

# ANÁLISE DOS ESFORÇOS DE CORTE NO FRESAMENTO DA LIGA A BASE DE NÍQUEL - INCONEL 625 – DEPOSITADA EM FORMA DE REVESTIMENTO METÁLICO

**Marcelo Acácio Rodrigues**

Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos, PMR/POLI/USP, Avenida Professor. Mello Moraes, 2231, CEP 05508-900, São Paulo, SP, [marcelo.lean.engenharia@gmail.com](mailto:marcelo.lean.engenharia@gmail.com)

**Amauri Hassui**

Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos, PMR/POLI/USP, Avenida Professor Mello Moraes, 2231, CEP 05508-900, São Paulo, SP, [amauri.hassui@poli.usp.br](mailto:amauri.hassui@poli.usp.br)

***Resumo.** As aplicações de superligas a base de níquel vêm aumentando em função da crescente demanda por materiais que resistam a processos e ambientes considerados agressivos, onde a utilização dos materiais metálicos tradicionais é inadequada. O Inconel 625 é utilizado com frequência em indústrias petroquímicas, mais precisamente na prospecção de petróleo, devido à sua alta resistência à corrosão. A contra partida dessa característica é a baixa usinabilidade desse material, que ocorre em função da alta resistência mecânica a altas temperaturas, alta abrasividade, alta ductilidade e alta taxa de encruamento. Nesse trabalho foram feitos ensaios de fresamento em corpos de prova de aço ABNT 8630 revestidos com Inconel 625. As variáveis de entrada foram a geometria da ferramenta de corte, o tipo de fresamento, concordante e discordante e o avanço por dente. Foram avaliadas as forças de corte com um dinamômetro piezoelétrico e o encruamento sofrido pela peça. Os resultados obtidos indicam que todas as variáveis de entrada influenciam os esforços de corte. O fresamento discordante resulta em menor esforço de corte, o mesmo se dando para geometrias mais positivas da ferramenta e avanços por dente menores.*

***Palavras-chave:** fresamento, superligas, Inconel 625*

## 1. INTRODUÇÃO

As aplicações de superligas a base de níquel vêm aumentando em função da crescente demanda por materiais que resistam a ambientes considerados agressivos.

Superliga é a denominação dada às ligas a base de níquel, cobalto ou titânio, com determinadas características mecânicas, químicas e térmicas, tais como: alta resistência à corrosão, baixa perda de resistência em altas temperaturas e adequação a aplicações de risco e de ordem médica.

Na indústria petrolífera, a utilização de superligas garante que as altas taxas de oxidação do meio (água salgada) não interfiram no funcionamento de válvulas, dutos, flanges e bocais. Ainda nessa indústria, o atrito gerado pelo escoamento do produto bombeado de poços profundos, submetido a altas pressões, gera elevadas temperaturas ao longo dos dutos que o conduzem. Conforme Shankar et al<sup>(1)</sup>, a exposição desta liga a altas temperaturas altera seu limite de resistência e sua ductilidade.

Outra característica marcante das superligas a base de níquel é a sua baixa usinabilidade. Conforme Ezugwu et al<sup>(2)</sup>, as ligas a base de níquel são bastante difíceis de serem usinadas.

Pode-se caracterizar as superligas a base de níquel, como um material com: alta resistência mecânica em elevadas temperaturas, alta abrasividade devido aos constituintes químicos da liga, alta ductilidade e alta taxa de encruamento.<sup>(1) (3) (4)</sup> O Inconel 625 tem sua usinagem prejudicada, porque os quatro fatores citados são indesejáveis para uma boa usinabilidade. Em geral, para obtenção de vidas razoáveis das ferramentas de metal duro, é necessária a utilização de baixas velocidades de corte, o que representa uma condição pouco econômica.

## 2 OBJETIVOS

Esse trabalho tem como objetivo investigar o comportamento das componentes RMS máximas da força de corte presentes no fresamento da superliga Inconel 625, quando são utilizadas diferentes velocidades de avanço, tipos de fresamento (concordante e discordante) e geometrias da pastilha de metal duro. Cabe ressaltar que a literatura a respeito desse material é bastante escassa e praticamente inexistente quando o assunto envolve a usinagem, daí o caráter investigativo do trabalho.

