

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**EDUARDO AUGUSTO DE OLIVEIRA E SANTOS**

**NITRETAÇÃO POR DESCARGAS ELÉTRICAS DA LIGA DE ALUMÍNIO SILÍCIO**

**BELO HORIZONTE**

**2017**

EDUARDO AUGUSTO DE OLIVEIRA E SANTOS

**NITRETAÇÃO POR DESCARGAS ELÉTRICAS DA LIGA DE ALUMÍNIO SILÍCIO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no Curso de Graduação de Engenharia de Materiais no 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

Co-orientador: Claudinei Alfredo do Nascimento

BELO HORIZONTE

2017

EDUARDO AUGUSTO DE OLIVEIRA E SANTOS

**NITRETAÇÃO DO ALUMÍNIO POR DESCARGAS ELÉTRICAS**

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

**BANCA EXAMINADORA**

---

Ernane Rodrigues da Silva – Orientador

---

Claudinei Alfredo do Nascimento

---

Roberta Nunes Nery dos Santos

---

Odilon Soares da Silva

## RESUMO

O alumínio e suas ligas apresentam vasta aplicação em diversos setores industriais, como automobilístico, aviação, médico e outros. Tanta gama de aplicação ocorre devido à sua baixa densidade e fácil processabilidade, porém apresentam baixa dureza superficial e pouca resistência ao desgaste. O objetivo deste estudo é avaliar a viabilidade e eficiência de tratamento de superfície para elevar a dureza superficial e resistência ao desgaste da liga hipoeutética de alumínio silício fundido sob pressão. Para realizar esse melhoramento superficial foi utilizada usinagem por descargas elétricas visando a nitretação dos corpos de prova cilíndricos, alterando o eletrodo ferramenta e avaliando as diferentes propriedades resultantes. Os testes foram realizados utilizando uma máquina de EDM por penetração convencional e ureia dissolvida em água deionizada como fluido dielétrico. Para medir os diferentes aspectos foram realizados ensaios de microdureza Vickers, difração de raios-X, microscopia óptica e avaliação do desempenho no processo pela variação de massa dos eletrodos envolvidos. Os resultados mostraram que houve alteração superficial das amostras de alumínio, indicando a ocorrência da nitretação. A camada nitretada apresentou uma dureza superficial pelo menos 93% superior ao metal base antes do procedimento, justificando assim a realização do processo quando o material for submetido a condições adversas.

Palavras chave: Liga de alumínio hipoeutética; nitretação por descargas elétricas; camada nitretada.

## **ABSTRACT**

Aluminum and its alloys are widely used in various industrial sectors, such as automotive, aviation, medical and others. Such application range occurs due to its low density and easy processability, but they have low surface hardness and low wear resistance. The objective of this study is to evaluate the feasibility and efficiency of surface treatment to increase the surface hardness and wear resistance of the pressure-fused silicon aluminum hypoeutectic alloy. In order to perform this superficial improvement, it was used electrical discharge machining, aiming at the nitriding of the cylindrical specimens, altering the electrode tool and evaluating the different resulting properties. The tests were performed using an EDM machine by conventional penetration and urea dissolved in deionized water as dielectric fluid. To measure the different aspects, Vickers microhardness tests, X-ray diffraction, optical microscopy and evaluation of the process performance were performed by the mass variation of the electrodes involved. The results showed that there was a superficial alteration of the aluminum samples, indicating the occurrence of nitriding. The nitrided layer had a surface hardness at least 93% higher than the base metal before the procedure, thus justifying the process when the material is subjected to adverse conditions.

**Keywords:** Hypoeutectic aluminum alloy; nitriding by electric discharges; nitrided layer.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Difratoogramas em atmosfera: (a) N70%-Ar30%,.....	14
Figura 2- Representação da eletrodeposição (adaptação).....	16
Figura 3 – As quatro etapas sequenciais de um processo de eletrodeposição.....	17
Figura 4 - Modificação de superfície através do EDM. ....	18
Figura 5 - Difração de raios x da superfície do titânio puro após EDM.....	19
Figura 6 - Amostras e eletrodos enumerados. ....	21
Figura 7 - Equipamento Eletroplus EDM-540. ....	22
Figura 8 - Máquina EDM detalhada. ....	23
Figura 9 - Painel de controle do equipamento de EDM com detalhamento das principais funções.....	24
Figura 10 - Eletrodeposição por descargas elétricas em operação. ....	25
Figura 11 - Microscopia ótica da amostra de Al. Eletrodo ferramenta de grafita. ....	30
Figura 12 - Microscopia ótica da amostra de Al. Eletrodo ferramenta de grafita. Ampliação da figura 11.....	30
Figura 13 - Microscopia ótica da amostra de Al. Eletrodo ferramenta de cobre.....	31
Figura 14 - Microscopia ótica da amostra de Al. Eletrodo ferramenta de cobre. Ampliação da figura 13.....	31
Figura 15 - Difratoograma da amostra de Alumínio antes do processo de EDM. ....	32
Figura 16 - Difratoograma da amostra de alumínio após a EDM - Grafita.....	33
Figura 17 - Difratoograma da amostra de alumínio após a EDM – Cobre.....	33
Figure 18 - Difratoogramas sobrepostos das amostras de alumínio.....	34
Figura 19 - Gráfico com os valores de Dureza Vickers (HV) - Média e desvio padrão. ....	35
Figura 20 - Imagem ampliada das marcações do ensaio de dureza. Eletrodo: cobre.....	36
Figura 21 - Imagem ampliada das marcações do ensaio de dureza. Eletrodo: grafita.....	37

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química (% em peso) da liga hipoeutética de alumínio.....	20
Tabela 2 - Parâmetros utilizados na EDM.....	26
Tabela 3- Valores de dureza Vickers das amostras, variação relativa e análise do DP.....	35
Tabela 4 - Valores de TRM, TD e DVR após nitretação por EDM do alumínio silício. ....	37

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

$\mu\text{m}$ : Micrometro (10<sup>-6</sup> m)

$\mu\text{s}$ : micro segundo (10<sup>-6</sup> s)

$^{\circ}\text{C}$ : Graus Celsius

A: Ampere

Al: Alumínio

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: Óxido de alumínio

AlN: Nitreto de alumínio

Atm: Pressão atmosférica

Cu: Cobre

DRX: Difração de raios x

DVR: Desgaste volumétrico relativo

EDM: Usinagem por descargas elétricas (Electrical discharge machining)

Fe: Ferro

g/l: Grama por litro (concentração)

g/mm<sup>3</sup>: Grama por milímetro cúbico (desgaste volumétrico)

HV: Dureza Vickers (Hardness Vickers)

Mg: Magnésio

mm: Milímetro (10<sup>-3</sup> m)

Mn: Manganês

Pb: Chumbo

PIII: implantação de íons por imersão à plasma (plasma immersion ion implantation).

Si: Silício

Sn: Estrôncio

TD: Taxa de desgaste

Ti: Titânio

TiC: Carboneto de titânio

TiN: Nitreto de titânio

TiO: Óxido de titânio

Toff: Tempo de pausa

Ton: Tempo de pulso

TRM: Taxa de remoção de material

V: Vanádio

V: Volts

Zn: Zinco

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	11
2. OBJETIVOS.....	12
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	13
3.1. Nitretação.....	13
3.2. Usinagem por descargas elétricas .....	16
3.3. Nitretação através do EDM.....	18
4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	20
4.1. Materiais e eletrodos peça e ferramenta.....	20
4.2. Fluidos dielétricos .....	21
4.3. Equipamento de usinagem por descargas elétricas .....	22
4.4. Microscopia óptica.....	26
4.5. Difração por raios x .....	27
4.6. Ensaio de microdureza Vickers .....	27
4.7. Desempenho da usinagem .....	27
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	29
5.1. Microscopia óptica.....	29
5.2. Difração por raios x .....	32
5.3. Microdureza Vickers.....	35
5.4. Avaliação do desempenho do processo de EDM.....	37
6. CONCLUSÃO .....	39
7. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA .....	40

## 1. INTRODUÇÃO

As ligas de alumínio são usadas em uma grande variedade de produtos e processos industriais. O baixo ponto de fusão, facilidade na usinagem e a possibilidade de reciclagem são atrativos do alumínio. Devido ao seu baixo peso específico é muito aplicado para reduzir a massa final do produto. Apesar de tantas vantagens, a baixa dureza superficial e resistência ao desgaste limitam seu campo de aplicação (JAHAN *et al.*, 2015).

O tratamento de superfície modifica as propriedades mecânicas superficiais ampliando a variedade de funções, dentre as possibilidades está a nitretação. A difusão de átomos nas camadas superficiais da liga de alumínio forma o Nitreto de Alumínio (AlN). O nitreto metálico apresenta alta condutividade térmica, boa resistência à corrosão, alta resistividade elétrica, elevada dureza (HV1400) e resistência ao desgaste melhorando significativamente as propriedades superficiais (GREDELJ *et al.*, 2002).

Existem algumas formas de realizar a nitretação em diferentes substratos metálicos. A nitretação líquida, nitretação a gás e a nitretação a plasma mostram-se eficientes para aços ferramentas padrões (MÖLLER *et al.*, 2001). Alguns estudos tem sido promissores no uso de técnicas específicas de nitretação à plasma em alumínio, com resultados que mostram a formação de uma bicamada de 15µm com elevado aumento da dureza (HV1400) (EBISAWA & SAIKUDO, 1996).

Outra forma de realizar a nitretação de ligas de alumínio é por EDM (Electric Discharge Machining). O processo de EDM é uma tecnologia promissora que pode ser utilizada em qualquer material condutor de eletricidade. Trata-se de uma usinagem não convencional que utiliza sucessivas descargas elétricas que ocorrem entre eletrodo e o metal banhado em um líquido dielétrico (JAHAN *et al.*, 2015). No experimento de Yan *et al* (2005) foi utilizado uma solução de ureia e água destilada como líquido dielétrico que favoreceu a decomposição do Nitrogênio e sua migração para a superfície da liga metálica e ocorreu a nitretação do metal em questão, o Titânio.

No presente estudo, avaliou-se a nitretação da liga de alumínio silício por usinagem por descargas elétricas e as alterações nas propriedades mecânicas superficiais, como dureza, espessura da camada e homogeneidade das camadas de nitreto de alumínio.

## 2. OBJETIVOS

Avaliar a viabilidade da nitretação da liga de alumínio silício hipoeutética fundida sob pressão através da usinagem por descargas elétricas utilizando a ureia dissolvida em água deionizada como fonte de nitrogênio.

Específicos:

- Avaliar a formação da camada nitretada via microscopia ótica.
- Mensurar o valor da microdureza Vickers na camada nitretada.
- Analisar os nitretos formados via difração de raios x.
- Avaliar o desempenho da nitretação por descargas elétricas.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Na presente revisão bibliográfica será abordado os principais temas do trabalho: Nitretação, usinagem por descargas elétricas (EDM) e nitretação por EDM.

