



**HAL**  
open science

# DETECÇÃO DE VIBRAÇÕES NO PROCESSO DE FRESAMENTO DE TOPO APLICANDO A TRANSFORMADA WAVELET A SINAIS DE FORÇA DE USINAGEM

Giovanni Arevalo Cabrera, Anna Carla Araujo, Daniel Alves Castello

► **To cite this version:**

Giovanni Arevalo Cabrera, Anna Carla Araujo, Daniel Alves Castello. DETECÇÃO DE VIBRAÇÕES NO PROCESSO DE FRESAMENTO DE TOPO APLICANDO A TRANSFORMADA WAVELET A SINAIS DE FORÇA DE USINAGEM. 8º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 2015, Salvador, Brazil. hal-03226771

**HAL Id: hal-03226771**

**<https://hal.science/hal-03226771>**

Submitted on 18 May 2021

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# DETECÇÃO DE VIBRAÇÕES NO PROCESSO DE FRESAMENTO DE TOPO APLICANDO A TRANSFORMADA WAVELET A SINAIS DE FORÇA DE USINAGEM

Giovanni Arevalo Cabrera, [cegio@ufrj.br](mailto:cegio@ufrj.br)<sup>1</sup>  
Anna Carla Araujo, [anna@mecanica.ufrj.br](mailto:anna@mecanica.ufrj.br)<sup>1</sup>  
Daniel Alves Castelo, [castello@mecanica.ufrj.br](mailto:castello@mecanica.ufrj.br)<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Poli/COPPE/UFRJ, Cidade Universitária - Ilha do Fundão, Centro de Tecnologia-, Bloco G - Sala G-202, Rio de Janeiro, RJ, Brasil- CEP 21945-970.

**Resumo:** Nas operações de usinagem, em especial o fresamento de topo de peças de alumínio, o acabamento superficial e o comportamento da ferramenta são afetados pelas vibrações regenerativas, também chamadas de chatter. Vários métodos têm sido desenvolvidos para prever e evitar esta situação indesejável. O diagrama de estabilidade de lóbulos (SLD) tem sido utilizado para analisar se o sistema peça-ferramenta estará em um comportamento estável ou instável em uma configuração de parâmetros de corte, a partir das características dinâmicas da máquina ferramenta e da ferramenta. Este trabalho apresenta um método para a detecção das vibrações chatter durante a fabricação para ser utilizado para alterar os parâmetros de corte, se for necessário. Esta proposta identifica se o sistema está em uma situação de instabilidade aplicando a Transformada Wavelet Discreta (DWT) aos sinais de força de usinagem durante a operação de fresamento. A metodologia utiliza a resultante da força de usinagem e a DWT obtém subsinais de aproximação e detalhes e, em seguida, elimina-se o ruído do subsinal de detalhes suprimindo sinais abaixo de um limiar, permitindo evidenciar picos de força que estão relacionados com a presença de chatter. Para fazer o estudo da aplicação da metodologia, a profundidade de corte variou durante o experimento pois foi usinada uma peça com geometria de uma rampa, e algumas velocidades de rotação foram avaliadas. A partir da profundidade de corte limite pode-se identificar o chatter no subsinal detalhes e os resultados são comparados e validados com o perfil de rugosidade, medidos após o término de todos os experimento, na superfície lateral do canal usinado. Os resultados experimentais indicam que os picos de força resultantes (após aplicar o limiar aos subsinais de detalhes) estão fortemente relacionados com a presença de chatter, já que existe uma boa correlação desta situação com as superfície rugosa reforçando a aplicabilidade do método proposto.

**Palavras-chave:** Fresamento, Forças de Corte, Chatter, Transformada Wavelet Discreta.

## 1. INTRODUÇÃO

A ocorrência de vibração durante o processo de usinagem é um dos fenômenos que influenciam diretamente sobre a qualidade do acabamento superficial, precisão dimensional da peça e, na geração de falhas na ferramenta, as quais representam aproximadamente 20% do tempo de inatividade das máquinas ferramentas, segundo um estudo realizado por Kurada e Bradley (1997), ocasionando uma redução na produtividade e, como consequência, um custo adicional do produto. Por esta razão, ao longo do tempo foi desenvolvido um grande número de estudos sobre a dinâmica da ferramenta nos processos usinagem. Um modelo analítico proposto por Hanna e Tobias (1958) para corte ortogonal e Tlustý e Mac Neil (1975) para fresamento, determinaram que a vibração em processos de usinagem é originada em maior parte pelas vibrações regenerativas, também conhecidas como *chatter*.

No estudo realizado por Budak e Altintas (1995) para encontrar os limites de estabilidade dinâmica da ferramenta em processos de fresamento, os autores reiteram que as vibrações chatter iniciam como consequência do aumento das forças de corte, gerando assim que um dos modos estruturais do sistema ferramenta-peça seja autoexcitado e, desta maneira deixando ao passo de cada aresta de corte ondulações na superfície da peça. Este fenômeno amplifica consideravelmente as vibrações, já que devido à diferença de fase entre as ondulações e as arestas de corte, ocasiona que a ferramenta seja afastada da peça, tornando-se o corte instável. Dessa forma, prever o surgimento de vibrações chatter nos demais processos de remoção de material, tornou-se um assunto importante na pesquisa de usinagem, por este motivo diversos autores, como I. Minis *et al.* (1990) e Budak e Altintas (1998), também focalizaram seus estudos na presença de vibrações chatter em vários processos de remoção de material como: torneamento, furação, brochamento e retificação.

Com o desenvolvimento dos estudos, o interesse de detectar se a ferramenta de usinagem está operando em uma situação de instabilidade tem aumentado. Por esta razão algumas estratégias de diagnóstico e monitoração foram desenvolvidas, a partir da aquisição de sinais experimentais: forças de corte, deslocamento da ferramenta, emissão acústica e corrente elétrica dos motores.

Para realizar um análise de sinais é necessário empregar técnicas de processamento, que permitam identificar o comportamento e possíveis alterações do sinal num determinado tempo. No trabalho de Kunpeng *et al.* (2009) foi realizado o monitoramento das condições da ferramenta em cinco categorias: análise tempo-frequência do sinal de

usinagem, eliminação de ruído no sinal, extração de características, análise de singularidade para estimação do estado da ferramenta e estimativa da densidade de probabilidade via Wavelet para a classificação do desgaste da ferramenta.