## 3 REVISÃO TEÓRICA

### 3.1 Características e propriedades da Superliga Inconel 625

A superliga a base de níquel Inconel 625 possui uma estrutura CFC, austenítica. Sua densidade é de 8,44 g/cm<sup>3</sup> (21°C). O módulo de elasticidade a tração e a torção são respectivamente 208 e 81 GPa, ambos a 21°C<sup>(5)</sup>. Esta liga possui alto percentual de elementos químicos na forma de solução sólida em sua matriz Ni-Cr-Mo. Conforme citado por Ezugwu et al<sup>(2)</sup>, a baixa usinabilidade de uma liga de níquel ocorre devido a alguns fatores:

1. A maior parte da resistência do material é mantida durante a usinagem devido a sua alta resistência aos efeitos térmicos;
2. Encruamento ocorre rapidamente a partir dos esforços aplicados sobre o material durante a usinagem;
3. Alto desgaste abrasivo da ferramenta devido à presença de diversos carbonetos;
4. Altas taxas de difusão no par ferramenta-peça devido às altas temperaturas presentes na região de corte;
5. Soldagem por fricção da liga de níquel na superfície de saída e de folga da ferramenta de corte, devido à alta adesão da liga além das baixas velocidades empregadas para a usinagem;
6. Alta ductilidade em uma dureza média (~300 HV), levando à dificuldade de formação do cavaco;
7. Baixa condutividade térmica, tornando a superliga refratária. Esta característica prejudica o desempenho da ferramenta uma vez que o calor gerado no processo de usinagem não será fortemente extraído pelo cavaco nem pela peça.

A microestrutura de uma liga à base de níquel é formada por solução sólida de matriz reforçada, contendo diversos tipos de carbonetos além de fase secundária.

As fases que constituem o Inconel 625 são:

1. Liga matriz ( $\gamma$ ): É a solução sólida CFC com alto percentual de elemento de liga;
2. Fase ( $\gamma'$ ) – Gama primária: Esta fase surge pela precipitação de altas frações de Al e Ti de acordo com a austenita de níquel. Esta é um intermetálico que aumenta a resistência mecânica da liga à medida que a temperatura se eleva;
3. Carbonetos: Carbono é adicionado para reagir com os elementos refratários e reativos resultando na formação de carbonetos primários MC. Durante a exposição a temperaturas elevadas em longos períodos, o MC é decomposto em dois tipos de carbonetos ( $M_{23}C_6$  e  $M_6C$ ) localizados nos contornos de grão, proporcionando um aumento da resistência às tensões, principalmente àquelas de origem trativa;

4. Contornos de grãos: Uma fina camada de carbonetos e outros elementos químicos em proporções menores formam esta região que resultam no aumento de resistência sob temperaturas médias a elevadas;
5. Fases TCP – Fases topologicamente empacotadas: Estas são fases secundárias  $\mu$ ,  $\sigma$  e  $\delta$  que proporcionam resistência mecânica à liga. Sua estrutura é tetragonal e sua interação ocorre pela afinidade química e geométrica com a matriz CFC da liga.

### 3.1.1 Propriedades físico-químicas da Superliga Inconel 625

O Inconel 625 é caracterizado como uma liga de Níquel-Cromo-Molibdênio.

A composição química da superliga Inconel 625 é apresentada na tabela 1.

Tabela 1 – Composição química da superliga Inconel 625<sup>(2)</sup>.

Composição química provável da liga Inconel 625													
Elem. Químico	Cr	Fe	Mo	Nb+Ta	C	Mn	Si	P	S	Al	Ti	Co	Ni
Mínimo	20	0	8	3,15	0	0	0	0	0	0	0	0	58
Máxim	23	5	10	4,15	0,1	0,5	0,5	0,015	0,015	0,4	0,4	1	---

A função dos elementos mencionados na tabela 1 são as seguintes:

