



ANÁLISE DA INTERAÇÃO DINÂMICA ENTRE IRREGULARIDADES SUPERFICIAIS E DESVIOS DE FORMA NA GERAÇÃO RUIDO EM COMPONENTES MECÂNICOS

CLAUDINEI JOSÉ DE OLIVEIRA¹, ERNANI SALES PALMA²

¹Fundação Comunitária de Ensino Superior de Itabira (FUNCESI)
Rua Venâncio Augusto Gomes 50 - Itabira - Brasil

²Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG)
Av. Antonio Carlos 6627 – Pampulha - Belo Horizonte - Brasil

(Recibido 5 de noviembre de 2011, para publicación 31 de enero de 2012)

Resumen – Este trabalho aborda a relação entre as características dimensionais de erro de forma (circularidade) e rugosidade superficial no funcionamento adequado de componentes mecânicos que foram manufaturados variando a velocidade de avanço de corte durante a usinagem em $\pm 30\%$ em relação aos parâmetros normalizados na produção. Estes componentes foram analisados após a manufatura e os resultados encontrados foram utilizados em uma matriz estatística. Nesta matriz foi utilizada a metodologia de experimentos fatoriais (*Design of experiments*), através da qual foi verificada a interação entre estas características e suas respectivas respostas nos experimentos. Os parâmetros escolhidos foram avaliados em dois níveis (mínimo e máximo) em um fatorial do tipo 2². As velocidades de rotação utilizadas no experimento variavam de acordo com sua utilização comercial. Os resultados encontrados apresentam interação o que comprova a interação dinâmica entre as variáveis escolhidas. Especificamente neste trabalho, os experimentos foram realizados em um eixo de manivelas (virabrequim) que é um dos principais componentes de um motor de combustão interna. Este componente trabalha em um motor de 1365 cilindradas bi-combustível, comercialmente conhecido por 1.4 flex. O eixo de manivelas em sua forma final possui massa de aproximadamente 9,8 kg e um comprimento de $392,3 \pm 0,05$ mm. Após o processo de usinagem, o componente precisa passar por um segundo processo que é o de têmpera superficial, conferindo-lhe maior dureza superficial e resistência mecânica. A partir dos resultados obtidos experimentalmente, foi aplicado um arranjo linear (modelagem), determinando assim os coeficientes usados para relacionar as respostas relativas às variáveis de entrada. Conhecendo-se os coeficientes dos arranjos entre os fatores, verificou-se quais fatores e em quais níveis apresentaram maior interação com o menor resíduo possível.

Palavras chave – Erro de forma, rugosidade, planejamento de experimentos, velocidade de rotação, interação dinâmica.

1. INTRODUÇÃO

Este trabalho analisa as interações dinâmicas entre as características superficiais e geométricas de um componente mecânico manufaturado com alterações inseridas por meio do avanço de corte no processo de fabricação. Por meio de ensaios, procura-se entender como as alterações resultantes após a variação do avanço de corte podem afetar o desempenho deste componente ao longo de velocidades de trabalho diferenciadas.

A importância prática deste estudo reside no fato de não existir componentes fabricados isentos de irregularidades, por menores que estas sejam. A maneira como estas irregularidades superficiais e dimensionais se interagem e afetam o funcionamento dos componentes mecânicos estão ligadas ao tipo de solicitação e regime específico de trabalho. No entanto, as condições de funcionamento de componentes e sistemas mecânicos também estão limitadas a outras variáveis tais como aos modos de vibração da estrutura, tensões acumuladas e lubrificação.

As características selecionadas no estudo podem interagir de várias maneiras. Algumas podem ter maior influência isoladamente, ou associadas a outras. As velocidades de trabalho podem causar

instabilidade dinâmica, acelerar o processo de falha por fadiga ou fazer com que o sistema entre em ressonância em função das modificações ocorridas.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Os sistemas mecânicos são compostos em sua maioria por vários componentes que podem ter função de maneira estática ou em movimento, estes componentes também estão sujeitos a ação do atrito.

A análise do comportamento dinâmico de sistemas rotativos e estacionários e suas interações sempre constituíram um grande desafio para a engenharia. Não são raras as situações onde componentes estáticos e dinâmicos de máquinas apresentam falhas, estas muitas vezes de difícil diagnóstico, requerendo estudos mais detalhados para definir com maior precisão suas causas e conseqüências [1].

Na ausência de desgaste, as superfícies apresentam uma combinação dinâmica e cinemática entre os efeitos do contato. Os primeiros efeitos são associados com as frequências naturais e a flexibilidade dinâmica de funcionamento e os outros são associados com a geometria e suas variações (erros de forma) [2].

As condições da superfície têm um forte efeito na causa de vibração, ruído e eficiência de trabalho, sendo a rugosidade um dos parâmetros que tem forte influência nas condições de atrito [3].

O atrito envolve medição da quantidade da força requerida para iniciar e/ ou sustentar o deslizamento. O atrito é classificado de duas maneiras: estático e cinético [4].

2.1. Princípios básicos da Tribologia

A Tribologia é uma ciência que abrange as áreas de Metrologia, Metalurgia, Lubrificação e Ciência dos Materiais, e associa o comportamento dos materiais, sua interação com o ambiente e o regime de trabalho. Ela abrange o conceito de transferência de força entre as superfícies, seja quando duas superfícies estão se movendo relativamente uma à outra ou quando uma é motriz para outra [5].

Não há nenhuma máquina ou mecanismo que não possua interação entre as superfícies em contato. A Tribologia vem tratar das propriedades de atrito e desgaste e de suas propriedades intrínsecas [6].

Segundo [7-9], a topografia e seu desenvolvimento nos contatos em atrito desempenham grande importância na compreensão de modelos nos processos de fricção. Quando um metal desliza sobre outro, a energia de atrito geralmente é dissipada tanto pela ruptura de uma camada interfacial, ou em deformação plástica pelas próprias superfícies que estão em contato.

Neste caso, existem as deformações em pontos localizados, onde literalmente existe o contato sobre as superfícies. Neste ponto existe deformação plástica localizada.

As superfícies em contato estarão submetidas a um estado triaxial de tensões. A Fig. 1 representa o contato real entre duas superfícies. Pode ser observado que a área de contato real é menor que a área aparente. O contato ocorre nas irregularidades superficiais de maior amplitude dentro da área aparente entre os contatos.

O valor na área de contato real A_r , é aproximado pela Eq. 1.

$$A_r \geq \frac{L}{p} \quad (1)$$

onde A_r é a área real de contato, L é a força normal na interface de contato e p é a penetração no material.

As superfícies em contato também estão sujeitas a uma série de tipos de desgastes, cada um com suas características. São eles: adesivo, abrasivo, erosivo, fadiga superficial, por vibração (*fretting*) e oxidação.

Segundo [11-13], o contato entre as asperidades contidas em determinadas regiões da superfície produzem pontos quentes (*hot-spots*). Neste aspecto, as propriedades térmicas como condutividade e difusividade se tornam importantes, pois as grandes transformações que ocorrem são iniciadas pela ativação térmica que ocorrem devido ao deslizamento e atrito, essas reações triboquímicas geram produtos na forma de óxidos metálicos. As naturezas destes óxidos vão determinar o tipo de fenômeno que vai agir entre as superfícies, ainda mais se estiver associados com algum tipo de mecanismo de transporte para movimentá-los.