Na área de análise de sinais é bastante comum utilizar a Transformada de Fourier (FT), mas esta técnica se limita basicamente aos sinais estacionários, sendo eficiente para determinar o conteúdo de frequências presentes no sinal, mas não é muito eficiente para determinar a localização no intervalo do tempo em que elas ocorrem. Assim, a Transformada de Fourier não fornece uma análise temporal, apenas na frequência (Oliveira, 2007). Uma solução para este inconveniente está na utilização da Transformada de Fourier Tempo Curto STFT (*Short Time Fourier Transform*), que oferece a análise temporal e frequencial para sinais transientes, ou seja, sinais que variam sua frequência no tempo. O método desta transformada é subdividir o sinal através de pequenas “janelas” de tempo dentro da qual o sinal permanece quase estacionário conseguindo assim aplicar a FT. Não obstante, uma desvantagem é que uma vez determinado o tempo da janela este não pode ser alterado, deixando assim sem analisar aquelas altas variações do sinal que se encontram num menor tempo do qual foi fixada a janela, Rioul e Vetterli (1991).

O método alternativo que surgiu para tratar os sinais transientes no plano do tempo-frequência foi a Transformada Wavelet (TW), que permite realizar um Análise de Múltipla Resolução, ou seja, permite o uso de longos intervalos de tempo, onde se queira informação de frequência mais baixa e intervalos de tempo mais curtos, onde se queira informação de alta frequência (Daubechies, 1990). Este método se baseia em filtrar a informação mediante um banco de filtros de dois tipos: passa baixa, também chamado de “aproximação”, e passa alta ou “detalhes”, permitindo assim estudar cada componente separadamente em sua escala correspondente.

As vantagens da transformada Wavelet na área de usinagem, geraram uma atenção considerável devido a que possibilita a identificação de descontinuidades ou ressaltos de curta duração presentes no sinal de força, como por exemplo: lascamentos, rupturas, desgastes nas arestas de corte e vibrações chatter na ferramenta. Alguns trabalhos desenvolvidos com o método da TW na pesquisa de usinagem estão descritos a seguir.

Kasashima e Mori (1995) aplicaram a transformada Wavelet Discreta (DWT) aos sinais de força experimentais para detectar em tempo real pequenas falhas da ferramenta, tais como quebras ou lascamentos na ponta do inserto e a excentricidade da ferramenta com respeito ao centro de rotação numa operação de fresamento frontal; conseguindo caracterizar as falhas da ferramenta com maior sensibilidade que a Transformada de Fourier Rápida (FFT).

Shu *et al.* (2002) estudaram como identificar as instabilidades dinâmicas da ferramenta num processo de fresamento aplicando a DWT a um sinal de força, podendo detectar as repentinas mudanças do sinal da força em tempo real, conseguindo distinguir com isto a transição da ferramenta de um estado estável para instável.

Hongrui *et al.* (2013) apresentaram um método eficaz para a identificação do chatter num processo de fresamento de topo com base nas técnicas de processamento de sinais como: Pacote da Transformada Wavelet (WPT) e a transformada de Hilbert-Huang (HHT). O WPT foi utilizado para a remoção do ruído e a HHT foi utilizada para obter um espectro de Hilbert-Huang, o qual fornece uma distribuição completa dos sinais em tempo-frequência e energia onde pode ser detectada a presença do chatter e também seus níveis.

Neste artigo propõe-se o desenvolvimento de um método experimental para a identificação do chatter em operações de fresamento aplicando a Transformada Wavelet Discreta (DWT). Para isto, é apresentada a metodologia desenvolvida e é aplicada a um experimento de fresamento de topo, o qual utiliza um corpo de prova com superfície de trabalho inclinada com a finalidade de aumentar a profundidade de corte enquanto a ferramenta avança em uma direção paralela à mesa. Aos sinais experimentais da força de usinagem resultante é aplicada a DWT com a finalidade de obter das novas curvas. O primeiro resultado da DWT é a força de usinagem livre de qualquer perturbação (altas frequências) que dificulte sua legibilidade, e o segundo sinal estará composto por ruído e picos de força, onde neste último será aplicado um procedimento para eliminar o ruído, oferecendo assim um sinal só com picos de força. Os resultados adquiridos deste processo são validados com medida de rugosidades realizados posteriormente na face lateral do canal usinado.

## 2. TRANSFORMADA WAVELET DISCRETA

A Transformada Wavelet Discreta (DWT) é baseada no algoritmo descoberto por Mallat (1989), o qual utiliza uma análise multiresolução e um banco de filtros oriundos da teoria geral de processamento de sinais. A DWT divide o sinal analisado em sub sinais de baixa frequência e alta frequência. O primeiro sub sinal é chamado de “aproximações” e o segundo de “detalhes”. O processo de filtragem que gera a divisão anteriormente mencionada, pode ser entendido através da Fig. (1)a, onde o sinal original (S) é decomposto por dois filtros complementares. O filtro passa-baixa gera a componente de aproximações (A), enquanto o passa-alta gera a componente de detalhes (D).

Para sinais de maior complexidade, o primeiro nível de decomposição não oferece um resultado satisfatório, então se faz necessária uma análise com mais níveis de decomposição para, assim, ter uma informação mais detalhada do sinal. Desta forma, surge a ideia de se realizar uma análise multinível, deixando claro que para cada nível de decomposição a resolução vai diminuindo, por este motivo é também conhecido como Análise de Múltipla Resolução (MRA).

O processo de decomposição da MRA é de maneira hierárquica, mas ele só pode ser efetuado sobre as componentes de aproximações (A) do nível anterior. Este processo é chamado também como ramificação ou árvore de decomposição Wavelet criada por Mallat (1989), este conceito é apresentado, de forma ilustrativa na Fig. (1)b).