- Cromo (Cr): Aumenta a resistência à corrosão e à oxidação. Diminui a usinabilidade devido à sua forte presença na formação de carbonetos;
- Ferro (Fe): O acréscimo de ferro tende a baixar a resistência à oxidação devido à baixa escala de aderência de óxido (elemento desoxidante);
- Molibdênio (Mo): É um metal refratário. É acrescido para aumentar a resistência mecânica e à corrosão em altas temperaturas. Forma carbonetos resistentes à abrasão;
- Nióbio (Nb): Também é considerado refratário. Modera o endurecimento da liga quando associado ao alumínio e ao titânio;
- Tântalo (Ta): É outro metal refratário. Adicionado em forma de solução sólida aumenta a resistência da liga. Prejudica a usinabilidade, pois propicia a formação de carbonetos;
- Carbono (C): É um elemento intersticial de aumento de resistência do níquel. Possui grande influência na formação de carbonetos;
- Manganês (Mn): Reduz a plasticidade de forma moderada. Aumenta a capacidade de endurecimento do material;
- Silício (Si): Aumenta a fluidez. Favorece a fratura a quente da liga;
- Fósforo (P): É um elemento indesejável para a liga devido sua capacidade de fragilização em temperaturas médias;
- Enxofre (S): Idem ao fósforo.
- Alumínio (Al): Possui o maior o potencial de endurecimento da liga. Fragiliza o material. Responsável pela formação de carbonetos complexos junto ao titânio, bem como o  $Al_2O_3$ , que possui alta resistência à corrosão em temperaturas elevadas;
- Titânio (Ti): Modera a capacidade de endurecimento da liga, quando substitui em volume o alumínio. Presente na formação de carbonetos.
- Cobalto (Co): Aumenta a resistência em altas temperaturas. Diminui a usinabilidade. Reduz a solubilidade do alumínio e do titânio na matriz CFC austenítica. Possui maior solubilidade para o carbono do que para o níquel, logo para uma quantidade equivalente de carbono, menos carbonetos estarão presentes na matriz  $\gamma$ .

Ainda no tocante à avaliação físico-química, o Inconel 625 apresenta uma proeminente capacidade de aumentar sua resistência quando deformado além do seu limite elástico. A taxa de encruamento deste material é um dos principais aspectos de sua baixa usinabilidade.<sup>(2)(3)</sup>

Como já citado, as ligas a base de níquel são resistentes ao calor e à corrosão quando submetidas a meios quimicamente agressivos. Essas ligas permanecem com elevada resistência mecânica em altas temperaturas e a corrosão é lenta. Este aspecto deve ser observado quando da especificação da

ferramenta e dos parâmetros de corte, além do meio lubrificante/refrigerante que poderá ser utilizado durante a usinagem.

### **3.2 O fresamento de superligas**

Para o corte de superligas, deseja-se que a força de usinagem seja mínima tanto pela produtividade quanto da integridade da ferramenta de corte. A utilização de ferramentas negativas em altas velocidades foi citada, porém resultados práticos não são comentados com a mesma ênfase dada àqueles feitos com ferramentas positivas de metal duro.<sup>(2)(3)</sup>

Choudury et al<sup>(6)</sup> avaliaram que o aumento das forças está relacionado não somente com a preparação da aresta, mas também das demais condições do processo, tais como velocidade de corte, avanço e geometria da aresta de corte.

Existe atualmente um grande número de revestimentos duros aplicados sobre as ferramentas de corte com objetivo de prolongar a vida das mesmas.

O TiAlN depositado por PVD apresenta uma estabilidade química superior àquela oferecida pelos revestimentos TiN e TiCN. O TiAlN é indicado para usinagem de materiais dúcteis, como é o caso do aço inoxidável austenítico, ou quando se deseja arestas de corte mais afiadas, conforme Diniz et al<sup>(7)</sup>.

Durante o fresamento das superligas a base de níquel, o calor gerado concentra-se na aresta de corte da ferramenta com uma intensidade superior àquela atingida no fresamento de aços e ferros e ferros fundidos, visto que a condutibilidade térmica deste material é baixa. Ainda em relação à usinagem dessa liga, o atrito gerado entre a superfície de saída da ferramenta e o cavaco, além do atrito entre a superfície de folga primária e secundária da ferramenta e a peça, resulta em calor e, por conseguinte, em desgaste da ferramenta de corte durante a evolução do processo. Uma terceira fonte de calor, também importante, é o atrito interno que ocorre no plano de cisalhamento ao longo da formação do cavaco. Para diminuir o efeito da temperatura na usinagem de superligas, utiliza-se fluido de corte que pode ter ação refrigerante ou lubrificante.

