

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

Herbert Eustáquio da Silva Júnior

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À FADIGA DA CAMADA NITRETADA PELO
PROCESSO DE ELETROEROSÃO NO AÇO AISI 4140**

BELO HORIZONTE

2016

HERBERT EUSTÁQUIO DA SILVA JÚNIOR

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À FADIGA DA CAMADA NITRETADA PELO
PROCESSO DE ELETROEROSÃO NO AÇO AISI 4140**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no Curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Ernane Rodrigues da Silva

BELO HORIZONTE

2016

HERBERT EUSTÁQUIO DA SILVA JÚNIOR

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À FADIGA DA CAMADA NITRETADA PELO
PROCESSO DE ELETROEROSÃO NO AÇO AISI 4140**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no Curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

APROVADO EM 01/07/2016

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Ernane Rodrigues da Silva

Prof. Dr. Marcello Rosa Dumont

Prof. Dr. Rogério Felício dos Santos

RESUMO

O objetivo deste trabalho é avaliar a resistência à fadiga da camada nitretada, do aço AISI 4140, pelo processo de usinagem por descarga elétrica (EDM) com fluidos dielétrico distintos, comparando-a com a condição do aço AISI 4140 como recebido. Para a obtenção dos resultados foi realizado ensaios de microdureza Vickers, microscopia óptica, microscopia eletrônica de varredura (MEV), ensaio de tração e ensaio de fadiga. Os resultados mostraram que o processo de usinagem por EDM promove o aparecimento de outras camadas na superfície do material, com durezas superiores a do metal base, assim como a formação da camada nitretada com espessura de aproximadamente 25 μ m. Ocorre também, uma melhora na resistência à fadiga do corpo de prova nitretado por descargas elétricas, em relação à superfície apenas usinada por EDM. Entretanto, quando se comparado ao material como recebido, não há ganho de resistência à fadiga.

Palavras chave: Aço AISI 4140; EDM; Nitretação por descargas elétricas; Fadiga

ABSTRACT

The objective of this study is to evaluate the fatigue resistance of the nitrided layer of the steel AISI 4140, by electric discharge by machining process (EDM) with different dielectric fluids, comparing it to the steel AISI 4140 as received. The results were obtained by Vickers hardness testing, optical microscopy, scanning electron microscopy (SEM), tensile and fatigue tests. The results showed that the process of machining by EDM promotes the appearance of other layers on the surface of the material with higher hardness than the base metal, and the formation of the nitrided layer with thickness of approximately 25 μ m. It was also observed an improvement in fatigue resistance in the specimen nitrided by electrical discharges compared with the surface only machined by EDM. However, when compared to the material as received, there is no increase in fatigue resistance.

Keywords: AISI 4140; EDM; Nitriding by EDM; Fatigue

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Aspecto macroscópico da fratura por fadiga: A – início da fratura; B – marcas de praia; C – ruptura.....	15
Figura 2 - Exemplo de uma curva S – N do aço SAE 2330 temperado.	16
Figura 3 - Equipamento para o ensaio de flexão rotativa com aplicação de carga em uma das extremidades.....	18
Figura 4 - Equipamento para o ensaio de flexão rotativa com aplicação de carga em ambas as extremidades.....	18
Figura 5 - Desenho esquemático da máquina de ensaio de fadiga de flexão plana.....	19
Figura 6 – Máquina real Ensaio de fadiga flexão plana com detalhamentos.	20
Figura 7 - Máquina de fadiga axial.....	21
Figura 8 – Exemplo de um corpo de prova circular para o ensaio de fadiga.	22
Figura 9 - Exemplo 2 de um corpo de prova circular para o ensaio de fadiga.....	22
Figura 10 - Representação esquemática da usinagem por eletroerosão.	25
Figura 11 - Representação esquemática das etapas da usinagem por eletroerosão: (a) ignição, (b) criação do canal de plasma, (c) fusão e sublimação dos resíduos da peça e do eletrodo e (d) limpeza dos materiais que se fundiram.....	25
Figura 12 - Representação esquemática das mudanças superficiais a partir da alteração do tempo de descarga elétrica.....	27
Figura 13 – Crateras formadas no processo de EDM.....	27
Figura 14 – Irregularidades do processo por EDM.	28
Figura 15 - Representação esquemática de uma máquina de EDM.	29
Figura 16 – Micrografia da seção transversal do aço AISI4140 nitretado por EDM.....	30
Figura 17 - Procedimento experimental resumido	31
Figura 18 - Projeto da matriz utilizada como eletrodo ferramenta.....	33
Figura 19 - Máquina de EDM utilizada nos experimentos.....	34
Figura 20 - Adaptações na máquina de EDM.....	35
Figura 21 – Configuração da usinagem por EDM.....	36
Figura 22 – Painel de controle da máquina de EDM.....	37
Figura 23 - Microdurômetro Vickers.....	38
Figura 24 – MEV.....	39
Figura 25 - Microscópio óptico.	39
Figura 26 – Corpo de prova para o ensaio de tração conforme norma ASTM A370-15.	40

Figura 27 – Corpo de prova para o ensaio de fadiga conforme norma ASTM E466-15.....	40
Figura 28 – Máquina para o ensaio de tração.....	41
Figura 29 – Máquina de ensaio de fadiga axial.....	42
Figura 30 – Corpo de prova usinado por EDM-ureia.....	43
Figura 31 – Morfologia das amostras EDM-ureia, A e B e EDM-água, C e D.....	44
Figura 32 – Seção transversal dos corpos de prova EDM-ureia e EDM-água.....	44
Figura 33 – Imagens do ensaio de microdureza Vickers EDM-ureia e EDM-água.....	45
Figura 34 – Relação da microdureza Vickers com a camada ensaiada.....	46
Figura 35 – Curvas S-N para os diferentes processos.....	48
Figura 36 – Resultado do Ensaio de Fadiga.....	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química do aço AISI 4140.	32
Tabela 2 - Propriedades mecânicas típicas do aço AISI 4140 laminado a quente, normalizado e recozido.....	33
Tabela 3 – Parâmetros utilizados na usinagem CNC.	34
Tabela 4 – Parâmetros utilizados na usinagem por EDM.	37
Tabela 5 - Condutividade elétrica das soluções utilizadas para a usinagem por EDM.	43
Tabela 6 – Microdureza Vickers EDM-ureia.	46
Tabela 7 – Resultados obtidos para o ensaio de tração do aço AISI 4140.	47
Tabela 8 – Relação dos valores obtidos no ensaio de fadiga.....	47

Sumário

1	INTRODUÇÃO	11
2	OBJETIVOS.....	13
3	FUNDAMENTOS TEÓRICOS E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
3.1	Fadiga em aços.....	14
3.2	Ensaio de fadiga.....	15
3.2.1	Ensaio de flexão rotativa	17
3.2.2	Ensaio de flexão plana	18
3.2.3	Ensaio de Tração-tração	20
3.3	Normas para o ensaio de Fadiga	21
3.4	Tratamento Termoquímico	23
3.5	Usinagem por EDM	24
3.6	Nitretação por eletroerosão	28
4	METODOLOGIA	31
4.1	Seleção dos materiais dos eletrodos ferramenta e eletrodos peça.....	32
4.2	Confecção dos eletrodos ferramenta e eletrodos peça	33
4.3	Ajustes para a utilização da máquina de EDM	34
4.4	Execução da EDM-ureia e EDM-água	36
4.5	Caracterização microestrutural	37
4.5.1	Ensaio de microdureza Vickers	38
4.5.2	Microscopia Eletrônica de Varredura.....	38
4.5.3	Microscopia óptica	39
4.6	Ensaio mecânicos	40
4.6.1	Ensaio de Tração	41
4.6.2	Ensaio de Fadiga.....	42
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	43

6	CONCLUSÃO	50
7	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS	51

1 INTRODUÇÃO

Com a evolução da indústria mecânica, aliado ao aumento de produtividade, a preocupação com as falhas motivou diversos estudos, Freitas (2010) e Santos (2013), principalmente em relação à falha por fadiga, já que essa é a responsável pelo maior número de rupturas em componentes e equipamentos mecânicos.

Para o aço AISI 4140 essa realidade não é diferente, por ser um aço muito empregado em estruturas que são submetidas a ciclos de tensão, como: eixos, pinos, grampos, fixadores para indústrias agrícolas e componentes mecânicos estruturais, um aumento na sua resistência à fadiga tornaria sua aplicabilidade maior e mais segura.

Nesse contexto, o tratamento termoquímico de Nitretação surge como uma das alternativas para esse aumento na resistência à fadiga dos aços. Dentre os tipos de nitretação, a que emprega o plasma tem sido a mais utilizada (SANTOS, 2013). Esse tratamento consiste no bombardeamento de íons sobre a superfície dos aços, gerando o aumento de temperatura deste e possibilitando a reação química dos elementos do metal com os íons de nitrogênio, ocasionando o aumento da dureza do material (CHIAVERINI, 2008).

Alguns estudos apontam a possibilidade de aplicar o processo de nitretação aliado ao processo de usinagem por descarga elétrica (EDM). Nesse processo híbrido, basicamente, enquanto a peça é usinada dentro de uma solução (fluido dielétrico) contendo nitrogênio, o superaquecimento do meio proporciona a formação de nitretos na superfície do material.

Santos (2013) encontrou resultados satisfatórios para esse processo. Usinando o aço AISI 4140, pelo processo de EDM, usando como fluido dielétrico a solução de água deionizada e ureia, ele conseguiu inserir o nitrogênio na superfície do aço, ocasionando ganho de dureza no material.

Yan *et al.* (2005) e Camargo *et al.* (2009) já haviam comprovado a possibilidade de implementação desse método. Utilizando também água deionizada e ureia como solução, eles adicionaram nitrogênio à superfície de amostras de titânio, gerando aumento de dureza no material.

Neste trabalho além de nitretar o aço AISI 4140 por meio da usinagem por EDM, foi avaliado a resistência à fadiga do material e a eficiência do procedimento por meio de microscopia ótica e eletrônica por varredura, ensaio de dureza, tração e fadiga, assim como análises da superfície do aço a partir de um rugosímetro.

Para alcançar o objetivo deste trabalho foi utilizada a estrutura do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG), da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (PUC-MG) e da Fiat Chrysler Automóveis Brasil LTDA, planta de Betim-MG.

2 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é avaliar a resistência à fadiga, por meio da curva S-N, da camada nitretada pelo processo de usinagem por descargas elétricas do aço AISI 4140, a partir da comparação com os valores de resistência à fadiga obtidos para esse aço na condição como o recebido e usinado por EDM.

3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Fadiga em aços

O termo “fadiga” é derivado do latim “fatigare” e quer dizer “ cansaço”(COLIM, 2006). Ele foi empregado pela primeira vez no início do século XIX, quando, após um curto intervalo de utilização, os eixos de vagões ferroviários começaram a falhar exibindo aspectos de fratura frágil e repentina, mesmo sendo feitos de aço dúctil (SALDANHA, 2006).

É um fenômeno que acontece quando o material é exposto, por um longo período de tempo, a tensões repetitivas ou ciclos de deformação. Por isso, é possível que a falha ocorra em níveis de tensão inferiores ao limite de resistência à tração ou ao limite de escoamento para uma carga estática. A falha por fadiga é de forma súbita, ou seja, ela é catastrófica, ocorrendo muito repentinamente e sem avisos, chegando a acometer cerca de 90% de todas as falhas mecânicas nos metais (CALLISTER, 2006).

O estudo das falhas se faz necessário, pois por meio dele se pode evitar a perda de vidas humanas, perdas econômicas e a interferência na disponibilidade de produtos e serviços. O engenheiro deve antecipar e planejar as falhas, e, caso ocorram, avaliar suas causas (CALLISTER, 2006).

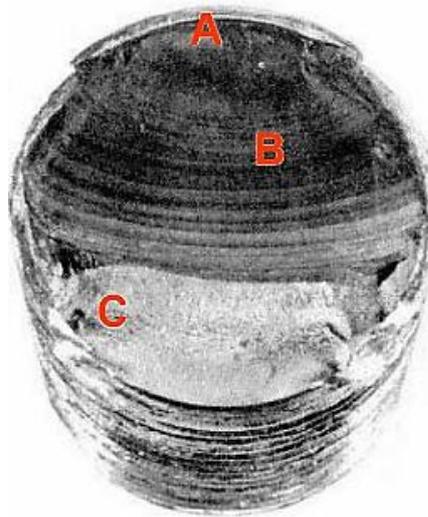
A análise da falha por fadiga é importante, pois a evolução da indústria mecânica, aliado ao aumento da produtividade, gerou um crescimento na ocorrência desse fenômeno, tornando inevitável o aprofundamento nesse tema (LOPES, 2006).

Para Barsom e Rolfe (1987) a falha por fadiga pode ser representada por três etapas distintas: Nucleação; Propagação da trinca; Fratura:

- Nucleação: É a etapa mais duradoura da vida da estrutura. Nesta fase a taxa de propagação da trinca é da ordem de nm/ciclo. Depende das tensões cisalhantes cíclicas que atuam.
- Propagação: Nesta fase a taxa de propagação é da ordem de μm /ciclo. As tensões de tração são as mais importantes nesta etapa, pois elas são responsáveis pelo crescimento das trincas nucleadas.
- Ruptura: É o colapso do material.

Outra característica da trinca por fadiga é a ausência de deformação plástica macroscópica antes da ruptura. A superfície da fratura exibe “marcas de praia” em torno do núcleo de fratura, podendo evidenciar assim, o ponto de origem da falha. Essas “marcas de praia” são derivadas da alternância de carregamento ou na frequência de aplicação da carga (BARSOM e ROLFE, 1987). Na Figura 1 é exemplificado o início da fratura, A, as marcas de praia, B, e a região final de ruptura, C.

