiadas e normalizadas, em regime de desbaste.

A rugosidade de peças usinadas por eletroerosão está intrinsecamente relacionada à energia média da descarga elétrica. O aumento da energia acarreta um maior nível de rugosidade, isto porque crateras de maior profundidade e mais largas são produzidas nas peças após a interrupção da descarga elétrica. Usualmente, a

ampliação do nível de energia, fornecida por descarga, é efetuada pela elevação da duração da descarga ou da corrente de descarga (AMORIM, 2002). Analisando os resultados apresentados nos gráficos, é possível a constatação de que a modificação do material exerce pouca influência sobre a rugosidade das peças.

4.3.2 *Variação do tratamento térmico*

4.3.2.1 Rugosidade média aritmética R_a

A figura 83 mostra que a rugosidade R_a , das amostras de aço AISI H13 e D6, no regime de acabamento, possui valores muito próximos, tanto beneficiadas quanto normalizadas.

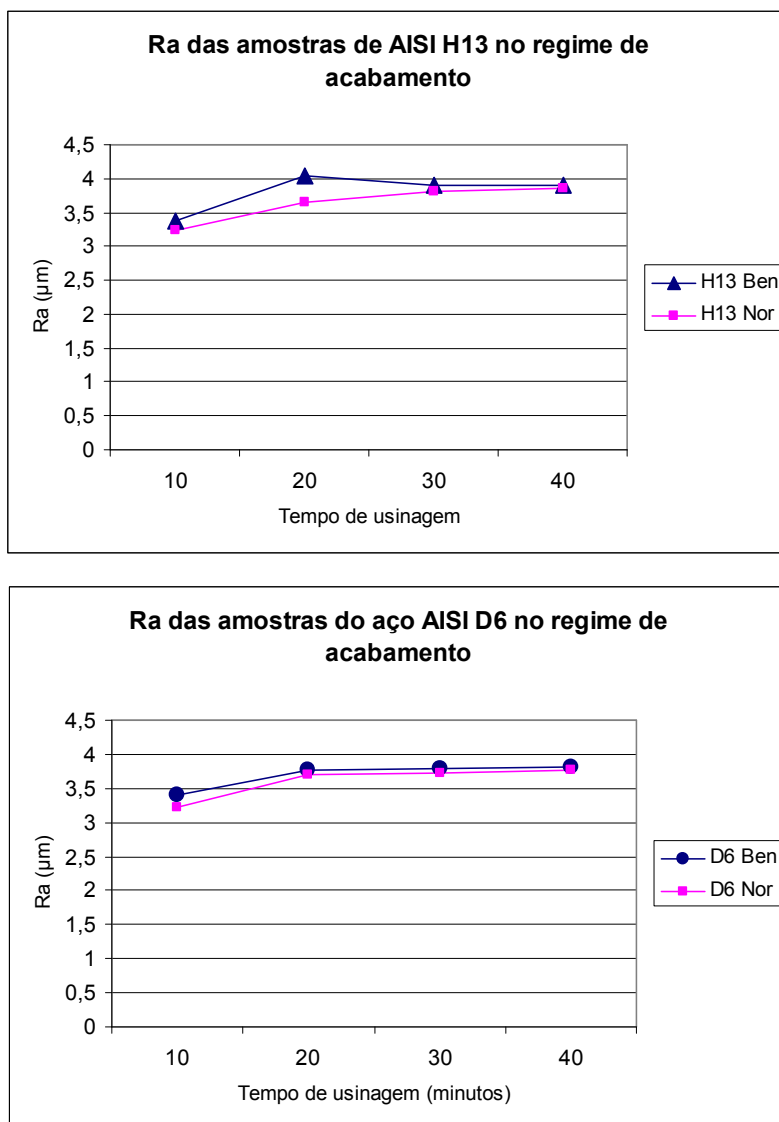


Figura 83 – Rugosidade R_a das amostras do aço AISI H13 e D6 no regime de acabamento.

A figura 84 apresenta que, no regime de desbaste, as amostras beneficiadas do aço AISI H13 têm a rugosidade R_a maior que as normalizadas e a rugosidade R_a das amostras do aço AISI D6, em regime de desbaste, são de mesmos valores.

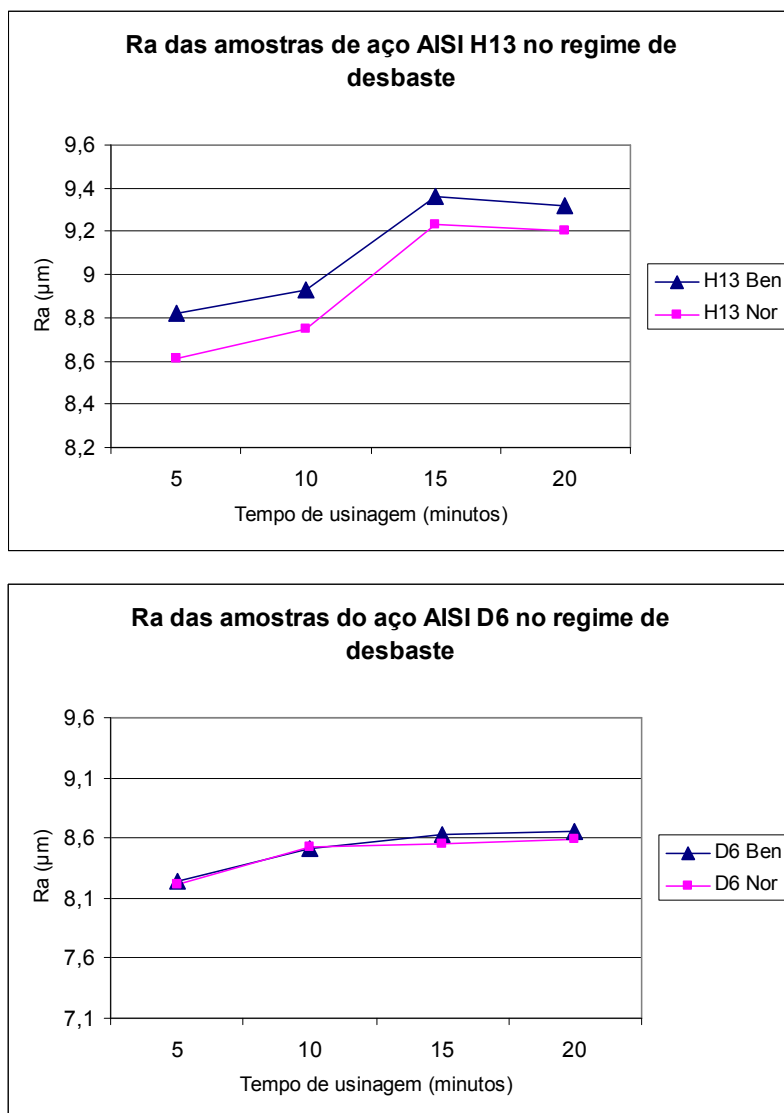


Figura 84 – Rugosidade R_a das amostras do aço AISI H13 e D6 no regime de desbaste.

4.3.2.2 Rugosidade R_z

A figura 85 mostra que a rugosidade R_z do aço AISI H13 e D6, em regime de acabamento, é a mesma para os dois tratamentos térmicos.

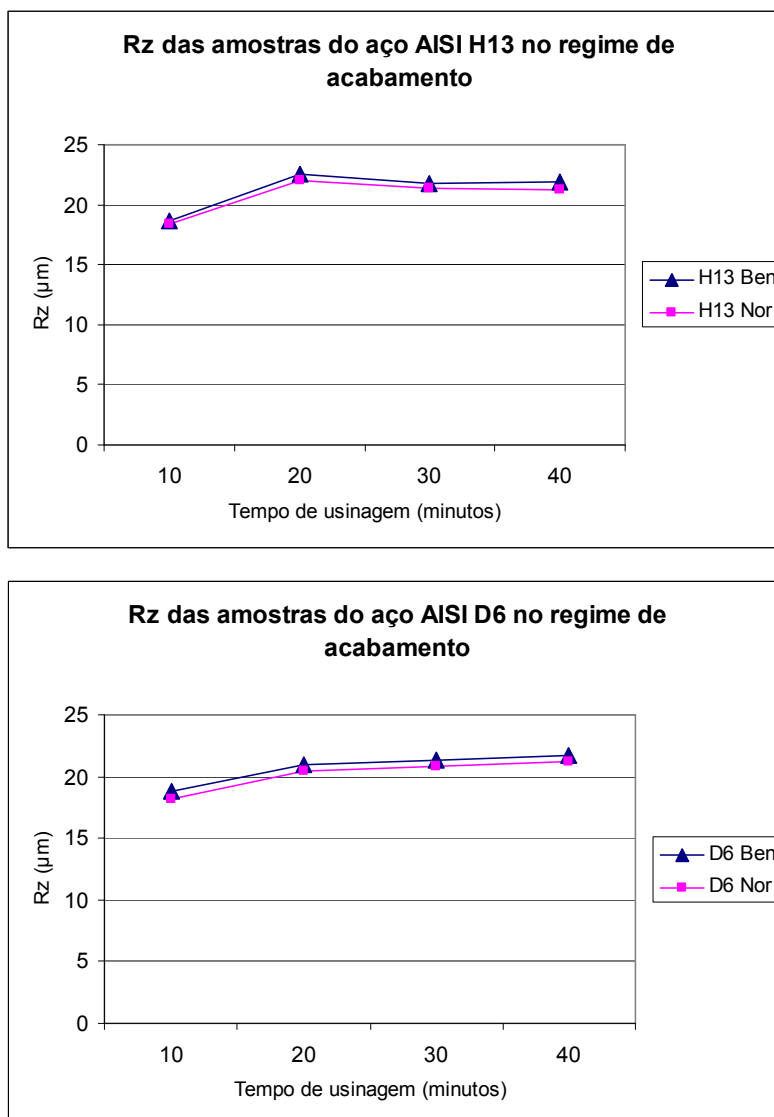


Figura 85 – Rugosidade R_z das amostras do aço AISI H13 e D6 no regime de acabamento.