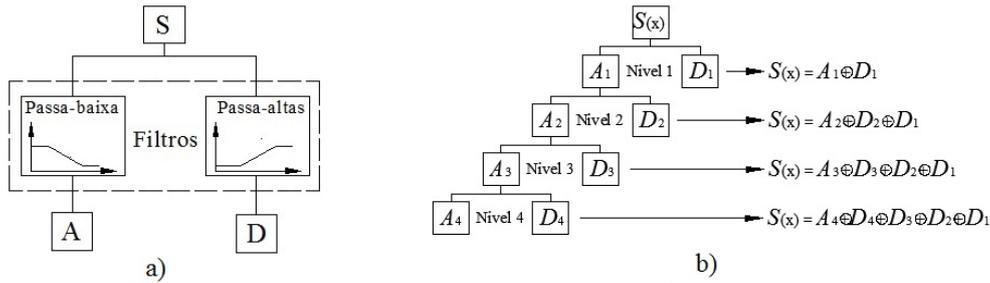


Figura 1. a) Filtragem básica da DWT b) Arvore de decomposição para 4 níveis.

Na Fig. (1b) o primeiro nível de decomposição do sinal  $S(x)$  é dividido em dois sub sinais: aproximações  $A_1$  e detalhes  $D_1$ , de modo que  $S(x) = A_1 \oplus D_1$ , no qual  $\oplus$  corresponde a um operador que representa a somatória dos subsinais  $A_1$  e  $D_1$ .

### 2.1. Eliminação do Ruído Utilizando o Limiar ( $\lambda$ )

Para eliminar o ruído presente no subsinal de detalhes  $D_1$  e detectar os picos de força é utilizado um determinado valor crítico conhecido como limiar ou *thresholding*. O objetivo do método limiar é reduzir ou até mesmo remover o ruído presente no subsinal de detalhes que se está analisando, de modo a zerar ou diminuir a magnitude dos coeficientes presentes neste subsinal. Para isso, foi proposto por Donoho e Johnstone (1993) duas funções de limiar: limiar abrupto ou *hard-thresholding* e limiar suave ou *soft-thresholding*.

No limiar abrupto, os coeficientes menores que o valor absoluto do limiar calculado são simplesmente anulados, ou seja, substituídos por zero, e coeficientes maiores ao limiar permanecem. A Eq.(1) mostra a expressão utilizada para aplicar este tipo de limiar.

$$D_m(i, j) = \begin{cases} 0, & \text{se } |D(i, j)| \leq \lambda \\ D(i, j), & \text{se } |D(i, j)| > \lambda \end{cases} \quad (1)$$

Onde  $D_m(i, j)$  representa os coeficientes modificados do subsinal de detalhes,  $D(i, j)$  representa os coeficientes do subsinal de detalhes e  $(i, j)$  são os coeficientes e o nível de decomposição respectivamente.

O método do limiar suave propõe uma redução dos coeficientes. Por tanto, se o valor absoluto do coeficiente é maior do que o limiar calculado o coeficiente é modificado, restando o limiar a seu valor absoluto, e se o valor absoluto é menor do limiar o coeficiente é igualado a zero. Os coeficientes reduzidos são estimados a partir da Eq.(2).

$$D_m(i, j) = \begin{cases} 0, & \text{se } |D(i, j)| \leq \lambda \\ \text{sign}(D_{i,j})(|D_{i,j}| - \lambda), & \text{se } |D(i, j)| > \lambda \end{cases} \quad (2)$$

Existe uma variedade de algoritmos para calcular o valor do limiar  $\lambda$ , os quais podem ser agrupados em duas categorias: limiares globais e limiares dependentes do nível, onde os globais calculam um valor fixo de  $\lambda$  para ser aplicado a todos os coeficientes do subsinal de detalhes, e os dependentes do nível que tem a possibilidade de calcular um valor diferente  $\lambda$  para cada nível de decomposição, Antoniadis *et al.* (2001).

Para o objetivo deste trabalho os limiares globais são os mais adequados, em vista que este método trabalha com um valor de limiar fixo a partir do subsinal de detalhes  $D_1$ , nos quais estão concentrados uma maior quantidade de altas frequências, Donoho e Johnstone (1993), para o caso o ruído e os picos de força. Além disto, porque são métodos fáceis, rápidos e automáticos de limiarização. Por este motivo serão descritos os algoritmos mais representativos a esta categoria.

#### 2.1.1. Algoritmo Minimax

Este algoritmo foi desenvolvido por Donoho e Johnstone (1993) e é baseado no principio minimax, o qual é utilizado em estatística. De acordo ao Toolbox de Matlab chamado Wavelet Toolbox, a Eq.(3) é a utilizada para estimar o valor do limiar minimax.

$$D_m(i, j) = \begin{cases} 0, & \text{se } n \leq \lambda \\ 0,3936 + 0,1829 \left( \frac{\log(n)}{\log^2} \right), & \text{se } n > \lambda \end{cases} \quad (3)$$

Neste caso se a quantidade de amostras do sinal  $n$  é menor do que 32, o valor do limiar é zero, caso contrario é aplicada a equação que prossegue.



### 3.1. Equipamentos e montagem experimental

Os experimentos foram realizados em um centro de usinagem marca Romi tipo V400 com a fixação da peça no dinamômetro Kistler 9257-BA conectado a um amplificador de sinais e uma placa de aquisição de dados.

O material do corpo de prova é uma liga de alumínio SAE 7475-T7, utilizado na indústria aeronáutica por suas boas propriedades mecânicas. A peça de trabalho foi usinada previamente com a finalidade de obter uma superfície inclinada a qual proporciona a possibilidade de aumentar a profundidade de corte com o avanço da ferramenta. As dimensões e o corpo de prova são mostrados na Fig. (3a).

A ferramenta de corte utilizada para a realização dos experimentos foi uma fresa de topo em aço rápido ao cobalto sem revestimento, com diâmetro de 6 mm e 4 arestas de corte, com um comprimento total de 58 mm e um ângulo de hélice de 30°. A ferramenta foi posicionada na pinça deixando um comprimento livre de 34,2 mm, com a finalidade de gerar com maior facilidade as vibrações chatter, como é mostrada na Fig. (3b).