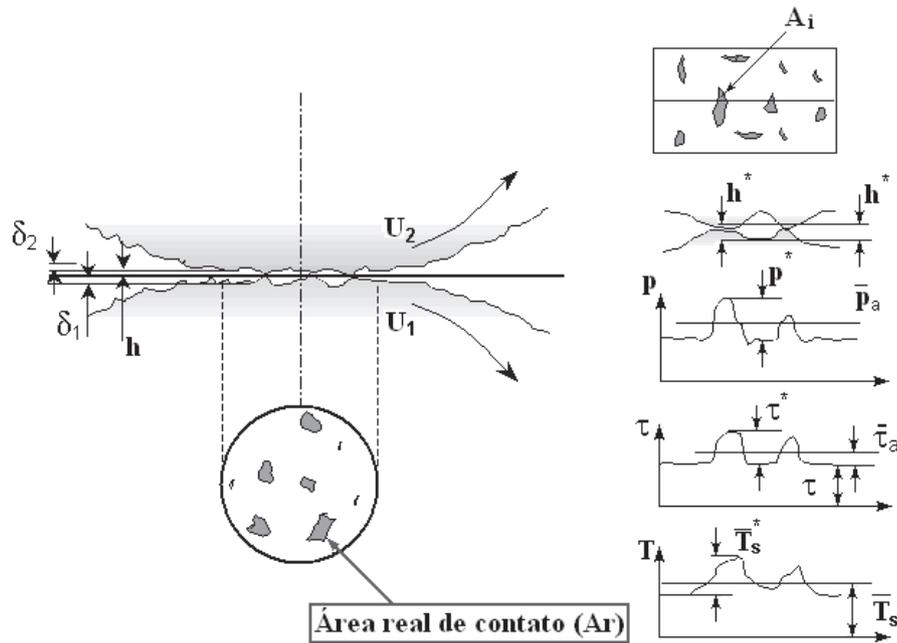


Fig. 1. Superfícies em contato [10].

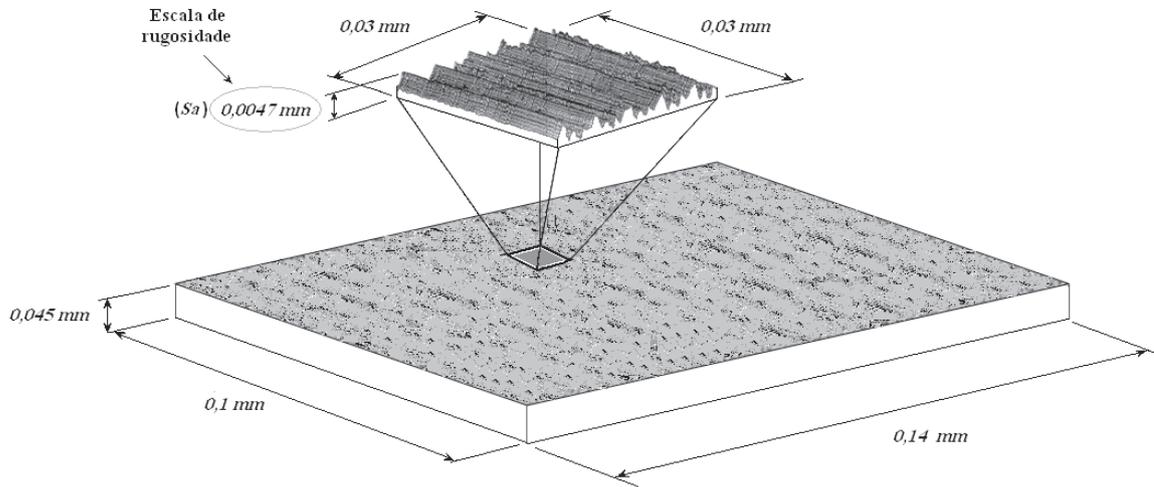


Fig. 2. Vista tridimensional ampliada de uma área em uma superfície.

2.2. Superfícies reais de engenharia

De acordo com [14] e [15], as superfícies fabricadas não são superfícies perfeitas, existem detalhes que só podem ser observados quando estas são ampliadas várias vezes em relação ao seu tamanho original. A Fig. 2 representa esquematicamente esta proporção.

De acordo com [16], o conjunto formado pelo alto número de irregularidades superficiais, nas formas de picos e vales, é definida como rugosidade superficial. A rugosidade é mensurada entre as escalas micrométrica (10^{-6} m) e nanométrica (10^{-9} m).

A qualidade da superfície determina muitas características do componente fabricado, como sua efetividade de lubrificação e a vida de componentes que estão diretamente em contato, entre outros. Podem ser encontradas marcas como trincas produzidas por impacto térmico, transferência de material e

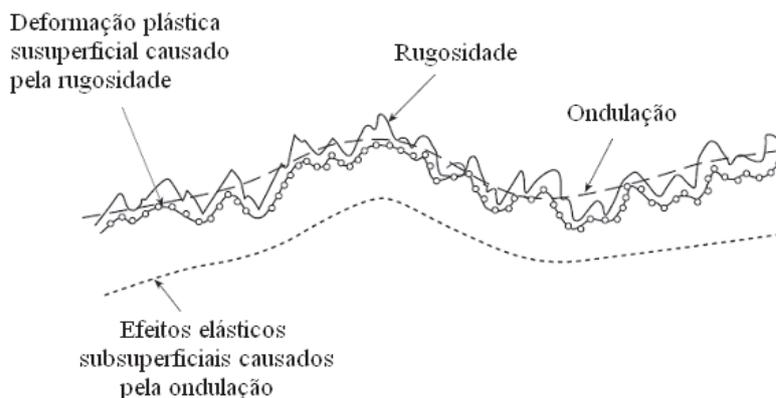


Fig. 3. Efeitos superficiais e subsuperficiais [21].

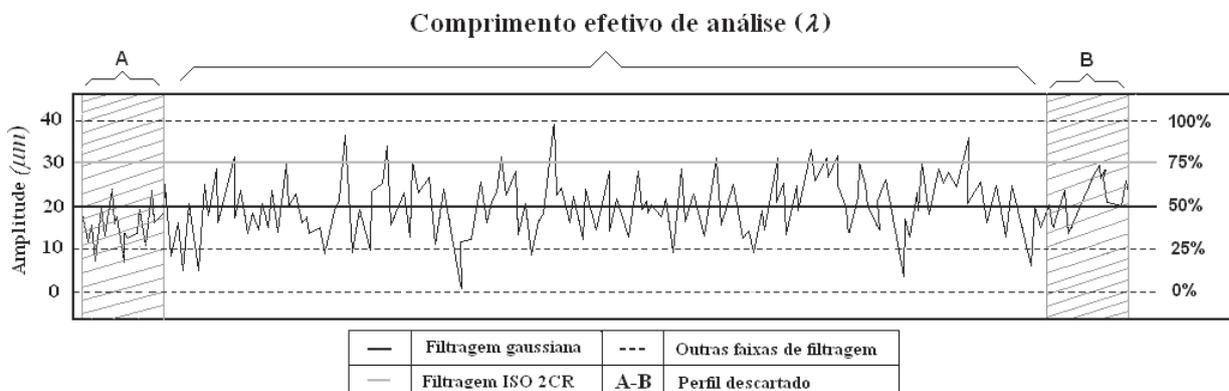


Fig. 4. Perfil de textura com filtragem gaussiana e ISO 2CR e pontos de descarte.

crateras produzidas por fratura de grão. Cada processo depende de sua especificação, podendo gerar superfícies distintas umas das outras. Quanto à rugosidade, a maneira de analisar a superfície está relacionada às orientações dos sulcos provenientes do processo de fabricação [17,18,19].