Trent<sup>(8)</sup> reforça a afirmação que a temperatura na interface cavaco-ferramenta aumenta com o acréscimo da velocidade de corte e tal parâmetro constitui o limite prático para a usinagem de materiais com alto ponto de fusão, como é o caso das superligas.

## **4 MATERIAIS, MÉTODOS E EQUIPAMENTOS**

Foram feitos vários ensaios de fresamento frontal onde se variaram a velocidade de avanço, o sentido de corte (concordante e discordante, definido da mesma forma que no fresamento tangencial) e a geometria da pastilha. Foram mantidos constantes a velocidade de corte de 30 m/min, a profundidade de corte radial de 42 mm e a axial de 2 mm. Os ensaios consistiram basicamente na usinagem dos corpos de prova fixados sobre uma plataforma dinamométrica, onde foram medidas as componentes da força de usinagem, extraídos os valores RMS e posteriormente, levantados os valores máximos. Cabe ressaltar que a variável desgaste da ferramenta não foi analisada, daí a usinagem apenas sobre o dinamômetro.

O corpo de prova utilizado foi de aço ABNT 8630 revestido com Inconel 625 cujas dimensões eram 70,71x45x20 mm<sup>3</sup> e sua ilustração encontra-se na figura 1.



Figura 1 - Ilustração do corpo de prova.

#### 4.1. Descrição da ferramenta de corte

##### 4.1.1. O cabeçote de faceamento

A ferramenta utilizada para realização dos ensaios de fresamento foi um cabeçote de faceamento de 63mm de diâmetro com 7 pastilhas.

Os ângulos oferecidos pelo alojamento onde foi montada a pastilha intercambiável estão na tabela 2.

Tabela 2. – Ângulos da ferramenta de corte antes da montagem das pastilhas.

<i>Característica</i>	Cabeçote-HM90 F90AP D63-7-22
Ângulo de saída radial	-3° 55'
Ângulo de inclinação axial	9°

##### 4.1.2. A pastilha intercambiável

A tabela 3 apresenta as características das pastilhas utilizadas.

Pode ser visto nesta tabela que ambas as pastilhas, após sua montagem, apresentam um perfil duplo positivo. A pastilha APCR foi retificada em sua periferia, com objetivo de tornar a aresta mais afiada, o mesmo não ocorrendo com a pastilha APKT.

Tabela 3. – Ângulos da ferramenta de corte após a montagem da pastilha

<i>Característica</i>	Pastilha intercambiável	
	HM90 APCR 100304 PDFR-P	HM90 APKT 100304 PDR
Ângulo de saída radial	23° 24'	11° 52'
Ângulo de saída axial	14° 51'	13° 35'
Ângulo de folga radial	14° 55'	14° 55'
Ângulo de folga axial	2°	2°
Raio de canto ( $r_e$ )	0,4 mm	0,4 mm

A pastilha intercambiável é da classe P(20-45), M (20-40), com revestimento de TiAlN, partícula submicron (5~8  $\mu$ m).

#### 4.2. Descrição da máquina/sistemas de fixação do corpo de prova e da ferramenta

A máquina utilizada foi um centro de usinagem vertical CNC Hermle C600U.

A fixação do corpo de prova foi feita através de um dispositivo especial, conforme pode ser visto na figura 2.

A fixação da ferramenta na máquina foi feita através de um cone básico porta-fresa, conforme norma HSK DIN 69893 Forma A / DIN 6358.



Figura 2 – Dispositivo de fixação do corpo de prova sobre o dinamômetro.

#### 4.3. Sistema de refrigeração / lubrificação

Durante os ensaios, foi utilizado 01 ponto de refrigeração/lubrificação. A máquina possibilitou a expulsão dos cavacos por jato de ar comprimido a uma pressão de 6Bar.

O fluido refrigerante/lubrificante utilizado foi o Vasco 1000, semi sintético, com aditivos EP, da Blaser. A concentração foi de 8 %, verificada com refratômetro manual.

A vazão total do único ponto foi de 0,04 m<sup>3</sup>/min.

#### 4.4. Sistema de medição e aquisição do sinal de força

Foram medidas as componentes da força de usinagem. Para isso, foi usado um dinamômetro piezoelétrico da marca Kistler Instrument AG, modelo 9272A. A placa de aquisição utilizada foi da National Instruments, modelo PCI 6025E. O amplificador foi um 5019B1410 da marca Kistler Instrument AG.

