

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Departamento de Engenharia Mecânica

CARLOS EIJI HIRATA VENTURA

**ANÁLISE DA RELAÇÃO ENTRE A FORMAÇÃO DO CAVACO,
VIBRAÇÃO DA FERRAMENTA E DESVIO DE FORMA NO
PROCESSO DE TORNEAMENTO**

São Paulo
Dezembro / 2008

CARLOS EIJI HIRATA VENTURA

ANÁLISE DA RELAÇÃO ENTRE A FORMAÇÃO DO CAVACO,
VIBRAÇÃO DA FERRAMENTA E DESVIO DE FORMA NO PROCESSO
DE TORNEAMENTO

Trabalho de formatura apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para a obtenção do título de Engenheiro
Mecânico

São Paulo
Dezembro / 2008

CARLOS EIJI HIRATA VENTURA

ANÁLISE DA RELAÇÃO ENTRE A FORMAÇÃO DO CAVACO,
VIBRAÇÃO DA FERRAMENTA E DESVIO DE FORMA NO PROCESSO
DE TORNEAMENTO

Trabalho de formatura apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para a obtenção do título de Engenheiro
Mecânico

Área de concentração:
Engenharia Mecânica

Orientador:
Prof. Dr. Amauri Hassui

São Paulo
Dezembro / 2008

FICHA CATALOGRÁFICA

Ventura, Carlos Eiji Hirata

Análise da relação entre a formação do cavaco, vibração da ferramenta e desvio de forma no processo de torneamento / C.E. H. Ventura. – São Paulo, 2008.

75 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Processos de fabricação I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica II.t.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Amauri Hassui, pela orientação e constante estímulo transmitido durante todo o trabalho.

Ao engenheiro Armando I. S. Antonialli e ao técnico Aristides Magri pela ajuda na realização dos ensaios.

Ao engenheiro Marcello B. Montagnani pela ajuda nas medições de circularidade.

Ao Laboratório de Usinagem da UNICAMP pela disponibilização da máquina e do sistema de aquisição de sinais.

Às Indústrias Romi pela doação dos corpos de prova.

À Iscar do Brasil pela doação das ferramentas.

À Taylor Hobson e à Sandvik Hard Materials pela disponibilização do aparelho para medição da circularidade.

A todos que colaboraram direta ou indiretamente na execução deste trabalho.

RESUMO

Dentre as ligas de ferro-carbono, os ferros fundidos constituem um grupo de ligas de importância fundamental para a indústria, estando suas principais aplicações em motores Diesel, coletores de escapamento e discos de freio. O ferro fundido cinzento, embora possua uma boa usinabilidade, é pouco resistente e frágil, enquanto o vermicular é caracterizado por alta resistência mecânica e boa tenacidade. Em função dessas propriedades mecânicas, verifica-se que o ferro fundido cinzento apresenta um cavaco mais curto quando comparado ao vermicular, caracterizado pelo seu maior comprimento e, por consequência, diferentes frequências de formação. A periodicidade do processo de formação do cavaco, além do auto-excitamento devido às irregularidades na superfície da peça, causa a oscilação dos esforços de corte, o que provoca o deslocamento da ferramenta na direção radial, acarretando desvios de circularidade na superfície usinada.

O trabalho tem por objetivo a avaliação da influência do tipo de cavaco formado na qualidade da superfície da peça trabalhada, o que foi feito a partir da aquisição de sinais de vibração da ferramenta e de medições de circularidade da peça. Os dados obtidos foram analisados por meio de um espectro de potência para a verificação das frequências fundamentais. A partir dos resultados, verificaram-se poucas diferenças entre os materiais estudados, mas foi possível a obtenção de informações relevantes quanto à influência dos parâmetros de corte no desvio de forma das peças usinadas. Além disso, observou-se uma relação entre o perfil de circularidade e a vibração da ferramenta durante o processo.

Palavras-chave: Torneamento. Vibração. Circularidade.

ABSTRACT

Among the Fe-C alloys the cast irons constitute a group of fundamental importance to the industry with their main applications in manufacturing of Diesel motors, exhaust collectors and brake discs. Despite of its good machinability, the gray cast iron is less resistant and brittle, while its high mechanical resistance and good toughness characterize the CGI. Due to these mechanical properties, it can be verified in comparison that the gray cast iron presents a shorter chip whereas its longer length, what will imply in different frequencies of formation, distinguishes the CGI. The periodicity of the chip formation process and the self-excited vibration due to the irregularities in the workpiece surface cause oscillation on the cutting forces, promoting a displacement of the tool in the radial direction. This damages the machined workpiece surface causing roundness deviations.

The work has the purpose of evaluating the influence of the chip type in the characteristics of the machined workpiece surface. This was made through the acquisition of the tool vibration signals and the measurement of the workpiece roundness. The obtained data were analyzed by means of a power spectrum in order to verify the fundamental frequencies. Through the results, it could not be noted substantial differences between the studied materials, but it was possible to obtain important information about the influence of the cutting parameters in the form deviation of the turned workpieces. Moreover, one could note a relationship between the roundness profile and the tool vibration during the process.

Keywords: Turning. Vibration. Roundness.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	08
2. REVISÃO DA LITERATURA	09
2.1. TORNEAMENTO	09
2.1.1. Esforços de corte	09
2.2. VIBRAÇÃO	11
2.2.1. Vibração no torneamento	12
2.3. MATERIAL	15
2.4. MECANISMO DE FORMAÇÃO DO CAVACO	17
2.4.1. Tipos de cavaco	19
2.5. PRECISÃO DE FORMA	20
2.6. RELAÇÕES PERTINENTES	21
2.6.1. Formação do cavaco x material	21
2.6.2. Vibração x formação do cavaco	23
2.6.3. Vibração x circularidade	24
2.7. CONSIDERAÇÕES SOBRE A TRANSFORMADA DE FOURIER	25
3. MATERIAIS E MÉTODOS	28
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	30
5. CONCLUSÕES	67
REFERÊNCIAS	69
APÊNDICE A – PROGRAMAS UTILIZADOS	74

1 INTRODUÇÃO

A falta de exatidão é uma das maiores limitações da qualidade do produto na usinagem. Em relação ao processo de torneamento, um dos fatores que mais contribuem para o desvio de forma na peça são as forças de usinagem, que podem produzir um alto grau de vibração durante o processo. A oscilação destas forças durante o corte é decorrente, dentre outros fatores, das diferentes fases do processo de formação do cavaco.

Acredita-se que existe uma relação direta entre o tipo de cavaco formado (curto ou longo) e a frequência de oscilação da ferramenta. O caso estudado é caracterizado por vibrações forçadas (decorrentes dos esforços de corte e rigidez da máquina) e pelo aparecimento de vibrações auto-excitadas (efeito regenerativo em função de ondulações na peça). Assim, serão avaliadas três características: tipo de cavaco (função da característica do material), vibração do porta-ferramenta na direção radial (passiva) e circularidade.

O presente trabalho tem como objetivo correlacionar a frequência de vibração da ferramenta com a frequência de ondulação do perfil da peça, considerando-se o tipo de cavaco de cada material. Dessa forma, obter-se-á um maior entendimento da influência do tipo de cavaco na dinâmica de corte, colaborando para a possibilidade de atuação sobre os erros de forma no processo de torneamento.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 TORNEAMENTO

Como torneamento entende-se o processo mecânico de usinagem para geração de perfis cilíndricos. A peça gira em torno do eixo de rotação da máquina, enquanto uma ferramenta monocortante avança, arrancando material, no sentido de formar sua superfície.

Tal processo é utilizado na fabricação de eixos, rolamentos, elementos de fixação, discos de freios, entre outros componentes mecânicos de grande importância na indústria atual.

Dada a grande escala de produção das indústrias metalúrgicas, verifica-se a importância da obtenção de um processo que garanta rapidez e, ao mesmo tempo, qualidade, sendo atualmente tais requisitos essenciais para a entrada e permanência no mercado.

Para a verificação da qualidade, são tomadas, em muitos casos, as medidas de precisão dimensional e de forma, cada vez mais importantes em função de ajustes de montagem, considerando a intercambialidade das peças envolvidas.

A partir da dinâmica do processo de torneamento, é possível averiguar prováveis causas de desvios na peça acabada e desgaste na ferramenta. Para isso, torna-se importante a correta compreensão dos esforços que agem nesta durante o corte.

2.1.1 Esforços de corte

As componentes da força de usinagem (força que atua sobre a cunha cortante durante o processo) são obtidas através da decomposição ortogonal desta (Fig.1):

-Força de corte: força de usinagem projetada sobre a direção de corte;

- Força de avanço: projeção da força de usinagem sobre a direção de avanço;
- Força passiva (de profundidade): projeção da força de usinagem sobre uma perpendicular ao plano de trabalho (que contém as direções de corte e avanço e passa pelo ponto de referência da aresta cortante).

O valor absoluto das componentes da força de usinagem é afetado pelas variações do processo de torneamento. Essas variações incluem as mudanças na peça e nas propriedades da ferramenta, mudanças na dureza da ferramenta e da peça, mudanças nas propriedades do fluido de corte, etc. Visto que não há uma maneira fácil de explicar essas variações com as condições de corte, seus efeitos nas variáveis da força de usinagem devem ser minimizados. Para fazer isso, foi sugerida a normalização das componentes da força de usinagem [1,2]. As variáveis da força de usinagem mais freqüentemente usadas são as proporções relativas a esta força, isto é,

$$F_1 = \frac{F_x}{F_z}, F_2 = \frac{F_y}{F_z}, F_3 = \frac{F_z}{\sqrt{F_x^2 + F_y^2}} \quad (1).$$

O uso destas proporções reduz a importância dos valores absolutos das componentes da força de usinagem [3].

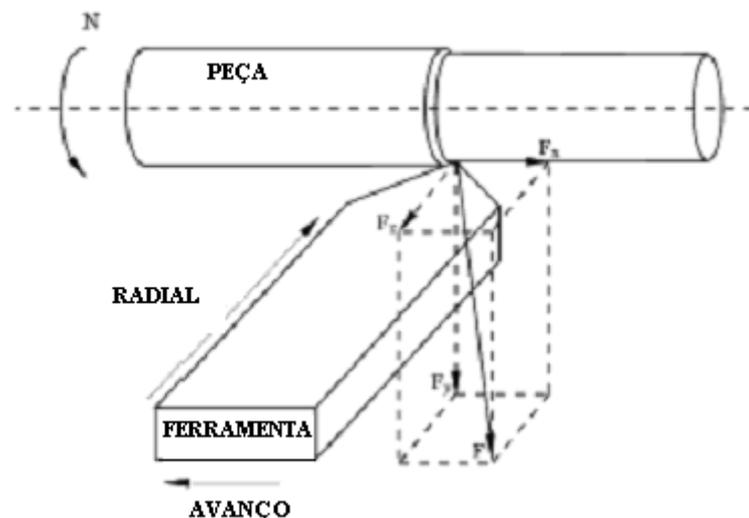


Figura 1 – Componentes da força de usinagem no torneamento [4]

A força radial (passiva), a qual será avaliada a influência no presente estudo é função do ângulo de posição χ (ângulo entre o plano de corte e o de trabalho) e do

ângulo de inclinação da ferramenta λ (ângulo entre a aresta de corte e o plano de referência medido no plano de corte). A componente ainda depende do raio da ponta da ferramenta r , do avanço f e da profundidade de corte a_p . A partir de ensaios feitos por Ferraresi [5], foram gerados gráficos que ilustram tais influências. Estes são mostrados na Figura 2.

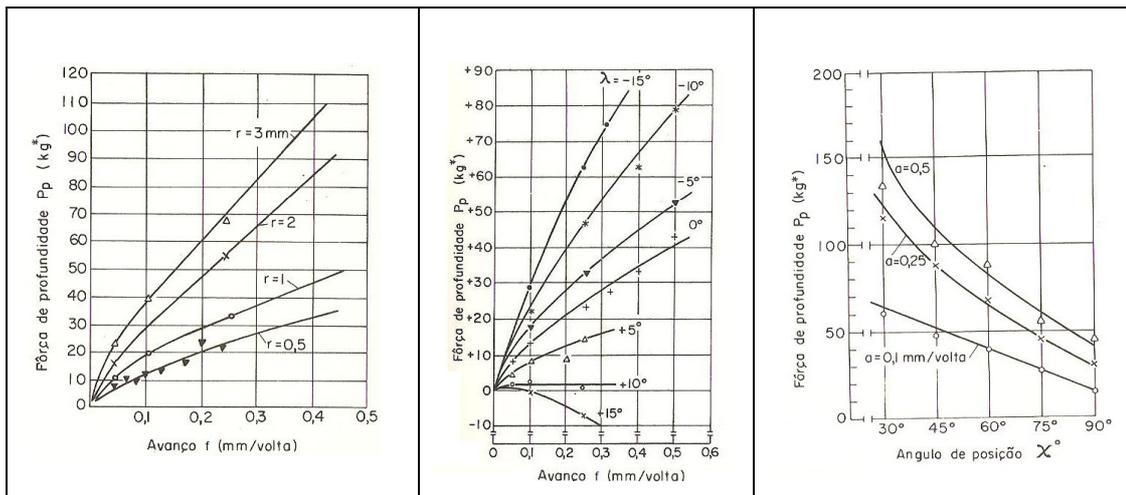


Figura 2 – Variações na força de profundidade em função do avanço, raio da ponta da ferramenta, ângulo de inclinação da ferramenta e ângulo de posição.
 Condições de corte: Material aço Ck 53 N; ferramenta de metal duro P30; $a_p = 3$ mm; $v_c = 125$ m/min; $\alpha = 8^\circ$; $\gamma = 10^\circ$; $\lambda = 0^\circ$; $\chi = 90^\circ$; $\varepsilon = 85^\circ$. [5]

2.2 VIBRAÇÃO

O estudo da vibração está baseado no movimento oscilatório de corpos e as forças associadas a este. Para o projeto da maioria das máquinas e estruturas de engenharia, é necessário levar em consideração o comportamento dinâmico do componente, verificando as forças atuantes e o grau de vibração [6].

Os sistemas vibratórios podem ser classificados como lineares e não-lineares. Para aqueles vale o princípio da superposição. Devido às pequenas amplitudes no movimento da ferramenta, o sistema aqui tratado será considerado linear, sendo que as técnicas matemáticas para a análise deste já são conhecidas.

Outra classificação implica em duas categorias diferentes: vibração livre e forçada. Esta última está sujeita à ação de uma força externa. Quando esta força é

oscilatória, o sistema é forçado a vibrar com a frequência de excitação. Se a frequência imposta coincide com uma das frequências naturais do sistema, a amplitude de oscilação aumenta consideravelmente. Na vibração livre, a oscilação ocorre devido a forças inerentes ao próprio sistema. No caso do torneamento, estas forças podem ser devidas ao efeito da elasticidade e do amortecimento do sistema como um todo.

2.2.1 Vibração no torneamento

Segundo Lee et al. [7], vibrações no torneamento podem ser classificadas em três categorias: vibração livre, vibração forçada e vibração auto-excitada. Normalmente, a vibração livre, comparada à forçada ou à auto-excitada, tem pouco significado prático por causa de sua resposta curta e transiente. A vibração forçada aumenta com a aplicação de esforços de corte (força de corte, de avanço e passiva) agindo na ferramenta. A ferramenta oscilará à frequência destes. Além disso, também deve ser levada em conta a influência da máquina na dinâmica do processo, o que pode ser exemplificado por eixos desbalanceados, problemas nos rolamentos, engrenagens, entre outros. Experimentos feitos por El-Sinawi e Kashani [8], para a avaliação do comportamento dinâmico da máquina e do processo de corte na operação de torneamento observaram que:

- (1) mesmo sem corte, certos modos de vibração estrutural da máquina são excitados pela rotação do fuso;
- (2) durante o corte, dependendo das condições, o processo regenerativo entre a peça e a ferramenta pode influenciar a dinâmica da máquina;
- (3) a magnitude da vibração da máquina tem um alto impacto no processo de corte e este, por sua vez, tem efeito significativo nas amplitudes de vibração da estrutura da máquina com efeito menor nas frequências.

Já a vibração auto-excitada resulta de uma instabilidade dinâmica do processo de torneamento, geralmente o efeito regenerativo, que consiste na excitação da ferramenta pelas ondulações produzidas na superfície da peça devido ao próprio corte. Um fator importante na avaliação da auto-excitação é a

profundidade de corte a_p , a qual é medida como um valor crítico, acima do qual ocorrem instabilidades durante o corte [9], como pode ser visto na Figura 3.

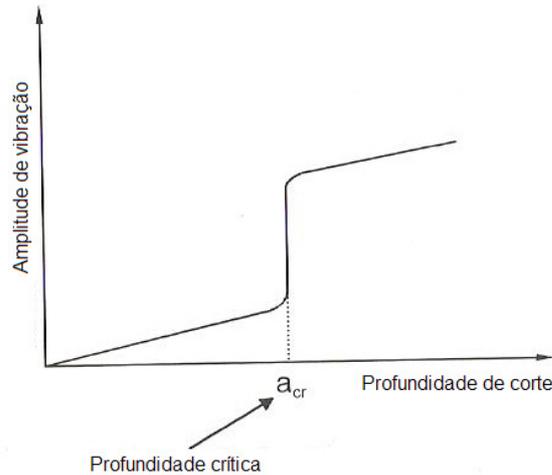


Figura 3 – Gráfico representativo da amplitude de vibração em função da profundidade de corte [9]

A interação entre os esforços de corte e a vibração através de um mecanismo de retorno forma um sistema dinâmico de ciclo fechado, sendo a frequência da vibração auto-excitada próxima ou maior que a frequência natural da ferramenta [10]. O efeito auto-regenerativo causado em um processo de corte ortogonal pode ser observado na Figura 4, onde se pode notar a relação da vibração da ferramenta também com a espessura do cavaco formado, já que este último parâmetro altera a força de corte. Os parâmetros $x(t)$ e $y(t)$ indicam as direções de deslocamento da ferramenta, V é a velocidade de corte e τ representa o período correspondente a uma revolução da peça.

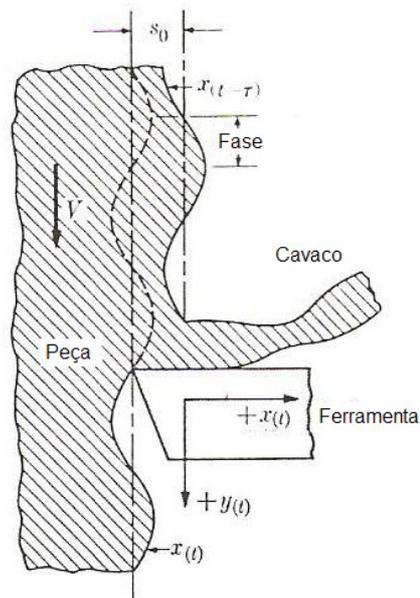


Figura 4 – Formação do cavaco e efeito regenerativo [11]

De acordo com Weck e Brecher [9], outro efeito, de menor importância, que pode levar à constância de vibrações auto-excitadas corresponde ao aumento da velocidade de corte com o decorrente decréscimo das forças de corte, o que influencia negativamente o amortecimento do sistema, implicando em instabilidades. Este efeito está limitado a baixas velocidades de corte, sendo estas pouco utilizadas para a maioria das combinações material-ferramenta atuais.

Apesar de Cook [11] ter notado que os modos de vibração são freqüentemente acoplados, aqui será analisado separadamente apenas o efeito da força passiva (radial), já que o estudo realizado por Thomas e Beauchamp [12], mostrou que isso é possível. Através de medições da freqüência natural da ferramenta, foi observado que a ferramenta vibra como um sistema de um grau de liberdade para cada coordenada em uma faixa de freqüência limitada. A Figura 5 mostra o modelo possível de ser utilizado, onde x_d é o deslocamento da ferramenta na direção radial, F é a força de usinagem, m é a massa equivalente e c e k correspondem aos parâmetros de amortecimento e elasticidade do sistema, respectivamente.

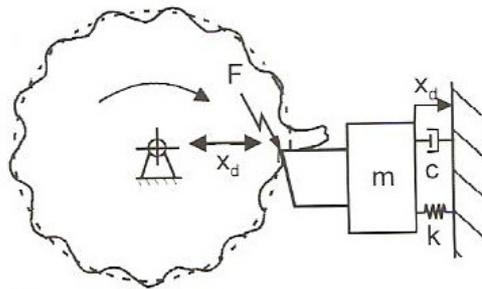


Figura 5 – Modelo de um grau de liberdade para o processo de torneamento [9]

Dimla Sr. [13] verificou relações de amplitude e freqüência entre o espectro das forças dinâmicas e o sinal de vibração, o que permite concluir que as forças oscilatórias influenciam o grau de oscilação da ferramenta. Mais especificamente, acredita-se que a freqüência do movimento vibratório da ferramenta na direção radial tem correspondência com a freqüência de oscilação da força passiva. A variação dessa força está intimamente ligada à freqüência de formação do cavaco e ao efeito regenerativo. Tobias [14] desenvolveu modelos lineares e explicou que a vibração da ferramenta pode ser afetada por forças devidas a:

- variação na espessura do cavaco, o que causa o efeito regenerativo (efeito na freqüência);
- condição de atrito, que afeta o amortecimento da ferramenta pela produção de uma força proporcional à velocidade (efeito na amplitude);
- variação da taxa de penetração (correspondente à formação do cavaco), que produz uma força proporcional ao deslocamento da ferramenta e à velocidade (efeito na freqüência natural e amplitude);
- variação na velocidade de corte, a qual afeta o amortecimento da ferramenta (efeito na amplitude).

Em seus estudos, Cook [11] verificou que, em geral, vibrações da ferramenta em altas freqüências são observadas em uma freqüência completamente independente da velocidade de corte, sendo ainda o efeito regenerativo de pouca importância.

2.3 MATERIAL

Dentre as ligas de ferro-carbono, os ferros fundidos constituem um grupo de ligas de importância fundamental para a indústria, não só devido a características inerentes ao próprio material, como também pelo fato de, mediante introdução de elementos de liga e aplicação de tratamentos térmicos adequados, ter sido viável seu emprego em aplicações que, de certo modo, eram exclusivas dos aços [8]. Entre estas aplicações, pode-se citar a fabricação de blocos de motores diesel, coletores de escapamento e discos de freios [15, 16].

Estes materiais são ligas de ferro, silício e carbono contendo outros elementos como manganês, enxofre e fósforo, que alteram significativamente as propriedades das ligas. Apesar das partículas de grafita se formarem quando o teor de carbono é maior que apenas 2% em peso, a maioria dos ferros fundidos comercialmente produzidos possui entre 3 e 4% [15]. Os ferros fundidos podem ser classificados da seguinte forma [8, 17]:

- ferro fundido cinzento: os elementos fundamentais são o carbono e o silício e uma parcela relativamente grande do carbono está no estado livre; as grafitas possuem forma lamelar e distribuem-se de forma aleatória;
- ferro fundido branco: os elementos fundamentais também correspondem ao carbono e ao silício, mas apresenta o carbono quase todo na forma combinada ;
- ferro fundido mesclado: possui uma mescla de proporções de ferro fundido branco e cinzento;
- ferro fundido maleável: obtido a partir do ferro fundido branco, mediante um tratamento térmico especial (maleabilização), transformando todo o ferro combinado em grafita na forma de nódulos;
- ferro fundido nodular: apresenta carbono livre na forma de grafita esferoidal, resultante a partir de um tratamento ainda realizado no estado líquido.
- ferro fundido vermicular: a grafita se encontra na forma de vermes com forma alongada e extremidades arredondadas. É obtido no estado bruto de fusão, através da adição de elementos de liga e controle do processo de solidificação [15].

Serão utilizados neste trabalho apenas os ferros fundidos cinzento e vermicular devido às diferentes propriedades mecânicas que irão caracterizar o tipo de cavaco formado a partir do material.

De acordo com Xavier [18], as diferenças entre essas ligas são creditadas aos tipos de morfologias das suas grafitas, que conferem propriedades físicas e mecânicas distintas a cada uma delas.