No regime de desbaste, o aço AISI H13 beneficiado tem valores da rugosidade R_z maior que o normalizado. A rugosidade R_z do aço AISI D6 beneficiado, submetido ao regime de desbaste, apresenta-se ligeiramente maior que o normalizado, como mostrado na figura 86.

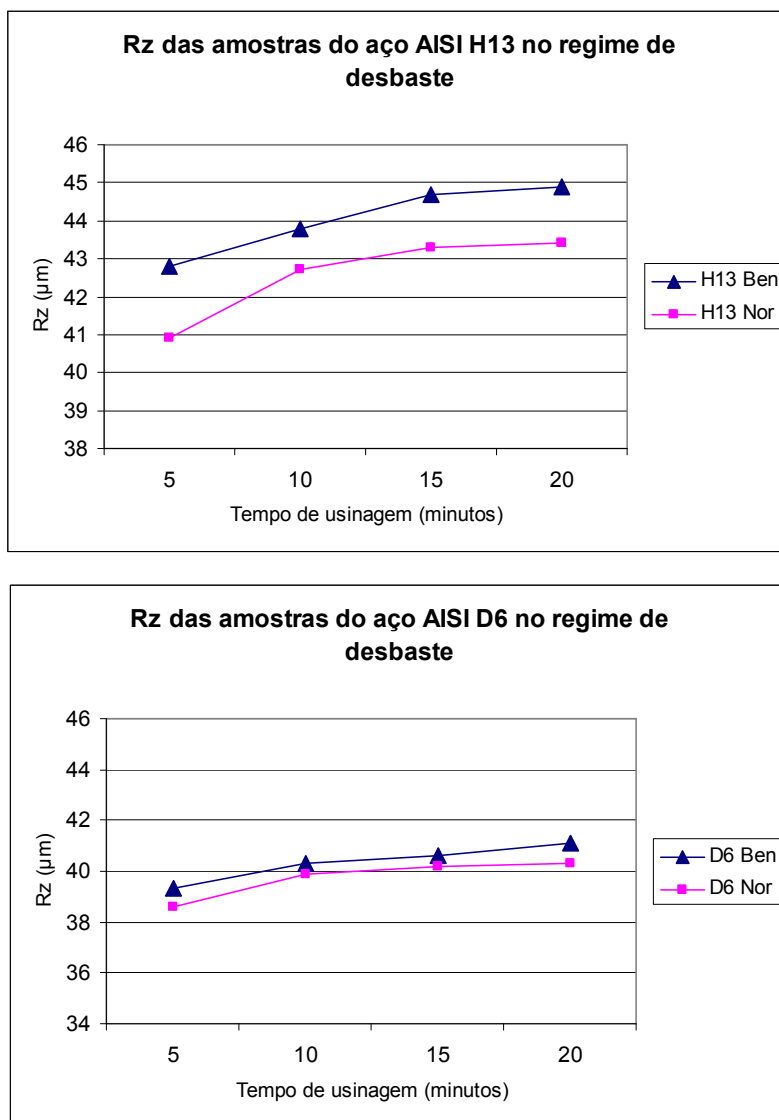
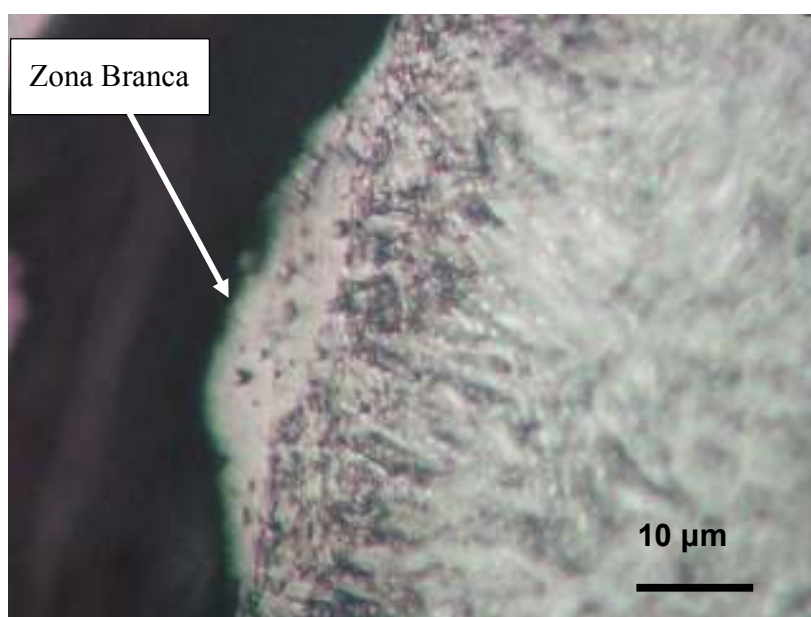


Figura 86 – Rugosidade R_z das amostras do aço AISI H13 e D6 no regime de desbaste.

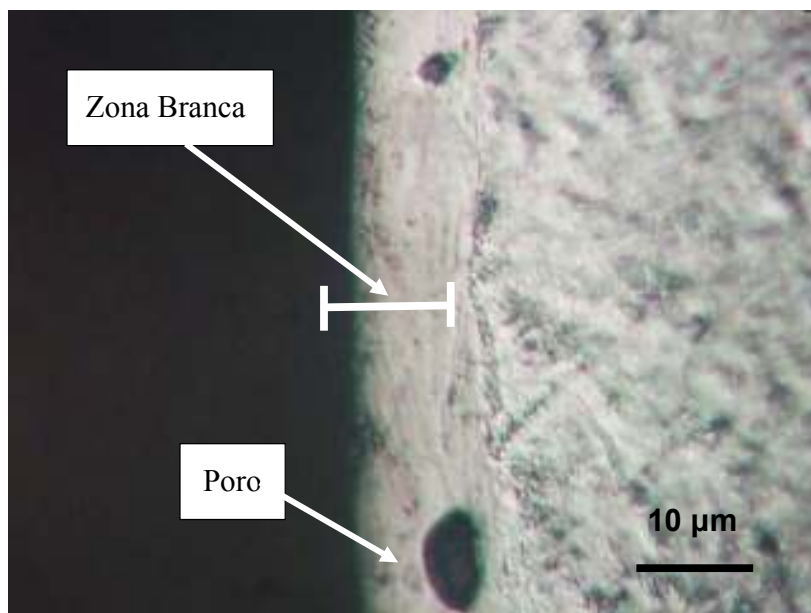
Ao avaliar o comportamento de todas as curvas de rugosidade R_a e R_z nos dois materiais, submetidos aos dois tratamentos térmicos, eletroerodidos, no regime de desbaste e acabamento, verifica-se que, nos primeiros minutos de teste, essas rugosidades tiveram valores menores e com o passar do tempo, esses valores aumentaram com tendência a se estabilizar. De maneira geral, esse comportamento da rugosidade deve-se ao fato de a energia média por descarga continuar sendo praticamente a mesma durante o processo.

4.4 Micrografia

A figura 87 mostra fotografias da microscopia ótica da amostra do aço AISI H13, beneficiado, usinadas por eletroerosão com parâmetros de acabamento e desbaste. Na imagem mostrada na figura 87 A, dá pra se notar a zona branca, também conhecida como *recast layer* e o substrato. A espessura da zona branca nas amostras trabalhadas em regime de desbaste é maior e possui mais porosidades (Fig.87 B), isso ocorre devido à diferença de energia fornecida para realizar o trabalho. No regime de desbaste, a corrente empregada é maior, produzindo maior aquecimento da superfície do eletrodo-peça.



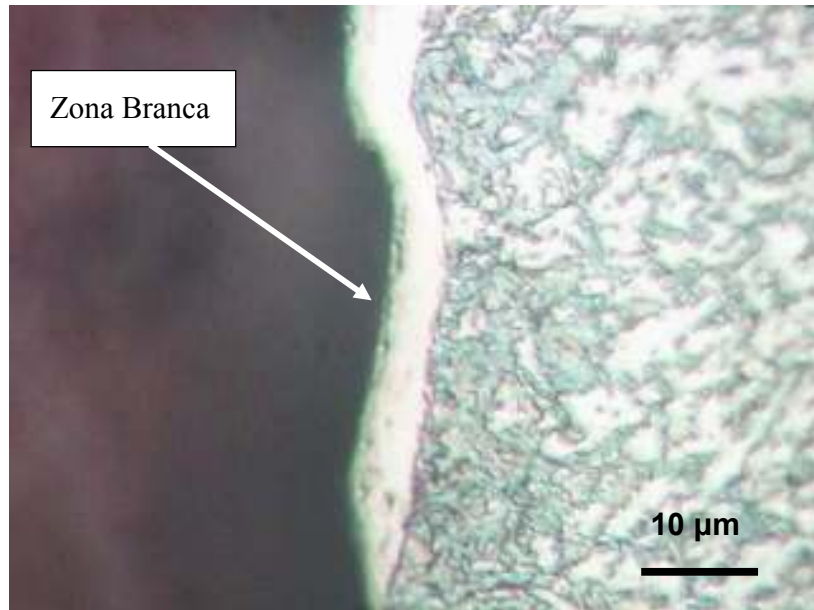
A) Parâmetros de acabamento.



