

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS
CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

DAVI LADISLAU FERREIRA

INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE CORTE NA MICROESTRUTURA
SUPERFICIAL DA LIGA INCONEL 625 POR MEIO DO FRESAMENTO DE TOPO.

BELO HORIZONTE

2017

DAVI LADISLAU FERREIRA

INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE CORTE NA MICROESTRUTURA
SUPERFICIAL DA LIGA INCONEL 625 POR MEIO DO FRESAMENTO DE TOPO.

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: Carlos Eduardo dos Santos

Belo Horizonte

2017

DAVI LADISLAU FERREIRA

INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE CORTE NA MICROESTRUTURA
SUPERFICIAL DA LIGA INCONEL 625 POR MEIO DO FRESAMENTO DE TOPO.

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

Apresentado em: 06/12/2017

BANCA EXAMINADORA

.....
Prof. Msc. Carlos Eduardo dos Santos

.....
Prof. Msc. João Bosco dos Santos

.....
Prof. Msc. Aderci Freitas Filho

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por me proporcionar a benção da vida e as oportunidades que recebi.

Agradeço a minha família, namorada e amigos pelo apoio e motivação em não desistir na busca dos meus objetivos.

Agradeço também ao meu professor orientador Carlos Eduardo dos Santos pelo carinho e disposição em me auxiliar em todos os obstáculos que o trabalho impôs e por compartilhar os conhecimentos que possui.

RESUMO

Superligas a base de Níquel tem ganhado destaque nas últimas décadas, uma vez que são capazes de resistir a ambientes altamente corrosivos e oxidantes, por um longo período de tempo. Neste contexto, tem-se o Inconel 625, liga comercial com propriedades potenciais e pouco exploradas ao se tratar de dificuldades de trabalhar durante os processos de usinagem. O presente trabalho retrata um estudo relativo a mudanças na microestrutura durante o fresamento de topo da liga Inconel 625 por meio da variação de parâmetros de corte, tais como Velocidade de corte, Avanço de corte e Profundidade de corte. A avaliação das alterações foi feita por técnicas de caracterização (difração de raios-X), e ensaios destrutivos (microdureza) e não destrutivos (tensão residual por difração de raios-Xalém da microscopia óptica). Os resultados obtidos no trabalho revelaram que a liga Inconel 625 sofre modificações na microestrutura devido a usinagem, sendo mais percebido em baixas velocidades de corte.

Palavras-chave: Inconel 625, usinagem, fresamento de topo, microestrutura, parâmetros de corte.

ABSTRACT

Nickel-based superalloys have gained prominence in recent decades as they are able to withstand highly corrosive and oxidizing environments for a long period of time. In this context, there is the Inconel 625, a commercial alloy with potential properties and little explored when dealing with difficulties of working during the machining processes. This paper presents a study of changes in microstructure during top milling of the Inconel 625 alloy, by varying cutting parameters such as Cutting Speed, Cutting Feed, and Depth of Cut. The evaluation of the changes was made by characterization techniques (X-ray diffraction), and destructive (microhardness) and non-destructive tests (residual stress by X-ray diffraction in addition to optical microscopy). The results obtained in the work revealed that the Inconel 625 alloy undergoes modifications in the microstructure due to the machining, being more perceived at low cutting speeds.

Keywords: Inconel 625, machining, top milling, microstructure, cutting parameters

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - estrutura cristalina CFC	15
Figura 2 - representações do fresamento de faceamento.....	17
Figura 3 - exemplificação do fresamento de topo	17
Figura 4 - representação do corte discordante no processo de fresamento	18
Figura 5 - representação do corte concordante no processo de fresamento	19
Figura 6 - movimentos responsáveis pela retirada de cavaco no fresamento.....	20
Figura 7 - representação de uma ferramenta de corte utilizada no fresamento	21
Figura 8 - formação do cavaco.....	22
Figura 9 - comparação do gradiente térmico na superfície de saída da ferramenta (aço rápido) na usinagem	28
Figura 10 - demonstração da lei de Bragg.....	29
Figura 11 - variação do ângulo difratado de acordo com alteração da distância interplanar	30
Figura 12 - superfície de um material tensionado.....	31
Figura 13 - amostra obtida pelo tubo soldado	32
Figura 14 - amostra embutida.....	34
Figura 15 - ataque químico por imersão.....	35
Figura 16 - equipamento de microdureza utilizado.....	37
Figura 17 - gráfico obtido pelo ensaio de tensão residual da amostra Processada_2.....	38
Figura 18 - gráfico obtido pelo ensaio de tensão residual da amostra como recebido	38
Figura 19 - difratograma amostra não usinada.....	42
Figura 20 - difratograma amostra usinada.....	42
Figura 21 - micrografia amostra como recebido ampliação 400 vezes	43
Figura 22 - micrografia da amostra Processada_1 ampliação 400 vezes	44
Figura 23 - microscopia da amostra Processada_2 400 vezes.....	44
Figura 24 - microscopia amostra Processada_3 ampliação 400 vezes	45
Figura 25 - microscopia da amostra Processada_4 ampliação de 400 vezes	46
Figura 26 - microscopia amostra Processada_5 ampliação 400 vezes	47
Figura 27 - endentação formada na amostra como recebida no ensaio de microdureza	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - composição química da liga de Inconel 625	14
Tabela 2 - propriedades mecânicas do Inconel 625	16
Tabela 3 - parâmetros utilizados na usinagem	33
Tabela 4 - parâmetros de ensaio	34
Tabela 5 - parâmetros do ensaio de tensão residual	36
Tabela 6 - parâmetros utilizados no ensaio de microdureza.....	36
Tabela 7- resultado de tensão residual	39
Tabela 8 - análise química do Inconel 625.....	41
Tabela 9 - resultados de microdureza obtidos	48

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - resultado de tensão residual	39
Gráfico 2 - resultados obtidos no ensaio de microdureza	48

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.1 OBJETIVOS	13
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1 História das ligas de níquel	14
2.2 Inconel 625	15
2.3 Usinagem	16
2.3.1 Conceito e histórico do fresamento	16
2.3.2 Grandezas físicas e parâmetros de corte.....	19
2.3.2.1 Movimentos.....	19
2.3.2.2 Velocidades	20
2.3.3 Geometria da cunha cortante	20
2.3.4 Mecanismos de formação do cavaco	21
2.3.5 Ferramentas de corte.....	22
2.3.5.1 Desgaste da ferramenta de corte durante a usinagem de ligas de Níquel.....	25
2.3.6 Fluidos de corte	25
2.3.7 Usinabilidade do Inconel e das ligas de níquel	26
2.4 Caracterização	28
2.4.1 Por difração de Raios-X	28
2.4.2 Análise de tensão residual.....	29
3. METODOLOGIA.....	32
3.1 Preparação dos corpos de prova	32
3.2 Usinagem dos corpos de prova	33
3.3 Caracterização do material por DRX.....	33
3.4 Espectroscopia	34
3.5 Metalografia.....	34
3.6 Tensão residual no Inconel 625	35
3.7 Microscopia óptica	36
3.8 Ensaio de dureza	36
4. RESULTADOS.....	38
4.1 Ensaio de tensão residual	38
4.2 Análise química.....	41
4.3 Difração de raios-X	42

4.4 Microscopia Óptica	43
4.5 Micro dureza.....	47
5. CONCLUSÃO	50
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	51
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	52

1. INTRODUÇÃO

A grande demanda de materiais resistentes à corrosão para utilização no ramo petrolífero faz com que cresça o estudo em ligas de aço responsáveis para fabricação de ductos. O Inconel 625 é um exemplo de liga estudada. Essa liga possui características bem notáveis, como elevada dureza, alta resistência mecânica em temperaturas elevadas, baixa condutividade térmica e afinidade com materiais usuais para fabricação de ferramentas de corte. Esse perfil faz com que o material possua baixa usinabilidade (DE MATTOS; VAREJÃO, 2009).

O níquel é um elemento químico cuja estrutura cristalina é a cúbica de face centrada, e pode ser ligado a outros elementos de liga, por exemplo ferro e cromo, no caso do Inconel 625. O carbono presente no material ao ser aquecido, durante a usinagem por exemplo, formará ligações químicas com os elementos de liga do aço. Desse modo o produto formado, os carbonetos, vão atuar como elementos abrasivos e de reforço para a matriz, promovendo aumento da resistência da liga, ou seja, dificultando assim a usinagem da peça (MAGRI, 2015).

Para falar de usinabilidade de uma liga deve ser levado em consideração o desempenho do material durante o processamento, ou seja, vida útil da ferramenta, taxa de remoção de material, acabamento superficial e cavaco gerado. Esses aspectos estão diretamente ligados as propriedades mecânicas do material, da refrigeração, do fluido utilizado e dos parâmetros de usinagem definidos para o processo (MAGRI, 2015).

O fresamento é uma técnica de usinagem bastante eficaz e utilizada, uma vez que possui grande versatilidade e é capaz de gerar peças com diversas geometrias. Esse processo é complexo, visto que é influenciado por parâmetros e variáveis de processo de corte, tais como velocidade de corte, avanço de corte, ferramenta, lubrificação, refrigeração e formação de cavaco (BARBOSA, 2015).

1.1 OBJETIVOS

Geral:

Analisar a influência das variáveis de corte na microestrutura superficial do Inconel 625 pós fresamento de topo.

Específicos:

- Avaliar a influência do avanço de corte (f) na deformação plástica por meio da medição de dureza e tensão residual;
- Avaliar a influência da velocidade de corte (V_c) na deformação plástica por meio da medição de dureza e tensão residual;
- Avaliar a influência da profundidade de corte (a_p) na deformação plástica por meio da medição de dureza e tensão residual;
- Avaliar a morfologia da estrutura abaixo da superfície usinada por meio da técnica da microscopia óptica.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 História das ligas de níquel

Segundo o MPSC (2016), o Níquel, representado pelo símbolo Ni, é classificado como um metal de transição, possui número atômico 28, densidade de $8,9 \text{ g/cm}^3$ na temperatura de 20°C e estrutura cristalina CFC (cúbica de face centrada). Possui ponto de fusão na faixa de 1455°C , e elevada condutividade elétrica e térmica; pode ser obtido por meio da extração de minerais, tais como: nicolita, pentlandita e pirrotita. Utilizado em baterias e componentes resistentes à corrosão, como tubos. Segundo Emersom (2009), os maiores produtores de Níquel do mundo são os EUA, Austrália, África do Sul e Brasil.

As chamadas superligas a base de Níquel são projetadas para resistir a ambientes agressivos (altamente corrosivos e oxidantes) por um longo período de tempo, mesmo em temperaturas maiores que 650°C (EMERSOM, 2009).

O Inconel, liga registrada e criada pela *special metals corporation* é um exemplo de liga comercial de Níquel austenítico, composta por outros elementos de liga, tais como o Cromo (que nesse caso pode possuir porcentagem maior que a encontrada nos aços inoxidáveis), Molibdênio, Tungstênio e Nióbio. A composição química do Inconel 625 é descrita na tabela 1 (EMERSOM, 2009).

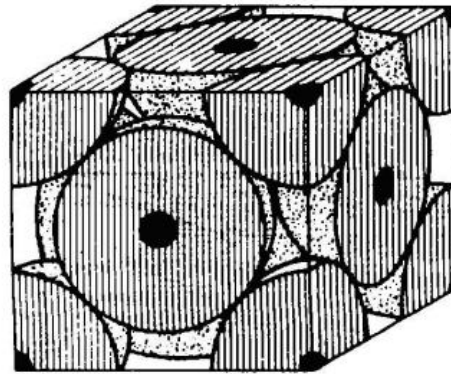
Tabela 1 - composição química da liga de Inconel 625

Elemento	Ni	Cr	C	Mn	Si	Fe	S	Al	Ti	P	Co	Nb	Mo
%peso	58,0	20,0	0,1	0,5	0,5	0,5	0,015	0	0,4	0,02	1	3,15	8,0
	min	-	max	max	max	max	max					-	-
		23,0										4,15	10,0

Fonte: Emersom, 2009.

As ligas de níquel possuem estrutura cristalina na forma CFC, como pode ser exemplificado na figura 1, e podem ser endurecidas por soluções sólidas ou precipitação de compostos metálicos. No primeiro caso, utiliza-se precipitação de carbonetos. Já no outro modo de precipitação utiliza-se elementos como o Ferro, Cromo, Molibidênio, Tungstênio, Titânio e Alumínio (ANTOSZCZSZYN, 2014).

Figura 1 - estrutura cristalina CFC



Fonte: Emersom, 2009.

2.2 Inconel 625

A liga Inconel 625 (Níquel-Cromo-Molibdênio) é patenteada pela empresa *SpecialsMetals Corporation* (ANTOSZCZSZYN, 2014).

Segundo Antoszczszyn (2014), a liga IN 625 possui relativa resistência à corrosão e elevada resistência mecânica, sem necessitar de tratamentos térmicos, além de dispor de uma ampla faixa de temperatura de trabalho, variando de ambientes criogênicos (valores negativos) até temperaturas próximas a 1000°C. Essas características fazem com que esse material seja utilizado amplamente na indústria química, como revestimentos de tubo, vasos de reação, colunas de destilação, trocadores de calor e válvulas.