O ferro fundido cinzento é relativamente leve, fácil de usar e devido às orientações das grafitas, amortece muito bem as vibrações [15, 18], mas é pouco resistente e frágil, sendo estas últimas características conseqüentes às descontinuidades provocadas na matriz pelos cantos agudos das grafitas, que agem como pontos de concentração de tensões e plano de propagação de trincas [19, 20, 21, 22]. Já o ferro fundido vermicular possui grafita intermediária entre os ferros fundidos cinzento e nodular, sendo que as extremidades arredondadas e as superfícies rugosas desta previnem a formação e propagação de trincas. Dessa forma, há um bom compromisso entre resistência mecânica e tenacidade, além deste tipo de ferro fundido possuir melhores propriedades em elevadas temperaturas. Entretanto, em função destas características, a usinabilidade piora [15].

Segundo Machado et al. [23], a usinabilidade decresce à medida que se caminha para classes de maior resistência, por causa do aumento da quantidade de perlita na matriz.

2.4 MECANISMO DE FORMAÇÃO DO CAVACO

Diversos problemas podem ocorrer em função do tipo de cavaco produzido no processo de usinagem. Controles de cavaco não-efetivos não resultarão apenas em baixa produtividade e pobre acabamento superficial de componentes, mas também poderão prejudicar ferramentas, máquinas e peças, assim como poderão causar ferimentos em operadores [24].

Em geral, a formação do cavaco pode ser descrita através dos seguintes passos:

- a- a partir da penetração da ferramenta, uma porção de material é recalcada contra a superfície de saída da ferramenta;
- b- tal porção sofre deformação plástica, a qual aumenta até atingir um certo valor de tensão de cisalhamento, iniciando-se um deslizamento entre o

material recalçado e a peça. Este deslizamento ocorre segundo as direções dos planos de cisalhamento dos cristais da porção recalçada;

- c- haverá então ruptura parcial ou completa na região de cisalhamento, realizando-se esta somente perto da aresta cortante para materiais altamente deformáveis, formando cavaco contínuo. Para materiais frágeis, o cavaco originado é de cisalhamento ou ruptura;
- d- continuando-se o movimento relativo entre ferramenta e peça, inicia-se um escorregamento da porção do material cisalhada sobre a superfície da ferramenta. Enquanto isso, uma nova porção do material está se formando e cisalhando.

A periodicidade do fenômeno foi comprovada experimentalmente por meio da medida da frequência e da amplitude de variação da intensidade da força de usinagem [5].

Existem diversas teorias desenvolvidas para a determinação do mecanismo de formação do cavaco, estando estas preocupadas com as tensões envolvidas e a avaliação da taxa e da frequência de deformação do material, tendo esta última valores bastante altos.

Tem-se o modelo da tensão de contato [25], a qual é avaliada a partir da geometria de interação. Quando ocorre contato entre a ferramenta e a peça, choque é gerado onde o efeito dinâmico é mais significativo. Em função do deslocamento das ondas de choque, ocorre variação dos valores de tensão.

Conta-se também com o modelo de Times [26], onde se considera a interação ferramenta-peça-cavaco: a ferramenta começa a penetrar na peça, ultrapassando sua resistência. A resistência à penetração cresce proporcionalmente à área de compressão do material da peça, o que resulta em um aumento na força de penetração. Esse processo continua até que a força se torne suficientemente grande para quebrar um pequeno fragmento do material da peça, que se move ao longo de um plano de escorregamento particular em certo ângulo. A força de penetração decresce abruptamente e um novo ciclo de formação do cavaco começa a ocorrer.

Ambos os modelos comprovam, por meio da medição das tensões e dos esforços de corte, a dinâmica periódica do processo de formação do cavaco. Por outro lado, novos modelos foram criados visando à simplificação dos processos de corte reais. Nestes, o uso do 'estado permanente' auxiliou a definir valores médios de parâmetros de processo durante o corte, mas por outro lado, criou a idéia de que

a distribuição de tensões é invariante no tempo, o que constitui um erro do ponto de vista conceitual da formação de cavaco, sendo este um processo onde o cavaco sofre mudanças nas tensões e deformações [27].

2.4.1 Tipos de cavaco

Os diferentes tipos de cavacos podem ser classificados em:

- a- Cavaco contínuo: camadas de material de cavaco justapostas em uma disposição contínua e alocadas em agrupamentos distintos. Tal cavaco se forma na usinagem de materiais dúcteis e homogêneos.
- b- Cavaco de cisalhamento: agrupamentos de material de cavaco bem distintos e justapostos. Sua formação ocorre a partir da diminuição da resistência do material no plano de cisalhamento devido ao aumento da deformação ou à heterogeneidade da estrutura metalográfica.
- c- Cavaco de ruptura: fragmentos arrancados da peça usinada. Os agrupamentos de material de cavaco permanecem separados. Ocorre a partir de materiais frágeis ou de estrutura heterogênea.

Os cavacos ainda podem ser classificados em função da sua forma, de acordo com a Figura 6. A figura ainda mostra uma terceira classificação do cavaco formado de acordo com o fator de empacotamento.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
em fita	emara nhado fita	hélice plana	hélice oblíqua	hélice cil. longa	hélice cil. curta	hélice espiral	espiral	vírgula	arran cados
					bom				
			útil					útil	
desfavorável									

Figura 6 – Formas de cavaco [28]

Trent [29] ressalta que a seção transversal do cavaco, mesmo na usinagem ortogonal, não é exatamente retangular; ao contrário, tanto a espessura quanto a largura do cavaco são geralmente maiores que a espessura e a largura teóricas de usinagem. Este fato é conseqüente ao escoamento da porção de material arrancada estar restringida somente pela face da ferramenta, podendo o metal mover-se livremente em todas as outras direções durante a formação do cavaco.

2.5 PRECISÃO DE FORMA

Erros de forma correspondem à diferença entre a superfície real da peça e a forma geométrica teórica. A precisão de forma das peças usinadas é um fator de grande importância que, se maximizado, pode contribuir para a diminuição de refugos na indústria. Em peças que exibem superfície cilíndrica, a medição de circularidade pode ser utilizada como um parâmetro relevante para a verificação da qualidade desta.

Circularidade é definida como a condição pela qual qualquer círculo deve estar dentro de uma faixa definida por dois círculos concêntricos, distantes no valor da tolerância especificada.

Como exemplo da importância do controle deste desvio, pode-se citar os cilindros de combustão interna, onde a tolerância de circularidade deve ser estreita para evitar vazamentos.

Os erros de forma são ocasionados por vibrações, imperfeições na geometria da máquina, defeito nos mancais e nas árvores, etc.

2.6 RELAÇÕES PERTINENTES

Serão mostradas a seguir algumas relações pertinentes, baseadas na literatura, entre os parâmetros a serem avaliados no projeto.

2.6.1 Formação do cavaco x material

Segundo Shaw [30], diversas variáveis podem influenciar a natureza e a extensão da fratura que ocorre durante o processo de formação de cavaco. Entre estas estão as características do material (número, tamanho, forma e dureza relativa das heterogeneidades, dureza produzida por tratamento térmico ou por encruamento) e a geometria da ferramenta, sendo que, segundo Klose [31], ângulos de saída negativos ou arredondamentos da ponta da ferramenta aumentam a deformação plástica durante a formação do cavaco.

A importância das heterogeneidades no corte de metais é evidente quando as características de diferentes ferros fundidos são comparadas. No caso dos ferros fundidos cinzento e vermicular, devem ser consideradas as diferentes formas assumidas pela grafita na microestrutura. Alguns pesquisadores dizem que a grafita atua aumentando a tensão durante a formação do cavaco, o que facilita a usinagem, enquanto outros defendem que a grafita fragiliza a liga e facilita a produção do cavaco. Foi também proposta a lubrificação interna pela grafita, facilitando o cisalhamento, mas ainda não se chegou a um consenso [32].

No ferro fundido cinzento, durante a usinagem, a ferramenta primeiro comprime o material e, como as suas grafitas possuem lamelas afiadas em forma de

veios, ocorre uma concentração de tensão nas suas extremidades e, devido ao fato de elas serem interconectadas, cria-se um plano de propagação de trincas à frente da aresta de corte (Figura 7-a). Com o avanço da ferramenta, o material é removido completamente com uma menor força de corte (b). Durante a usinagem, a ferramenta de corte não permanece sempre em contato com o material, pois uma porção de desse é removida à frente da ferramenta, gerando crateras (c). O arrancamento do material contribui para a liberação da grafita, que age como lubrificante e piora a rugosidade da superfície usinada (d) [33, 34].

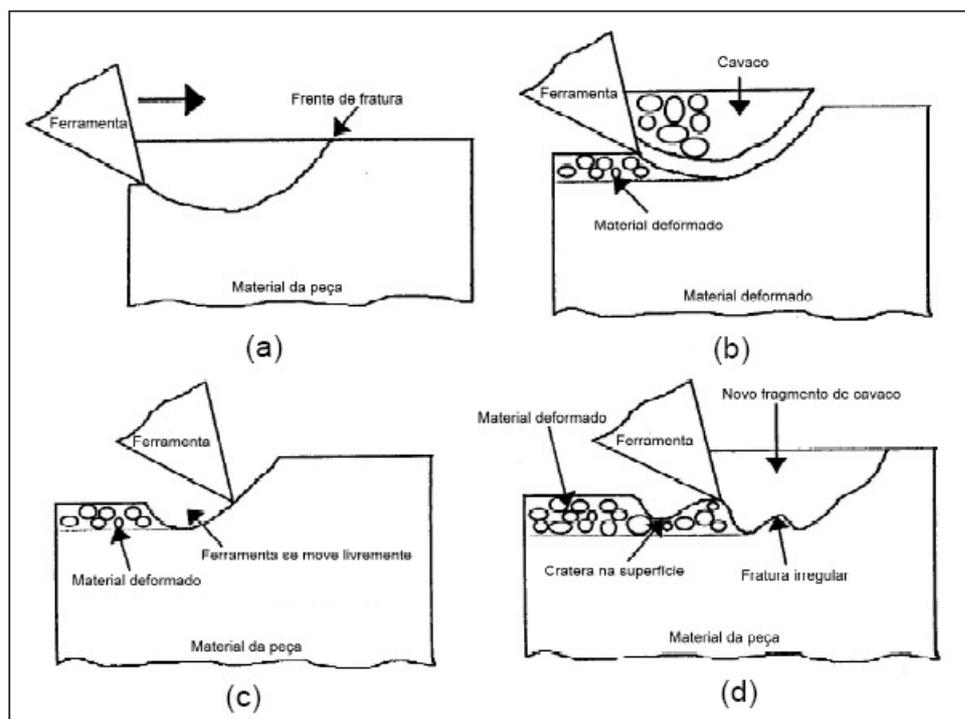


Figura 7 – Formação do cavaco no ferro fundido [33]

No vermicular, como as arestas das lamelas das grafitas são arredondadas, o corte requer uma maior força, já que o formato do cavaco é muito mais parecido com o gerado na usinagem do ferro fundido nodular. Apesar da forma da grafita tornar o modo de ruptura do cavaco dúctil, o ferro fundido vermicular é usinado da mesma maneira que o cinzento, através de uma trinca no plano da grafita que possui uma menor resistência aos esforços de corte [18, 23].

Além disso, considerando a fragilidade do ferro fundido cinzento e a maior resistência e tenacidade do vermicular (maior quantidade de ferrita e menor de

perlita na matriz aumenta a plasticidade do material [32]), pode-se afirmar que aquele forma um cavaco mais curto (de ruptura) como resultado da concentração de tensão associada com os veios de grafita que compõem o material, ocorrendo a ruptura em um curto espaço de tempo, enquanto o vermicular forma um cavaco mais longo, aumentando o período do ciclo de formação deste.

Em seus estudos, Andrade [17] mostra que o cavaco produzido na furação do ferro fundido vermicular apresenta tipo e forma aproximada do cavaco gerado a partir do ferro fundido cinzento na mesma operação, ou seja, cavaco arrancado. Já no fresamento e torneamento, as diferenças são mais nítidas, revelando a maior ductilidade do ferro fundido vermicular.

2.6.2 Vibração x formação do cavaco

Como mostrado no item 2.4, a dinâmica de formação do cavaco tem estreita relação com a oscilação dos esforços de corte. Em seus estudos, Dimla Sr. [13] observou que os picos de amplitude no sinal da força durante o processo apresentam correspondência com a frequência natural do porta-ferramenta ou são provenientes do processo de formação do cavaco. Astakhov [35] defende que o fenômeno da periodicidade da formação do cavaco deveria ser incorporado na análise dinâmica do processo de corte. A partir da análise espectral das forças medidas durante um processo de corte ortogonal, ele observou que as maiores amplitudes são as avaliadas nas frequências correspondentes às de formação do cavaco.

No caso do cavaco descontínuo, nota-se que o maior valor absoluto da força de usinagem ocorre quando do cisalhamento do material e o valor mais baixo quando começa a propagação da trinca e o desprendimento do cavaco [36]. Devido ao ciclo de formação deste tipo de cavaco ser curto, observa-se uma elevada frequência de oscilação dos esforços de corte, podendo implicar em uma alta frequência de vibração da ferramenta. Nota-se então que o cavaco contínuo apresenta valores de frequência menores, em função do maior tempo sem ocorrência de ruptura.

Bäker [37] e Jaspers e Dautzenberg [38] verificaram que muitas ligas formam cavacos segmentados a altas velocidades, onde a deformação do cavaco é heterogênea e regiões de alta e baixa deformação se alternam, levando a um serrilhado na parte posterior do cavaco. Com isso, notaram que a flutuação das forças de corte devido ao cavaco serrilhado pode levar a vibrações da ferramenta dependendo da rigidez da máquina.

As vibrações ocorridas tanto no caso do cavaco serrilhado, como a partir dos altos valores dos esforços de corte no processo de formação deste ocasionam o deslocamento da ferramenta nas direções onde atuam as componentes da força de usinagem (corte, avanço e passiva). Devido a estas forças serem ortogonais, elas podem ser consideradas separadamente, causando então movimentos regidos por equações diferenciais desacopladas. Assim, pode-se avaliar o efeito de cada uma delas de forma independente. O presente trabalho propõe o estudo da influência da força passiva, já que seu deslocamento periódico aliado à ondulação, também periódica, na peça, altera os valores da circularidade na superfície.

2.6.3 Vibração x circularidade

Erros podem ser classificados em duas categorias: quase-estáticos e dinâmicos. Erros quase-estáticos são aqueles entre a ferramenta e a peça, que variam lentamente com o tempo e se relacionam com a estrutura da máquina. Essas fontes incluem os erros geométricos / cinemáticos, erros devidos a componentes da máquina e aqueles devidos a deformações termicamente induzidas na estrutura da máquina. Erros dinâmicos, por outro lado, são causados por fontes como erro de movimentação do fuso, vibrações da estrutura da máquina, erros do controlador, etc. Estes últimos são mais dependentes de condições particulares de operação da máquina [39].

O erro induzido pelas forças de usinagem pode ser classificado como um erro dinâmico e contribui para a maioria dos erros reportados (térmicos, geométricos, cinemáticos), restringindo as indústrias a trabalharem com reduzidas taxas de remoção de material [40].

Estudos feitos por Mayer et al. [41] avaliaram o erro no diâmetro final da peça (que se reflete no diferente valor da profundidade de corte) em função de deflexões ocorridas devido aos esforços de corte. Foi observado que essas deflexões dizem respeito ao sistema peça-ferramenta-máquina, não sendo, portanto devidas apenas ao deslocamento radial da ferramenta durante o processo, apesar deste último ser de grande importância no desvio de forma da peça.

Um fator relevante de influência nestes erros é a vibração composta pela vibração da própria máquina e das oscilações dos esforços de corte ocorridas durante o processo, originadas da formação do cavaco e da auto-excitação produzida a partir do efeito regenerativo proveniente da ondulação da superfície da peça [9]. As amplitudes do deslocamento da ferramenta provocadas por essa vibração prejudicam a qualidade do acabamento da superfície da peça, o que é mais especificamente notado pelas medições de circularidade, haja vista a combinação de movimentos radiais gerados pela vibração com os movimentos de avanço. No presente trabalho, o corpo de prova utilizado possui uma relação de fixação L/D (comprimento/diâmetro) suficiente para que possam ser desconsiderados os efeitos de deflexão da peça, além do que o porta-ferramentas é tratado como sendo excitado por forças variáveis, o que gera movimentos oscilatórios deste em relação à peça, havendo componentes de amortecimento e de aceleração de massa. Foi avaliado apenas o deslocamento na direção radial, o que corresponde à ação da força passiva.

A fim de serem evitados desvios tanto dimensionais, como de forma na peça, estudos têm sido feitos e diversos modelos têm sido desenvolvidos para a avaliação da vibração no torneamento [13] e até dispositivos para o controle desta, assim como para o controle da precisão dimensional [8]. Da mesma forma, o objetivo aqui corresponde ao estudo do deslocamento periódico da ferramenta na direção radial e sua relação com o desvio de forma na peça. Com o entendimento do processo, há a possibilidade de serem criados mecanismos de controle para a melhora da eficiência nos processos de torneamento visando um acabamento superficial adequado.

2.7 CONSIDERAÇÕES SOBRE A TRANSFORMADA DE FOURIER

Visando à comparação da freqüência de oscilação da ferramenta com a freqüência do perfil ondulado na superfície da peça usinada, serão avaliados espectros de freqüência obtidos a partir da transformada de Fourier.

Segundo Lynn e Fuerst [42], a transformada permite levar o sinal obtido do domínio do tempo ao domínio da freqüência, podendo-se avaliar a intensidade de cada harmônico, ou seja, a ‘quantidade’ das principais freqüências que compõem o sinal. Isso é feito considerando-se que um sinal pode sempre ser sintetizado por uma série de senos e co-senos com amplitudes e freqüências apropriadas.

Para sinais periódicos, os coeficientes que representam tal ‘quantidade’ podem ser calculados pela equação 2:

$$a_k = \frac{1}{N} \cdot \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \cdot \exp(-j \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot k \cdot n}{N}) \quad (2),$$

onde k é o harmônico e N é o número de pontos adquiridos em cada período.

Sendo a função exponencial periódica e $x[n]$ real, conclui-se que os coeficientes a_k formam um espectro simétrico.

Os coeficientes espectrais possuem partes reais e imaginárias, correspondendo aos co-senos e senos que compõem o sinal. Comumente, cada harmônico é expresso em termos de amplitude e fase, de acordo com as equações 3 e 4, respectivamente:

$$|a_k| = \sqrt{\Re^2(a_k) + \Im^2(a_k)} \quad (3)$$

$$\phi_k = \arctan\left(\frac{\Im(a_k)}{\Re(a_k)}\right) \quad (4).$$

Em sinais não periódicos, considera-se $N \rightarrow \infty$, fazendo com que os coeficientes espectrais tornem-se pequenos e apareçam muito próximos. Dessa forma, deve-se pensar em termos de uma distribuição de energia espectral contínua em vez de discreta, caracterizando uma função densidade de freqüência.

Embora cada coeficiente espectral se torne muito pequeno quando $N \rightarrow \infty$, o produto $N \cdot a_k$ permanece finito.

Fazendo $\Omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot k}{N}$ como uma variável de freqüência contínua e manipulando-se a equação 2, chega-se à equação 5, que representa o coeficiente espectral para um sinal não periódico:

$$X(\Omega) = N.a_k = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x[n].\exp(-j.\Omega.n) \quad (5).$$

Quando o sinal não apresenta um número exato de períodos dentro do intervalo n , ocorre um ‘espalhamento’ de energia devido às descontinuidades. Assim, os picos de amplitude podem não aparecer de maneira clara e as relações de fase entre os componentes são difíceis de se visualizar.

Segundo os mesmos autores [42], em geral, verifica-se que o uso desse tipo de análise é válido sempre que o sinal e o ruído possuem espectros substancialmente diferentes, para que assim, não haja problemas na interpretação dos picos no gráfico.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Foi utilizado para a realização dos ensaios um torno CNC Romi Galaxy 20 com rotação máxima de 4500 rpm e potência nominal de 15 kW (Fig. 8).



Figura 8 – Torno CNC Romi Galaxy 20

Tornearam-se a seco corpos de prova de ferro fundido vermicular e cinzento com diâmetros de 90 mm e 80 mm de comprimento. Os parâmetros de corte foram definidos em função da seleção da ferramenta para o acabamento de ferros fundidos e constam na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros de corte

Ferro fundido vermicular								
Ensaio	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8
a_p (mm)	1,0	1,0	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5
v_c (m/min)	210	210	175	175	210	210	175	175
f (mm/volta)	0,30	0,24	0,30	0,24	0,30	0,24	0,30	0,24
Ferro fundido cinzento								
Ensaio	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
a_p (mm)	1,0	1,0	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5
v_c (m/min)	210	210	175	175	210	210	175	175
f (mm/volta)	0,30	0,24	0,30	0,24	0,30	0,24	0,30	0,24

Para o torneamento do ferro fundido vermicular as pastilhas utilizadas foram WNMG 080408-GN, classe IC5010 com revestimentos TiCN MTCVD e Al_2O_3 CVD com quebra-cavacos. No corte do ferro fundido cinzento, as pastilhas são WNMA 080408, classe IC9007 com cobertura TiCN / Al_2O_3 / TiN multicamadas CVD. O porta-ferramenta corresponde ao modelo MWLNL 2525M-08W.

Para a aquisição dos sinais de vibração foi acoplado à parte traseira do porta-ferramenta um acelerômetro Kistler ligado a um filtro passa-baixa da mesma empresa com frequência de corte de 1 kHz, sendo considerado, dentro de aproximações, apenas o sinal referente à oscilação do porta-ferramenta. Este filtro foi conectado a um microcomputador. Os sinais foram adquiridos por meio do programa Labview e placa de aquisição da National Instruments.

O tratamento matemático dos sinais adquiridos (transformada de Fourier para a análise das frequências fundamentais) procedeu-se com o software Scilab.

Para se evitar a influência do desgaste da ferramenta, a cada passe no corpo de prova efetuava-se a troca da aresta e avaliava-se o desvio de circularidade da peça. Essa medição foi feita por um circularímetro Taylor Hobson modelo Talyrond 265, com uma janela de frequência de 1-500 Hz e com amplitudes limitadas acima de $0,1\mu m$.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nos gráficos das figuras de 9 a 24 é possível observar o comportamento do sinal de vibração da ferramenta, além do perfil de circularidade das peças usinadas referentes aos ensaios realizados de acordo com a Tabela 1.