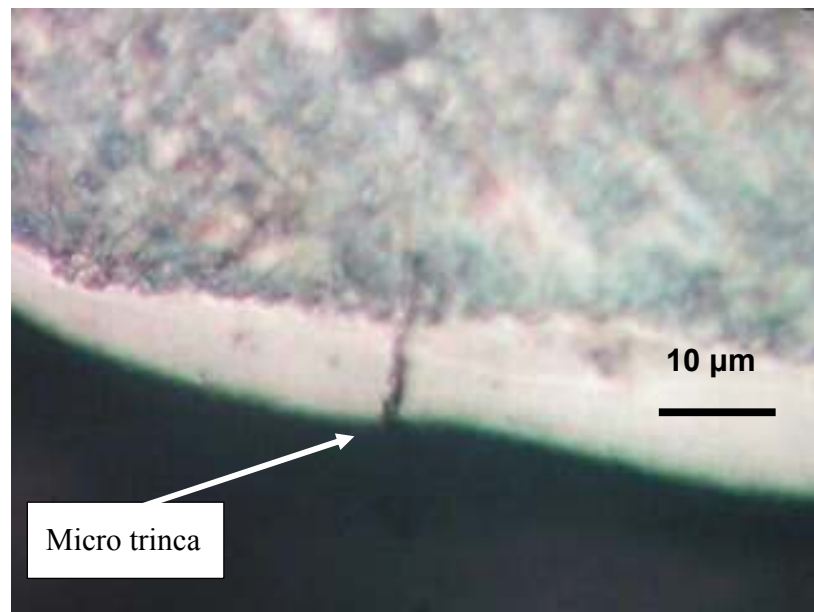
B) Parâmetros de desbaste.

Figura 87 – Microscopia ótica das amostras do aço AISI H13 Beneficiado (Aumento de 500x).

A figura 88 mostra fotografias da microscopia ótica do aço AISI H13 normalizado, submetido à usinagem por eletroerosão com parâmetros de acabamento e desbaste com indicações da zona branca e o substrato. Nas amostras submetidas ao regime de desbaste (Fig. 88 B), a presença de trincas é muito maior que nas amostras submetidas ao regime de acabamento, possivelmente devido ao maior aquecimento que ocorre em regime de desbaste, pois a energia é maior nesta condição. Com esse maior aquecimento, o volume de material fundido aumenta e o resfriamento provocado pelo fluido dielétrico produz maior quantidade de trincas na camada branca, podendo se propagar até no substrato.



A) Parâmetros de acabamento.

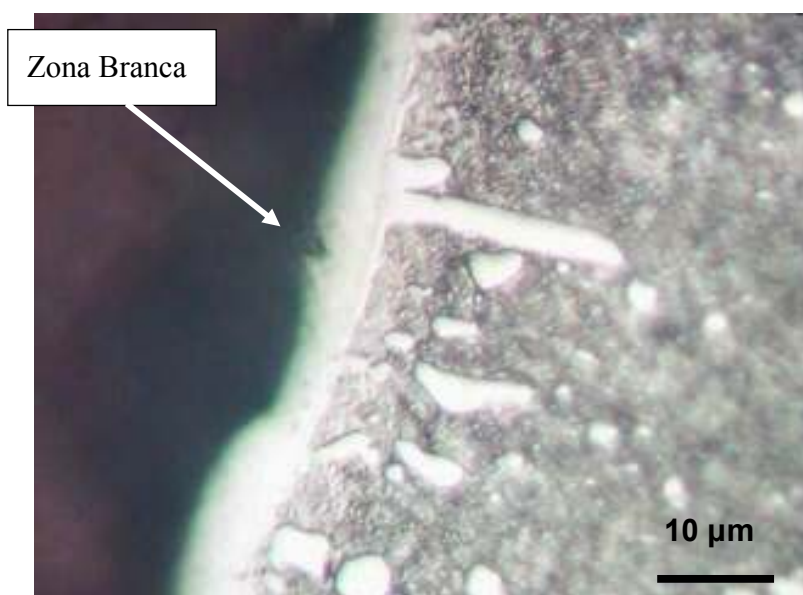


B) Parâmetros de desbaste.

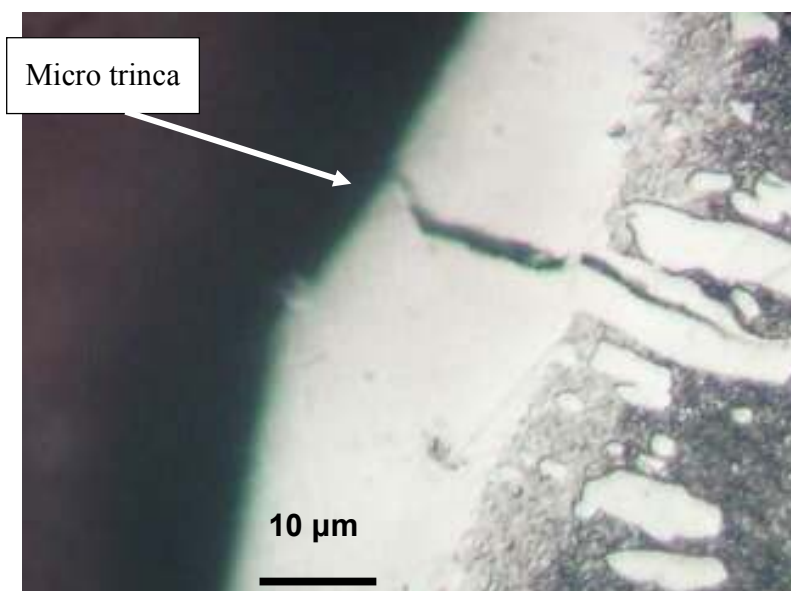
Figura 88 – Microscopia ótica das amostras do aço AISI H13 normalizado (Aumento de 500x).

Amostras do aço AISI D6 beneficiados, submetidas à eletroerosão em regimes de acabamento e desbaste, são mostradas nas fotografias de microscopia ótica na figura 89. Esse material apresenta morfologia distinta, com o fundo perlítico e placas

de carbonetos metálicos bem destacadas (Fig. 89 A). São observadas trincas transversais que atravessam a zona branca e placas de carbonetos. Provavelmente, essas trincas ocorrem devido ao choque térmico do processo de eletroerosão. As placas de carbonetos metálicos são regiões de alta energia que, ao se submeter a essa variação de temperatura, ficam tensionadas no ponto de se romper (Fig. 89 B).



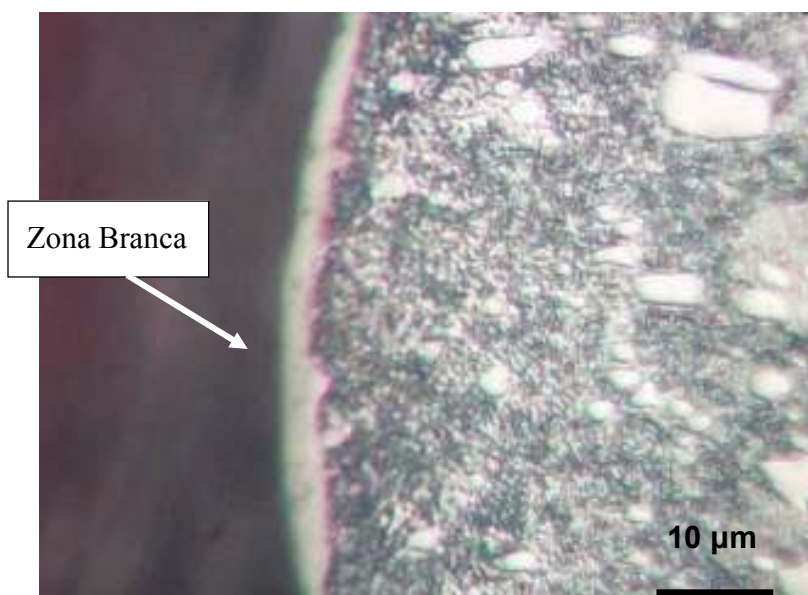
A) Parâmetros de acabamento.



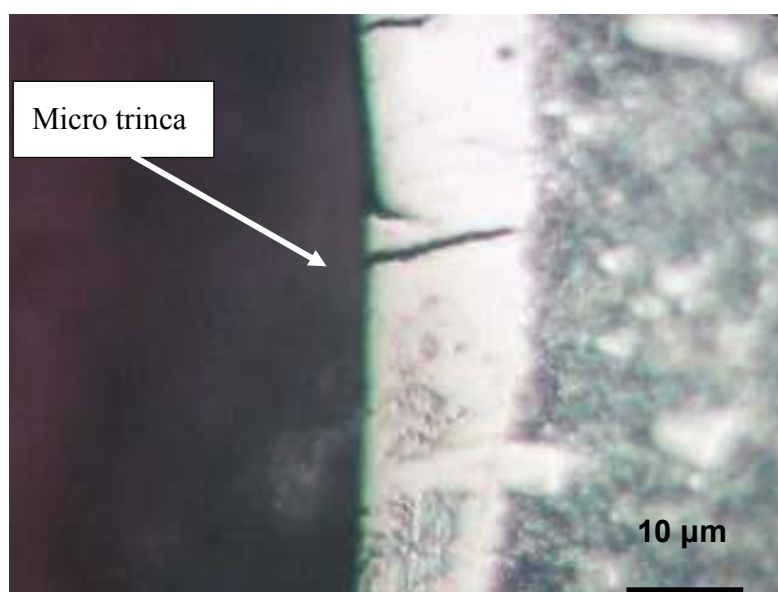
B) Parâmetros de desbaste.