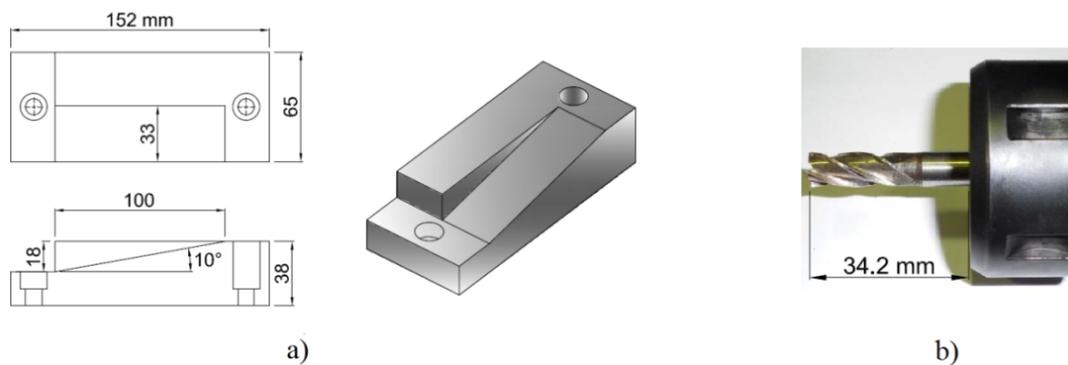


Figura 3. Corpo de prova e ferramenta de corte.

### 3.2. Parâmetros de corte

Os parâmetros de corte adotados para a realização dos experimentos são apresentados na Tabela 1: duas velocidades de rotação, com a finalidade de ver o comportamento da estabilidade da ferramenta. O avanço por dente foi mantido constante para que a variação da área de corte estivesse em função da profundidade de corte apenas. O processo de fresamento foi realizado em cheio. Os valores dos parâmetros de corte utilizados são resumidos na Tab. (1).

Tabela 1. Parâmetros de corte utilizados.

Parâmetros	Experimento 1	Experimento 2
Velocidade de rotação (rev/min)	5200	5570
Velocidade de corte (m/min)	(98)	(105)
Avanço por dente (mm/dente)	0,02	
Taxa de amostragem (Hz)	12480	13368

## 4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Dois testes, um de cada experimento, foram selecionados e são apresentados nas Fig 4 e 6. As componentes da força de usinagem medidas são mostradas nas Fig. (4a) e (6a) e a força resultante calculada é apresentada nas Fig. (4b) e (6b). Para a aplicação da TW, a função selecionada foi a Daubechies 4 com o quarto nível de decomposição, porque é a que melhor se adapta no tempo e na frequência, oferecendo um comportamento uniforme e suave como o recomendado por Misiti *et al.* (2001).

Os resultados da aplicação da DWT na força resultante  $F_r$  do experimentos 1 e 2, são os subsinais de aproximação  $A_4$  e detalhes  $D_1$ , mostrados nas Fig. (5) e (7).

Na Fig. (5a) pode-se observar o detalhe A-A que mostra como o subsinal  $A_4$  proporciona uma visão mais clara do comportamento do sinal com respeito ao sinal da  $F_r$  antes do tratamento e como também o subsinal de detalhes  $D_1$  contem as altas frequências que representam o ruído e os picos de força, relacionados com a presença de chatter.

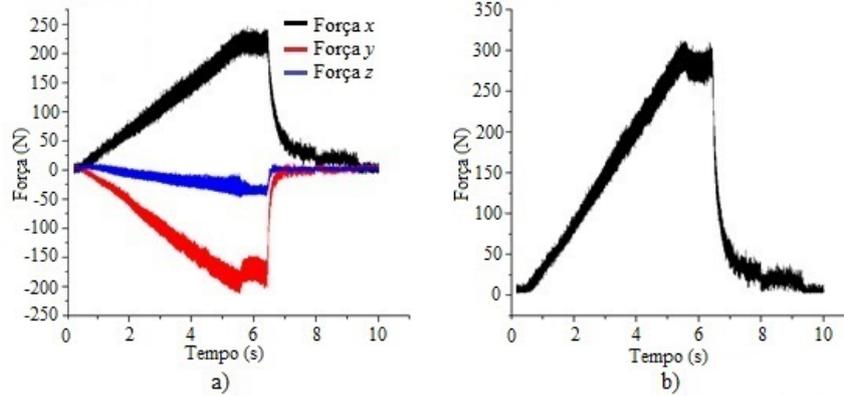


Figura 4. Forças de corte experimento 1 a) Componentes  $F_x$ ,  $F_y$  e  $F_z$  b) Força de usinagem resultante  $F_r$ .

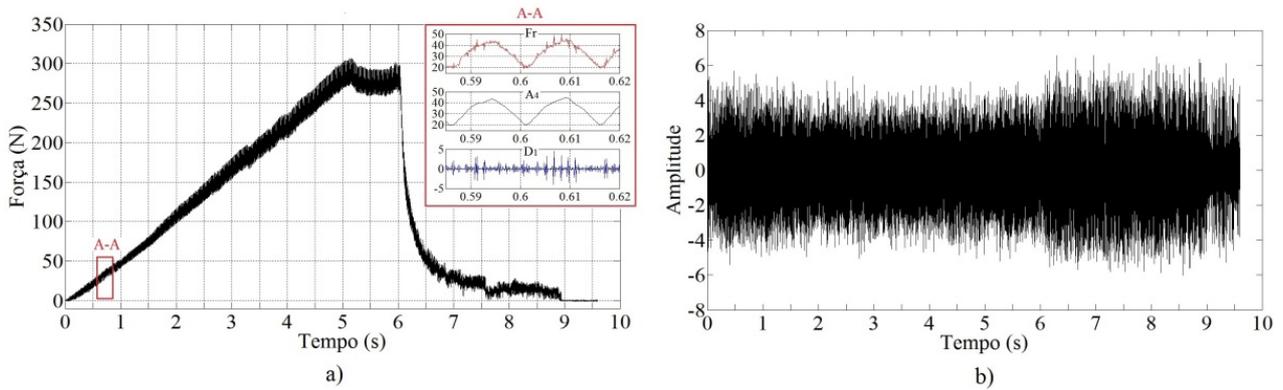


Figura 5. Resultados da DWT na  $F_r$  do experimento 1 a) Subsinal de aproximação  $A_4$  b) Subsinal de detalhes  $D_1$ .