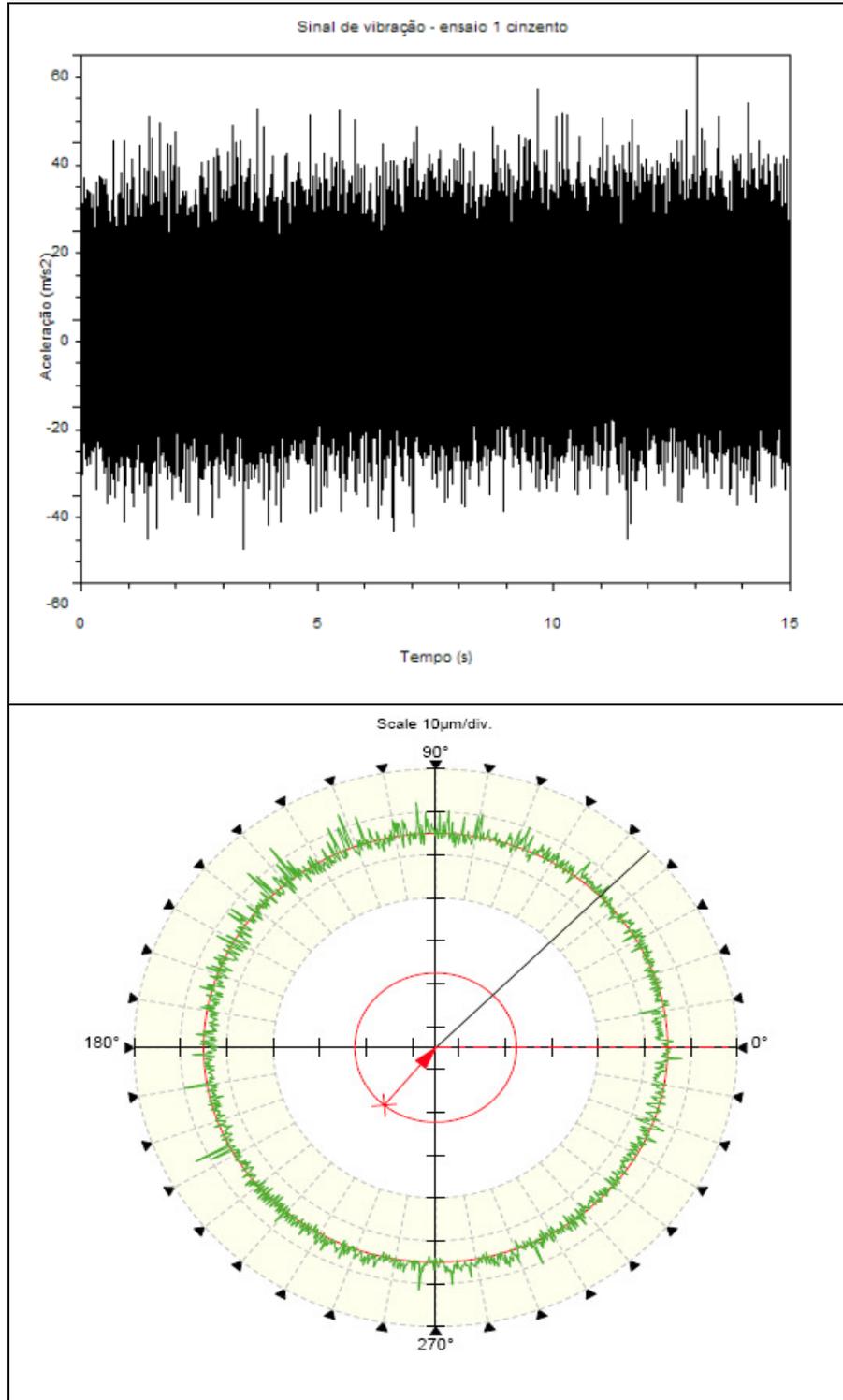


Figura 9 – Gráficos do sinal de vibração e do perfil de circularidade referentes ao ensaio C1 (ferro fundido cinzento)

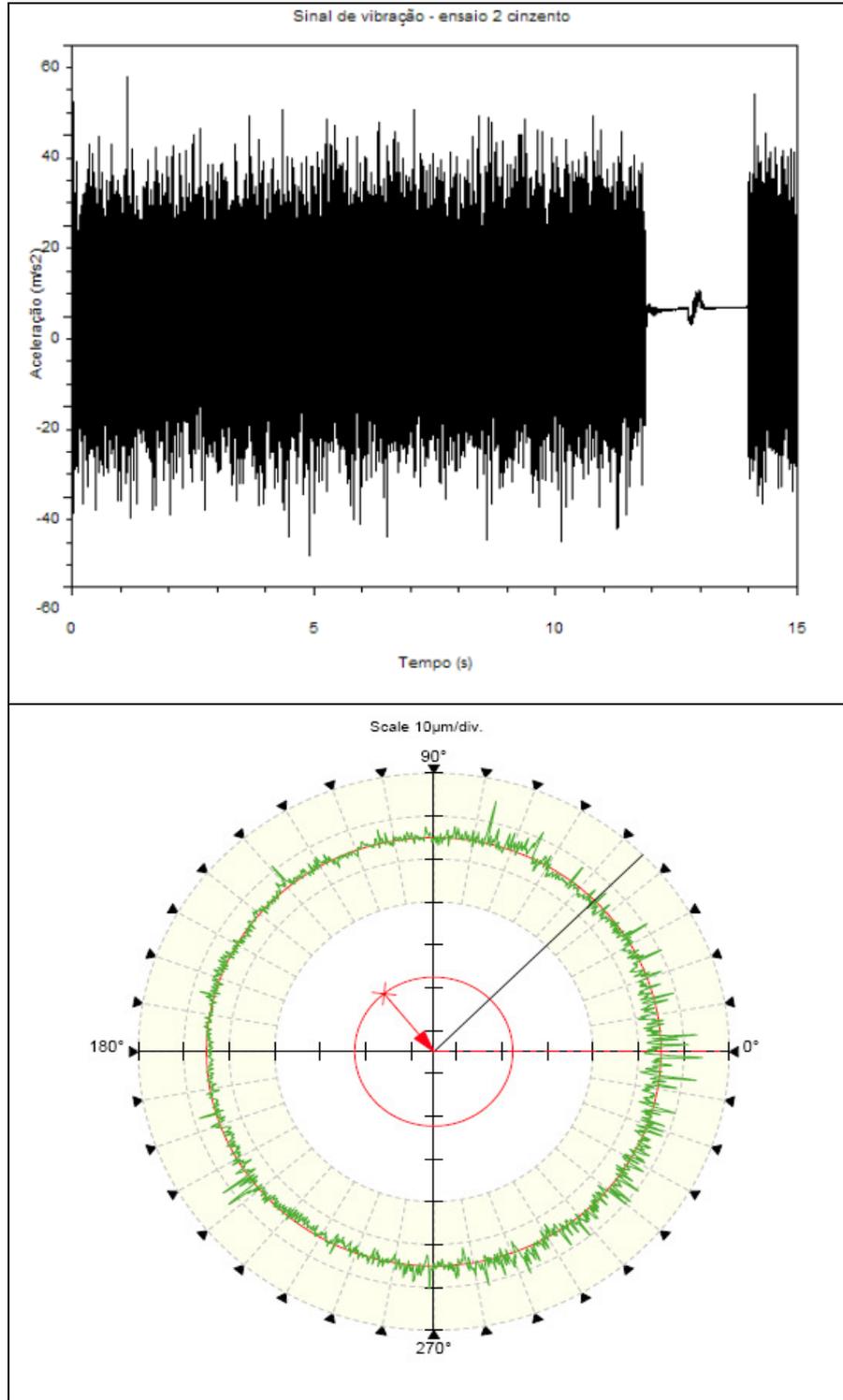


Figura 10 – Gráficos do sinal de vibração e do perfil de circularidade referentes ao ensaio C2 (ferro fundido cinzento)

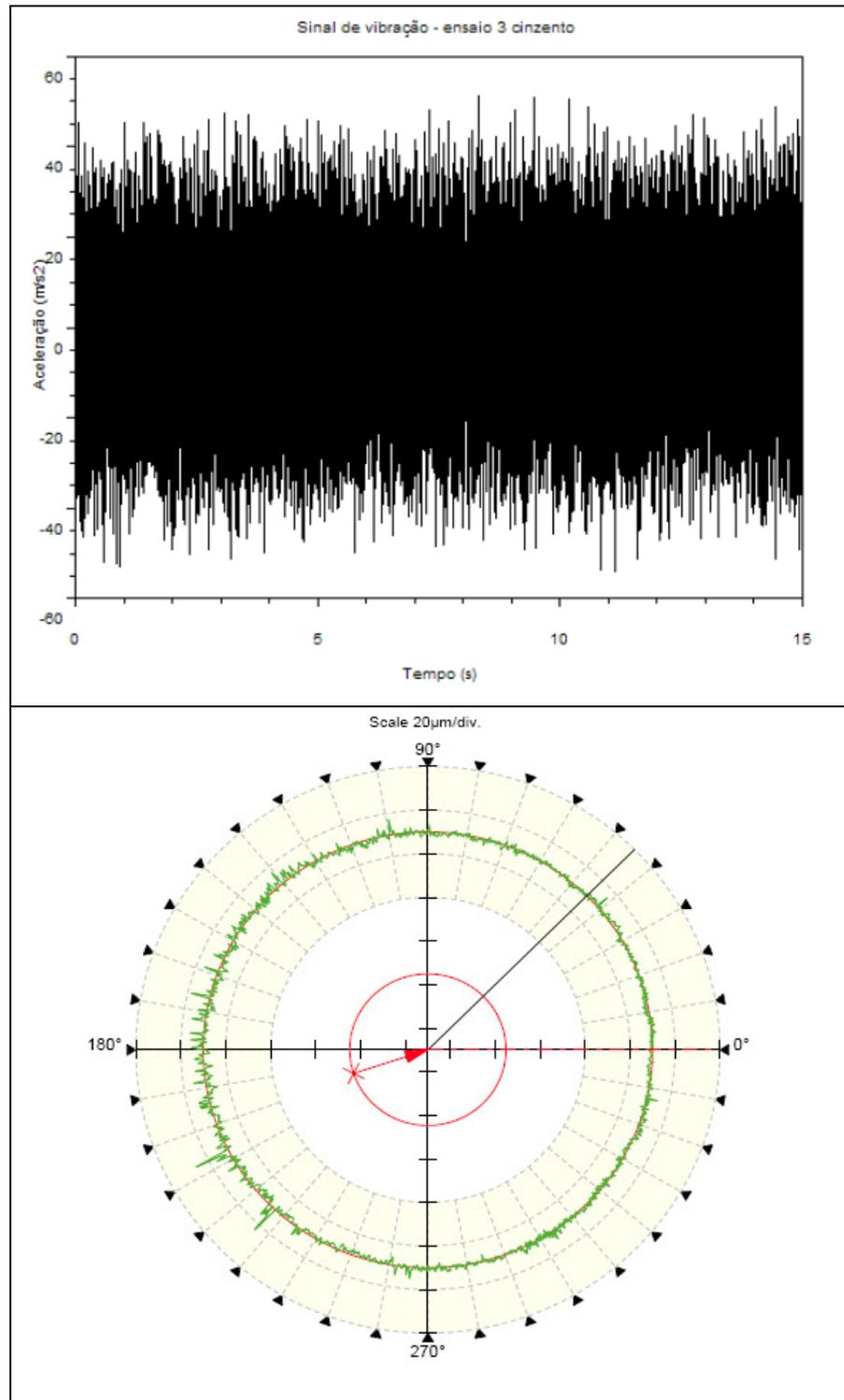


Figura 11 – Gráficos do sinal de vibração e do perfil de circularidade referentes ao ensaio C3 (ferro fundido cinzento)

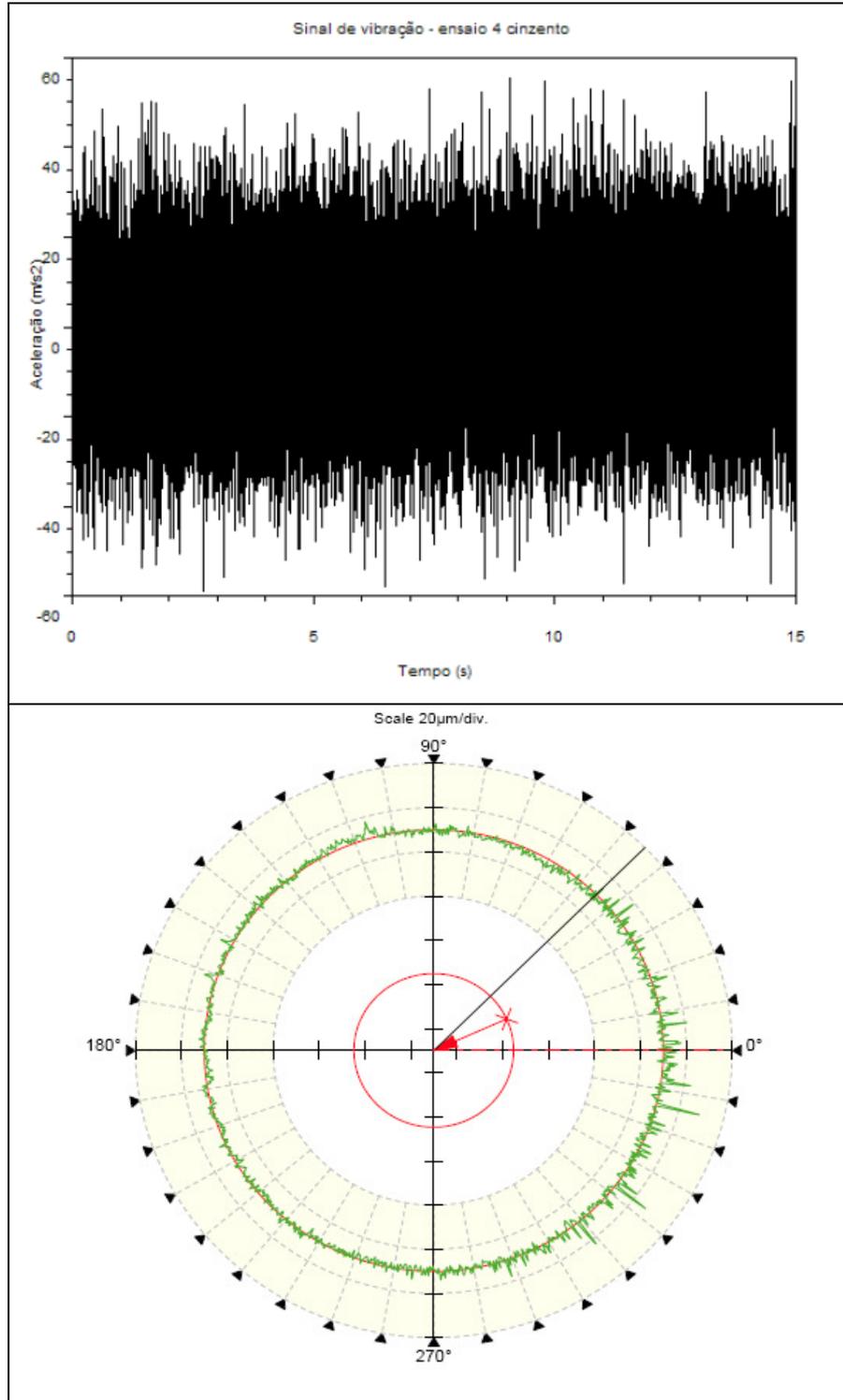


Figura 12 – Gráficos do sinal de vibração e do perfil de circularidade referentes ao ensaio C4 (ferro fundido cinzento)

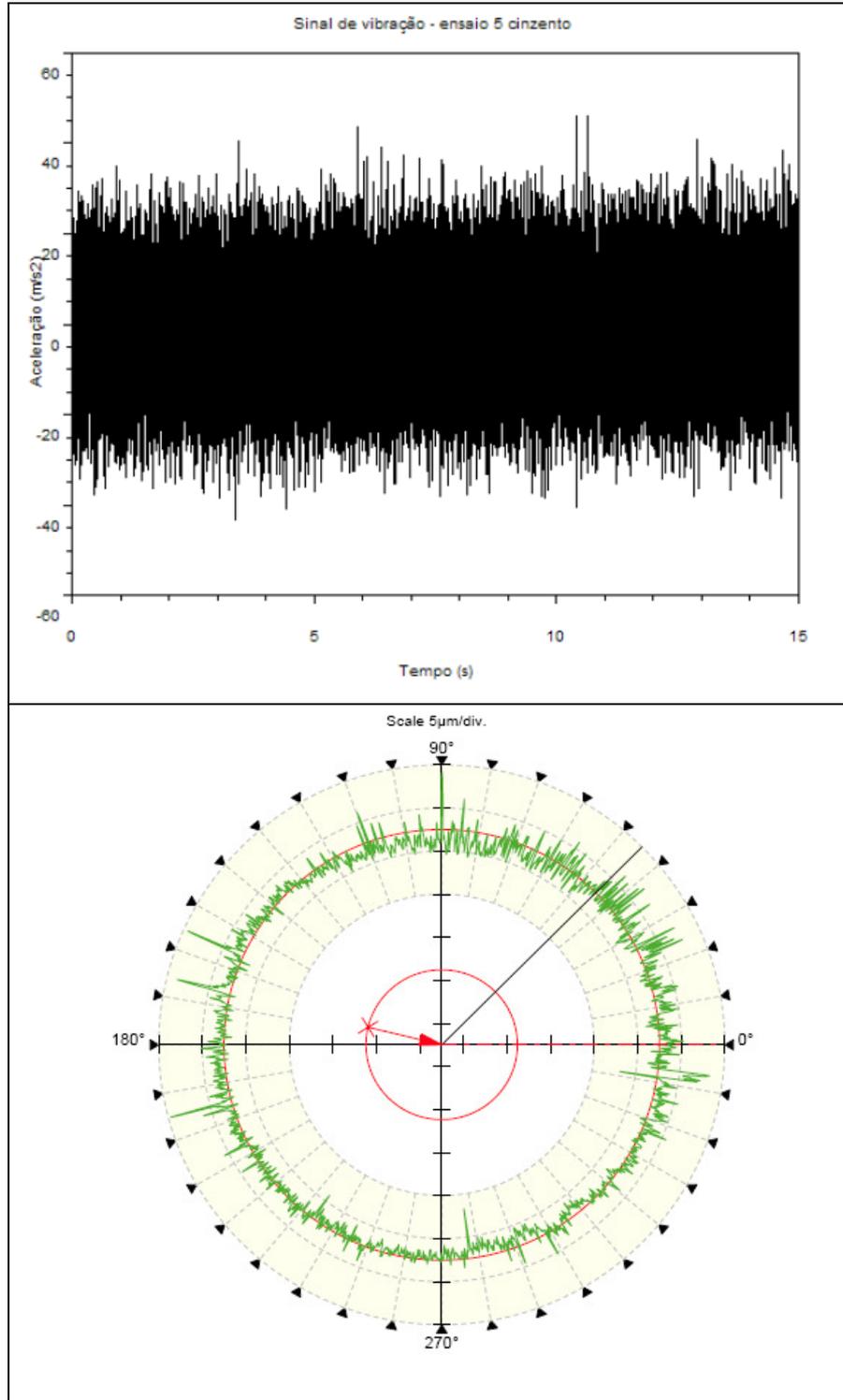


Figura 13 – Gráficos do sinal de vibração e do perfil de circularidade referentes ao ensaio C5 (ferro fundido cinzento)

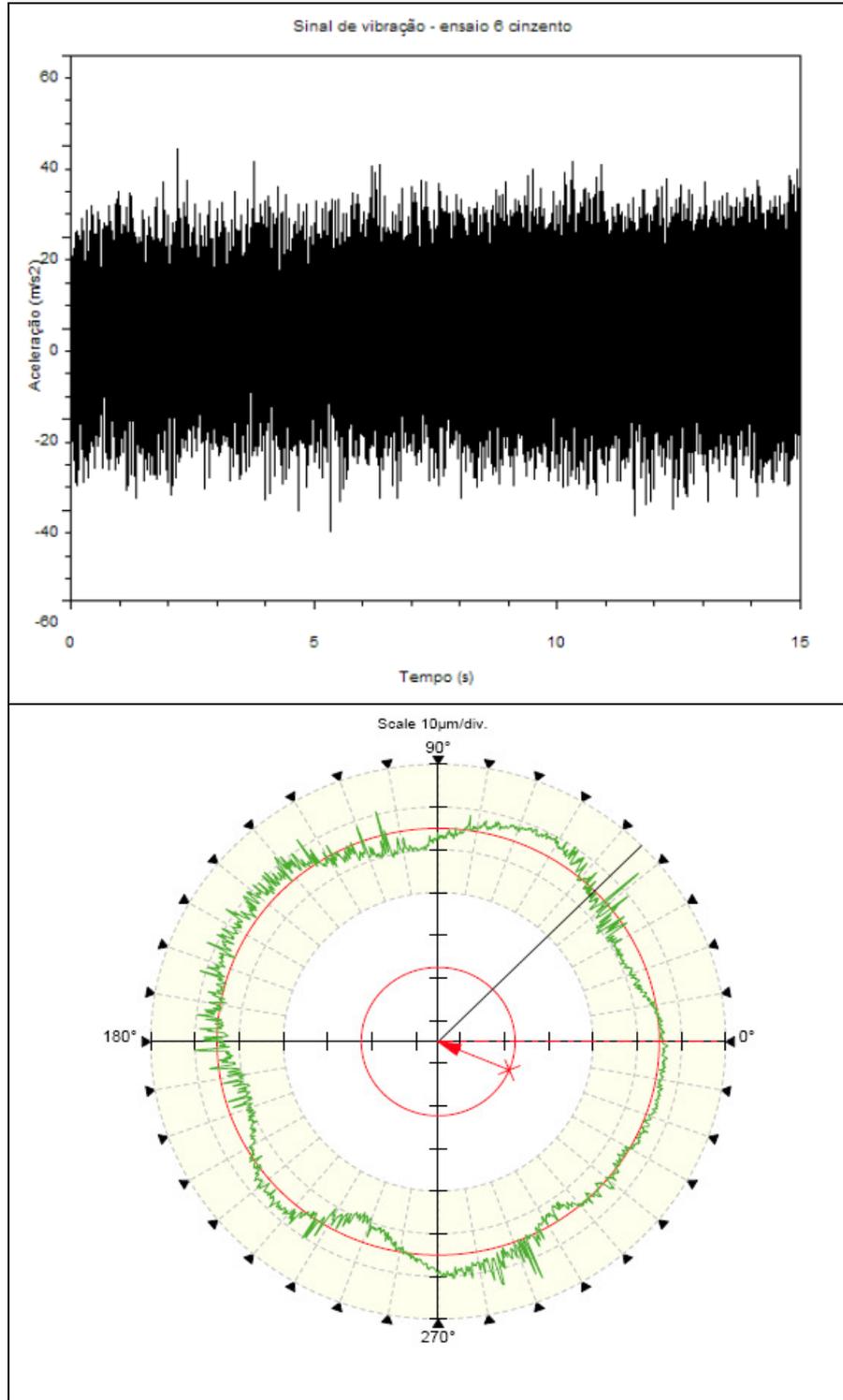


Figura 14 – Gráficos do sinal de vibração e do perfil de circularidade referentes ao ensaio C6 (ferro fundido cinzento)

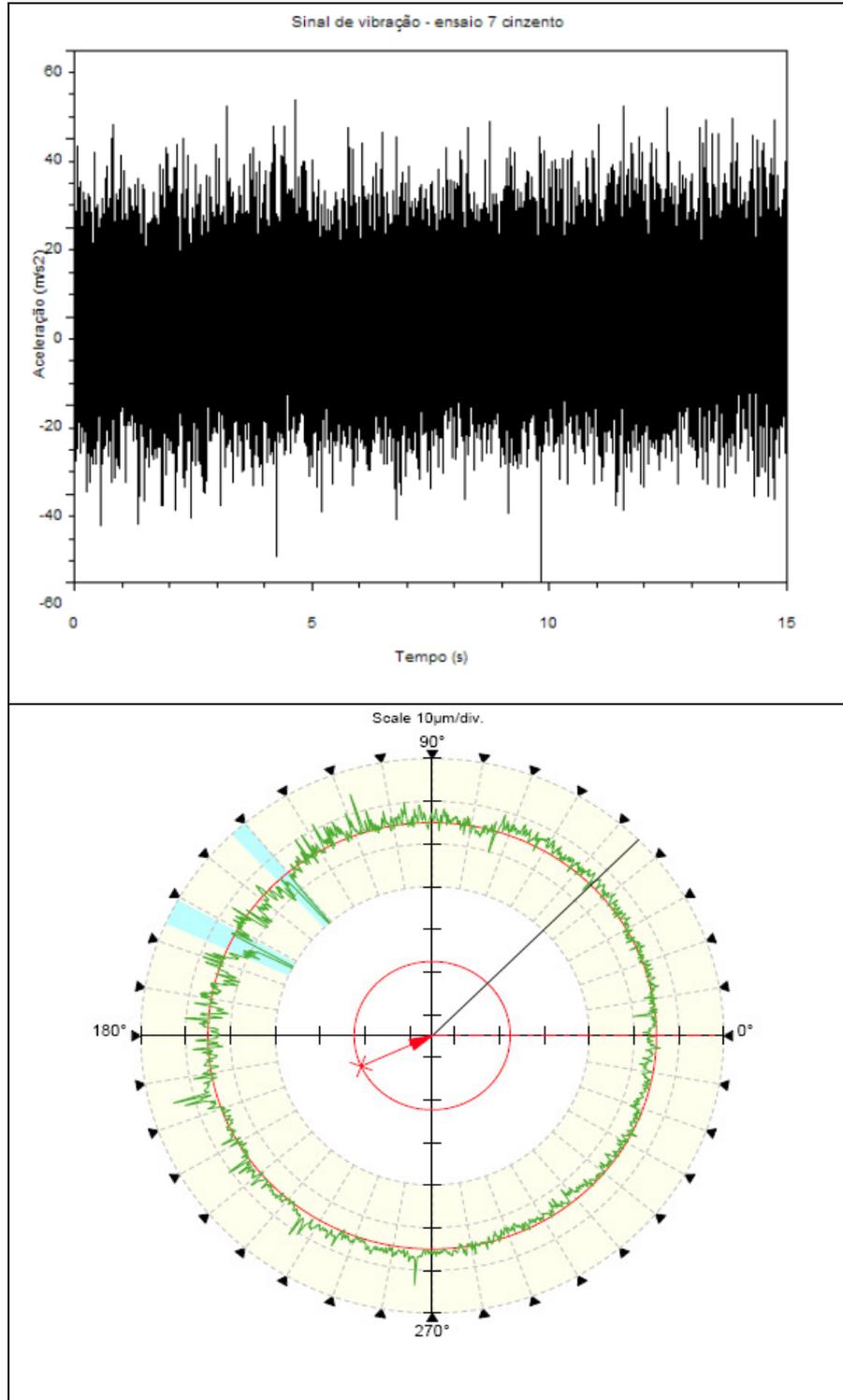


Figura 15 – Gráficos do sinal de vibração e do perfil de circularidade referentes ao ensaio C7 (ferro fundido cinzento)