Os parâmetros para a aquisição do sinal foram: tempo de aquisição: 120 segundos, taxa de aquisição 720 pontos/segundos, constantes dos canais de aquisição: Fx = 7,90; Fy= 7,89; Fz= 3,61 e fator de conversão Tensão → Força: 200.

A orientação dos eixos do dinamômetro foi concorrente aos da máquina. A direção de avanço ficou alinhada ao eixo x do dinamômetro.

As superfícies dos corpos de prova foram desbastadas antes da medição para que o sobremetal de 2mm fosse mantido constante.

Foi efetuada a troca dos insertos após 4 passes sobre o corpo de prova. Com isso, descartou-se da análise os esforços devido ao desgaste da ferramenta.

O plano experimental encontra-se na tabela 4.

Tabela 4. Plano experimental.

Ensaio	Estratégia	$v_f$ (mm/min)	Pastilha	Classe
1	Discordante	48,28	hm 90 apcr 100304 pdf-r-p	IC 928
2	Concordante	48,28	hm 90 apcr 100304 pdf-r-p	IC 928
3	Discordante	68,97	hm 90 apcr 100304 pdf-r-p	IC 928
4	Concordante	68,97	hm 90 apcr 100304 pdf-r-p	IC 928
5	Discordante	48,28	hm 90 apkt 100304 pdr	IC 928
6	Concordante	48,28	hm 90 apkt 100304 pdr	IC 928
7	Discordante	68,97	hm 90 apkt 100304 pdr	IC 928
8	Concordante	68,97	hm 90 apkt 100304 pdr	IC 928

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Vale lembrar que as componentes Fx, Fy e Fz estão na direção de avanço, perpendicular a esse e na direção do eixo da máquina respectivamente. A figura 3 ilustra essa montagem.

Devido à grande quantidade de resultados obtidos durante esta fase, optou-se por avaliar apenas os valores máximos RMS das componentes da força de usinagem.

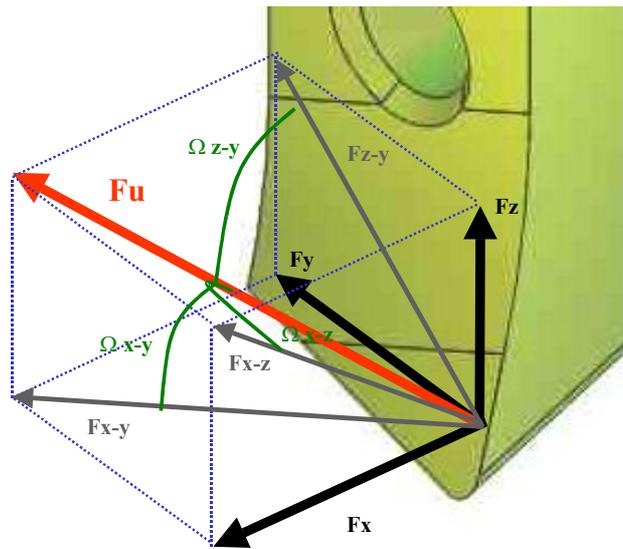


Figura 3 Projeções da força de usinagem.

A figura 4 apresenta as grandezas calculadas RMS máximas das componentes da força de usinagem para cada condição de corte, conforme a tabela 4.