A recomendação é efetuar as mensurações de rugosidade perpendicularmente aos sulcos provenientes do processo de fabricação [20].

2.3. Caracterizações da superfície

Quando duas superfícies estão em contato e uma força atuando perpendicularmente a elas, as irregularidades são transferidas para as camadas subsuperficiais das partes em contato, a Fig. 3 representa as subdivisões de um perfil e o comportamento da superfície sob ações de tensões [21].

A força que atua na superfície causa maiores alterações na textura superficial e menores na ondulação que terá comportamento elástico.

2.4. Processos de filtragem em perfis de rugosidade e forma

Segundo [22] e [17], devido às características que as superfícies podem apresentar. A filtragem ISO 2CR ou gaussiana podem influenciar os perfis gerados e também seus resultados de medição. Os filtros têm a função de retirar componentes de ondas que não fazem parte do perfil e que são oriundos de vibrações ou outras fontes de interferência.

Estes filtros podem realçar ou ocultar certas características. O filtro gaussiano foi padronizado para fazer um corte de 50% na amplitude total de um perfil capturado, enquanto filtro ISO 2CR foi padronizado para ter um corte de 25%, apresentando 75% da amplitude máxima do seu valor capturado ao longo do perfil.

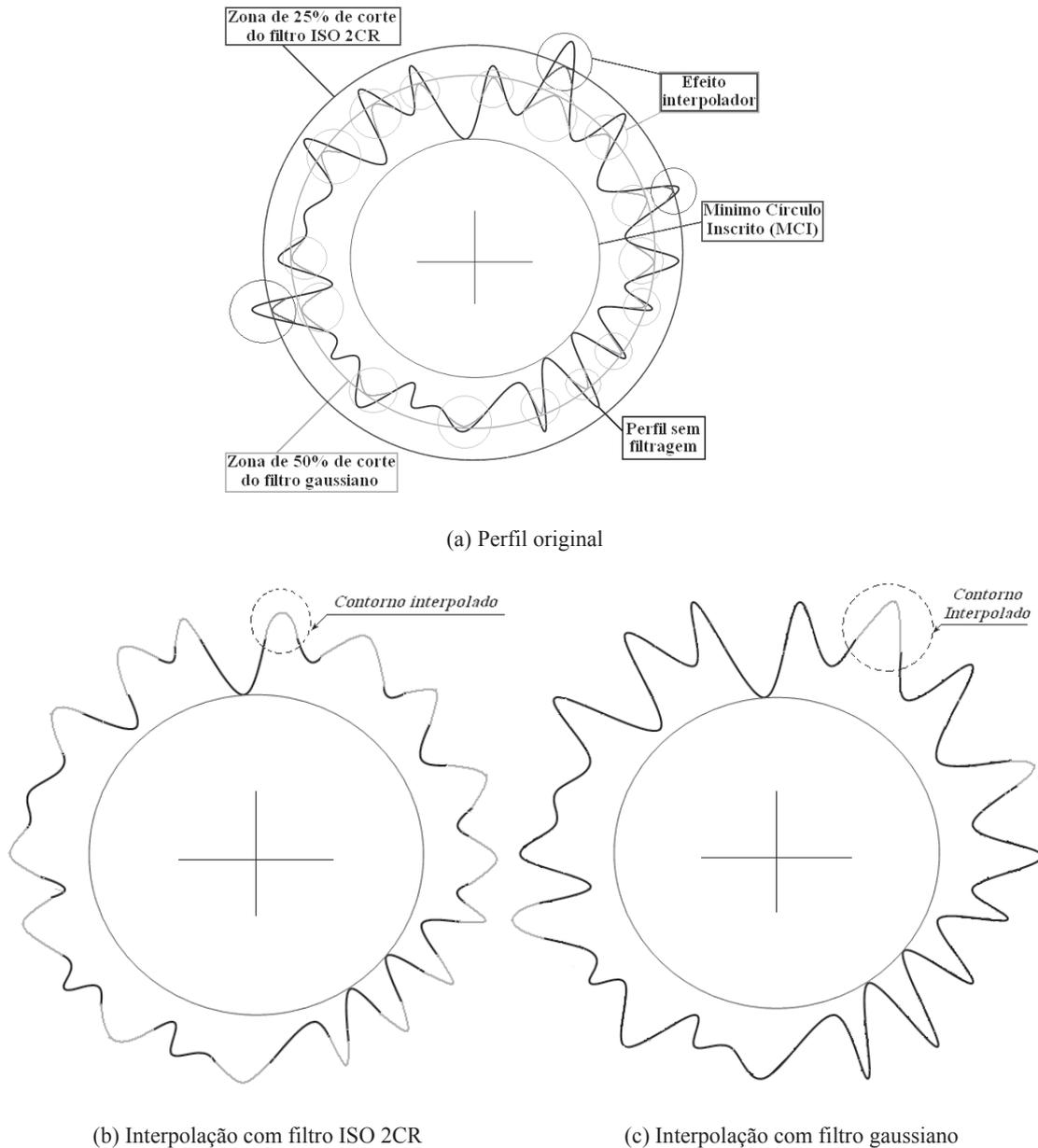


Fig. 5. Efeito de filtragem em um perfil circular.

Segundo [23] e [15], esta condição vale tanto para as análises da rugosidade como as de erro forma. A Fig. 4 apresenta um perfil filtrado de rugosidade, com as respectivas faixas de corte de cada filtro e as partes que são descartadas durante o processo de medição.

De acordo com [17,21], o erro de forma é um desvio entre uma forma Euclidiana perfeita e uma forma real obtida por um processo qualquer de fabricação. Essa diferença é o valor que difere da retitude, planeza e da circularidade ideais.

Os erros de forma têm fácil caracterização, pois são as diferenças entre as formas euclidianas perfeitas como círculos, linhas e planos. A Fig. 5 mostra um perfil circular com a aplicação dos dois tipos de filtragem.

Devido às diferenças entre os efeitos de filtragem, são esperadas diferenças entre os valores de medição em relação ao tipo de filtro usado na análise [14].