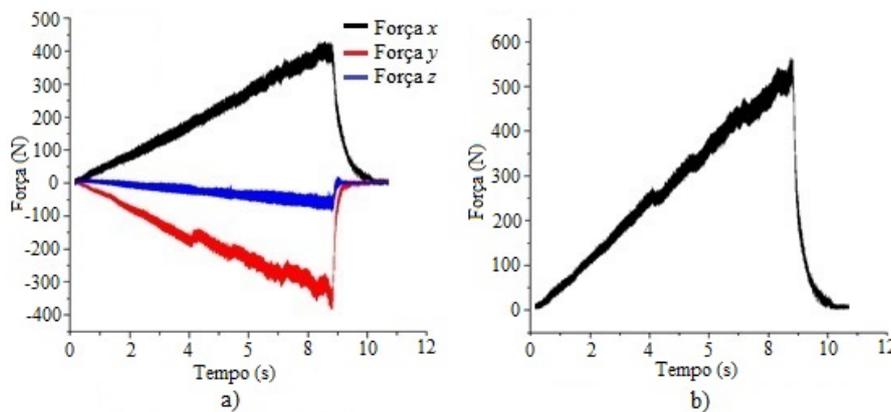


Figura 6. Forças de corte experimento 2 a) Componentes  $F_x$ ,  $F_y$  e  $F_z$  b) Força de usinagem resultante  $F_r$ .

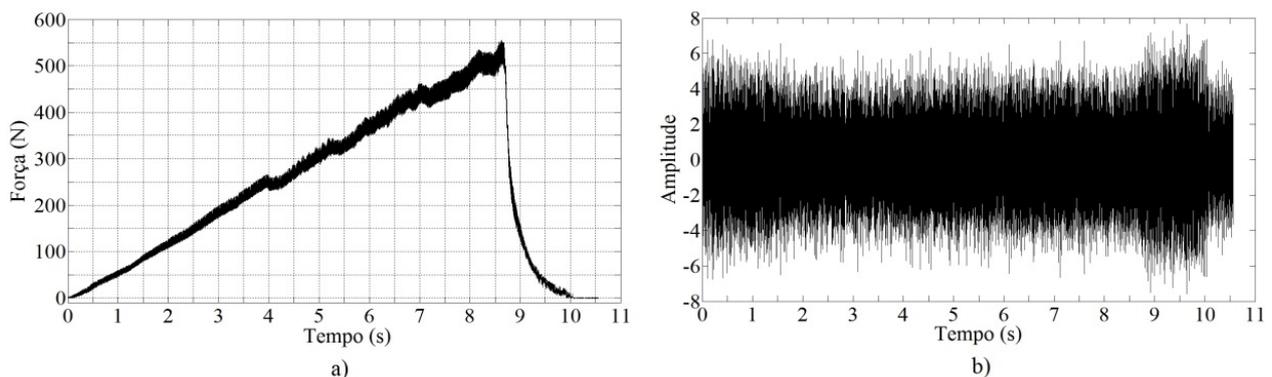


Figura 7. Resultados da DWT na  $F_r$  do experimento 2 a) Subsinal de aproximação  $A_4$  b) Subsinal de detalhes  $D_1$ .

#### 4.1. Eliminação do ruído e obtenção dos picos de força aplicando o limiar ( $\lambda$ )

Considerando que os subsinais  $D_1$  dos experimentos 1 e 2 estão compostos na maior parte por ruído, foram calculados os limiares Minimax e Universal, com as Eq. (3) e Eq. (4), para eliminar o ruído presente nestes subsinais. Os valores calculados dos limiares para o experimento 1 foram o limiar Minimax (3,479) e o limiar Universal (4,836), e para o experimento 2 o limiar Minimax (3,522) e o limiar Universal (4,869). Após obter os resultados dos limiares foi utilizado o método de limiar abrupto com a finalidade de zerar os valores menores ao valor calculado de  $\lambda$ , já que estes fazem parte do ruído, deixando assim os maiores valores, os quais representam os picos de força que estão ligados à ocorrência de chatter.

Nas Fig. (8a) e (9a) são mostrados os subsinais  $D_1$  dos experimentos 1 e 2 respectivamente, onde pode-se observar duas linhas azuis que denotam a faixa na qual o valor do limiar Universal atua, como também duas linhas vermelhas que representa o limiar Minimax. As Fig. (8b) e (9b) apresentam o resultado depois de ter aplicado o limiar Minimax ao subsinal  $D_1$ , e as Fig. (8c) e Nas Fig. (9c) mostram o subsinal  $D_1$  após a aplicação do limiar Universal.

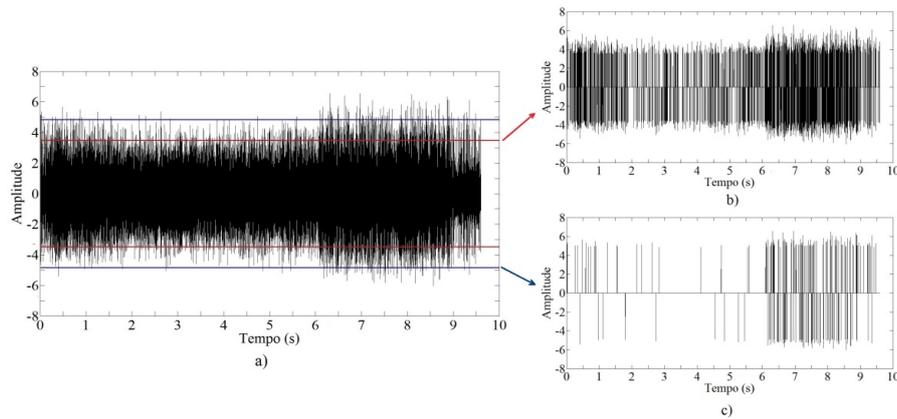


Figura 8. a) Subsinais de detalhes  $D_1$  do experimento 1 b)  $D_1$  do experimento 1 aplicando o limiar Minimax c)  $D_1$  do experimento 1 aplicando o limiar Universal.