O elemento químico utilizado como endurecedor por solução sólida nessa liga é o Nióbio, que associado ao Molibidênio promove a elevada resistência mecânica, além de possibilitar a formação de carbonetos. O Nióbio em elevadas concentrações pode formar precipitados Ni_3Nb , que possuem estrutura cristalina do tipo tetragonal de corpo centrado (TCC) ou ortorrômbica durante o tratamento térmico de envelhecimento. A estrutura TCC é capaz de promover um aumento da resistência mecânica do material, enquanto a ortorrômbica, pode provocar a diminuição da dureza. Uma porcentagem, em massa, maior que 15% de Cromo é capaz de elevar a resistência à oxidação para temperaturas superiores a 760° C (ANTOSZCZSZYN, 2014).

Segundo Antoszczszyn (2014), a tabela 2 descreve algumas propriedades mecânicas do IN 625.

Tabela 2 - propriedades mecânicas do Inconel 625

Forma e condição	Resistência à tração (MPa)	Limite de escoamento (MPa)	Dureza (Brinell)
Barra / Placa			
Laminado	827 - 1103	414 - 758	175 - 240
Recozido	827 - 1034	414 - 655	145 - 220
Solubilizado	724 - 896	290 - 414	116 - 194
Folha, /Tira			
Recozido	827 - 1034	414 - 621	145 - 240
Tubos /Est. a frio			
Recozido	827 - 965	414 - 517	-
Solubilizada	689 - 827	276 - 414	-

Fonte: Antoszczyszyn, 2014.

2.3 Usinagem

2.3.1 Conceito e histórico do fresamento

Segundo Santos; Sales (2007), a usinagem é definida como transformação de um material bruto em um produto final, através da retirada de cavacos. Esse processo pode ser dividido em convencional (retirada de cavaco se dá por meio de cisalhamento entre superfície e ferramenta de corte) e não convencional (plasma, laser, abrasivo, reações químicas).

O fresamento se difere das demais técnicas de usinagem pelo fato do corte ser intermitente, o cavaco gerado ser pequeno e ter espessura variável. No processo há dois movimentos principais: o de rotação da ferramenta e o de avanço. O movimento de avanço na maioria das vezes é realizado pela própria peça que está sendo usinada, porém, as máquinas mais modernas possuem a habilidade da ferramenta de corte realizar esse movimento também. A máquina que realiza essa operação é denominada de fresadora (CARVALHO, 2016).

Segundo Câmara (2008), há diversas classificações do processo de fresamento, sendo eles em relação à posição do eixo-árvore da máquina-ferramenta, a qual pode ser dividido em fresamento horizontal ou fresamento vertical (também denominado inclinado) ou em relação a disposição dos dentes, podendo rotular como fresamento tangencial ou fresamento frontal.

O fresamento tangencial é descrito como procedimento em que os dentes ativos estão localizados na superfície cilíndrica da ferramenta. Além disso, a superfície usinada está paralela ao eixo da máquina; nesse caso as fresas são denominadas de cilíndricas ou tangenciais. Já o fresamento frontal é representado quando os dentes ativos estão posicionados na superfície frontal da ferramenta de corte, e a superfície usinada está perpendicular ao eixo do equipamento; nesse caso as fresas são chamadas de frontais ou de topo (CÂMARA, 2008).

Segundo Câmara (2008), as operações de fresamento frontal mais importantes são:

- Fresamento de faceamento: a superfície formada pelo processo de usinagem é plana, e se dá pela associação de arestas de corte localizadas na periferia e na face da fresa, ou seja, tem como características formação de superfícies planas perpendiculares ao eixo de revolução da máquina. A figura 2 demonstra essa operação (CÂMARA, 2008).

Figura 2 - representações do fresamento de faceamento



- Fonte: Câmara, 2008.
- Fresamento de topo: o corte é gerado pelas arestas posicionadas na periferia da fresa (geralmente em um plano paralelo ao eixo da ferramenta) ou por arestas fixadas no topo da ferramenta. A figura 3 exemplifica o procedimento (CÂMARA, 2008).

Figura 3 - exemplificação do fresamento de topo

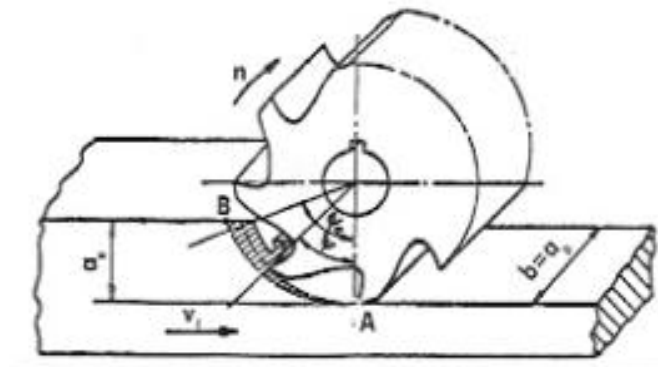


Fonte: Câmara, 2008.

Segundo Câmara (2008) o fresamento pode ser dividido em dois métodos, o discordante e o concordante.

O método discordante é aquele em que o sentido do movimento rotatório da ferramenta é contrário ao sentido do movimento de avanço. A espessura do corte é progressiva até atingir um valor máximo nesse caso, como pode ser demonstrado na figura 4. Há geração de forças que tendem a levantar a peça do local de fixação, o que exige que a peça esteja bem presa. No caso de usinagem de peças longas, esse método pode gerar vibrações indesejadas, capazes de prejudicar o acabamento superficial e a tolerância da peça usinada. No início do corte, quando a aresta toca a peça há um atrito elevado, aumentando a temperatura local. Quando a pressão de corte supera a resistência ao cisalhamento do material ocorre a remoção de cavaco (corte) em formatos de vírgula (CÂMARA, 2008).

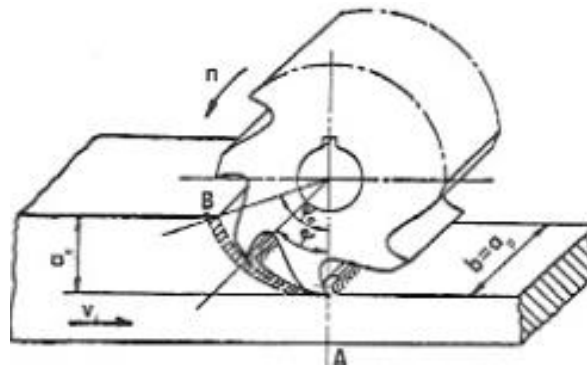
Figura 4 - representação do corte discordante no processo de fresamento



Fonte: Diniz, Marcondes e Coppini, 2000.

O método concordante ocorre quando há igualdade entre os sentidos do movimento de avanço e de rotação da fresa. Nesse caso o corte se inicia na espessura máxima do cavaco (reduz o fenômeno de abrasão) e forças geradas tentam a comprimir a peça contra a mesa. É indicado que se utilize esse método para usinar materiais com maior nível de deformação plástica, porém deve ser levado em conta que o impacto inicial de corte é maior que no caso anterior. A figura 5 revela a situação descrita (CÂMARA, 2008).

Figura 5 - representação do corte concordante no processo de fresamento



Fonte: Diniz, Marcondes e Coppini, 2000.

A ferramenta utilizada nesse processo de usinagem pode possuir grande quantidade de arestas de corte, variando de uma a cem. Esse fato é impactante em relação à remoção de material. A fresa pode ser definida como inteiriça ou com insertos. Na primeira a aresta de corte é constituída do mesmo material do restante da ferramenta, o que viabiliza obter ângulos de corte agudos, ou seja, gera menor esforço durante o corte. Geralmente esse tipo é utilizado em fresas de topo e fresa de disco. Já a segunda possui um corpo que pode variar entre alumínio, titânio ou de aço. A principal vantagem da fresa com insertos é a redução do custo de fabricação (CÂMARA, 2008).

2.3.2 Grandezas físicas e parâmetros de corte

Com base no conceito de usinagem, são fatores responsáveis para a retirada do cavaco o movimento relativo entre ferramenta e a peça, além de grandezas físicas tais como velocidade de corte, grandezas de corte e grandezas relativas ao cavaco (SANTOS; SALES, 2007).

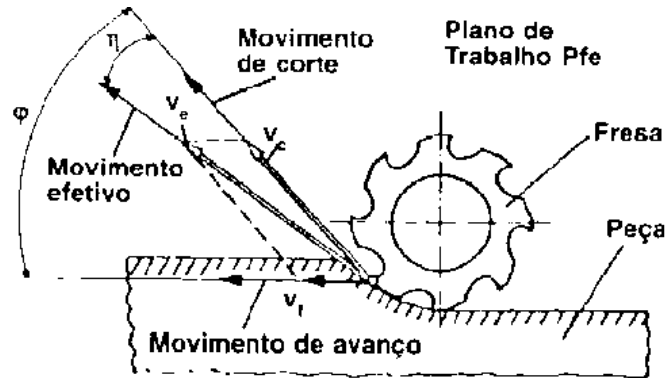
2.3.2.1 Movimentos

Segundo Santos e Sales (2007), os movimentos avaliados são os que levam em conta a aresta de corte da ferramenta e a peça, considerada estática. São divididos em dois grupos, os que retiram e os que não retiram cavaco. Os movimentos clássicos são:

- movimento de corte: movimento entre a peça e a ferramenta que resulta na retirada do cavaco, em uma única vez (SOUZA, 2012);
- movimento de avanço: associado ao movimento de corte resulta em uma retirada de cavaco contínua (SOUZA, 2012);
- movimento efetivo: resultante da execução concomitante dos movimentos de corte e avanço (SANTOS; SALES, 2007).

Esses movimentos são demonstrados por meio da figura 6.

Figura 6 - movimentos responsáveis pela retirada de cavaco no fresamento



Fonte: Diniz, Marcondes e Coppini, 2000.

2.3.2.2 Velocidades

Na usinagem algumas velocidades são importantes para controlar o processo, são elas: a velocidade de corte e avanço. A velocidade de corte é definida como velocidade da aresta de corte, sendo relevante a direção e sentido do corte. Já a velocidade de avanço é definida como velocidade de um ponto de referência da aresta da ferramenta, em relação ao avanço (SANTOS; SALES, 2007).

2.3.3 Geometria da cunha cortante

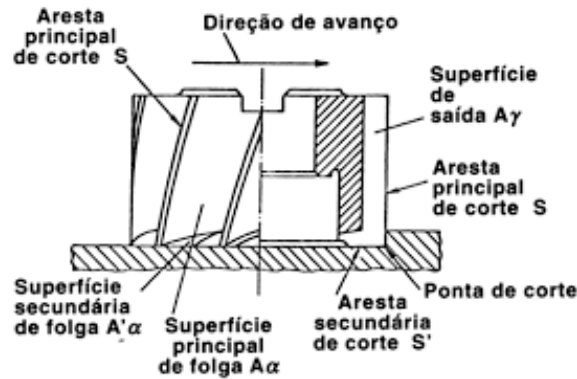
A geometria das ferramentas de corte possui influência no processo de usinagem, e sua composição, descrita pela norma da ABNT NBR 6163/80 é dada por superfícies de saída e de folga, aresta de corte (principal e secundária) e ponta de corte (SANTOS; SALES, 2007).

Define-se tais fatores como:

- superfície de saída: segundo Souza (2012), é a superfície da ferramenta onde há formação e deslizamento do cavaco;
- superfície de folga: segundo Santos e Sales (2007), a folga é definida como a distância de separação entre a superfície da ferramenta e a peça;
- aresta principal de corte: segundo Santos e Sales (2007) a aresta de corte que indica a direção principal de corte;
- aresta secundária de corte: segundo Santos e Sales (2007) nesse caso a cunha de corte aponta a direção contrária de corte;
- ponta de corte: é a ponta da ferramenta referente a interseção da aresta de corte principal e secundária (SOUZA, 2012).

A figura 7 demonstra os fatores descritos anteriormente.

Figura 7 - representação de uma ferramenta de corte utilizada no fresamento



Fonte: de Souza, 2016

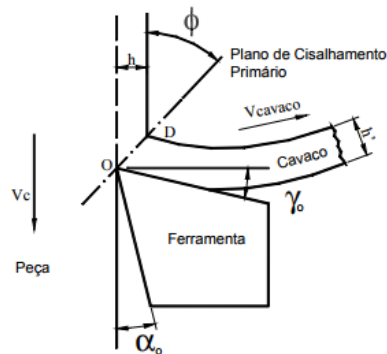
2.3.4 Mecanismos de formação do cavaco

Segundo Souza (2012) os fatores importantes no processo da usinagem, tais como desgaste da ferramenta, calor gerado, penetração do fluido de corte, segurança do operador e acabamento superficial da peça são diretamente influenciados pela formação do cavaco. O cavaco é formado por meio de esforços cisalhantes do material e o ângulo formado entre o plano cisalhante e a direção de corte é denominado de ângulo de cisalhamento. Esse ângulo será inversamente proporcional ao esforço de corte e a deformação do cavaco.

A deformação plástica atingida na usinagem é responsável pela formação do cavaco. Ao atingir um valor de deformação superior ao limite de resistência do material ocorrerá a ruptura do mesmo, devido ao cisalhamento gerado. Esse processo é cíclico, ou seja, logo após um cavaco ser partido, outro se formará na superfície (SOUZA, 2012).