Figura 89 – Microscopia ótica das amostras do aço AISI D6 beneficiadas (Aumento de 500x).

A diferença de espessura da zona branca das amostras de aço AISI D6 normalizado, submetidas à eletroerosão, é mostrada na figura 90. A presença de trincas transversais é mais acentuada nos regimes de desbaste, devido ao maior calor, fornecido para a usinagem e conseqüente resfriamento brusco (Fig. 90 B). A zona branca, nas amostras submetidas ao regime de acabamento, é desigual e inexe em alguns pontos (Fig. 90 A), provavelmente devido às diferenças de temperaturas e composições químicas heterogêneas.



A) Parâmetros de acabamento.



B) Parâmetros de desbaste.

Figura 90 – Microscopia ótica das amostras do aço AISI D6 normalizadas (Aumento de 500x).

4.5 Caracterização Topográfica

As topografias das amostras de aço AISI H13 e AISI D6, normalizadas e beneficiadas eletroerodidas em condições de acabamento e desbaste, apresentam-se

em fotografias que foram tiradas no Microscópio Eletrônico de Varredura com tensão de 25 kV. A figura 91 mostra essas fotografias para efeito de comparação visual da textura e características topográficas, além de trincas longitudinais e porosidades, com incidência de crateras com espalhamento em toda a superfície da amostra de aço AISI H13 beneficiado, eletroerodido, em regime de desbaste.

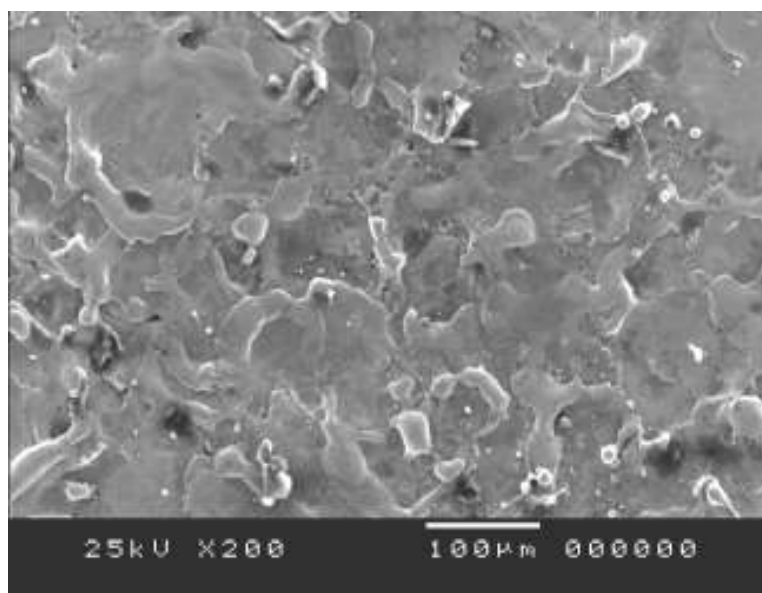


Figura 91 - Regime de desbaste do aço AISI H13 beneficiado (Aumento de 200x).

Com ampliação de 1000x, nas figuras 92 e 93, dá pra distinguir a diferença de topografia nos dois regimes. Na superfície submetida ao regime de desbaste, as crateras têm dimensões maiores.

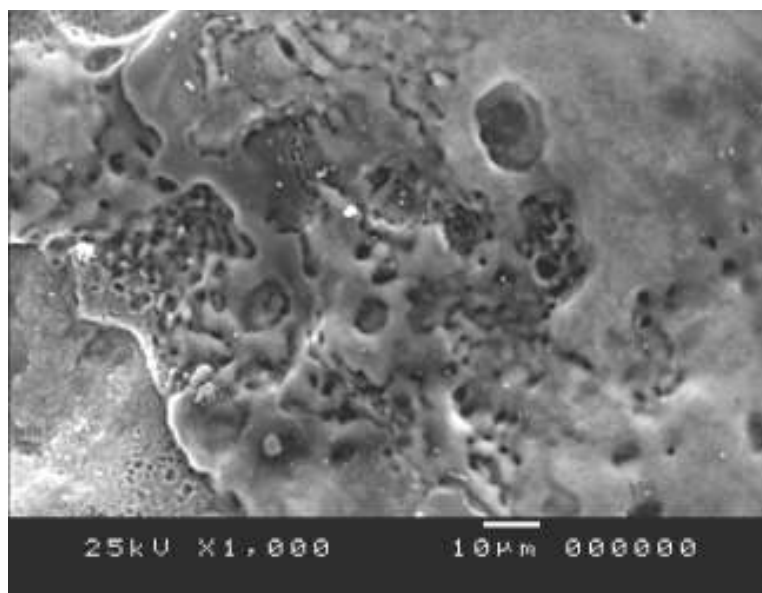


Figura 92 - Regime de desbaste do aço AISI H13 beneficiado (Aumento de 1000x).

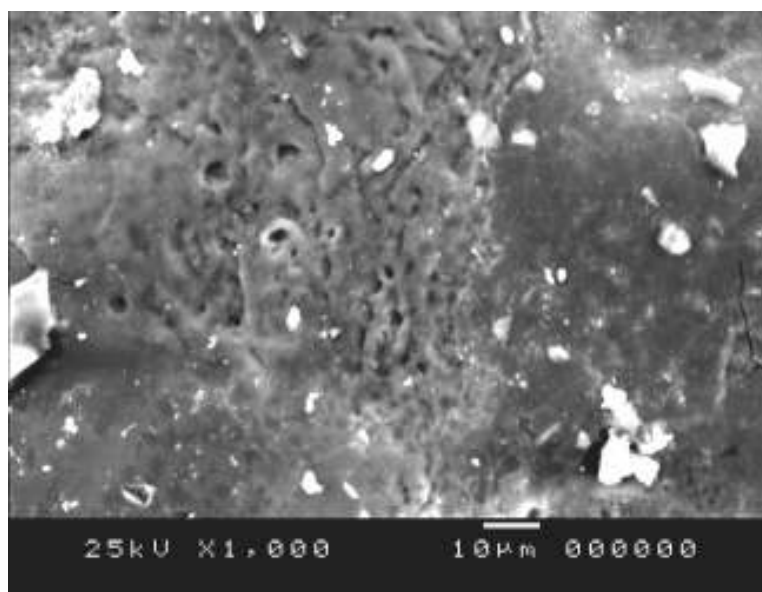


Figura 93 - Regime de acabamento do aço AISI H13 beneficiado (Aumento de 1000x).

A figura 94 apresenta trincas superficiais produzidas pela grande diferença de temperatura que é próprio do processo de eletroerosão na amostra de aço AISI H13 beneficiado, eletroerodida, em regime de desbaste.

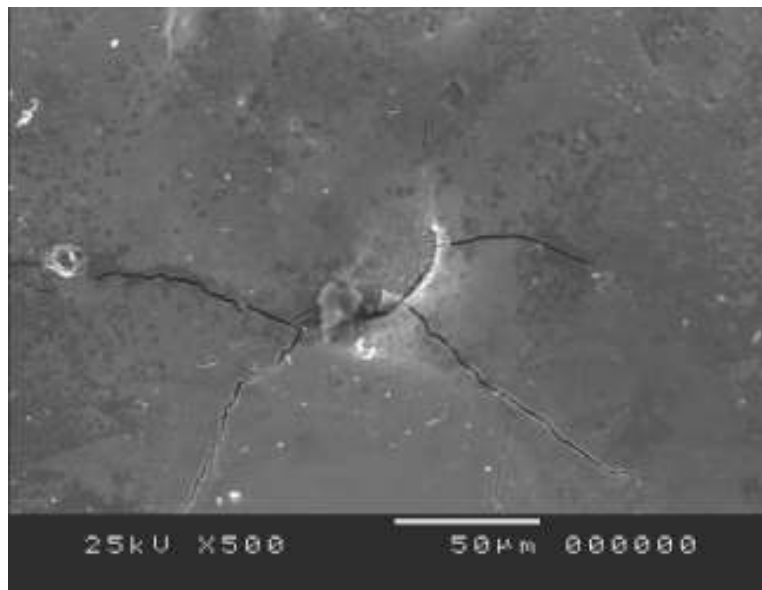


Figura 94 - Trinca superficial ocorrida em regime de desgaste das amostras de aço AISI H13 beneficiado (Aumento de 500x).

A figura 95 mostra topografia da amostra de aço AISI D6 beneficiado, submetida ao regime de acabamento com suas crateras, ao longo da superfície, enquanto que a figura 96 mostra detalhe de uma cratera com porosidades nas regiões adjacentes.

