

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

ELLIS ROBERTA DE ANDRADE SILVA

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA CORRENTE ELÉTRICA NA USINAGEM POR
ELETROEROSÃO NO NÍVEL DE TENSÕES RESIDUAIS NA SUPERFÍCIE DO
AÇO SAE P20**

BELO HORIZONTE

2020

ELLIS ROBERTA DE ANDRADE SILVA

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA CORRENTE ELÉTRICA NA USINAGEM POR
ELETROEROSÃO NO NÍVEL DE TENSÕES RESIDUAIS NA SUPERFÍCIE DO
AÇO SAE P20**

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: Dr. Carlos Eduardo dos Santos

BELO HORIZONTE

2020

ELLIS ROBERTA DE ANDRADE SILVA

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA CORRENTE ELÉTRICA NA USINAGEM POR
ELETROEROSÃO NO NÍVEL DE TENSÕES RESIDUAIS NA SUPERFÍCIE DO
AÇO SAE P20**

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 __/__/____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Carlos Eduardo dos Santos

Prof. Dr. Ernane Rodrigues da Silva

Prof. Dr. Paulo Renato Perdigão de Paiva

Dedico este trabalho primeiramente a Deus, por ser essencial em minha vida, autor de meu destino, meu guia, socorro presente na hora da angústia, a minha mãe Maria José, ao meu pai Geraldo. e a minha irmã Elaine.

AGRADECIMENTOS

Inicialmente, agradeço a Deus por ter me dado forças, me amare me guiar durante todos os percursos da minha vida, pois nos momentos de dificuldades ele sempre me amparou;

Aos meus pais sou imensamente grata por tudo, pelo amor incondicional, apoio e incentivo aos meus estudos, os quais sem os sacrifícios deles nada disso seria possível. Me proporcionaram todas as condições necessárias para que eu pudesse ingressar neste curso e concluí-lo. Vocês são meu porto seguro!

À minha irmã, Elaine, por todo o companheirismo e pela sua amizade, sempre tornando os meus dias melhores e mais leves.

Gostaria de agradecer em especial meu orientador Prof. Carlos Eduardo dos Santos pela parceria, paciência, compreensão, orientação de excelência, disponibilidade e ajuda. É graças ao seu apoio que estou concluindo este estudo; sou extremamente grata por todo o suporte.

À professora Aline Magalhães pelas dicas e conselhos para a confecção deste trabalho.

A todos os Técnicos do Departamento de Engenharia de Materiais, que sempre tiveram dispostos a ajudar.

Aos hospitais Biocor e SARAH. O primeiro por salvar a minha vida, agradeço também e à equipe de técnicos de enfermagem, enfermeiros e médicos, em especial ao Dr. Marco Túlio Azevedo Tanure e ao Dr. Igor Loureiro dos Santos, o segundo por proporcionar minha reabilitação, sem a ajuda da pedagoga Paula, das fisioterapeutas Ana Carolina e Denise, da terapeuta ocupacional Tereza, da fonoaudióloga Erika, da educadora física Anita, da médica Dra. Denise e o psicólogo Guilherme, não seria possível a conclusão desse ciclo.

Ao CEFET por ter me proporcionado oportunidades únicas, desafios, experiências e pessoas especiais.

Aos amigos que sempre estiveram ao meu lado, nos momentos mais difíceis inclusiva.

Agradeço a mim, por acreditar em mim.

E a todos que contribuíram de alguma forma para a execução e conclusão deste trabalho.

“Todas as vitórias ocultam uma abdicação”.

(Simone de Beauvoir)

RESUMO

O aço ferramenta SAE P20 é um aço com teor de carbono de cerca de 0,36% em peso, é principalmente empregado na fabricação de moldes para injeção de termoplásticos devido as suas diversas características, tais como. boa usinabilidade, boa soldabilidade, boa uniformidade de dureza e baixa deformação na têmpera. Um molde possui especificações e restrições definidas, como acabamento superficial rigoroso, devido as adversidades a que estará sujeito, exigindo que características da integridade superficial sejam compatíveis com o fato de serem constantemente solicitados a esforços, sendo através de pressões vinculadas ao processo de injeção, em relação às forças de fechamento do molde, ou ainda, à fadiga dos ciclos de injeção. Assim, para atender essas exigências, usinagens não convencionais como a eletroerosão, vem sendo amplamente aplicadas com o objetivo de se obter componentes com formas complexas, menor espessuras, e reduzir o número de operações. Porém, é inevitável o aparecimento de tensões residuais, uma vez que, há o deslocamento das discordâncias na rede cristalina. As tensões residuais são entendidas como as tensões que se conservam em um material mesmo com a inexistência de forças externas aplicadas. Possuem origem mecânica, química e/ou térmica. Podem ser benéficas, caso forem compressivas ou deletérias, caso trativas. Este trabalho propõe-se a estudar e avaliar a tensão residual gerada durante a usinagem por descargas elétricas, utilizando a técnica de caracterização de difração de raios X (DRX). Sete corpos de prova foram confeccionados, e revenidos a temperatura de 600°C durante 1:30h e resfriado no forno, objetivando o alívio de tensão oriundas do processamento de material, posteriormente usinados por eletroerosão. A amostra sem usinagem apresentou tensão residual de tração, após o processo de eletroerosão foi percebido uma mudança de estado, passando a tensões compressivas, atingindo o valor de $-631,2 \pm 125,6$ MPa, apresentando tendência de uma correlação proporcional com o aumento de corrente elétrica durante o processo.

Palavras-chave: Aço SAE P20. Moldes de injeção. Usinagem por descargas elétricas. Tensão residual. Método de difração de raios X.

ABSTRACT

SAE P20 tool steel is a steel with about 0.36% of carbon content by weight, it is mainly used in the manufacture of thermoplastic injection moulds due to its several characteristics, such as good machinability, good weldability, good hardness uniformity and low quenching deformation. A mold has defined specifications and restrictions, such as rigorous surface finishing, due to the adversities to which it will be subjected, requiring that characteristics of surface integrity are compatible with the fact that they are constantly requested to efforts, being through pressures linked to the injection process, in relation to the mold closing forces, or even to the fatigue of the injection cycles. Thus, to meet these requirements, unconventional machining such as electroerosion has been widely applied in order to obtain components with complex shapes, smaller thicknesses, and reduce the number of operations. However, it is inevitable the appearance of residual tensions, since, there is the dislocation of the disagreements in the crystalline net. The residual stresses are understood as the stresses that are conserved in a material even with the non-existence of external forces applied. They have a mechanical, chemical and/or thermal origin. They can be beneficial, if they are compressive or harmful, if they are tractive. This work aims to study and evaluate the residual voltage generated during machining by electrical discharges, using the X-ray diffraction characterization technique (XRD). Seven specimens were made and tempered at 600°C for 1:30h and cooled in the furnace, in order to relieve stress from the processing of material, later machined by electroerosion. The sample without machining showed residual tensile stress, after the electroerosion process a change of state was noticed, passing to compressive stresses, reaching the value of -631.2 ± 125.6 MPa, showing a tendency of a proportional correlation with the increase of electric current during the process.

Keywords: SAE P20 steel. Injection moulds. Machining by electrical discharges. Residual voltage. X-ray diffraction method.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Processo de eletroerosão	22
Figura 2 – Representação da remoção do material no processo de EDM	23
Figura 3 – Microscopia óptica da amostra de aço AISI D6 beneficiada, usinada por EDM em regime de acabamento. Ataque: Nital 2%	24
Figura 4 – Curva de revenimento do aço SAE P20	28
Figura 5 – Demonstração de ondas construtiva	29
Figura 6 – Demonstração de ondas destrutivas	29
Figura 7 – Efeitos de esforços uniformes (compressivo e distensivo) e não uniformes sobre a estrutura cristalina.....	30
Figura 8 – Combinação de tensões residuais e aplicadas devido ao carregamento externo.....	31
Figura 9 – Varredura do ângulo (ψ) no DRX	32
Figura 10 – Desenho esquemático das dimensões dos corpos de prova	34
Figura 11 – Eletroplus EDM-540	35
Figura 12 – Curva de revenimento	36
Figura 13 – (a): Esquema de medida de tensão por difração de raios X para $\psi=0$ (a) e $\psi>0$; (b): 1– tubo de raios X; 2,3 – raios X incidente e difratado; 4 – amostra analisada; 5 – perfil da linha de difração registrado pelo detector de raios X	37
Figura 14 – XRD – 7000 X-Ray.....	38
Figura 15 – Análise gráfica da equação.....	39
Figura 16 – Esquema da medição de tensão residual por DRX	40
Figura 17 – Equipamento Eletroplus EDM-540 em operação	42
Figura 18 – Amostras usinadas por EDM	43
Figura 19 – Curva $\text{sen}^2\psi$ versus 2θ da amostra de referência (amostra 00) para verificação do alinhamento e o respectivo valor da tensão	44
Figura 20 – Curva $\text{sen}^2\psi$ versus 2θ da amostra 01 para verificação do alinhamento e o respectivo valor da tensão.....	45
Figura 21 – Curva $\text{sen}^2\psi$ versus 2θ da amostra 02 para verificação do alinhamento e o respectivo valor da tensão.....	46
Figura 22 – Curva $\text{sen}^2\psi$ versus 2θ da amostra 03 para verificação do alinhamento e o respectivo valor da tensão.....	47
Figura 23 – Curva $\text{sen}^2\psi$ versus 2θ da amostra 04 para verificação do alinhamento e o respectivo valor da tensão.....	48

Figura 24 – Curva $\text{sen}2\psi$ versus 2θ da amostra 05 para verificação do alinhamento e o respectivo valor da tensão.....	49
Figura 25 – Curva $\text{sen}2\psi$ versus 2θ da amostra 06 para verificação do alinhamento e o respectivo valor da tensão.....	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química do aço SAE P20 (em porcentagem).....	33
Tabela 2 – Principais características do aço SAE P20.	33
Tabela 3 – Parâmetros do ensaio de EDM	35
Tabela 4 – Parâmetros do ensaio de DRX. (continua)	38
Tabela 4 – Parâmetros do ensaio de DRX. (continuação).....	39

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 01	39
Equação 02	39
Equação 03	40
Equação 04	40
Equação 05	40

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASTM : *American Society for Testing and Material*

DRX : *Difração de raios X*

DT : *Duty time*

EDM : *Electrical Discharge Machining*

EUA : *Estados Unidos da América*

SAE : *Society of Automotive Engineers*

ZAC : *Zona Afetada pelo Calor*

ZR : *Zona Refundida*

LISTA DE SÍMBOLOS

%	: <i>Por cento</i>
±	: <i>Mais ou menos</i>
×	: <i>Multiplicação</i>
°	: <i>Graus</i>
°C	: <i>Graus Celsius</i>
A	: <i>Ampère</i>
ap	: <i>Profundidade</i>
C	: <i>Carbono</i>
cos	: <i>Cosseno</i>
Cr	: <i>Cromo</i>
CrK α	: <i>Radiação</i>
d ₀	: <i>Distância interplanar livre de tensão</i>
d ψ	: <i>Distância entre os planos difratores inclinados</i>
E	: <i>Energia de descarga</i>
E	: <i>Módulo de elasticidade específico do material</i>
Fe- α	: <i>Ferro alfa/Ferrita</i>
Fe- γ	: <i>Ferro gama/Austenita</i>
h	: <i>Horas</i>
HV	: <i>Dureza Vickers</i>
kHz	: <i>Quilohertz</i>
kV	: <i>Quilovolts</i>
mA	: <i>Miliampère</i>
mm	: <i>Milímetro</i>
Mn	: <i>Manganês</i>
Mo	: <i>Molibdênio</i>
MPa	: <i>Mega Pascal</i>
sen	: <i>Seno</i>
Si	: <i>Silício</i>
T _{OFF}	: <i>Tempo de onda desligado</i>

T_{ON}	: <i>Tempo de onda ligado</i>
T_S	: <i>Fator correspondente da corrente elétrica</i>
U	: <i>Tensão de trabalho</i>
V	: <i>Volts</i>
ε	: <i>Epsilon - Deformação</i>
θ	: <i>Theta - Ângulo rotação da amostra</i>
σ	: <i>Sigma</i>
σ_ϕ	: <i>Tensão na direção ϕ</i>
ν	: <i>Coefficiente de Poisson específico do material</i>
ϕ	: <i>Phi</i>
ψ	: <i>Psi - Ângulo de inclinação da amostra</i>

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	17
2. OBJETIVOS	19
2.1. Objetivo Geral	19
2.2. Objetivos Específicos	19
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
3.1. Usinagem por Descargas Elétricas	20
3.1.1. Parâmetros do processo de Eletroerosão.....	24
3.2. Aço SAE P20: características e aplicações.....	27
3.3. Tratamento térmico do aço SAE P20	27
3.4. Difração de Raios X (DRX)	28
3.5. Tensões Residuais.....	30
3.5.1. Tensão Residual por Difração de Raios X (DRX).....	31
4. MATERIAIS E MÉTODOS	33
4.1. Materiais	33
4.1.1. Material utilizado para os corpos de prova	33
4.1.2. Material do eletrodo	33
4.2. Usinagem dos corpos de prova	34
4.3. Equipamento de Usinagem por Descargas Elétricas	34
4.4. Tratamento Térmico	35
4.5. Ensaio de Difração de Raios X (DRX).....	36
4.5.1. Tensão residual por Difração de Raios X (DRX)	36
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	42
5.1. Usinagem por descargas elétricas	42
5.2. Difração por raios X	43
6. CONCLUSÃO	51
7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	52
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	53

1. INTRODUÇÃO

O aço ferramenta SAE P20, possui teor de carbono de, aproximadamente, 0,36% possui também, em sua composição, elementos de liga com cromo, molibdênio e manganês, conferindo a esse aço uma boa usinabilidade, tanto no estado recozido como beneficiado, boa soldabilidade e boa uniformidade de dureza, além de excelente polibilidade e boa reprodutibilidade de desempenho (GGDMETALS, 2018).