Figura 1 - Aspecto macroscópico da fratura por fadiga: A – início da fratura; B – marcas de praia; C – ruptura.



Fonte: (MILFONT, 2014)

3.2 Ensaio de fadiga

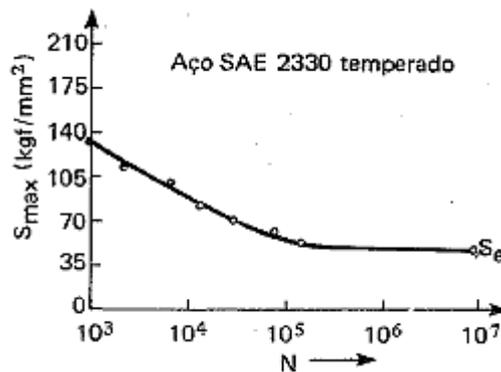
Para Brandão (2013) o ensaio de fadiga consiste na aplicação de uma carga cíclica, ou seja, com valores de tensão máximo e mínimo, alternando por um intervalo de tempo determinado pela ruptura do corpo de prova. Através desse ensaio é possível se obter o limite de tensão, tempo de uso e o tipo de aplicação do material.

Na maior parte das vezes se utiliza a própria peça durante o ensaio, para simular as condições reais de uso, entretanto por questões econômicas e pela normalização, também é utilizado corpos de prova padronizados. (BRANDÃO, 2013)

Normalmente se utiliza para a representação dos resultados do ensaio de fadiga a curva Tensão *versus* Número de ciclos, também denominada de curva Wöhler ou curva S – N. O

eixo das abcissas, representado pelo N , é o número de ciclos suportado pelo corpo de prova e, o eixo das ordenadas, representado pelo S , a tensão aplicada durante o procedimento (SOUZA, 1982). Na Figura 2 é exemplificado uma curva S-N:

Figura 2 - Exemplo de uma curva S – N do aço SAE 2330 temperado.



Fonte: SOUZA, 1982

As curvas S-N são montadas após vários ensaios com corpos de prova. Ela, na verdade, é uma média de vários pontos, quando se varia a tensão máxima ($S_{máx}$) aplicada.

Para a realização do ensaio, escolhe-se uma $S_{máx}$ prevendo uma tensão em que ocorrerá a falha com poucos ciclos (N). Mantendo a mesma velocidade para todos os ensaios, diminui-se o $S_{máx}$ para os sucessivos ensaios, até uma $S_{máx}$ em que não há a ruptura para um determinado número de ciclos (específico do material)(SOUZA, 1982).

Em seguida, após encontrar o $S_{máx}$ sem ruptura, aumenta-se a $S_{máx}$ gradativamente nos próximos ensaios, até se encontrar a tensão limite de resistência à fadiga (S_e) do material (SOUZA, 1982).

Assim como na maioria dos ensaios mecânicos fatores como: concentração de tensões, parâmetros empregados, velocidade de execução e temperatura podem gerar efeitos no resultado final do ensaio. Outro fator importante a ser analisado no ensaio é o acabamento superficial, já que, a fadiga, na maior parte das vezes, tem seu início na superfície do metal e, uma superfície mal acabada, apresentará irregularidades, que por sua vez, podem aumentar a concentração de tensões e diminuir a resistência à fadiga do material (SOUZA, 1982).

O ensaio de fadiga, para Brandão (2013) está relacionado com o tipo de esforço empregado. Alguns exemplos de ensaio são: Flexão rotativa, flexão plana e tração-compressão.

- Flexão rotativa: O corpo de prova é submetido a esforços de flexão enquanto o mesmo gira em torno de um eixo
- Flexão plana: O corpo de prova é submetido a esforços de flexão pura com diferentes níveis de tensão (FREITAS, 2010)
- Tensão-compressão: O corpo de prova é submetido a esforços alternados de tração e compressão. Para este ensaio os equipamentos utilizados são os tradicionais para o ensaio de tração.

3.2.1 Ensaio de flexão rotativa

De acordo com Brandão (2013), neste ensaio o corpo de prova é submetido a esforços de flexão enquanto o mesmo gira em torno de um eixo.

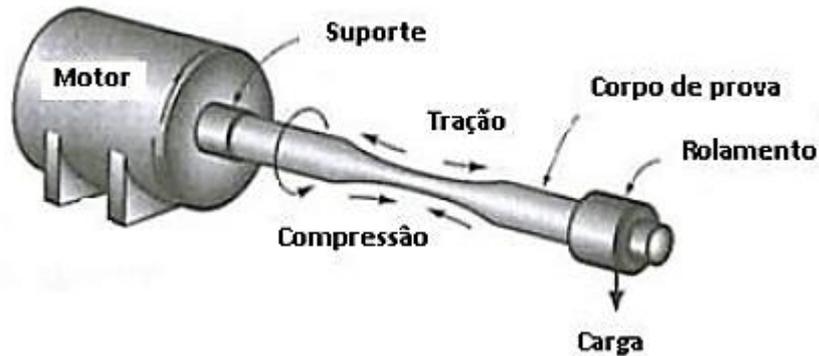
Primeiramente deve-se escolher uma determinada tensão e expor o corpo de prova a ela, até a sua ruptura, registrando o número de ciclos. Em seguida, o mesmo procedimento é realizado com outros corpos de prova, alterando a tensão empregada (BRANDÃO, 2013)

Com os dados do comportamento do material (número de ciclos até a sua ruptura) de acordo com a tensão aplicada, monta-se a curva S-N.

Para a realização do ensaio, utiliza-se um equipamento composto por um contador de rotação, um motor, um dispositivo aplicador de carga, e suporte para o corpo de prova (BRANDÃO, 2013)

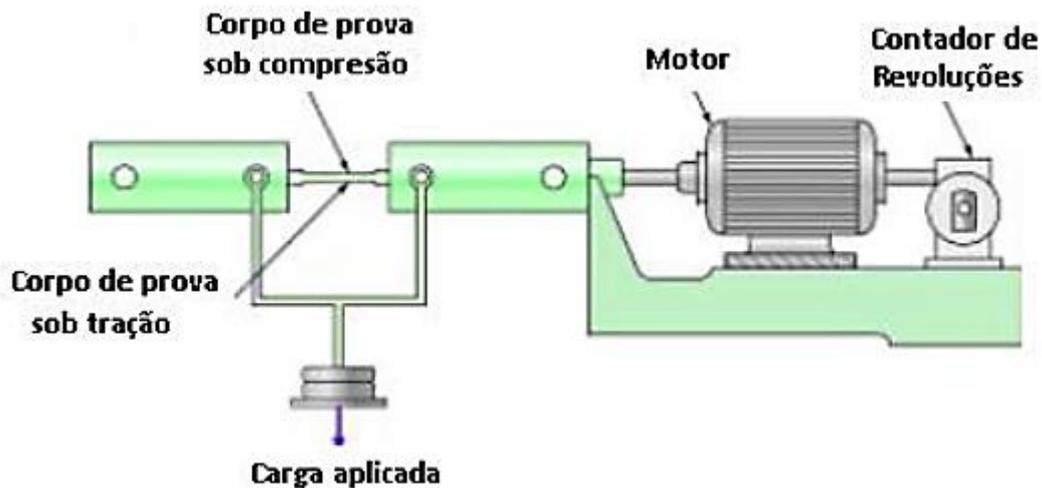
O dispositivo aplicador de carga pode ser empregado em apenas uma das extremidades do corpo de prova, como mostrado na Figura 3, ou em ambas as extremidades, como exemplificado na Figura 4.

Figura 3 - Equipamento para o ensaio de flexão rotativa com aplicação de carga em uma das extremidades.



Fonte:UDOMPHOL, 2012

Figura 4 - Equipamento para o ensaio de flexão rotativa com aplicação de carga em ambas as extremidades.



Fonte: UDOMPHOL, 2012

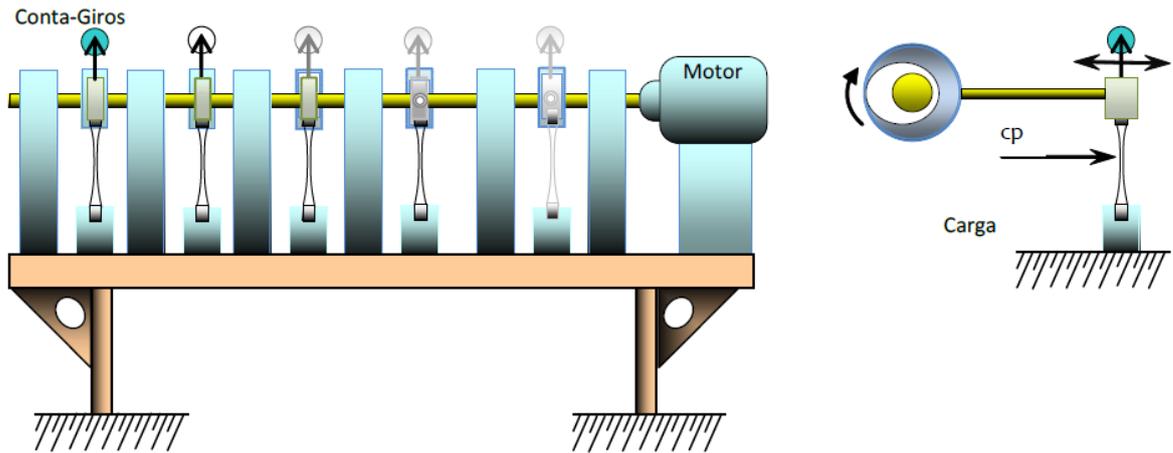
3.2.2 Ensaio de flexão plana

De acordo com Freitas (2010) na flexão plana o corpo de prova é submetido a esforços de flexão com diferentes valores de tensão. Entretanto, diferentemente da flexão rotacional, não há o giro do material a ser ensaiado.

Assim, como no ensaio de flexão rotacional, diferentes corpos de prova são ensaiados com diferentes tensões e, por fim, monta-se a curva S-N.

A máquina utilizada neste procedimento, esquematizada na Figura 5, é composta por motor, conta giros, dispositivo aplicador de carga, e suporte para o corpo de prova. Neste ensaio, o conta giros, contabiliza o número de esforços completos de flexão (ida e volta do corpo de prova).

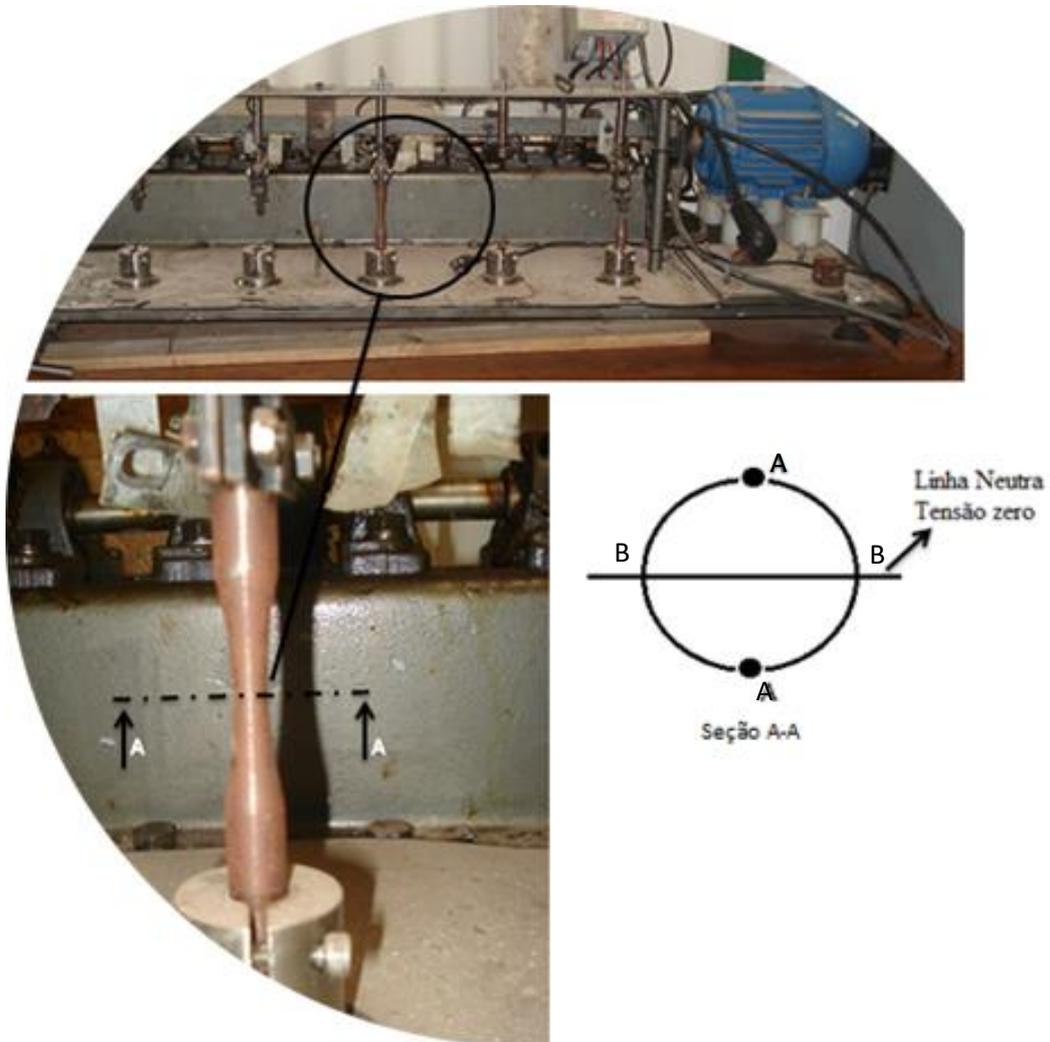
Figura 5 - Desenho esquemático da máquina de ensaio de fadiga de flexão plana.