#### 3.1. Nitretação

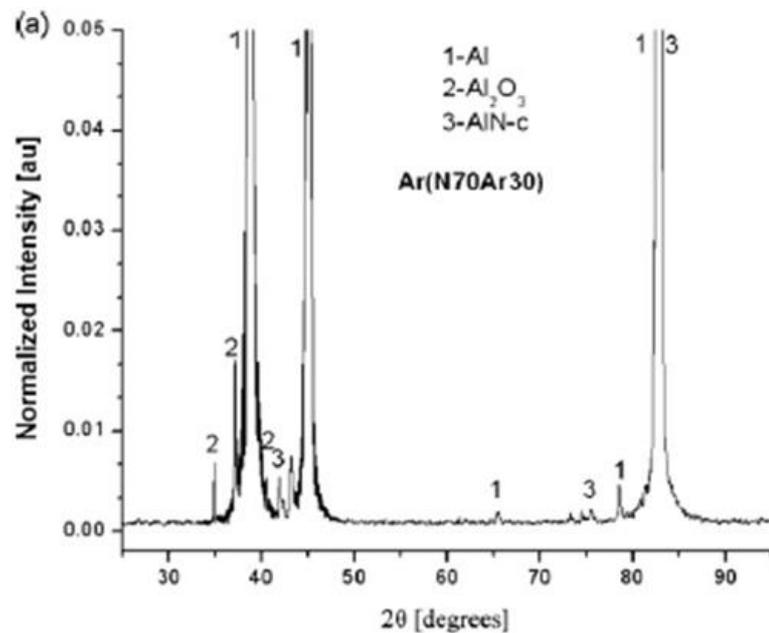
A nitretação é um tratamento de superfície que tem como principal objetivo o endurecimento do metal base. Uma das maneiras que acontece o aumento na dureza superficial é por difusão do átomo de nitrogênio na rede cristalina de ligas ferrosas, por difusão intersticial ou por lacunas. Dessa forma não há transformação de fases nem precipitação de nitretos. (SANTOS, 2013). Em ligas não ferrosas, como as ligas de alumínio, a nitretação ocorre pela formação do Nitreto de Alumínio em suas camadas mais superficiais, diferentemente das ligas ferrosas (CHEN, STOCK, MAYR, 1994).

O nitreto de alumínio é formado na superfície do metal por difusão dos átomos de alumínio até os átomos de nitrogênio. Os átomos de Al se originam das camadas do interior do substrato, inferiores à camada de nitreto que se forma. Já o nitrogênio tem como origem uma fonte externa, que varia de acordo com o mecanismo de nitretação. A nitretação do alumínio se encerra quando finda alimentação de nitrogênio do mecanismo externo ou quando não é mais possível haver difusão dos átomos de alumínio nas subcamadas, devido ao seu gradiente de concentração. Cada uma dessas maneiras originam camadas nitretadas diferentes. Quando o limitador é o nitrogênio forma-se uma camada mais fina e homogênea, e quando o limitador é o alumínio forma-se uma camada mais espessa, porém heterogênea (MÖLLER *et al.*, 2001). Para a realização da nitretação do alumínio é necessário realizar um tratamento superficial prévio para a retirada do óxido de alumínio ( $Al_2O_3$ ), presente em toda superfície desse tipo de material. Essa camada de óxido impede a difusão do nitrogênio através do substrato impedindo a nitretação (CHEN, STOCK, MAYR, 1994).

Existe uma relativa variedade de mecanismos para nitretação do alumínio, cada uma com suas peculiaridades e características. Existe a possibilidade de nitretar o alumínio através, de deposição química de vapor, laser, plasma e outros. Entretanto, nenhum método ainda se apresentou como ideal (ZHENG *et al.*, 2012). Segundo Möller *et al* (2001), para o endurecimento de vários metais, a difusão do nitrogênio deve ocorrer com uma espessura aproximada de  $10\mu m$  a 1 mm.

Para a realização de procedimentos de modificação superficial de amostras de alumínio, a concentração do meio em que será introduzido é aspecto chave nos resultados do procedimento. Na figura 1 (a,b e c) é possível verificar que diferentes composições da atmosfera em que as amostras estavam submetidas, em que as concentrações de Argônio e Nitrogênio foram variadas, levaram a diferentes composições químicas (López-Callejas, et al., 2010). Os difratogramas foram obtidos em amostras que passaram por implantação de íons por imersão à plasma (*plasma immersion ion implantation –PIII*).

**Figura 1 - Difratogramas em atmosfera: (a) N70%-Ar30%,**



**Figura 1 – Difratograma em atmosfera (b) N50%-Ar50%**

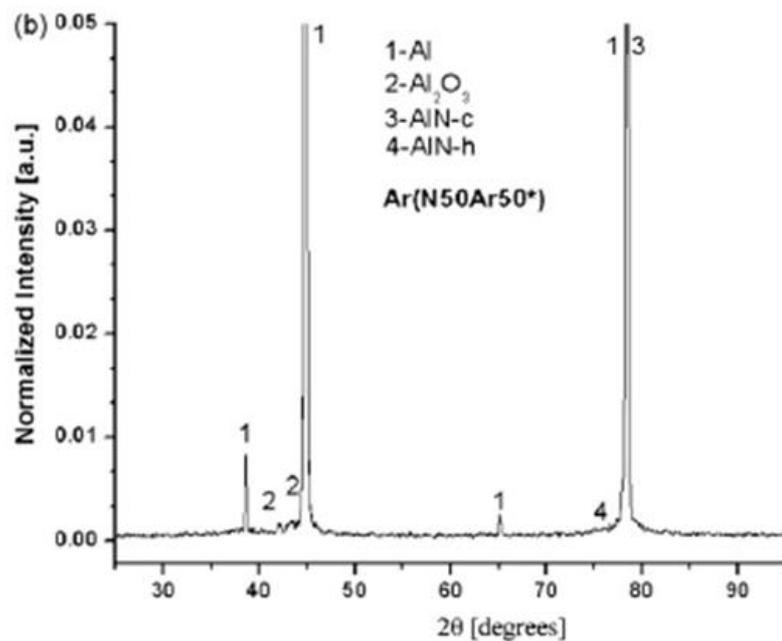
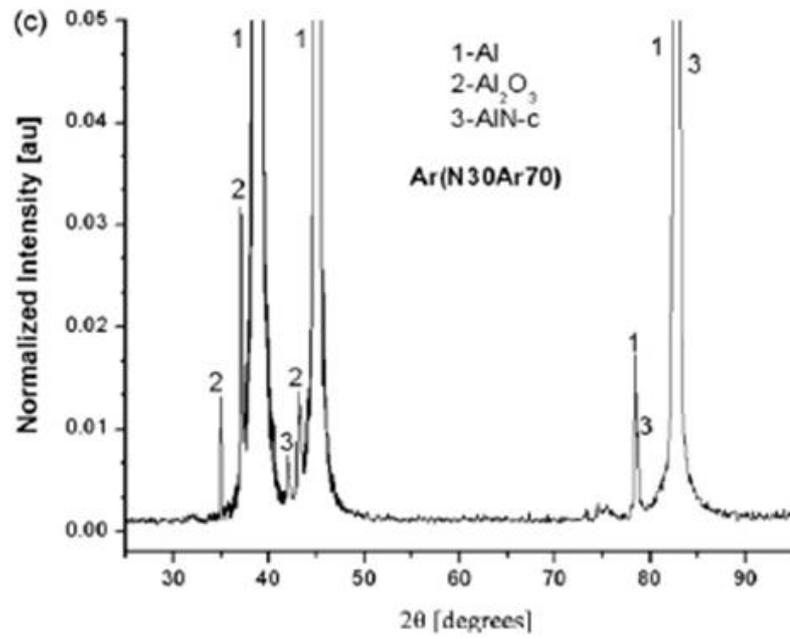


Figura 1 – Difratoograma em atmosfera (c) N30%-Ar70%.



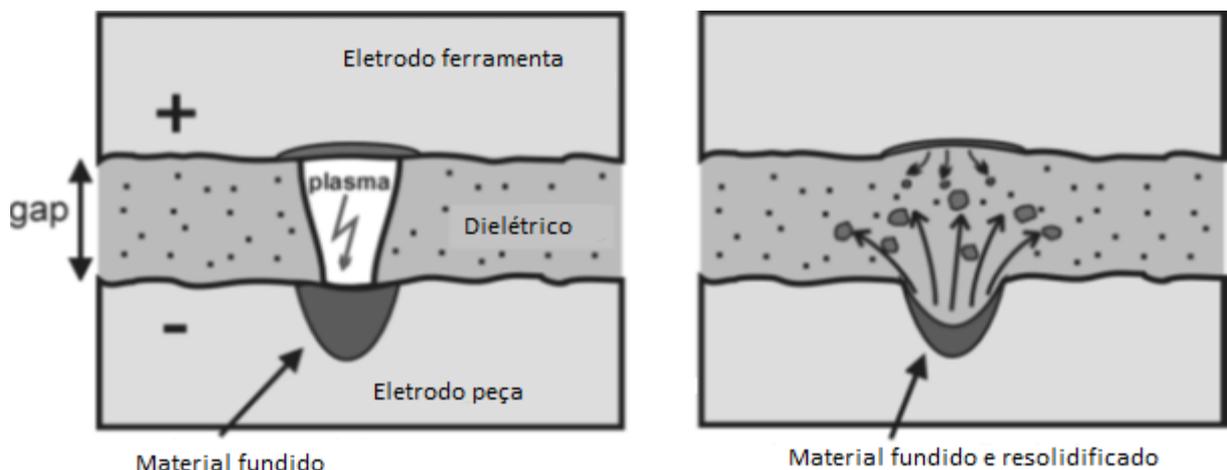
Fonte: LÓPEZ-CALLEJAS, et al., 2010

### 3.2. Usinagem por descargas elétricas

A usinagem por descargas elétricas (*Electrical Discharge Machining – EDM*) é um tipo de usinagem não convencional utilizada na confecção de peças condutoras de eletricidade com formatos complexos, elevada dureza e que apresenta dificuldade de ser processada pelos processos convencionais (ARANTES *et al*, 2003).

Segundo BLEYS *et al* (2006), a usinagem por EDM consiste na conversão de energia elétrica em térmica, e uma pequena quantidade de material é removida tanto do eletrodo quanto da superfície da peça. No final da centelha, parte do material é removida deixando uma pequena cratera e imediatamente abaixo a essa superfície a zona é fundida e volta a ser solidificada e termicamente afetada, como ilustrado na figura 2.

**Figura 2- Representação da eletrodeposição (adaptação).**



Fonte: (BLEYS, et al., 2006)

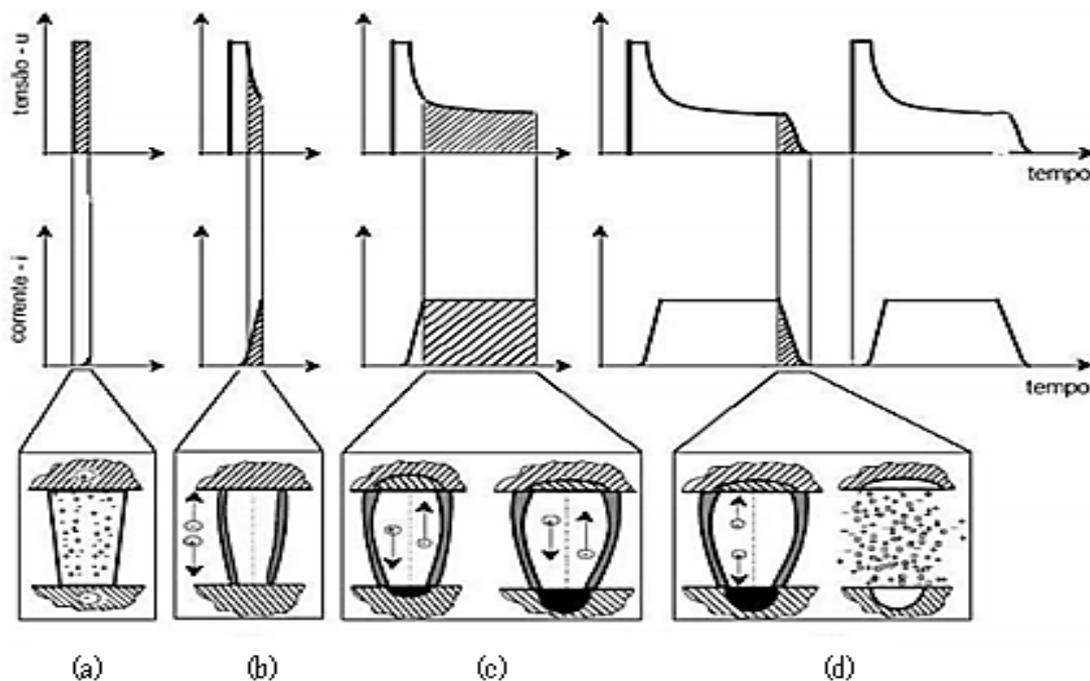
O processo de usinagem por descargas é baseado na aplicação de uma diferença de potencial entre duas peças condutoras de energia, peça usinada e eletrodo, que são separados por uma pequena distância (*gap*) ocorrendo descargas elétricas pulsadas. (CAMARGO, COSTA, RASLAN, 2009).