Com base na teoria de Trent, é formada uma zona de aderência entre a interface cavaco-superfície de saída da ferramenta e em um segundo momento se configura uma zona de escorregamento entre a ferramenta e o cavaco, exemplificado na figura 8 (REIS, 2000).

Figura 8 - formação do cavaco



Fonte: (REIS, 2000).

Na zona de aderência o material que está em contato com a superfície da ferramenta se encontra em estado estagnado, havendo ainda um gradiente de velocidade ao longo da espessura do cavaco. Os principais fatores apontados para o surgimento dessa zona são as altas tensões de compressão, calor gerado, altas taxas de deformação e afinidades químicas entre a ferramenta e a peça usinada. Tais fatores promovem ligações químicas na interface (SANTOS; SALES, 2007).

A zona de escorregamento se inicia no momento em que a tensão de cisalhamento começa a decrescer e está localizada nos arredores da zona de aderência (SANTOS; SALES, 2007).

Segundo Santos e Sales (2007) os cavacos gerados podem ser classificados quanto ao tipo (contínuos, parcialmente contínuos, descontínuos e segmentados) e a forma (fita, helicoidal, espiral e lascas ou pedaços). Os cavacos segmentados são obtidos por meio da usinagem de materiais de baixa condutividade térmica ou em caso de extremas velocidades de corte. Já os demais sofrem influência da ductilidade do material e das condições de corte, sendo os contínuos obtidos geralmente em usinagem de materiais dúcteis e os descontínuos em materiais frágeis.

2.3.5 Ferramentas de corte

Segundo Santos e Sales (2007), ferramentas de corte devem possuir elevada dureza e resistência ao desgaste como principais requisitos, e é válido ressaltar que essas propriedades se conservem em temperaturas elevadas.

O aço ao carbono foi utilizado em larga escala até meados do século 19. Ele possui as propriedades requeridas na temperatura ambiente, porém há queda acentuada dos atributos a medida que a ferramenta é aquecida. Esses materiais perderam espaço com o desenvolvimento de ligas mais adequadas (MACHADO et al., 2009).

O aço rápido teve um grande destaque no processamento, visto que possibilitou alcançar maiores velocidades de corte, podendo assim aumentar a produtividade. Este material foi desenvolvido pela primeira vez por Taylor e White no ano de 1880, quando houve investigações nas composições químicas e tratamentos térmicos dos aços, visando um melhor desempenho, alterando as velocidades de corte de 5 m/min para 35 m/min. Esses materiais são obtidos por processos de fundição, laminação ou sinterização. As ferramentas são divididas em grupos a base de Tungstênio e grupos de Molibidênio (MACHADO et al., 2009).

Os aços rápidos ao contrário do aço ao carbono em elevadas temperaturas, cerca de 480 °C até 565 °C podem ter elevação da dureza. Isso ocorre devido à formação de carbonetos (elementos de liga formando ligações covalentes com o Carbono presente na matriz) (MACHADO et al., 2009).

O segundo grande avanço tecnológico na área foi o desenvolvimento do metal duro (também chamado de Widia), aproximadamente em 1890. A utilização de Cobalto, Tungstênio e Cromo possibilitou a utilização de ferramentas que poderiam ser utilizadas em velocidades de corte cerca de 25% maiores que as aplicadas na usinagem com aço rápido. Esse material possui elevados níveis de resistência ao desgaste, resistência mecânica e tenacidade. São fabricados por meio da metalurgia do pó, na qual se utiliza de uma combinação de vários minerais com elevado controle granulométrico e sinterização controlada (SANTOS; SALES, 2007).

Os cermetes são materiais compósitos, que possuem uma fase cerâmica (TiC, TiN ou TiCN) e uma matriz metálica de níquel ou molibidênio. Possui grande afinidade química com os materiais metálicos não ferrosos, devido a grande concentração de titânio. As ferramentas dessa classe possuem baixa condutividade térmica e elevado coeficiente de expansão volumétrica, o que tornam sua utilização viável em operações de acabamento, diminuindo assim as chances de falha da ferramenta (SANTOS; SALES, 2007).

Em geral, as ferramentas cerâmicas possuem como grandes características a elevada inércia química, resistência à abrasão e dureza a quente, refratariedade, baixa condutividade térmica e boa resistência à fluência. Porém geralmente possuem baixa tenacidade. Pode ser composta por basicamente alumina ou nitreto de silício. As cerâmicas a base de alumina podem ser reforçadas por carbeto de silício (*Whiskers*), resultando em um aumento da tenacidade da ferramenta, propiciando a utilização das ferramentas em cortes intermitentes. As ferramentas a base de nitreto de silício possuem baixo coeficiente de expansão térmica (diminui a ocorrência de trincas térmicas durante o corte), excelente resistência ao choque térmico, porém, não possuem fácil sinterização devido à alta densidade (MACHADO et al., 2009).

Segundo Santos e Sales (2007), a fim de obter melhores comportamentos e aumento da vida útil das ferramentas de corte utiliza-se a deposição de revestimentos. Os principais materiais de revestimentos utilizados são nitreto de titânio, carbeto de silício, óxido de alumínio e alguns tipos de carboneto. Os principais processos de deposição são o CVD e o PVD. O primeiro ocorre por meio de reações químicas em elevadas temperaturas (900 a 1100°C). Obtém-se um revestimento com tamanho médio de 10 micrômetros. Já o segundo ocorre em temperaturas mais baixas, próximo a 500°C e possibilita um revestimento mais fino. A deposição nesse caso ocorre por meio de vapores gerados em fornos com baixa pressão.

No caso do fresamento, as ferramentas de corte devem apresentar as seguintes propriedades: elevada dureza, tenacidade para evitar falha por fratura, alta resistência ao desgaste, alta resistência a compressão, alta resistência ao cisalhamento, alta resistência ao choque térmico, alta resistência ao impacto e ser inerte quimicamente, por se tratar de um processo intermitente em que haverá choques térmico e impacto (CÂMARA, 2008).

As ferramentas utilizadas no fresamento, por se tratar de um processo intermitente, são sujeitas a desgaste por lascamento, trincamento, fratura, deformação plástica, difusão/arrastamento de material e desgaste por abrasão. As falhas estão diretamente ligadas ao posicionamento correto da ferramenta, da utilização adequada do fluido de corte, da velocidade de corte, avanço e da relação entre o tempo ativo e inativo, ou seja, tempo que há corte e tempo que não há corte; além das propriedades mecânicas e térmicas do material cuja ferramenta foi produzida (CÂMARA 2008).

2.3.5.1 Desgaste da ferramenta de corte durante a usinagem de ligas de

Níquel

Nesse caso, há grande desgaste de entalhe na profundidade de corte associado à deformação plástica e oxidação. Outro fato que promove esse desgaste são as altas tensões de cisalhamento e baixa condutividade térmica do material (CÂMARA 2008).

Segundo Câmara (2008), a usinagem de níquel utilizando ferramentas de metal duro pode promover desgaste de flanco na aresta secundária de corte (relacionado à temperatura) e presença de sulcos desgastados por mecanismo de difusão, que podem causar falhas, vibração, baixa produtividade e deficiência no acabamento. Os cavacos gerados são propensos a aderir nessas ferramentas, devido à afinidade química.

2.3.6 Fluidos de corte

Segundo Santos e Sales (2007), os fluidos de corte possuem funções principais de refrigeração, remoção de cavaco e lubrificação das ferramentas de corte durante a usinagem. O mecanismo de atuação do fluido como lubrificante não é muito conhecido, porém Merchant (1950) e Postnikov (1967) estudaram a hipótese do lubrificante penetrar na ferramenta por meio da capilaridade e assim gerar um filme lubrificante de baixa tensão de cisalhamento na interface cavaco-ferramenta. Já o fenômeno de refrigerante é explicado pelo gradiente térmico na ferramenta, evitando, assim, o superaquecimento da mesma. As funções secundárias dos fluidos são a melhoria no acabamento superficial da peça usinada, auxílio a quebra e retirada de cavaco da zona de corte e proteção do sistema contra a corrosão atmosférica.

Em velocidades de corte reduzidas não há ocorrência de elevadas temperaturas na ferramenta, porém a refrigeração é de bastante relevância, visto que a lubrificação é indispensável a fim de evitar a formação de aresta postiça de corte. (MACHADO et al., 2009).

Os fluidos anti espumantes evitam a formação de espumas na região do corte, melhorando assim a visibilidade e otimizando a troca de calor. Os anti corrosivos atuam como protetores do sistema contra a corrosão. Os detergentes agem na limpeza do sistema, evitando a deposição de Iodo, lamas e borras. Os emulgadores minimizam a tensão superficial da água, de modo a formar uma emulsão de óleo na água. Os biocidas inibem a proliferação de

microrganismo. Por fim, os aditivos de extrema precisão aperfeiçoam a lubricidade dos fluidos fazendo com que esses atuem em temperaturas e pressões de corte elevadas (SANTOS; SALES, 2007).

Os lubrificantes, segundo Machado et al., (2009) podem ser classificados como líquidos aquosos (água, soluções químicas, emulsões), óleos (minerais, graxos, compostos, de extrema pressão ou de usos múltiplos), sólidos (grafite e bissulfeto) ou gasosos (ar, CO₂ e N₂), sendo a última inviável economicamente. A aplicação durante a usinagem deve ser feita na interface do cavaco-ferramenta, podendo ser com vazão de fluido variada. Os principais métodos de uso do fluido são: jorro do fluido à baixa pressão ou por gravidade, mínima quantidade de fluido (MQF) ou sistema de alta pressão.

O jorro do fluido à baixa pressão ou por gravidade é o mais utilizado, visto que é simples. Basicamente, o fluido escorre sobre a ferramenta/cavaco/peça e é arrastado para fora da interface cavaco-ferramenta, dispensando dispositivos especiais, como nos demais casos. A técnica de MQF leva em consideração efeitos ambientais, saúde do operador e custos. O jato é pulverizado sobre a superfície de saída da ferramenta em vazão mínima controlada. Por fim, o método de alta pressão tem o objetivo de quebrar o cavaco. Para isso utiliza-se um jato de fluido com pressão e vazão controlada em duas direções. A primeira sobre o cavaco e a segunda contra o cavaco, na superfície de saída da ferramenta. Resultados de pesquisas mostraram que pressão de 21 kgf/cm² obteve ótimos resultados na usinagem de superligas de níquel (SANTOS; SALES, 2007).

Segundo Santos e Sales (2007), as ligas de níquel são resistentes ao calor e apresentam dificuldades para serem usinadas, visto que demonstra influência severa do encruamento. Sendo assim, a utilização do enxofre livre como aditivo dos fluidos de corte faz-se necessária, porém deve-se tomar cuidado, uma vez que pode causar deterioração da peça.

2.3.7 Usinabilidade do Inconel e das ligas de níquel

O termo usinabilidade é descrito como a facilidade ou dificuldade de certo material ser usinado. Essa característica pode ser determinada pela composição e pelo estado da estrutura da liga. Para determinar esse fator utilizam-se quatro grandezas, sendo elas, vida da ferramenta, forças de corte, formação de cavaco e qualidade superficial (SOUZA, 2012).

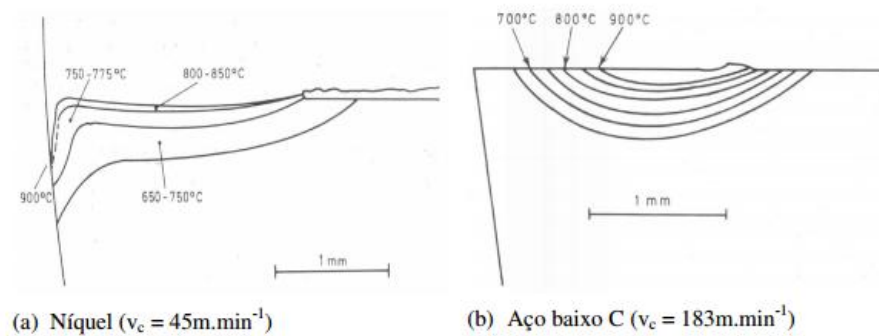
O Níquel apresenta comportamento dúctil, resistente a elevadas temperaturas, possui baixa condutividade térmica e sofre encruamento rapidamente. Tais fatores fazem com que durante a usinagem haja grande dificuldade da formação/quebra de cavaco (SOUZA, 2012).

Segundo Câmara (2008), estudos sobre a usinabilidade do Inconel 718, no ano de 1994, levaram em consideração operação de torneamento utilizando ferramenta de metal duro revestidas por CVD ou PVD. A partir dos resultados, percebeu-se que velocidades de corte e avanço utilizadas são muito inferiores quando comparado com a usinagem de um aço utilizando a mesma ferramenta de corte. Foi constatado, também, que as ferramentas revestidas por CVD apresentaram melhores resultados que a outra, mas ambos os resultados não foram satisfatórios.

Há estudos utilizando ferramentas de metal duro revestidas por TiN (PVD), e TiN + Al₂O₃ (CVD) em operação de fresamento de faceamento no Inconel 718 com velocidades de corte na faixa de 50 a 100 m.min⁻¹, utilizando avanços na faixa de 0,08 a 0,12 mm.z⁻¹, profundidade de corte de 2mm. Os resultados obtidos revelaram que as ferramentas que foram revestidas pela técnica CVD foram as que alcançaram melhores resultados, visto que o CVD possibilitou melhor adesão do revestimento na ferramenta de corte. Foi possível perceber também que o fresamento concordante apresentou resultados mais impactantes, já que o encruamento no início da formação do cavaco era menor (CÂMARA, 2008).