Na atualidade, os aços da família do aço SAE P20, os mais utilizados na fabricação de moldes de injeção de termoplásticos, ganharam mercado há cerca de sessenta anos nos EUA e são oriundos de uma classe de aços para construção mecânica, conhecido como SAE 4135 (COSTA E SILVA; MEI, 1988).

Com especificações e restrições definidas, um molde de injeção é um artigo que abrange uma grande gama tecnológica, em razão das diversas condições de curtos prazo de abastecimento (SALVADOR; COSTA, 2007). Por possuírem geometria complexas, os moldes, necessitam de uma conformação mecânica mais severa e com certa complexidade. Por sua vez, essa conformação mecânica leva a uma permanente deformação (objetivada), a chamada deformação plástica.

De acordo com Baretta (2007), o molde de injeção trata-se de uma ferramenta de alta complexidade, composto por diversas partes que são responsáveis por conferir a geometria conforme desejada ao polímero que se encontra em fluxo livre, e que em dado momento do processamento, é injetado em seu interior, posteriormente o resfria para que assim, se extraia o produto montado.

A ocorrência de deformação plástica desencadeia o deslizamento dos grãos. Tal ocorrência leva a formação de tensões de naturezas trativas ou compressivas. Como consequência, pode ocorrer a elevação da dureza, porém isso nem sempre é favorável, dado que, pode comprometer o desempenho deste componente por meio de pequenas trincas no interior dele. O fato da existência do termo “tensão residual” é um indício da existência de uma tensão após cessar as forças externas aplicadas (KLUG; ALEXAND, 1974). As tensões residuais podem exercer um papel benéfico ou deletério, conforme sua magnitude, sinal e distribuição (SOUSA, 2012).

Embora que, os estudos em torno dos efeitos das tensões residuais terem iniciado há mais de um século, foi no fim dos anos 30, com o desenvolvimento das tecnologias de medição

da difração de raios X e extensômetros, é que se obteve melhores resultados da avaliação dos efeitos das tensões residuais, apesar da baixa monitoração das mesmas, na prática. Se tratando de fabricação de componentes manufaturados, esse monitoramento é de grande relevância, levando em consideração, o fato de que, a tensão residual pode induzir a falhas prematuras, causando distorções e/ou pequenas trincas na superfície da peça. Por outro lado, a tensão residual compressiva poderá melhorar as propriedades de um material (NOYAN, I.C.; COHEN, 1987).

Se trata de uma colossal adversidade para engenheiros de todo o mundo, a fabricação de novas peças metálicas sem perder as propriedades mecânicas da matéria-prima após a submissão à processamentos como a conformação mecânica, pois que, essa altera de forma permanente as propriedades originais, e conseqüentemente, conferindo tensões residuais ao mesmo. Tensões residuais são prontamente inseridas, mas, a recíproca para o alívio ou redistribuição delas, não é verdadeira (TURIBUS, 2014).

A usinagem por descargas elétricas - EDM surgiu como um processo alternativo aos de usinagem convencional, com a principal característica a capacidade de produzir peças de geometrias complexas e de alto grau de precisão em materiais de difícil usinabilidade. Porém tensões residuais, são geradas. A EDM é um processo amplamente empregado e diversas pesquisas são realizadas com o intuito de se obter melhorias e integração de processos industriais.

Sendo assim, este trabalho visa analisar as tensões residuais geradas pela usinagem por descargas elétricas, através de análise de difração de raios X, utilizando uma técnica correntemente utilizada, o método $\sin^2\psi$. Uma vez que, as tensões trativas podem levar a diminuição do tempo de vida em fadiga, tendo em vista que causam uma aceleração da taxa de crescimento de trincas, tornando o material mais vulnerável à corrosão sob tensão. Também podem provocar a iniciação precoce de trincas e sua propagação que pode levar à ocorrência de falhas da peça e/ou equipamento. Já a tensão residual compressiva, considerada benéfica, pode retardar o índice de propagação de trincas por fadiga na microestrutura cristalina. Assim, o estudo das tensões residuais geradas pela usinagem por descargas elétricas, possuem grande valia, quando a vida útil de um molde é levada em consideração.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Avaliar de forma experimental as tensões residuais oriundas do processo de eletroerosão em aço ferramenta SAE P20 por meio de difração de raios X (DRX).

2.2. Objetivos Específicos

- Compreender se a intensidade de corrente elétrica influencia as tensões residuais na superfície usinada;
- Avaliar as de tensões residuais através da difração de raios X (DRX). Para isso, houve uma preparação dos corpos de prova, com corte, fresagem, revenimento e sequencialmente, a usinagem por EDM.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Na presente revisão bibliográfica, foi tratado os principais assuntos do trabalho: usinagem por descargas elétricas (EDM), tensão residual por DRX, características e aplicações do aço SAE P20 e tratamento térmico para este aço.

3.1. Usinagem por Descargas Elétricas

A princípio, a erosão de metais em virtude das descargas elétricas foi investigada por Sir Joseph Priestley, cientista britânico, em 1768. Já na década de 40, mais especificamente em 1943, B. R. Lazarenko e N. I. Lazarenko, um casal russo, que ao analisarem o desgaste de contatos de interruptores inferiram que as descargas elétricas seriam capazes de serem aplicadas com a finalidade de usinar metais que apresentavam a dificuldade em utilizar os métodos convencionais (MCGEOUGH, 1988).

O casal de cientistas foi nomeado pelo governo soviético nomeou para desvendar o desgaste gerado entre os contatos elétricos de tungstênio, um grande obstáculo para manutenção dos motores automotivos no decorrer da Segunda Guerra Mundial. Os investigadores observaram que ao introduzir os eletrodos em óleo, as fagulhas eram mais homogêneas e calculáveis do que ao ar (PANDEY; SINGH, 2010).

Foram os responsáveis pela criação do sistema renomado como circuito Lazarenko, que consiste na submersão da peça e ferramenta em um fluido dielétrico no interior de uma espécie de cuba de trabalho, conectadas a resistores e capacitores carregados por uma fonte de corrente contínua (JAMESON, 2001).

Esses investigadores russos elaboraram ao longo da guerra, as primeiras máquinas de EDM, que foram muito benéficas na usinagem de materiais de alta dureza, como o tungstênio e seus carbonetos (PANDEY; SINGH, 2010).

Nos anos 50, evoluções ocorreram no âmbito da compreensão do fenômeno entorno da eletroerosão, assim, se deu início a fabricação, em larga escala, de máquinas de EDM, porém, devido à baixa qualidade de componentes eletrônicos, o maquinário não era capaz de se desempenhar com êxito, tornando a utilização limitada. Na década posterior, um imenso estudo do tema, fez com que das máquinas de EDM se modernizassem, de modo a atingir respostas aos diversos problemas relacionados à modelagem matemática e o aperfeiçoamento de

servocontroladores. Com isso, a produção de máquinas de EDM obteve consideráveis melhorias em seu desempenho (PANDEY; SINGH, 2010 e ABBAS et al, 2007).

Em virtude da evolução tecnológica ocorrida a partir de 1970, foi possível a criação da tecnologia a fio que aperfeiçoou as máquinas e aprimorou a descarga elétrica, em decorrência dos potentes geradores, desenvolvimento de novos eletrodos-ferramenta a fio (EL-HOFY, 2005). Na década de 1980, o fabrico a partir de micro usinagens ganhou maiores proporções, o que fez com que a partir desse momento, o mercado mundial, viu a necessidade de avançar nas pesquisas relacionadas ao processo de EDM (PANDEY; SINGH, 2010). Com isso, ocorreu um grande avanço da eletroerosão, o que tornou o processo mais rápido e mais barato. Com o avanço tecnológico, a velocidade atingiu um aumento em 20 vezes, o que propiciou uma significativa redução do custo de produção em pelo menos 30% (EL-HOFY, 2005).

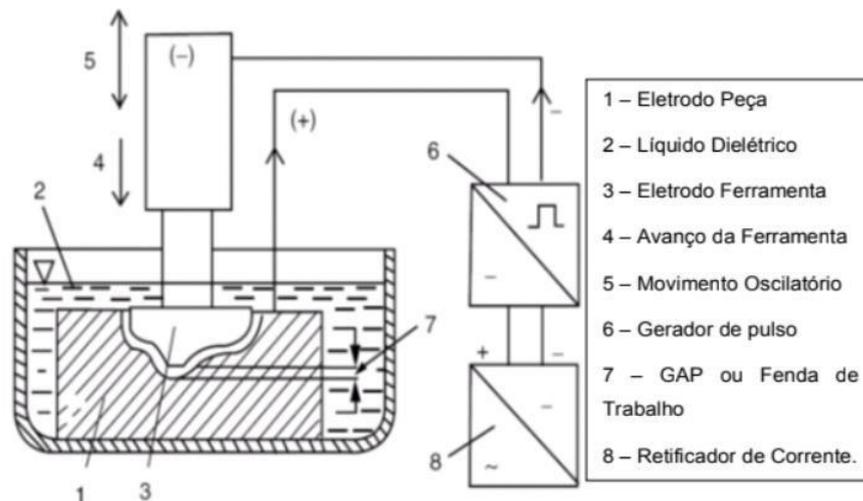
A usinagem por descargas elétricas (EDM – *Electrical Discharge Machining*), também chamada de eletroerosão, se caracteriza por ser um processo não convencional de usinagem que despertou o interesse em indústrias de transformação diante a crescente necessidade de fabricação de componentes com formas complexas, menor espessuras, e por reduzir o número de operações, pois esta proporciona trabalhar com uma maior gama de materiais, sem grandes limitações e ainda assim, permite alcançar maiores precisões dimensionais, algo mais difícil de alcançar a partir de processos convencionais, como por exemplo a fresagem e o torneamento. Estas vantagens fazem da EDM um processo competitivo em muitas indústrias, a título de exemplo, na fabricação de moldes para injeção e matrizes para extrusão de termoplásticos. A eletroerosão consiste em uma produção de milhares de descargas elétricas, em fração de segundos, com o intuito de retirar material da peça.

Segundo McGeough (1988), a usinagem por descargas elétricas, em síntese, é remoção de material mediante a fusão estimulada por descargas elétricas intermitentes entre um eletrodo (ferramenta) e a superfície a ser usinada. Apesar do procedimento ser de origem elétrica (descargas elétricas) a remoção é exclusivamente térmica. O processo de remoção de maneira geral, é realizado submerso à um líquido não condutor de eletricidade (dielétrico). Encontra-se uma diversificada gama de fluidos dielétricos disponíveis no mercado. Entretanto, diversos estudos em torno desse tema, apontaram que para o processo de eletroerosão por penetração, a melhor escolha são os óleos de hidrocarbonetos. Visto que são facilmente encontrados, além de possuem propriedades, como o fato de não perderem as suas características dielétricas ao longo do processo, mesmo quando são ionizados e sujeitos à presença de detritos. Permitindo assim, estabelecer um ambiente controlado sob a região envolvente da descarga (SABBO, 2017).

Um encadeamento de pulsos elétricos de intensidade de 80V a 120V e frequência na ordem de 5kHz, é empregada entre os eletrodos que estão distanciados a um intervalo de 0,01-0,5mm, intitulado *gap*. Este *gap* também nomeado de fenda de trabalho, é essencial para que o processo seja alcançado com êxito (EL-HOFY, 2005).

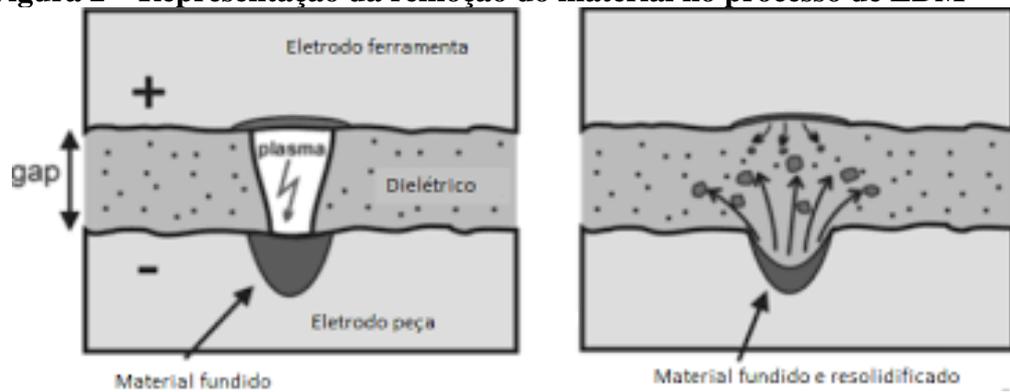
O processo desenvolve-se com o conjunto eletrodo-peça imerso em um líquido dielétrico, onde a remoção de material é conseguida através de descargas controladas de curta duração (medidas em microsegundos) na “folga” desse mesmo conjunto. A peça é normalmente ligada ao polo negativo (funcionando como cátodo) e o eletrodo ao polo positivo de uma fonte de corrente contínua (funcionando como ânodo), assim como ilustrado na figura 1. A descarga elétrica só ocorre quando o eletrodo se encontra a uma distância relativamente curta da peça. A remoção do material ocorre pela sua fusão e subsequente vaporização, ocasionando a formação uma depressão sob a face da peça análogo ao ilustrado na figura 2. Os detritos provenientes da remoção, são arrastados pelo líquido dielétrico da zona de trabalho. Após a remoção de material pretendida, a descarga elétrica é interrompida, o eletrodo se levanta novamente, dando-se início a um novo ciclo (EL-HOFY, 2005).

Figura 1 – Processo de eletroerosão



FONTE: SANTOS, 2010.