Fonte: FREITAS,2010

Neste ensaio a flexão exposta ao material cria regiões suscetíveis a esforços alternados de tração e compressão, região a, e regiões neutras, ou seja, não sofrem interferência de tensões durante o ensaio, região b. Na Figura 6 é ilustrada a máquina real, pertencente à PUC-MG, utilizada neste ensaio, com corte nas regiões supracitadas.

Figura 6 – Máquina real Ensaio de fadiga flexão plana com detalhamentos.



Fonte: Autor, 2016

3.2.3 Ensaio de Tração-tração

No ensaio de fadiga por tração-tração, assim como nos outros ensaios de fadiga, o corpo de prova é submetido a esforços cíclicos que, neste caso, são alternados de tração. Para Martins (2010) é um ensaio utilizado quando a tensão ou a deformação devem ser uniformes e, principalmente, quando o objetivo é avaliar as condições metalúrgicas do material. Na Figura 7 é ilustrado um exemplo de máquina de fadiga axial.

Figura 7 - Máquina de fadiga axial.



Fonte: INSTRON, 2016

3.3 Normas para o ensaio de Fadiga

Para a realização do ensaio de fadiga, assim como em outros ensaios mecânicos, algumas normas devem ser levadas em consideração para o fornecimento de dados confiáveis.

De acordo com Souza (1982) três diferentes corpos de prova podem ser utilizados:

1. A própria peça ou um modelo ou protótipo da mesma.
2. Produtos acabados, como chapas, barras, tubos, arames, etc.
3. Corpos de prova usinados para o ensaio.

Quando se faz um estudo de caso é mais comum se utilizar das formas 1 e 2, já que elas reproduzem com maior fidelidade a realidade (SOUZA, 1982).

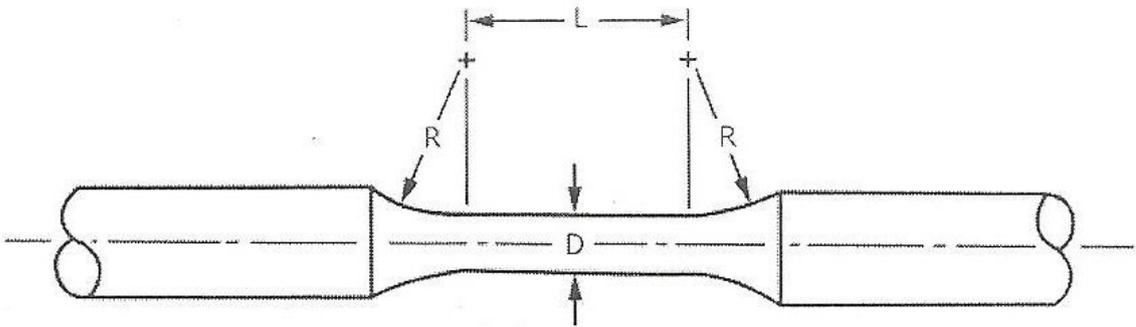
Quando se utiliza da forma número 3, deve-se seguir a norma ASTM E466 – 07 que trata dos corpos de prova para o ensaio de fadiga. De acordo com ela é recomendável realizar o ensaio

com corpos de prova circulares, para, desta forma, diminuir os efeitos de concentradores de tensão.

A norma ASTM E466 – 07 propõem o emprego de duas formas de seção circular.

- As amostras com filetes tangencialmente misturados entre a seção de teste e as extremidades.

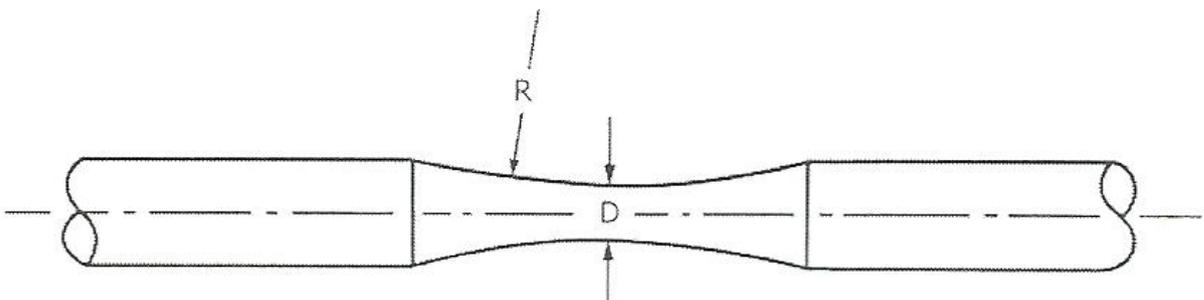
Figura 8 – Exemplo de um corpo de prova circular para o ensaio de fadiga.



Fonte: ASTM E466 - 07

- As amostras com um raio contínuo entre as extremidades

Figura 9 - Exemplo 2 de um corpo de prova circular para o ensaio de fadiga.



Fonte: ASTM E466 – 07

Em ambos os casos a norma indica que o diâmetro da seção de teste deve ser, de preferência entre 5,08mm e 25,4mm, a área da seção transversal do aperto deve ser de pelo menos, quatro vezes a área de seção do teste, o raio do filete de mistura deve ser de pelo menos oito vezes o diâmetro da seção de ensaio, para minimizar a concentração de tensão, e o comprimento da seção de teste deve ser aproximadamente 2 a 3 vezes o diâmetro.

3.4 Tratamento Termoquímico

O tratamento termoquímico consiste da adição, por difusão, de elementos químicos na superfície. Para que ocorra essa difusão o aço deve ser aquecido a temperaturas entre 300°C e 1200°C. Pela inserção de elementos químicos através do aumento da temperatura esse processo é denominado termoquímico (SILVA; MEI, 2010). De acordo com Colpaert (2008) esse procedimento é utilizado quando se deseja um núcleo tenaz com uma superfície de elevada resistência ao desgaste, sendo aplicado em engrenagens, pinos móveis, eixos de comando, etc.

Diferentemente dos tratamentos térmicos, o endurecimento da superfície, neste caso, não é estabelecida através da transformação martensítica. No tratamento termoquímico essa propriedade é o resultado das reações entre elementos químicos contidos em um meio (sólido, líquido ou gasoso) e elementos químicos contidos no aço (CHIAVERINI, 2008).

Pela enorme quantidade de elementos químicos existentes na natureza somados com os elementos químicos sintéticos, podemos concluir que a variedade dos tratamentos termoquímicos aplicáveis segue a mesma tendência. Entretanto, pelo fato do carbono e do nitrogênio serem solutos intersticiais e, por tanto, terem maior facilidade de inserção nas redes cristalinas, são os elementos mais utilizados. Para Colpaert (2008) Os tratamentos termoquímicos mais usuais são:

- Cementação: Introdução de carbono na superfície do aço a temperaturas acima de 900°C
- Nitretação: Introdução do nitrogênio na superfície do aço a temperatura de 500°C a 590°C
- Carbonitretação: Introdução de carbono e nitrogênio na superfície do aço a temperaturas na faixa entre 800°C e 900°C
- Cianetação: Introdução de carbono e nitrogênio na superfície do aço através da imersão do mesmo em um banho contendo cianetos fundidos.
- Nitrocarburação: Introdução de carbono e nitrogênio na superfície do aço com microestrutura ferrítica.

3.5 Usinagem por EDM

Para Ferraresi (2006) a usinagem convencional compreende processos que visam fornecer à peça forma, dimensão e acabamento através da retirada de uma porção de material. Na usinagem, este material retirado é denominado de cavaco.

Entretanto, neste trabalho, será abordada uma técnica não convencional de usinagem denominada *Electrical Discharge Machining* (EDM), conhecida também como usinagem por descarga elétrica ou usinagem por eletroerosão.

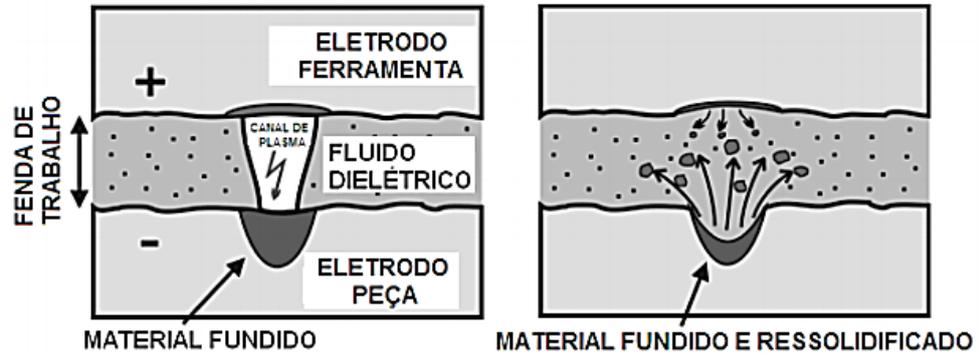
É um processo empregado quando se busca a usinagem de materiais de elevada dureza, com geometrias complexas e com considerável condutividade elétrica. Sua maior aplicação é na produção de matrizes para estampagem, forjamento, fieiras para trefilação, extrusão, moldes plásticos, etc (ARANTES, 2003).

Assim como nos processos convencionais de usinagem já citados, no processo por EDM ocorre a remoção de uma porção de material da peça, entretanto esta retirada é realizada pelo efeito térmico de descarga elétrica (CAMARGO, 2009).

O processo consiste na aplicação de uma diferença de potencial entre duas placas condutoras de eletricidade (eletrodo e peça), afastadas entre si por uma distância, denominada de *gap*, para não se tocarem, de modo a fechar o circuito e gerar curto-circuito. Com isso, ocorrem descargas elétricas pulsadas (para não elevar a temperatura da peça) entre os eletrodos, que são alternadas por milionésimos de segundo (CAMARGO, 2009).

Quando o pulso termina, o canal de plasma, formado entre o eletrodo e a peça (catodo e anodo), é extinto, gerando uma diminuição drástica da temperatura. Com isso, o meio dielétrico consegue retirar o material da superfície da peça em forma de partículas microscópica (SANTOS, 2013), como é mostrado na Figura 10.

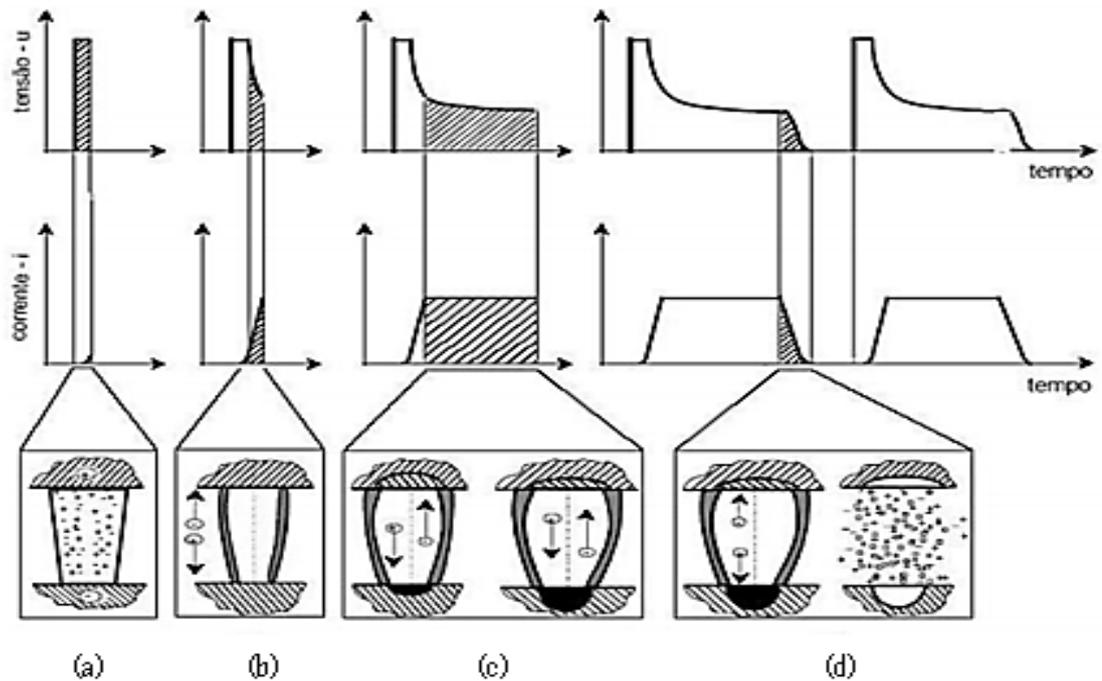
Figura 10 - Representação esquemática da usinagem por eletroerosão.



Fonte: BLEYS et al.,2006

Kahng (1977) explicou a retirada de material pela descarga elétrica em 4 etapas: ignição, criação do canal de plasma, fusão e sublimação dos resíduos da peça e do eletrodo e limpeza dos materiais que se fundiram, como mostrado na Figura 11.

Figura 11 - Representação esquemática das etapas da usinagem por eletroerosão: (a) ignição, (b) criação do canal de plasma, (c) fusão e sublimação dos resíduos da peça e do eletrodo e (d) limpeza dos materiais que se fundiram.



Fonte: KÖNIG; KLOCKE, 1996

A etapa representada na Figura 11(a) é o momento inicial do processo, em que a distância entre o eletrodo e a peça varia de 0,05 mm a 1,00 mm. Mesmo a tensão alcançando os 110 V a resistência do meio dielétrico impede o fluxo de corrente (SANTOS, 2013).