As forças utilizadas para usinar níquel puro são superiores as necessárias para usinar ferro puro. Isso se deve principalmente pela produção de elevadas temperaturas na zona de fluxo e uma não uniformidade da distribuição de temperatura na ferramenta. A figura 9 compara o gradiente de temperatura na superfície de saída de uma ferramenta de aço rápido na usinagem de níquel utilizando uma velocidade de corte de 45 m.min⁻¹ comparado com a usinagem de aço de baixo teor de carbono utilizando velocidade de corte no valor de 183 m.min⁻¹ (CÂMARA, 2008).

Figura 9 - comparação do gradiente térmico na superfície de saída da ferramenta (aço rápido) na usinagem



Fonte: Câmara, 2008.

Segundo Câmara (2008), há duas informações principais obtidas pelos gráficos. A primeira é que o níquel atinge temperaturas elevadas até mesmo em baixas velocidades de corte. A segunda é que não há região de baixa temperatura na aresta de corte no caso da usinagem de níquel. Nesse caso, ferramentas utilizadas na usinagem de níquel tendem a ser deformadas ao longo da aresta de corte, pois haverá tensões de compressão e elevadas temperaturas (mesmo em velocidades de corte baixas), o que acarretará em um processo de desgaste maior.

2.4 Caracterização

2.4.1 Por difração de Raios-X

O DRX é uma técnica que se baseia na dispersão dos raios X provocada pelos elétrons de um material, sem causar alterações nos comprimentos de onda ou perda de energia. Essa dispersão é causada por colisão dos raios X com os elétrons presentes no átomo do material. O elétron depois de excitado gera um campo eletromagnético de mesma frequência e mesmo comprimento de onda que os raios X incidentes. Após a colisão há uma mudança da direção de propagação da onda, seguindo a lei de Bragg. (SILVA, 2013).

A lei de Bragg é descrita pela equação 1 e demonstrada pela figura 10.

Equação 1 - Lei de Bragg

$$n\lambda = 2d \sin\theta$$

Onde:

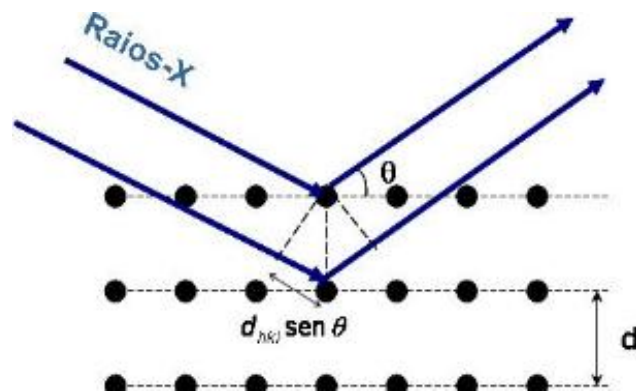
λ = comprimento de onda

d = distância interplanar

θ = ângulo de incidência

n = número inteiro correspondete à ordem de difração dos planos

Figura 10 - demonstração da lei de Bragg



Fonte: Prandel, 2016.

É válido ressaltar que na técnica as variáveis λ , n e θ são conhecidas, sendo d o único valor não determinado. (SILVA, 2013).

O difratômetro de raios-X possui um detector de ondas eletromagnéticas, cuja função é fornecer os pulsos recebidos durante o ensaio para uma eletrônica associada, que informa a análise acerca da intensidade do feixe difratado. Esse feixe é expresso por meio de picos em um gráfico Intensidade *versus* ângulo (2θ), ou seja, um difratograma. Cada pico do difratograma demonstra a reflexão dos raios X (segundo a lei de Bragg) nos planos cristalinos das fases presentes na amostra ensaiada, sendo assim possível caracterizar a amostra. (SILVA, 2013).

2.4.2 Análise de tensão residual

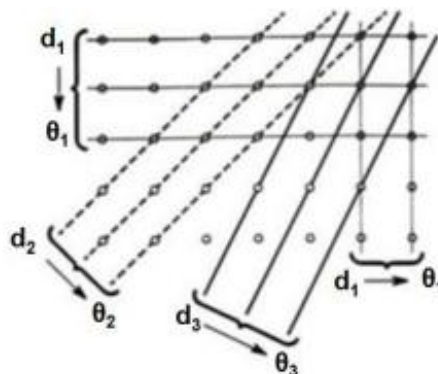
Segundo De Lorenzi (2015), tensões residuais são aquelas geradas por meio de gradiente de temperatura ou aplicação de forças externas, mesmo após a interrupção da causa, ou seja, são oriundas de deformação plástica não homogênea. Essas tensões podem ser classificadas em macro ou micro, e de acordo com os efeitos que essas geram na peça podem ser benéficas ou maléficas.

O ensaio de difração de raios-X é não destrutivo e tem a finalidade de medir a deformação por meio do estudo do espaçamento inter planar da estrutura cristalina do material em questão (DE LORENZI, 2015).

"O método de medição e de cálculo mais conhecido é chamado de método do seno (2ψ). Tal método usa alguns pressupostos em relação à condição do material, e utiliza baixa energia de radiação, o que significa baixa penetração, de forma a reduzir os esforços necessários para se obter uma determinação precisa das tensões residuais. O pressuposto básico é que em um metal policristalino os cristais estão desordenados. Em tal material, com granulometria fina e isento de tensões, o espaço entre os planos cristalinos não varia com a orientação destes planos. Entretanto, quando tensionado, sendo esta tensão aplicada ou residual, o espaçamento inter planar se altera do seu valor livre de tensões para um novo, correspondente à magnitude dessas tensões. Se a tensão aplicada for trativa, as distâncias entre os planos perpendiculares a estas aumentarão, enquanto que para os planos paralelos a este campo de tensões, essas distâncias vão diminuir" (DE LORENZI, 2015).

Segundo De Lorenzi (2015), utilizando um comprimento de onda constante para difratar sobre a superfície a ser estudada, o resultado será uma alteração do ângulo de difração. Isso ocorrerá devido a mudança no espaçamento dos cristais. A figura 11 retrata a variação do ângulo de difração citado anteriormente.

Figura 11 - variação do ângulo difratado de acordo com alteração da distância interplanar

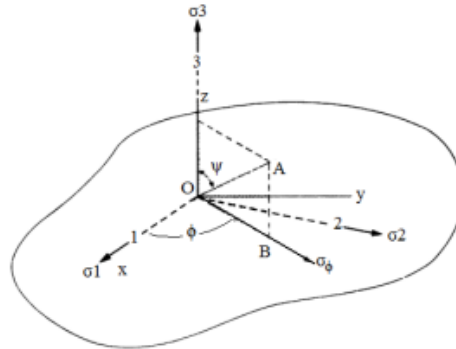


Fonte: De Lorenzi (2015).

Levando em conta a figura 12, percebe-se que as direções 1, 2 e 3 que são as principais, não possuem tensão cisalhante. Nesse caso as tensões presentes são de tração, σ_1 , σ_2 e σ_3

respectivamente. Portanto, deve se avaliar a variação do ângulo Ψ , visto que a difração encontrada é referente aos cristais perpendiculares à normal e os raios difratados (DE LORENZI, 2015).

Figura 12 - superfície de um material tensionado



Fonte: De Lorenzi (2015)

Segundo De Lorenzi (2015) de acordo com a teoria da elasticidade relacionada com as deformações e em função de 2Θ (ângulo encontrado no difratograma) tem-se a equação 2.

Equação 2 - teoria da elasticidade relacionada com deformação e em função do ângulo

$$\sigma = K * M$$

Onde:

$$K = - \left[\frac{E}{2(1 + \vartheta)} \right] * \cotan(\theta^\circ)$$

Sendo

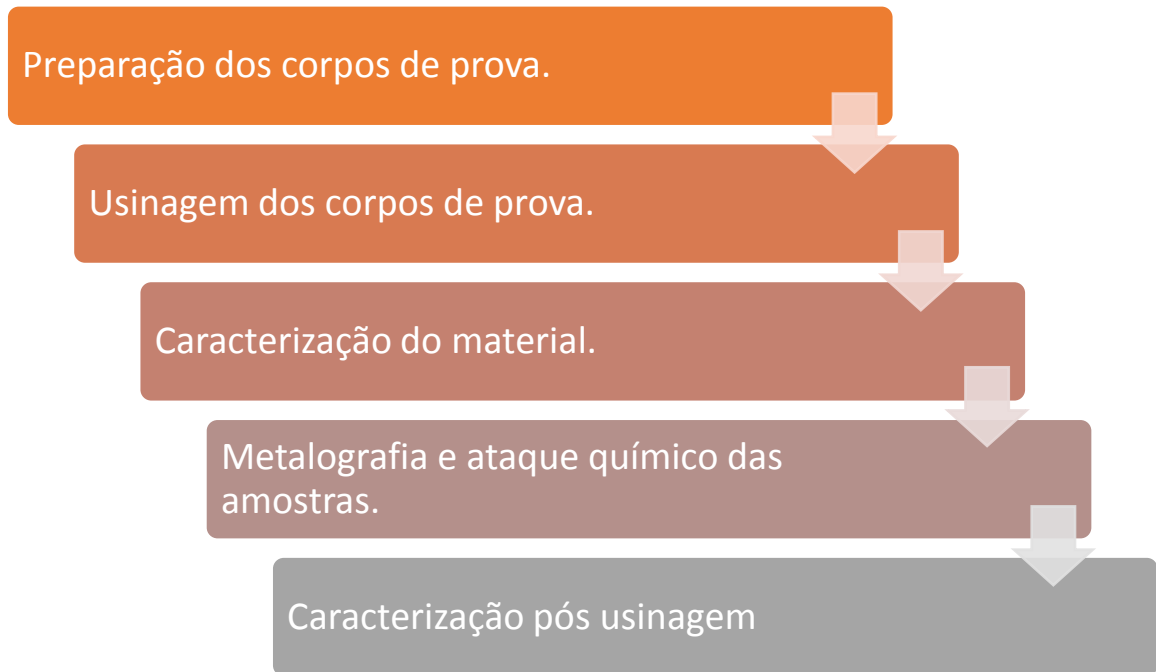
ϑ coeficiente de Poisson do material

E módulo de elasticidade do material

A penetração atingida dos raios-X depende diretamente do comprimento de onda e do ângulo de difração (desloca o pico da tensão, aumentando assim a precisão das medições), logo depende de qual material compõe o tubo de raios-X utilizado no equipamento (DE LORENZI, 2015).

3. METODOLOGIA

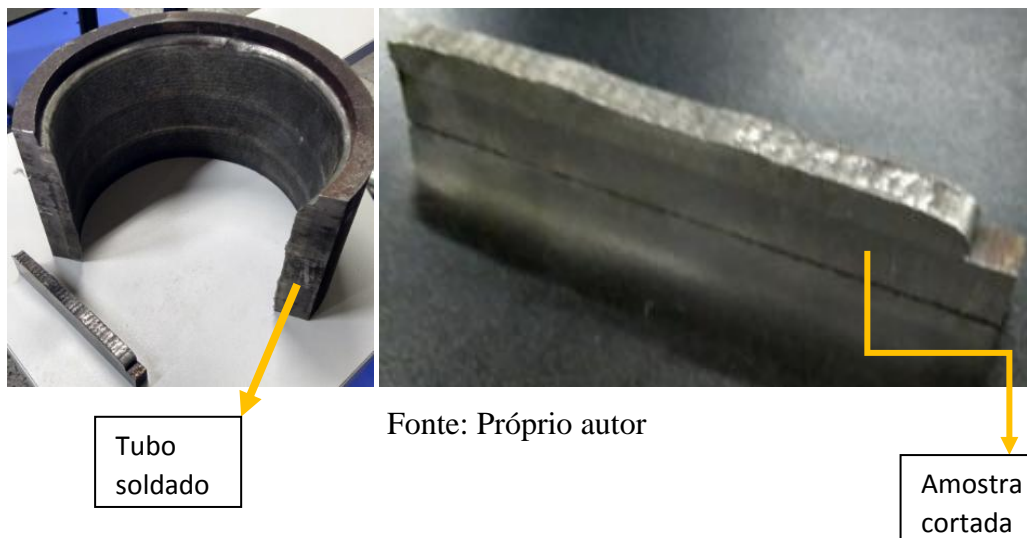
A metodologia utilizada para o desenvolvimento do trabalho em questão segue o seguinte fluxograma.



3.1 Preparação dos corpos de prova

As amostras foram obtidas por meio de um tubo no qual a liga estudada foi depositada na superfície interna da peça através do processo de soldagem, conforme demonstrado na figura 13. O tubo foi cortado utilizando uma serra de fita modelo Franho 1600, disponível no CEFET-MG, em amostras de 300 mm por 25mm.

Figura 13 - amostra obtida pelo tubo soldado



A preparação inicial ocorreu na fresadora Clever FH-4 utilizando avanço de $f = 55 \text{ mm / minuto}$ e profundidade de corte de $a_p = 1 \text{ mm}$, deixando assim as laterais dos corpos de prova perpendiculares. Em seguida, cortaram-se os corpos de prova no equipamento de corte modelo - Arocor 80, fazendo com que as amostras que futuramente seriam embutidas com comprimento de 20 mm e as que não fossem embutidas com 30 mm - limitação de tamanho devido aos equipamentos de embutimento a quente e difração de raios-X.