Portanto, o equipamento consiste em um eletrodo e uma peça a ser usinada, submersa em um líquido dielétrico. Quando as descargas elétricas entre peça e eletrodo começam, a temperatura e pressão atingidas são elevadas, podem chegar até 15.000°C e 200 atm respectivamente. A temperatura e pressão extrema transforma o líquido dielétrico entre a peça e o eletrodo em um vapor eletrolítico. A cada pulso elétrico, retira-se uma pequena porção de material da superfície da peça e forma-se uma cratera, que fica depositado já em estado sólido no fundo da nova abertura. Entre um pulso elétrico e outro, o gás eletrolítico ocupará os espaços que serão preenchidos pelo fluido dielétrico, o que levará a um choque térmico

devido à diferença de temperatura, que posteriormente irá gerar micro explosões e as partículas fundidas na peça serão desagregadas, começando a usinagem (KAMINSKY & CAPUANO, 1999).

O fenômeno de EDM é dividido em quatro etapas sequenciais e podem ser vistas na figura 3. Elas são: (a) ignição; (b) formação do canal de plasma; (c) fusão e sublimação dos resíduos da peça e eletrodo; (d) limpeza dos materiais que se fundiram (SANTOS, 2013).

**Figura 3 – As quatro etapas sequenciais de um processo de eletrodeposição.**



Fonte: (KÖNIG, KLOCKE, & LENZEN, 1996)

Segundo SANTOS (2013), o eletrodo avança na direção da peça até uma distância entre 50  $\mu\text{m}$  e 1000  $\mu\text{m}$  sem ocorrência de fluxo de corrente. 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.

As características dos fluidos dielétricos tem influência direta na realização do EDM e em seus parâmetros como Taxa de Remoção de Material, Relação de Desgaste e aspecto superficial. As propriedades do fluido capazes de influenciarem são a resistividade dielétrica, viscosidade, ponto de fulgor, estabilidade à oxidação (ARANTES *et al*, 2003).

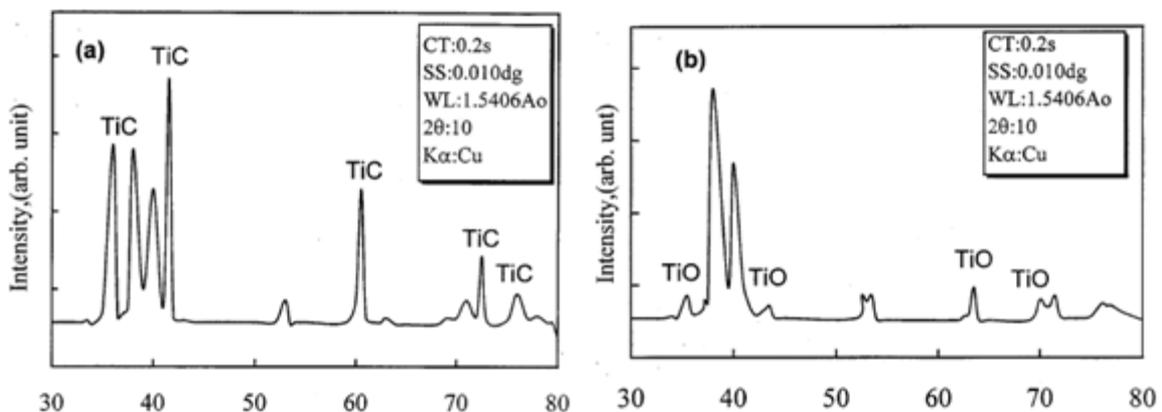
Existem algumas variações da usinagem por descargas elétricas, dependendo da aplicação, material usinado e necessidade do processo, em que a mais adequada é escolhida (BLEYS *et al.*, 2006).

### 3.3. Nitretação através do EDM

Na produção de peças finais para aplicações industriais, é muito comum realizar o acabamento por processos diversos e finalizar o processo com algum tipo de tratamento superficial em busca de melhorias nas propriedades mecânicas finais. Entretanto, trata-se de um processo de elevado custo e tempo. Uma forte tendência no estudo de tratamento de superfície é a possibilidade de usinagem por eletroerosão com adição de ureia na água deionizada como líquido dielétrico, que possibilitará a modificação de superfície durante a usinagem (YAN, TSAI, YUAN, 2005).

No estudo realizado por Yan & Chen (1997), foi observada a modificação da superfície da liga Ti-6Al-4V utilizando água destilada e querosene como dielétrico. Na Figura 4-(a), a difração de raios-X evidencia a presença de TiO quando se usa água destilada enquanto a Figura 4-(b) revela a presença de TiC quando se utiliza querosene, devido à composição de cada um dos fluidos dielétricos. (CHEN, YAN, HUANG, 1999).

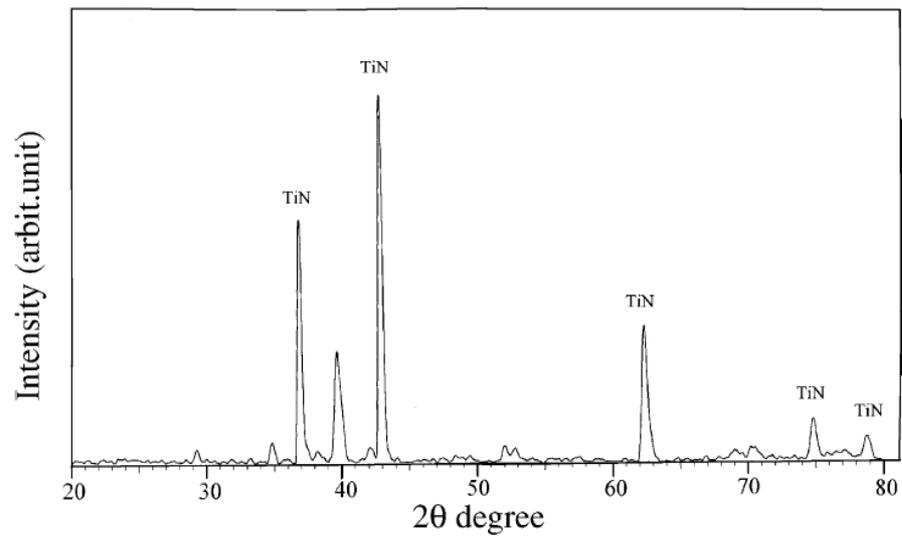
**Figura 4 - Modificação de superfície através do EDM.**



Fonte: (CHEN, YAN, HUANG, 1999)

No estudo de Yan *et al* (2005) foi realizado a modificação da superfície do titânio puro utilizando EDM e solução de ureia e água destilada para melhorar a baixa resistência ao desgaste. De acordo com a difração de raios-X da figura 5, fica evidenciado a presença de TiN na superfície da peça metálica, e assim comprovado a viabilidade de realizar a modificação de superfície utilizando o líquido dielétrico contendo ureia durante EDM.

**Figura 5 - Difração de raios x da superfície do titânio puro após EDM.**



Fonte: (YAN, TSAI, YUAN, 2005)

#### 4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O procedimento proposto visava à modificação da superfície das amostras da liga de alumínio silício através da inserção de nitretos, através da usinagem por descargas elétricas.

##### 4.1. Materiais e eletrodos peça e ferramenta

O material utilizado como eletrodo peça foi a liga hipoeutética de alumínio silício fundida sob pressão, com o intuito de verificar a ocorrência de nitretação nesse tipo de material. A descrição detalhada da composição química está presente na Tabela 1. Foram usadas seis amostras circulares para verificar a ocorrência de nitretação.

**Tabela 1 - Composição química (% em peso) da liga hipoeutética de alumínio.**

Elemento	Al	Si	Cu	Fe	Mg	Mn	Zn	Ni	Pb	Sn
% em peso	86,8	7,76	3,11	0,74	0,36	0,4	0,56	0,03	0,05	0,02

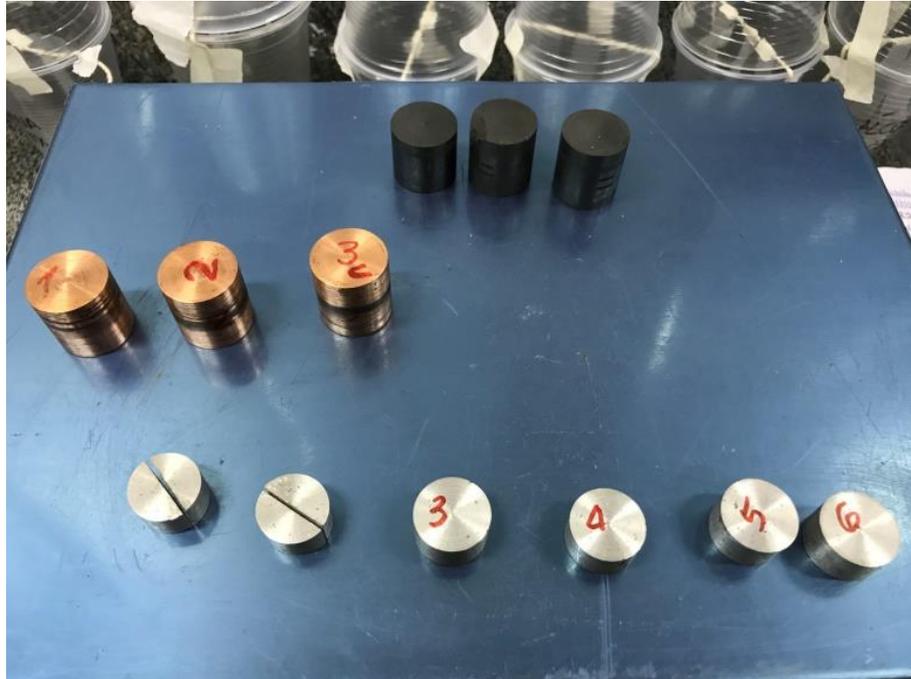
Fonte: (MARTINS, 2016)

Os eletrodos ferramentas utilizados no experimento foram de cobre eletrolítico e grafita, três de cada em formato circular. Os eletrodos de grafita foram secados previamente no forno tipo mufla por três horas a 400°C.

Os seis eletrodos foram separados em dois grupos, incluindo em cada grupo uma amostra segmentada ao meio para facilitar posterior análise metalográfica. Cada grupo utilizou um tipo de eletrodo ferramenta.

Todos os eletrodos tiveram sua superfície usinada em torno convencional. Além disso, foram devidamente identificados, como é possível observar na figura 6.