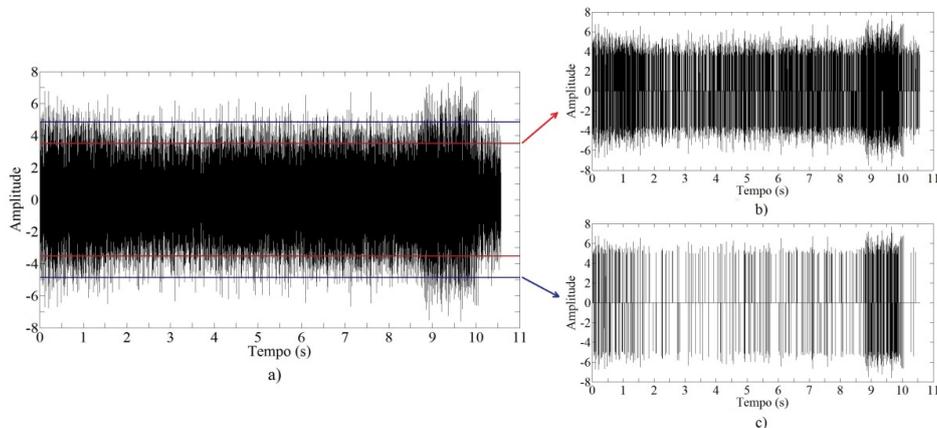
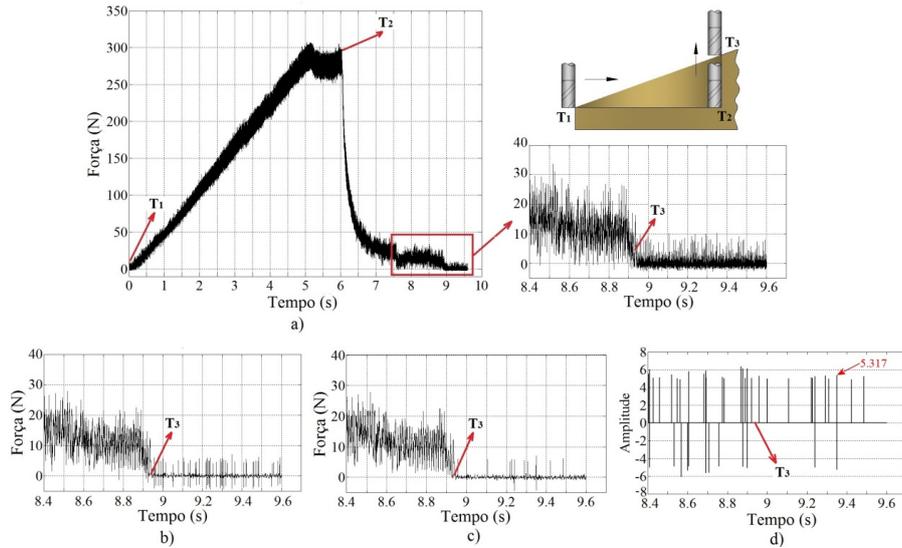


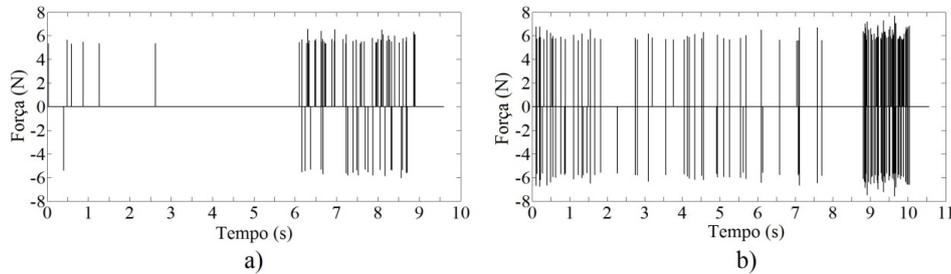
Figura 9. a) Subsinais de detalhes  $D_1$  do experimento 2 b)  $D_1$  do experimento 2 aplicando o limiar Minimax c)  $D_1$  do experimento 2 aplicando o limiar Universal.

Para selecionar o limiar adequado é feita uma comparação dos limiares, onde é somado ao subsinal  $A_4$  os subsinais  $D_1$  depois de ter aplicados os limiares Minimax e Universal para o experimento 1, sendo estas mostradas nas Fig. (10b) e (10c). Assim, utilizando o valor do limiar Universal, o qual é maior do que o limiar Minimax, o sinal resultante da soma  $A_4 \oplus D_1$  continua com ruído, podendo-se identificar porque na zona na qual a ferramenta deixa de ter contato com a peça, ou seja a partir do instante  $T_3$  e o tempo no qual o sinal deixa de receber informação, no sinal não deve existir nenhum pico de força portanto deveria ficar uma linha constante entorno do zero. Sendo necessário adquirir um novo valor de limiar que garanta a eliminação total do ruído, deixando somente os picos de força.

Para adquirir o novo valor de limiar o qual vai ser chamado de limiar gráfico, utilizou-se como referência a zona a partir do instante  $T_3$  onde é adotado o maior valor da amplitude, o qual pode ser observado na Fig. (10d). Esta mesma metodologia é utilizada para o experimento 2, onde os valores para o limiar gráfico do experimento 1 é de 5.317 e para o experimento 2 é de 5.584. Estes novos limiares gráficos foram aplicados nos subsinais  $D_1$  originais de ambos experimentos. Os resultados dos novos subsinais  $D_1$  aplicando o limiar gráfico para os experimentos 1 e 2, são apresentados nas Fig. (11a) e (11b) respectivamente.



**Figura 10. Seleção do limiar para o experimento 1 a) Sinal de  $F_r$  em cru b) Detalhe do sinal proveniente da soma de  $A_4 \oplus D_1$  usando limiar Minimax c) Detalhe do sinal proveniente da soma de  $A_4 \oplus D_1$  usando limiar Universal**



**Figura 11. Subsinais  $D_1$  aplicando o limiar gráfico a) Experimento 1 b) Experimento 2**

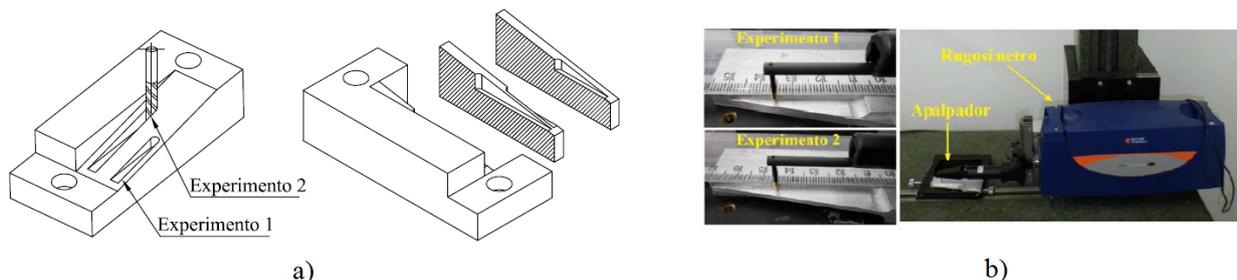
Nas Fig. (11a) e (11b), pode se observar que a partir do instante  $T_3$  foram eliminados os picos que representavam o ruído, deixando assim o sinal somente com os picos de força, os quais vão ser relacionados posteriormente com o sinal de rugosidade para determinar a presença de chatter.