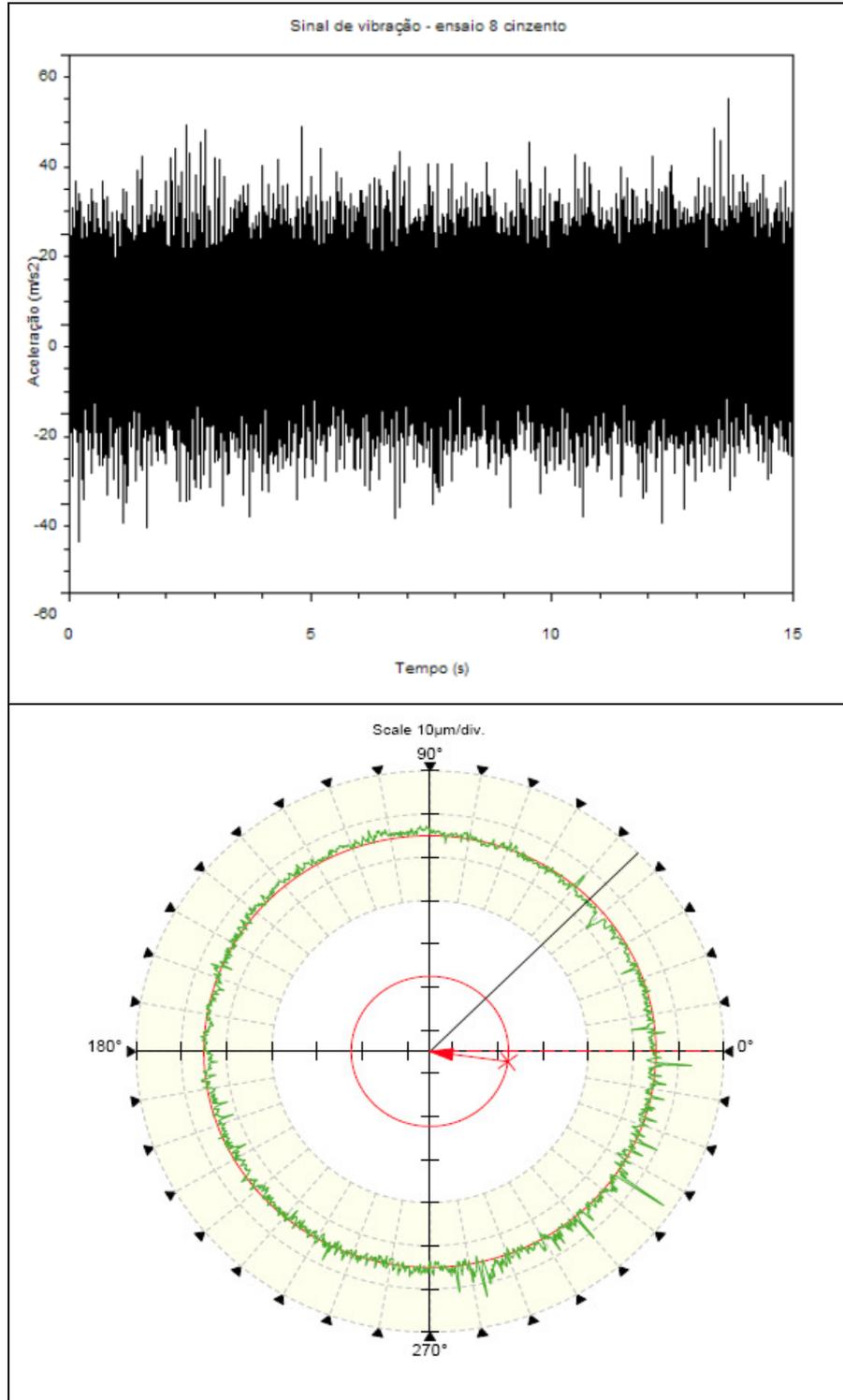


Figura 16 – Gráficos do sinal de vibração e do perfil de circularidade referentes ao ensaio C8 (ferro fundido cinzento)

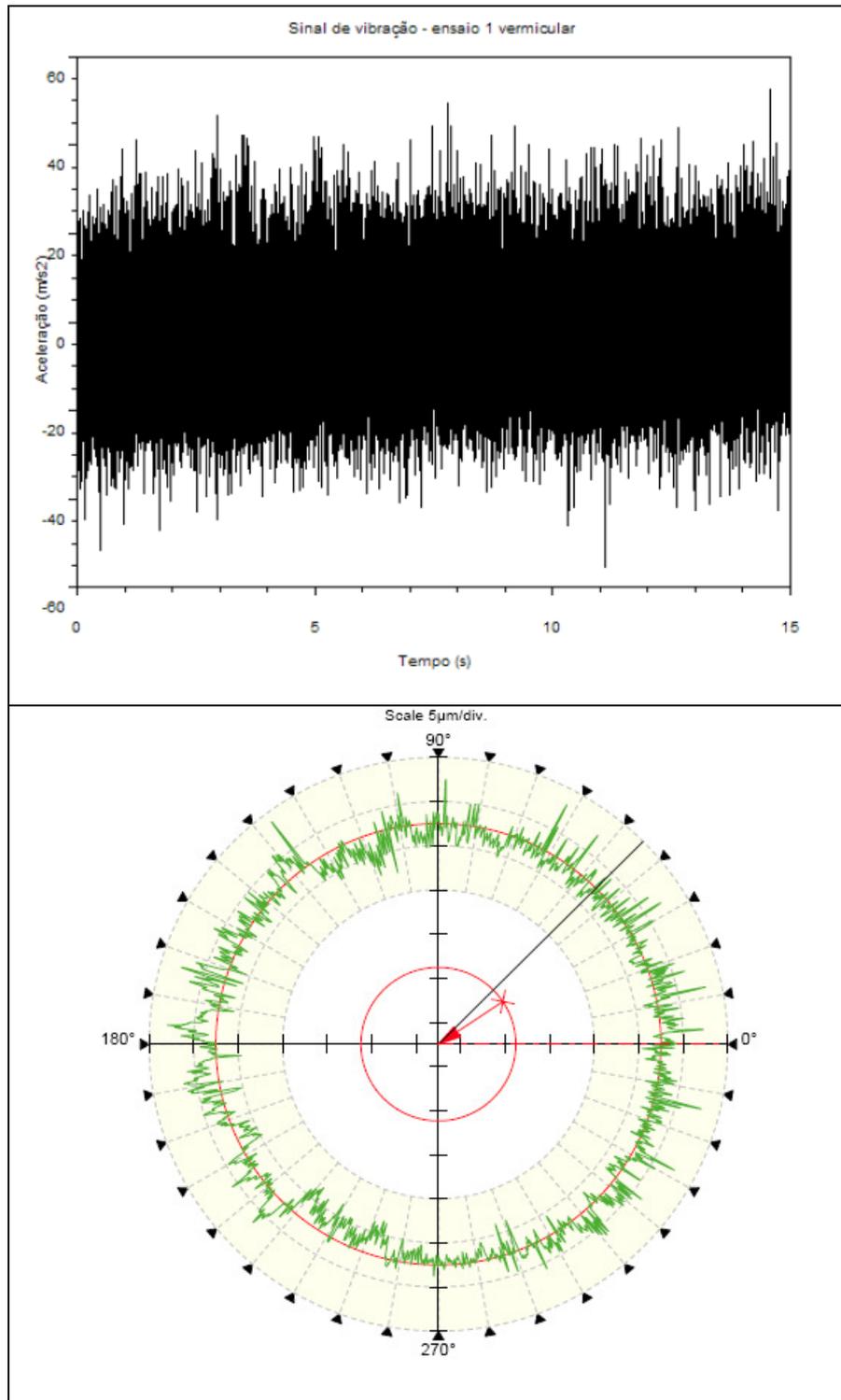


Figura 17 – Gráficos do sinal de vibração e do perfil de circularidade referentes ao ensaio V1 (ferro fundido vermicular)

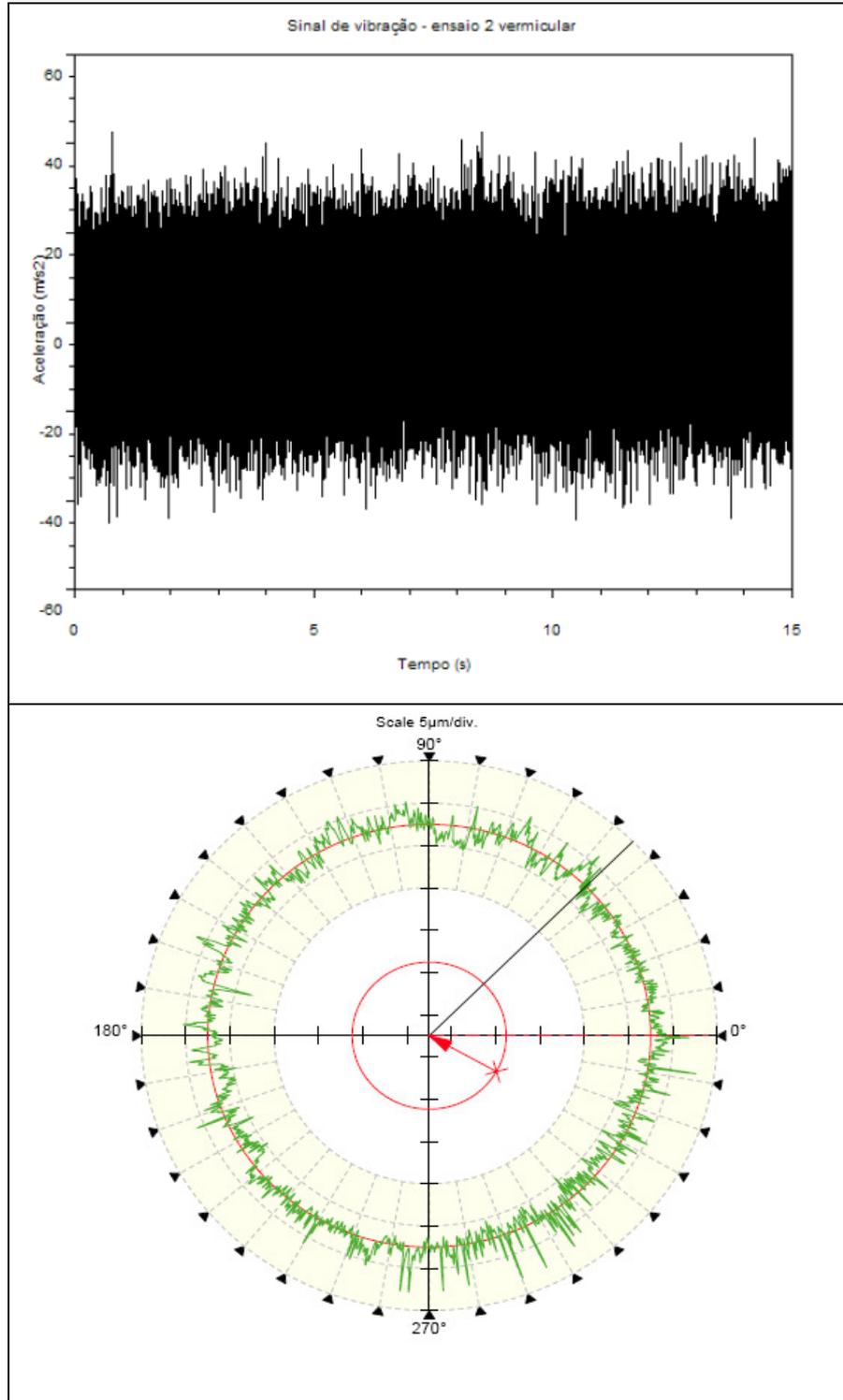


Figura 18 – Gráficos do sinal de vibração e do perfil de circularidade referentes ao ensaio V2 (ferro fundido vermicular)

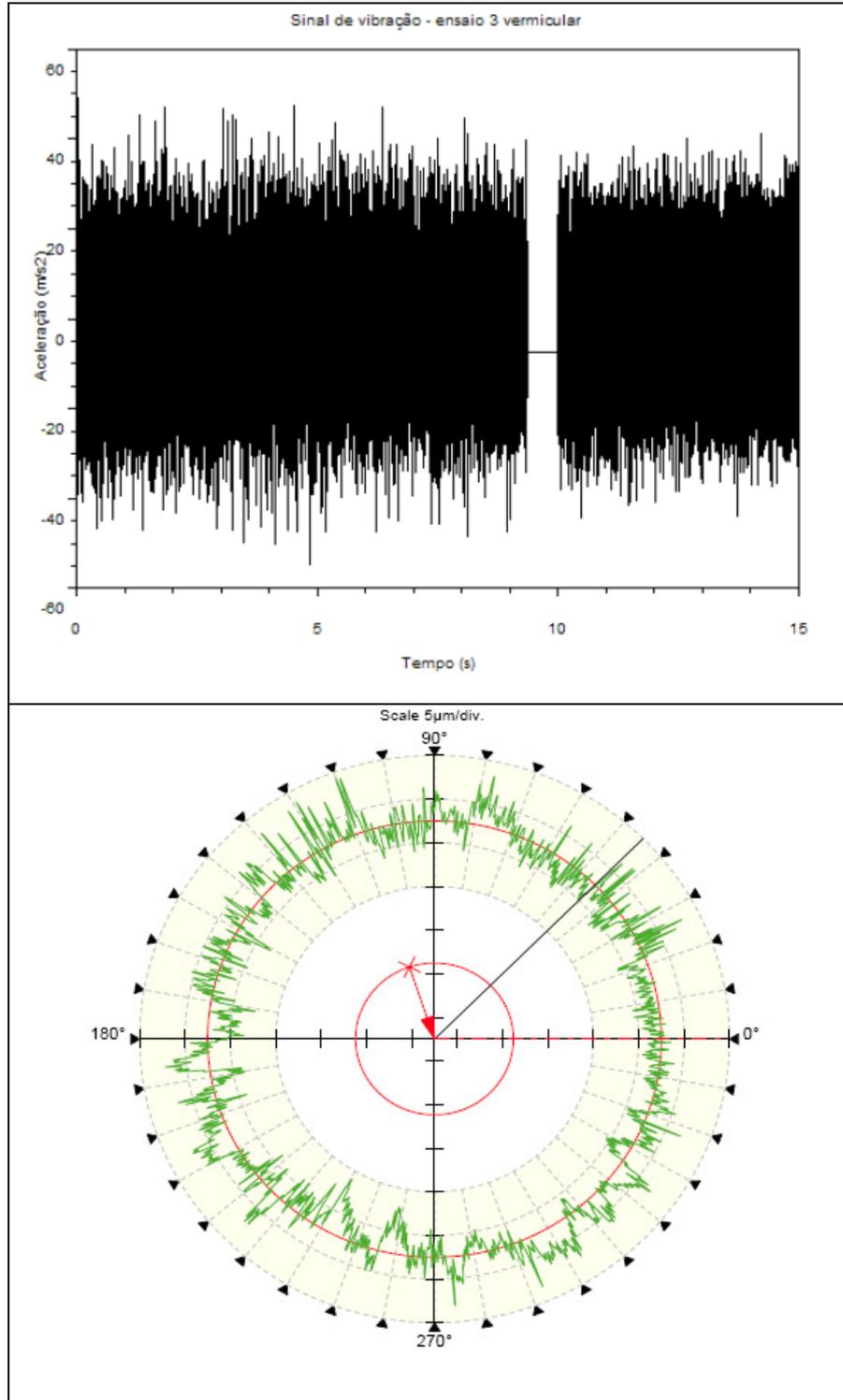


Figura 19 – Gráficos do sinal de vibração e do perfil de circularidade referentes ao ensaio V3 (ferro fundido vermicular)

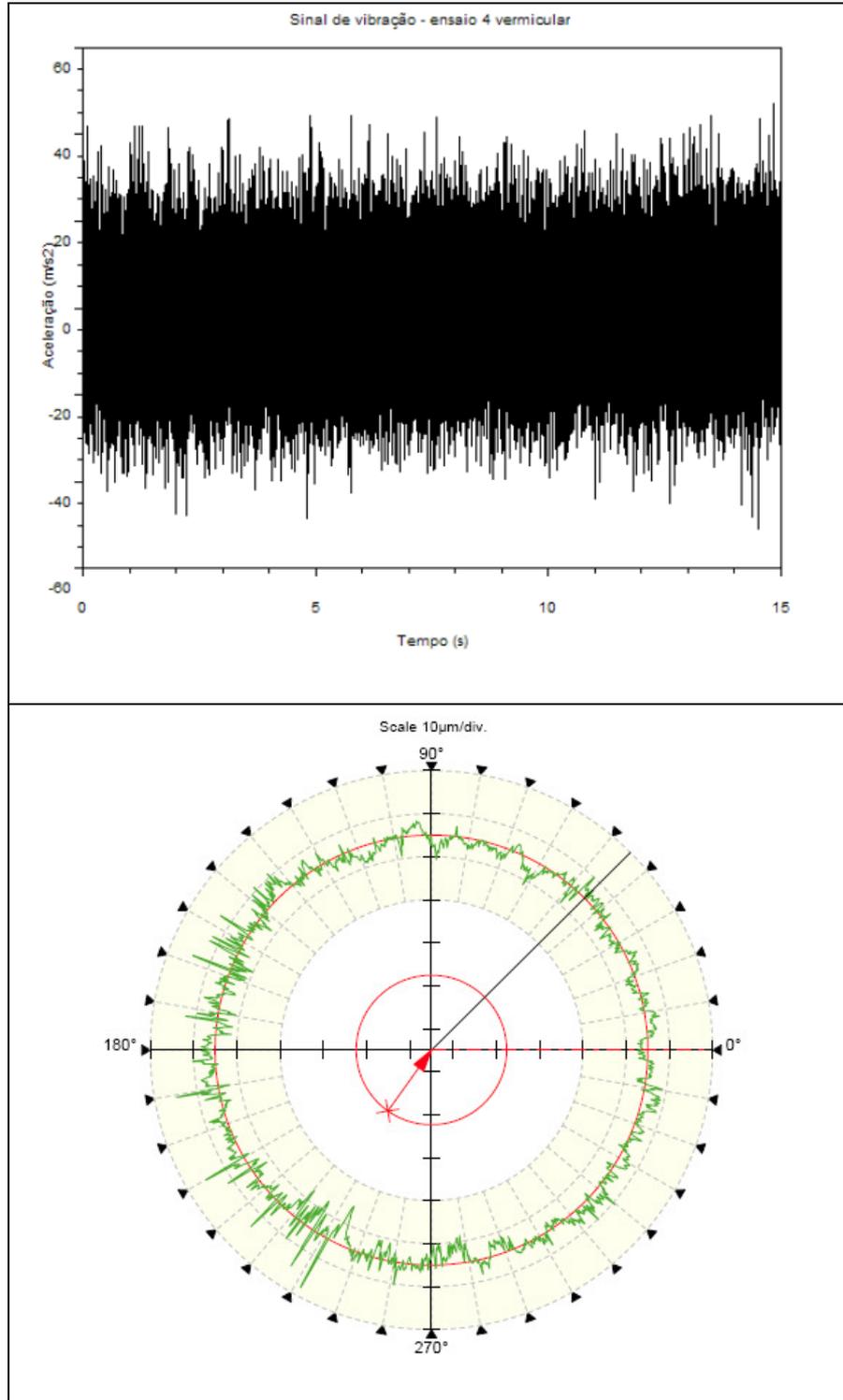


Figura 20 – Gráficos do sinal de vibração e do perfil de circularidade referentes ao ensaio V4 (ferro fundido vermicular)

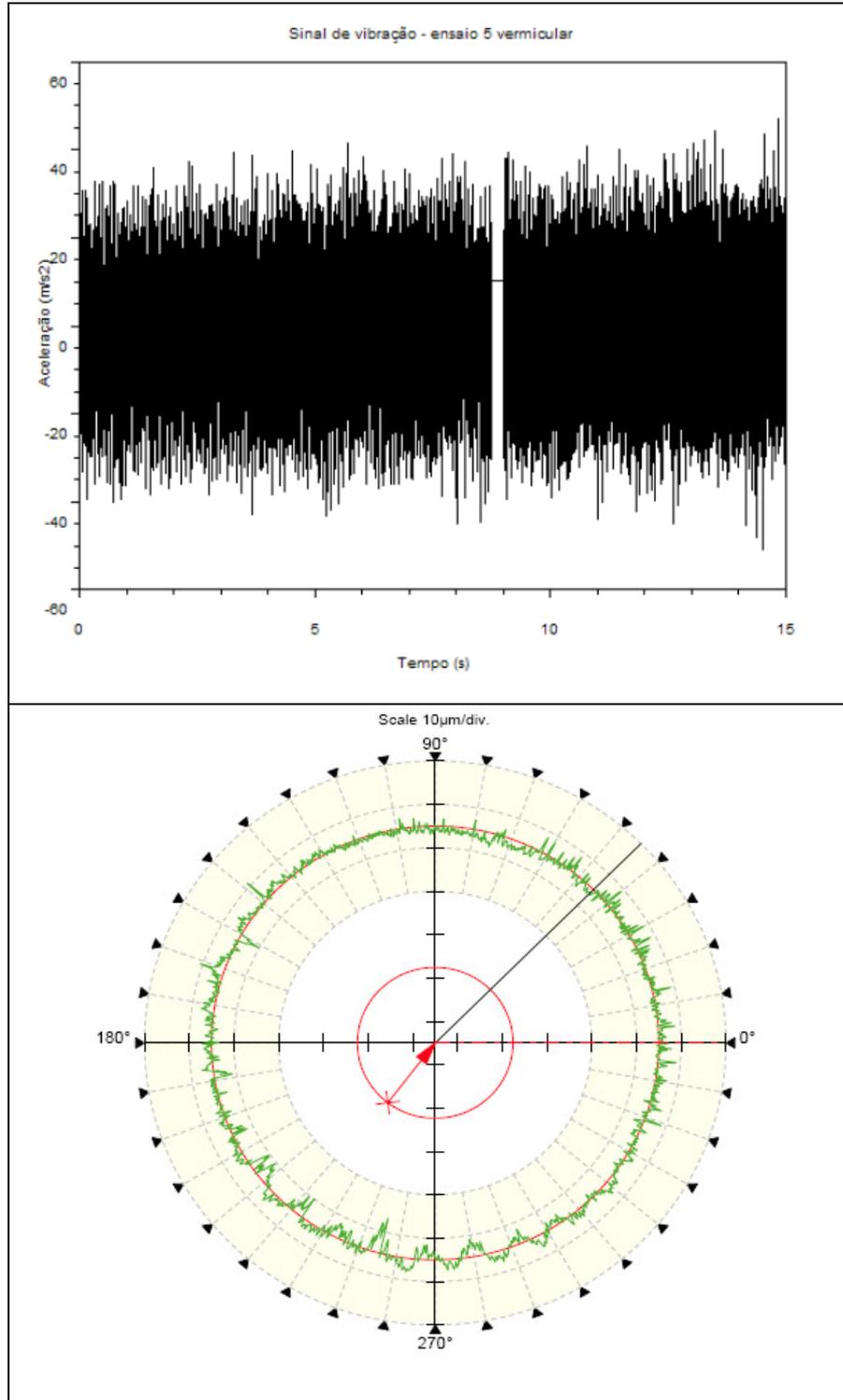


Figura 21 – Gráficos do sinal de vibração e do perfil de circularidade referentes ao ensaio V5 (ferro fundido vermicular)