**Figura 6 - Amostras e eletrodos enumerados.**



Fonte: Foto do autor

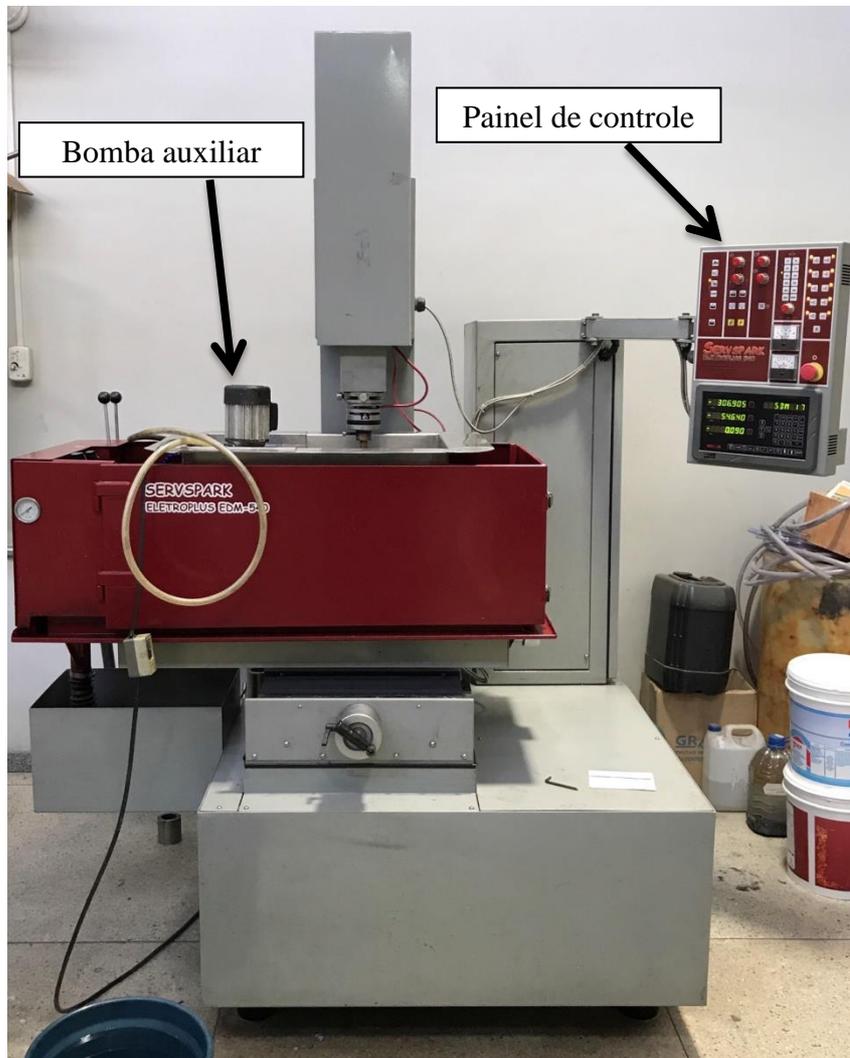
#### **4.2. Fluidos dielétricos**

Para a preparação do fluido dielétrico, utilizou-se água deionizada, utilizando água potável comum em um deionizador a base de resina. Um quilograma de ureia farmacológica foi dissolvido em 30 litros do solvente.

### 4.3. Equipamento de usinagem por descargas elétricas

O equipamento utilizado foi uma máquina “Eletroplus EDM-540” da Sevspark, mostrado na figura 7. Ela possui um cabeçote de encaixe para o eletrodo ferramenta com movimentação vertical (eixo z). O equipamento opera em ciclos, em que o suporte do eletrodo ferramenta movimenta-se para baixo e se aproxima do eletrodo ferramenta a uma distância suficiente para que ocorra uma descarga elétrica entre eletrodos peça e ferramenta. Após um tempo pré-determinado, as peças voltam a se afastar e se reinicia o ciclo. Toda a operação e controle das variáveis são feitas pelo painel de controle da máquina.

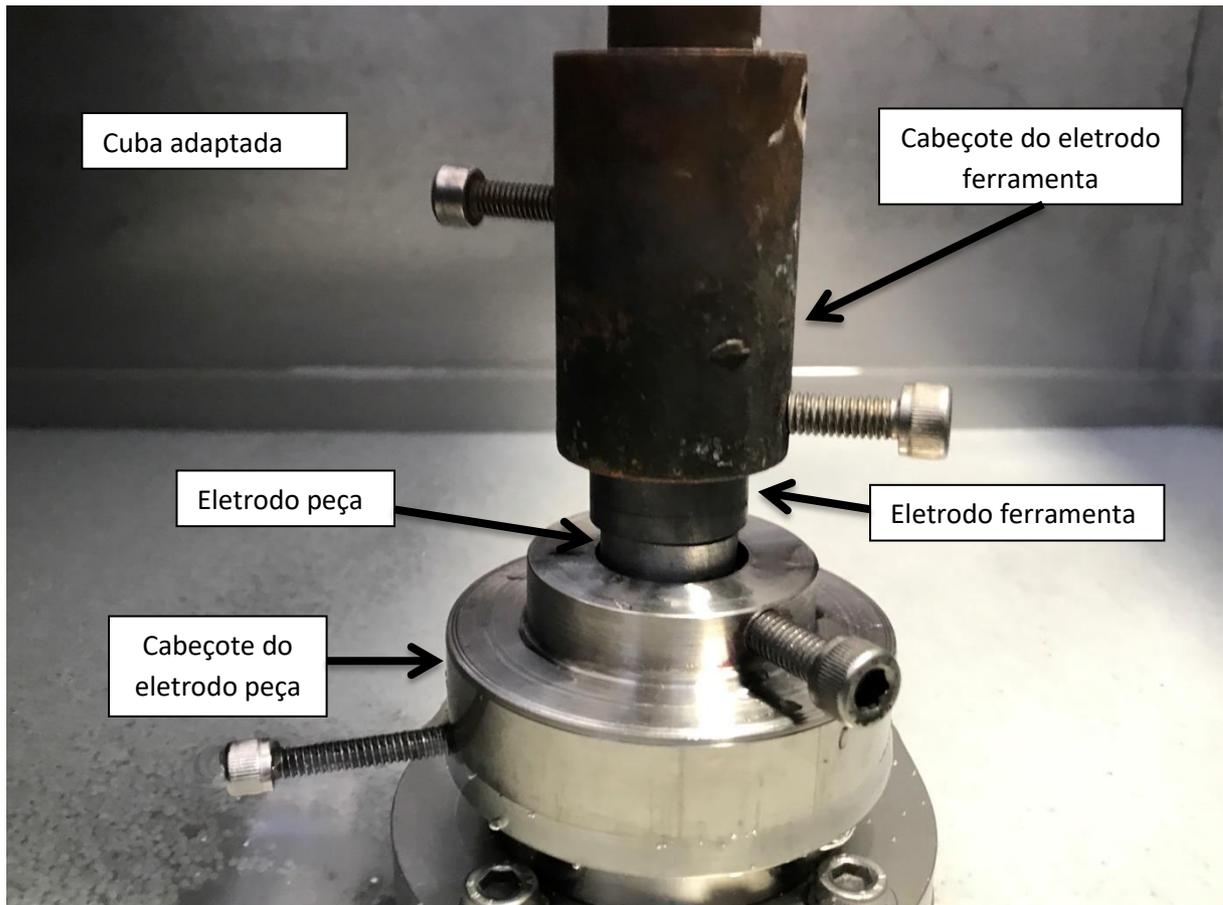
**Figura 7 - Equipamento Eletroplus EDM-540.**



Fonte: Foto do autor

Utilizou-se uma cuba adaptada para a realização do experimento com um suporte de encaixe para o eletrodo peça. O objetivo de utilizar essa cuba adaptada é evitar a contaminação pelo óleo mineral, que se utiliza para outros procedimentos de eletroerosão. A figura 8 ilustra o posicionamento do eletrodo ferramenta sobre o eletrodo peça. Além disso, é possível perceber o fácil manuseio do caçote porta amostras.

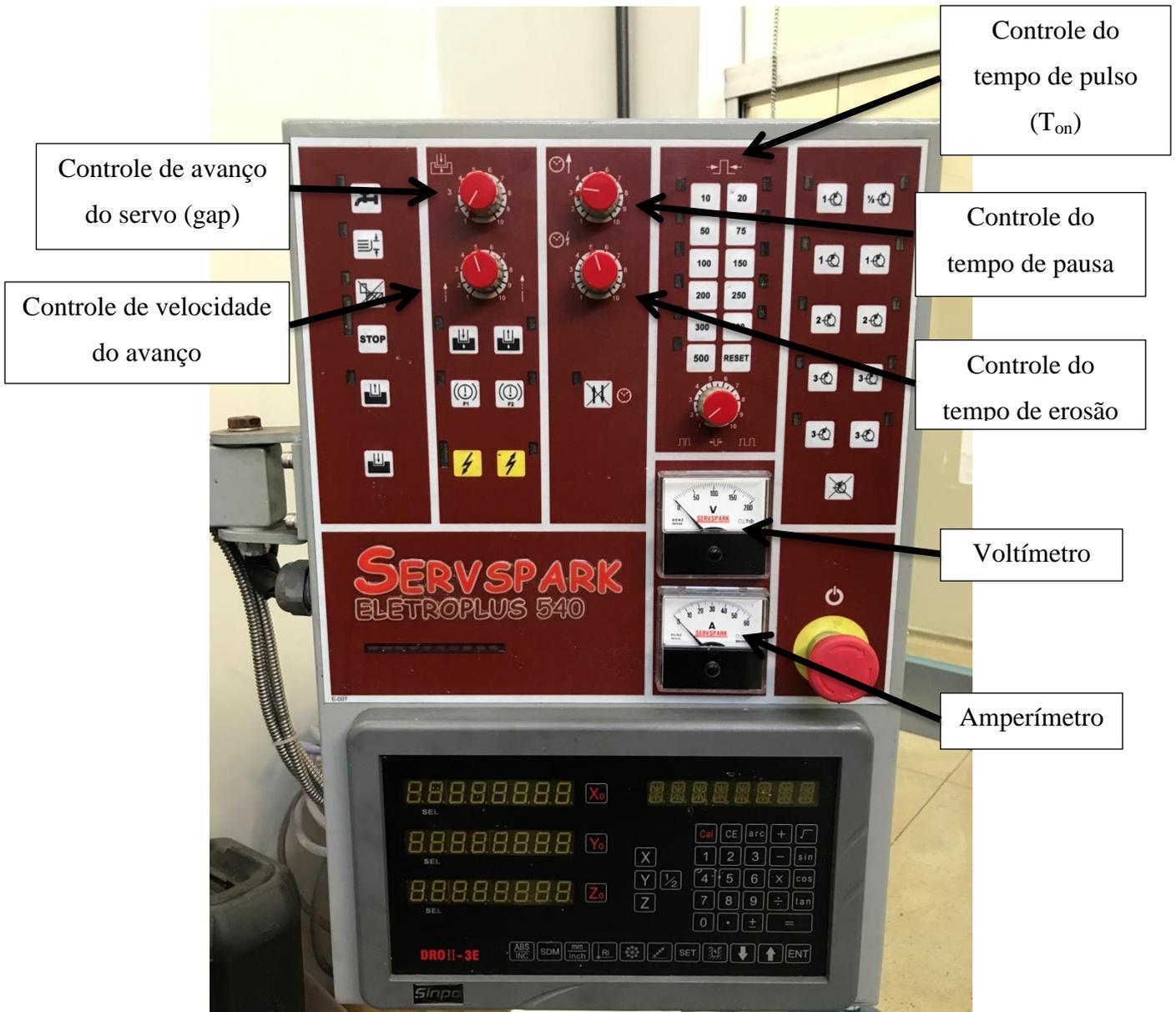
**Figura 8 - Máquina EDM detalhada.**



Fonte: Foto do autor

Na figura 9 é possível ver detalhadamente o painel e que todas as variáveis do procedimento são controladas nele, como o avanço do servo (velocidade e distância); tempo de pulso ( $T_{on}$ ), pausa ( $T_{off}$ ), erosão e a corrente.