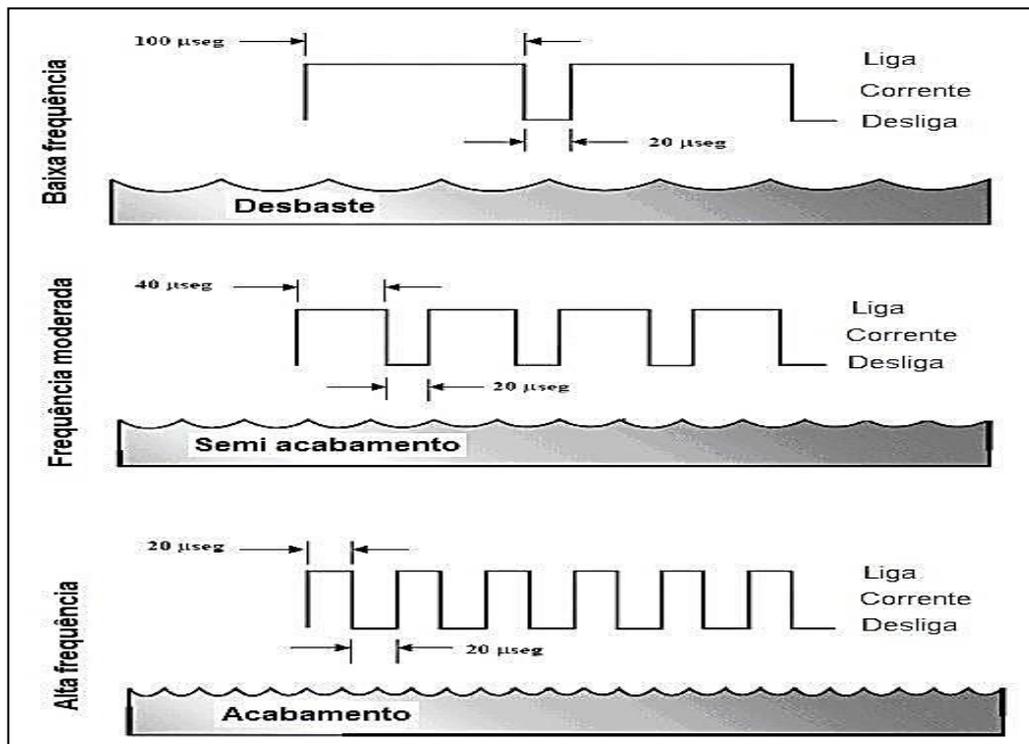
Na segunda etapa, representada pela Figura 11(b), o eletrodo se aproxima da peça, por uma distância denominada de fenda, permitindo a passagem de elétrons. Esses elétrons que saem em altas velocidades do catodo colidem com as moléculas do dielétrico, aumentando a temperatura do meio, provocando a evaporação do meio dielétrico e diminuindo sua resistência. Esse fenômeno promove o aumento da liberação de mais elétrons e a formação do canal do plasma (SANTOS, 2013).

Já terceira etapa, representada pela Figura 11(c), ocorre a fusão e sublimação dos resíduos da peça e do eletrodo. Esses fenômenos acontecem, pois durante as descargas elétricas, a fusão continua e o canal do plasma aumenta. Com isso, as superfícies do eletrodo e da peça são bombardeadas por elétrons e íons. Logo, a energia cinética das partículas é transformada em calor, fundindo, assim, a superfície dos corpos envolvidos (peça e eletrodo) (SANTOS, 2013).

Por fim, na quarta etapa, representada pela Figura 11(d), durante a suspensão da descarga elétrica, ocorre a formação de pequenas crateras na superfície da peça e do eletrodo. Uma porção do material fundido se deposita na cratera e outra parte é removida pelo meio dielétrico (SANTOS, 2013).

Em seu trabalho, Santos (2013), estudou o efeito na qualidade superficial das peças a partir de alguns parâmetros do processo. De acordo com o autor, o acabamento superficial sofre influência, principalmente, do tempo de descarga elétrica. Para ele, ao aumentar o tempo de descarga, T_{on} , maior será a porção fundida do material, gerando uma grande cratera e ocasionando um acabamento grosseiro, já aumentando o tempo sem descarga, T_{off} , menores serão as porções fundidas, menores crateras e, conseqüentemente, um melhor acabamento, como mostrado na parte inferior da Figura 12, em que, de I para III ocorre a diminuição do tempo de descarga elétrica (aumento da frequência).

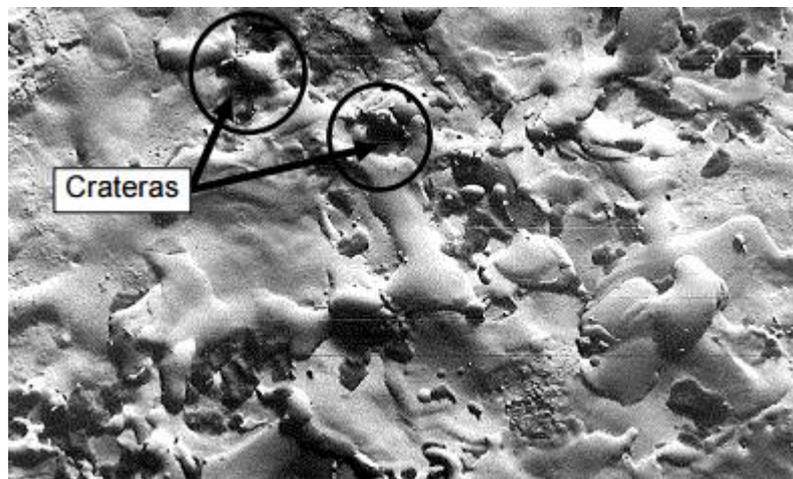
Figura 12 - Representação esquemática das mudanças superficiais a partir da alteração do tempo de descarga elétrica.



Fonte: Guiral, 1997

Silva (2012) também relacionou a qualidade superficial da peça com a descarga elétrica no processo de usinagem por EDM. Para ele, altas energias de descarga proporcionam menor qualidade superficial, já que maiores crateras são formadas. Na Figura 13 é mostrada a formação de crateras pelo processo de EDM.

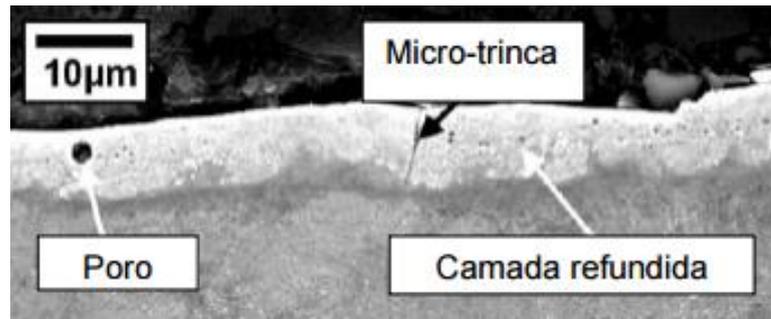
Figura 13 – Crateras formadas no processo de EDM.



Fonte: STEVENS, 1998

Silva (2012) ainda associa outras irregularidades como: poros e micro trincas à usinagem por EDM. Para o autor, os ciclos térmicos de aquecimento da peça, por descarga elétrica e resfriamento, pelo fluido dielétrico, são os fenômenos que propiciam essas irregularidades, além de ocasionarem a formação de uma zona refundida. Essas descontinuidades são ilustradas na Figura 14.

Figura 14 – Irregularidades do processo por EDM.



Fonte: FULLER, 1989 (modificado)

3.6 Nitretação por eletroerosão

A nitretação por eletroerosão é um dos processos não convencionais mais amplamente aplicados na área dos recobrimentos. O sua principal vantagem é o endurecimento da superfície independente das propriedades mecânicas do metal base da peça (YAN et AL., 2005)

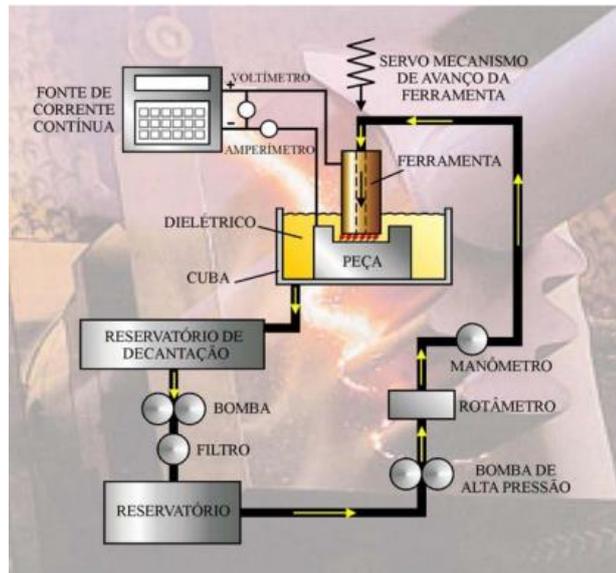
Yan *et al.* (2005), por exemplo, estudou a nitretação por eletroerosão como recobrimento em ligas de titânio, já que estas apresentam propriedades inadequadas na superfície (baixa resistência ao desgaste adesivo e abrasivo, além de um alto coeficiente de atrito), induzindo um maior desgaste.

Para Camargo *et al.*(2006) além do acréscimo nas propriedades superficiais do metal base, a nitretação por eletroerosão é uma alternativa válida quando se analisa fatores econômicos.

Este procedimento ocorre simultaneamente ao processo de usinagem por eletroerosão. Enquanto a peça é usinada, já ocorre o recobrimento da mesma com nítretos. Ou seja, no momento das descargas elétricas (derivadas do processo de usinagem por EDM) o fluido existente entre a peça e a ferramenta vai superaquecer. Quando se utiliza como fluido

compostos de nitrogênio, ao ser superaquecido, o mesmo liberará nitrogênio para o meio. Com isso, esses íons libertos reagirão com o metal base da peça formando nitretos, o que aumentará a dureza da superfície e, conseqüentemente, a resistência ao desgaste. (CAMARGO et al., 2006). Na Figura 15 é demonstrado esquematicamente uma máquina de EDM.

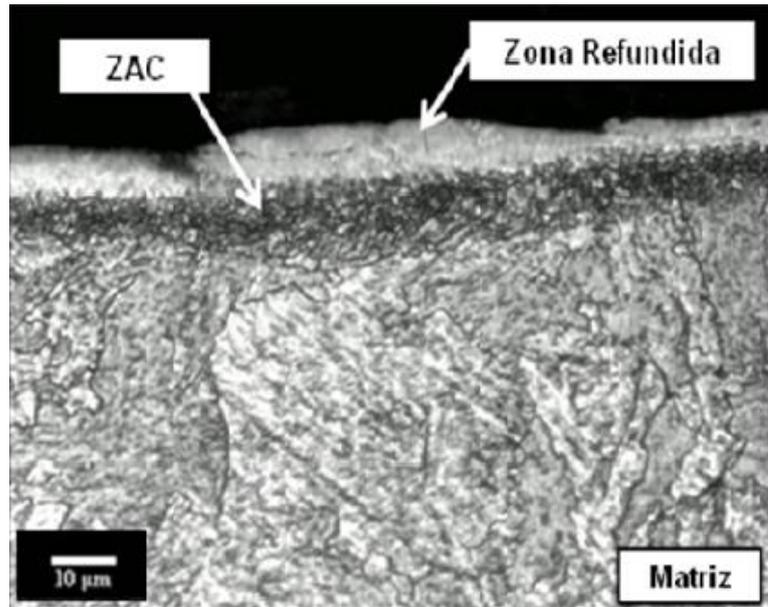
Figura 15 - Representação esquemática de uma máquina de EDM.



Fonte: CAMARGO et al., 2006

A comprovação da veracidade e da eficiência desse processo pode ser observada por diferentes técnicas de caracterização. Santos (2013) utilizou imagens da seção transversal da amostra, por meio do Microscópio Óptico, indicando as diferentes camadas formadas durante o processo, como: Zona refundida, zona afetada pelo calor (zac) e matriz - como uma das técnicas de comprovação da eficácia do processo de nitretação do aço AISI 4140, por meio da usinagem por EDM, como ilustrado na Figura 16.

Figura 16 – Micrografia da seção transversal do aço AISI4140 nitretado por EDM.