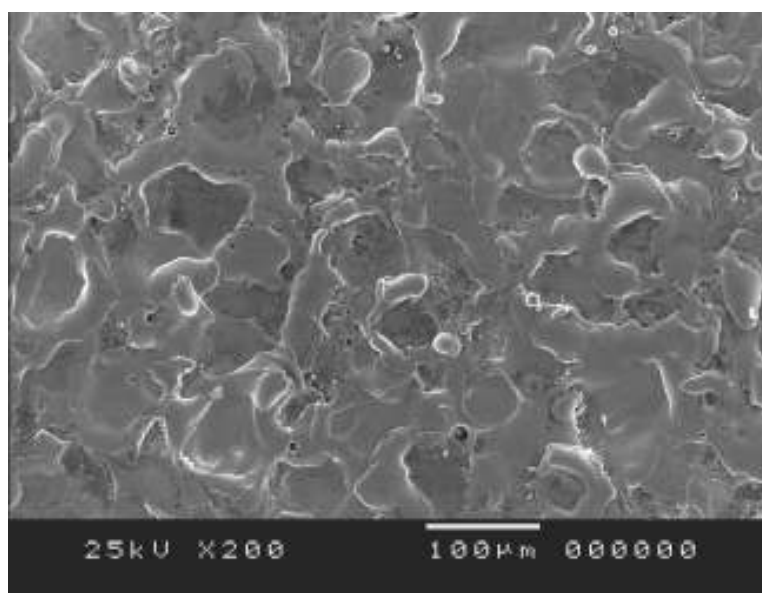


Figura 95 - Regime de acabamento do aço AISI D6 beneficiado (Aumento de 200x).

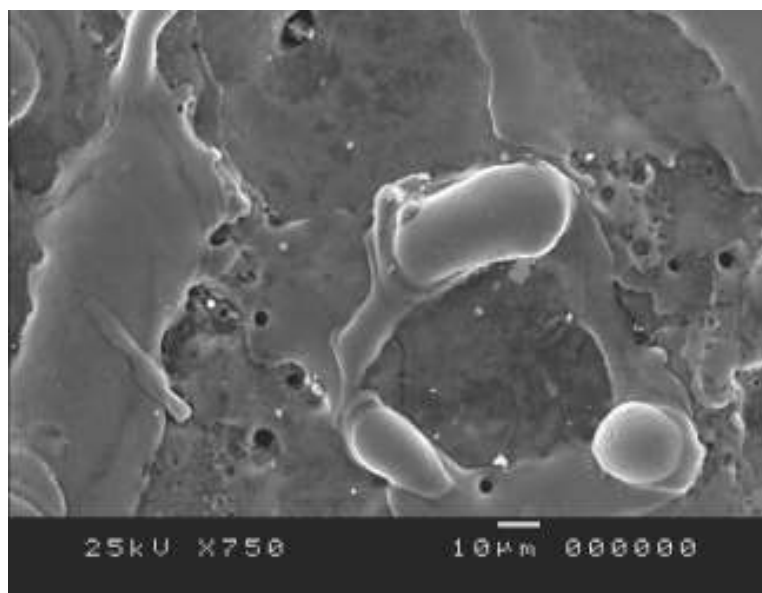


Figura 96 - Regime de acabamento do aço AISI D6 beneficiado (Aumento de 750x).

A figura 97 exibe trincas na superfície da amostra de aço AISI D6 beneficiado, submetida ao regime de desbaste, já na figura 98, essas trincas são mais detalhadas, podendo ser observadas ao longo de toda a superfície.

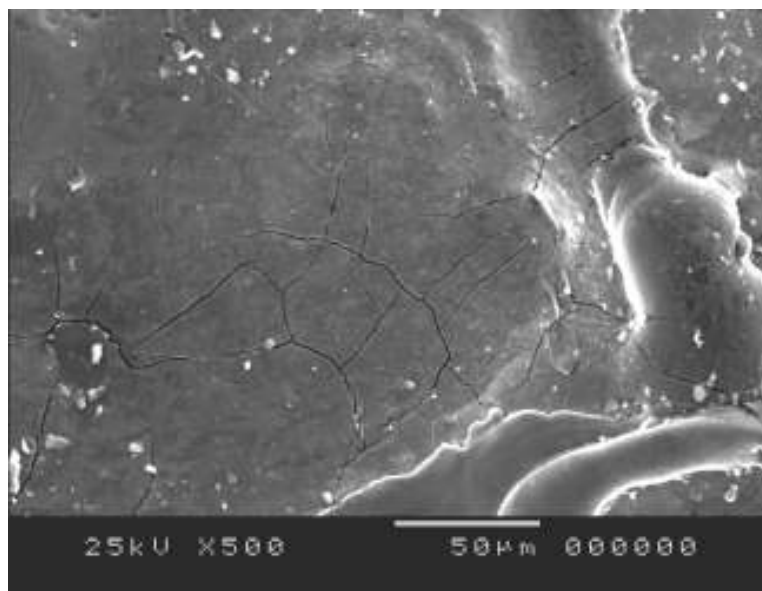


Figura 97 - Trincas superficiais na amostra de aço AISI D6 beneficiado, submetida ao regime de desbaste (Aumento de 500x).

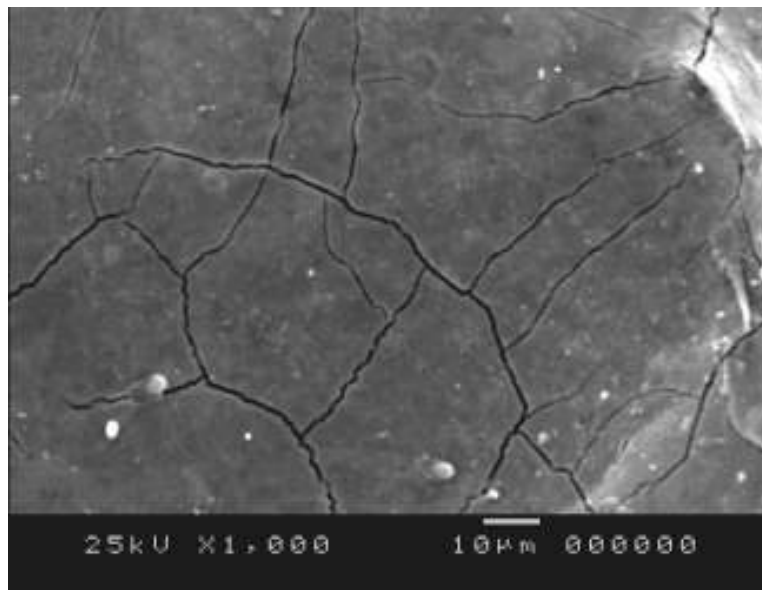


Figura 98 - Trincas superficiais na amostra de aço AISI D6 beneficiado, submetida ao regime de desbaste (Aumento de 1000x).

Para o aço AISI D6, aparentemente, observa-se maior quantidade de trincas. Isso pode ser atribuído à sua maior dureza, possivelmente conseguida pela sua composição química.

A figura 99 exibe parte de uma amostra de aço AISI D6 normalizado, submetida ao regime de acabamento. Observam-se detalhes de poros e trincas na superfície eletroerodida.

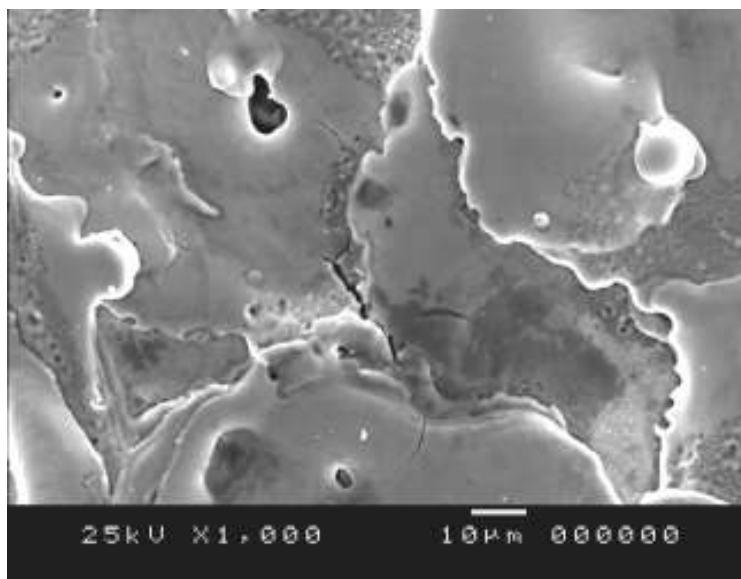
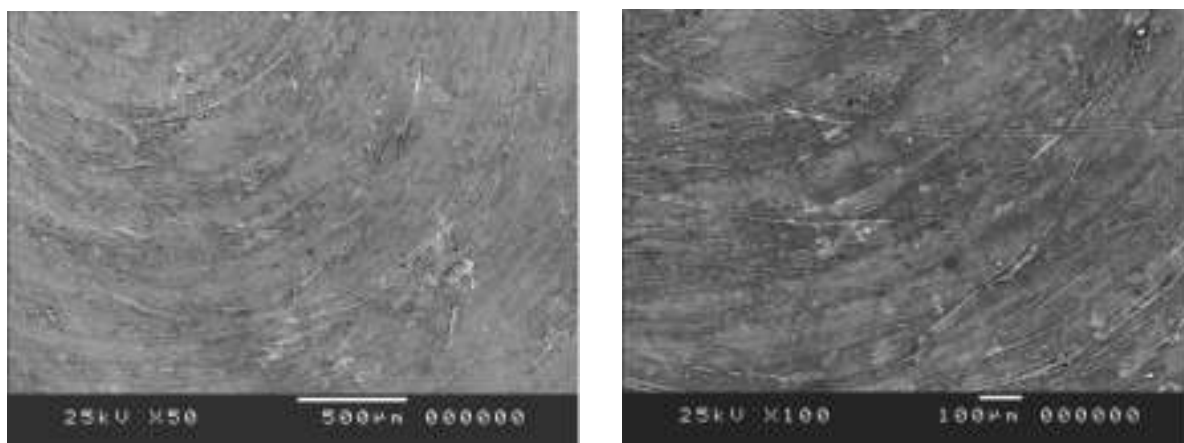


Figura 99 - Regime de acabamento da amostra de aço AISI D6 normalizado (Aumento de 1000x).