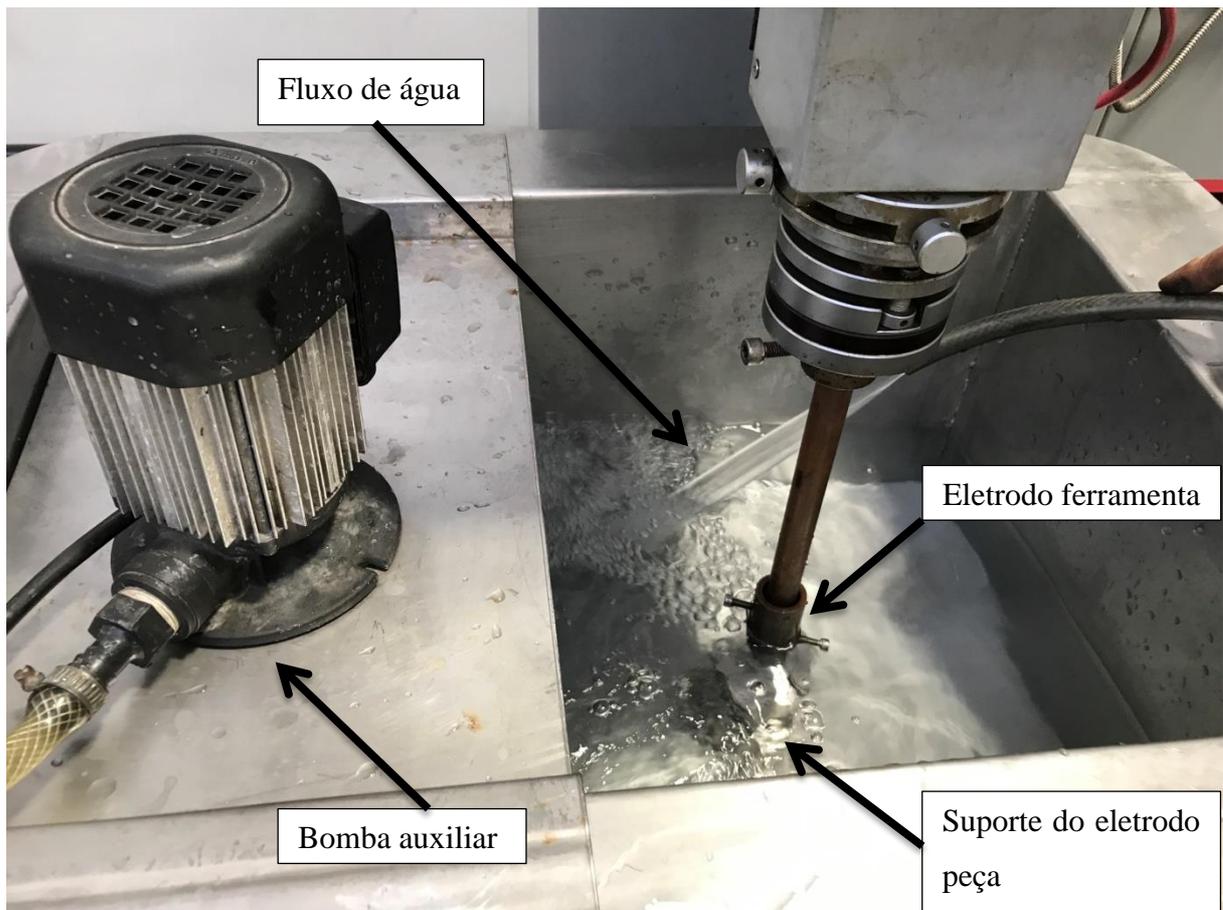
**Figura 9 - Painel de controle do equipamento de EDM com detalhamento das principais funções.**



Fonte: Foto do autor

Usou-se uma bomba auxiliar durante todo o processo de usinagem por descargas elétricas, como ilustrado na figura 10. O fluxo de fluido dielétrico foi direcionado à região entre os eletrodos, com o objetivo de evitar a deposição de resíduos oriundos do processo na superfície do eletrodo peça. Uma vez que os particulados gerados podem agir como isolantes na passagem de corrente entre os eletrodos e impedir que a nitretação ocorra.

**Figura 10 - Eletrodeposição por descargas elétricas em operação.**



Fonte: Foto do autor

Os parâmetros utilizados estão evidenciados abaixo na Tabela 2:

**Tabela 2 - Parâmetros utilizados na EDM.**

Parâmetros	
Polaridade do eletrodo ferramenta	Positiva
Tensão	60 V
Corrente	40 A
Tempo de pulso ( $T_{on}$ )	100 $\mu$ s
Tempo de pausa ( $T_{off}$ )*	1,5
Fenda (gap)*	1
Tempo de erosão*	5
Afastamento periódico do eletrodo ferramenta*	3
Velocidade do Servo*	5
Tempo de duração de cada teste	5 minutos

Fonte: Autor

\*Parâmetros ajustados no painel da máquina

#### 4.4. Microscopia óptica

As amostras foram observadas em microscópio óptico para avaliar a espessura da camada nitretada após o processo de eletrodeposição por descargas elétricas. Diferentes ampliações foram realizadas com o intuito de melhor avaliar a eficiência do processo.

#### 4.5. Difração por raios x

A difração de raios x (DRX) foi utilizada para verificar a ocorrência de nitretos nas amostras. Através dos difratogramas obtidos, uma análise foi realizada para avaliação dos tipos de nitretos formados nas amostras após o experimento.

#### 4.6. Ensaio de microdureza Vickers

A microdureza Vickers utiliza o penetrador piramidal sob a ação de uma força de 10N em um período de 20 segundos. Foram efetuadas três medições por superfície e obtido o valor médio e desvio padrão. A imagem da superfície foi capturada por meio de câmera acoplada ao equipamento.

#### 4.7. Desempenho da usinagem

Para avaliar o desempenho da usinagem foram utilizadas três análises: taxa de remoção de material, taxa de desgaste e o desgaste volumétrico relativo. Todas três análises usam a diferença da massa dos eletrodos, que foram pesados em uma balança de precisão de  $10^{-3}$  g antes e depois da usinagem.

A **taxa de remoção de material (TRM)** evidencia o volume removido do eletrodo peça em um determinado tempo de usinagem. Essa taxa é expressa em  $\text{mm}^3/\text{min}$  e é obtida pela equação 4.1.

$$TRM = \frac{(m_i - m_f)}{(0,002725).t} \quad (4.1)$$

Em que:  $m_i$  é a massa antes da usinagem e  $m_f$  é a massa após o EDM, dadas em grama. O  $t$  é o tempo em minutos do procedimento, que teve duração de 5 minutos, e  $0,002725 \text{ g/mm}^3$  corresponde ao peso específico do alumínio.

A **taxa de desgaste (TD)** evidencia o volume perdido do eletrodo ferramenta durante a usinagem. Essa taxa é expressa em  $\text{mm}^3/\text{min}$  e dada pela equação 4.2.

$$TD = \frac{(m_i - m_f)}{\rho \cdot t} \quad (4.2)$$

Em que  $\rho$  é a peso específico do material do eletrodo ferramenta, para o cobre eletrolítico esse valor é de  $0,0089 \text{ g/mm}^3$  e para o grafite é de  $0,0021 \text{ g/mm}^3$ . Além de usar o mesmo tempo  $t$  de 5 minutos.

O **desgaste volumétrico relativo (DVR)** é a relação entre as diferenças de volumes do eletrodo peça e ferramenta antes e depois do processo de EDM e dada pela equação 4.3.

$$DVR = \frac{TD}{TRM} \cdot 100 \quad (4.3)$$

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados e discussões são baseados nos valores obtidos na microdureza Vickers, nos difratogramas obtidos na difração por raios x, pela análise da microscopia ótica e por fim, pelo desempenho da eletroerosão. Considera-se, portanto, aspectos visuais, químicos e mecânicos para a avaliação da formação de nitretos.

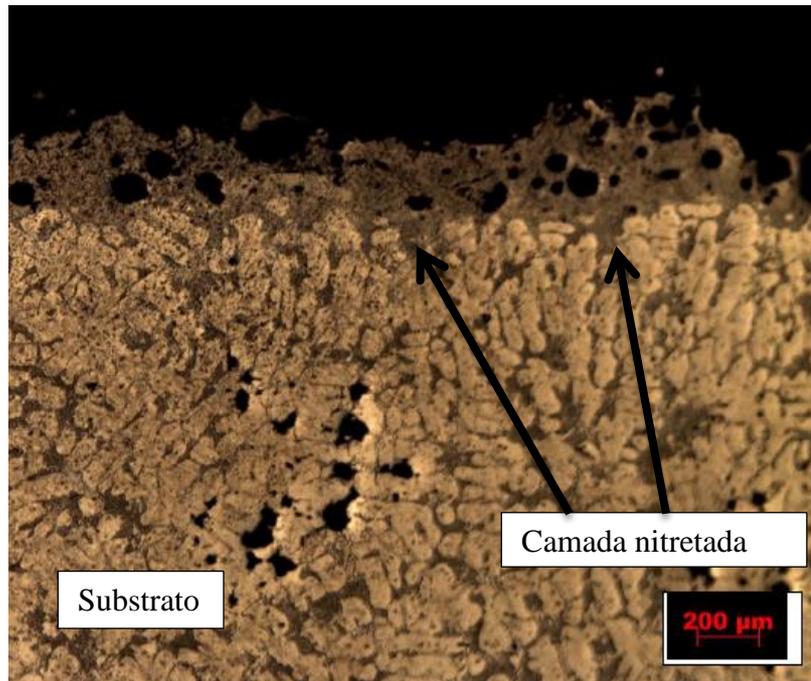
### 5.1. Microscopia óptica

A eletrodeposição por descargas elétricas aplicadas à superfície do alumínio, usando ureia dissolvida em água deionizada produziu mudanças visíveis em microscópio óptico. A superfície perpendicular das amostras previamente seccionadas ao meio foi utilizada para observar as modificações ocorridas.

As figuras 11 e 12 são ampliações da superfície do alumínio que sofreu EDM utilizando a grafita como eletrodo ferramenta, e as figuras 13 e 14 são ampliações das amostras com o cobre como eletrodo ferramenta. Nas quatro imagens é possível verificar a formação da camada superficial modificada, diferente do aspecto do substrato, com aspecto mais refinado. Portanto, é possível afirmar que houve mudança superficial através da EDM na liga de alumínio silício. Indicados pelas setas, as regiões mais escuras e de diferentes espessuras, portanto apresentaram aspecto heterogêneo na formação de nitretos.