As medições de forma por revolução se dão em torno de uma circunferência. Logo, é necessário se definir a frequência que será usada para se coletar os detalhes em torno do perfil. Para isso é usado um

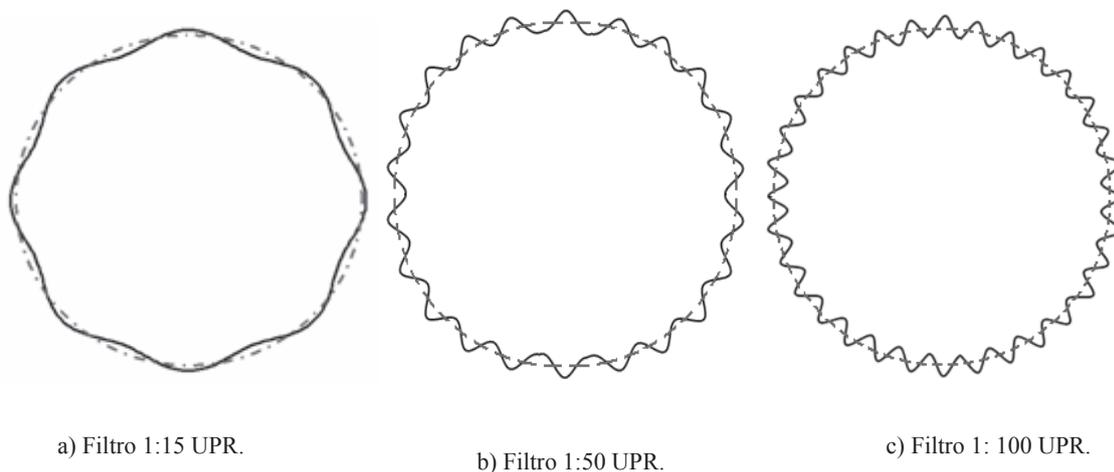


Fig. 6. Efeito da filtragem em função da quantidade de harmônicas – Adpatado de [24].

número de ondulações por revolução. Essa aplicação é conhecida como filtro UPR (*Undulations Per Revolution*) que são baseadas nas Transformadas de Fourier. A Fig. 6 mostra o efeito da filtragem UPR em um perfil circular.

Como pode ser observado na Fig. 6, a quantidade de ondulações vai definir a sensibilidade da análise.

2.5. Falhas com origem nas condições superficiais

Baseando-se em [16,25-27], a integridade superficial é um parâmetro que envolve propriedades mecânicas, rugosidade superficial, tensões atuantes e condições estruturais da camada superficial de um componente. Uma vez iniciada uma trinca, haverá concentração de tensões ao redor da mesma, o que poderá gerar a fratura. Este parâmetro tem sua importância aumentada quando a solicitação do componente é elevada, no que tange as condições de carregamento, temperatura, velocidade e aumento na vibração.

De acordo com [28], quando um componente é solicitado, a camada superficial sofre o maior carregamento. Para componentes usinados e sujeitos a cargas cíclicas, a integridade é bastante influenciada pela condição da sua camada superficial. As superfícies estão sujeitas ao contato direto, até que algum tipo de proteção fique entre elas.

Segundo [29], quando duas superfícies contínuas são carregadas em contato, haverá algum tipo de distorção em cada uma delas. As deformações podem ser puramente elásticas ou podem envolver alguma deformação plástica adicional. Neste caso a deformação torna-se permanente.

Folgas, erros de forma, rugosidade superficial e desbalanceamento podem gerar instabilidades dinâmicas, e com isso gerar o efeito de ressonância na estrutura ou no componente, com isso possibilitando a falha, sendo ela muitas vezes catastrófica.

Na ausência de desgaste, as superfícies apresentam uma combinação dinâmica e cinemática de efeitos. Os primeiros efeitos são associados com as frequências naturais e a flexibilidade dinâmica de funcionamento e os outros são associados com a geometria e suas variações (erros de forma) [2].

2.6. Análise modal

A análise modal é uma ferramenta que pode ser utilizada para discriminar como e em quais frequências um componente ou estrutura pode vibrar naturalmente sendo uma das primeiras etapas de uma análise dinâmica. Os resultados da análise modal indicam as frequências e os modos que a estrutura tende a vibrar quando excitada [30].

Segundo [31] e [32], para realizar uma análise modal é necessário ajustar um modelo e determinar as forças atuantes, comparar e correlacionar às respostas da estrutura em função das vibrações. Uma análise

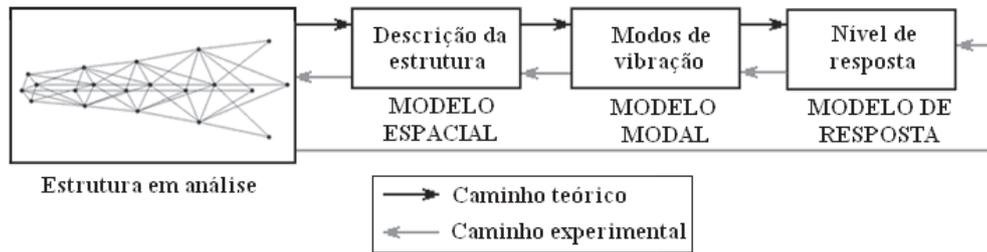


Fig. 7. Análise experimental e teórica - Adaptado de [33].

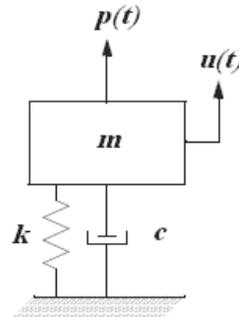


Fig. 8. Sistema com um grau de liberdade [30].

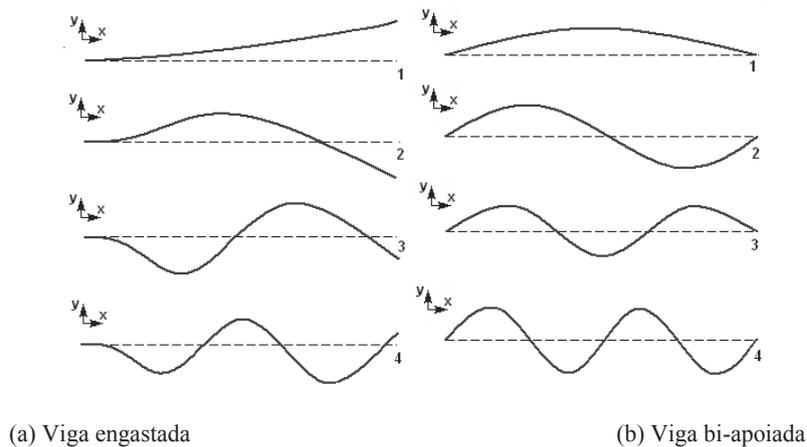


Fig. 9. Modos de vibração de uma viga - Adaptado de [30].

modal ou vibracional típica pode ser dividida em três etapas: análise teórica, modelo modal e nível de resposta.

A análise modal experimental parte do nível de resposta em função dos modos de vibração, para aí descrever a estrutura. Este caminho é apresentado na Fig. 7.

A representação mais simples de um sistema dinâmico é um sistema massa-mola com um grau de liberdade, conforme apresentado na Fig. 8. Neste sistema, m é a massa, c é o coeficiente de amortecimento, k é a constante de rigidez da mola e p é a força aplicada.

As forças que agem na estrutura a cada instante de tempo são separadas em forças internas e forças externas. As forças internas são inerentes à estrutura enquanto que as forças externas são provocadas por fatores externos e, portanto, independe da estrutura em que está sendo aplicada. Os modos de vibração são funções das propriedades estruturais e das condições de contorno. Se as condições de contorno são modificadas, como a substituição do engaste por apoios em ambas as extremidades, as frequências naturais e os modos de vibração alteram-se também. A Fig. 9 apresenta os modos de vibração de uma viga engastada e bi-apoiada.