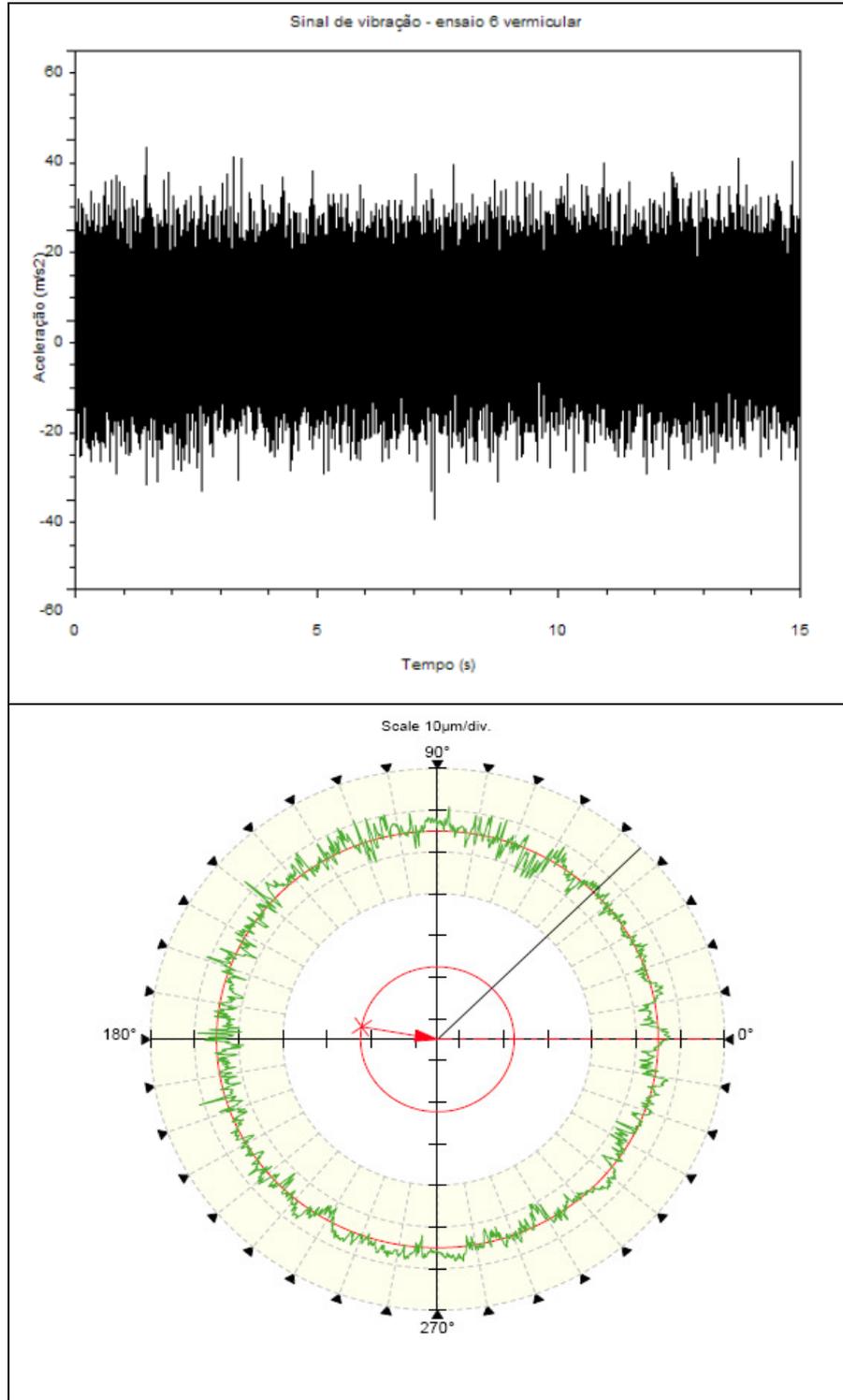


Figura 22 – Gráficos do sinal de vibração e do perfil de circularidade referentes ao ensaio V6 (ferro fundido vermicular)

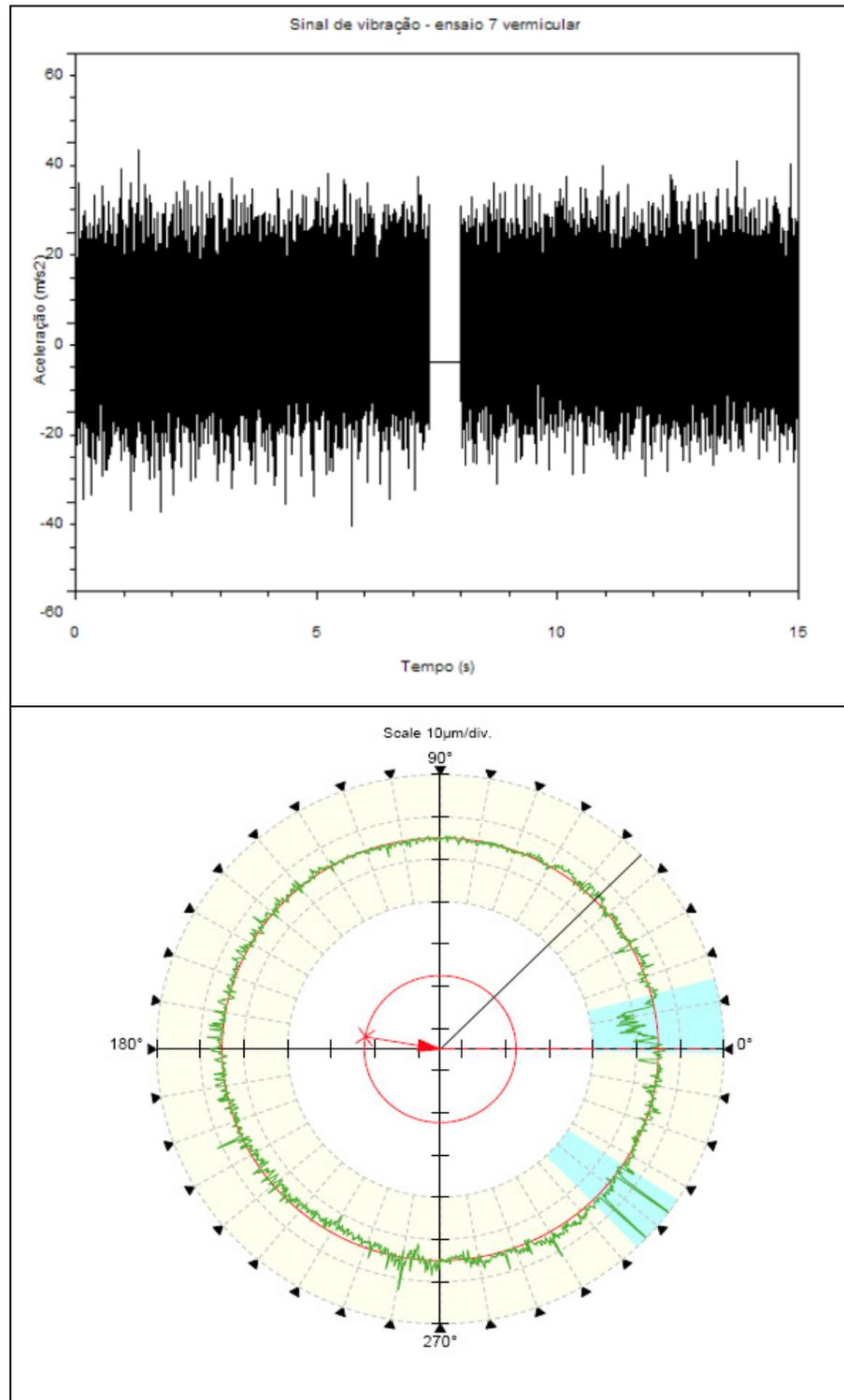


Figura 23 – Gráficos do sinal de vibração e do perfil de circularidade referentes ao ensaio V7 (ferro fundido vermicular)

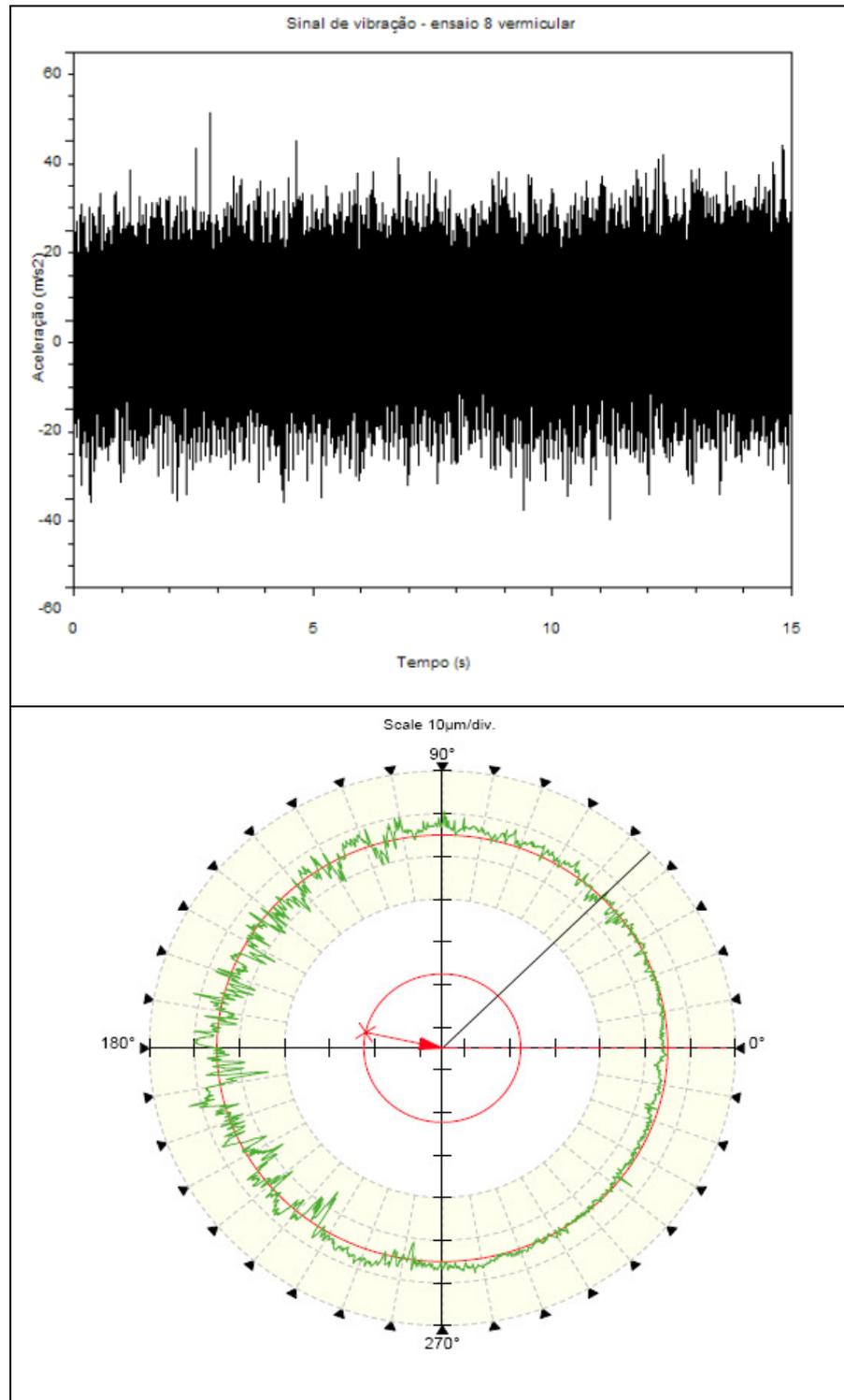


Figura 24 – Gráficos do sinal de vibração e do perfil de circularidade referentes ao ensaio V8 (ferro fundido vermicular)

Com os resultados obtidos, a partir de uma avaliação dos valores rms e das medições de circularidade, foi possível a elaboração das tabelas 2 e 3, com o objetivo apenas de se resumir os principais dados, sendo que esses não podem ser

comparados, pois o valor de circularidade é medido em uma seção do cilindro, enquanto o valor rms da vibração da ferramenta é influenciado por todo o sinal.

Tabela 2 – Valores rms do sinal de aceleração e medições de circularidade para o ferro fundido cinzento

Ferro fundido cinzento		
Ensaio	RMS (m/s ²)	Circularidade (μm)
C1	9,93	14,38
C2	9,08	14,37
C3	10,39	20,64
C4	10,96	24,10
C5	9,18	12,98
C6	8,51	16,81
C7	8,04	53,44
C8	8,78	18,00

Tabela 3 – Valores rms do sinal de vibração e medições de circularidade para o ferro fundido vermicular

Ferro fundido vermicular		
Ensaio	RMS (m/s ²)	Circularidade (μm)
V1	9,56	11,43
V2	10,38	9,93
V3	10,27	13,34
V4	10,03	22,46
V5	9,83	14,12
V6	7,61	14,32
V7	7,68	29,82
V8	9,07	18,78

Como é periódico o movimento da ferramenta em relação à peça, pode-se aproximá-lo por uma série de Fourier. Assim, integrando-se o sinal de aceleração duas vezes, obtém-se o deslocamento da ferramenta, o qual possui o mesmo comportamento do sinal obtido por meio dos acelerômetros, mas oposto e com valores de amplitude proporcionais e menores. Assim, torna-se possível abstrair o comportamento vibracional da ferramenta a partir dos gráficos de aceleração, os quais demonstram altas amplitudes e variações em torno da posição de equilíbrio.

A diminuição da oscilação da ferramenta (deslocamento) no trecho correspondente à medição de circularidade causa uma redução deste valor, o que

foi observado para os dois materiais na condição de maior velocidade de corte ($v_c = 210 \text{ m/min}$ – ensaios 1, 2, 5 e 6). Isso se justifica pelo fato de que o aumento da velocidade de corte induz um aumento da velocidade de cisalhamento, diminuindo assim a deformação do cavaco antes da ruptura [43]. Isso provoca uma diminuição das forças de corte, reduzindo a amplitude de deslocamento da ferramenta.

Notou-se ainda a influência da profundidade de corte na amplitude da aceleração da ferramenta observando que os ensaios de 1 a 4 ($a_p = 1,0 \text{ mm}$) possuem maiores valores rms, o que confirma a tendência à trepidação apresentada quando da usinagem acima de uma profundidade de corte crítica [9].

Nas figuras 15 e 23 (ensaios C7 e V7, respectivamente), notaram-se irregularidades nas superfícies das peças, sendo estas devidas a ‘rechupes’ decorrentes do processo de fundição. Esse fato provocou a obtenção de valores de circularidade discrepantes em relação às outras peças, como pode ser visto nas tabelas 2 e 3. Além disso, é importante ressaltar que esses problemas na superfície podem causar um aumento da frequência de vibração da ferramenta.

Para a verificação da qualidade de trabalho a partir dos valores de circularidade, partiu-se do fato de que a diferença entre o maior e o menor diâmetro na mesma seção transversal não deve exceder a metade da tolerância do diâmetro nominal. Dessa maneira, excetuando-se os ensaios C7 e V7, foram obtidas qualidades de trabalho entre IT8 e IT10, as quais estão dentro da faixa de tolerâncias utilizada em acoplamentos na mecânica corrente.

As irregularidades observadas nos gráficos de aceleração dos ensaios C2, V3, V5 e V7 (figuras 10, 19, 21 e 23, respectivamente) foram devidas a problemas na aquisição do sinal, não devendo ser levadas em conta na análise dos resultados.

Nas figuras de 25 a 40, são mostrados os gráficos referentes à transformada de Fourier para as análises de frequência do sinal de aceleração e do perfil de circularidade da peça.

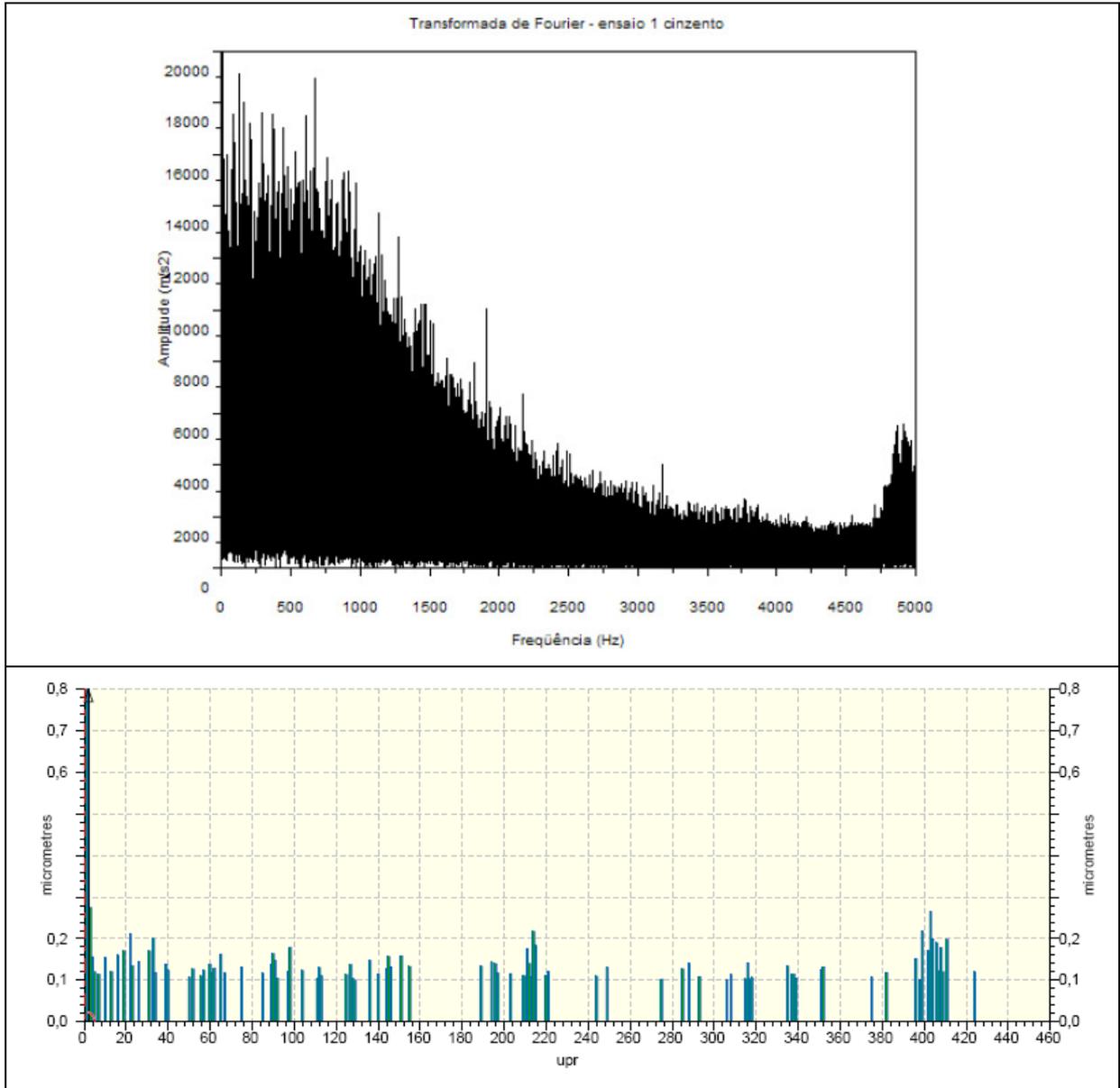


Figura 25 – Gráficos da transformada de Fourier para o sinal de vibração e circularidade da peça referentes ao ensaio C1 (ferro fundido cinzento)

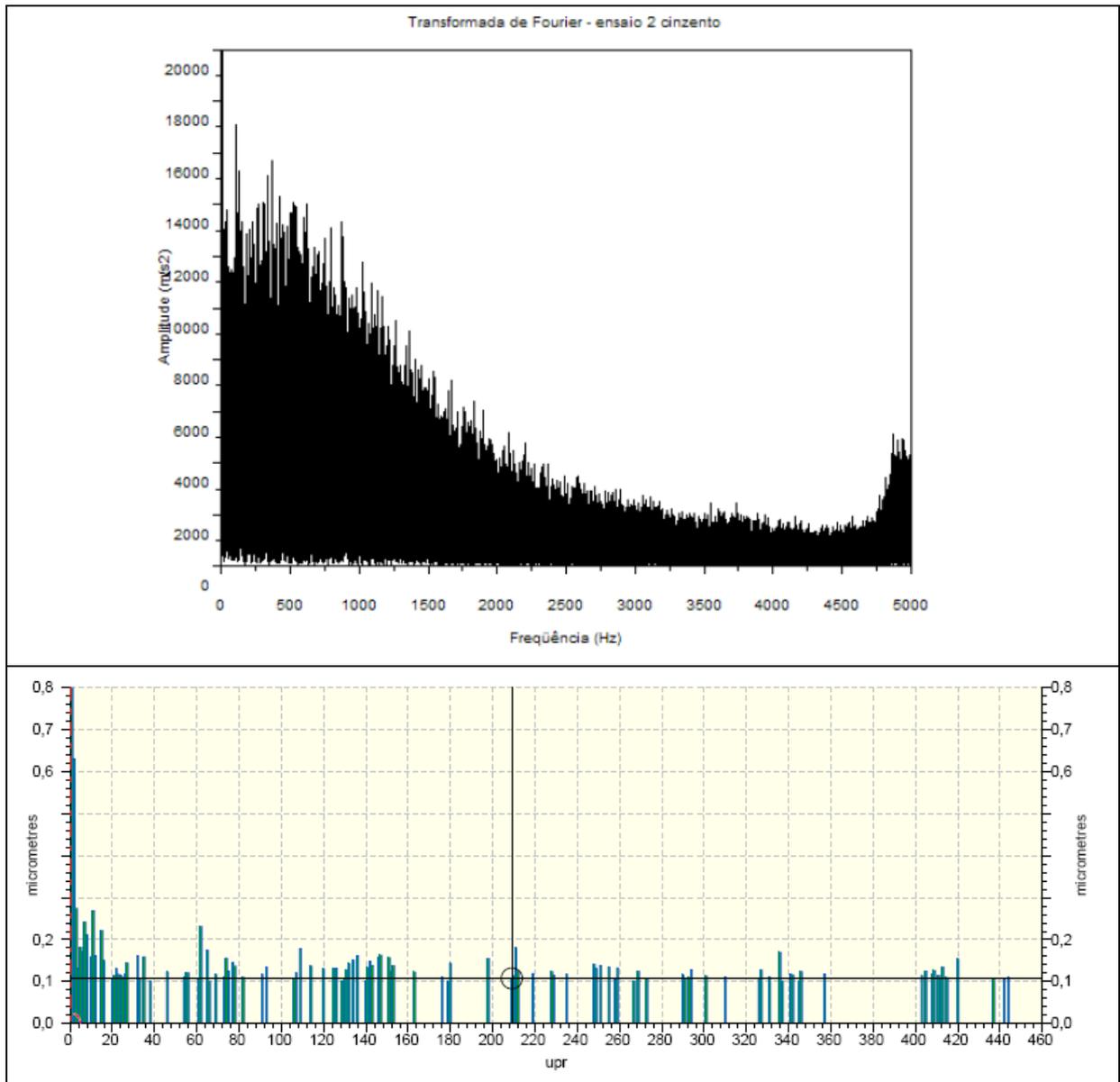


Figura 26 – Gráficos da transformada de Fourier para o sinal de vibração e circularidade da peça referentes ao ensaio C2 (ferro fundido cinzento)