3.2 Usinagem dos corpos de prova

Após a preparação das amostras conforme descrito no tópico anterior, foi realizado a usinagem dos corpos de prova, utilizando a Fresadora CNC Romi Discovery 560 disponível no CEFET-MG. Nesta etapa, utilizou-se a ferramenta fresa de topo com diâmetro de 25 mm e 3 pastilhas Kyocera - BDMT11T308ER-JT modelo M para aços inoxidáveis. A refrigeração foi realizada por jarro utilizando óleo sintético Syntilo 9902 do fabricante Castrol.

As amostras foram processadas conforme a tabela 3, adotando os parâmetros de corte em função da ferramenta.

Tabela 3 - parâmetros utilizados na usinagem

Amostra	Velocidade de Corte (VC= m/min)	Profundidade (ap mm)	Avanço (f = mm/min)	RPM
Como recebido	-	-	-	-
Processada_1	50	1,0	130	636
Processada_2	50	1.5	130	636
Processada_3	100	1,0	130	1280
Processada_4	100	1,0	260	1280
Processada_5	300	1,0	130	3821

Fonte: Próprio autor

3.3 Caracterização do material por DRX

Realizou-se no equipamento de difração de raios-X análise de fase das amostras como recebido e processada_5, a fim de avaliar se houve alteração da estrutura cristalina por meio da usinagem. O ensaio foi realizado no equipamento Shimadzu - XRD-7000 X-ray

Diffractionmeter Maxima disponível no CEFET-MG e seguiu os parâmetros indicados na tabela 4.

Tabela 4 - parâmetros de ensaio

Parâmetro	Tipo
Fonte de radiação	Cobre
Ângulo de varredura	20 a 125
Velocidade	1°/minuto
Diferença de potencial	40 kV
Corrente	30 mA

Fonte: Próprio autor

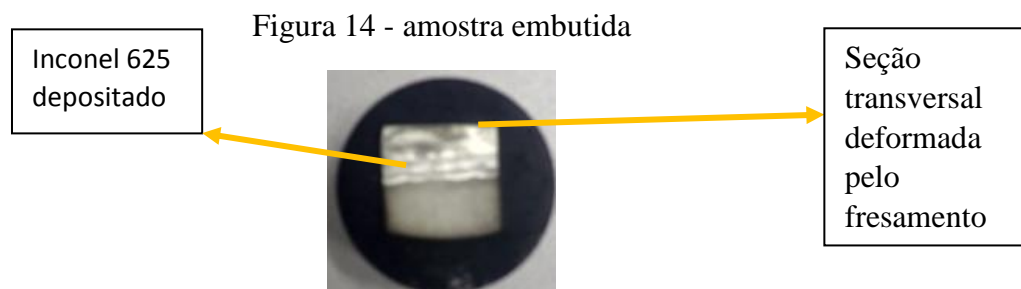
3.4 Espectroscopia

Outro ensaio utilizado no trabalho, em questão, foi o de análise química no equipamento Foundry-Master Xpert- fabricante Oxford Instruments, disponível no CEFET-MG. A amostra foi ensaiada três vezes, utilizando gás Argônio e com base em uma matriz cujo solvente é o Ferro.

3.5 Metalografia

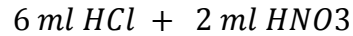
Após a usinagem as amostras de foram submetidas ao processo de embutimento a quente. Utilizou-se o equipamento Arotec - PRE 30Mi disponível no CEFET-MG e pelet de baquelite preto da marca Arotec. As amostras foram embutidas na seção transversal ao corte por usinagem.

Após o embutimento, as amostras foram polidas, utilizando lixas de granulometria mash 120, 240, 320, 400, 600 e 1200. Posteriormente poliram-se as amostras, utilizando pano com pasta de diamante de 9, 3 e 1 microns.



Fonte: Próprio autor

Realizou-se o ataque químico das amostras a fim de revelar a estrutura cristalina. Em um primeiro momento. Atacou-se por imersão utilizando Água Régia, com a proporção de:



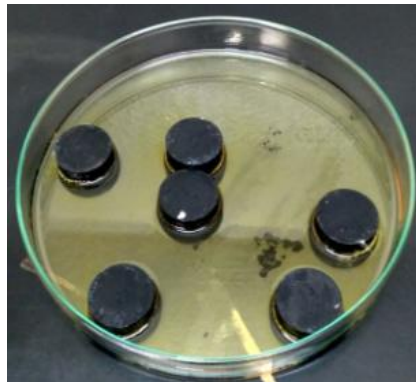
O ataque com Água Régia não foi efetivo, visto que não revelou a estrutura e ainda queimou a superfície do material.

Em um segundo momento, realizou-se o ataque químico das amostras utilizando o reagente Glicerégia, cuja composição é:



O ataque se deu por imersão, conforme figura 15, tendo duração de 41 minutos.

Figura 15 - ataque químico por imersão



Fonte: Próprio autor

3.6 Tensão residual no Inconel 625

As amostras foram submetidas ao ensaio de DRX a fim de avaliar o *stress*, ou seja, tensão residual. O ensaio foi realizado no equipamento Shimadzu - XRD-7000 X-ray Diffractometer Maxima, disponível no CEFET-MG utilizando os parâmetros indicados na tabela 5.

Tabela 5 - parâmetros do ensaio de tensão residual

Parâmetro	Tipo
Ângulo de varredura	Entre 122 e 135
Ângulo de análise	128°
Fonte de radiação	Cromo
Ângulo de incidência (Ψ)	0, 15, 27, 39 e 45
Tempo de ensaio	Contínuo

Fonte: Próprio autor

Cada amostra foi ensaiada três vezes e os resultados foram submetidos a métodos estatísticos a fim de obter maior confiabilidade.

3.7 Microscopia óptica

O ensaio de microestrutura óptica foi executado no microscópio óptico Kontrol modelo IM713 sobre ampliação de 400 vezes. Foram obtidas imagens de regiões aleatórias na superfície usinada, dando preferência para as regiões deformadas.

3.8 Ensaio de dureza

O ensaio de microdureza Vickers foi realizado no equipamento DUH - 211S - Dynamic Ultra Micro Hardness Tester - do fabricante Shimadzu, disponível no CEFET-MG. As amostras ensaiadas foram as, Como recebido, Processada_1 e Processada_2. Os parâmetros utilizados no ensaio estão descritos na tabela 6.

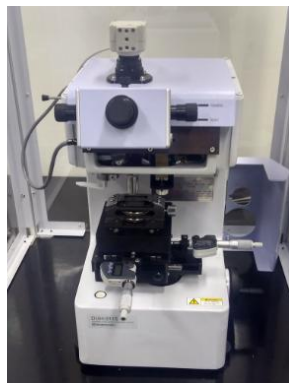
Tabela 6 - parâmetros utilizados no ensaio de microdureza

Parâmetros	Tipo
Força máxima	150 mN
Força mínima	0,2 mN
Velocidade	6,6620 mN/seg
Tempo de penetração após atingir a força máxima	5 segundos

Fonte: Próprio autor

Cada amostra foi ensaiada três vezes, medindo a dureza de regiões de microestrutura semelhante. As amostras Processada_1 e Processada_2 foram ensaiadas na região usinada, enquanto na amostra como recebida analisou-se a região central. Escolheu-se somente essas amostras, visto que foram as que tiveram maior (Processada_1) e menor (Processada_2) valores de tensão residual encontrados, enquanto a como recebida foi escolhida de modo a notar se há alteração de dureza por meio da usinagem. A figura 16 demonstra o equipamento que foi utilizado.

Figura 16 - equipamento de microdureza utilizado



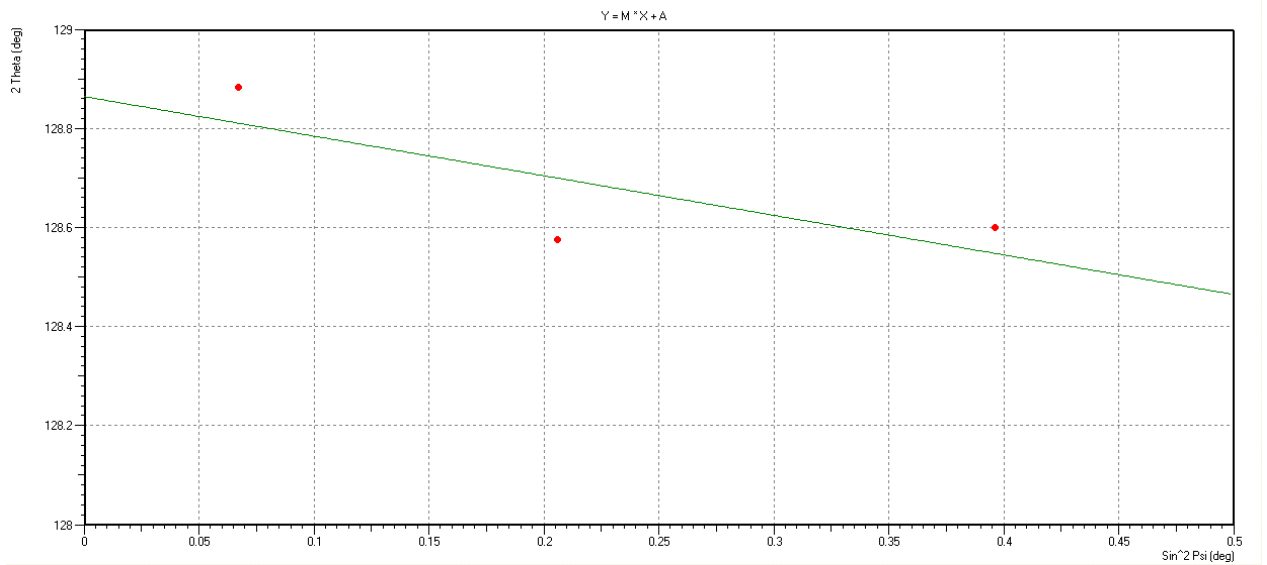
Fonte: Próprio autor

4. RESULTADOS

4.1 Ensaio de tensão residual

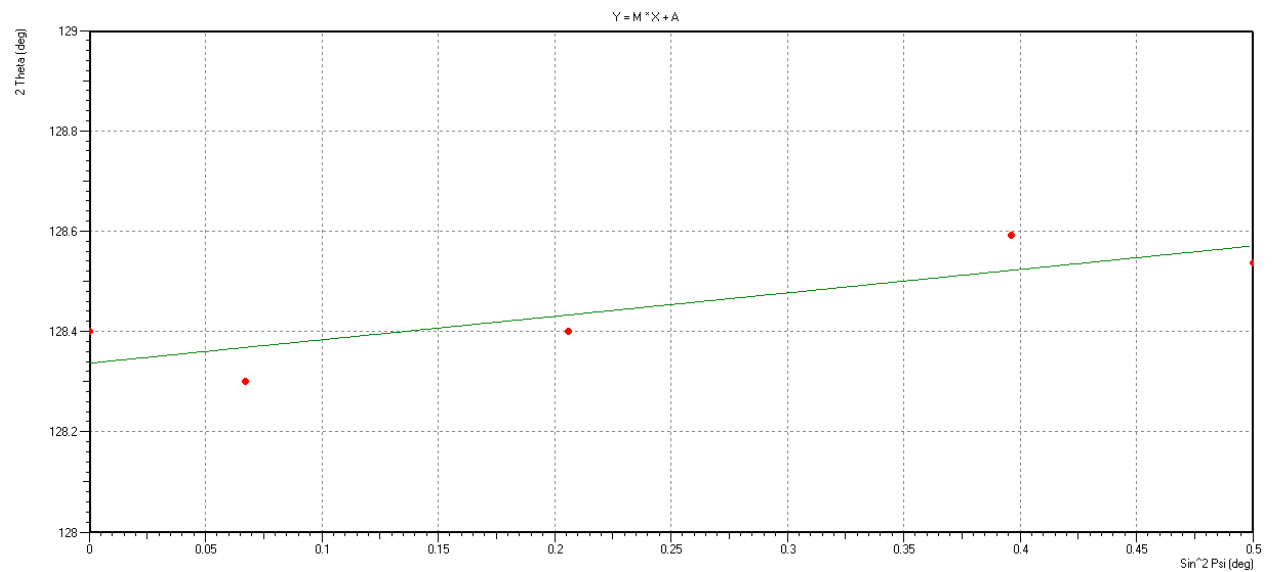
As figuras 17 e 18 exemplificam como foram obtidos os resultados do ensaio. O valor da tensão residual foi alcançado por meio da regressão linear dos pontos do gráfico resultante da técnica.