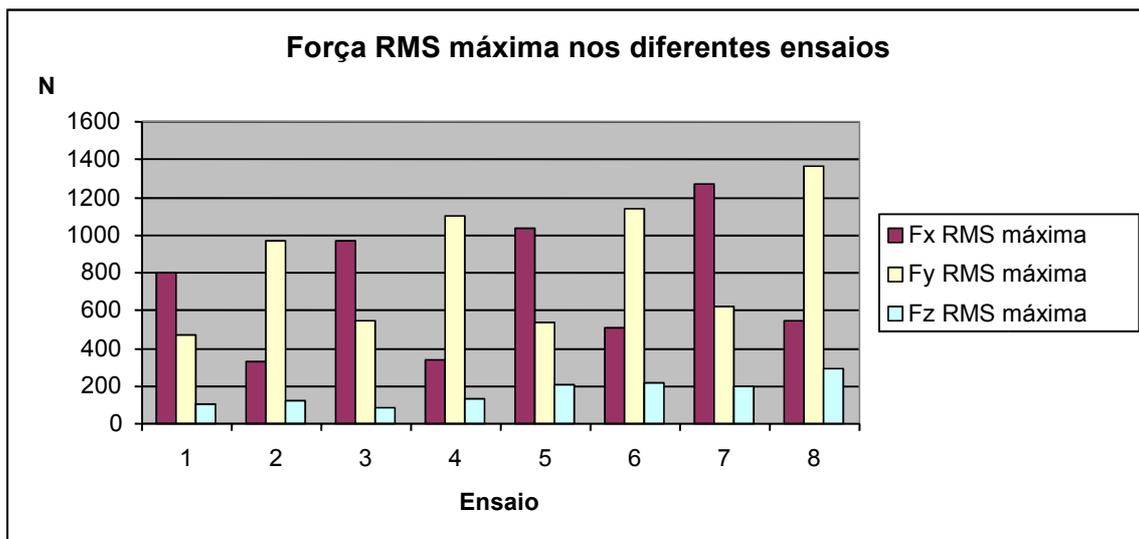


Figura 4 Valor RMS máximo das componentes da força de usinagem

Analisando a figura 4 pode-se observar os seguintes pontos:

- A mudança do corte discordante para concordante, comparação dos ensaios 1 e 2; 3 e 4; 5 e 6; 7 e 8 resultou no aumento da força RMS máxima na direção y e redução na direção x. A força na direção Z permaneceu praticamente constante. A principal diferença entre esses dois tipos de fresamento diz respeito à forma como os esforços de corte são aplicados à peça pela ferramenta. No discordante, há um aumento gradativo dos esforços de corte, pois o cavaco tem, inicialmente, espessura zero e essa vai aumentando ao longo do corte. Por outro lado, no caso concordante, essa espessura tem comportamento contrário logo, ocorre um impacto inicial e a partir daí, os esforços vão gradativamente diminuindo. Cabe ressaltar que isso vale para cada engajamento da aresta na peça. Nesse trabalho, os sinais representam 2 arestas em contato, mais uma terceira que ficava 10% do tempo em contato, em outras palavras, havia 2,1 dentes em contato ao longo da aquisição.

Medições de micro dureza após a usinagem, mostraram que os corpos de prova usinados com fresamento concordante apresentaram uma dureza menor, o que indica um encruamento menor também.

Provavelmente o valor da força RMS na direção y (perpendicular à direção de avanço) corresponde ao ponto em que a espessura do cavaco é máxima. Assim sendo, essa força é maior no caso concordante devido ao ângulo de entrada da ferramenta. Esse ângulo, para proteger a aresta de corte, faz com que o contato se dê no corpo da pastilha, que não tem capacidade de corte, por outro lado, no caso discordante esse corte está ocorrendo com a aresta propriamente dita.

Em relação à direção x (avanço), há influência do encruamento propiciado pela usinagem. O momento representado no gráfico, situa-se provavelmente distante do ponto onde a espessura do cavaco é zero. Daí, a estratégia que gera maior encruamento apresenta maior força de corte. Como mencionado isso ocorre no fresamento discordante.

Em função da geometria da ferramenta, não existe diferença entre os cortes concordantes e discordantes em relação aos esforços no eixo z.

- A mudança da velocidade de avanço (ensaios 1 e 3; 2 e 4; 5 e 7 e 6 e 8) resultou no aumento da força máxima em  $F_x$  (direção de avanço) e  $F_y$  (perpendicular ao avanço). Ressalta-se que a velocidade de corte e, conseqüentemente a rotação da ferramenta, permaneceu constante, portanto aumentando-se a velocidade de avanço, aumenta-se conseqüentemente o avanço por dente. O aumento das forças apresentado tem relação com o aumento da seção de cavaco removida e também da maior taxa de deformação, que provavelmente implica em maior encruamento..
- A mudança de geometria (de APCR para APKT) resultou no aumento da força máxima nas duas direções (ensaios 1 e 5; 2 e 6; 3 e 7; 4 e 8). Como mencionado na descrição das pastilhas, a ferramenta APKT é menos positiva. Isso faz com que a deformação sofrida pelo cavaco, antes da ruptura seja maior, portanto, os esforços de corte se comportam da mesma maneira. Cabe mencionar, que por ser menos positiva axialmente também, nota-se um aumento significativa dos esforços na direção Z.