Figura 2 – Representação da remoção do material no processo de EDM

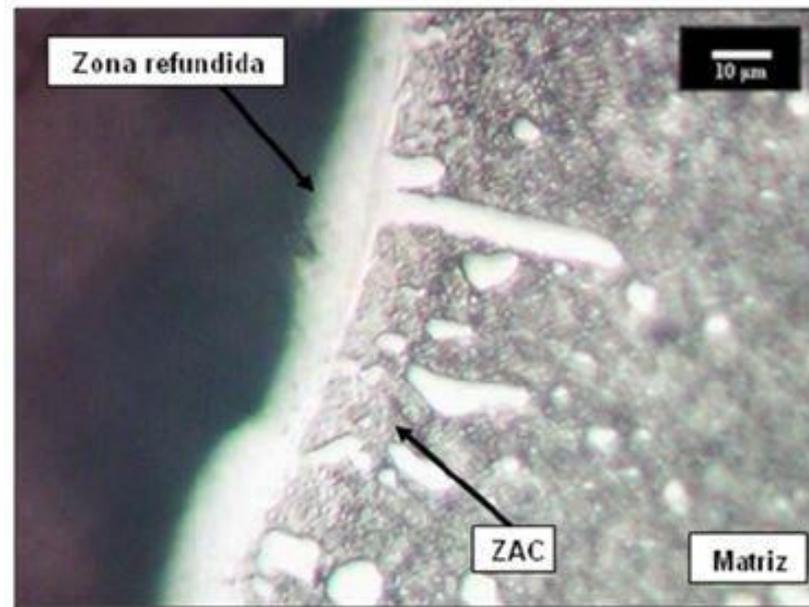


FONTE: BLEYS, et al., 2006.

De acordo com Bleys et al. (2006), modificações estruturais e de composição química são geradas em camadas do eletrodo e da peça, em virtude de que, o processo é predominantemente de remoção térmica. O líquido dielétrico possui a função de limpeza e refrigeração dos resíduos desprendidos da peça e eletrodo, entretanto, existem partículas remanescentes, que acabam solidificando na própria cratera, ganhando o nome de “zona refundida”, uma subcamada ressolidificada também conhecida como camada branca ou *white layer*.

A figura 3 apresenta além da zona refundida (ZR) e do metal de base (matriz), a ZAC – zona afetada pelo calor. Como o próprio nome já sugere, esta região é parcialmente afetada pela alta temperatura que o processo de eletroerosão atinge, isso porque apesar das temperaturas serem altas, não são o suficiente para a fusão do metal, porém são o suficientemente altas para levar a mudanças estruturais e da composição química, esta mudança na composição química se deve ao processo difusão atômica em que ocorre a migração dos átomos das regiões mais concentradas para as de baixa concentração (PANDEY; SINGH, 2010).

Figura 3 – Microscopia óptica da amostra de aço AISI D6 beneficiada, usinada por EDM em regime de acabamento. Ataque: Nital 2%



FONTE: SANTOS, R. F., 2007.

3.1.1. Parâmetros do processo de Eletroerosão

As propriedades físicas dos materiais do eletrodo e da peça, assim como o meio dielétrico e a maneira que o operador manuseia o equipamento, alguns parâmetros de essencial importância tais como: corrente de descarga, polaridade e tempo de descarga. Uma melhor qualidade de acabamento e estrutural está intimamente ligada a escolha adequada do material do eletrodo e dos parâmetros (KLOCKE; KÖNIG, 2007).

Alguns parâmetros de entrada são descritos a seguir:

a) *Gap* ou fenda de trabalho:

Trata-se do intervalo entre o eletrodo e a peça, no qual há a produção da centelha. Uma distância maior, resulta em um menor tempo de usinagem, porém a rugosidade é maior (SANTOS, 2010).

b) Tempo de onda ligado (T_{ON}):

Situando-se no intervalo de alguns microssegundos e alguns milissegundos, é o tempo de duração da energia elétrica da centelha, e este valor é inserido diretamente na máquina (BENEDICT, 1987).

Um maior rendimento se dá a partir de um maior tempo de onda ligado (pulsos de longa duração), pois ocorrerá uma maior taxa de remoção do material, mas com isso, a rugosidade é

elevada, comprometendo o acabamento superficial. Nesta situação há um desgaste maior da peça do que do eletrodo. Em pulsos de curta duração há um maior trânsito de partículas negativas do que de partículas positivas. Quanto mais partículas de um determinado tipo fluírem na direção do eletrodo ou peça, é mais intenso o calor gerado, e maior a quantidade de material removido. Avaliando os pulsos de longa duração, o movimento das partículas negativas e positivas é o mesmo, porém devido à maior massa das partículas positivas, a quantidade de material removido será superior (BARCHEKY, BYMARA; AMORIM – ENGEMAC, 1988).

c) Tempo de onda desligado (T_{OFF}):

Tempo de pausa que ocorre a interrupção da descarga elétrica. É o tempo necessário para a estabilização do ambiente no *gap*, incluído o tempo de explosão da bolha de gases, após o tempo de corrente ligada. Não influencia o desgaste do eletrodo, uma vez que este ocorre devido à energia disponibilizada apenas durante o tempo de onda ligada (SABBO, 2017).

d) Corrente de descarga:

Sendo o fator que mais influencia a textura superficial gerada (KUMAR et al, 2009), com seu aumento nota-se um progressivo crescimento da taxa de remoção do material. Utilizando-se eletrodos de cobre observa-se que um aumento da corrente propicia um aumento do desgaste relativo (relação entre a taxa de desgaste da ferramenta e a taxa de remoção de material da peça). Uma diminuição da corrente de descarga faz com que o *gap* diminua e proporciona um melhor acabamento superficial. É aconselhável que para operações de desbaste utilize-se altas correntes no intuito de se obter uma maior remoção de material, mas com aumento na rugosidade. Já para o acabamento, diminui-se a corrente reduzindo-se a rugosidade e a taxa de remoção (KLOCKE e KÖNIG, 2007). A corrente utilizada no processo de eletroerosão deve ser contínua. Na corrente alternada, a intensidade da corrente é variável, gerando inversões de polaridade (o mesmo polo em um momento é positivo, sequentemente é negativo). No processo de eletroerosão, isso poderia levar a um desgaste maior da ferramenta do que da peça (SABO, 2008). Deve-se salientar que a influência da energia de descarga (corrente) sobre a taxa de remoção permite determinar diretamente a dependência da rugosidade em função da corrente.

e) Tempo de descargas sucessivas:

As descargas sucessivas ao longo de toda a superfície do eletrodo fazem a usinagem da peça. O tempo de descargas sucessivas significa o tempo durante o qual as descargas são disparadas sem que o eletrodo retroceda, seguido pelo tempo de retração, que é o tempo que o

eletrodo retrocede, portanto, não disparando faíscas (SANTOS, 2010). A frequência das descargas pode chegar até 200.000 ciclos por segundo.

f) Polaridade:

A escolha da polaridade adequada é imprescindível para um bom rendimento no processo de usinagem por descargas elétricas, a contínua troca de posição entre partículas positivas e negativas entre eletrodo e peça ocasiona um fluxo de corrente através do canal de descarga, gerando calor suficiente para provocar a fusão do material (BARCHEKY, BYMARA; AMORIM – ENGEMAC, 1988). A polaridade tem alta influência sobre o desgaste e a taxa de remoção. Para tempos de descarga longos a ferramenta é mantida com polaridade positiva, com o intuito de garantir um bom comportamento dos valores de erosão (KLOCKE; KÖNIG, 2007). A polaridade negativa só faz sentido para tempos de descarga curtos ou para certos materiais como o metal duro ou titânio (KLOCKE; KÖNIG, 2007). Em processos de eletroerosão por penetração, a polaridade do eletrodo é normalmente positiva, o que previne o desgaste no eletrodo e diminui a velocidade de usinagem.

g) Tensão de trabalho (U):

Como a tensão de descarga é variável no tempo, utiliza-se então, uma tensão média que é a tensão de trabalho. Para uma tensão de trabalho muito pequena, observa-se descargas falhas e curtos-circuitos, devido ao *gap* muito pequeno. Disto resultam taxas de remoção pequenas e desgaste relativo elevado. Deve-se tomar cuidado quando se aumenta sucessivamente a tensão de trabalho. isto levará a tempos de retração muito longos devido ao aumento demasiado do *gap* (KLOCKE e KÖNIG,2007).

h) Duty Time (DT) ou Relação de contato:

É uma relação entre o tempo de onda ligado e o tempo total do pulso (ou ciclo de uma faísca). Um DT pequeno significa um mau aproveitamento da energia disponível na unidade de tempo e com isto, uma redução da taxa de remoção. Portanto o Duty Time deve ser escolhido de tal forma que se garanta uma deionização suficiente do canal de descarga e se garanta a estabilidade do processo (KLOCKE e KÖNIG,2007).

i) Energia de Descarga (E):

O que caracteriza e eficiência do processo é a potência elétrica: $P = V.I$ (Tensão x Corrente) e a duração do pulso elétrico. Para altas energias de descarga observa-se um aumento da taxa de remoção de material e da rugosidade.

3.2. Aço SAE P20: características e aplicações

O aço SAE P20 é um aço ferramenta sendo um dos mais aplicados para a confecção de moldes para injeção e matrizes para extrusão para termoplásticos não clorados e moldes para sopro. Esse aço possui boa usinabilidade, propriedade observada tanto no estado recozido como no beneficiado. Além disso possui boa soldabilidade e boa uniformidade de dureza. Desenvolvido para apresentar elevada polibilidade e boa reprodutibilidade de desempenho, possui também baixa deformação na têmpera ou no endurecimento por precipitação (GGDMETALS, 2018).

3.3. Tratamento térmico do aço SAE P20

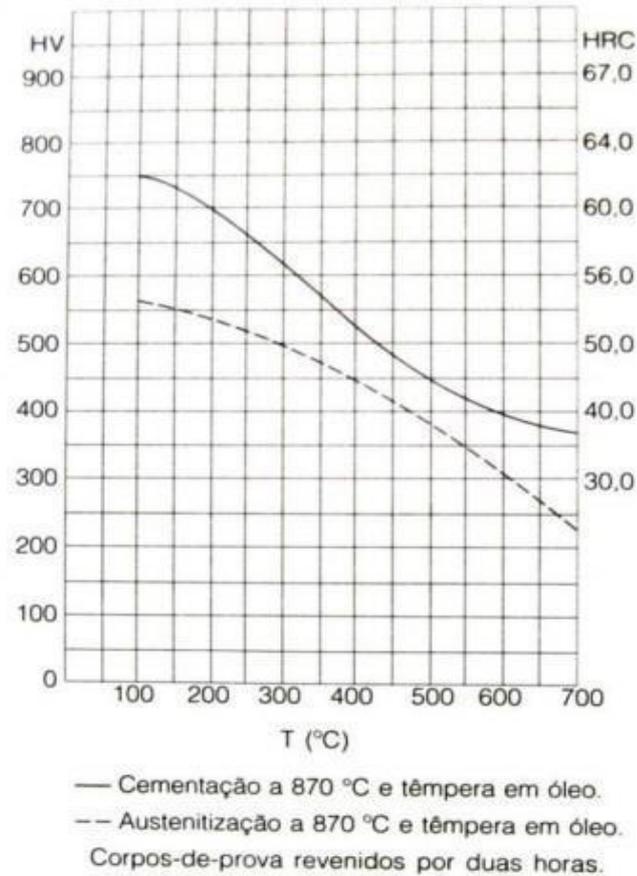
Constituídos por sequência de aquecimento e resfriamento, os tratamentos térmicos, atuam na transformação alotrópica da ferrita ($Fe-\alpha$) em austenita ($Fe-\gamma$), além da solubilização do carbono e elementos de liga em tais fases. De maneira a atingir a melhor associação entre as diversas propriedades dos aços, o controle das modificações microestruturais é fundamental nos tratamentos térmicos (SILVA; MEI, 2006).

Tratando-se da fabricação de moldes, para alcançar as propriedades mecânicas finais, se faz necessário o uso de tratamentos térmicos, sendo habitual os tratamentos de têmpera e revenido, que certificam ao aço a dureza adequada à maioria das aplicações (MESQUITA; BARBOSA, 2007).

Utilizando a eletroerosão na confecção do molde, se faz necessário a submissão do mesmo a um novo revenimento, com o objetivo de minimizar as altas tensões residuais de tração. A superfície imperfeita e rugosa deixada pela eletroerosão deve ser inteiramente desbastada (PRIES et al, 2005).

Para o aço SAE P20, o tratamento térmico se dará em até três etapas, alívio de tensões têmpera e revenimento. A figura 4 mostra a curva de revenimento do aço SAE P20. Devido à alta temperabilidade destes aços, a dureza da superfície e do núcleo são semelhantes (SILVA; MEI, 2006).

Figura 4 – Curva de revenimento do aço SAE P20

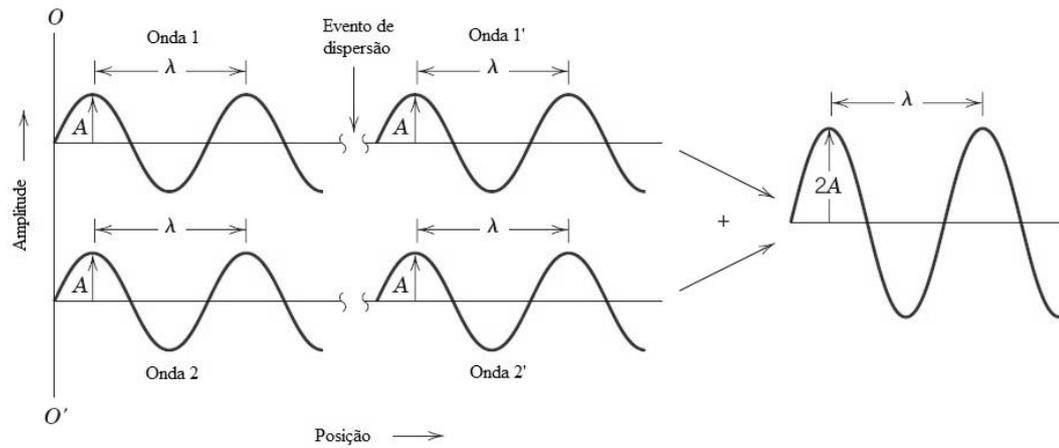


FONTE: SILVA; MEI, 2006.