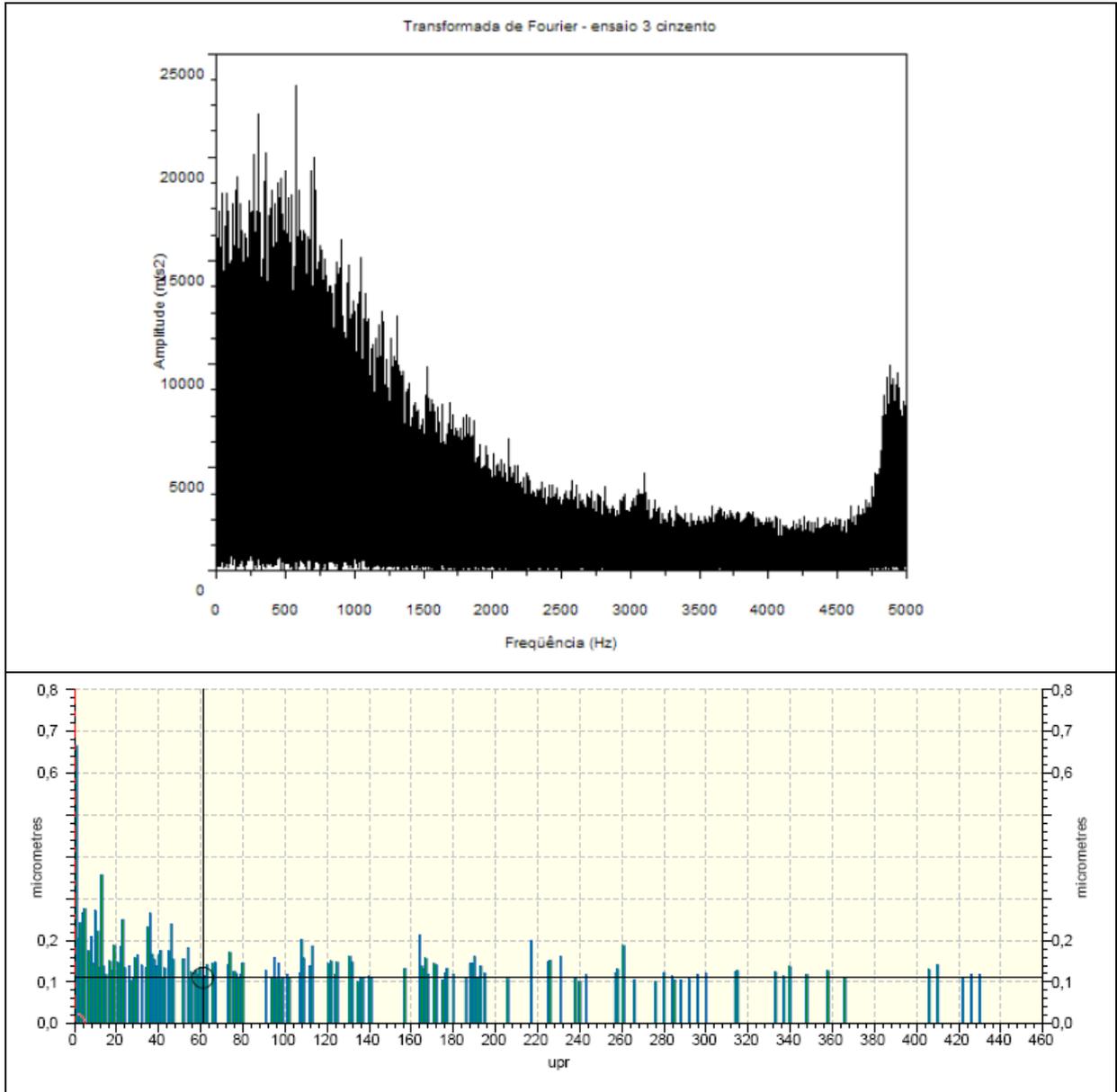


Figura 27 – Gráficos da transformada de Fourier para o sinal de vibração e circularidade da peça referentes ao ensaio C3 (ferro fundido cinzento)

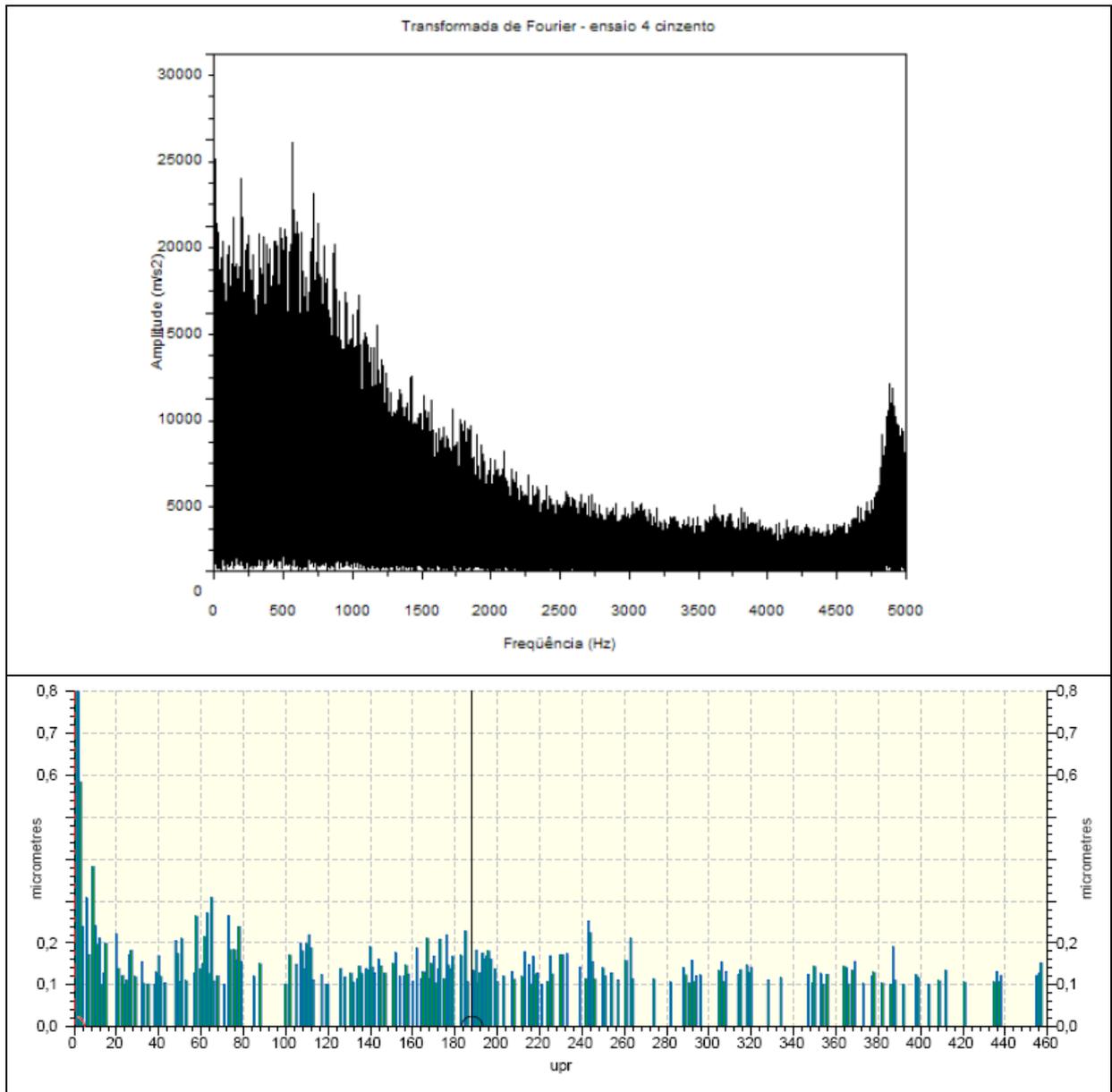


Figura 28 – Gráficos da transformada de Fourier para o sinal de vibração e circularidade da peça referentes ao ensaio C4 (ferro fundido cinzento)

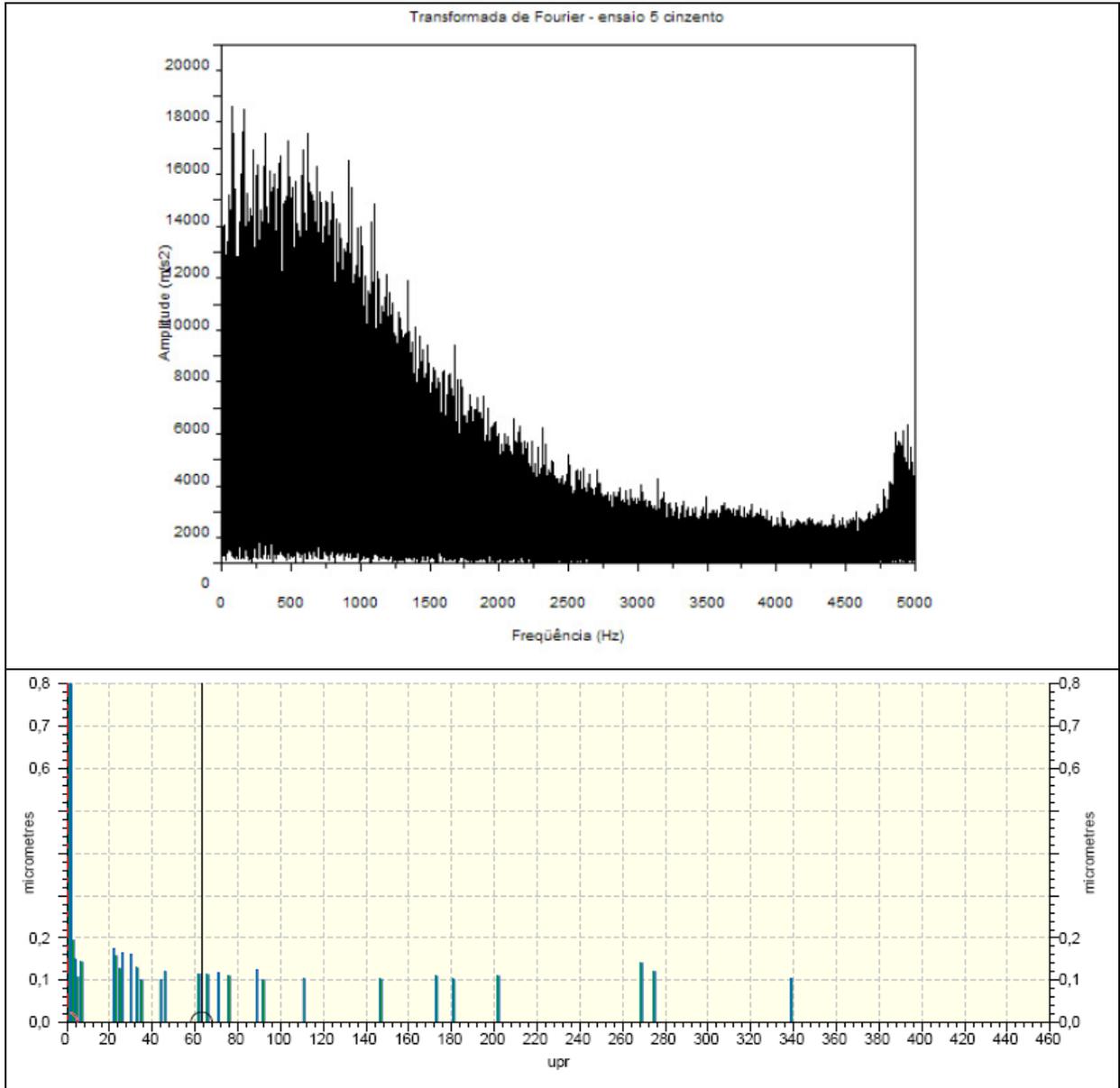


Figura 29 – Gráficos da transformada de Fourier para o sinal de vibração e circularidade da peça referentes ao ensaio C5 (ferro fundido cinzento)

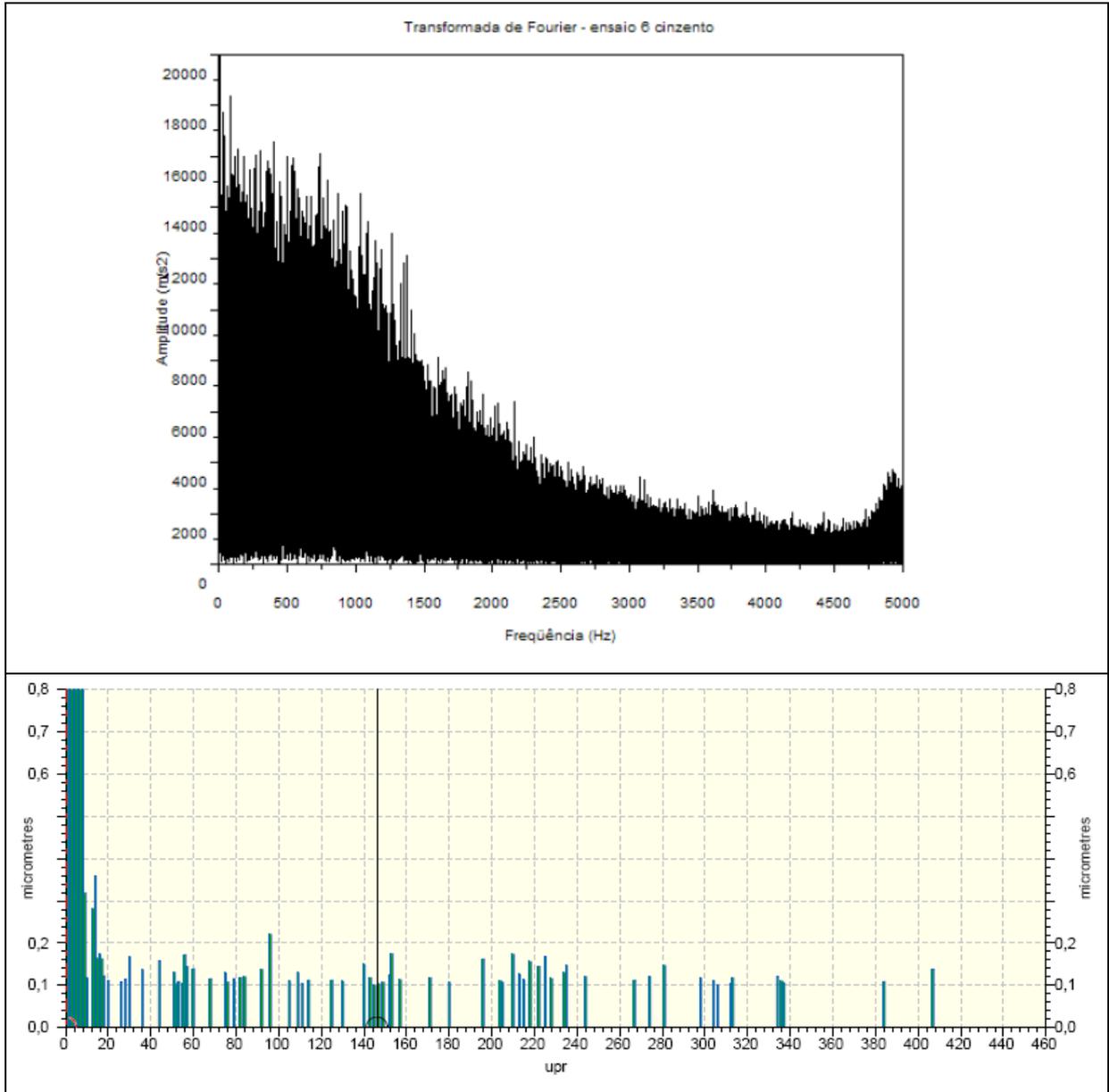


Figura 30 – Gráficos da transformada de Fourier para o sinal de vibração e circularidade da peça referentes ao ensaio C6 (ferro fundido cinzento)

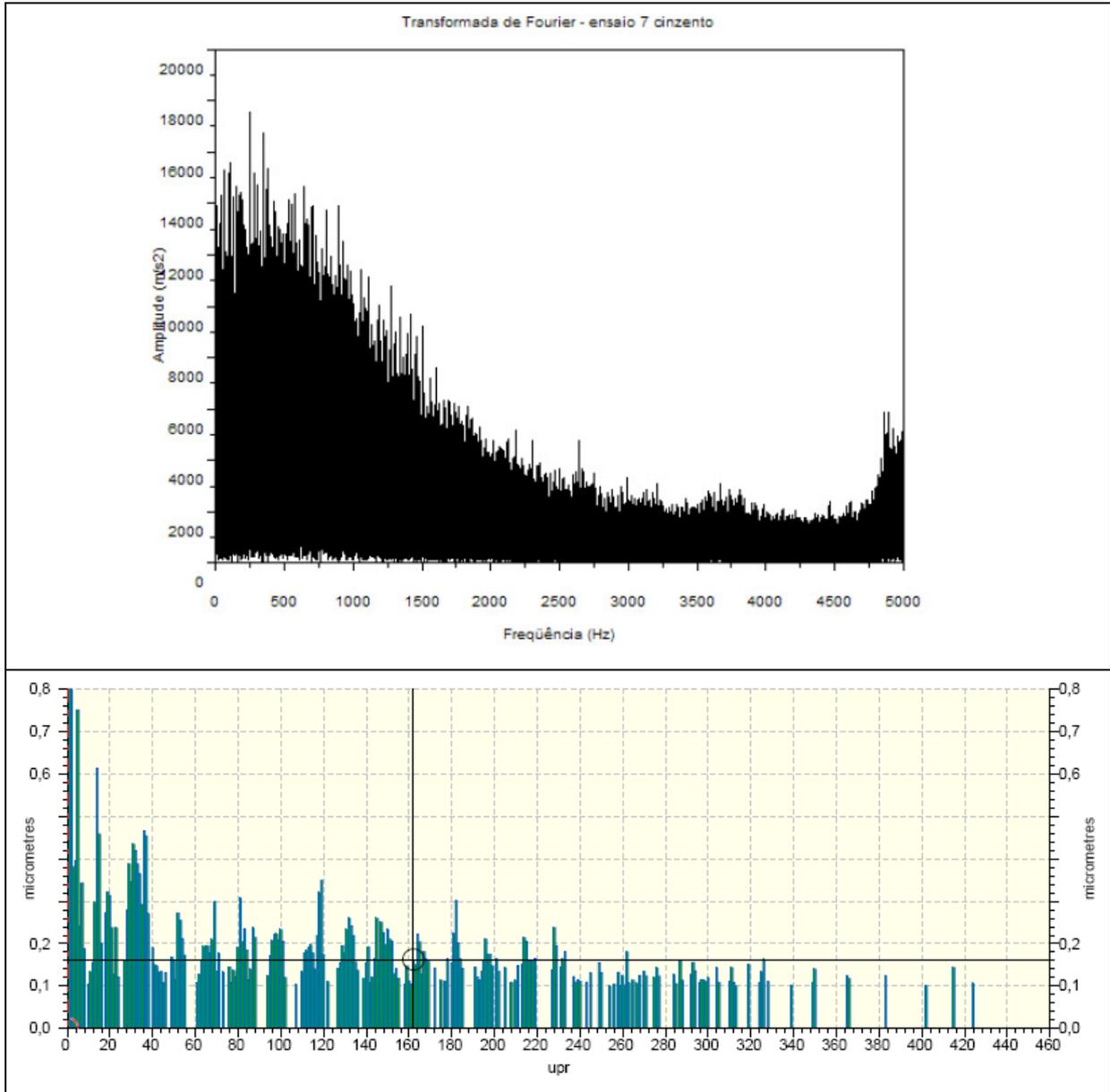


Figura 31 – Gráficos da transformada de Fourier para o sinal de vibração e circularidade da peça referentes ao ensaio C7 (ferro fundido cinzento)

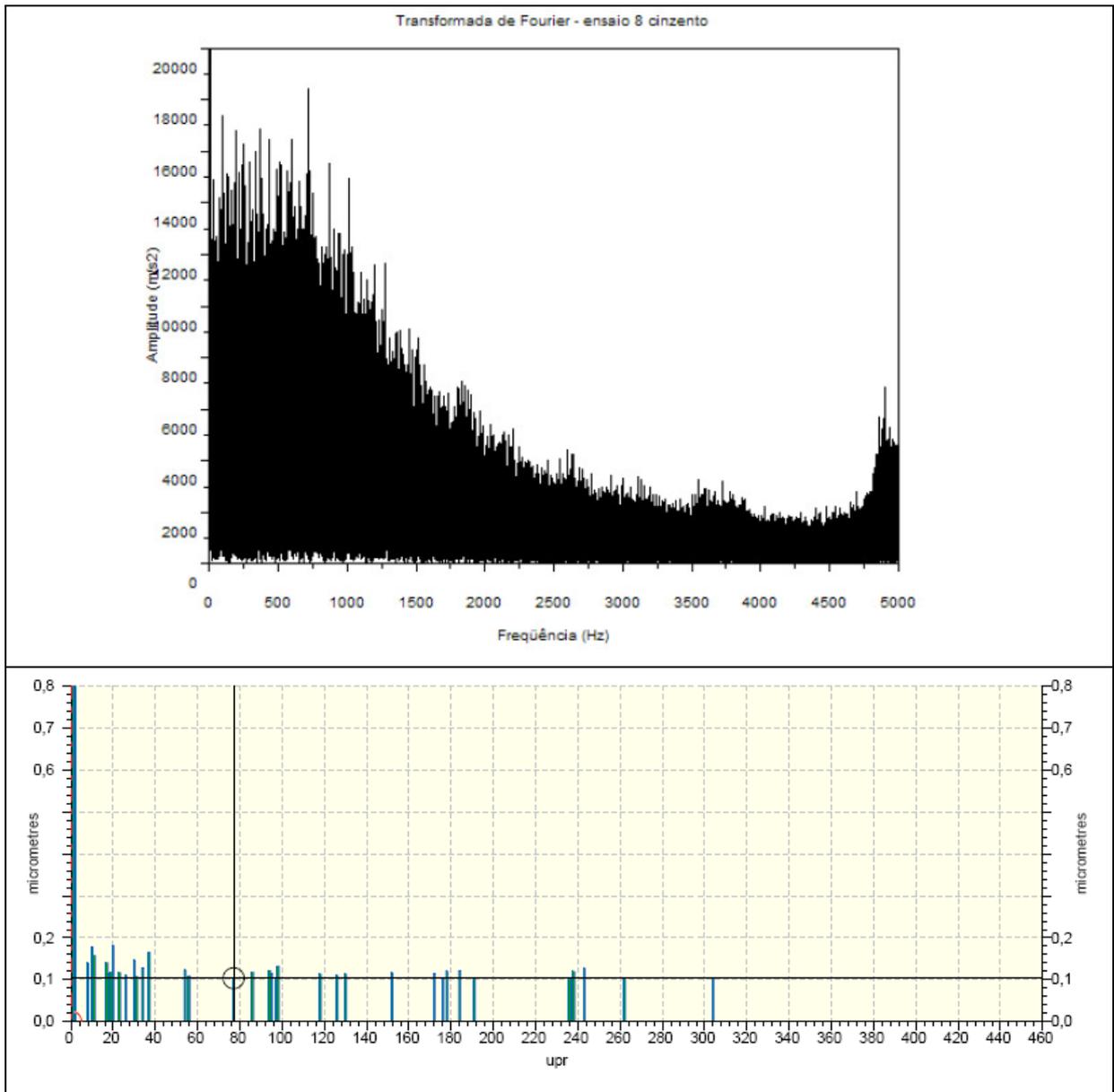


Figura 32 – Gráficos da transformada de Fourier para o sinal de vibração e circularidade da peça referentes ao ensaio C8 (ferro fundido cinzento)