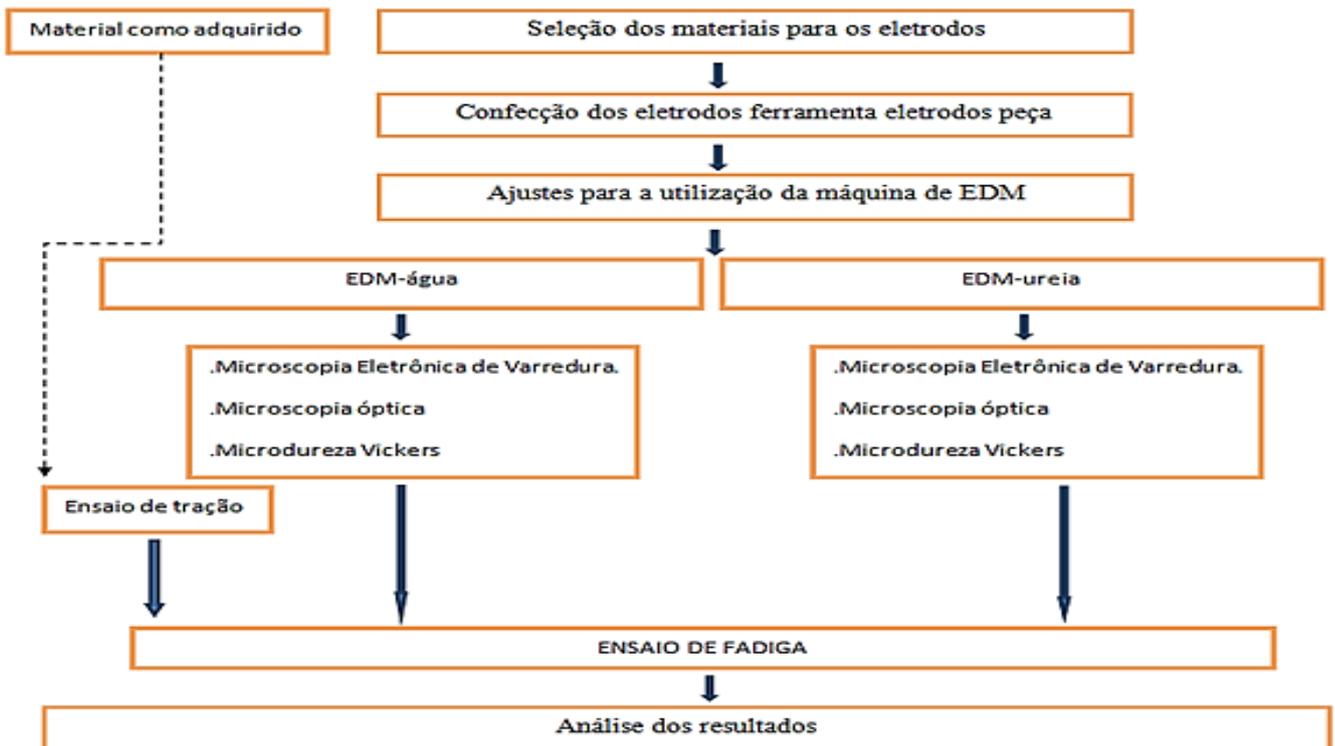
Fonte: SANTOS, 2013

4 METODOLOGIA

A metodologia aplicada foi em parceria com um trabalho de mestrado ainda em andamento, por isso, algumas etapas não foram finalizadas. Ela teve como objetivo a nitreção da camada superficial do aço AISI 4140, por meio da usinagem por descargas elétricas usando como fluido a solução de água deionizada e ureia (EDM-ureia) e o estudo da resistência à fadiga, comparando-a com a do mesmo aço: Usinado por descargas elétricas usando como fluido a água deionizada (EDM-água); Como adquirido no mercado.

Três foram as estruturas para a execução do trabalho prático. Na Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (PUC-MG), campus Coração Eucarístico, foram utilizados os laboratórios de usinagem e de metalografia. No Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG) foram utilizados os laboratórios para realização da Eletroerosão. E para a realização dos ensaios de tração e de fadiga necessários, foram utilizados os laboratórios de materiais da Engenharia Experimental da Fiat Chrysler Automóveis Brasil LTDA, planta de Betim-Minas Gerais. As etapas do procedimento experimental estão resumidas na Figura 17.

Figura 17 - Procedimento experimental resumido



Materiais e métodos

4.1 Seleção dos materiais dos eletrodos ferramenta e eletrodos peça

O material utilizado como eletrodo ferramenta deve possuir boa condutividade elétrica e alto ponto de fusão. Além disso, devem ter baixo custo e fácil fabricação (MCGEOUGH, 1988). Assim como nos trabalhos de Silva (2012) e Santos (2013) o material escolhido como eletrodos ferramenta foi o cobre eletrolítico. Foi utilizado o formato inicial de barra com comprimento de 52 mm e seção transversal de 25,4mm.

Como eletrodo peça foi utilizado o Aço AISI 4140 (como adquirido no mercado). Esse aço possui boa resistência à torção e fadiga, o que pode ser potencializado com a utilização dos processos de nitretação (FREITAS, 2010).

O estudo dessa liga se faz necessário pela sua variedade de aplicação podendo ser empregada na fabricação de eixos, pinos, grampos, fixadores para a indústria agrícola, automobilística, de máquinas e equipamentos, etc.(FREITAS, 2010)

A aplicação dessa liga metálica na indústria está diretamente relacionada às suas propriedades. A sua elevada dureza, resistência e tenacidade são algumas delas. Essas características são em função dos elementos de ligas a ela adicionados, com teores indicados na Tabela 1(FREITAS, 2010).

Tabela 1 – Composição química do aço AISI 4140.

	C (%)	Si (%)	Mn (%)	Cr (%)	Mo (%)
AISI 4140	0,40	0,25	0,90	0,95	0,20

Fonte: VILLARES METALS, 2004

Esse material foi adquirido em forma de barra circular com seção transversal de diâmetro de 15,8 mm (5/8 polegada) e suas propriedades mecânicas estão listadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Propriedades mecânicas típicas do aço AISI 4140 laminado a quente, normalizado e recozido.

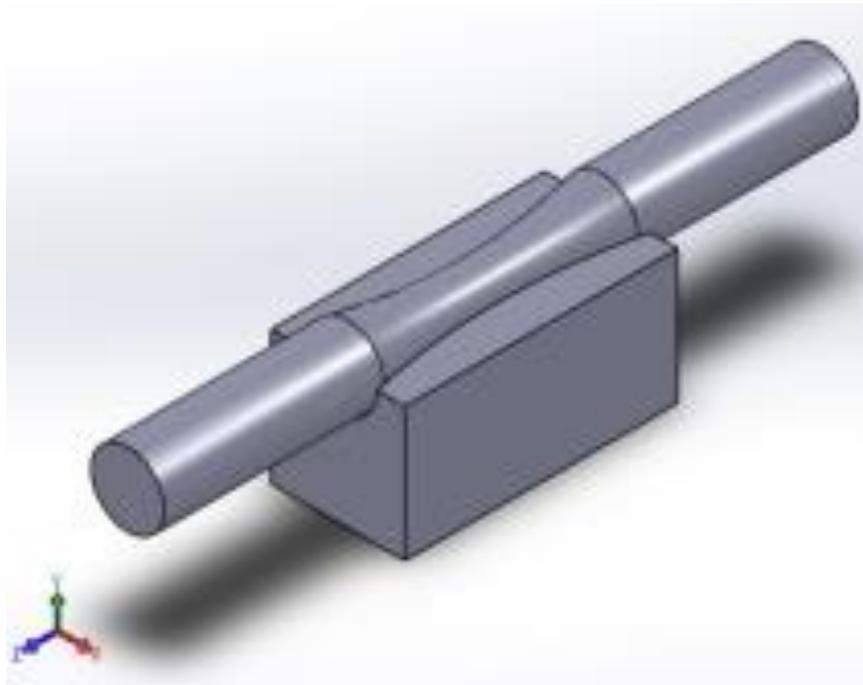
Qualidade	σ_r (MPa)	σ_e (MPa)	Alongamento (%)	Redução de área (%)	Dureza (HB)
AISI 4140	1000-1200	420 – 655	17,7 – 25,7	47 - 57	197 - 302

Fonte: LG STEEL, 2016

4.2 Confeção dos eletrodos ferramenta e eletrodos peça

Como os corpos de prova utilizados para os ensaios subsequentes possuem seção transversal da parte útil cilíndrica, foi proposto à produção de uma matriz (eletrodo ferramenta) que tornasse possível a usinagem por EDM, como mostrado na Figura 18. Para isso, foi utilizado o laboratório de usinagem da PUC-MG, empregando o maquinário CNC ROMI Discovery 560 Bridgeport e como ferramenta uma fresa de topo esférica de metal duro com diâmetro 6 mm e raio de canto de 3 mm. Foi empregado também como sistema CAM o edgcam 2013, com a programação NC Siemens 840D. Os parâmetros utilizados estão listados na Tabela 3.

Figura 18 - Projeto da matriz utilizada como eletrodo ferramenta.



Fonte: Autor, 2016

Tabela 3 – Parâmetros utilizados na usinagem CNC.

Parâmetro	Desbaste	Acabamento
Rotação (RPM)	1600	3000
Avanço (mm/min)	300	480
Incremento de corte (mm)	0,5	0,15

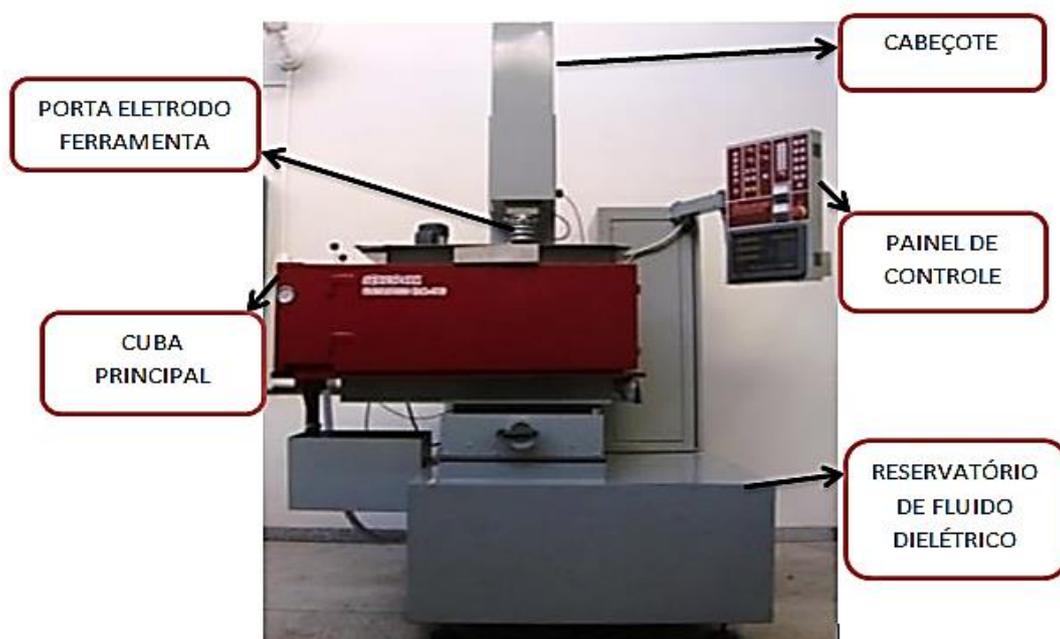
Fonte: Autor, 2016

Os eletrodos peça foram fabricados nos laboratórios de usinagem do CEFET-MG. Foi utilizado para isso um torno CNC ROMI Centur 30 D com comando NC Siemens 802D, pastilha de corte CoroTurn® 107 para torneamento, código ISSO VBMT 11 03 04-PF 4215, fabricante SandvikCoromant, fluido de corte refrigerante Synergy 905, fabricante BlaserSwisslube.

4.3 Ajustes para a utilização da máquina de EDM

Nesta etapa do trabalho foi empregado uma máquina de EDM convencional por penetração, instalada no laboratório de ajustagem do CEFET-MG, modelo ServsparckEletroplus EDM-540, corrente elétrica nominal de 40 Amperes. Ela possui porta eletrodo ferramenta, reservatório de fluido dielétrico, cabeçote, cuba principal e um painel de controle em que se controla os parâmetros do processo, como ilustrado na Figura 19.

Figura 19 - Máquina de EDM utilizada nos experimentos.



Fonte: Autor, 2016

Para elaboração dos testes alguns ajustes foram realizados nesse aparelho:

- Cuba auxiliar fabricada em aço inox 304

A cuba auxiliar foi inserida dentro da cuba principal, com o objetivo de prevenir da corrosão, causada pelos fluidos dielétricos, os componentes da máquina. Além disso, ele evita o contato dos fluidos dielétricos da máquina com o fluido a ser testado.

- Bomba de Recirculação de fluido Dielétrico

É uma bomba do moledo CD 30002 de fabricação ASTEN com capacidade de 51 litros por minuto e pressão de 2 metros de coluna d'água (0,2 bar), motor elétrico de corrente alternada, rotação de 3100 RPM e potência de 120 Watts (0,16 CV), frequência de 60 Hz.

O objetivo dessa bomba é proporcionar um jato d'água do próprio fluido dielétrico que, quando direcionado, através de mangueira, para o espaço existente entre o eletrodo ferramenta e o eletrodo peça, denominado fenda de trabalho, limpa a região, contribuindo para uma retirada mais eficiente de partículas sólidas e uma melhora na taxa de remoção de material (TRM) no processo EDM (SANTOS, 2013).

Essas adaptações estão representadas na Figura 20.

Figura 20 - Adaptações na máquina de EDM

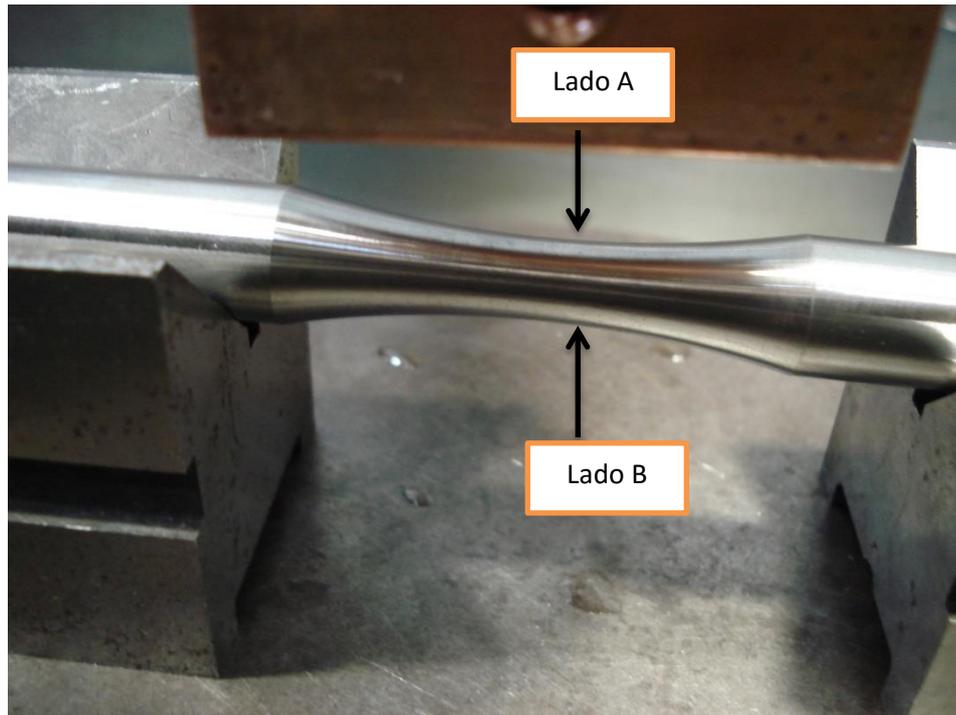


Fonte: Autor, 2016

4.4 Execução da EDM-ureia e EDM-água

Como tentativa de cobrir a maior área do corpo de prova com a usinagem por EDM, ela foi dividida em duas etapas, durando 5 minutos para cada “lado” como ilustrado na Figura 21.