3.4. Difração de Raios X (DRX)

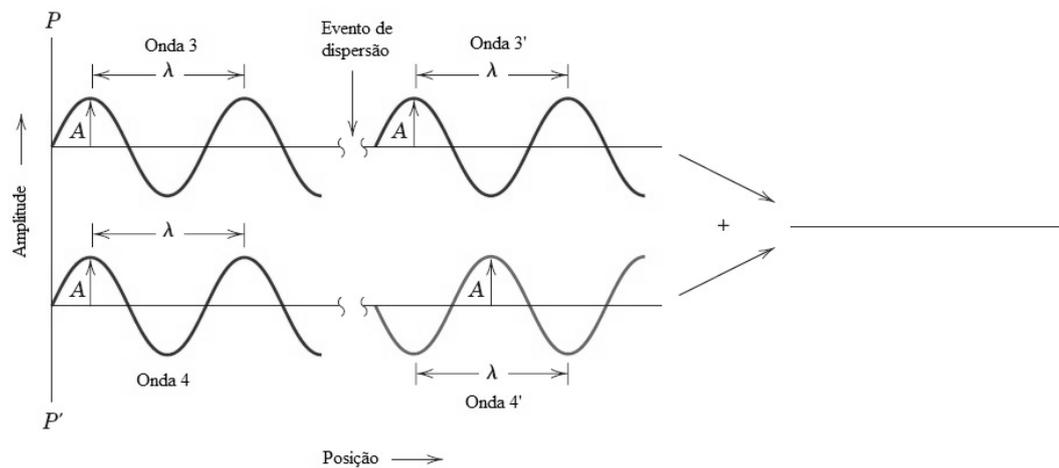
A ocorrência do desvio de um feixe de raio X ao passa por uma barreira ou uma pequena abertura, é o que caracteriza o fenômeno da difração. A transmissão de energia desses raios se dá através de comprimentos de ondas, podendo ser somados ou anulados quando duas ondas de mesmo comprimento se encontram. A interferência construtiva (aquela em que ocorre um aumento da amplitude da onda resultante), é representada na figura 5. Já na figura 6, a representação é de uma interferência destrutiva, onde ocorre a anulação dessas ondas (CALLISTER, 2008).

Figura 5 – Demonstração de ondas construtiva



FONTE: CALLISTER (2008, p. 50).

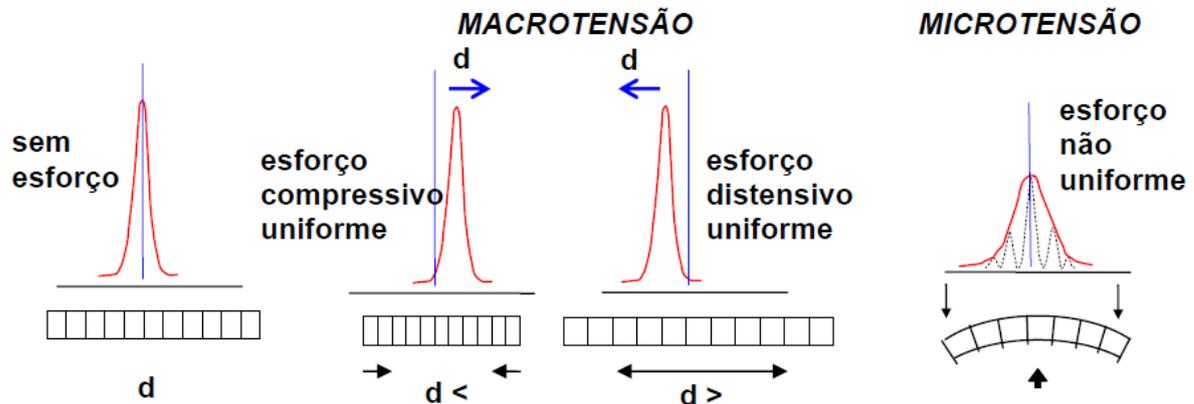
Figura 6 – Demonstração de ondas destrutivas



FONTE: CALLISTER (2008, p. 50).

A figura 7 ilustra a variação da posição do pico em função da tensão residual atribuída ao material, segundo Sousa (2012), resalta-se que na varredura de DRX foi analisado a macrotensão na ferrita, posicionada em 2θ no ângulo de $156,1^\circ$. A tensão residual de tração desloca a curva para a direita, elevando a posição angular do pico, e reduzindo quando a tensão é trativa.

Figura 7 – Efeitos de esforços uniformes (compressivo e distensivo) e não uniformes sobre a estrutura cristalina



FONTE: SOUSA, 2012.

3.5. Tensões Residuais

Tensões residuais são habitualmente identificadas como as tensões internas, auto equilibradas, que persistem no material, elementos mecânicos e peças acabadas, mesmo quando não mais sob influência térmica ou mecânica. Os mecanismos geradores dessas tensões são de origem mecânica, química e/ou térmica. Quanto aos seus efeitos nos componentes, podem ser benéficas ou maléficas. Se forem compressivas, serão do primeiro caso, o segundo tipo trata-se de tensões residuais trativas (MACHERAUCH, 1987).

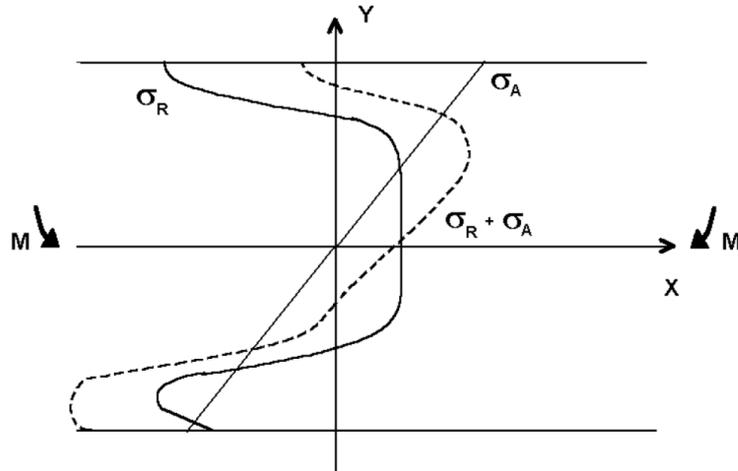
Facilmente introduzidas, porém difíceis de serem aliviadas ou redistribuídas, as tensões residuais geram grandes preocupações os projetistas de todos os projetos de engenharia. Normalmente caros, incompletos e de risco, estes processos de alívio de tensões, podem provocar deformações não desejadas nos componentes. Como alternativa, as tensões residuais podem ser habitualmente, inseridas propositamente nas peças, tendo como propósito os seus aspectos positivos, tal como a introdução de tensões compressivas (TURIBUS, 2014).

As tensões residuais influenciam diretamente na vida útil dos componentes mecânicos principalmente quando submetidos a carregamentos cíclicos, por isso é de grande importância conhecê-las. Estas somam-se algebricamente com as tensões aplicadas no regime elástico, conforme observado na figura 8, o que gera uma grande influência de maneira significativa, nas características mecânicas e físicas do material, tendo potencial de levar a ruptura imatura e abrupta do componente (CINDRA FONSECA, 2000).

Desta maneira, enquanto as tensões residuais de compressão na superfície da peça são geralmente benéficas (retardam a nucleação e propagação de trincas, e a corrosão sob tensão),

as tensões residuais trativas na superfície da peça são indesejáveis, uma vez que, são a principal razão de falhas por fadiga e corrosão, quando esta peça se encontra sob tensão (KANDIL et al, 2001).

Figura 8 – Combinação de tensões residuais e aplicadas devido ao carregamento externo



FONTE: CINDRA FONSECA, 2000.

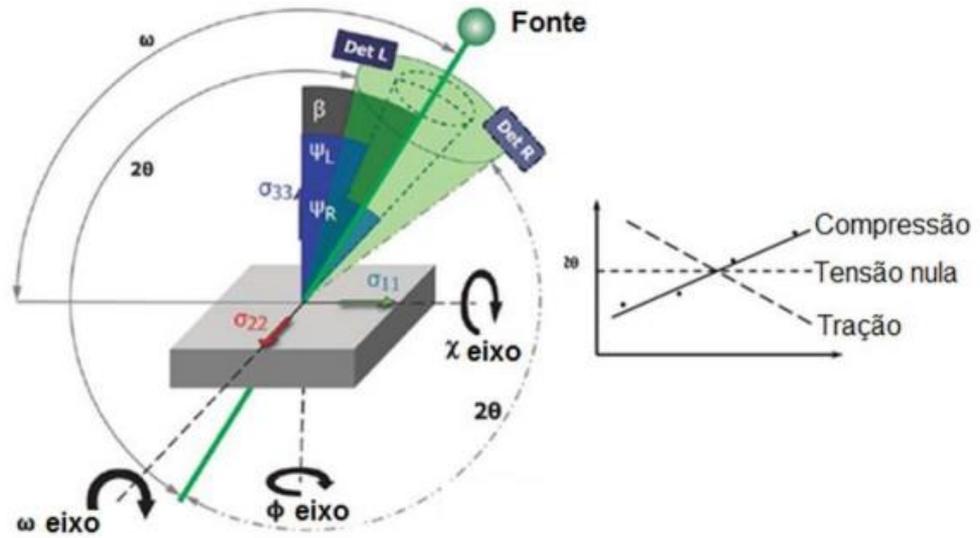
3.5.1. Tensão Residual por Difração de Raios X (DRX)

O estudo das tensões residuais através da técnica de difração de raios X é um dos mais utilizados, por se tratar de um método não-destrutivo, confiável e é aplicável para a maioria dos materiais policristalinos, metálicos ou cerâmicos. A DRX oferece uma série de vantagens em comparação com outros diversos métodos de avaliar a tensometria, sejam métodos mecânicos, ultrassônicos ou magnéticos (SOUSA, 2012).

Pode ser aplicado à indústria, visto que, é capaz de ser uma forma rotineira de medição, com o intuito resguardar a boa funcionalidade de produtos e equipamentos se de qual natureza for, metais, cerâmicos ou compósitos intermetálicos (SANTOS, 2012).

Conforme observado na figura 9, a curva referente a tensão compressiva é crescente, ao variar o $\sin^2\psi$ a posição 2θ aumenta, a curva referente a tensão trativa é decrescente, aumento o $\sin^2\psi$ durante a varredura, a posição angular 2θ decresce, o que não ocorre quando o material está isento de tensões, em qualquer posição de varrida no $\sin^2\psi$, a distância interplanar não altera.

Figura 9 – Varredura do ângulo (ψ) no DRX



FONTE: Adaptado da norma ASTM E2860-12 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL, 2012) e Prev y (1996).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

O procedimento experimental proposto visava compreender as tensões residuais geradas através da usinagem por descargas elétricas e avaliadas através da difração de raios X.

4.1. Materiais

4.1.1. Material utilizado para os corpos de prova

O material utilizado foi o aço SAE P20. Nas tabelas 1 e apresenta a composição química do aço SAE P20.

Tabela 1 – Composição química do aço SAE P20 (em porcentagem).

%C	%Si	%Mn	%Cr	%Mo
0,36	0,50	0,80	1,70	0,4

FONTE: GGD METALS, 2018 (Adaptado).

Já a tabela 2, apresenta algumas das suas características. A dimensão do material era de 300mm × 300mm × 20 mm.

Tabela 2 – Principais características do aço SAE P20.

Aço SAE P20
Boa usinabilidade, tanto no estado recozido como beneficiado
Boa soldabilidade e boa uniformidade de dureza
Excelente polibilidade e boa reprodutibilidade de desempenho

FONTE: GGD METALS, 2018 (Adaptado).

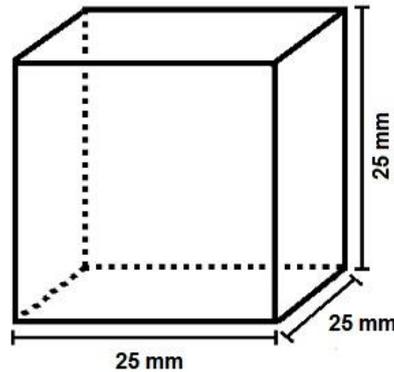
4.1.2. Material do eletrodo

A remoção de material no processo de eletroerosão ocorre por descargas elétricas através de uma ferramenta, o eletrodo. Os materiais utilizados para a produção de eletrodos necessitam de propriedades que facilitem a descarga, resistindo ao mesmo tempo à erosão que o processo origina no material a usar. O material utilizado neste trabalho foi o cobre eletrolítico, possui boa condutividade elétrica e melhor custo-benefício comparado aos demais materiais de eletrodo, como exemplo a grafita dentre outros. O eletrodo tem a geometria cilíndrica, medindo diâmetro de 1 ¼ de polegada × 50 mm de comprimento.

4.2. Usinagem dos corpos de prova

Para a realização do ensaio foram cortados sete corpos de prova em aço SAE P20, sendo que um era referência e apenas tratado termicamente e os demais usinados por eletroerosão e tratados termicamente com as seguintes dimensões, $25\text{mm} \times 25\text{mm} \times 25\text{mm}$ conforme desenho da figura 10.