De acordo com [32,34,35], as relações entre o carregamento estrutural e as frequências naturais determinam o valor absoluto da resposta dinâmica, ou seja, é a relação de uma excitação específica com as frequências naturais que estabelece o fator de escala explícito, este fator é usado para determinar o nível que cada modo particular é excitado pelo carregamento. Os métodos de solução podem ser classificados basicamente em métodos de transformação e ou métodos iterativos.

2.7. Procedimentos estatísticos

Devido à dificuldade em se controlar tudo o que é produzido, técnicas estatísticas são aplicadas em amostras que são coletadas durante a produção até para se conhecer o que é sistemático e o que é aleatório no processo.

Baseando-se nos enunciados de [36-40], através das coletas de dados é possível analisar e interpretar o comportamento e a tendência de certas variáveis ou características com a aplicação de ferramentas estatísticas aplicadas a melhoria da qualidade.

De acordo com [41], os experimentos planejados estatisticamente levam à geração de informações que possibilitam a modelagem de respostas, cuja análise pode elucidar diversos questionamentos, como o comportamento de um determinado material sob a influência da interação de dois ou mais fatores.

De acordo com [42], existe a necessidade de estudar o efeito desses fatores com diferentes níveis de regulagens.

Observa-se que o número de testes requeridos para a experimentação tende a crescer à medida que a quantidade de fatores aumenta. Isso torna os experimentos industriais inviáveis nas empresas, porque os custos e o tempo de execução são elevados.

De acordo com [36,43-46], os ensaios planejados estatisticamente levam à geração de informações que possibilitam a modelagem de respostas, cuja análise pode elucidar diversos questionamentos, como o comportamento de um determinado material sob a influência da interação de dois ou mais fatores. Esta análise pode ser feita na prática com uma variável de cada vez, ou com base mais racional usando técnicas de projeto de experimentos.

De acordo com [47-49], o significado do planejamento fatorial é que cada teste completo ou repetições de todas as combinações possíveis dos níveis dos fatores são investigados. Nesta etapa é quando se definem os fatores mais importantes e se estudam os efeitos observados sobre a variável resposta escolhida. Este procedimento pode ser ilustrado com dois fatores A e B . Para cada um destes fatores escolhidos, pode-se testá-los em níveis diferenciados, sendo a e b os respectivos níveis de A e B existem ab combinações de teste. Essa organização também representa o caso geral do fatorial com dois fatores.

Na tabela 1 a seguir, têm-se as interações de A nos respectivos níveis (1, 2, ..., a) e B (1, 2, ..., b). Para cada combinação dos fatores A e B em seus respectivos níveis, têm-se uma resposta Y , para qualquer resposta do tipo Y_{ijk} observada quando um dos fatores esta no i -ésimo nível ($i=1, 2, 3, \dots, a$). É importante frisar que o produto dos níveis $(ab)n$ deve ser feito de observações aleatórias para evitar qualquer tipo de tendência.

Segundo [50] e [51], com o experimento organizado dessa forma é possível verificar se a resposta é alterada significativamente quando o nível do fator A ou B são alterados. Se a resposta é alterada significativamente quando o nível de algum fator é mudado, implica em interação entre os fatores (linha x coluna). O modelo estatístico do planejamento fatorial é dado pela Eq. 2.

$$y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad (2)$$

onde, μ é a média dos resultados, τ_i é o efeito principal do fator A , β_j é o efeito principal do fator B , $(\tau\beta)_{ij}$ é o efeito da interação entre os fatores A e B e ε_{ijk} é o erro experimental.

De acordo com [42], Os efeitos correspondem à mudança da resposta média quando o nível de um fator é alterado de (-1) para (+1), mantendo os outros fatores constantes. O procedimento consiste em multiplicar os resultados da coluna y_i pelos valores (± 1) associados a coluna x_i da matriz experimental correspondente ao efeito principal que se deseja estimar.

Para determinar o efeito de interação, primeiro devem ser construídas as colunas das interações da matriz planejamento. Essas colunas são formadas por meio da multiplicação das colunas dos efeitos principais. Por exemplo, para estimar o efeito de interação E_{12} das colunas dos efeitos, serão multiplicadas

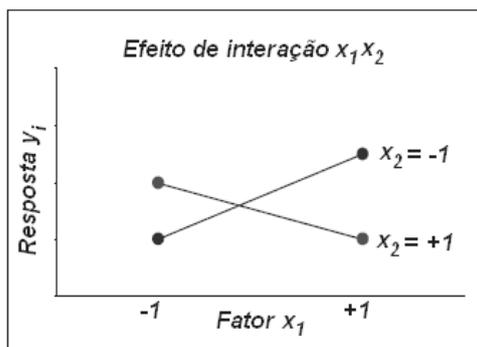
Tabela 1. Interação genérica entre dois fatores com n níveis.

	Níveis	Fator B			
		1	2	...	b
Fator A	1	$Y_{111}, Y_{112}, \dots, Y_{11n}$	$Y_{121}, Y_{122}, \dots, Y_{12n}$...	$Y_{1b1}, Y_{1b2}, \dots, Y_{1bn}$
	2	$Y_{211}, Y_{212}, \dots, Y_{21n}$	$Y_{221}, Y_{222}, \dots, Y_{22n}$...	$Y_{2b1}, Y_{2b2}, \dots, Y_{2bn}$
	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
	a	$Y_{a11}, Y_{a12}, \dots, Y_{a1n}$	$Y_{a21}, Y_{a22}, \dots, Y_{a2n}$...	$Y_{ab1}, Y_{ab2}, \dots, Y_{abn}$

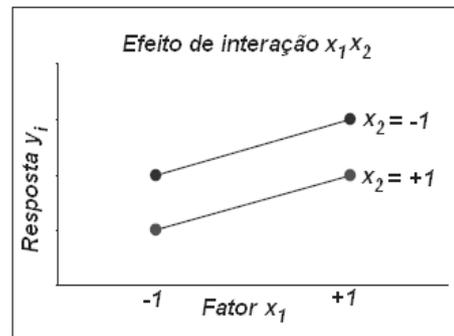
Fonte: Montgomery, 1991

Tabela 2. Efeitos das interações dos fatores A e B.

AB		Fator B		Interações			
		+1	-1	E_{11}	E_{12}	E_{21}	E_{22}
Fator A	+1	+1	-1	$A_1 \cdot B_1 = +1$	$A_1 \cdot B_2 = -1$	$A_2 \cdot B_1 = -1$	$A_2 \cdot B_2 = +1$
	-1	-1	+1				



(a) Fatores com interação



(b) Fatores sem interação

Fig. 10 - Gráficos de interação dos efeitos [42].

as colunas dos fatores x_1 e x_2 , em seguida os valores ± 1 associados à coluna x_1x_2 da matriz experimental são utilizados para estimar o efeito de interação. Isso pode ser exemplificado na tabela 2.

No entanto, na maioria das vezes necessita-se utilizar gráficos lineares que representam os efeitos principais e de interação.