Figura 17 - gráfico obtido pelo ensaio de tensão residual da amostra Processada_2



Fonte: Próprio autor

Figura 18 - gráfico obtido pelo ensaio de tensão residual da amostra como recebido



Fonte: Próprio autor

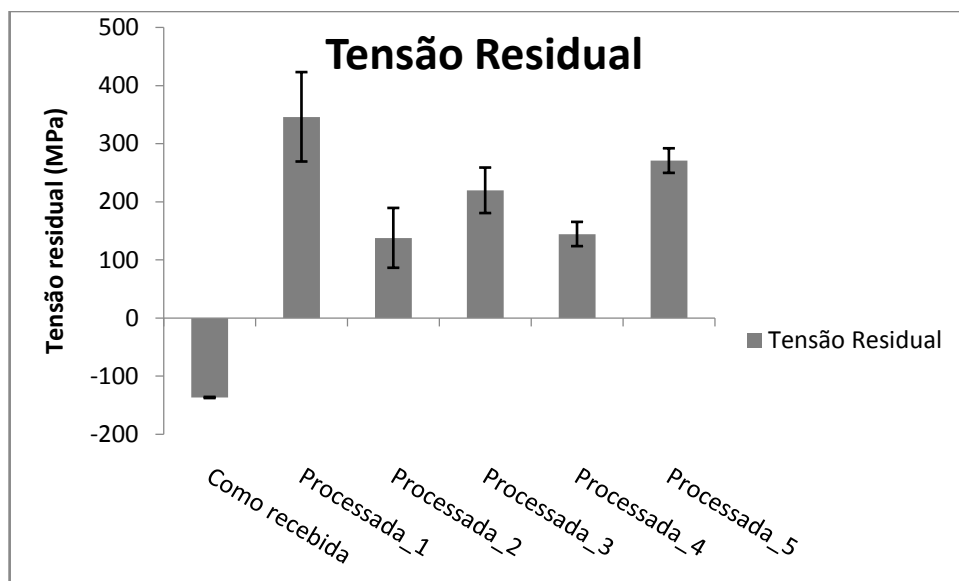
A tabela 7 e o gráfico 1 apresentam os resultados obtidos no ensaio de tensão residual.

Tabela 7- resultado de tensão residual

Amostra	Tensão 1 (MPa)	Tensão 2 (MPa)	Tensão 3 (MPa)	Média (MPa)	Desvio padrão
Como recebida	-	-	-139,876	-139,876	±1
Processada_1	426,870	192,190	418,748	345,936	±133,210
Processada_2	72,345	101,552	239,235	137,711	±89,127
Processada_3	152,637	288,146	217,777	219,52	±67,771
Processada_4	110,123	182,102	140,773	144,333	±36,121
Processada_5	239,740	261,109	311,129	270,659	±34,640

Fonte: Próprio autor

Gráfico 1 - resultado de tensão residual



Fonte: Próprio autor

Analisando os resultados percebe-se que a amostra como recebido, a qual não foi submetida ao processo de usinagem apresenta tensão residual negativa, ou seja, de compressão. Esse resultado é válido, visto que a soldagem gera contração da área processada, devido ao aquecimento. Essa amostra foi ensaiada três vezes, porém foi possível coletar apenas um valor, visto que a superfície se apresentava irregular, e esse fato dificultou a leitura do

difratômetro que não foi capaz de direcionar o feixe na superfície irregular. É válido ressaltar que a superfície do corpo de prova não foi preparada a fim gerar danos e interferir nos resultados.

Comparando o valor encontrado no ensaio da amostra como recebido com a amostra Processada_1, percebe-se que ocorreram deformações que provocam mudanças significativas de orientação do esforço da tensão residual, passando de compressiva para trativa. Este fenômeno foi percebido também nas demais condições, sendo plausível afirmar que durante a usinagem por fresamento ocorrem deformação e incidência de tensões na superfície.

De acordo com o gráfico 1 percebe-se uma discrepância significativa na repetição dos resultados. É fato que a leitura de tensão residual é muito sensível, logo, pode ser atribuído tal acontecimento ao posicionamento no porta amostras ou até mesmo à heterogeneidade de elementos em regiões deste material, onde incide-se os feixes de raios-X, sendo este fenômeno não analisado neste trabalho. Com isso, optou-se por utilizar a média para análise dos demais resultados.

A diferença de valor de tensão residual encontrada entre a amostra como recebido e a Processada_1 foi de -139 MPa para 345,9 MPa. A amostra Processada_2 em relação a Processada_1 sofreu elevação no $a_p = 1$ mm para $a_p = 1,5$ mm, permanecendo os demais parâmetros constantes. Assim, podemos avaliar o parâmetro a_p como inversamente proporcional a tensão, ou seja, em profundidades menores ocorrem maiores tensões residuais de tração na superfície, sendo a amostra Processada_1 com 345,9 MPa e a Processada_2 com 137,71 Mpa, obtendo diferença de 208,1 Mpa.

Analisando os resultados obtidos entre amostra Processada_1 e Processada_3 percebe-se que o valor encontrado é inversamente proporcional a velocidade de corte, ou seja, em velocidades maiores obteve-se menor valor de tensão. Essa comparação foi válida, visto que entre os corpos ensaiados alterou-se somente a velocidade de corte. Porém, comparando a Processada_3 com Processada_5, percebe-se que o aumento da velocidade de corte aumentou também a tensão residual, demonstrando comportamento diretamente proporcional entre V_c e tensão residual.

Por fim, analisando a influência do avanço, pode-se comparar as amostras Processadas_3 e Processada_4, visto que entre esses dois corpos de prova houve alteração somente no avanço (f). Percebe-se que nesse caso o avanço tem comportamento inversamente proporcional a tensão residual, ou seja, com o aumento do avanço obtém tensões menores.

Em relação aos resultados obtidos, pode ser percebido que o maior resultado de tensão residual foi encontrado em condição de usinagem de menores velocidade de corte, menores ap e menores avanço, quando comparado com os demais. Esse resultado é coerente se pensar que nessas condições o arrancamento de material se deu de forma dinâmica e lenta, logo houve mais tempo para deformar o material e causar aumento da tensão residual.

4.2 Análise química

A tabela 8 ilustra o resultado de análise química obtido pela técnica de espectroscopia por emissão óptica.

Tabela 8 - análise química do Inconel 625

Elemento	Resultado
Fe	15.7 %
C	0.06 %
Si	0.14 %
Mn	0.24 %
P	0.02 %
S	0.02 %
Cr	17.0%
Mo	9.69%
Ni	> 52.0%
Al	0.19%
Co	0.04%
Cu	0.01%
Nb	2.91%
Ti	0.14%
V	0.03%

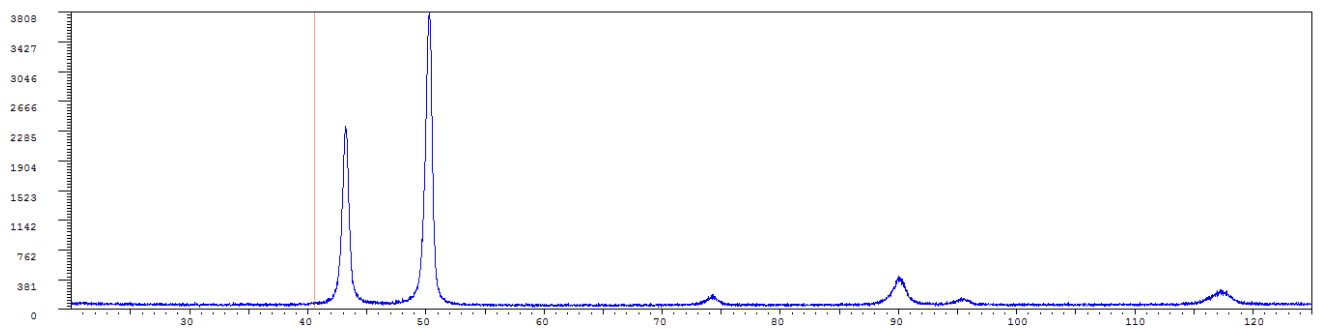
Fonte: Próprio autor

Os resultados encontrados na tabela 8 podem ter alguma incoerência, devido ao espectrômetro disponível no CEFET-MG analisa ligas ferrosas somente em que o Fe é o elemento em maior quantidade sendo o solvente. Porém o resultado pode ser utilizado com aproximação considerada aceitando um nível de confiabilidade bom por conhecer a origem do material, além de estar equivalente aos resultados por Emerson (2009).

4.3 Difração de raios-X

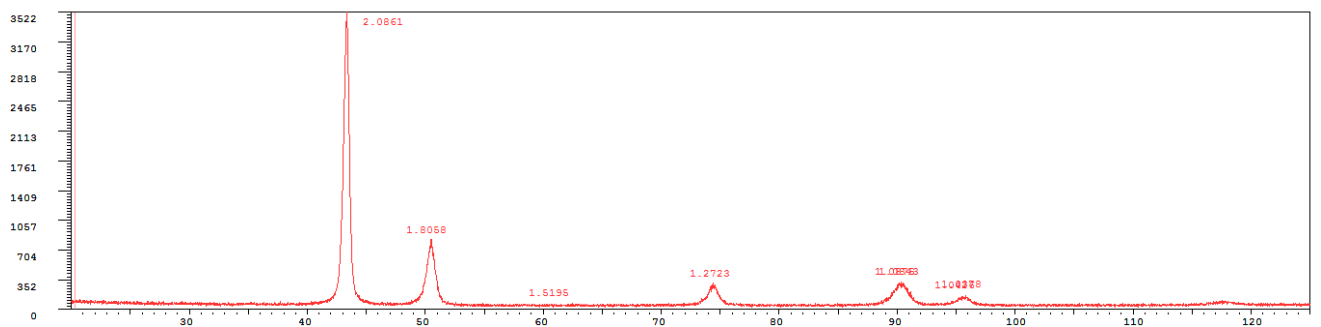
Os resultados encontrados na difração por raios-X são exibidos nos figuras 19 e 20.

Figura 19 - difratograma amostra não usinada



Fonte: Próprio autor

Figura 20 - difratograma amostra usinada



Fonte: Próprio autor

Com base na literatura é possível afirmar que os picos encontrados em ambos difratogramas são da Austenita ($2\theta = 43$) e Ferrita ($2\theta = 50$). Por meio desse resultado e o da Espectroscopia é possível inferir que o material trata-se realmente do Inconel 625.

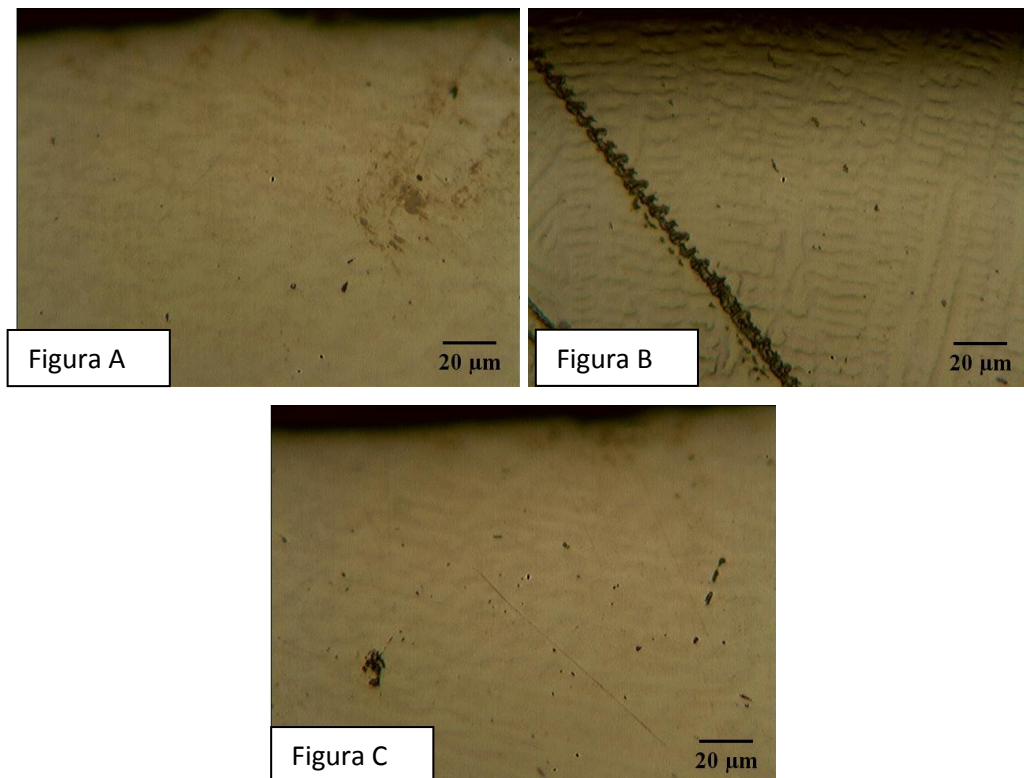
Em relação aos difratogramas percebe-se que após a usinagem o pico referente à Austenita aumentou a intensidade enquanto o da ferrita diminuiu a intensidade significativamente. Já o

pico referente a $2\theta=117$ não foi encontrado. Por fim os picos referente a $2\theta=74$, $2\theta=90$ e $2\theta=96$ não sofreram alterações significativas. Esses resultados comprovam que houve alterações microestruturais devido ao fresamento.

4.4 Microscopia Óptica

A figura 21 retrata a morfologia da microestrutura referente à amostra como recebido. As figuras 20 a 26 retratam a morfologia da microestrutura referente à zona submetida ao fresamento da amostra Processada_1 até a amostra Processada_5.