Figura 10 – Desenho esquemático das dimensões dos corpos de prova



FONTE: Autoria própria.

4.3. Equipamento de Usinagem por Descargas Elétricas

O equipamento empregado foi uma máquina de eletroerosão por penetração, modelo “Eletroplus EDM-540” da Sevspark, exibido na figura 11. O equipamento contém um cabeçote em que se encaixa o eletrodo ferramenta, este se desloca verticalmente (eixo z). A máquina de eletroerosão trabalha ciclicamente, de modo que o suporte do eletrodo ferramenta se desloca para baixo, aproximando-se do eletrodo ferramenta a uma dada distância capaz que permita que ocorra uma descarga elétrica entre eletrodos peça e ferramenta a uma dada distância (*gap*), permitindo que ocorra uma descarga elétrica entre eletrodos peça e ferramenta. A descarga ocorre dentro de um tempo pré-determinado, depois eletrodo se afasta da peça, dando reinício ao ciclo. Todas as operações e controle das variáveis são realizadas através do painel de controle da máquina.

Figura 11 – Eletroplus EDM-540



FONTE: Autoria própria.

Os parâmetros utilizados estão declarados a seguir, na tabela 3, pela configuração da máquina, cada 1 Ts corresponde a 3 Ampère de corrente e a profundidade que a ferramenta penetra do material foi denominada como (ap).

Tabela 3 – Parâmetros do ensaio de EDM

Amostra	T_s	T_{ON}	Gap	Tempo de descarga	T_{OFF}	ap	Tempo Inicial	Tempo Final
00			Amostra de referência (sem usinagem)					
01	2	100	1	6	50%	0,4	08:53	11:05
02	4	200	1	6	50%	0,5	11:10	11:55
03	5	300	1	6	50%	0,5	12:00	12:28
04	6	400	1	6	50%	0,7	12:30	12:50
05	7	500	1	6	50%	0,8	12:51	12:59
06	13	500	1	6	50%	1	13:00	13:06

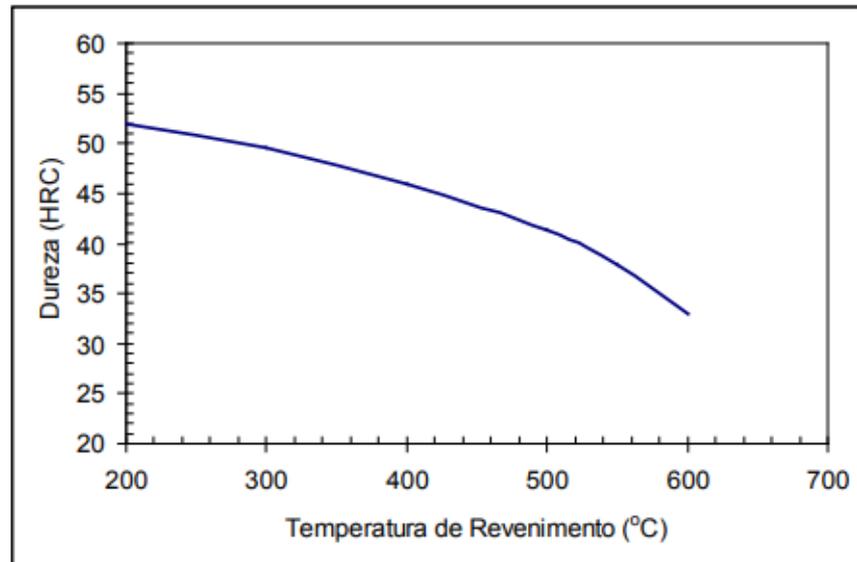
FONTE: Autoria própria.

4.4. Tratamento Térmico

O aço SAE P20 passou por um processo térmico (revenimento) para aliviar as tensões que poderia conter durante o processamento, segundo Silva (2006), dependendo das condições de revenimento, este material pode reduzir a sua dureza para em média 300 HV, este efeito

alivia as tensões internas do material. O diagrama da figura 12 é referente ao aço SAE P20 e foi proposto pela GGD METALS (2018), a temperatura de 600°C durante 1:30h foi utilizada para revenir todas as amostras, o resfriamento do corpo de prova foi realizado no forno, a amostra 00 foi separada para referência, seu valor de tensão residual foi comparado as demais tensões induzidas na usinagem pelo processo de descargas elétricas.

Figura 12 – Curva de revenimento



FONTE: GGD METALS, 2018.

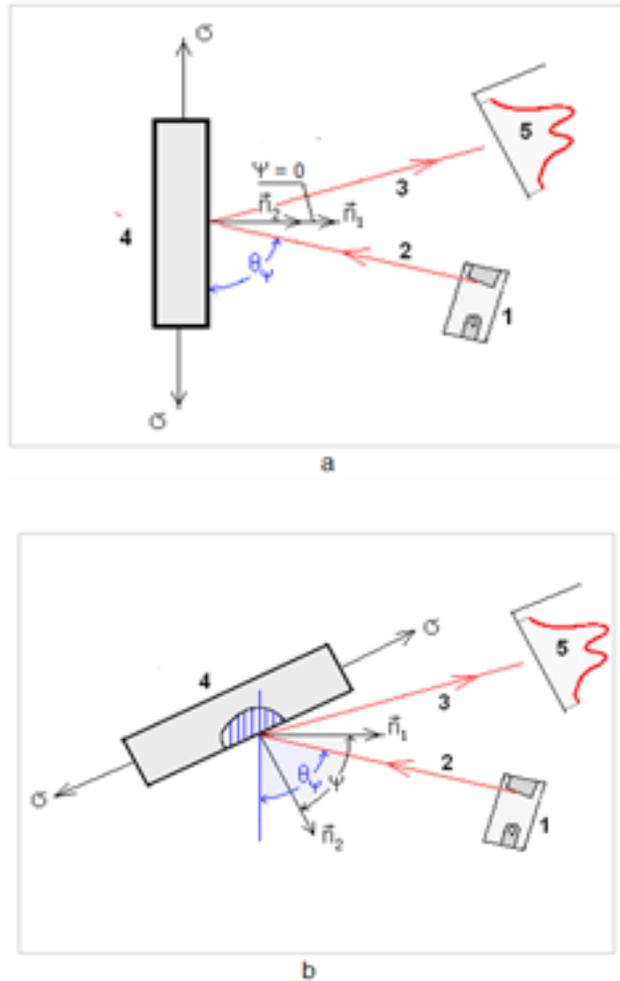
4.5. Ensaio de Difração de Raios X (DRX)

Utilizando um difratômetro de raios X pode-se relacionar a difração com as tensões residuais de um certo material. Fazendo a análise de uma amostra com este instrumento, obtém-se o padrão de interferência do material analisado, o que permite aferir informações relevantes como ângulo, largura e altura dos picos.

4.5.1. Tensão residual por Difração de Raios X (DRX)

Para avaliar as tensões residuais foi feito o uso da difração de raios X, pelo método do $\sin^2\psi$ com radiação $\text{CrK}\alpha$. A figura 13 apresenta um esquema de medidas utilizando método de $\sin^2\psi$, principal método de medidas de tensões por difração de raios X, que tem como base a medida da posição angular da linha de difração

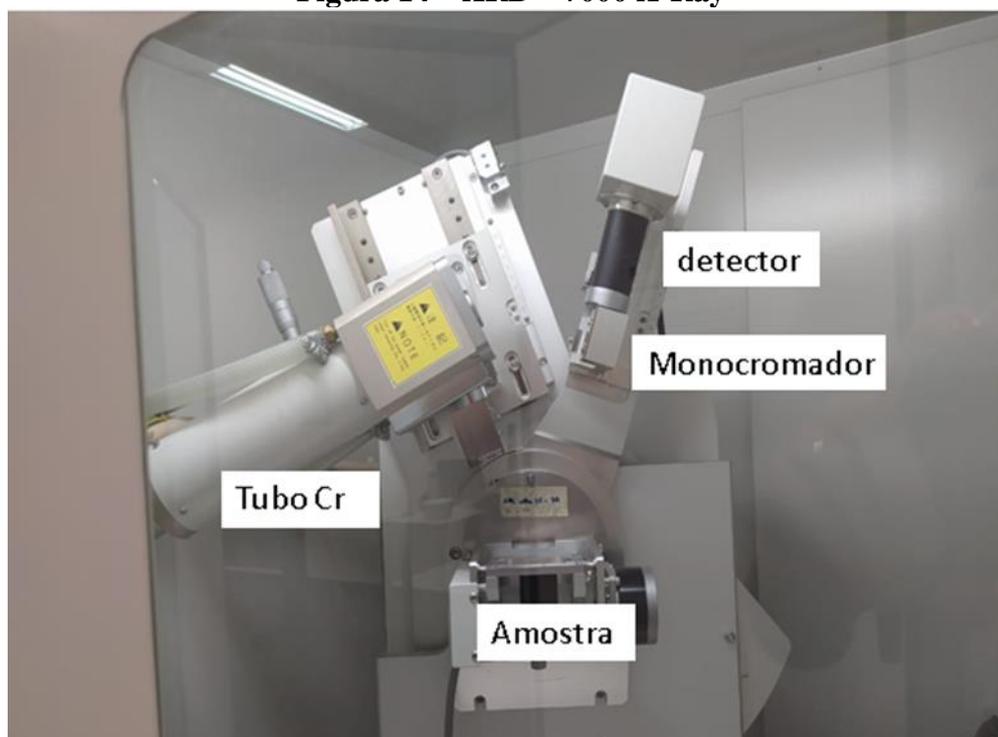
Figura 13 – (a): Esquema de medida de tensão por difração de raios X para $\psi=0$ (a) e $\psi>0$; (b): 1– tubo de raios X; 2,3 – raios X incidente e difratado; 4 – amostra analisada; 5 – perfil da linha de difração registrado pelo detector de raios X



FONTE: NOVIKOV, 1994.

O ensaio foi executado por difração de raios X convencional empregando o difratômetro modelo Shimadzu XRD – 7000 X-Ray, apresentado na figura 14.

Figura 14 – XRD – 7000 X-Ray



FONTE: Autoria própria.

Os parâmetros empregados no ensaio encontram-se listados na tabela 4.

Tabela 4 – Parâmetros do ensaio de DRX. (continua)
Configuração das medidas de tensão residual no DRX

Alvo	Cr $\kappa\alpha$ (2,289 Å)
Método	ψ Constante
Raio do Gonimômetro	200 mm
Ângulo de difração	156° (211)
Varredura	150° a 159°
Passo	0,1°
Tempo por passo	2 segundos
Velocidade	2°/minuto
Corrente	30 mA

Tabela 4 – Parâmetros do ensaio de DRX. (continuação)

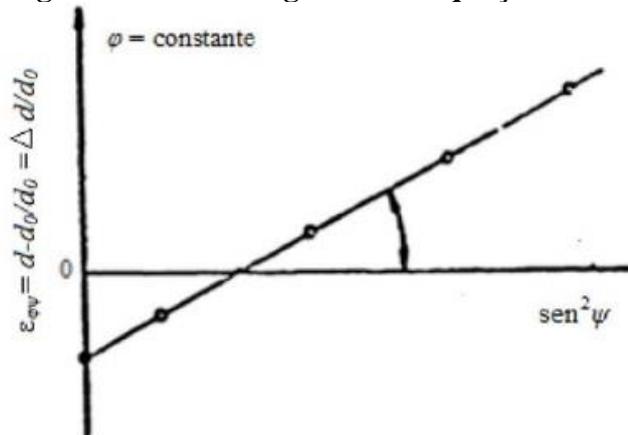
Configuração das medidas de tensão residual no DRX	
Tensão	40 kV
Ângulo ψ	0; 10; 18; 24; 36; 44; 51; 57

FONTE: Autoria própria.

A equação 1 fornece o comportamento da deformação relativa planar para um dado ângulo ψ . Referindo-se à tensão próxima à superfície do material (σ_ϕ) em qualquer direção definida pelo ângulo entre a normal à superfície do material e a normal aos planos cristalinos, ângulo ψ , para a deformação (ε) na direção ($\phi\psi$) considerando as tensões principais σ_1 e σ_2 . (ALVES, 2014).

$$\varepsilon_{\phi\psi} = \frac{1 + \nu}{E} \sigma_\phi \text{sen}^2 \psi - \frac{\nu}{E} (\sigma_1 + \sigma_2) \quad (01)$$

Ao passo que diferentes valores de deformação relativa serão obtidos ao se variar o ângulo ψ , dados ângulos θ e Φ fixos, tal equação gerará uma reta representada no gráfico de $\varepsilon_{\theta\phi}$ por $\text{sen}^2 \psi$ conforme apresentado na figura 15 (ALVES, 2014).

Figura 15 – Análise gráfica da equação

FONTE: GUIMARÃES, L.R., 1990.