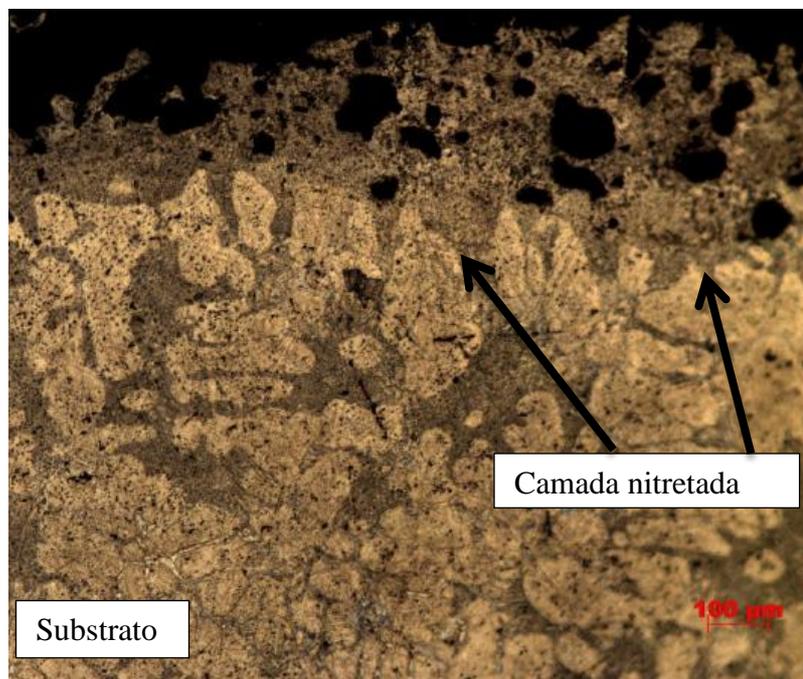
Ao comparar as figuras 12 e 14 é possível verificar que o eletrodo de cobre forneceu uma camada mais homogênea e espessa de nitretos de alumínio, ou seja, foi mais efetiva na modificação superficial.

**Figura 11 - Microscopia ótica da amostra de Al. Eletrodo ferramenta de grafita.**



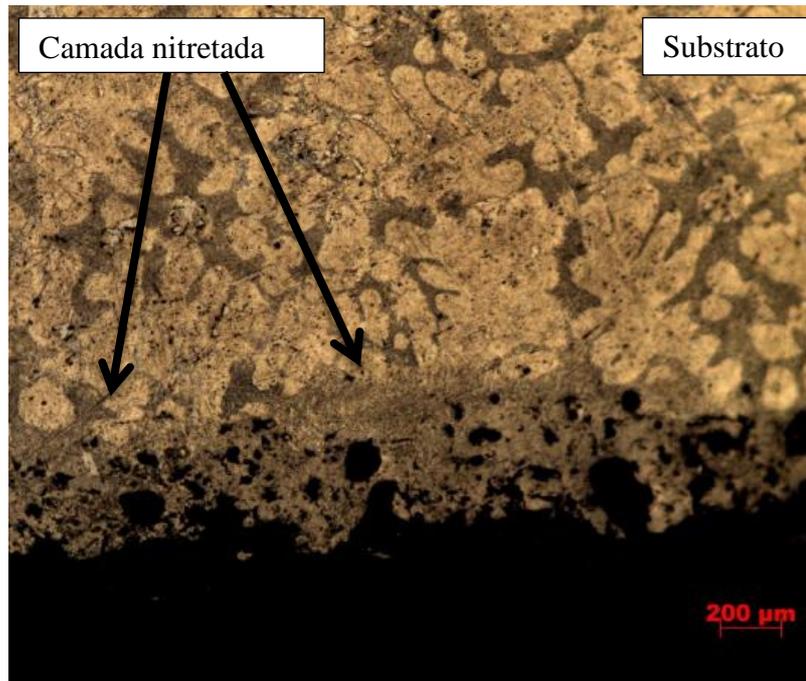
Fonte: Elaborado pelo autor

**Figura 12 - Microscopia ótica da amostra de Al. Eletrodo ferramenta de grafita.  
Ampliação da figura 11.**



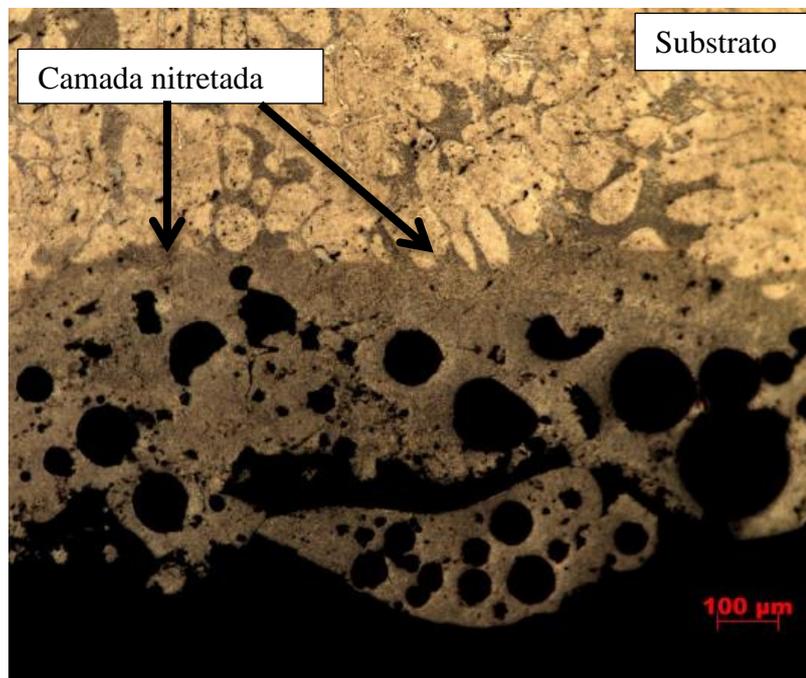
Fonte: Elaborado pelo autor

**Figura 13 - Microscopia ótica da amostra de Al. Eletrodo ferramenta de cobre.**



Fonte: Elaborado pelo autor

**Figura 14 - Microscopia ótica da amostra de Al. Eletrodo ferramenta de cobre.  
Ampliação da figura 13.**



Fonte: Elaborado pelo autor

## 5.2. Difração por raios x

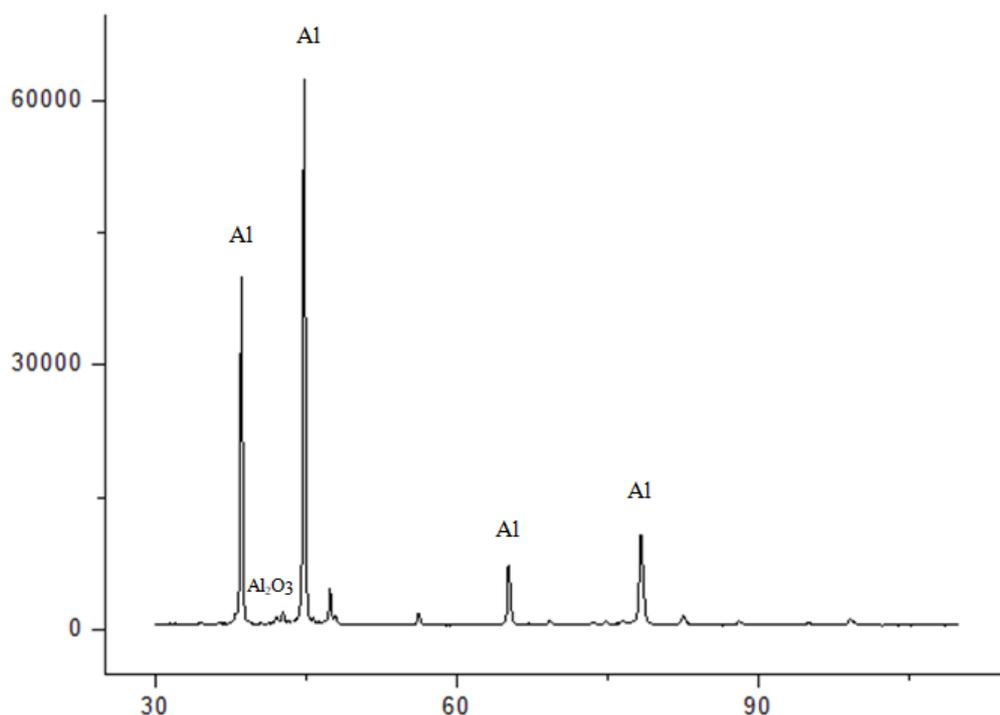
A análise dos difratogramas de raios x (DRX) das amostras antes e depois do EDM permitiu identificar a presença de nitretos de alumínio após o procedimento.

O DRX da amostra do metal base antes do processo de eletrodeposição, figura 15, mostrou o esperado, com elevadas concentrações de Al e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  dada à alta reatividade do alumínio com oxigênio.

Os difratogramas de raios x após o EDM utilizando a grafita e o cobre como eletrodos ferramenta apresentaram resultados semelhantes, como é possível verificar nas figuras 16 e 17. Ambas apresentaram picos referentes ao AlN, o que comprovam a eficácia do processo na alteração química superficial.

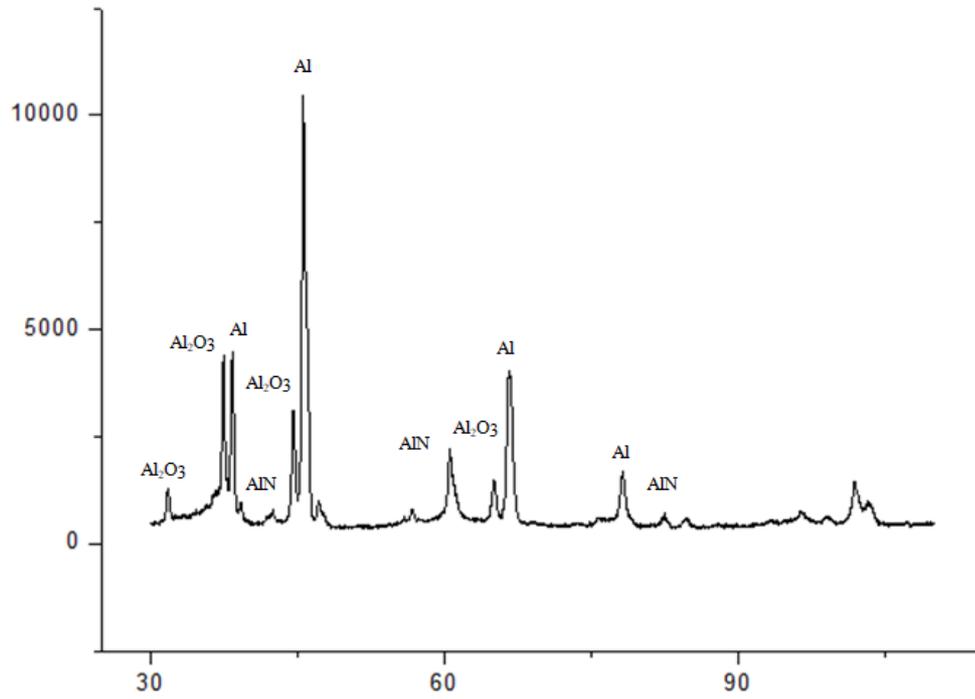
Além disso, picos referentes ao  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ficaram mais visíveis, uma vez que a eletrodeposição elevou a rugosidade e, portanto, um acréscimo na área superficial, o que leva a ampliação da concentração do óxido em sua superfície.