Figura 21 – Configuração da usinagem por EDM.



Fonte: Autor, 2016

Nesta etapa foi realizado a EDM com fluidos dielétricos com composições diferentes: ureia fertilizante na concentração de 30 g/l para 55 litros de água deionizada (EDM-ureia); 55 litros de água deionizada (EDM-água), medindo a condutividade do banho antes e depois do ensaio com o uso de um condutímetro portátil com compensação automática de temperatura, modelo CD203 da PHTeK com resolução de 0 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à 1999 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Para a realização da EDM vários parâmetros foram ajustados no painel de controle da máquina, como mostrado na Figura 22 e listados na tabela 4.

Figura 22 – Painel de controle da máquina de EDM.



Fonte: Autor, 2016

Tabela 4 – Parâmetros utilizados na usinagem por EDM.

Polaridade do eletrodo ferramenta	Positiva
Tensão (V)	200
Corrente de trabalho (A)	40
Controle de avanço do servo no eixo Z, <i>gap</i>	A1 = 1*
Controle de velocidade do servo, cabeçote	A2 = 1*
Tempo de afastamento periódico da ferramenta	A3 = 2*
Tempo de erosão	A4 = 5*
Tempo de nível alto (pulso), T_{ON}	A5 = 100
Tempo de nível baixo, T_{OFF}	A6 = 10

*Posição da chave

Fonte: Autor, 2016

4.5 Caracterização microestrutural

Para a análise da microestrutura formada após o processo de usinagem por EDM, três amostras, EDM-água, EDM-ureia e como recebido, foram produzidas pelas técnicas metalográficas convencionais, ou seja, corte da seção transversal, embutimento, lixamento, polimento e ataque (Nital 2%), sendo que o lixamento foi realizado manualmente nas lixas de #180, #220, #320, #400, #600 e #1200 mesh e o polimento foi realizado em politriz

automática rotativa com pasta de alumina de granulometria 9 μm , 3 μm e 1 μm , respectivamente, durante tempo de 3 minutos.

4.5.1 Ensaio de microdureza Vickers

Para identificar a formação da camada nitretada e, além disso, comparar a diferença entre as camadas formadas pelo processo de usinagem por EDM foi realizado o ensaio de microdureza Vickers.

Na microdureza Vickers é medido as diagonais da base da indentação causada pelo penetrador piramidal sob a ação de uma força. Neste caso, foi aplicada uma força de 10 gf (98,07 mN) por 20 segundos, sendo realizado 3 medições por região e obtido o valor médio. As imagens foram capturadas por meio de câmera digital acoplada aos equipamentos.

Para isso foi utilizado o Microdurômetro Vickers Shimadzu HMV 2T-E, como mostrado na Figura 23.

Figura 23 - Microdurômetro Vickers.



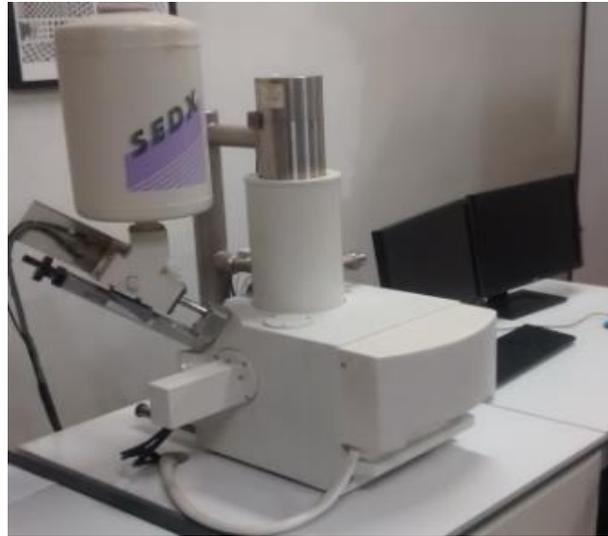
Fonte: SHIMADZU, 2016

4.5.2 Microscopia Eletrônica de Varredura

Para a análise da morfologia das amostras usinadas por EDM foi realizada a análise por Microscopia Eletrônica por Varredura (MEV).

Para isso, foi utilizado o equipamento Shimadzu SSX – 550 SUPERSCAN, com tensão de 15 kV e detecção de imagens de elétrons secundários, como mostrado na Figura 24.

Figura 24 – MEV.



Fonte: Autor, 2016

4.5.3 Microscopia óptica

Para a medição e verificação das diferentes camadas formadas pelo processo de usinagem por EDM foi utilizada a Microscopia óptica.

Para isso foi empregado o Microscópio Metalográfico Platina Invertida IM713 marca Kontrol com diversas ampliações, como mostrado na Figura 25.

Figura 25 - Microscópio óptico.

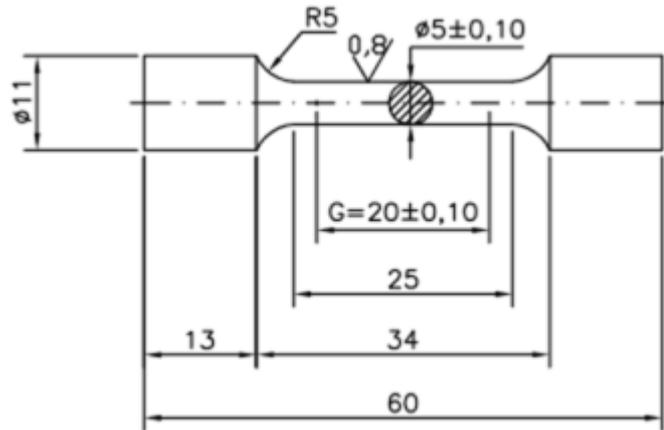


Fonte: FORTEL, 2015

4.6 Ensaios mecânicos

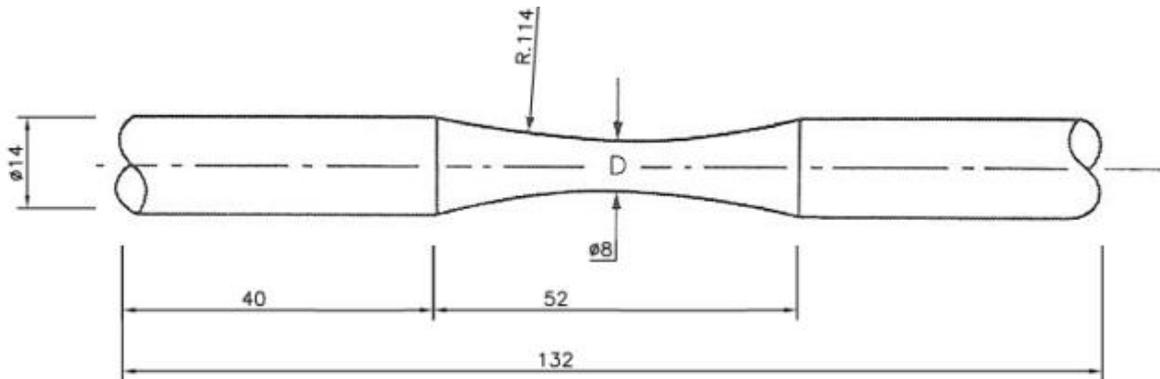
Os corpos de prova para os ensaios de tração e fadiga, foram confeccionados de acordo com as normas ASTM A370-15 e ASTM E466-15, respectivamente, como mostrado nas Figuras 26 e 27.

Figura 26 – Corpo de prova para o ensaio de tração conforme norma ASTM A370-15.



Fonte: ASTM A370-15 (adaptado pelo autor, 2016).

Figura 27 – Corpo de prova para o ensaio de fadiga conforme norma ASTM E466-15.



Fonte: ASTM E466-15 (adaptado pelo autor, 2016).

Foi confeccionado um total de 43 corpos de prova: 3 corpos de prova para o ensaio de tração, sendo que todos foram na condição como adquirido; 40 corpos de prova para o ensaio de fadiga, sendo 15 EDM-ureia, 10 EDM-água e 15 na condição como recebido.

4.6.1 Ensaio de Tração

É um dos ensaios mecânicos mais comuns e consiste na aplicação de uma carga axial crescente até a sua ruptura, passando por um período, denominado regime elástico, em que a deformação é diretamente proporcional à tensão aplicada, e, por outro momento, denominado regime plástico, em que o material passa a se deformar permanentemente (SILVA; MEI, 2010).

Neste trabalho, o ensaio de tração foi realizado conforme a norma ASTM A370-15 no laboratório de Materiais da Engenharia Experimental da FCA Fiat Chrysler Automóveis Brasil Ltda.

Para isso foi utilizada uma máquina de tração fabricada pela INSTRON, modelo 4467 com capacidade de carga máxima de 30 kN (3000 kgf) à máxima velocidade, velocidade máxima de 500 mm/min à máxima carga, velocidade mínima de 0,005 mm/min e frequência de 47 à 63 Hz e à temperatura ambiente, como mostrado na Figura 28.

O objetivo deste ensaio foi comparar os valores de resistência mecânica do material adquirido com os valores obtidos na bibliografia e obter valores referências para o ensaio de fadiga.

Figura 28 – Máquina para o ensaio de tração.



Fonte: INSTRON, 2016

4.6.2 Ensaio de Fadiga

Neste trabalho, o ensaio de fadiga foi realizado conforme a norma ASTM E466-15 no laboratório de Materiais da Engenharia Experimental da FCA Fiat Chrysler Automóveis Brasil Ltda.

Para isso foi utilizada uma máquina de tração fabricada pela INSTRON, modelo 8801 Sistema de testes de fadiga servo-hidráulico, com capacidade de carga axial de tração e compressão de até ± 100 kN e registro automático do número de ciclos, quando o corpo de prova se rompe, como mostra a Figura 29.

Figura 29 – Máquina de ensaio de fadiga axial.



Fonte: INSTRON, 2016

Os corpos de prova foram submetidos a ensaios de fadiga axial com solicitação tração-tração, razão de tensão R igual a 0,1 - ou seja, ao iniciar o ensaio com uma tensão igual a 100 N, por exemplo, a próxima tensão aplicada seria de 1000 N - e frequência de prova de 25 Hz. O ensaio foi realizado em temperatura de 23 °C e repetido com cada corpo de prova os quais foram solicitados a diferentes níveis de tensão.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Por se tratar de um projeto em parceria com um estudo de mestrado, ainda em andamento, os resultados apresentados são parciais, ou seja, foram coletados na fase atual do trabalho. Tendo em vista a metodologia traçada os resultados serão apresentados e discutidos nesta seção. Inicialmente na Figura 30 é ilustrado o resultado do corpo de prova após a usinagem por EDM-ureia.

Figura 30 – Corpo de prova usinado por EDM-ureia.



Fonte: Autor, 2016

Os valores de condutividade elétrica da solução utilizada durante a usinagem por EDM-água e EDM-ureia estão representados na Tabela 5.

Tabela 5 - Condutividade elétrica das soluções utilizadas para a usinagem por EDM.