Analisando o gráfico obtido, será possível calcular a tensão atuante na direção Φ , σ_ϕ , a partir do coeficiente angular da reta em questão, tal que se obtém a equação 2:

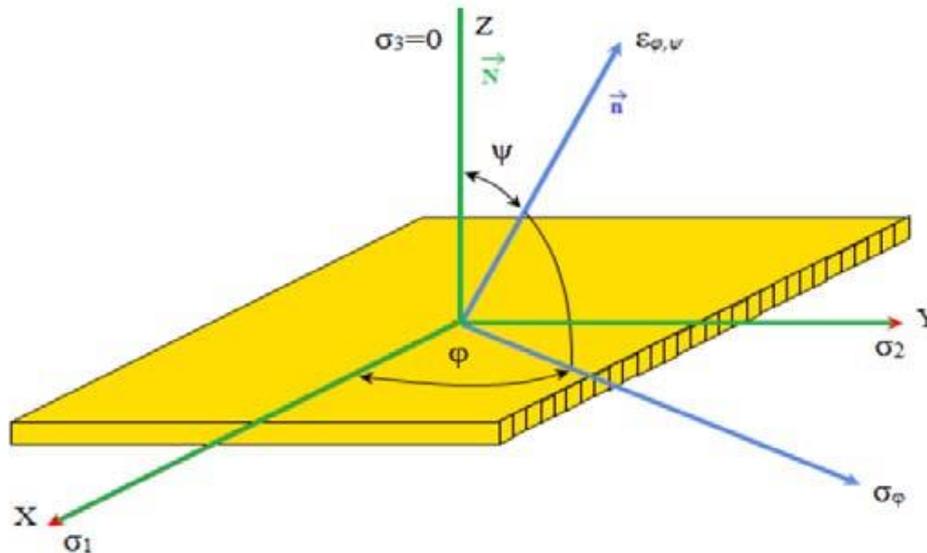
$$\sigma_\phi = m \left(\frac{E}{1 + \nu} \right) \quad (02)$$

A relação da tensão direcional com as tensões principais é dada pela equação 3:

$$\sigma_{\phi} = \sigma_1 \cos^2 \phi + \sigma_2 \sin^2 \phi \quad (03)$$

A figura 16 mostra que elevando-se o ângulo ψ para 90° a componente da tensão próxima à superfície (σ_{ϕ}) é calculada conforme a equação 3 (ALVES, 2014).

Figura 16 – Esquema da medição de tensão residual por DRX



FONTE: ALVES., 2014.

Por fim, o último termo da equação 1, necessário ao cálculo das tensões principais, poderá ser obtido a partir da deformação relativa calculada para o ângulo de $\psi=0^\circ$. A partir dos passos descritos acima, irá se obter o seguinte sistema de equações, composto pelas equações 4 e 5:

$$\sigma_1 + \sigma_2 = \frac{-\nu}{E} \left(\frac{d_{\psi} - d_0}{d_0} \right) \quad (04)$$

$$\sigma_1 \cos^2 \phi + \sigma_2 \sin^2 \phi = m \left(\frac{E}{1 + \nu} \right) \quad (05)$$

A resolução desse sistema explicita os valores de tensões residuais atuantes no material. (ALVES, 2014).

Onde:

σ_{ϕ} = Tensão na direção ϕ ;

ϕ = Ângulo rotação da amostra;

d_{ψ} = Distância entre os planos difratadores inclinados;

ψ = Ângulo de inclinação da amostra – formado entre a normal à superfície do material e a normal aos planos cristalinos;

E = Módulo de elasticidade específico do material;

ν = Coeficiente de Poisson específico do material;

d_0 = Distância interplanar livre de tensão;

ε = Deformação.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados e discussões foram fundamentados nos valores alcançados na difração por raios X, juntamente com o desempenho e parâmetros da eletroerosão.

5.1. Usinagem por descargas elétricas

Utilizando os parâmetros descritos na tabela 3, realizou-se a usinagem por descargas elétricas para a confecção das amostras, como a figura 17 mostra.

Figura 17 – Equipamento Eletroplus EDM-540 em operação



FONTE: A autoria própria.

A figura 18 revela as amostras já usinadas, nas dimensões pré-estabelecidas, após o tratamento térmico. Demonstrando que foi possível confeccionar com êxito os corpos de prova, a partir dos parâmetros pré-estabelecidos.

Figura 18 – Amostras usinadas por EDM

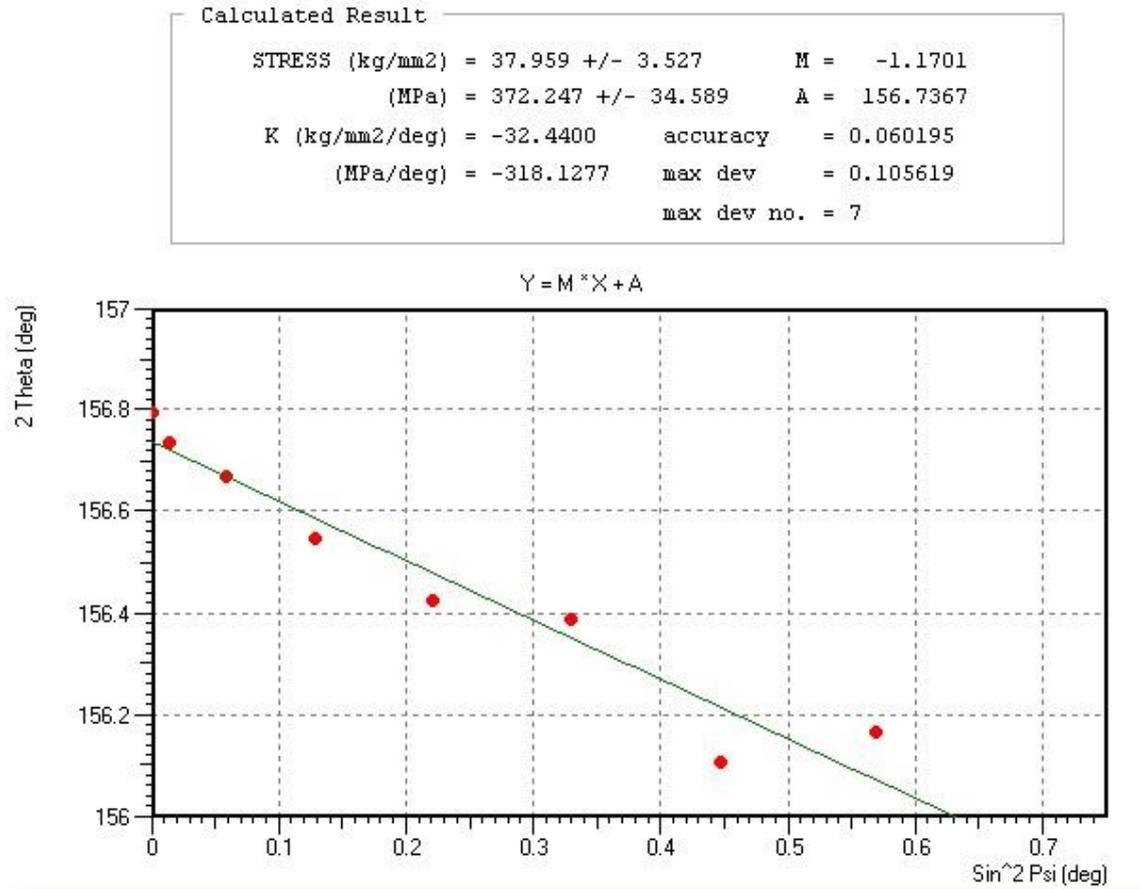


FONTE: Autoria própria.

5.2. Difração por raios X

As análises difratográficas realizadas com os parâmetros da tabela 4, possibilitaram identificar que, como observa-se na figura 19, o material após o processo térmico (amostra de referência, amostra 00) está sob tensão residual trativa, de aproximadamente $372,2 \text{ MPa} \pm 34,5 \text{ MPa}$, havendo uma deformação distensiva na rede cristalina. Sendo assim, pode-se fazer a comparação com as demais amostras usinadas.

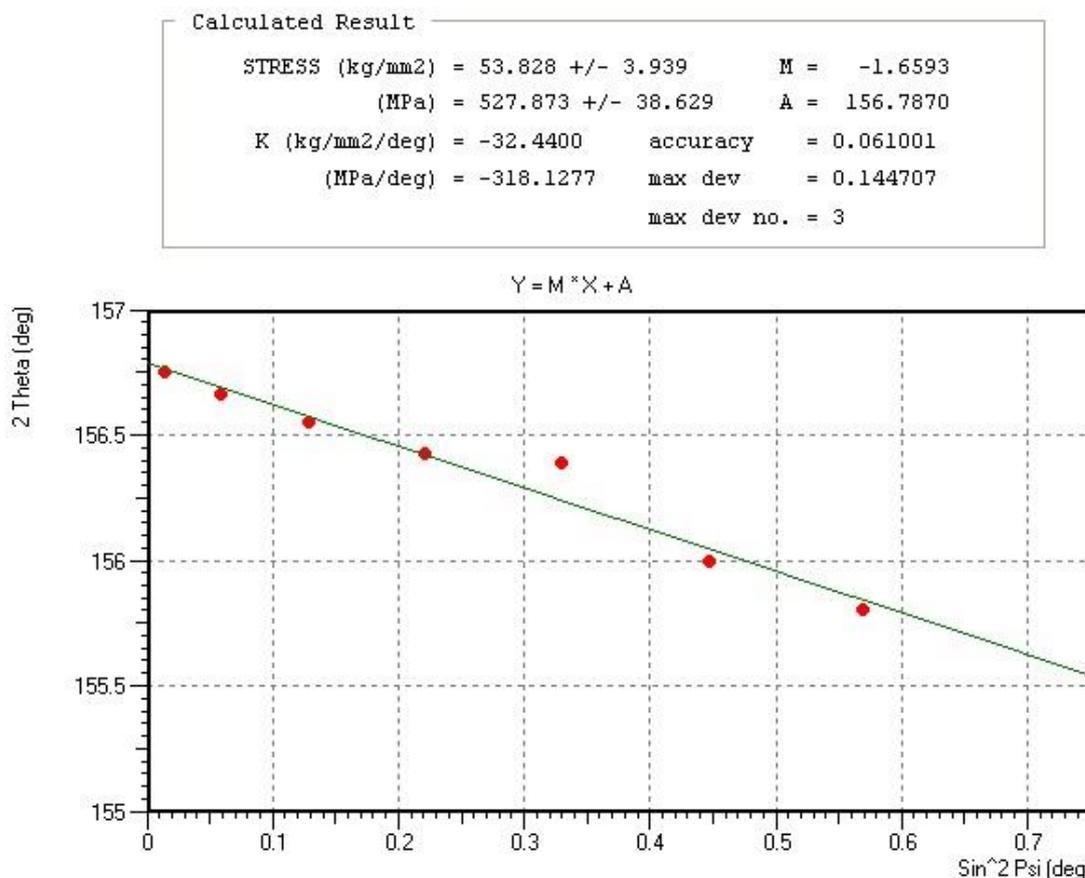
Figura 19 – Curva $\sin^2\psi$ versus 2θ da amostra de referência (amostra 00) para verificação do alinhamento e o respectivo valor da tensão



FONTE: Autoria própria.

As análises de DRX revelaram que, a amostra 01 encontra-se sob tensão residual trativa, de aproximadamente $527,9 \text{ MPa} \pm 38,6 \text{ MPa}$, como mostrado na figura 20, ocorrendo uma deformação distensiva na rede cristalina. O valor da tensão residual trativa é aproximadamente 41,8% superior ao valor de referência, demonstrando que a usinagem EDM interfere de maneira a aumentar as tensões residuais.

Figura 20 – Curva $\sin^2\psi$ versus 2θ da amostra 01 para verificação do alinhamento e o respectivo valor da tensão

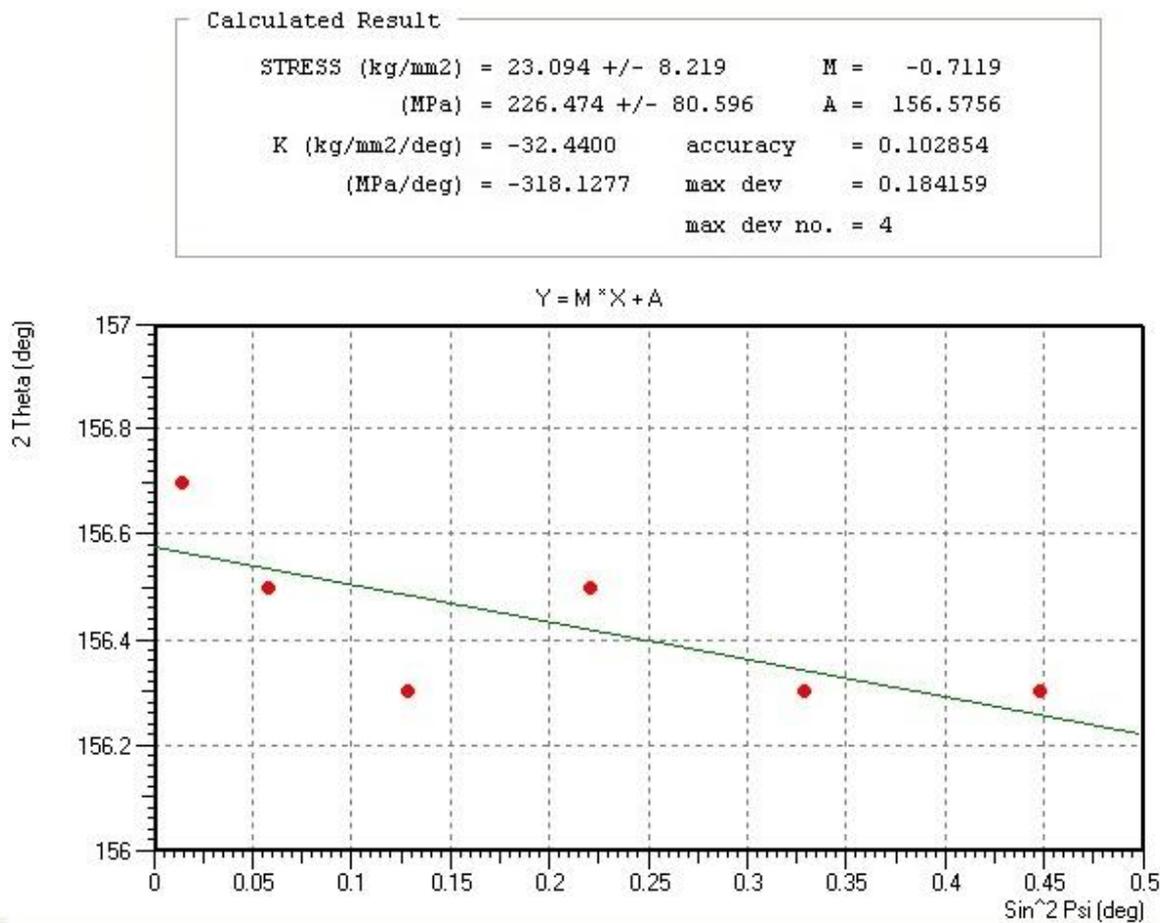


FONTE: Autoria própria.