Baseando-se em [52,53], os gráficos dos efeitos de interação descrevem a variação de um fator em função dos níveis de outros fatores. Por exemplo, a Fig. 10(a) ilustra que o efeito provocado pela mudança de nível do fator x_1 na resposta depende do nível do fator x_2 , portanto, existe interação entre os fatores x_1 e x_2 . A Fig. 10(b) demonstra que o efeito provocado pela mudança do nível do fator x_1 na resposta é independente do nível do fator x_2 , portanto não existe interação entre os fatores.

3. PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Os experimentos para este trabalho foram realizados em um eixo de manivelas (virabrequim) que é um dos principais componentes de um motor de combustão interna. Esta peça possui mancais que são classificados como fixos e móveis. A Fig. 11 apresenta o aspecto do eixo de manivela acabado.

As etapas de fabricação do componente são as seguintes: torneamento, têmpera por indução, retificação e lixamento. O eixo acabado deste estudo possui massa de aproximadamente 9,8 kg e um comprimento de $392,3 \pm 0,05$ mm. O limite de resistência à tração do material utilizado é de 70,0 MPa, com o limite de escoamento é 45 MPa, percentual de alongamento é de 2% e dureza de 265 ± 35 HV. Após o processo de usinagem, a peça precisa passar por um segundo processo que é o de têmpera superficial, conferindo-lhe

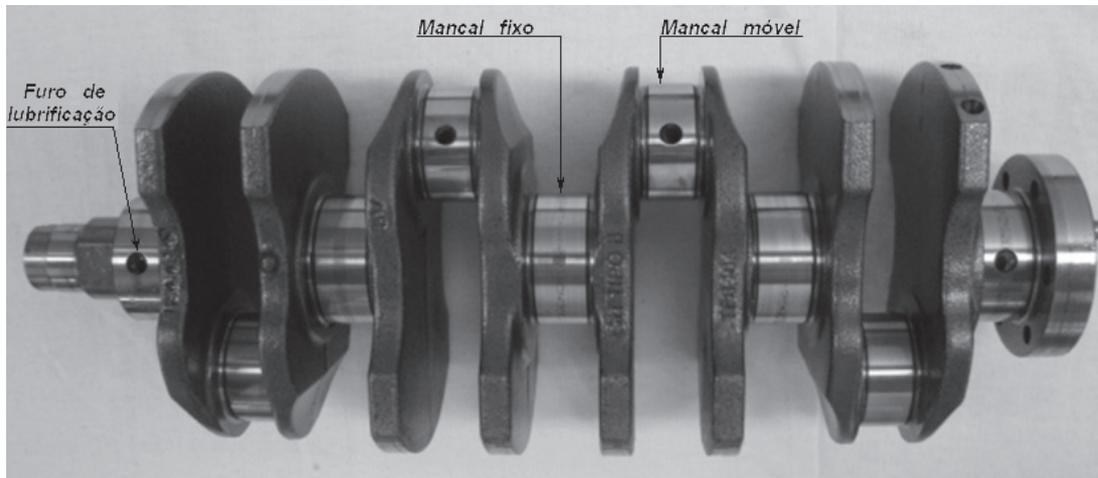


Fig. 11. Eixo de manivelas (virabrequim).

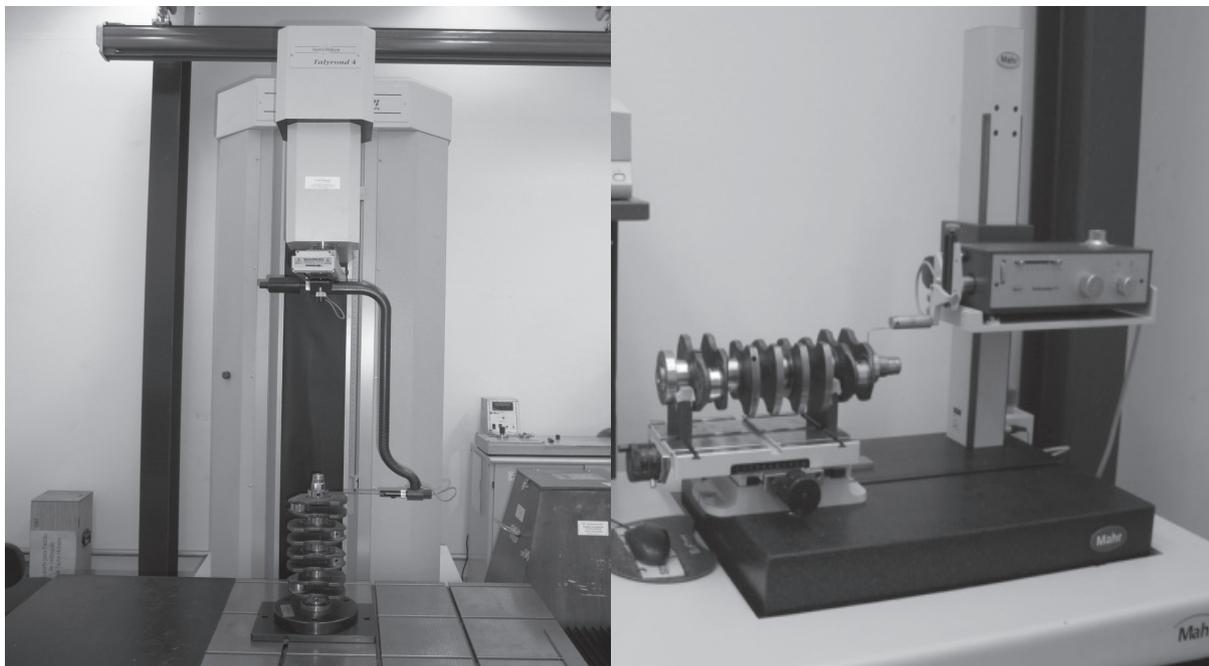
(a) Medidor de forma *Talyrond 4*(b) Rugosímetro *Mahr Perthen PRK*

Fig. 12. Instrumentação utilizada para avaliação dimensional.

maior dureza superficial e resistência mecânica, a camada termicamente alterada é de aproximadamente 5 mm e a dureza mínima especificada após esta operação é de 660 HV. Este componente é de um motor bi-combustível de 1365 cilindridadas que comercialmente é conhecido por 1.4 flex.

Os equipamentos que foram utilizados para as medições de rugosidade e desvio de forma são um medidor de forma *Talyrond 4* e um rugosímetro *Mahr Perthen PRK*. Estes equipamentos se encontram em perfeitas condições de uso e manuseio, pois estão dentro do período de calibração.

O laboratório onde serão levantadas as medições pertence à *FPT Technologies* que é uma empresa do setor automotivo, e devido às exigências do mercado por qualidade, confiabilidade e rastreabilidade das medições, se encontra em rigorosas condições de temperatura, umidade. Também serão utilizados acelerômetros tri-axiais e microfones fabricados pela empresa *Brüel&Kjaer* para verificar o nível de vibração e ruído após as alterações dos parâmetros de usinagem.