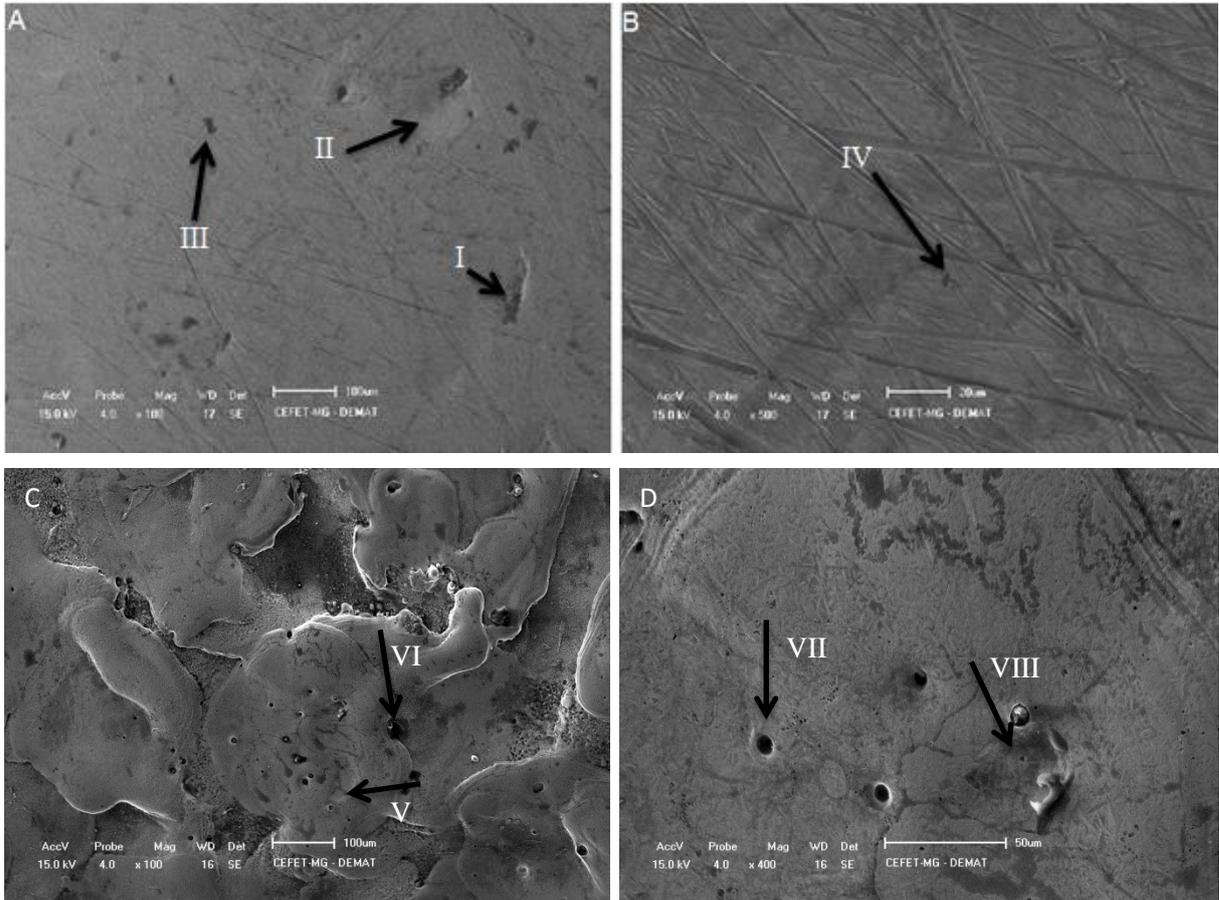
Processo	Condutividade elétrica média ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	
	Antes do processo	Após o processo
EDM-água	1	3
EDM-ureia	91	101

Fonte: Autor, 2016

Após serem usinados por EDM uma parcela dos corpos de prova foram direcionados para o estudo do seu comportamento mecânico pelo ensaio de fadiga e, outra parcela, para serem analisados pelo MEV, microscópio óptico e microdurômetro Vickers.

NA Figura 31 é ilustrada a morfologia das amostras, obtidas por meio do MEV, usinados por EDM-ureia, A e B, e EDM – água, C e D.

Figura 31 – Morfologia das amostras EDM-ureia, A e B e EDM-água, C e D.

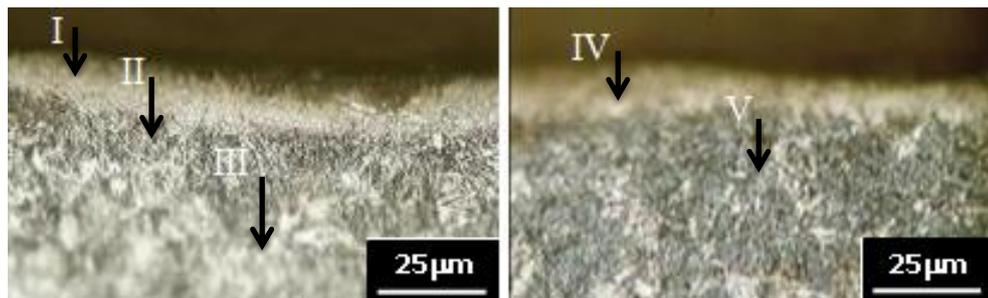


Fonte: Autor, 2016

Com o auxílio da bibliografia podemos identificar os pontos I, II, III, IV, V, VI, VII e VIII como cratera e/ou poros. O que corrobora com as características, citadas por Silva (2012), de uma superfície usinada por EDM e se assemelha com os resultados encontrados por Santos (2013).

Na Figura 32 é ilustrada as imagens obtidas pelo microscópio óptico para as amostras usinadas por EDM-ureia, A, e EDM-água, B.

Figura 32 – Seção transversal dos corpos de prova EDM-ureia e EDM-água.

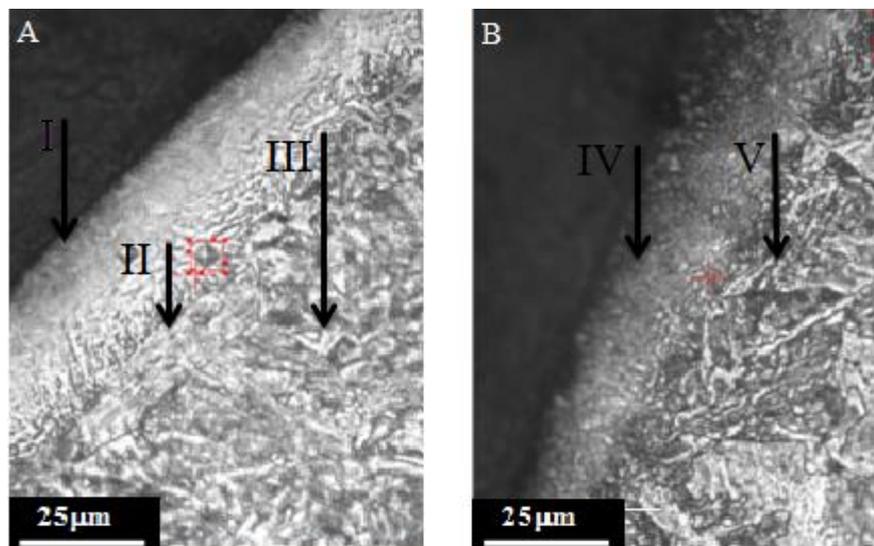


Fonte: Autor, 2016

A partir da análise das imagens é possível identificar quantidades diferentes de camadas formadas pelos diferentes processos. Enquanto que na amostra usinada por EDM, em que o fluido dielétrico foi a solução água deionizada e ureia, Figura 32. A, identifica-se 3 camadas, na amostra usinada por EDM, em que o fluido dielétrico foi apenas a solução de água deionizada, Figura 32.B, identifica-se 2 camadas. É possível perceber que em ambas as figuras há a formação da zona refundida (ZR), I e IV, característica do processo de usinagem por EDM, e identificar a camada do metal base (matriz ou substrato), III e V. O ponto destoante entre as figuras é a camada II. Essa diferença pode ser associada à presença de nitretos formados durante a usinagem por EDM-ureia, dando origem a uma camada denominada de camada nitretada. Santos (2013) em seu trabalho, ao utilizar a usinagem EDM-ureia, também identificou a formação de três camadas e, apesar de não identificá-la como camada nitretada, justificou sua existência, também, pela adição de nitrogênio ao material. Outro ponto em comum ao trabalho de Santos (2013) é a espessura da camada nitretada. Assim como em sua pesquisa, o valor encontrado foi de, aproximadamente, 25 μ m.

Na Figura 33 são mostradas as imagens obtidas pelo ensaio de microdureza Vickers realizado nas amostras usinadas por EDM-ureia e EDM-água.

Figura 33 – Imagens do ensaio de microdureza Vickers EDM-ureia e EDM-água.



Fonte: Autor, 2016

A partir da Figura 33 é possível perceber novamente a divisão das amostras em diferentes camadas, sendo que, a imagem 38.A, referente a amostra usinada por EDM-ureia, tem 3 camadas, I- zona refundida, II- camada nitretada, III – substrato, e a imagem 38.B, referente a

amostra usinada por EDM-água, tem 2 camadas, IV-zona refundida e V- substrato. O resultado de dureza obtido para a amostra usinada por EDM-ureia é mostrado na Tabela 6.

Tabela 6 – Microdureza Vickers EDM-ureia.

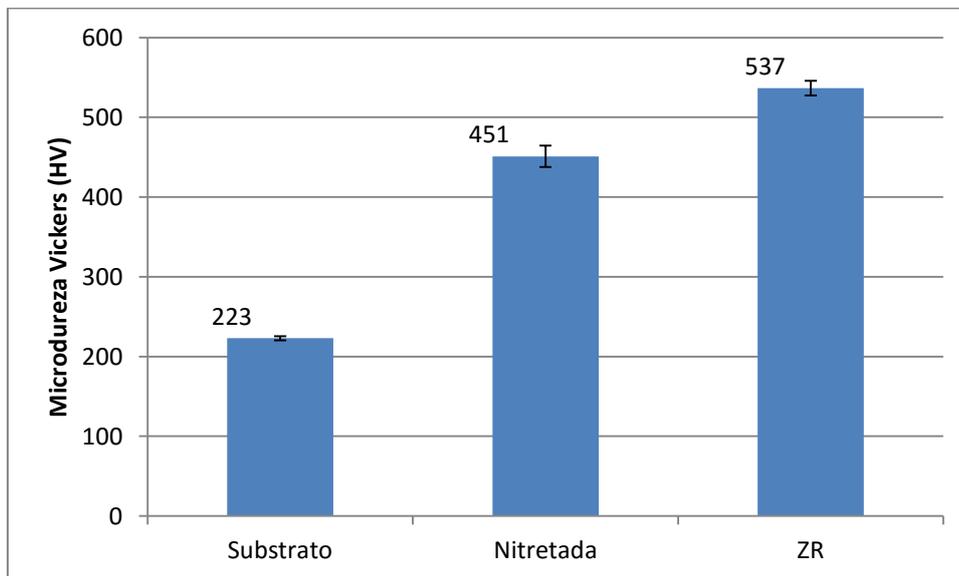
Região	Dureza HV (\pm^*)
Substrato AISI 4140	223 \pm 3
Camada nitretada	451 \pm 14
Zona refundida	537 \pm 9

*Desvio padrão

Fonte: Autor, 2016

Para facilitar o entendimento dos valores obtidos, foi plotado um gráfico da microdureza Vickers encontrada x camada ensaiada, como ilustrado na Figura 34.

Figura 34 – Relação da microdureza Vickers com a camada ensaiada.



Fonte: Autor, 2016

A partir da análise do gráfico é possível notar o ganho de dureza obtido pela amostra após a usinagem por EDM-ureia, já que, quando comparado ao valor de dureza obtido pelo substrato, houve um aumento de mais de 100% na camada nitretada e mais de 140% na camada refundida. Esses dados comprovam a existência de diferentes camadas, apresentadas pelo MEV e pelo microscópio óptico.

Com o objetivo de se obter valores referência para o ensaio de fadiga, foi realizado o ensaio de tração no corpo de prova como recebido. Os valores encontrados no ensaio estão representados na Tabela 7.

Tabela 7 – Resultados obtidos para o ensaio de tração do aço AISI 4140.

Diâmetro (mm)	Limite de escoamento (LE) (MPa)	Limite de Resistência (LRT) (MPa)	Alongamento percentual (AL) (%)
5,15±0,01	681±29	1077±6	13±0,3

Fonte: Autor, 2016

A partir dos resultados encontrados no ensaio de tração do corpo de prova como recebido, foi possível limitar a tensão de referência ($0,8 \cdot \text{LRT}$) para os ensaios de fadiga. Na Tabela 8 são apresentados os valores de ciclos para os níveis de tensão empregados no ensaio de fadiga coletados até a data de execução deste trabalho.

Tabela 8 – Relação dos valores obtidos no ensaio de fadiga.

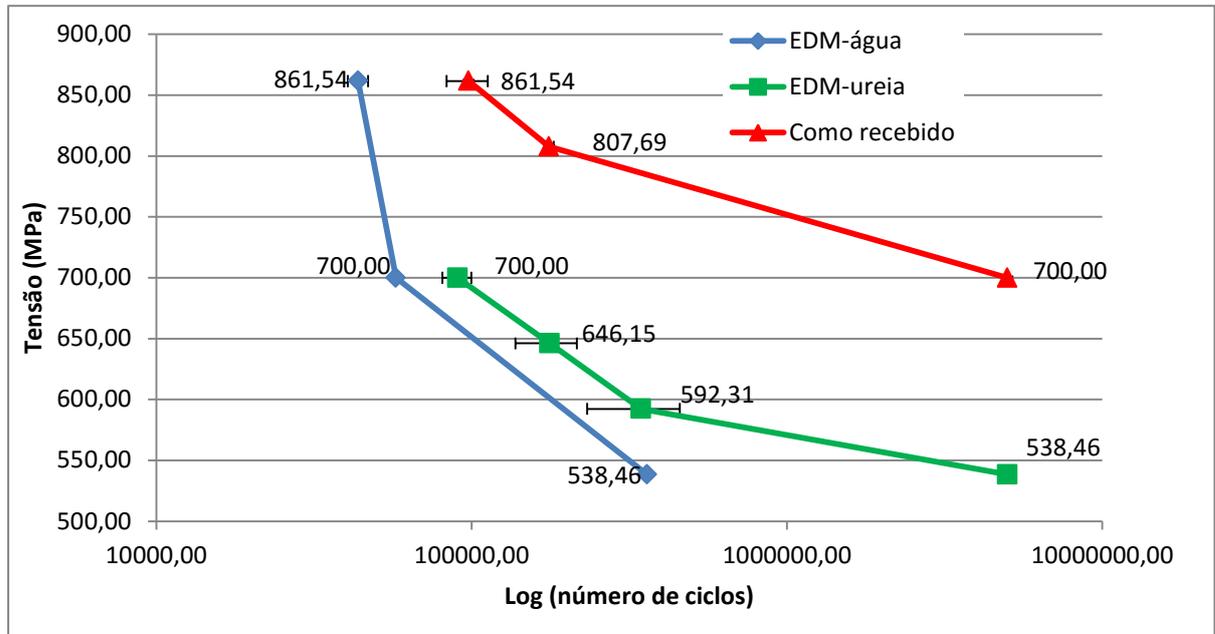
Nível de tensão	Como recebido			EDM – ureia			EDM – água		
	Ciclos (x1000)	Média (x1000)	Desvio Padrão (x1000)	Ciclos (x1000)	Média (x1000)	Desvio Padrão (x1000)	Ciclos (x1000)	Média (x1000)	Desvio Padrão (x1000)
0,80*LRT	77,351	97,711	14,553	-	-	-	-	-	-
	105,285			-	-	-	45,903	43,640	3,2
	110,496			-	-	-	41,377		
0,75*LRT	169,681	175,696	6,015	-	-	-	-	-	-
	181,710			-	-	-	-	-	
0,65*LRT	5000*	5000*	0	80,665	90,195	9,530	57,502	57,502	0
	5000*			99,724			-		
0,60*LRT	-	-	-	186,876	176,433	38,816	-	-	-
	-	-	-	217,883			-	-	-
	-	-	-	124,539			-	-	-
0,55*LRT	-	-	-	271,662	344,545	112,848	-	-	-
	-	-	-	503,941			-	-	-
	-	-	-	258,031			-	-	-
0,50*LRT	-	-	-	5000*	5000*	0	358,184	359,684	1,5
	-	-	-	-	-	-	361,185	-	-