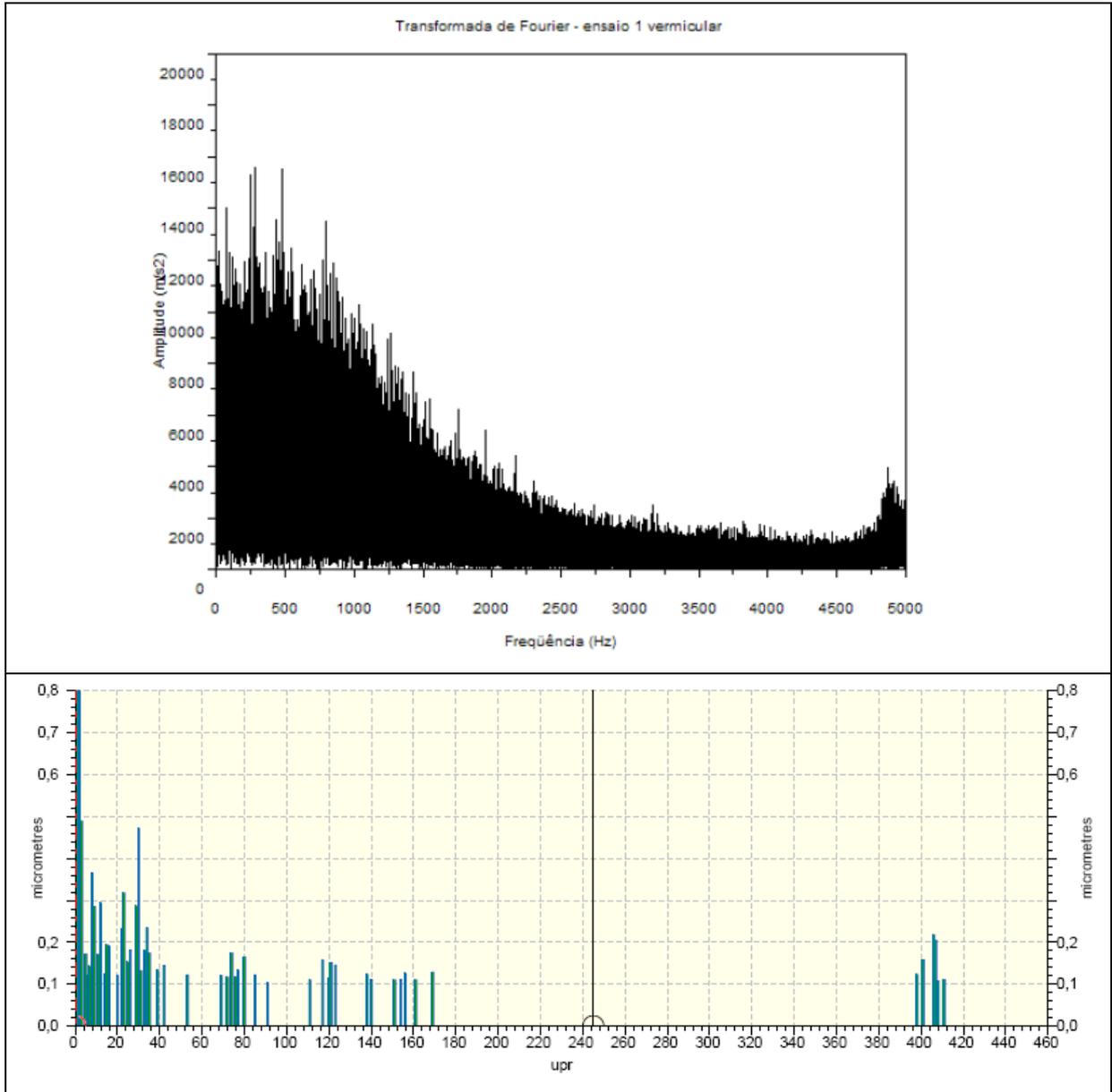


Figura 33 – Gráficos da transformada de Fourier para o sinal de vibração e circularidade da peça referentes ao ensaio V1 (ferro fundido vermicular)

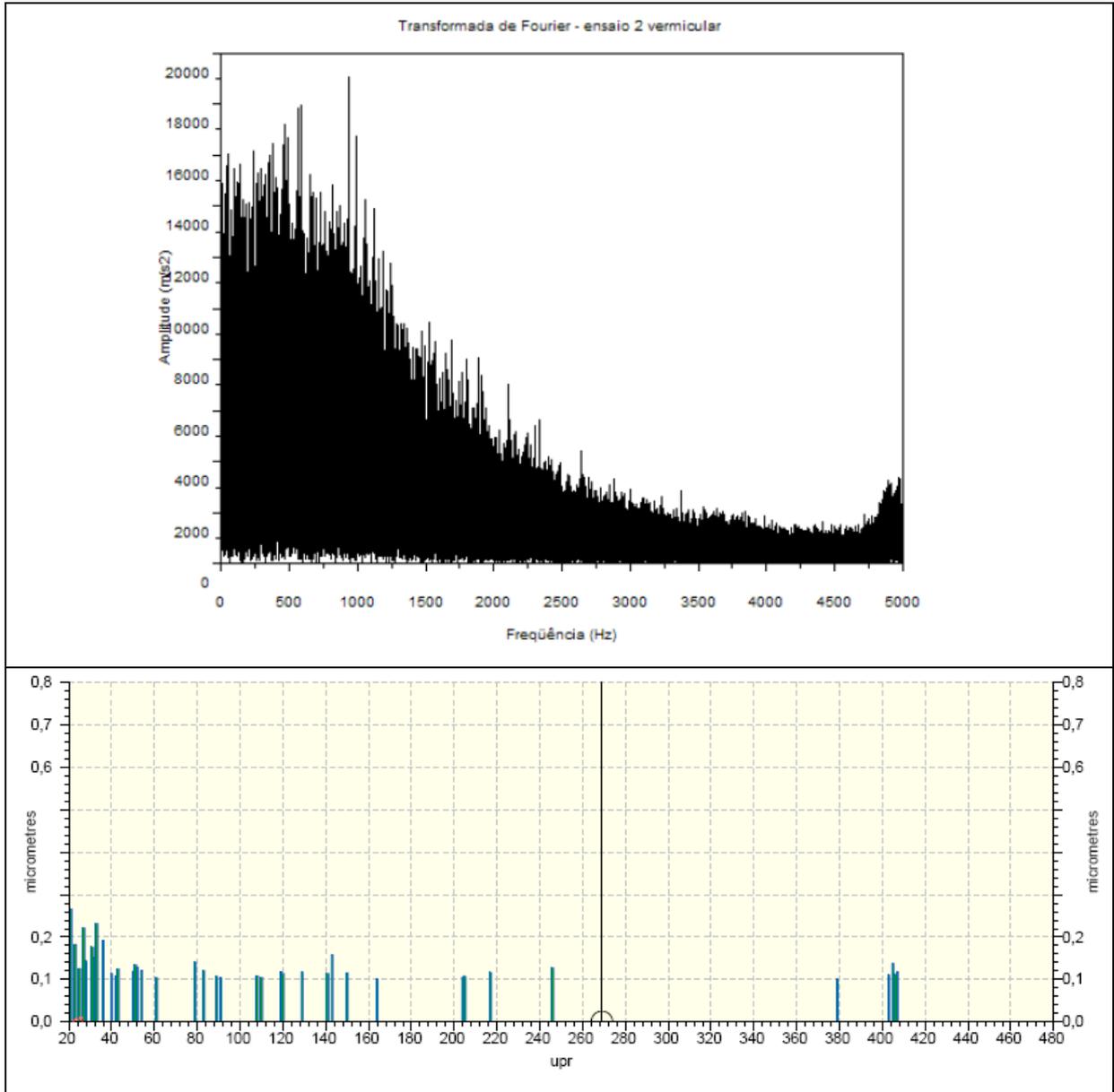


Figura 34 – Gráficos da transformada de Fourier para o sinal de vibração e circularidade da peça referentes ao ensaio V2 (ferro fundido vermicular)

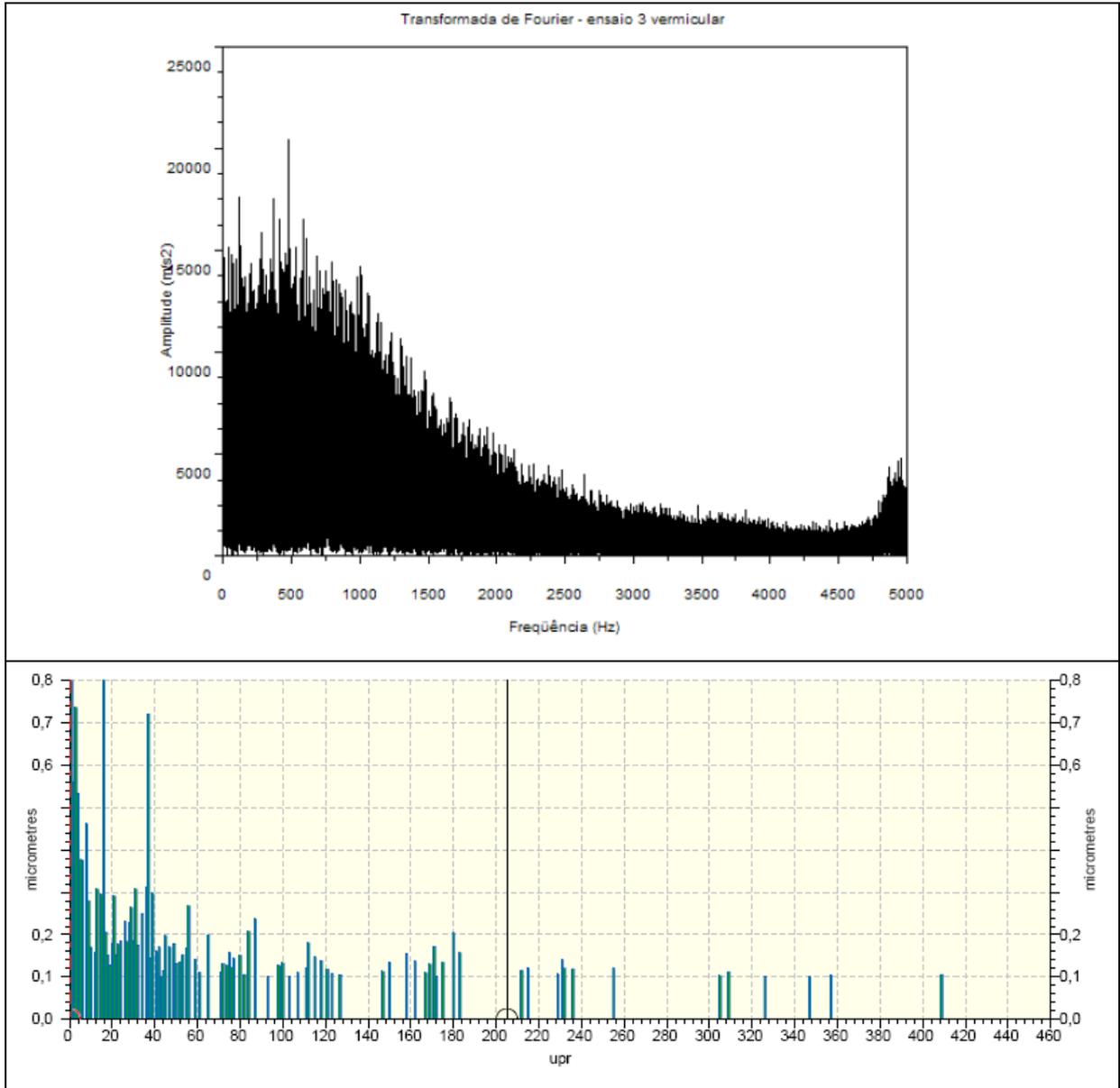


Figura 35 – Gráficos da transformada de Fourier para o sinal de vibração e circularidade da peça referentes ao ensaio V3 (ferro fundido vermicular)

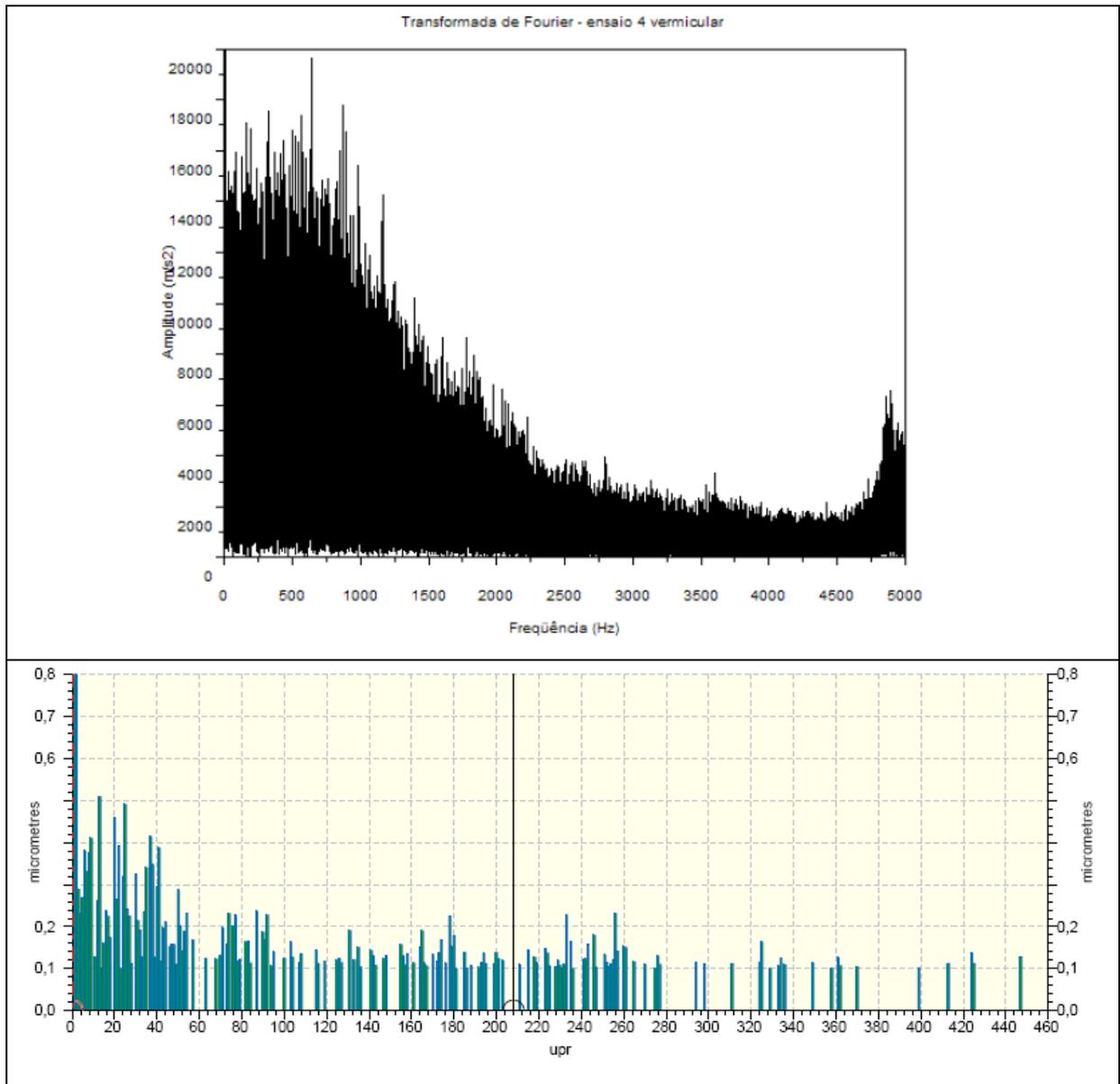


Figura 36 – Gráficos da transformada de Fourier para o sinal de vibração e circularidade da peça referentes ao ensaio V4 (ferro fundido vermicular)

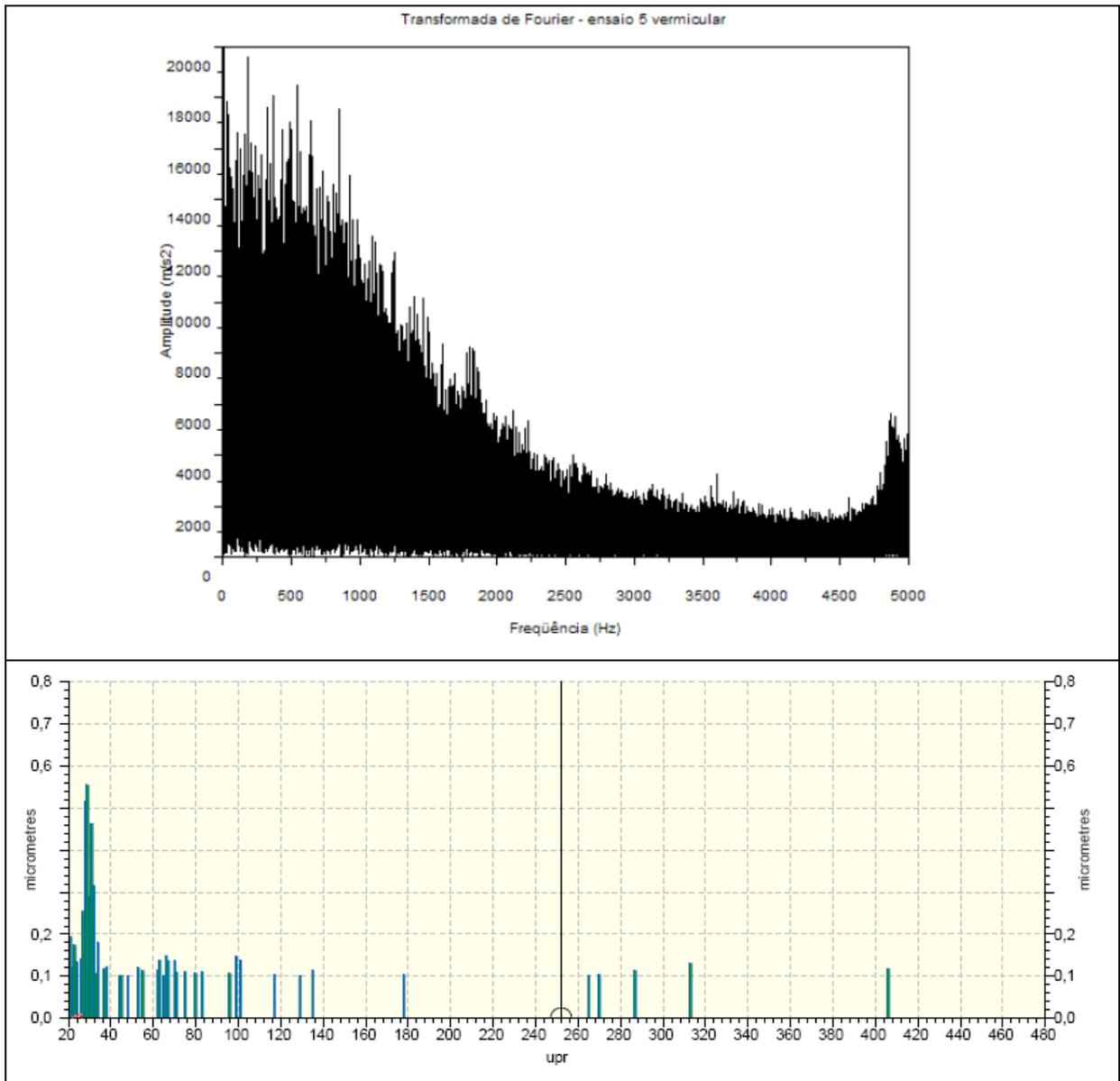


Figura 37 – Gráficos da transformada de Fourier para o sinal de vibração e circularidade da peça referentes ao ensaio V5 (ferro fundido vermicular)

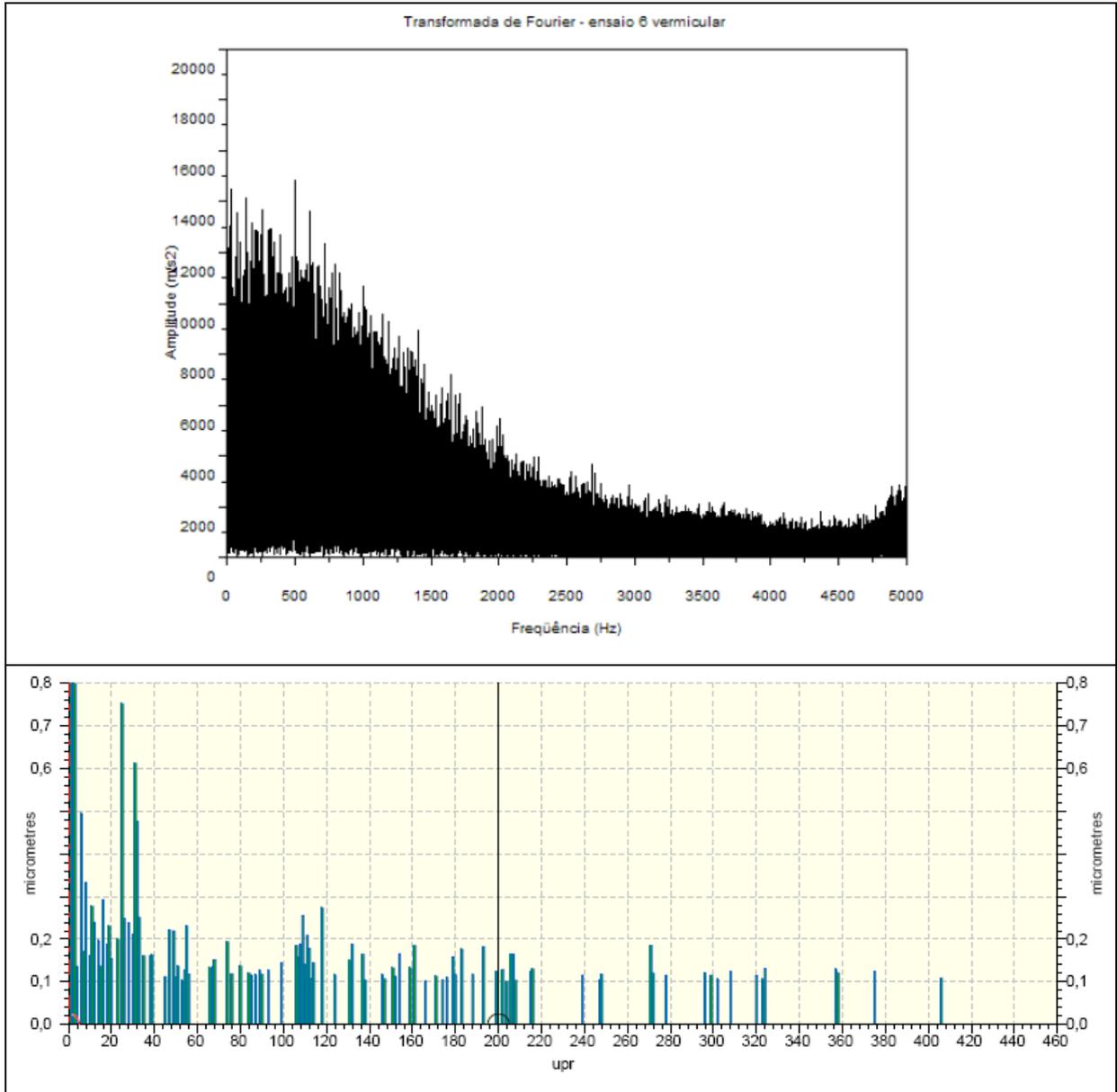


Figura 38 – Gráficos da transformada de Fourier para o sinal de vibração e circularidade da peça referentes ao ensaio V6 (ferro fundido vermicular)

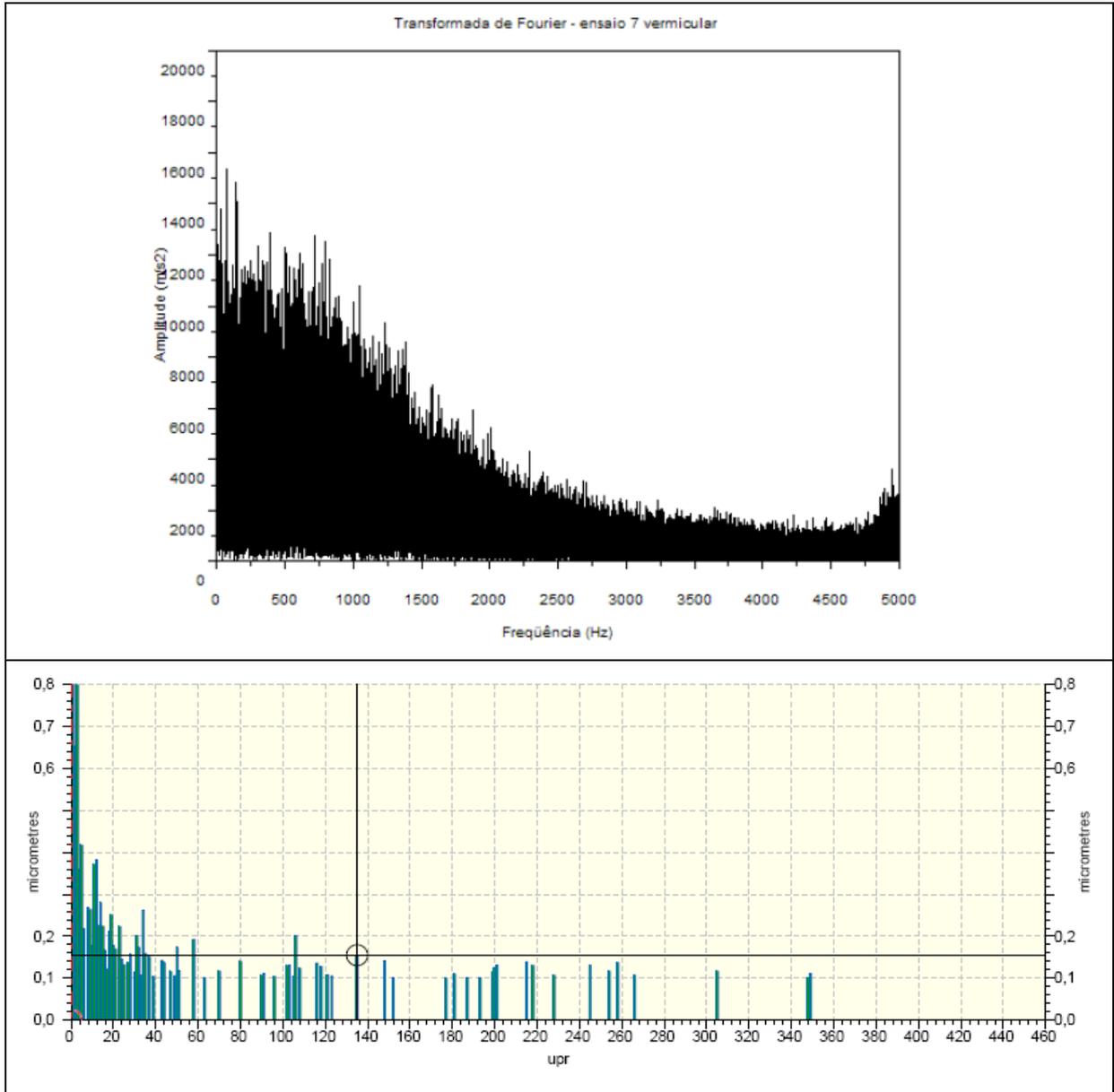


Figura 39 – Gráficos da transformada de Fourier para o sinal de vibração e circularidade da peça referentes ao ensaio V7 (ferro fundido vermicular)