#### 4.2. Resultados da rugosidade

A rugosidade é um conjunto de irregularidades, ou seja, pequenas saliências e reentrâncias que caracterizam uma superfície e a medida mais reconhecida e utilizada internacionalmente na indústria para quantificá-la é o desvio médio aritmético  $Ra$  (NBR ISO 4287:2002). No estudo elaborado por Benardos e Vosniakos (2003), para os processos de fresamento e torneamento, foi observado que entre os fatores que mais afetam a rugosidade superficial são as vibrações, as quais ocorrem devido à instabilidade dinâmica do sistema máquina-ferramenta.

Para realizar as medições de rugosidade foi necessário fazer cortes no corpo de prova através de um processo de electroerosão com fio. Estes cortes foram feitos na mesma direção na qual a ferramenta usinou, com a finalidade de permitir que o apalpador pudesse medir a face lateral da ranhura realizada pelo processo, como observados na Fig. (12a).

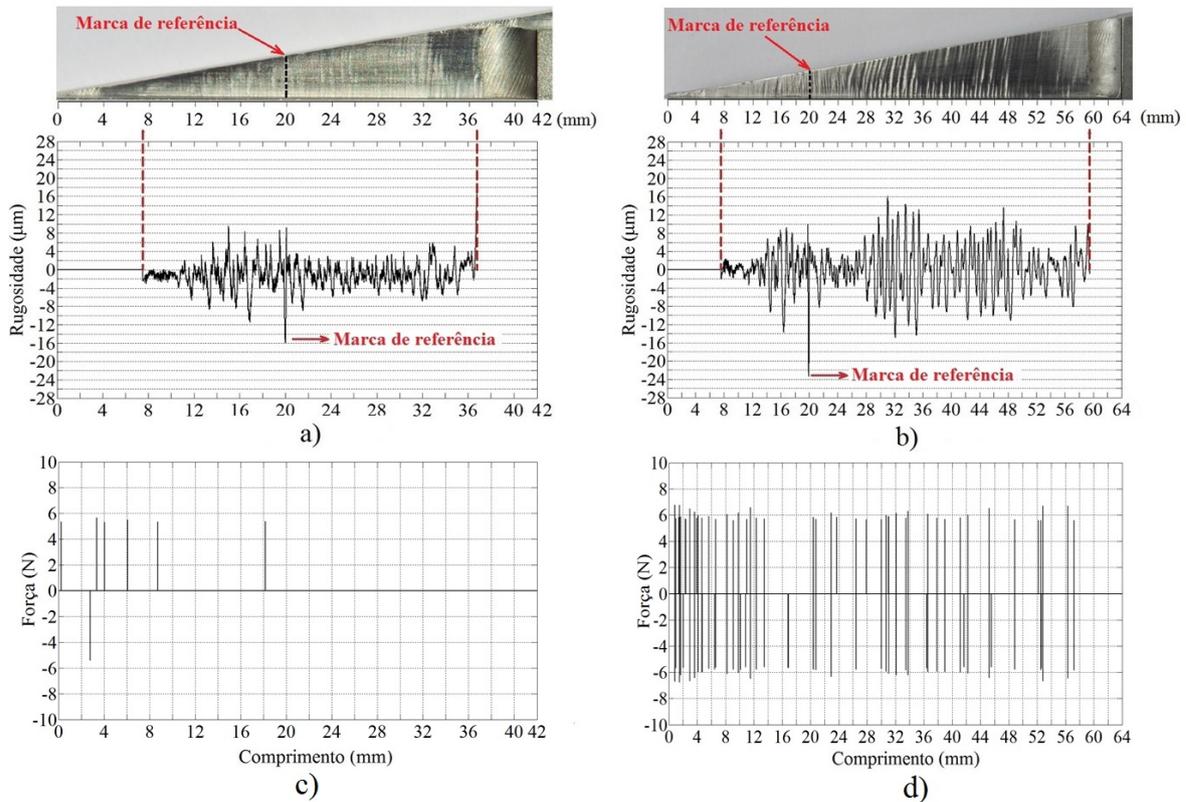
Para o processo de medição foi utilizado um rugosímetro Form Talysurf 50 séries 0120 e um apalpador de referência SY 0637, os dois da marca Taylor Hobson, os quais são mostrados na Fig. (12b).



**Figura 12. a) Preparação corpos de prova b) Procedimento de medição da rugosidade**

Para o cálculo da rugosidade  $Ra$  foi utilizado um comprimento de amostragem (*cut-off*) de 2.5 mm. As medições do perfil com filtro de *cut-off* da rugosidade na face lateral dos experimentos 1 e 2 não puderam ser realizadas em todo o seu comprimento, já que a topografia dificultava que o apalpador realizasse uma varredura total da superfície, além disto não era possível saber em que comprimento exato o apalpador começava a medição, por esta razão foi realizada uma marca de referência a um comprimento inicial de 20 mm.

Nas Fig. (13a) e (13b) são mostrados os resultados para os experimentos 1 e 2 da rugosidade superficial, onde são comparados com a superfície real usinada.



**Figura 13. Comparação dos resultados a) Rugosidade experimento 1 b) Rugosidade experimento 2 c) Picos de força no experimento 1 c) Picos de força no experimento 2**

Nas Fig. (13a) e (13b) pode-se observar como a amplitude da rugosidade superficial do experimento 2 é notavelmente maior do que a amplitude do experimento 1. Para ter certeza que a rugosidade do experimento 2 é maior do que o experimento 1 é calculado o desvio médio aritmético  $Ra$  com a Eq. (6), obtendo como resultado para experimento 1  $Ra=1.797 \mu\text{m}$  e para o experimento 2  $Ra=3.196 \mu\text{m}$ , confirmando assim que a rugosidade do experimento 2 é bem maior que o experimento 1, o qual quer dizer que a ferramenta apresentou vibrações no experimento 2, deixando marcas ou ondulações na superfície lateral.