*Corpo de prova não se rompeu

Fonte: Autor, 2016

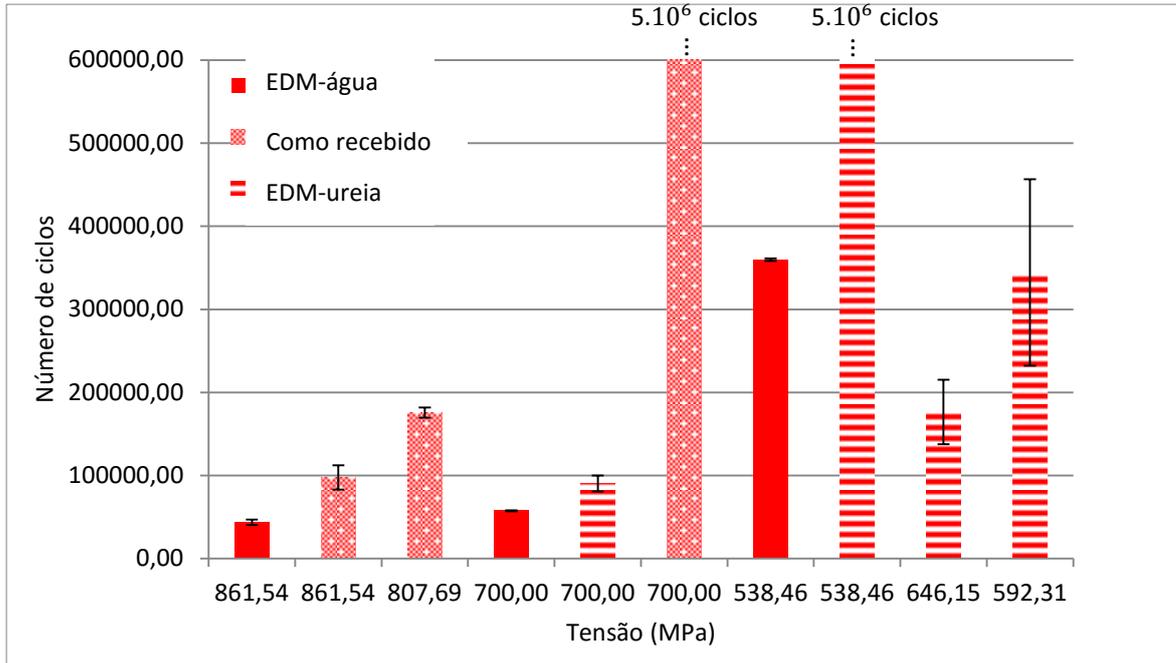
Com os dados da Tabela 8 foi possível montar as curvas S-N para os diferentes modos de processamento, como recebido, EDM-ureia e EDM-água. As curvas estão ilustradas na Figura 35.

Figura 35 – Curvas S-N para os diferentes processos.



Fonte: Autor, 2016

Para facilitar a visualização dos valores obtidos um novo gráfico foi plotado, invertendo os eixos da curva S-N e utilizando um gráfico de coluna, como ilustrado na Figura 36.

Figura 36 – Resultado do Ensaio de Fadiga.

Fonte: Autor, 2016

Para limitar o tempo de duração do ensaio foi estipulado um valor máximo de cinco mil ciclos para os corpos de prova. Para essa condição, apenas o material como recebido e usinado por EDM-ureia alcançaram esse patamar, em uma tensão de $0,65 \cdot \text{LRT}$ e $0,50 \cdot \text{LRT}$, respectivamente, o que demonstra um maior limite de resistência à fadiga do material como recebido.

Além disso, a partir da análise dos gráficos é possível perceber também que ao se empregar a usinagem por EDM, usando como fluido dielétrico água deionizada e ureia há um aumento de resistência à fadiga da peça, quando se compara à resistência do mesmo material, usinado por EDM, usando apenas água deionizada como fluido dielétrico. Entretanto, quando se compara a resistência à fadiga do material usinado por EDM-ureia com o material na condição como recebido, há uma queda na resistência para todos os valores de tensão, provavelmente a baixa qualidade do acabamento superficial (superior a 1 micrón) das peças usinadas por EDM, está exercendo forte influência nos resultados.

6 CONCLUSÃO

Neste trabalho foram aplicadas diferentes rotas de processamento, EDM utilizando como fluido dielétrico água deionizada (EDM-água), EDM utilizando como fluido dielétrico água deionizada e ureia (EDM-ureia) e o aço AISI 4140 na condição como recebido, com o objetivo de avaliar a interferência do processo empregado na resistência à fadiga do material. A partir dos resultados obtidos conclui-se que:

- O processo de nitretação simultaneamente ao processo de usinagem por EDM em um corpo de prova para ensaio de fadiga é possível.
- As camadas derivadas do processo de usinagem por EDM-ureia possuem dureza superior ao do substrato.
- A resistência à fadiga do aço AISI 4140 usinado por EDM com solução de água deionizada e ureia é superior a do aço AISI 4140 usinado por EDM com água deionizada.
- A resistência à fadiga do aço AISI 4140, na condição como recebido, é superior a do aço AISI 4140 usinado por EDM.

7 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS

ARANTES, Luciano José et al. Avaliação de superfícies usinadas por diferentes fluidos dielétricos no processo de usinagem por eletroerosão. **Revista Escola de Minas**, Uberlândia, v.26,n.2,p.7,jun.2003.Disponívelem:<http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0370-44672003000200005>. Acesso em: 20 jun. 2016.

ASTM International. [S.l.]: **ASTM**, 2012. Disponível em: <<http://www.astm.org>>.

Acessado em: 20 de maio de 2015.

ASTM A370-15. Standard test methods and definitions for mechanical testing of steel products. American Society for testing and Materials: 2015.

ASTM E466-15. Standard practice for conducting force controlled constant amplitude axial fatigue tests of metallic materials. American Society for testing and Materials: 2015.

BLEYS, P.; KRUTH, J-P.; LAUWERS, B.; SCHACHT, B.; BALASUBRAMANIAN, V.; FROYEN, L.; HUMBEECK, J. V. Surface and Sub-Surface Quality of steel after EDM. **Advanced Engineering Materials**. N. 1-2, p. 15-25. 2006.

BRANDÃO, Rodrigo Perrotta. **Projeto mecânico de uma máquina de ensaio de fadiga por flexão rotativa**. 2013. 76 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

CALLISTER, W. D .Jr. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006. 589p.

CAMARGO, B. C., COSTA, H. L., RASLAN, A. A. Endurecimento superficial de uma liga Ti6Al4V através de usinagem por descargas elétricas. 16º POSMEC FEMEC UFU, Uberlândia, 2006.

CAMARGO, B. C.; COSTA, H. L.; RASLAN, A. A. **Endurecimento superficial de uma liga Ti₆Al₄V por meio de usinagem por descargas elétricas**. In: COBEF Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, Belo Horizonte, MG, v.5, 2009.

CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos**. 7 ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2008. 599p.

COLIM, G.M. Fadiga dos materiais. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. 2006

COLPAERT, Hubertus. **Metalografia**: dos produtos siderúrgicos comuns. 4. ed. São Paulo: Edgar Blucher, 2008.

DIETER, George E. **Metalurgia Mecânica**. Tradução Antonio S. S. ;Silva, Luiz H. de Almeida; Paulo E. V. de Miranda. 2.ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 1981.

FERRARESI, D. Fundamentos da Usinagem dos Metais. Ed. Edgar Blücher Ltda, São Paulo, 2006. 12^a. Reimpressão.

FORTEL. Microscópios marca Kontrol: Disponível em: <
<http://fortel.com.br/equipamentodemedicao-1.html> > Acesso em: 15 jun. 16.

FREITAS, Wanderlei Ferreira de. **Avaliação das propriedades mecânicas e resistência à fadiga do aço aisi 4140 submetido a diferentes valores de temperatura de revenimento**. 2010. 91 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

FULLER, J.E. **Electrical Discharge Machining Metals Handbook**. 9.ed., v.16, 1989.p 557-564.

GERDAU. Aços finos Piratini. **Manual de Aços**: Disponível em: <
http://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariamecanica/maprotec/catalogo_acos_gerdau.pdf>. Acesso em: 08 jun. 2016.

GUITRAU, E. B. The Eletrical Discharge Machining Handbook. Cincinnati, USA: Hanser Gardner Publications, 1997. 306p.

INSTRON. Soluções em ensaios. Por tipo de ensaio: Disponível em: <
<http://www.instron.com.br/pt-br/testing-solutions/by-test-type> > Acesso em: 15 jun. 16

KÖNIG, W.; KLOCKE, F.; LENZEN, R. The Electrical Machining Processes: What Demands Will They Face in the Future. **International Journal of Electrical Machining**.v.1 n.1, p.3-7, 1996.

LG STEEL. Industria e Comércio de Arruelas LTDA. **Propriedades Mecânicas dos Aços**: Disponível em: < <http://lgsteel.com.br/propriedades-mecanicas-do-carbono.htm> > Acesso em: 21 jun. 16

LOPES, Karina Stefania Souza. **Influência dos parâmetros de usinagem na resistência à fadiga de aços AISI 4140**. 2006. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte.

MARQUES SILVA, Fabrício C., AREVALOS M., Rodrigo, **Modernização da Máquina de Fadiga por Flexão Rotativa do Laboratório de Ensaios de Materiais**. Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, 2011.

MARTINS, Marcelo Sampaio. **FADIGA DO AÇO PARA MOLAS DE VÁLVULAS SAE 9258 PRODUZIDO INDUSTRIALMENTE POR LINGOTAMENTO CONVENCIONAL E CONTÍNUO**. 2010. 145 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2010.

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

MILFONT, Gilfran. **Inspeção de equipamentos**: Estudos de caso. 2014. Disponível em: <<http://inspecaoequipto.blogspot.com.br/2014/02/falha-por-fadiga.html>>. Acesso em: 20 jun. 2016.

PADILHA, Angelo Fernando; AMBROZIO FILHO, Francisco. **Técnicas de Análise Microestrutural**. São Paulo: Hemus, 2004.

RODRIGUES, J.R.P. **Efeito da adição de carboneto de silício em pó na geração de microtrincas e na topografia da superfície usinada por descargas elétricas do aço rápido ABNT M2**. Uberlândia-MG: UFU, 1999. 47 p. (Dissertação de Mestrado).

SALDANHA, L. A. Q. Modificações superficiais na resistência a fadiga da liga Ti-6Al-4V. UNESP. Guaratinguetá. 2006.

SANTOS, Rogério Felício dos. **Nitreção por EDM do aço AISI 4140**. 2013. 129 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2013.

SHIMADZU. Hmv-2 Series. Shimadzu Micro Hardness Tester: Disponível em: < <http://www.shimadzu.com.br/analitica/produtos/microdurometros/catalogos/hmv-2.pdf> >
Acesso em: 15 jun.16.

SILVA, André Luiz V. da Costa e; MEI, Paulo Roberto. **Aços e ligas especiais**. 3. ed. São Paulo: Blucher, 2010.

SILVA, E.R. **Otimização e avaliação dos parâmetros de influencia do processo AJEDM**. 2012. 125f. Tese (Doutorado) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, MG, 2012.

SOUZA, Sergio Augusto de. **Ensaio mecânicos de materiais metálicos**: fundamentos teóricos e práticos. 5. ed. São Paulo: E. Blucher, 1982.

SOUZA, Sergio Augusto de. **Composição química dos aços**. São Paulo: E. Blucher, 1989.

STEVENS, I. **Improvement of surface quality in die-sinking EDM**. Doctoral thesis. 1998, 181 p. Department of Mechanical Engineering. Katholieke Universiteit Leuven. Leuven, 1998.

TESA TECHNOLOGY. E-catalog Tesa: Disponível em < http://www.tesatechnology.com/en-gb/products/home/#.V2Gbl_krLIU > Acesso em: 15 jun. 16

UDOMPHOL, T., Mechanical Metallurgy Laboratory – Fatigue Testing, ed. 2012.

VILLARES METALS. Catálogo Técnico: Composição Química de Aços Villares. 2004
Catalogo online: catálogo de produtos. Disponível em:<
<http://www.villaresmetals.com.br/pt/villares/Downloads>>. Acesso em: 08 jun. 2016.

YAN, B. H., TSAI, H. C., HUANG, F. Y. The effect in EDM of a dielectric of a urea solution in water on modifying the surface of titanium. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, n.45, 194-200, 2005.