A superfície eletroerodida apresenta espessas camadas altamente endurecidas (ver figuras 91 a 93) com alta concentração de microtrincas superficiais e que podem atingir o substrato. Essas superfícies, portanto, apresentam elevadas concentrações de tensões e que podem comprometer a vida útil do componente, principalmente se submetido a carregamentos cíclicos. Nesses casos, predomina-se a remoção da camada branca por outro processo de usinagem. Entre outros, citá-se a retificação que é um processo de remoção de material por abrasão e a usinagem eletroquímica (ECM – *Electro Chemical Machining*) que remove material por meio de reações químicas.

Os eletrodos de cobre eletrolítico foram usinados em operação de faceamento no torno mecânico com avanço de 0,1 mm/rot antes dos trabalhos de eletroerosão e as faces foram fotografadas no MEV e se apresentam na figura 100.

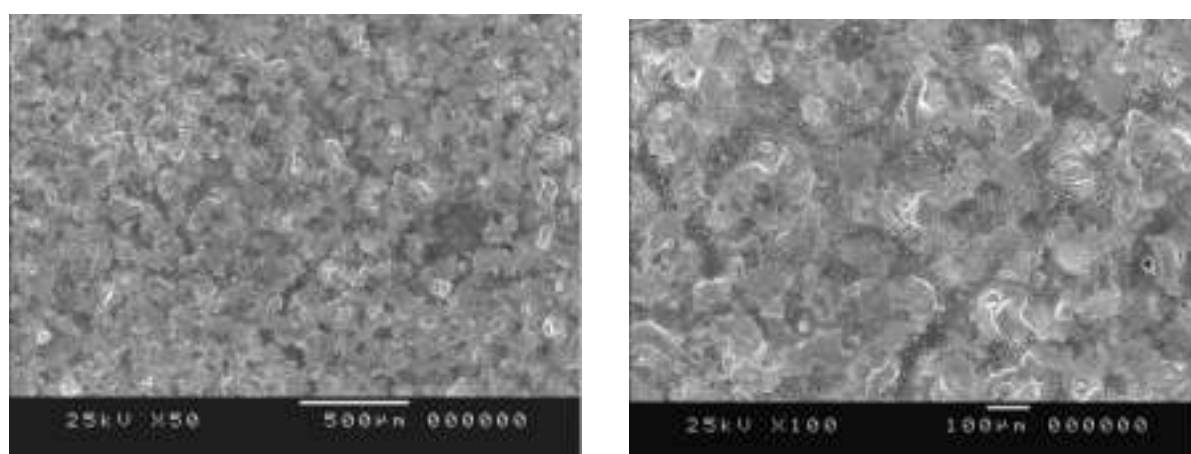


A) Face do eletrodo-ferramenta.

B) Face do eletrodo ferramenta.

Figura 100 – Topografia da face do eletrodo de cobre eletrolítico antes das operações de eletroerosão.

Após a utilização do eletrodo, há uma modificação acentuada na topografia da superfície com poros e crateras, observadas na figura 101.



A) Superfície do eletrodo

B) Superfície do eletrodo.

Figura 101 – Topografia da face do eletrodo de cobre eletrolítico após as operações de eletroerosão.

4.6 Microdureza

Os parâmetros de usinagem por eletroerosão escolhidos para este trabalho, principalmente o de acabamento, produziram uma zona branca de espessura máxima de 20 μm . Para obter uma impressão compatível com essa dimensão, é necessário que a carga usada no ensaio de microdureza seja no máximo de 100 gf para as condições desses materiais. O espaçamento entre as impressões utilizado foi de 50 μm . Outra dificuldade é de se conseguir posicionar o penetrador, pois a zona branca é na borda da amostra, próxima do baquelite, utilizado no embutimento e que, na maioria das vezes, devido à dificuldade de preparação, apresenta-se abaulada. Esse arredondamento da borda pode gerar deformações nas impressões, causando imprecisões nas leituras das medidas de dureza. A figura 102 mostra fotografia da impressão produzida no ensaio de microdureza Vickers em amostra eletroerodida de aço AISI H13.

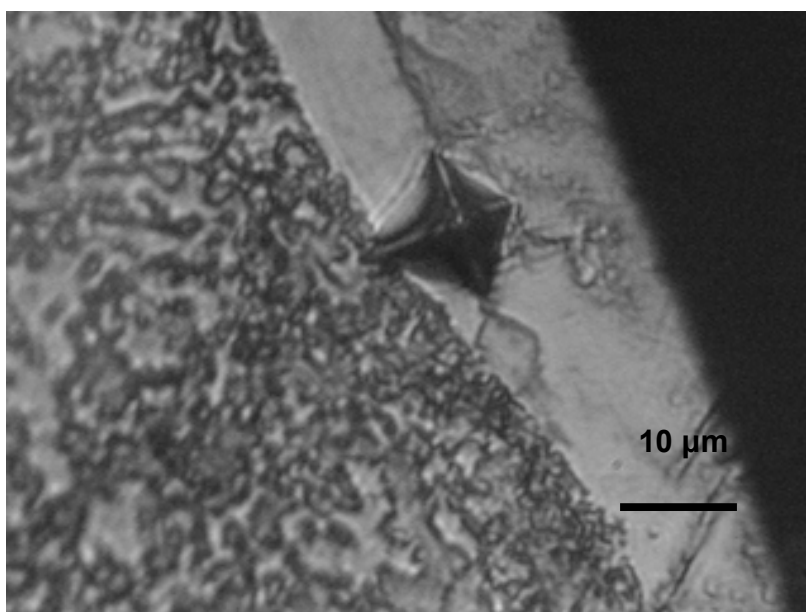


Figura 102 – Impressão produzida em ensaio de microdureza (aumento de 400x), na amostra eletroerodida de aço AISI H13, normalizado, submetida à condição de acabamento.

A figura 103 mostra a variação da dureza ao longo do sentido transversal das amostras do aço AISI D6 beneficiado, submetido ao regime de acabamento. Na região da zona branca, a dureza atingiu valores de até 612 HV devido a influências térmicas do processo de eletroerosão. Essa dureza vai diminuindo à medida que se desloca para o interior da amostra e tem um valor intermediário a uma distância de aproximadamente 100 μ m. A partir de 150 μ m, a dureza medida apresenta uma uniformidade de valores variando entre 550 e 560 HV.

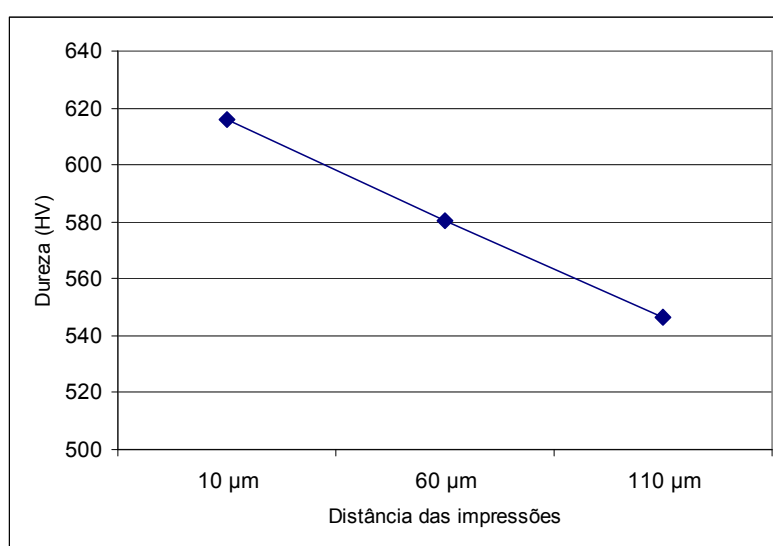


Figura 103 – Dureza do aço AISI D6, beneficiado, submetido ao regime de acabamento em usinagem por eletroerosão.

Nas amostras do aço AISI D6 beneficiado, submetidas à eletroerosão em regime de desbaste, também há um decréscimo da dureza à medida que se desloca para o interior da amostras em seu sentido transversal. Na figura 104, esse decréscimo é mostrado na curva e tem uma inclinação mais suave.