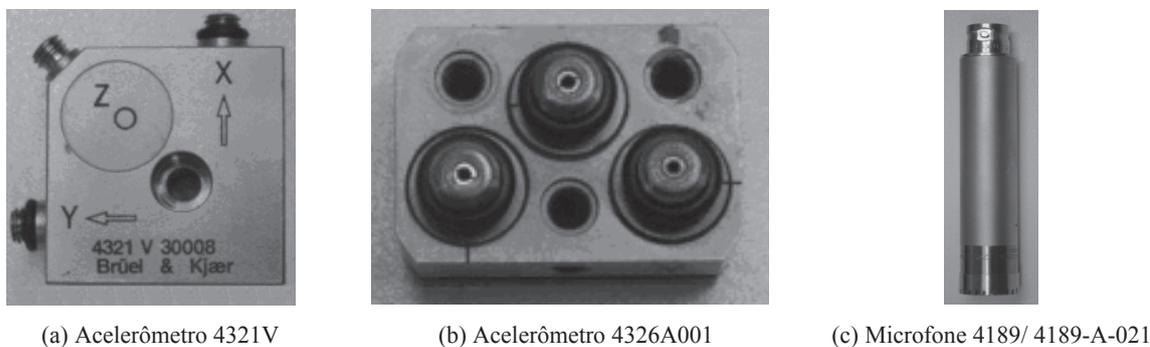


Fig. 13. Instrumentação utilizada na avaliação dinâmica.

Tabela 3. Combinações entre os fatores e seus níveis.

<i>Ensaio</i>	<i>Fatores</i>		<i>Interação</i>	<i>Resposta</i>	
	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>AB</i>	<i>Y1</i>	<i>Y2</i>
1000	-	-	+	⋮	⋮
2000	+	-	-		
3000	-	+	-		
4000	+	+	+	<i>Y1n</i>	<i>Y2n</i>

A Fig. 12 apresenta a instrumentação utilizada na avaliação dimensional. O medidor de forma possui incerteza de medição com 95% de confiabilidade de $\pm 0,3 \mu\text{m}$ para circularidade e cilindricidade. A medição da rugosidade é realizada perpendicularmente em relação aos sulcos de usinagem, o equipamento tem uma resolução de $0,01 \mu\text{m}$ e possui incerteza de medição com 95% de confiabilidade de $\pm 0,03 \mu\text{m}$ para a rugosidade média (R_a).

A Fig. 13 apresenta a instrumentação utilizada na avaliação dinâmica deste experimento. Os acelerômetros operam nas seguintes faixas de trabalho:

- acelerômetro triaxial B&K 4326 no mancal fixo central - 1 Hz a 8 KHz;
- acelerômetro triaxial B&K 4321 no bloco - 0.1 Hz a 10 KHz.

Os microfones que foram utilizados abrangem as respectivas faixas de trabalho que vão de 6,3 Hz a 20KHz. O ruído de fundo no local onde os experimentos serão executados é de 0,02 dB e tem a capacidade de amortecer até 99,99% do ruído externo, ou seja, para 100 dB externo 0,01dB chegam dentro da sala de experimentação.

O ruído foi mensurado por três microfones, um dentro do habitáculo do veículo e os outros externos há uma distância de um metro, o resultado é a média das três coletas. Os microfones utilizados são os seguintes:

- microfone campo livre pré-polarizado 1/2" modelo 4189. A sensibilidade do circuito aberto (S_o) é de (-26,3) dB re 1V/Pa, com equivalência a 48,3mV/Pa e a capacitância 14,5pF.
- microfone tipo 4189-A-021 com sensibilidade combinada (-26,5)dB re mV/Pa, com equivalência de 47,2 mV/Pa.

A incerteza a 95% é de $\pm 0,2$ dB para ambos os dois microfones utilizados, pois, visualmente são idênticos, apenas suas especificações técnicas se diferem.

3.1. Planejamento fatorial do experimento

O planejamento fatorial que será empregado na verificação da interação dos parâmetros é do tipo 2^k , onde cada variável será combinada em dois níveis (máximo e mínimo) e o expoente será igual a dois, ou seja, haverá quatro combinações entre as variáveis escolhidas para cada peça. As variáveis de entrada serão os parâmetros R_a (A) e circularidade (B) combinados em dois níveis cada um (menor e maior valor encontrado nas medições dos mancais fixos). A tabela 3 apresenta as rotações utilizadas na experimentação das peças ensaiadas.

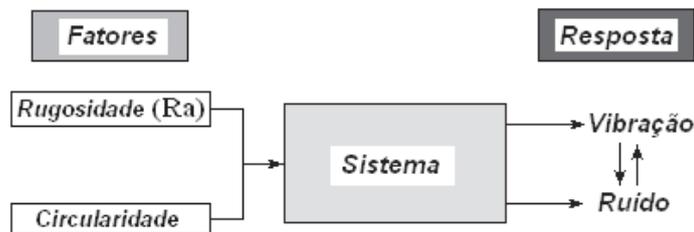


Fig. 14. Representação do sistema com dois fatores.

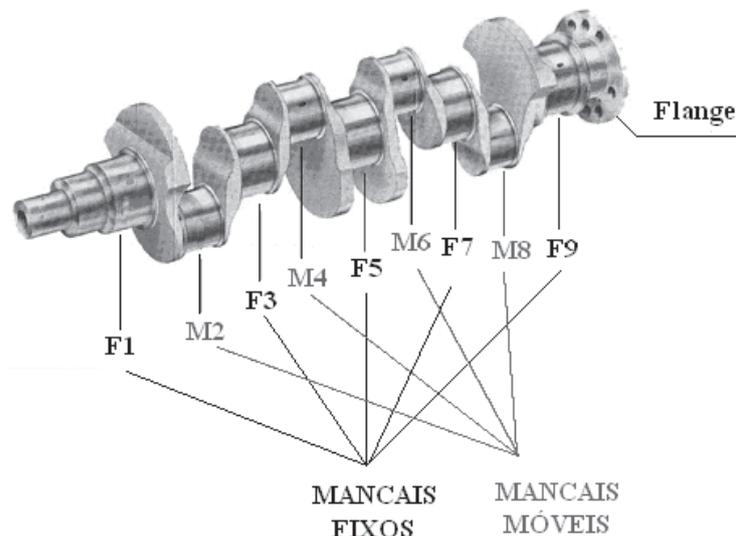


Fig. 15. Sentido de medição nos mancais do eixo de manivelas.

A Fig. 14 representa esquematicamente os dois fatores (rugosidade e circularidade) e as respostas que serão relacionadas (vibração e ruído).

A velocidade de avanço de corte foi variada em $\pm 30\%$ em relação à velocidade normalizada pelo processo de produção diário e em seguida duas peças foram manufaturadas. O parâmetro de rugosidade R_a foi mensurado a 0° e 180° graus, onde foi extraído um valor médio entre estes dois pontos de medição. A característica de circularidade foi analisada em torno do diâmetro (360°) sendo dispensável mais de uma medição.

Para todas as medições de rugosidade e forma será aplicada a filtragem gaussiana. Na Fig. 15 têm-se esquematicamente representado como o eixo de manivelas foi mensurado. Os mancais são classificados como fixos (F) e móveis (M) e numerados de acordo com a ordem que a medição foi executada.

Os mancais de interesse para este estudo são os fixos, pois, estes trabalham apoiados, e qualquer tipo de variação na forma ideal do diâmetro ou na rugosidade da superfície irá gerar instabilidades no funcionamento do componente, e elas tendem a se propagar para o conjunto onde ele é acoplado.