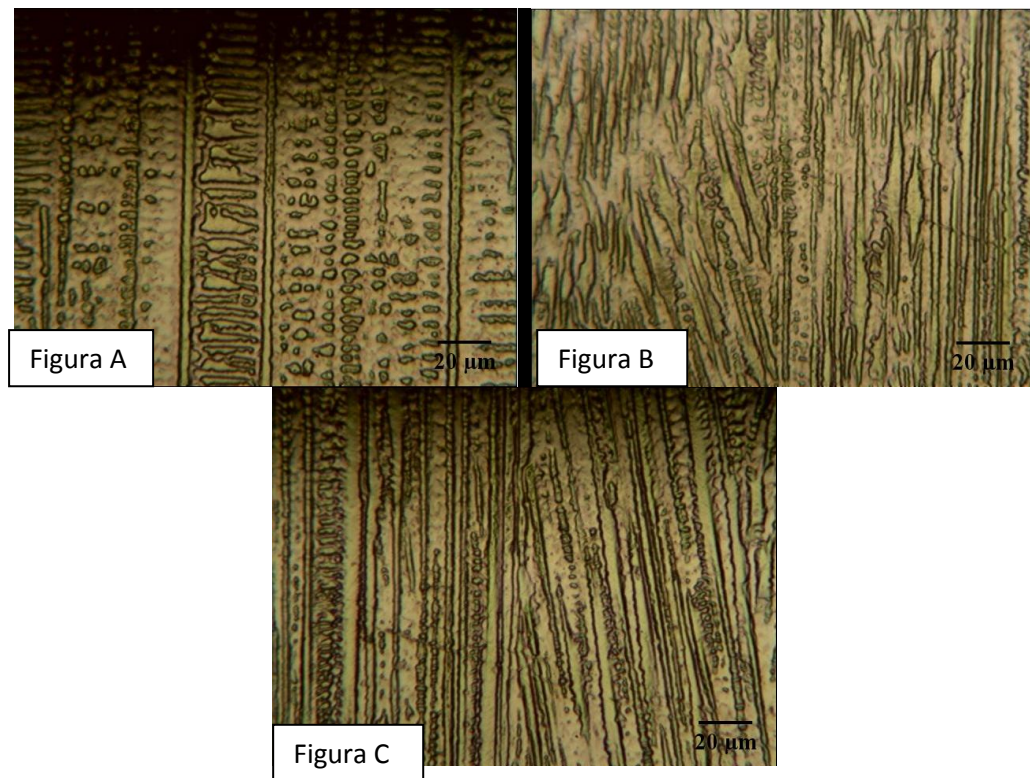
Figura 21 - micrografia amostra como recebido ampliação 400 vezes



Fonte: Próprio autor

Em relação à amostra Como recebido percebe-se que como não houve usinagem, a microestrutura permaneceu intacta por toda a superfície, sendo perceptível a homogeneidade da estrutura. Já nas demais amostras é possível notar que houve deformação plástica, visto que as dentritas sofreram modificações.

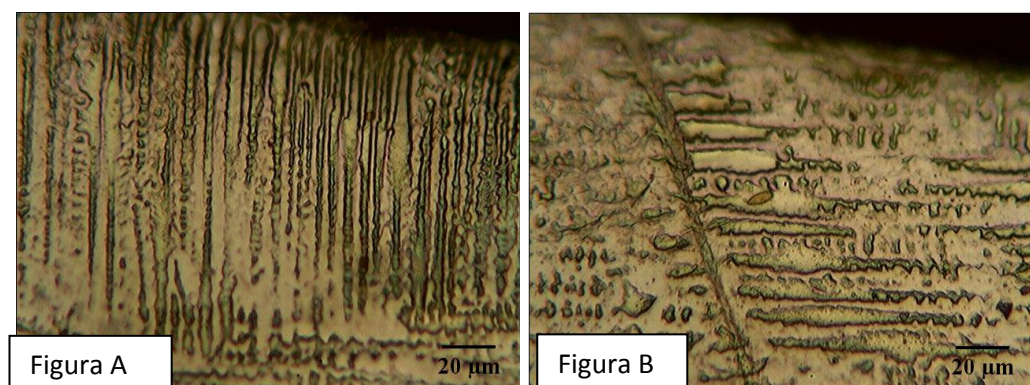
Figura 22 - micrografia da amostra Processada_1 ampliação 400 vezes



Fonte: Próprio autor

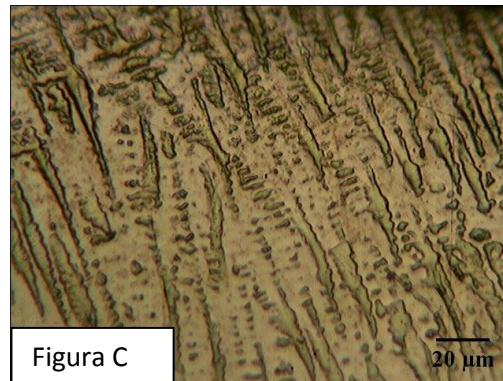
Na amostra Processada_1 nota-se que a deformação se encontra no sentido vertical, ou seja, perpendicular ao sentido de corte. Provavelmente essa deformação é devido ao aquecimento e ao arrancamento de material.

Figura 23 - microscopia da amostra Processada_2 400 vezes



Fonte: Próprio autor

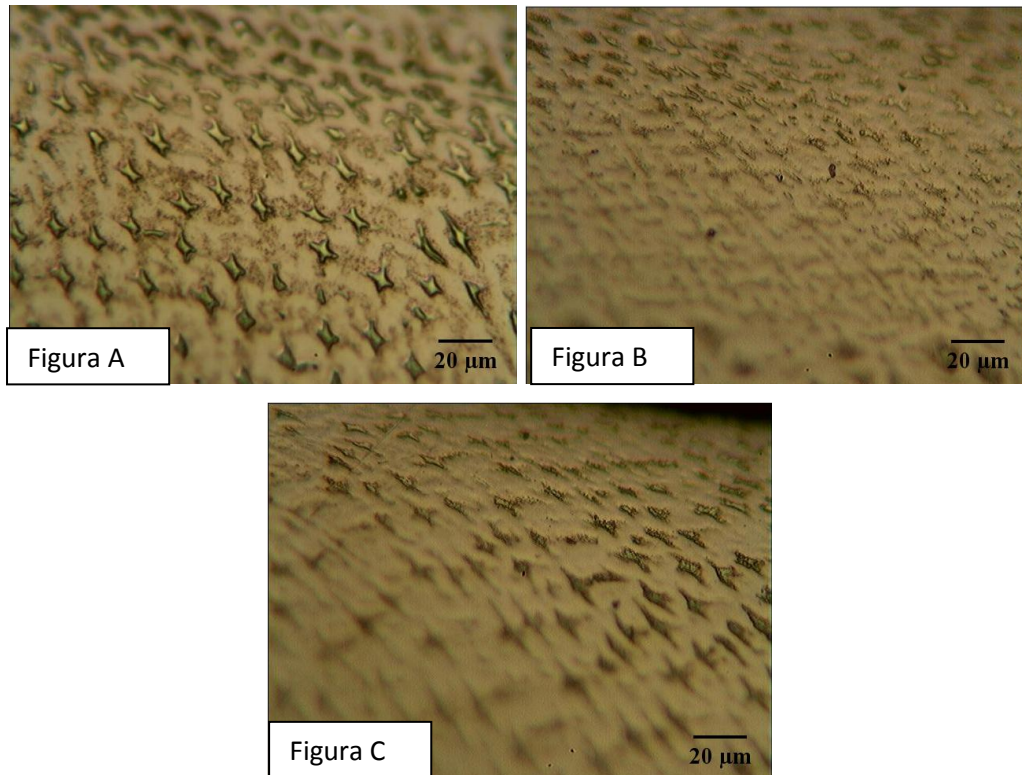
Figura 23 - microscopia da amostra Processada_2 ampliação 400 vezes



Fonte: Próprio autor

Na amostra Processada_2 inicialmente a deformação estava semelhante a encontrada na situação 1. Porém ao verificar na extensão do corte, percebe-se que há modificação no sentido da deformação, obtendo imagens em que a deformação passa a ser paralela ao sentido de usinagem.

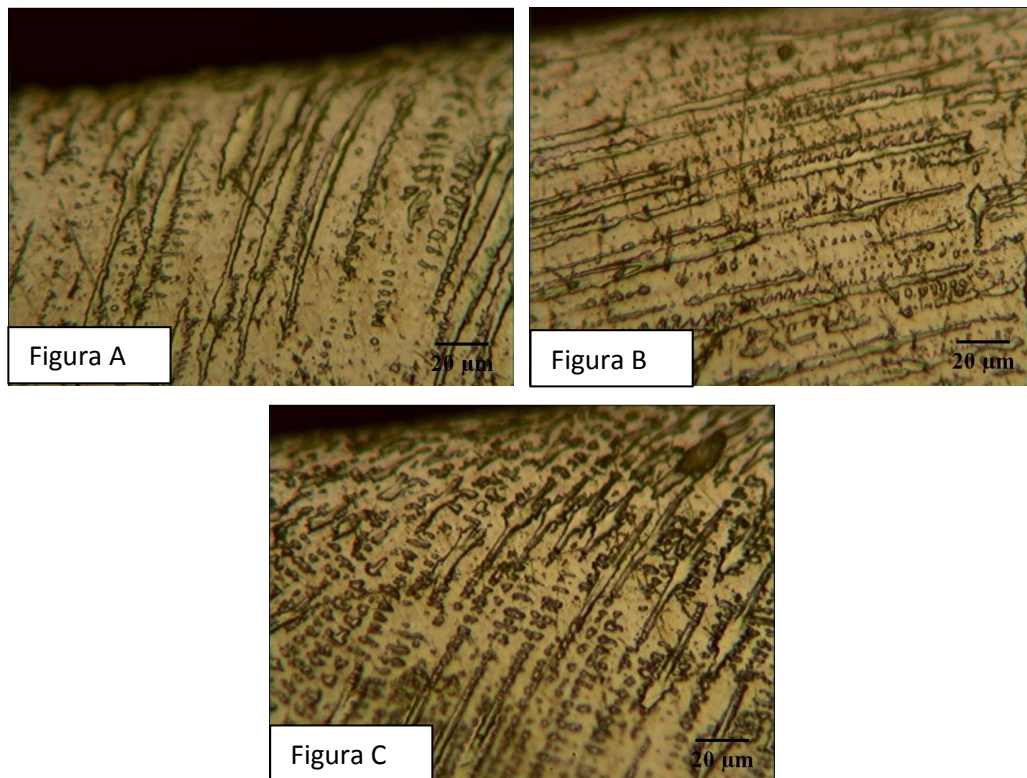
Figura 24 - microscopia amostra Processada_3 ampliação 400 vezes



Fonte: Próprio autor

Já na amostra Processada_3 é possível perceber que a deformação encontrada nessa situação foi totalmente diferente das demais amostras. As dentritas não se encontravam inicialmente alongadas, mas sim em formatos de losangos. Com o distanciamento da região inicial da usinagem percebeu-se que as dentritas começaram a sofrer deformação alongacional, tendo comportamento semelhante ao das demais amostras, excetuando a amostra Como recebido.

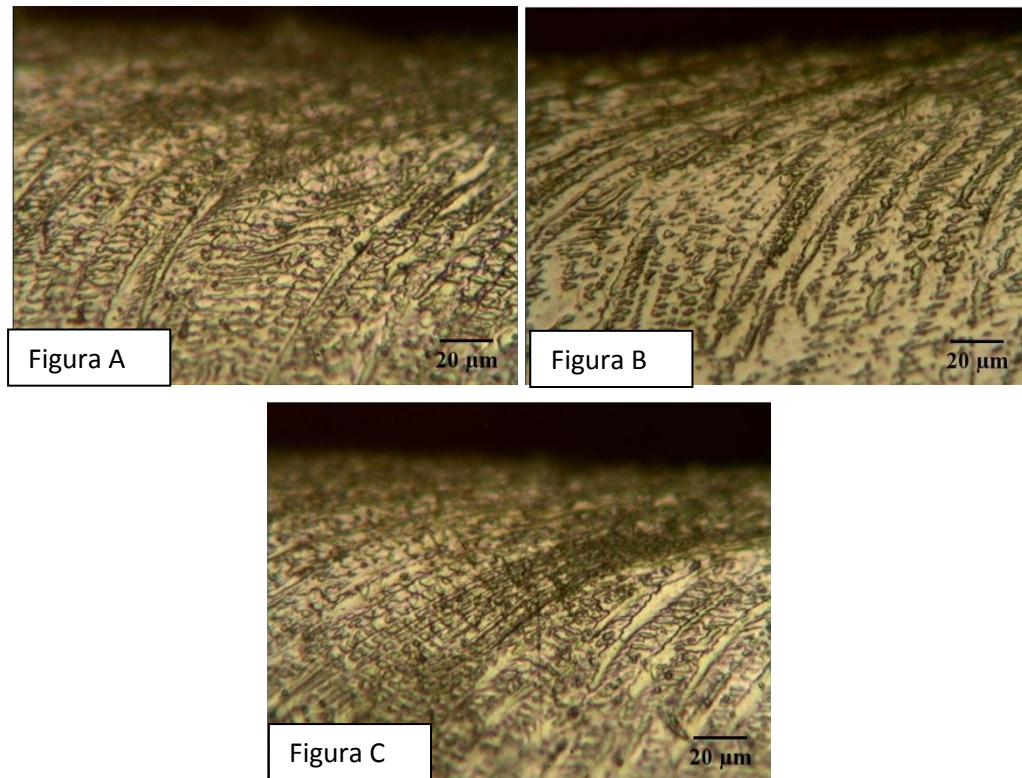
Figura 25 - microscopia da amostra Processada_4 ampliação de 400 vezes



Fonte: Próprio autor

A amostra Processada_4 por sua vez teve comportamento semelhante ao da amostra Processada_2, visto que inicialmente obteve deformação no sentido perpendicular ao corte, porém com o decorrer do processo de usinagem a deformação passou a ser paralela ao sentido de corte. A diferença encontrada para a amostra Processada_2 é a densidade de deformação, já que na amostra Processada_4 o número de dentritas deformadas foi muito menor.