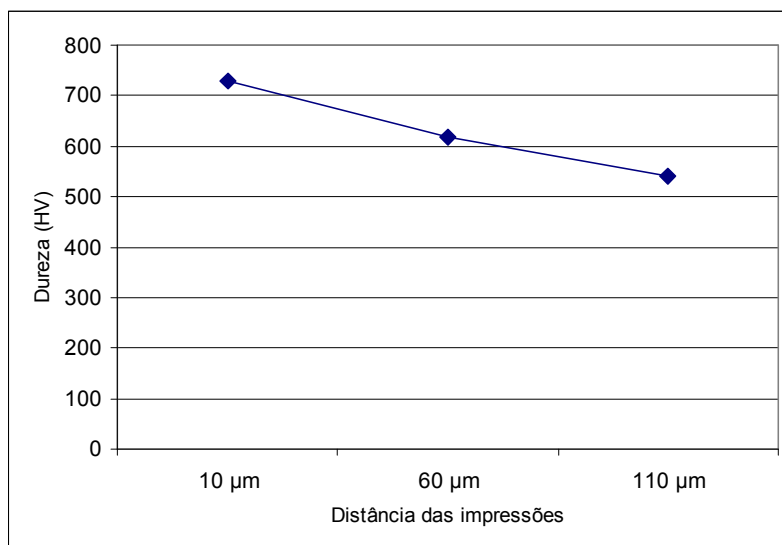


Figura 104 – Dureza do aço AISI D6, beneficiado, submetido ao regime de desbaste em usinagem por eletroerosão.

A figura 105 mostra que a dureza medida em amostras de aço AISI H13 beneficiado, submetidas à eletroerosão por penetração, em regime de desbaste, possui um valor menor próximo à região da zona branca, estando a uma distância de aproximadamente 50 µm. É possível que tenha acontecido a decarbonetação da superfície usinada, o que justifica a baixa dureza da zona branca em relação ao substrato. Também, devido às influências das variações térmicas, existe a possibilidade de formação de martensita revenida. A partir de 100 µm, os valores de dureza tendem a se igualar ao longo da superfície do substrato.

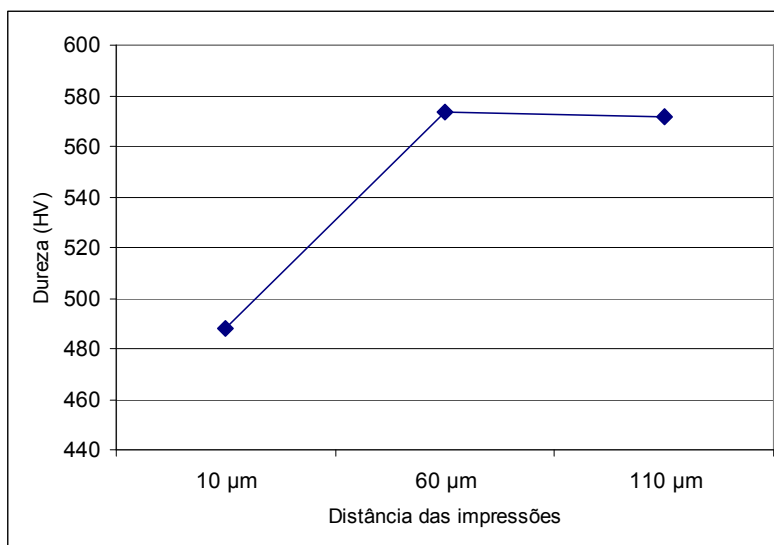


Figura 105 – Dureza do aço AISI H13, beneficiado, submetido ao regime de desbaste em usinagem por eletroerosão.

A dureza das amostras do aço AISI H13 beneficiado, submetidas à eletroerosão por penetração, em regime de acabamento, medida na região da zona branca, atingiu valores maiores que a do substrato. A figura 106 mostra esse detalhe, representado no gráfico.

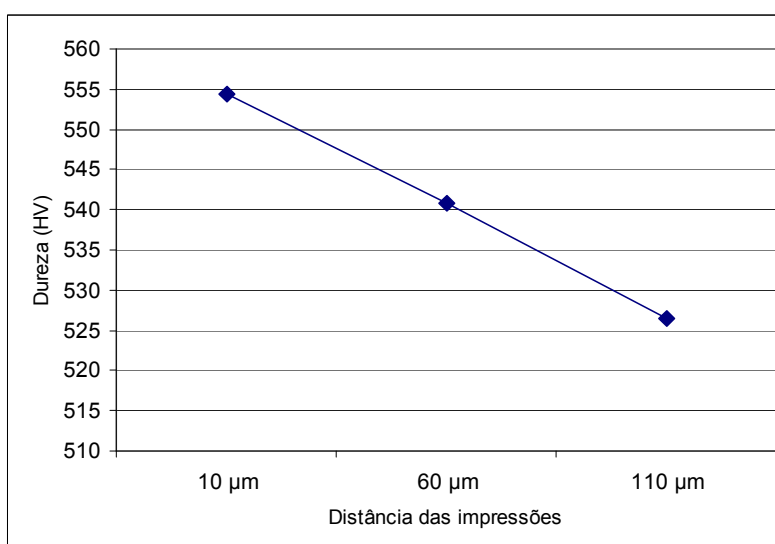


Figura 106 – Dureza do aço AISI H13, beneficiado, submetido ao regime de acabamento em usinagem por eletroerosão.

A figura 107 mostra que houve um aumento significativo da dureza nas amostras de aço AISI H13, normalizado, eletroerodidas, no regime de desbaste. Esse aumento é bastante acentuado na região da zona branca, a uma distância de aproximadamente 10 μm da borda da amostra. A partir de 60 μm , na direção do centro da amostra, os valores de dureza conservam-se em aproximadamente 220HV. Segundo Amorim (2002), a camada branca apresenta modificações em sua estrutura e composição química, apresentando dureza superior ao metal base da liga, devido principalmente à interação do carbono, liberado pela desintegração do dielétrico, que se funde para dentro da peça formando cementita.

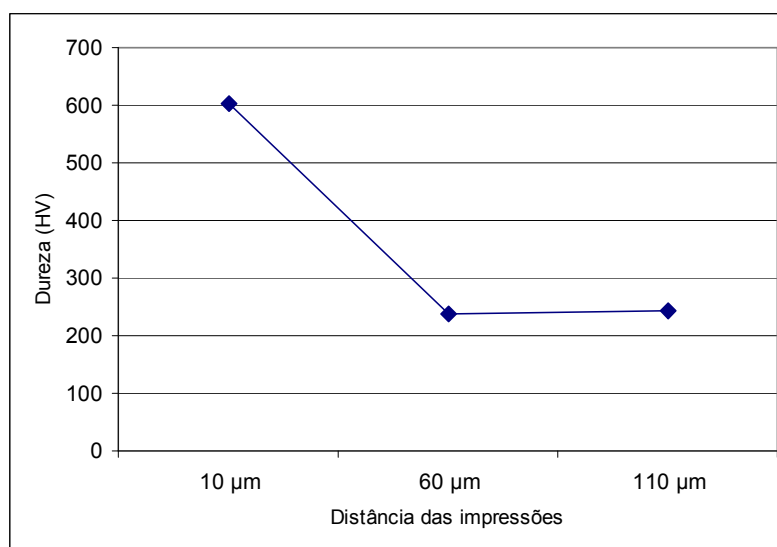


Figura 107 – Dureza do aço AISI H13, normalizado, submetido ao regime de desbaste em usinagem por eletroerosão.

Apesar de esses dois materiais serem aços-ferramenta, eles possuem elementos de liga diferentes e em quantidades diferentes. Essas diferenças nas composições químicas, associadas às forças de ligação atômica e ao reticulado cristalino, irão influenciar de forma decisiva nos fatores que interferem na eletroerosão como: calor específico, condutividade térmica e temperatura de ebulição, além da resistência elétrica, relação entre a temperatura de evaporação e fusão dos materiais. Essa interferência acontece na taxa de remoção de material, desgaste do eletrodo e rugosidade.

5 CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste capítulo são apresentadas as conclusões e as sugestões para trabalhos futuros, baseadas nos resultados obtidos nos testes realizados, segundo a metodologia proposta e apresentada no capítulo 3.

5.1 Conclusão

Depois do desenvolvimento deste trabalho concluiu-se que:

Os valores da rugosidade R_a e R_z acompanham os mesmos valores no regime de acabamento dos dois materiais, tanto na condição de beneficiado quanto normalizado. As diferenças entre os dois materiais, em regime de acabamento, não influenciaram significativamente nos valores da rugosidade avaliados. No regime de desbaste, o aço AISI H13, normalizado e beneficiado, após a eletroerosão, apresentou valor da rugosidade maior que no aço AISI D6. O tratamento térmico de beneficiamento não alterou a rugosidade no aço AISI H13, no regime de acabamento, em relação ao tratamento térmico de normalização. O aço AISI H13 beneficiado apresenta maior rugosidade que o normalizado, quando submetido ao regime de desbaste. O aço AISI D6 beneficiado, em regime de acabamento ou de desbaste, apresenta rugosidade maior que a do estado de normalizado.

Na comparação entre os dois materiais normalizados, verificou-se que a taxa de remoção de material foi maior na eletroerosão do aço AISI D6 nos regimes de desbaste e acabamento. Com os dois materiais beneficiados, no regime de desbaste, o aço AISI D6 teve um desempenho melhor que o do aço AISI H13 na taxa de remoção de material. No entanto, no regime de acabamento, essa diferença não foi significativa. O desgaste do eletrodo foi maior na eletroerosão do aço AISI H13 que no aço AISI D6 em todas as situações avaliadas: regime de

trabalho ou tratamento térmico. Na relação de desgaste, o aço AISI H13 ficou sempre com valores acima do aço AISI D6 em todas as situações avaliadas.