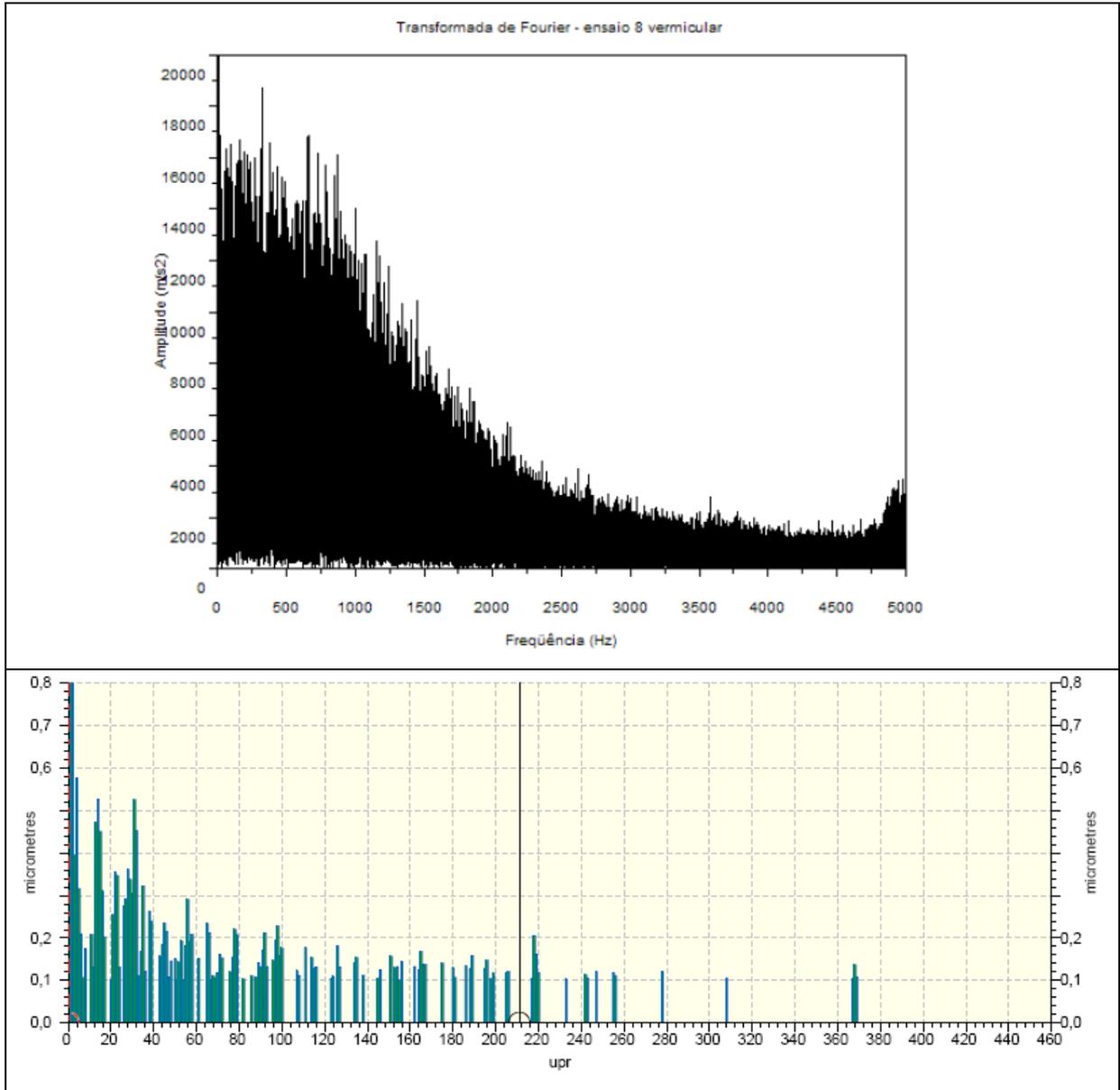


Figura 40 – Gráficos da transformada de Fourier para o sinal de vibração e circularidade da peça referentes ao ensaio V8 (ferro fundido vermicular)

A irregularidade dos períodos de oscilação nos sinais de vibração devido aos ruídos e influências da máquina causou ‘espalhamento’ de energia no cálculo das transformadas de Fourier. Esse fato prejudicou a observação clara dos picos de amplitude, dificultando a análise.

Em relação às frequências obtidas, não se notaram diferenças quando variados os parâmetros de corte. Assim, verifica-se que a frequência de vibração da ferramenta não apresentou relação clara com a velocidade de corte e, portanto, com a rotação da peça.

Na abordagem do problema foram levadas em consideração as diferenças entre as características dos materiais usinados (o ferro fundido cinzento possui uma estrutura mais heterogênea e a grafita age como um concentrador de tensões, enquanto o vermicular apresenta a grafita fortemente aderida na matriz de ferro e suas extremidades arredondadas, o que não produz o fator de entalhe), as quais influenciam a periodicidade da ruptura do cavaco, sendo esse fenômeno comprovado por meio da variação da intensidade da força de usinagem [5, 26]. Apesar disso, nos gráficos obtidos a partir dos sinais de aceleração (figuras 25 a 40), não se verificaram diferenças significativas para os dois materiais, não sendo possível a distinção entre eles a partir da observação das componentes de frequência. Isso pode ter ocorrido em função da composição e fabricação dos corpos de prova, não permitindo uma distinção clara entre o comprimento dos cavacos durante o corte, o que acarretou períodos de ruptura muito próximos. Tal problema pode ter sido agravado pela utilização de uma ferramenta com quebra-cavacos na usinagem do ferro fundido vermicular. As frequências de maiores amplitudes observadas foram semelhantes para os dois tipos de ferro fundido, ficando em faixas de 0-1000 Hz e 4000-5000 Hz.

De acordo com os gráficos de circularidade nas figuras de 25 a 40, notou-se uma concentração de picos na região de baixas frequências, sendo escassa a existência de picos com amplitudes maiores que $0,1\mu\text{m}$ em altas frequências. Essa análise é indicativa de que o processo de corte acarretou componentes mais significativos de oscilação da ferramenta a menores frequências.

Ademais, foi possível perceber que as análises de Fourier da vibração e da circularidade são análogas para cada caso, ocorrendo maiores amplitudes a baixas frequências, além da tendência a um aumento de amplitude a altas frequências. Comparando-se os gráficos, pôde-se verificar uma relação de aproximadamente 10 vezes, tanto entre as frequências mais baixas (faixa de 0-1000 Hz para a aceleração e faixa de 0-100 picos/volta para a circularidade), como entre as relativas aos últimos picos significativos de cada gráfico (faixa de 4000-5000 Hz para a aceleração e faixa de 400 a 500 picos/volta para a circularidade). Devido ao fato de as amplitudes e frequências de aceleração serem muito altas, deve-se notar que as inversões de movimento da ferramenta são pequenas, ou quase nulas, o que não possibilita o aparecimento de maiores frequências na circularidade, levando em conta que os gráficos de frequência relativos aos picos da peça foram feitos com um

filtro que só considerou amplitudes acima de $0,1\mu\text{m}$. Dessa maneira, é válida a relação entre os gráficos da análise de Fourier da vibração e da circularidade.

É importante ressaltar que devido ao tipo de microestrutura dos materiais, a ferramenta não está sempre em contato com a peça em função da geração de crateras quando do arrancamento de partículas durante a remoção do material, ocasionando intermitência durante o corte. Isso justifica a não existência de um padrão exato quando da comparação dos gráficos, já que o sinal de aceleração é irregular.

Os últimos picos referentes aos sinais de aceleração podem estar ligados à frequência de formação do cavaco, já que esse fenômeno é caracterizado por frequências superiores a 1500 Hz [5], além do que, segundo Cook [11], a altas frequências, o efeito regenerativo possui pouca importância na vibração da ferramenta. Já as altas amplitudes observadas a baixas frequências, podem estar relacionadas ao processo de vibração regenerativa, fenômeno que ocorre a partir da excitação da ferramenta pelas ondulações na superfície da peça, essas causadas a partir da variação da largura do cavaco durante o corte, nesse caso, oblíquo. Esse processo forma um ciclo fechado quando considerado que a variação da espessura do cavaco provoca oscilações na força passiva, o que altera a amplitude de oscilação da ferramenta e provoca desvios na profundidade de corte, alimentando novamente o ciclo.

Assim, conclui-se que os desvios de maiores amplitudes na circularidade das peças correspondem ao processo de vibração regenerativa e em menor intensidade e com maiores frequências à formação do cavaco.

5 CONCLUSÕES

A partir da revisão da literatura, verificou-se a influência do tipo de cavaco formado na frequência de oscilação das forças de corte. Sendo finita a rigidez do sistema máquina-ferramenta, conclui-se que a oscilação da ferramenta ocorre em função dos esforços atuantes, os quais também consideram a influência do auto-excitamento causado pela ondulação na superfície da peça. A variação da amplitude de vibração tende a alterar o valor da profundidade de corte durante o processo, fazendo com que haja desvios de forma na superfície das peças usinadas.

Os resultados obtidos inicialmente demonstraram a influência da profundidade de corte e da velocidade de corte na dinâmica do processo. Altos valores do primeiro parâmetro implicam em maiores amplitudes de vibração, enquanto um aumento da velocidade de corte causa um decréscimo nas medidas de circularidade, mas não influencia claramente a frequência de vibração da ferramenta.

Por meio da análise de Fourier, foi possível a verificação das frequências fundamentais, tanto da oscilação da ferramenta, como da ondulação na superfície da peça. A comparação destas frequências possibilitou avaliar a relação entre a aceleração da ferramenta e as ondulações produzidas na superfície dos corpos de prova torneados, sendo encontrada uma relação aproximada de 10 vezes entre as baixas frequências dos sinais de vibração (0-1000 Hz) e dos sinais de circularidade (0-100 picos/volta), e entre as altas frequências correspondentes ao último pico significativo da transformada dos sinais de vibração (4000-5000 Hz) e de circularidade (400-500 picos/volta). Em função das altas acelerações, o movimento oscilatório da ferramenta é pequeno, causando baixas amplitudes na superfície da peça e não contribuindo para o perfil de circularidade, o que justifica as menores frequências nesses últimos gráficos.

Além disso, foi verificado que os gráficos de frequência elaborados a partir do perfil de circularidade e do sinal de aceleração apresentaram uma concentração de altas amplitudes a baixas frequências, demonstrando que os maiores deslocamentos da ferramenta possuem componentes de menores frequências. Como o processo de formação do cavaco normalmente ocorre a altas frequências e os cavacos dos materiais usinados se apresentaram de forma segmentada, conclui-se que as faixas

correspondentes aos últimos picos significativos se relacionam a esse fenômeno. Assim, as maiores amplitudes, que mais afetam a circularidade, não estão diretamente ligadas ao processo de formação do cavaco, podendo estar relacionadas ao processo de vibração regenerativa. Conclui-se dessa forma que a força passiva oscila com maiores amplitudes e menores frequências em função do efeito regenerativo, enquanto a formação do cavaco causa menores deslocamentos a maiores frequências.

Durante o corte, não foram notadas diferenças entre o comprimento dos cavacos dos materiais usinados, não sendo possível a observação de variações de frequência dos picos significativos quando da alteração do material.

REFERÊNCIAS

- [1] DU, R., ELBESTAWI; M. A.; WU, S. M. **Automated monitoring of manufacturing process**, Part 1 and Part 2. *Journal of Engineering for Industry*, v.117, p.121-141, 1995.
- [2] ORABY, S. E.; HAYHURST, D. R. **Development of models for tool wear force relationships in metal cuttings**. *International Journal of Mechanical Sciences*, v.33, n.2, p.125-138, 1991.
- [3] GHASEMPOOR, A.; JESWIET, J.; MOORE, T. N. **Real time implementation of on-line tool condition monitoring in turning**. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, v.39, n.12, p.1883-1902, 1999.
- [4] ORABY, S. E.; HAYHURST, D. R. **Tool life determination based on the measurement of wear and tool force ratio variation**. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, v.44, n.12-13, p.1261-1269, 2004.
- [5] FERRARESI, D. **Usinagem dos Metais; Fundamentos da Usinagem dos Metais**. 8.ed. São Paulo: Edgard Blücher Ltda., 1990. 751p.
- [6] THOMSON, W. T.; DAHLEH, M. D. **Theory of Vibration with Applications**. 5.ed. New Jersey: Prentice Hall, 1998. 524p.
- [7] LEE, E. C.; NIAN, C. Y.; TARNG, Y. S. **Design of a dynamic vibration absorber against vibrations in turning operations**. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 108, p. 278-285, 2001.
- [8] EL-SINAWI, A. H.; KASHANI, R. **Improving surface roughness in turning using optimal control of tool's radial position**. *Journal of Materials Processing Technology*, v.167, p.54-61, 2005.
- [9] WECK, M.; BRECHER, C. **Werkzeugmaschinen 5 – Messtechnische Untersuchung und Beurteilung, dynamische Stabilität**. 7. Aufl. Berlin: Springer Verlag, 2006. 474S.
- [10] MERITT, H. E. **The theory of self-excited machine-tool chatter**. *Journal of Engineering for Industry*, v. 87, p. 447-454, 1965.

- [11] COOK, N. H. **Manufacturing Analysis**. Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1966. 229p.
- [12] THOMAS, M.; BEAUCHAMP, Y. **Statistical investigation of modal parameters of cutting tools in dry turning**. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, v. 43, p. 1093-1106, 2003.
- [13] DIMLA SR., D. E. **The impact of cutting conditions on cutting forces and vibration signals in turning with plane face geometry inserts**. *Journal of Materials Processing Technology*, v.155-156, p.1708-1715, 2004.
- [14] TOBIAS, S. A. **Schwingungen an Werkzeugmaschinen**. München: C. Hanser, 1961. 332S.
- [15] GALÁRRAGA, E. G. C. **Estudo do Desgaste em Materiais Utilizados em Disco de Freio de Ferro Fundido com Grafita Lamelar e Vermicular**. 2002. 192 p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.
- [16] MOCELLIN, F. **Avaliação da usinabilidade do ferro fundido vermicular em ensaios de furação**. 2002. 97 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.
- [17] ANDRADE, C. L. F. de **Análise da furação do ferro fundido vermicular com brocas de metal-duro com canais retos revestidas com TiN e TiAlN**. 2005. 154 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.
- [18] XAVIER, F. A. **Aspectos tecnológicos do torneamento do ferro fundido vermicular com ferramentas de metal-duro, cerâmica e CBN**. 2003. 144 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.
- [19] ZIEGLER, K. R.; WALLACE, J. F. **The Effect of Matrix Structure and alloying on the Properties of compacted Graphite Iron**. *AFS Transactions*, v. 82-123, p. 735- 748. 197-.
- [20] DAWSON, S.; WÜRTEMBERG, J. M. von. **Experiências Práticas com Ferro Fundido de Grafita Compactada Como Material para Componentes**

Automotivos. In: 26º SIMPÓSIO INTERNACIONAL SOBRE TECNOLOGIA AUTOMOTIVA E AUTOMAÇÃO – ISATA, 1993, Aachen. Anais... Aachen: 1993 apud XAVIER, F. A. Aspectos tecnológicos do torneamento do ferro fundido vermicular com ferramentas de metal-duro, cerâmica e CBN. 2003. 144 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

[21] DAWSON, S. **Operational Properties of Compacted Graphite Iron: Feedback from ongoing test programs.** SinterCast S.A, Switzerland, Fev. 1994.

[22] MARQUARD, R.; SORGER, H.; McDONALD, M. **Crank it up: New materials create new possibilities.** Engine technology international, v. 2, p. 58-60, 1998.

[23] MACHADO, A. R.; BOEHS, L.; SANTOS, M. T. dos; GUESSER, W. L. **Usinagem de Ferros Fundidos Cinzento, Nodular e Vermicular.** *Tecnologias Avançadas de Manufatura.* Cap. 4 – Coleção Fábrica do Milênio, v.1. 1.ed. Jaboticabal: Editora Novos Talentos, 2005. 169p.

[24] WANG, J. **Development of a chip flow model for turning operations.** *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, v.41, p.1265-1274, 2001.

[25] STEFANOV, Y. P.; MAKAROV, P. V.; BURKOV, P. V.; MATVEEV, V. S. **Dynamic simulation of chip generation and formation in metal cutting.** *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, v.28, p. 117-124, 1997.

[26] TIME, I. I. **On the Resistance of Metals and Wood to Cutting.** Dermacov, St. Petersburg, 1880 (em russo). apud Astakhov, V. P.; Shvets, S. V.; Osman, M. O. M. Chip structure classification based on mechanics of its formation. *Journal of Materials Processing Technology*, v.71, p. 247-257, 1997.

[27] ASTAKHOV, V. P.; SHVETS, S. V.; OSMAN, M. O. M. **Chip structure classification based on mechanics of its formation.** *Journal of Materials Processing Technology*, v.71, p. 247-257, 1997.

[28] KÖNIG, W.; KLOCKE, F. **Fertigungsverfahren – Drehen, Fräsen, Bohren.** 7. korrigierte Aufl. Berlin: Springer Verlag, 2002. 547S.

[29] TRENT, E. M. **Metal Cutting.** 4.ed. Woburn: Butterworth-Heinemann, 2000. 446p.

[30] SHAW, M. C. **Metal Cutting Principles**. 2.ed. New York: Oxford University Press, 1986. 594p.

[31] KLOSE, Hans-Jürgen **Einfluss der Werkstoffmorphologie auf die Zerspanbarkeit niedriglegierter Gusseisen**. *Berichte aus dem Institut für Fertigungstechnik und Spanende Werkzeugmaschinen – Universität Hannover*. Düsseldorf: VDI Verlag, nº 297, 1993. 174S.

[32] MARWANGA, R. O.; VOGT, R. C.; COHEN, P. H. **Influence of graphite morphology and matrix structure on chip formation during machining of continuously cast ductile irons**. *AFS Transactions*, p. 651-661, 2000.

[33] COHEN, P. H.; VOGT, R. C.; MARWANGA, R. O. **Influence of graphite morphology and matrix structure on chip formation during machining of ductile irons**. In: AFS Casting Congress, 2000, Pittsburg. American Foundrymen's Society apud MOCELLIN, F. Avaliação da usinabilidade do ferro fundido vermicular em ensaios de furação. 2002. 97 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

[34] GEORGIU, G. **CGI high speed machine tool solutions**. In: COMPACTED GRAPHITE IRON – MACHINING WORKSHOP, 5, 2002. Darmstadt. Anais...Darmstadt: PTW – Institute of Production and Machine Tools, 2002.

[35] ASTAKHOV, V. P. **Metal Cutting Mechanics**. Boca Raton: CRC Press LLC, 1999. 297p.

[36] GUO, Y. B.; YEN, D. W. **A FEM study on mechanisms of discontinuous chip formation in hard machining**. *Journal of Materials Processing Technology*, v.155-156, p.1350-1356, 2004.

[37] BÄKER, M. **The influence of plastic properties on chip formation**. *Computational Materials Science*, v.28, p. 556-562, 2003.

[38] JASPERS, S. P. F. C.; DAUTZENBERG, J. H. **Material behavior in metal cutting: strains, strain rates and temperatures in chip formation**. *Journal of Materials Processing Technology*, v.121, p.123-135, 2002.

[39] RAMESH, R.; MANNAN, M. A.; POO, A. N. **Error compensation in machine tools – a review. Part I: geometric, cutting-force induced and fixture-dependent errors**. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, v. 40, p. 1235-1256, 2000.

[40] TOPAL, E. S.; COGUN, C. **A cutting force induced error elimination method for turning operations.** *Journal of Materials Processing Technology*, v.170, p. 192-203, 2005.

[41] MAYER, J. R. R.; PHAN, A-V.; CLOUTIER, G. **Prediction of diameter errors in bar turning: a computationally effective model.** *Applied Mathematical Modelling*, v. 24, p. 943-956, 2000.

[42] LYNN, P. A.; FUERST, W. **Introductory digital signal processing – with computer applications.** Chichester: John Wiley & Sons Ltd., 1994. 400p.

[43] DEGNER, W.; LUTZE, H.; SMEJKAL, E. **Spanende Formung – Theorie, Berechnung, Richtwerte.** 15. Aufl. München, Wien: Carl Hanser Verlag, 2002. 396S.

APÊNDICE A – PROGRAMAS UTILIZADOS

A seguir serão apresentados os programas utilizados. O primeiro diz respeito ao torneamento da peça e o segundo, ao tratamento dos sinais adquiridos, a fim de se obter a frequência fundamental por meio do método da Transformada Rápida de Fourier (FFT).

Torneamento (desbaste - acabamento)

```
G59 X0 ZXXX //localiza o zero peça
T101 M3 //chama a ferramenta e liga a rotação no sentido anti-
horário
G96 VXXX //define velocidade de corte constante
G46 //ativa compensação do raio da ponta da ferramenta
G00 XXXX ZXXX //posiciona a ferramenta
G01 XXXX ZXXX FXXX //corte com avanço XXX
G00 X150 //afastamento da ferramenta no eixo x
G00 Z50 //afastamento da ferramenta no eixo z
G40 //desliga compensação do raio da ponta da ferramenta
M30 //fim do programa
```

Tratamento matemático do sinal de vibração

```
/**Leitura dos pontos
```

```
B=fscanfMat('C:\nome do arquivo.txt');
```

```
/**Sinal sem tratamento
```

```
C=(B*9.8)/(100*0.00965); //conversão em função do filtro (V => m/s2)
```

```
qtde=size(C);
```

```
t=qtde(1,1);
```

```
tempo=1e-4:1e-4:t/(1e4); //vetor de tempo para taxa de aquisição de 10kHz
```

```
//Gráfico do sinal de aceleração no tempo:
```

```
xset('window',1)
```

```
plot2d(tempo',C)
```

```
xtitle("Sinal de vibração - ensaio X material","Tempo (s)", "Aceleração (m/s2)")
```

```
/**Transformada de Fourier
```

```
//Janelamento:
```

```
w=window('hn',t);
```

```
w=w';
```

```
sinal_final=w.*C;
```

```
Transf=fft(sinal_final);
```

```
taxa_aquis=10e3;
```

```
freq=taxa_aquis*(0:(t/2))/t;
```

```
a=size(freq);
```

```
a=a(1,2);
```

```
D=abs(Transf(1:a));
```

```
//Gráfico da transformada de Fourier em função da frequência:
```

```
xset('window',2)
```

```
plot2d(freq,D)
```

```
xtitle("Transformada de Fourier - ensaio X material","Frequência (Hz)", "Amplitude (m/s2)")
```