**Figura 15 - Difratograma da amostra de Alumínio antes do processo de EDM.**



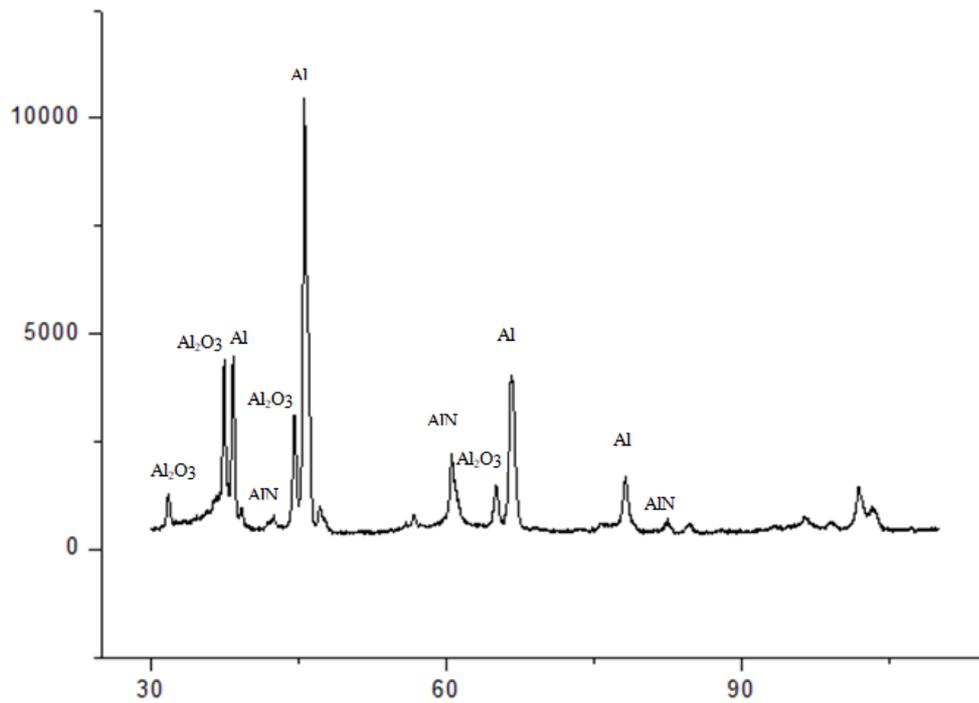
Fonte: Elaborado pelo autor

**Figura 16 - Difratoograma da amostra de alumínio após a EDM - Grafita.**



Fonte: Elaborado pelo autor

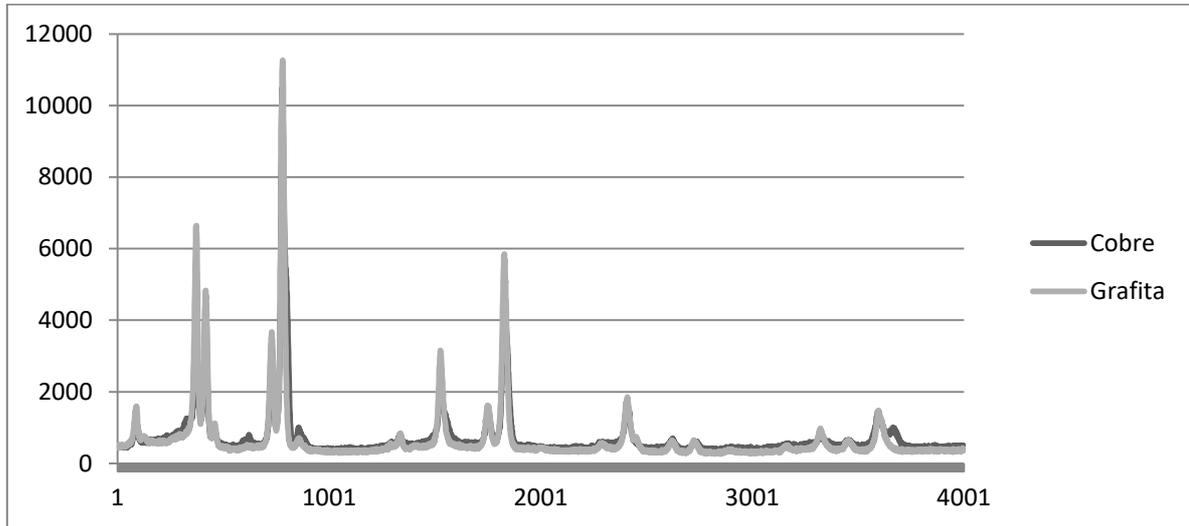
**Figura 17 - Difratoograma da amostra de alumínio após a EDM – Cobre.**



Fonte: Elaborado pelo autor

Na figura 18 é possível ver os dados das duas difrações sobrepostas, o que evidencia a grande semelhança entre os difratogramas, porém as diferenças são nítidas quando os dados são sobrepostos.

**Figure 18 - Difratogramas sobrepostos das amostras de alumínio**



Fonte: Elaborado pelo autor.

### 5.3. Microdureza Vickers

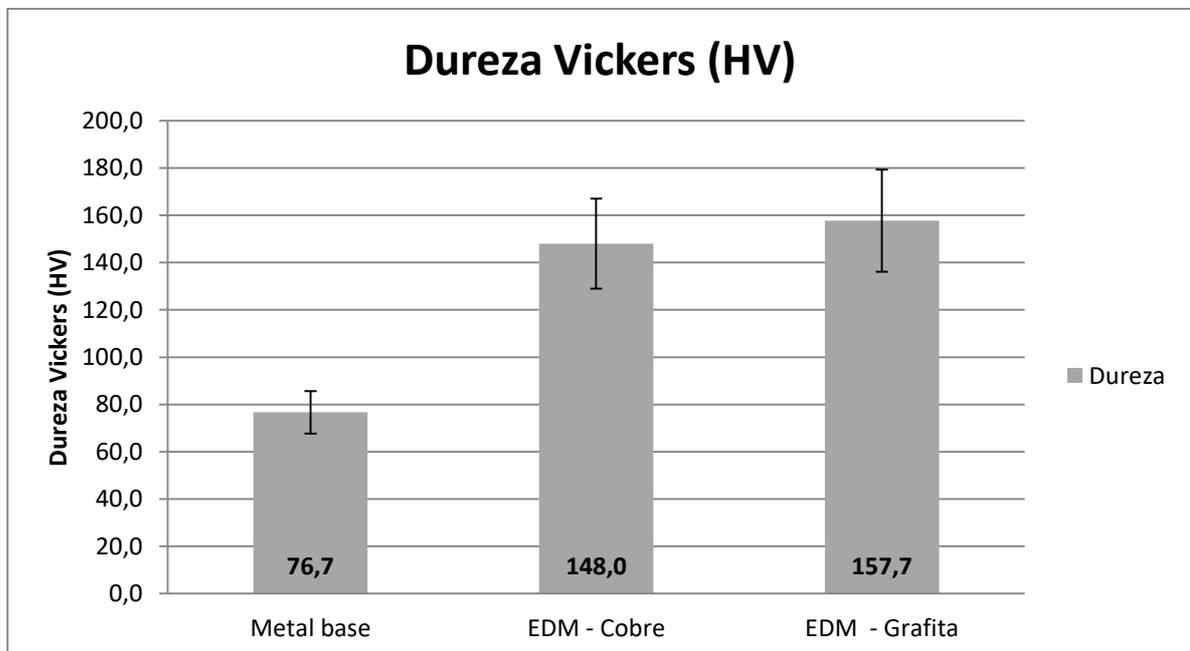
A partir da tabela 3 é possível verificar os resultados obtidos pela microdureza Vickers das amostras antes e após a nitretação com os dois diferentes tipos de eletrodo, grafita e cobre. O indentador penetrou sobre superfície superior. Os valores são correspondentes à média das durezas superficiais, o desvio padrão (DP) e a variação relativa da dureza, tendo como base de comparação o valor de dureza do metal base. No gráfico da figura 19 é possível comparar a dureza das três amostras.

**Tabela 3- Valores de dureza Vickers das amostras, variação relativa e análise do DP.**

Dureza Vickers (HV)		
Amostras	Média ± Desvio Padrão	Variação relativa
Metal base	76,67±8,97	0%
Após EDM - Grafita	157,67±21,57	106%
Após EDM - Cobre	148,00±19,00	93%

Fonte: elaborado pelo Autor

**Figura 19 - Gráfico com os valores de Dureza Vickers (HV) - Média e desvio padrão.**



Fonte: Elaborado pelo autor

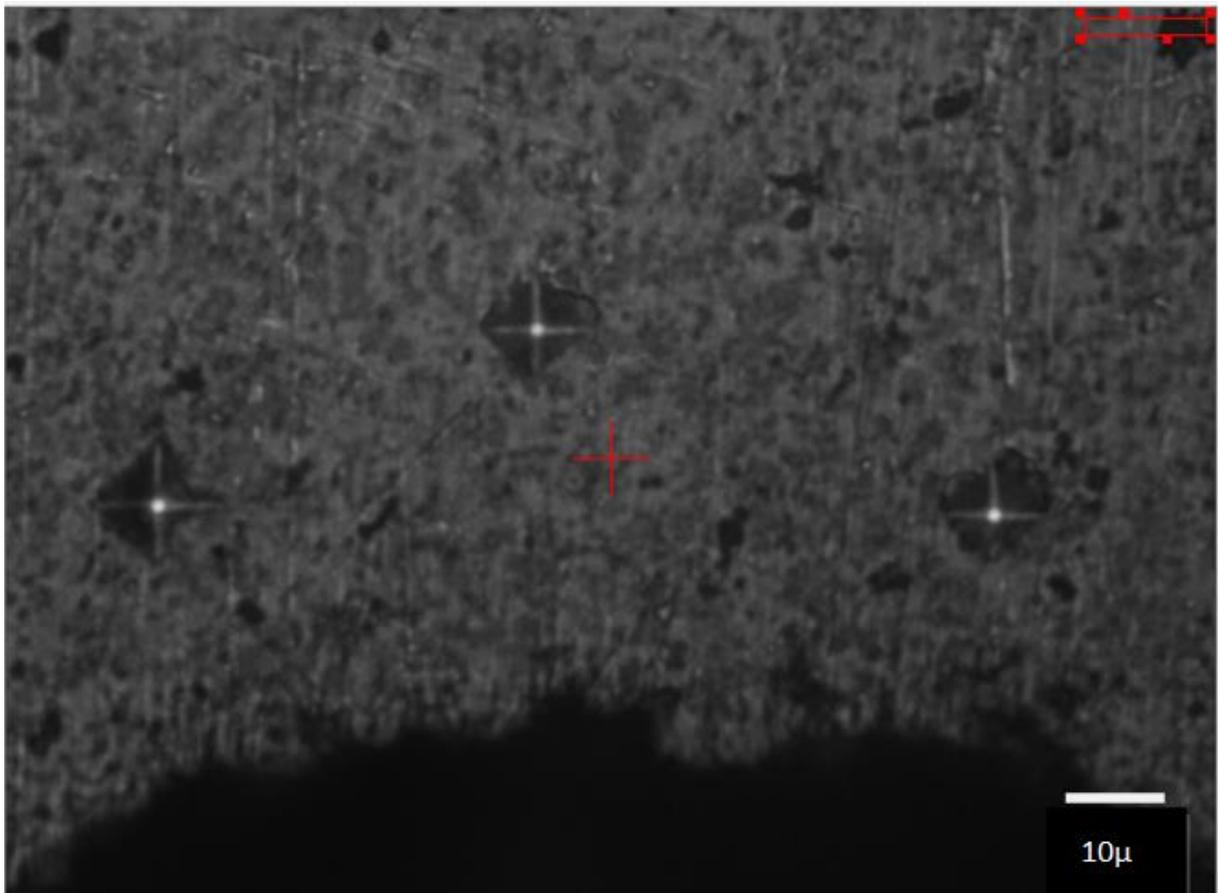
O aumento da dureza Vickers após a eletroerosão por descargas elétricas no alumínio utilizando a ureia dissolvida em água deionizada como fluido dielétrico se deve à formação de

nitretos de alumínio em sua superfície. Nota-se aumento significativo do valor de dureza, de 106% para a amostra em que o eletrodo ferramenta utilizado foi a grafita e de 93% para a amostra em que foi nitretadas utilizando o cobre, variações em relação ao valor médio do metal base.