## 5. CONCLUSÕES

Os resultados apresentados permitem algumas conclusões dentro das condições testadas:

- O fresamento discordante apresentou maiores valores de  $F_x$  (direção de avanço) e menores de  $F_y$ . Isso ocorreu em função da entrada menos favorável na peça no fresamento concordante, e do maior encruamento ocorrido no corte discordante;

- Velocidades de avanço maiores implicam em maiores taxas de deformação, no caso, em maiores avanços por dente, e maiores espessuras de cavaco conseqüentemente, maiores encruamentos e maiores forças de corte em todas as componentes;

- Geometrias mais positivas da ferramenta implicam em menores deformações do cavaco e portanto, forças de corte também menores.

## 6. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à ISCAR do Brasil pelo fornecimento de ferramentas, à Vetcogray pelo fornecimento do INCONEL 625 e à AIM/ITA por permitir a utilização de sua estrutura para realização dos ensaios.

## 8. REFERÊNCIAS

[1] – SHANKAR, K. V. et al. Microstructure and mechanical properties of Inconel 625 superalloy. Journal of nuclear materials n. 228, p. 222-232, 2001.

- [2] – EZUGWU, E. O. et al. The machinability of nickel based alloys: a review. Journal of Materials Processing technology, n. 86, p. 1-16, 1999.
- [3] – CHOUDHURY, I.A. et al. Machinability of nickel-base alloys: a general review. Journal of Materials Processing Technology, n. 77, p. 278-284, 1998.
- [4] – FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. 9ª. Reimpressão. São Paulo: Ed. Edgard Blucher Ltda, 1995.
- [5] – Metals Handbook – Ninth Edition Volume 3 – Properties and Selection: Stainless Steels, Tool materials and Specials Purpose metals. Heat-Resistant Materials.
- [6] – CHOUDHURY, I.A. et al. Machining with chamfered tools. Journal of Materials Processing Technology, n. 170, p. 115-120, 2005.
- [7] – DINIZ, A. E. et al. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. 3. ed. São Paulo: Artliber, 2001. 244 p.
- [8] – TRENT, E. M. **Metal Cutting**. 2.ed. London: Butterworths, 1984. 242 p.

## ANALYSIS OF CUTTING FORCES IN THE MILLING OF WELDED DEPOSITED NICKEL BASED ALLOY – INCONEL 625

### **Marcelo Acácio Rodrigues**

Escola Politécnica da USP, Department of Mechatronics and Mechanical Systems Engineering, PMR/POLI/USP, Professor. Mello Moraes Avenue, CEP 05508-900, São Paulo, SP, [marcelo.lean.engenharia@gmail.com](mailto:marcelo.lean.engenharia@gmail.com)

### **Amauri Hassui**

Escola Politécnica da USP, Department of Mechatronics and Mechanical Systems Engineering, PMR/POLI/USP, Professor. Mello Moraes Avenue, , 2231, CEP 05508-900, São Paulo, SP, [amauri.hassui@poli.usp.br](mailto:amauri.hassui@poli.usp.br)

**Abstract:** *The nickel based superalloy applications has been increased due to the growing demand of materials that resist to processes and environments considered aggressive, where the use of traditional metallic materials is unsuitable. The Inconel 625 is usually used in petrochemical industries, more precisely in the petrol prospecting, due to its high corrosion resistance. The counterpart of this characteristic is the poor usinability of this material that occurs due of its high mechanical strength under high temperatures, high abrasivity, high ductility and high work hardening tendency. In this work they were done milling tests in ABNT 8630 with Inconel 625 weld deposited. The input parameters were the cutting tool geometry, the type of milling (up and down) and the feed per tooth. It was evaluated the cutting force measured with a piezoelectric dynamometer. The results shown that all the input parameters have influence on the cutting forces. The up-milling demands lower cutting force, the same happening with more positive geometries and lower feed per tooth.*

**Keywords:** *Milling, Superalloys, Inconel 625*