Figura 26 - microscopia amostra Processada_5 ampliação 400 vezes



Fonte: Próprio autor

Por fim, a amostra Processada_5 foi a que mais sofreu deformação, visto que a densidade de dentritas deformadas foi a maior dentre as demais amostras. Percebe-se que próximo a região de usinagem há muitas dentritas deformadas no sentido paralelo ao corte, e que essas estão muito próximas umas das outras. Distanciando um pouco da região usinada (caminhando para o interior da amostra) nota-se que as dentritas vão se distanciando uma das outras, até que elas começam a sofrer alteração no sentido de deformação e começam a ter comportamento de deformação no sentido perpendicular ao sentido de usinagem.

4.5 Micro dureza

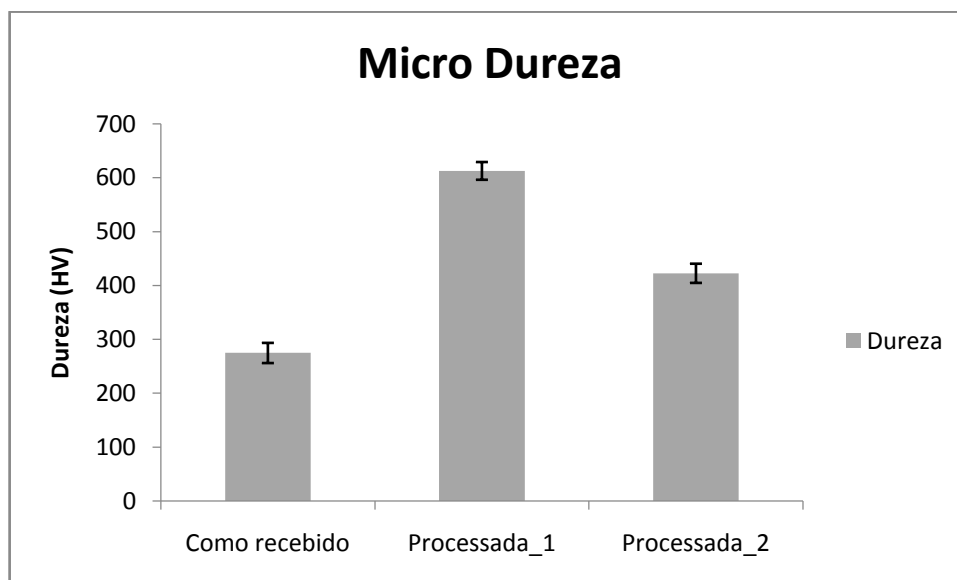
Os resultados obtidos pelo ensaio de microdureza estão descritos na tabela 9.

Tabela 9 - resultados de microdureza obtidos

Amostra	Ensaio 1 (HV)	Ensaio 2 (HV)	Ensaio 3 (HV)	Média (HV)	Desvio Padrão
Como recebido	264,061	249,396	311,403	274,95	±32
Processada_1	644,720	603,360	590,081	612,72	±28
Processada_2	454,037	421,784	392,399	422,74	±31

Fonte: Próprio autor

Gráfico 2 - resultados obtidos no ensaio de microdureza

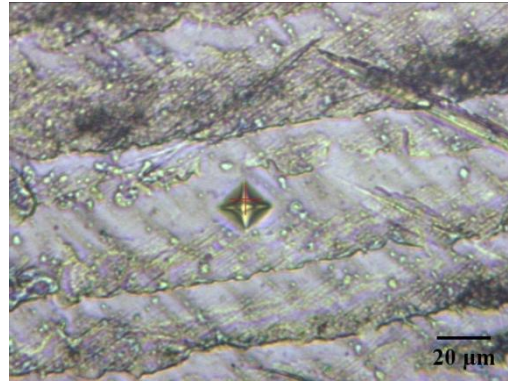


Fonte: Próprio autor

A partir dos resultados encontrados percebe-se que a usinagem causou alterações na dureza dos corpos de prova, provavelmente devido à tensão residual gerada pela deformação plástica. Isso pode ser confirmado pelo aumento de dureza encontrado nas amostras Processada_1 e Processada_2 em relação a como recebido. Percebe-se também a quanto maior a tensão residual, maior a dureza obtida.

A figura 27 ilustra a microestrutura e o formato da endentação gerada pelo penetrador durante o ensaio.

Figura 27 - endentação formada na amostra como recebida no ensaio de microdureza



Fonte: Próprio autor

5. CONCLUSÃO

- Com base nos resultados percebe-se que o Inconel 625 é um material bastante suscetível à deformação plástica e que pode ter grandes alterações microestruturais em diversas condições de usinagem.
- Notou-se que a velocidade de corte possui influência inversamente proporcional em relação a deformação plástica, ou seja, quanto menor a velocidade de corte, fixando os demais parâmetros, maior a tensão residual e dureza obtida nos ensaios.
- Percebeu-se que a profundidade de corte possui influência inversamente proporcional em relação a deformação plástica, ou seja, quanto menor a profundidade de corte, fixando os demais parâmetros, maior a tensão residual e dureza obtida nos ensaios.
- Verificou-se que o avanço possui influência inversamente proporcional em relação a deformação plástica, ou seja, quanto menor o avanço, fixando os demais parâmetros, maior a tensão residual e dureza obtida nos ensaios
- Notou-se também por meio dos ensaios de microscopia óptica que a usinagem causou alterações microestruturais do Inconel 625, sendo possível observar em algumas regiões a deformação plástica.
- A partir dos ensaios realizados no presente trabalho, pode se concluir que a condição em que houve maior tensão residual foi a de menor velocidade de corte, profundidade de corte e avanço. Isso implica que a deformação obtida nesse caso foi mais lenta. Desse modo houve maior tempo e maior distribuição da tensão, acarretando maior deformação plástica, ou seja, maior arrancamento.
- Por fim, observando os resultados de tensão residual e análise microestrutural percebe-se que em maiores deformações obteve-se maiores durezas, ou seja, a deformação teve comportamento diretamente proporcional a tensão residual (deformação plástica).

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Visto os resultados encontrados e a disponibilidade de material para ser estudado, é possível dar seqüência na linha de estudo, focando em analisar condições de tratamentos térmicos para estabelecer o retorno das condições iniciais após a usinagem e avaliar a interferência de tratamentos térmicos efetuados antes da usinagem, comparando com os resultados encontrados no presente trabalho.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANTOSZCZSZYN, Tiago José. **Revestimento de liga de Níquel Inconel 625 por plasma com arco transferido (PTA) sobre aços API 5L X70 e AISI 316L**. 2014. 80 p. (Engenharia mecânica) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014. Disponível em: <http://www.pgmecc.ufpr.br/dissertacoes/dissertacao_159_tiago_jose_antoszczyszyn.pdf>. Acesso em: 10 set. 2016.

BARBOSA, Rodrigo da Silva. **Avaliação dos esforços de corte no fresamento frontal da liga de alumínio-silício (A356) quando mantido constante a produção de peças**. 2015. 82 f. pós-graduação (Mestrado em Engenharia mecânica)- Universidade Federal de São João Del Rei, São João Del Rei, 2014. Disponível em: <<https://www.ufsj.edu.br/portal2-repositorio/File/ppmec/Rodrigo%20Barbosa.pdf>>. Acesso em: 14 nov. 2017.

CÂMARA, Marcelo Araujo. **Influência do ângulo de posição sobre o fresamento frontal de níquel puro com insertos de metal duro**. 2008. 94 p. Programa de pós-graduação em engenharia mecânica (Engenharia mecânica) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008. Disponível em:<<http://livros01.livrosgratis.com.br/cp062389.pdf>>. Acesso em: 05 nov. 2016.

CARVALHO, Bruno. **Fresamento**. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAARMgAD/fresamento#comments>>. Acesso em: 05 nov. 2016.

DE LORENZI, Mariana Sgamaro De Lorenzi. **Avaliação de tensões residuais pelo método de Difração de Raios-X em revestimentos de Inconel 625 obtidos por HVOF**. 2015. 79 p. Programa de Pós-Graduação (Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais)- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/132702/000984034.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 31 out. 2017.

DE MATTOS, Cassiana Santos ; VAREJÃO, Tatiana Oliveira . **Usinagem da liga Inconel 625 para a indústria de petróleo do estado do Espírito Santo**. 2009. 44 f. Tese (Pós-graduação)- Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2009. Disponível em:

<http://mecanica.ufes.br/sites/engenhariamecanica.ufes.br/files/field/anexo/tatiana_e_cassiana.pdf>. Acesso em: 14 nov. 2017.

DE MELO, Miguel Cabral; GOMES, Ìverton Rodrigo Barbosa; DE SOUZA, Luiz Guilherme Meira. Caracterização de amostras por microscopia óptica e por microdureza de materiais metálicos ferrosos e não ferrosos. **Scientia: Revista de Educação, Ciência e Tecnologia do IFRS**, Porto Alegre, v. 2, n. 3, p. 48-61, dez. 2015.

DE SOUZA, André João. **AULA 7 –Geometria da ferramenta de corte**. Disponível em:<<https://chasqueweb.ufrgs.br/~ajsouza/ApostilaUsinagem-Aula07-p.45-51.pdf>>. Acesso em: 03 out. 2016.

DINIZ, Anselmo Eduardo; MARCONDES, Francisco Carlos; COPPINI, Nivaldo Lemos. Fresamento. In: DINIZ, Anselmo Eduardo; MARCONDES, Francisco Carlos; COPPINI, Nivaldo Lemos. Tecnologia da usinagem dos materiais. São Paulo: Mm Editora, 2000. cap. 12, p. 195-204.

DUARTE, Lauren da Cunha et al. **Aplicações de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Sistema de Energia Dispersiva (EDS) no Estudo de Gemas: exemplos brasileiros**. 2003. 15 p. Pós-graduação (Pós-graduação em Geociências) - UFRGS, Porto Alegre, 2003. Disponível em: <<http://www.ufrgs.br/igeo/pesquisas/Sitenovo/3002/01-3002.pdf>>. Acesso em:06 nov. 2016.

EMERSOM, MaiquelPfungstag. **Avaliação do comportamento à fadiga e à corrosão-fadiga de juntas soldadas da liga Inconel 625, como material de interesse para a indústria petrolífera**. 2009. 69 p. UFRGS, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009. Disponível em:<<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/16312/000700457.pdf?...1>>. Acesso em:10 set. 2016.

MACHADO, Álisson Rocha et al. **Teoria da usinagem dos materiais**. 1. ed. São Paulo: Edgar BlucherLtda, 2009. 371 p. Disponível em: <<http://joinville.ifsc.edu.br/~julio.fabio/UsinagemII/Teoria%20da%20Usinagem%20Dos%20Materiais.pdf>>. Acesso em: 14 nov. 2017.

MAGRI, Aristides. **Uma contribuição ao estudo do torneamento da liga 625**. 2015. 99 f. Mestrado (Mestrado em Engenharia mecânica)- Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2015. Disponível em: <http://repositorio.unicamp.br/bitstream/REPOSIP/265738/1/Magri_Aristides_M.pdf>. Acesso em: 14 nov. 2017.

MSPC. **Informações técnicas: Níquel**. Disponível em: <http://www.mspc.eng.br/quim1/quim1_028.shtml>. Acesso em: 17 set. 2016.

PRANDEL, Luis. **Difração de Raios-X**. Disponível em: <<http://www.geocities.ws/fisicattus/raiox.htm>>. Acesso em: 06 nov. 2016.

REED, S. J. B. 1996. **Electron Microprobe Analysis and Scanning Electron Microscopy in Geology**, New York, Cambridge University Press. 201 p

REIS, Alexandre Martins. **Influência do ângulo de posição secundária da ferramenta, raio de ponta e lubrificação na usinagem em presença de aresta postiça de corte**. 2000. 88 p. Dissertação (Pós-graduação em engenharia mecânica)- Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2000. Disponível em: <<https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/14802/1/ReisDISSPRT.pdf>>. Acesso em: 11 nov. 2017.

SANTOS, Sandro Cardoso; SALES, Wisley Falco. **Aspectos tribológicos da usinagem dos materiais**. São Paulo: Artliber Editora Ltda, 2007. 246 p.

SILVA, Amanda Luzia da. **CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA POR DIFRAÇÃO DE RAIOS X E DETERMINAÇÃO DE TERRAS RARAS POR ICP-MS DE ROCHAS DA REGIÃO SUL DA BAHIA**. 2013. 100 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciências e Técnicas Nucleares, Departamento de Energia Nuclear, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

SOUZA, Thiago Freire de. **Usinagem da liga de Níquel Inconel 718 com pastilhas de cerâmica**. 2012. 60 p. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia mecânica) - UNESP, Guaratinguetá, 2012. Disponível

em:<http://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/121464/souza_tf_tcc_guara.pdf?sequence=1>. Acesso em: 20 set. 2016.