O desvio padrão foi significativo, porém constante nas três amostras, mesmo antes da EDM. A amostra que utilizou a grafita como eletrodo ferramenta apresentou dureza Vickers mais elevada, porém um maior desvio padrão. Portanto ela foi mais heterogênea na hora de modificar a superfície do alumínio. Já amostra de cobre apresentou menor aumento na dureza Vickers, porém se mostrou mais homogênea.

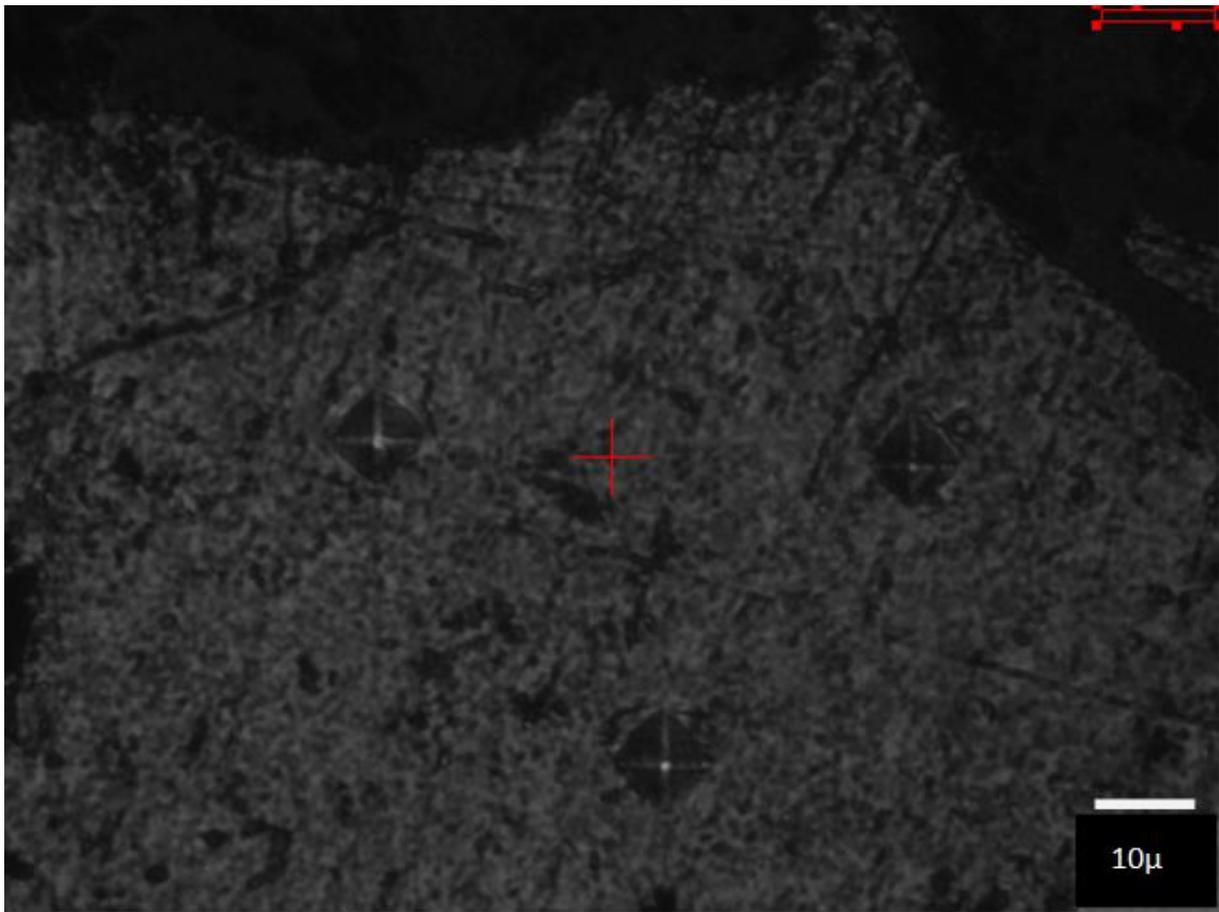
Os resultados foram obtidos após três medições nas superfícies das amostras. As figuras 20 e 21 apresentam as superfícies experimentas da pelo penetrador piramidal de 10N por 20 segundos.

**Figura 20 - Imagem ampliada das marcações do ensaio de dureza. Eletrodo: cobre**



Fonte: Elaborado pelo autor

**Figura 21 - Imagem ampliada das marcações do ensaio de dureza. Eletrodo: grafita**



Fonte: Elaborado pelo autor

#### **5.4. Avaliação do desempenho do processo de EDM**

A Taxa de Remoção de Material (TRM) do eletrodo peça, Taxa de Desgaste do eletrodo ferramenta (TD) e Desgaste Volumétrico Relativo (DVR) são mostrados na tabela 4. Os valores utilizados no cálculo foram pela comparação entre as massas antes e depois do processo de nitretação por EDM por 5 minutos.

**Tabela 4 - Valores de TRM, TD e DVR após nitretação por EDM do alumínio silício.**

<b>Eletrodo Ferramenta</b>	<b>TRM</b>	<b>TD</b>	<b>DVR</b>
Grafita	28,04±17,32	-1,49±1,68	-5,92±8,13
Cobre	26,16±7,70	-0,83±0,14	-3,25±0,55

Fonte: Elaborado pelo autor

Nota-se uma grande variação nos valores de TRM, TD e DVR levando a um elevado desvio padrão. Esses valores são atribuídos ao alto valor de corrente utilizado no experimento, uma vez que o objetivo principal era garantir a eficácia do tratamento superficial.

As variações das TRM do eletrodo peça e das TD do eletrodo ferramenta do processo utilizando o cobre foram menores do que quando se utilizou grafita.

Os sinais negativos nos resultados de TD indicam que os eletrodos ganharam massa após o processo de EDM.

Portanto, para garantir a nitretação da superfície do alumínio por eletroerosão por descargas elétricas utilizando a ureia dissolvida em água deionizada, que foi contestado, foi necessário utilizar uma alta corrente, (40 A – corrente máxima da máquina), o que gerou um elevado desgaste dos eletrodos ferramenta e peça.

## 6. CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos e do comportamento observado durante a eletroerosão do alumínio é possível concluir que:

- É possível realizar o endurecimento superficial de amostras de alumínio através da usinagem por descargas elétricas utilizando a ureia dissolvida em água deionizada como fluido dielétrico.
- É possível a utilização dos dois tipos de eletrodos ferramenta, cobre e grafita, na nitretação do alumínio.
- A formação de nitretos de alumínio acontece de maneira simultânea ao acréscimo de óxido de alumínio em sua superfície.
- As amostras que apresentaram maior ganho em dureza utilizaram o eletrodo ferramenta de grafita.
- As amostras que apresentaram modificação superficial mais homogênea utilizaram o eletrodo ferramenta de cobre.
- Quanto ao desempenho do processo de EDM, ao utilizar o eletrodo de cobre apresentou um menor desgaste volumétrico relativo.
- Ocorreu um ganho no valor de microdureza Vickers com eletrodo de cobre de aproximadamente 93% e de 106% com o eletrodo de grafita, aproximadamente.

## 7. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- ARANTES, L. J., SILVA, M. B., SILVA, E. M., & RASLAN, A. A. (Junho de 2003). **Avaliação de superfícies usinadas por diferentes fluidos dielétricos no processo de usinagem por eletroerosão.** *Rem: Rev. Esc. Minas, Ouro Preto*, v. 56, n. 2, pp. 91-96.
- BLEYS, P., KRUTH, J. P., LAUWERS, B., SCHACHT, B., BALASUBRAMANIAN, V., FROYEN, L., et al. (2006). **Surface and sub-surface quality of steel after EDM.** *ADVANCED ENGINEERING MATERIALS, N 1-2*, pp. 15-25.
- CAMARGO, B. C., COSTA, H. L., & RASLAN, A. A. (17 de Abril de 2009). **Endurecimento Superficial de uma liga de Ti6Al4V por meio de usinagem por descargas elétricas.** *V CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO.*
- CHEN, H., STOCK, H., & MAYR, P. (1994). **Plasma-assisted nitriding of aluminium.** *Surface and Coatings Technology*, pp. 139-147.
- CHEN, S. L., YAN, B., & HUANG, F. (1999). **Influence of kerosene and distilled water as dielectrics on the electric discharge machining characteristics of Ti-6Al-4V.** *Journal of Materials Processing Technology* 87, pp. 107-111.
- EBISAWA, T., & SAIKUDO, R. (1996). **Formation of aluminum nitride on aluminum surfaces by ECR nitrogen plasmas.** *Surface and Coatings Technology*, pp. 622-627.
- GREDELJ, S., GERSON, A. R., KUMAR, S., & MCINTYRE, N. S. (2002). **Plasma nitriding and in situ characterisation of aluminium.** *Applied Surface Science*, pp. 234-247.
- JAHAN, M. P., KAKAVAND, P., KWANG, E. L., RAHMAN, M., & WONG, Y. S. (Maio de 2015). **An experimental investigation into the micro-electro-discharge machining behaviour of aluminium alloy (AA 2024).** *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, pp. 1127-1139.
- KAMINSKY, P. C., & CAPUANO, M. N. (26 de Novembro de 1999). **Usinagem de microfuros pelo processo de eletroerosão por penetração em máquinas EDM.** *XV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica.*

- KÖNIG, W., KLOCKE, F., & LENZEN, R. (1996). **The Electrical Machining Processes: What Demands Will They Face in the Future.** *International Journal of Electrical Machining.v.1 n.1*, pp. 3-7.
- LÓPEZ-CALLEJAS, R., Millán-Flores, H., Muñoz-Castro, A., Valencia-Alvarado, R., Mercado-Cabrera, A., Eguiluz, R. P., et al. (2010). **Nitriding of 6061T6 aluminium by plasma immersion ion implantation at low energy.** *Progress in Organic Coatings*, pp. 142-145.
- MARTINS, P. S. (2016). **Estudo da furação em altas velocidades de corte em ligas de Al-Si utilizando brocas de aço rápido e metal duro sem e com revestimento de DLC (Diamond like carbon).** *Tese (Doutorado) - Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais*, p. 209.
- MÖLLER, W., PARASCANDOLA, S., TELBIZOVA, T., GÜNZEL, R., & RICHTER, E. (2001). **Surface processes and diffusion mechanisms of ion nitriding.** *Surface and Coatings Technolog*, pp. 73-79.
- SANTOS, R. F. (2013). **Nitreção por EDM do aço AISI4140.** *Tese (Doutorado)*. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia.
- YAN, B. H., TSAI, H. C., & Yuan, H. F. (2005). **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*, pp. 194–200.
- ZHENG, X., REN, Z., LI, X., & WANG, Y. (2012). **Microstructural characterization and mechanical properties of nitrided layers on aluminum substrate prepared by nitrogen arc.** *Applied Surface Science*, pp. 508-514.