O tratamento térmico não influenciou na taxa de remoção de material dos dois aços avaliados, estando sob regime de desbaste ou acabamento. Apesar de o aço AISI D6 ter maior dureza no estado de beneficiado, esse material normalizado provocou maior desgaste no eletrodo no regime de desbaste. No regime de acabamento, o desgaste do eletrodo foi igual para as amostras beneficiadas e normalizadas do aço AISI D6. Na eletroerosão do aço AISI H13, em regime de desbaste, o eletrodo desgastou-se mais ao usinar esse material normalizado. No regime de acabamento, o desgaste do eletrodo foi ligeiramente maior na eletroerosão do aço AISI H13 beneficiado em todas as fases do teste. O aço AISI D6 normalizado, em regime de desbaste e acabamento, apresenta relação de desgaste maior que o beneficiado. O aço AISI H13, em regime de desbaste, apresenta maior relação de desgaste em estado de normalizado que o beneficiado. Entretanto, no regime de acabamento, a relação de desgaste é a mesma para os dois tipos de tratamento térmico.

Em todas as amostras foi constatada presença da zona branca (*recast layer*), independente do material ou do tratamento térmico. O que se percebeu visualmente é que a espessura da zona branca é menor e mais uniforme em regimes de acabamento. Em regimes de desbaste, ela possui espessura maior e mais disforme.

A presença de poros e trincas transversais na zona branca, que se propagam na direção do substrato, foi detectada nas amostras. Esse fato realça a teoria que explica a elevada temperatura na eletroerosão e resfriamento brusco.

A topografia das amostras avaliadas mostra que as descargas elétricas na eletroerosão ocorrem de forma aleatória.

O aço AISI D6 beneficiado, submetido à eletroerosão, em regime de desbaste ou acabamento, apresentou elevada dureza na região da zona branca. À medida que se desloca para o interior da amostra, essa dureza diminui até se estabilizar a uma distância de aproximadamente 150 μm . Essa variação da dureza deve-se às influências térmicas do processo. O aço AISI H13 beneficiado apresentou dureza

menor na zona branca que no substrato quando submetido ao regime de desbaste. Já no regime de acabamento, a dureza da zona branca ficou maior que no substrato. O aço AISI H13 normalizado apresentou alta dureza na zona branca, valor bem maior que do substrato depois de usinado por eletroerosão no regime de desbaste.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Como sugestões para trabalhos futuros, enumeram-se as seguintes:

1) Investigar o efeito do movimento rotativo e vibratório no eletrodo e/ou na peça com variação de parâmetros na usinagem por eletroerosão por penetração, avaliando desgaste de eletrodos, taxa de remoção de material e integridade superficial em peças submetidas a esse processo.

2) Testar o desempenho de eletrodos, como por exemplo: grafite, cobre tungstênio e qual a influência da rugosidade desses eletrodos no processo de eletroerosão.

3) Pesquisar a usinagem por eletroerosão do titânio e suas ligas para confecção de próteses metálicas e possibilidade de fabricação, utilizando também o processo de sinterização.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMORIM, F.; **Desempenho de Eletrodo de Grafita e de Cobre no Acabamento de Aço Ferramenta**. Revista Máquina e Ferramenta. Ano 2006, n. 485, jun,

AMORIM, F.; **Tecnologia de Eletroerosão por Penetração da Liga de Alumínio AMP 8000 e da Liga de Cobre CuBe para Ferramentas de Moldagem de Materiais Plásticos**. 2002, 156 f. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC.

AÇOS FAVORIT. Seqüência de processamentos dos aços AISI H13 e AISI D6. Disponível em <http://www.favorit.com.br>. Acesso em maio de 2007.

ARANTES, L. J.; **Avaliação de Fluidos Dielétricos no Processo de Usinagem por Descargas Elétricas**, 2001. 74f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG.

ARANTES, L. J.; **Desenvolvimento e Avaliação do Processo Híbrido de Usinagem por Descargas Elétricas e Jato de Água Abrasivo (AJEDM)**. 2007, 117f. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG.

ASM, Handbook – **Metallography and Microstructures**. ASM Interntional – The Materials Information Company, v 9, USA, 2004.

BENEDICT, G. F.; **Nontraditional Manufacturing Processes**. New York: Marcel Dekker, p. 207-229, 1987.

CASAS, B. ; TORRES, Y.; LLANES, L.; **Fracture and fatigue behavior of electrical discharg machined cemented carbides**. Refractory Metals and Hard Materials, Elsevier, 2005.

CALLISTER JR., W. D.; **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**, LTC, Rio de Janeiro, RJ, 2000.

CEZAR, A. B.; **Monitoramento da Transição da Fase Estrutural CCC – CFC da Liga Co**. 2006, Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR.

CHIAVERINI, V.; **Aços e ferros fundidos**. Associação Brasileira dos Metais, São Paulo, 1984.

DIBITONTO, D. D. et al; **Theoretical models of the electrical discharge machining process: a simple cathode erosion mode**. Journal of Applied Physics, USA, v. 66, n.9.p. 4095-4103, nov. 1989.

DROZDA, T. J.; **Tool and manufacturing engineers handbook: machining**. USA: Society of Mechanical Engineers, 1998, 5v.

ENGEMAQ – AGIE CHARMILLES, **Manual de instalação, operação e manutenção da máquina EDM 440 NC série L**, Caxias do Sul, RS, 2006.

EUBANK, P. T. et al.; **Theoretical models of the electrical discharge machining process 3: the variable mass, cylindrical plasma mode**. Journal of Applied Physics, USA, v. 73, n. 11, p. 7900-7909, jun. 1993.

FERRARESI, D.; **Fundamentos da usinagem dos metais**. Edgard Blucher, São Paulo, 1977.

FREITAS, W. R. de; **Análises Quantitativas de Carbonetos em Aços Ligados**. 1987, 122f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG.

GIROTTI, E. M., SANTOS, I. A.; **Medidas de Resistividade Elétrica DC em sólidos: como efetuá-las corretamente.** Química nova, vol.25, n.4 639 – 647, 2002

GUITRAU, E. B.; **The Electrical Discharge Machining handbook.** Hanser Gardner Publications, Cincinnati, 1997.

HO, K. H.; NEWMAN, S. T.; **State of the art electrical discharge machining (EDM)** Pergamon, June 2003.

KAHNG, C. H.; RAJURKAR, K. P.; **Fundamental theories of the parameters of EDM process.** SME Technical Papers, USA, v. 1, p. 77-285, 1977.

KLOCKE, F. et al; **The effects of powder suspended dielectrics on the thermal influenced zone by electrodischarge machining with small discharge energies.** Materials Processing Technology, Elsevier, 2004.

KÖNIG, W. ; KLOCKE, F.; LENZEN, R.; **The electrical machining processes: what demands will they face in the future.** International Journal of Electrical Machining. Japan, v.1 n.1.p. 3-7, 1996.

KRAUSS, G.; **Steel: Heat Treatment and Processing Principles.** 1989, ASM International, Ohio, 1989.

LEE, Y. L.; **Fatigue Testing and Analysis – Theory and Practice.** Elsevier TLFebook, p. 109, 2005.

MCGEOUGH, J. A.; **Advanced Methods of Machining.** London: Chapman and Hall, 1988. p. 128-152.

NBR NM 188 – 1 **Norma para medição da Dureza Vickers**, ABNT, maio de 1999.

OARMOLDWORKS. **Cooper versus graphite**. Disponível em <http://www.oarmolds.com>. Acesso em abril de 2007.

OLIVEIRA, C. J.; **Avaliação da Influência de Sistemas de Filtragem Aplicados a Topografia de Superfície em Usinagens**, 2004. 123f. Dissertação de Mestrado – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG.

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE MINAS GERAIS. Pró-Reitoria de Graduação. Sistema de Bibliotecas. **Padrão PUC Minas de normalização**: normas da ABNT para apresentação de trabalhos científicos, teses, dissertações e monografias. Belo Horizonte, 2007. Disponível em: <http://www.pucminas.br/biblioteca>. Acesso em: outubro de 2007.

SALES, W. F.; SANTOS, S. C.; **Aspectos tribológicos da usinagem dos metais**. Artliber, São Paulo, 2007.

SCHUMACHER, B. M.; **After 60 years of the EDM the discharg process remains still disputed**. Materials Processing Technology, Elsevier, November 2003.

SILVA, N. H.; **Usinagem de Furos de Pequenos Diâmetros na Liga de Titânio Ti6Al4V em Máquina de Eletroerosão por Penetração**. 2006,109f. Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, PR.

TAYLOR HOBSON PRECISION, **Guide to Surface Texture Parameters**, 2000.

VAN DIJKI, F. et al; **Some results of physical research in EDM**. In: International Symposium for Electromachining, Bratislava, 1974, 1 v. P. 68-85.

VAN VLACK, L. H.; **Princípios de Ciência e Tecnologia dos Materiais**. Campus, Rio de Janeiro, RJ, 1984.

VARTANIAN, M. A.; ROSENHOLM, O.; **Methods of manufacturing**. Proceedings of Manufacturing Conference, Chicago, EUA, v.1, p1 – 16, 1992.

VDI – VEREIN DEUTSCHER INGENIEUR. **Elektroersive bearbeitung: definitionen und terminologie**, 3402. Dusseldorf, 1990, 2 v.

YU, Z. B.; JUN, T.; KUNIEDA, M.; **Dry electrical discharge machining of cemented carbide**. Elsevier, October, 2003.