Com relação à amostra 02, os ensaios de DRX, conforme a apresentação na figura 21, possibilitaram observar que esta situa-se sob tensão residual trativa, de aproximadamente 226,5 MPa \pm 80,6 MPa. Ou seja, corrente elétrica de aproximadamente 12 A, foi suficiente para reduzir a compressão da rede cristalina, apresentando em média 40% menor em relação a amostra de referência.

A variação ocorrida em relação a amostra 01, pode estar atrelado ao tempo de usinagem, onde a amostra 01 recebeu as descargas de 6 A por um tempo de 1:12h e a amostra 02 recebeu maior corrente, 12 A por um tempo menor, 0:45h, assim é preciso entender melhor este fenômeno de tempo e corrente para compreender a influência de cada variável nesta alteração do estado de tensão na superfície do aço SAE P20.

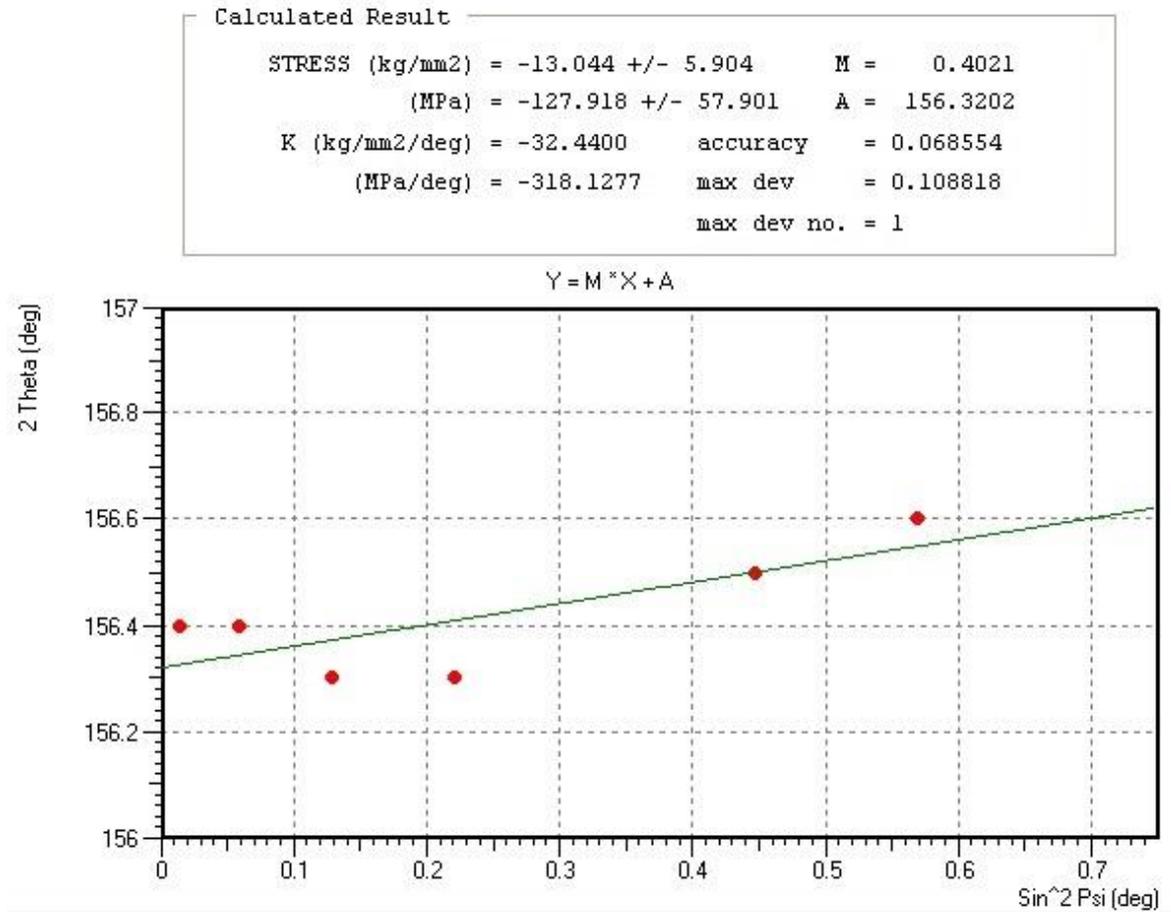
Figura 21 – Curva $\sin^2\psi$ versus 2θ da amostra 02 para verificação do alinhamento e o respectivo valor da tensão



FONTE: Autoria própria.

O estudo através da difração de raios X, propiciou descobrir que a amostra 03 se encontra sob tensão residual compressiva, de aproximadamente $-127,1 \text{ MPa} \pm 57,9 \text{ MPa}$. Tal informação pode ser averiguada na figura 22. Houve alteração do estado de tensão trativa para compressiva, nesta condição a corrente elétrica foi de 15 A e o tempo de 0:28h, ou seja, menor tempo de exposição e maior corrente, estas condições permite uma possibilidade de atribuir a corrente elétrica como a variável mais influente no estado de tensão, podendo também tender a tensões compressivas com o aumento da corrente elétrica, que por sinal é benéfico para superfície, reduzindo a probabilidade de trincas por fadiga e melhor resistência ao desgaste.

Figura 22 – Curva $\sin^2\psi$ versus 2θ da amostra 03 para verificação do alinhamento e o respectivo valor da tensão

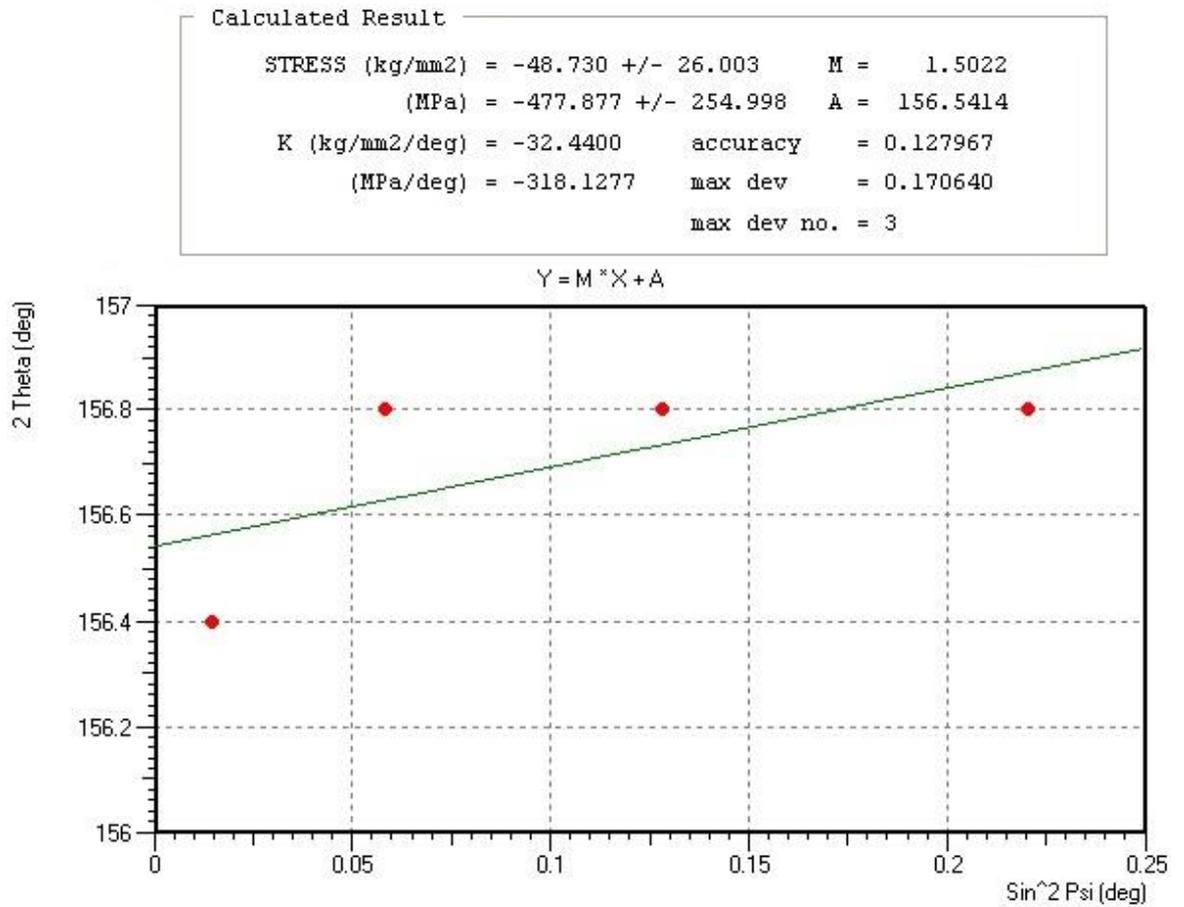


FONTE: Autoria própria.

No que diz respeito à amostra 04, a difração de raio X, revelou que, esta, está sob tensão residual compressiva, de aproximadamente $-477,9 \text{ MPa} \pm 255 \text{ MPa}$, informação contida na figura 23.

Nesta condição de usinagem, a corrente elétrica elevou para 18 A, aumentando em 20% comparando a amostra 03, o tempo de exposição foi de 0:20h, sendo menor que o tempo de usinagem da amostra 03, porém a tensão residual de compressão teve um acréscimo médio de 375%, mas com margem de erro de 53% do valor médio, assim, não se pode atribuir um aumento significativo da tensão residual compressiva, mas é percebido a garantia da continuidade do estado de tensão e sinaliza uma elevação em função da corrente, mesmo com menor tempo de exposição.

Figura 23 – Curva $\sin^2\psi$ versus 2θ da amostra 04 para verificação do alinhamento e o respectivo valor da tensão

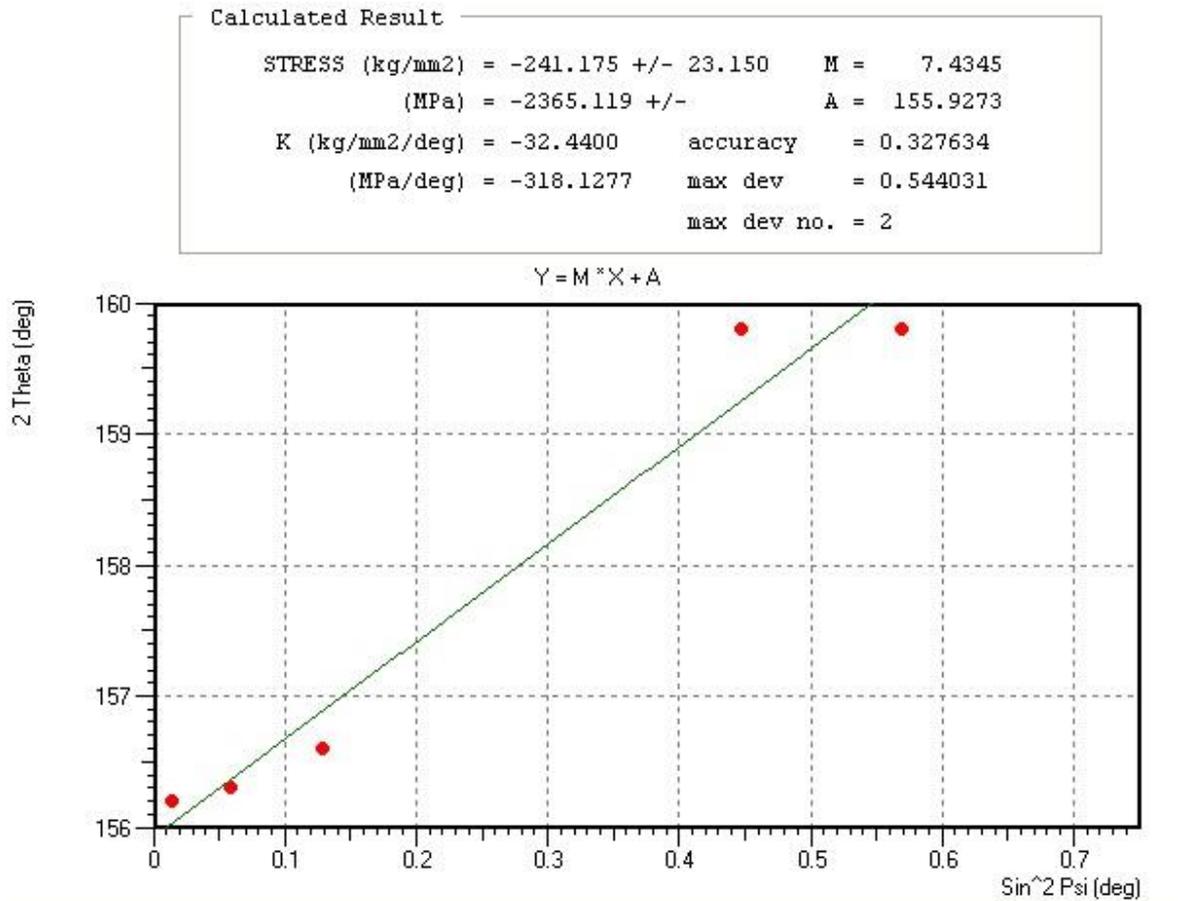


FONTE: Autoria própria.

Quanto a amostra 05, o ensaio de DRX, apontou um valor de aproximadamente -2365,1 MPa para a tensão residual compressiva, dado presente na figura 24.