#### 4.3. Comparação entre os picos de força e a rugosidade superficial

Com o objetivo de estabelecer uma relação do surgimento dos picos de força no subsinal de detalhes  $D_1$  com o aumento da rugosidade superficial nos experimentos 1 e 2 em função do comprimento usinado, realizou-se uma comparação entre a superfície real usinada, a rugosidade superficial e os picos de força gerados no processo de fresamento, que pode ser observada nas Fig. (13a) e (13c) para o experimento 1, e Fig. (13b) e (13d) para o experimento 2.

## 5. CONCLUSÕES

Neste artigo foi realizada a aplicação da Transformada Wavelet Discreta em sinais de força experimentais, e proposta uma técnica para a eliminação do ruído presente nos subsinais de detalhes. Foram efetuadas também medições de rugosidade a fim de relacionar a presença dos picos de força com o aumento da rugosidade superficial. Os resultados mostraram como a maior frequência de aparecimento dos picos de força originou também um aumento na amplitude da rugosidade. O procedimento experimental realizado neste artigo indica que a aplicação da DWT nos sinais de força de usinagem resultante pode detecta o chatter durante o monitoramento do processo.

## 6. REFERÊNCIAS

- Agostinho, O.L., Rodrigues, A.C., Larini, J., 1977, "Princípios de engenharia de fabricação mecânica: tolerâncias, ajustes, desvios e análise de dimensões", Edgard Blucher, Vol. 1.
- Antoniadis A., Bigot, J., Sapatinas, T., 2001, "Wavelet estimators in nonparametric regression: A comparative simulation study", Journal of Statistical Software, Vol. 6, pp. 1-83.
- Benardos, P.G., Vosniakos, G.C., 2003, "Predicting surface roughness in machining: a review", International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 43, pp. 833-844.
- Budak, E., Altintas, Y., 1995, "Analytical Prediction of Stability Lobes in Milling", CIRP Annals Manufacturing Technology, Vol. 44, pp. 357-362.
- Budak, E., Altintas, Y., 1998, "Analytical prediction of chatter stability in milling part I: general formulation", Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Vol. 120, pp. 22-30.
- Daubechies, I., 1990, "The wavelet transform, time-frequency localization and signal analysis". IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 36, pp. 961-1005.
- Donoho, D., Johnstone, I., 1993, "Ideal spatial adaptation by wavelet shrinkage", Biometrika, Vol. 81, pp. 425-455.
- Hanna, N.H., Tobias, S.A., 1974, "Theory of nonlinear regenerative chatter", Journal of Engineering for Industry, Vol. 96, pp. 247-255.
- Hongrui Cao, Yaguo Lei, Zhengjia He, 2013, "Chatter identification in end milling process using wavelet packets and Hilbert Huang transform", International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 69, pp. 11-19.
- Kasashima, N., Mori, K., 1995, "Online Failure Detection in Face Milling Using Discrete Wavelet Transform", CIRP Annals Manufacturing Technology, Vol. 44, pp. 483-487.
- Kunpeng, Z., San, W.Y., Soon, H.G., 2009, "Wavelet analysis of sensor signals for tool condition monitoring: A review and some new results", International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 49, pp. 537-553.
- Kurada, S., Bradley, C., 1997, "A review of machine vision sensors for tool condition monitoring", Computers in Industry, Vol. 34, pp. 55-72.
- Mallat, S.G., 1989, "A Theory for Multiresolution Signal Decomposition: The Wavelet Representation", IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence, Vol. 7, pp. 674 - 693.
- Minis, I., Yanushevsky, R., Tembo, A., Hocken, R., 1990, "Analysis of linear and nonlinear chatter in milling", CIRP Annals Manufacturing Technology, Vol. 39, pp. 459-462.
- Misiti, M., Misiti, Y., Oppenheim, G., Poggi, J.M., 2014, "Wavelet Toolbox™ User's Guide", The MathWorks Inc, Natick, MA.
- Oliveira, H. M., 2007, "Análise de sinais para engenheiros: uma abordagem via Wavelets". Rio de Janeiro, Brazil, Brasport.
- Riou, O., Vetterli, M., 1991, "Wavelet and signal processing", IEEE Signal processing Magazine, Vol. 8, pp. 14-38.
- Suh, C.S., Khurjekar, P.P., Yang, B., 2002, "Characterisation and identification of dynamic instability in milling operation", Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 16, pp. 853-872.
- Thrusty, J., Mac Neil, J., 1975, "Dynamics of cutting in end milling", Annals of CIRP, Vol. 24, pp. 213-221.

## DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

# DETECTION OF VIBRATIONS ON THE END-MILLING PROCESS APPLYING THE WAVELET TRANSFORM TO MACHINING FORCE SIGNALS.

**Abstract:** *In machining operations, especially end-milling of aluminum parts, surface finishing and tool behavior are affected by regenerative vibrations, also called chatter. Various methods to calculate and avoid this undesirable situation have been developed. Stability lobe diagram (SLD) has been being used to analyze if the part-tool system will be under a stable or unstable behavior with a cutting parameters configuration, using dynamic characteristics of the machine-tool and the tool. This work presents a method to detect chatter vibrations during the manufacturing and change cutting parameters if necessary. This proposal identifies if the system is under an unstable situation applying Discrete Wavelet Transform (DWT) to the signals of cutting forces during milling operations. The methodology uses the resultant cutting force and DWT obtains sub-signals of approximation and details. Then, noise is eliminated by suppressing signals under a threshold to the detail sub-signal, allowing to evidence force peaks that are related to the chatter presence. In order to make the study of the methodology application, the depth of cut varied during the experiment because it was machined a part with an inclined geometry and some cutting speed were evaluated. From the depth of cut boundaries chatter can be identified on the detailed sub-signal and the results are compared and validated with the roughness profile, measured after the end of the experiments on the side surface of milled channels. Experiments results indicate that resultant force peaks (after applying the threshold to the detailed sub-signals) are highly related to chatter presence as there is a good correlation of this situation with the rough surface reinforcing the applicability of the proposed method.*

**Keywords:** *End Milling, Cutting forces, chatter and Wavelet Transform.*