Nesta análise, houve uma dispersão nos pontos da curva de tensão, possivelmente teria um baixo índice de ajuste na regressão, o valor de tensão calculado não apresentou a margem de erro, porém é mantido o estado de tensão compressivo, esta análise requer verificações futuras.

Figura 24 – Curva $\sin^2\psi$ versus 2θ da amostra 05 para verificação do alinhamento e o respectivo valor da tensão

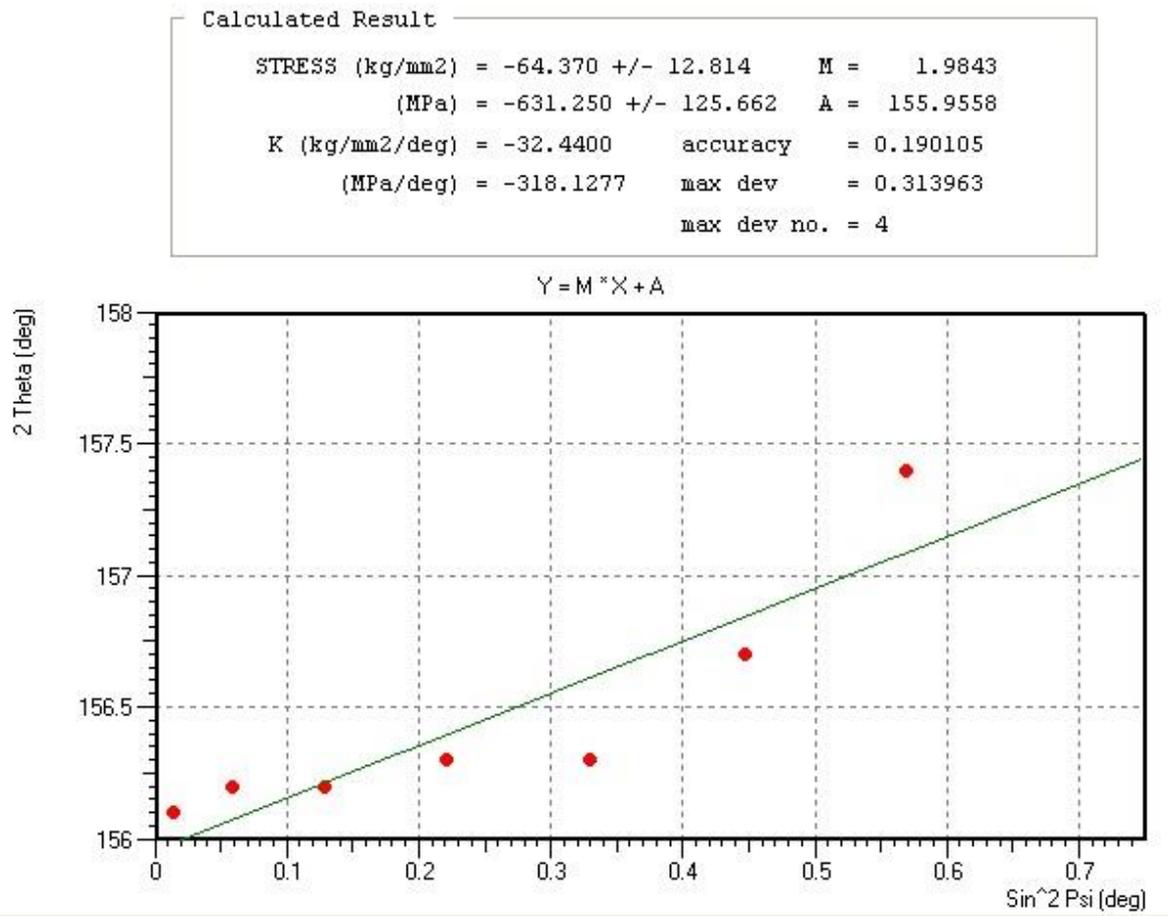


FONTE: Autoria própria.

Em referência a amostra 06, a análise de DRX, indicou um valor de aproximadamente $-631,2 \text{ MPa} \pm 125,6 \text{ MPa}$, demonstrando uma tensão residual compressiva, como exibido na figura 25.

O ensaio da amostra 06, retoma a relação de tendência que vinha apresentando nos ensaios anteriores, o estado de tensão residual compressivo continua crescendo, aumentando em média 75% em relação a amostra 04, com uma menor dispersão na margem de erro, o tempo de exposição foi de 0:06h e a corrente utilizada de 39 A. Isto mostra que o tempo de usinagem não tem influência direta com o estado de tensão, a corrente sim, é a variável principal deste estudo, e mantendo a tendência de influenciar de forma crescente na tensão residual compressiva.

Figura 25 – Curva $\sin^2\psi$ versus 2θ da amostra 06 para verificação do alinhamento e o respectivo valor da tensão



FONTE: Autoria própria.

6. CONCLUSÃO

As amostras tiveram uma área superficial usinada suficiente para a realização da leitura das tensões residuais, foi possível linearizar a reta de tensão residual com os pontos medidos no DRX, com exceção da amostra 05, esta requer verificações futuras.

As condições de revenimento utilizada nesta pesquisa gerou tensões residuais trativas, se fazendo necessário análises futuras para encontrar os parâmetros que melhor isentam as tensões residuais do aço SAE P20, porém, os resultados foram trabalhados de forma comparativa. Houve durante a usinagem por descargas elétricas variação do estado de tensão entre a amostra de referência (amostra 00) para as demais condições de usinagem entre as amostras (01 a 06)

Ensaio de difração de raios X por meio da técnica $\sin^2 \psi$, foram realizados para avaliar a influência das variáveis do processo de usinagem por descargas elétricas na geração de tensões residuais e qual tipo de tensão residual é induzida na amostra. Com os resultados obtidos, notou-se que a intensidade de corrente elétrica (Ampère) foi a variável que mais influenciou no estado de tensão do material.

O aumento da corrente elétrica induziu a alteração do estado de tensão trativa presente na amostra de referência (amostra 00) para tensões compressivas nas amostras de (01 a 06), quanto mais indução de corrente elétrica no processo de usinagem por descargas elétricas, maior nível de tensão compressiva foi encontrado nas amostras. Este fenômeno parece benéfico, superfícies com tensões compressivas melhoram a resistência ao desgaste e dificulta a fadiga. Visto que o aço SAE P20 é aplicado em moldes e matrizes e estão sujeitos a estes fenômenos mecânicos, é possível atribuir que o processo de eletroerosão não afeta negativamente a vida útil destes componentes.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Avaliar a textura das superfícies fabricadas por descargas elétricas;
- Analisar se a microdureza e a tensão residual estão correlacionadas;
- Efetuar a análise metalográfica de amostras usinadas e não usinadas por EDM;
- Compreender até que ponto o revenimento alivia as tensões;
- Analisar a dispersão dos dados no processo de medição de tensão no DRX;
- Avaliar a influência da taxa de remoção na eletroerosão nas tensões residuais;
- Avaliar a influência do material do eletrodo nas tensões residuais;
- Avaliar a influência do material da peça nas tensões residuais no processo de eletroerosão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABBAS, N. M; SOLOMON, D. G; BAHARU, M. F. **A review on current research trends in electrical discharge machining (EDM)**. International Journal of Machine Tools and Manufacture. N. 7-8. p. 1214- 1228. 2007.
- ALMEN, J. O. **Residual stress and fatigue in metals**. 1. ed. New York: McGraw-Hill Book Company, 1963.
- ALVES, J.M. **Análise da Transformação Martensítica e Tensão Residual em um aço inoxidável 304L**. 2014. 112 f. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais) - Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro. 2014.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E2860-12: standard test method for residual stress measurement by X-Ray diffraction for bearing steels**. West Conshohocken: ASTM; 2012. 18 p.
- BARCHEKY; BYMARA e AMORIM – **Apostila IBH 50 A - ENGEMAC**, 1988.
- BARETA, D. **Estudo comparativo e experimental de materiais aplicados a incerto macho de moldes de injeção dentro do conceito de molde híbrido**. 2007. 148f. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia de Materiais) – Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2007.
- BENEDICT, G. F. **Nontraditional manufacturing processes**. Marcel Dekker. New York. 1987.
- BLEYS, P. et al. **Surface and sub-surface quality of steel after EDM**. Advanced Engineering Materials. N. 1-2. p. 15-25, 2006.
- CALLISTER JR., W. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 7. Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.
- CINDRA FONSECA, M. P. **Evolução do estado de tensões residuais em juntas soldadas de tubulação durante ciclos de fadiga**, 2000. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) - Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2000
- COSTA E SILVA, A. L.; MEI, P. R.. **Aços e ligas especiais**. 2. ed. São Paulo: Eletrometal S.A. Metais Especiais, 1988.p.36,93 e 227.
- EL-HOFY, H. A. G. **Advanced machining processes - Nontraditional and hybrid machining processes**. 1 ed. Egito: McGraw Hill Professional, 2005. p.115-130.
- GGDMETALS. **GGD P20**. Disponível < <https://ggdmetals.com.br/wp-content/uploads/2018/04/A%C3%87O-P20.pdf> >. 2018. Acesso em: 10 ago. 2019.
- GUIMARÃES, L.R. **Estudo de parâmetros experimentais envolvidos na determinação de macrotensões residuais, em tubos de aço inoxidável, pelo método da difração de raios X**.

1990. 81 f. Dissertação (Mestrado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares Autarquia Associada à Universidade de São Paulo, São Paulo, 1990.

JAMESON, E. C. **Electrical discharge machining**. Dearborn: Society of Manufacturing Engineers, 2001. cap. 1, p. 1-21.

KANDIL, F. A.; LORD, J. D.; FRY, A. T.; GRANT, P. V. **A review of residual stress measurement methods - A guide to technique selection**. Reino Unido, 2001.

KLOCKE, F.; KÖNIG, W. **Fertigungsverfahren 3 – Abtragen, generieren und lasermaterialbearbeitung**. Springer Verlag, 4. Auflage, 2007.

KLUG, H.P.; ALEXAND, L.E. **X-ray Diffraction Procedures for Polycrystalline and Amorphous Materials** John Wiley e Sons. 2.ed. 1974.

KUMAR, S.; SINGH, R.; SINGH, T.P.; SETHI, B.L. **Surface Modification by Electrical Discharge Machining: A review**. Journal of Materials Processing Technology, 209(8): p. 3675-3687. 2009.

MACHERAUCH, E. **Introduction to Residual Stress, Advanced in Surface Treatments, International Guide Book on Residual Stress**. 1986, Vol. 4. 38p.

MCGEOUGH, J. A. **Advanced methods of machining**. Chapman and Hall. Londres, p. 128-152, 1988.

MEASUREMENTS GROUP. **Measurements of Residual Stresses by the Hole Drilling Strain Gage Method** - Hypertext Publication – 1999.

MESQUITA, R. A.; BARBOSA, C. A. **Os aços para moldes de plástico devem ser muito bem caracterizados**. Revista máquinas e Metais, São Paulo, n. 499, p. 68-91, 2007.

MOLDES INJEÇÃO PLÁSTICOS. **Eletroerosão: tecnologia de usinagem por descargas elétricas (EDM)**. Disponível < <http://moldesinjecaoplasticos.com.br/eletroerosao-tecnologia-de-usinagem-por-descargas-eletricas-edm/>> Acesso em: 20 ago. 2019.

NOVIKOV, I. **Teoria dos Tratamentos Térmicos dos Metais**, Traduzido por: TEODÓSIO, J., L. Ed. Uuniversidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1994, 550p.

NOYAN, I.C.; COHEN, J.B. **Residual Stress - Measurement by Diffraction and Interpretation**. Nova York: Springer-Verlag, 1987.

PANDEY, A.; SINGH, S. **Current research trends in variants of Electrical Discharge Machining: A review**. International Journal of Engineering Science and Technology. N. 2-6. p. 2172-2191. 2010.

PREVÉY, P. S. **X-ray diffraction residual stress techniques**. Metals Handbook, v. 10, p. 380-392, 1996.

PRIES, H.; LILUASHVILI, Z.; DILGER, K.; WOHLFAHRT, H. **Mecanismos de desgaste em matrizes de fundição sob pressão**. Revista Fundição e Serviços, São Paulo, ano 15, n. 154, p. 40-48, 2005.

SABBO, J. N. B. M. **Análise do Estado superficial de aços no processo de eletroerosão para moldes de injeção**. 2017. 74f. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2017.

SABO, I. S. S. C. **Usinagem por eletroerosão**. 2008 21f. Departamento de Engenharia Mecânica e Mecatrônica, Faculdade de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Estado do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

SALVADOR, V.L.; COSTA, C. A. **Quais são as etapas mais importantes no desenvolvimento de ferramentas de injeção**. Plástico Industrial, ano IX, p. 82-94, fev. 2007.

SANTOS, I. **Análise dos parâmetros de entrada na eletroerosão de penetração da liga de titânio TI-6AL-4V**. 2010. 126f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica e de Materiais) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2010.

SANTOS, R. F. **Influência do material da peça e do tratamento térmico na eletroerosão nos aços AISI H13 e AISI D6**. 2007. 122 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2007.

SILVA, A. L. V. C.; MEI, P. R. **Aços e Ligas Especiais**. 2 ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2006.

SILVA, P. S. C. P. **Comportamento Mecânico de Materiais Metálicos**. Universidade Federal do Paraná, 1999.

SOUSA, D. **Determinação de tensões residuais em materiais metálicos por meio de ensaio de dureza**. 2012. 113f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal De São João Del-Rei, São João Del-Rei, 2012.

TURIBUS, N. S. **Análise por difração de raios X do estado das tensões residuais em chapas de aço inoxidável duplex após soldagem**. 2014. 89f. Tese (Doutorado em Engenharia Nuclear) – Uuniversidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.