A vibração foi analisada no eixo vertical (sentido de movimento dos pistões), no eixo transversal (sentido longitudinal ao virabrequim) e no eixo longitudinal (sentido transversal ao virabrequim). Os sinais dos acelerômetros serão coletados por um período de 30 s em cada faixa de rotação, considerando-se uma janela de 10 s para estabilização da faixa de rotação. O ruído foi analisado em três pontos um metro do motor sendo dois externos e um dentro do habitáculo do veículo de acordo com norma interna do fabricante.

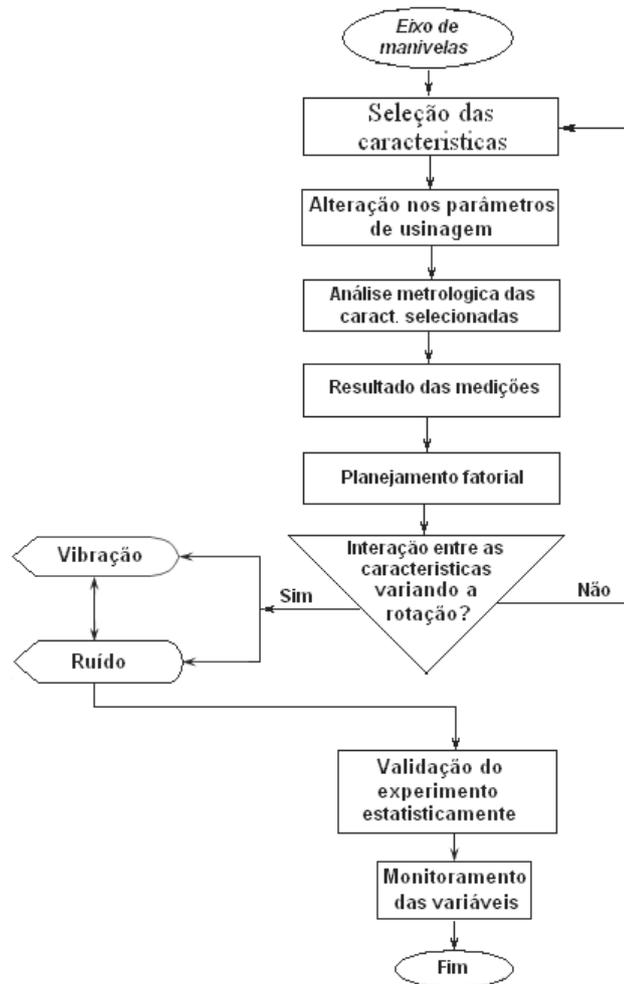


Fig. 16. Etapas de desenvolvimento do experimento.

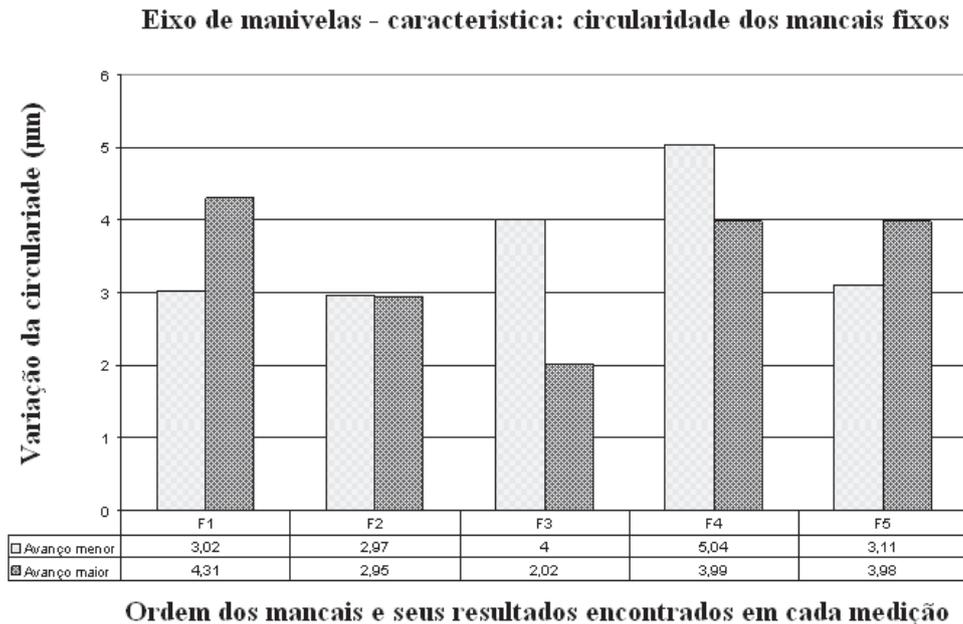
3.2. Obtenção da relação entre resposta e fatores significativos

Partindo-se dos resultados encontrados nas medições das características, foi aplicado um arranjo linear (modelamento), onde foram encontrados os coeficientes usados para relacionar as respostas relativas às variáveis de entrada. Conhecendo os coeficientes dos arranjos entre os fatores foram verificados quais fatores e em quais níveis apresentam maior interação com o menor resíduo possível.

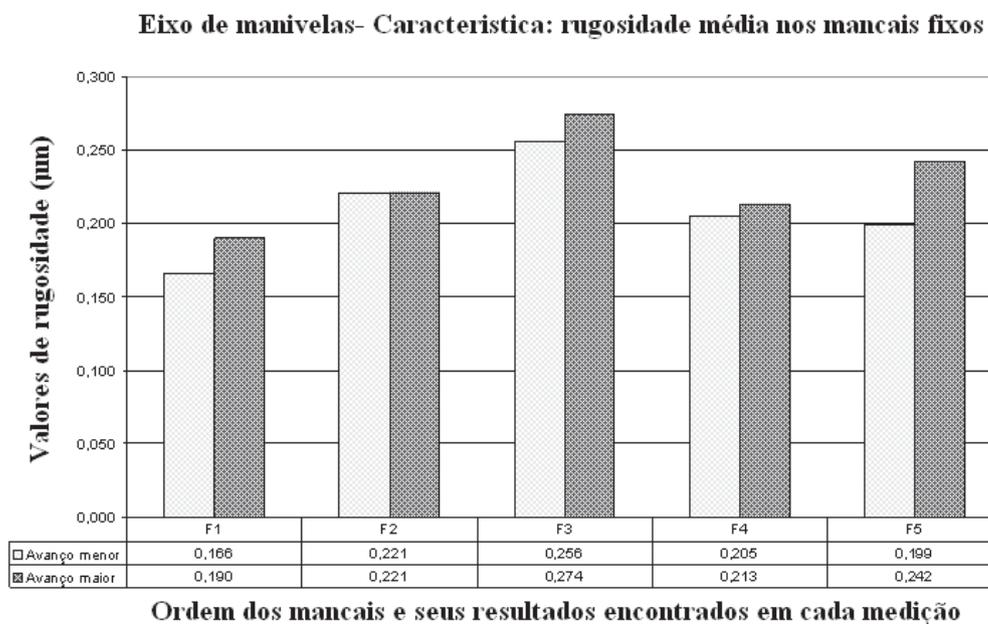
Foi aplicado um teste de hipótese para aceitação ou não dos resultados comparados e uma ANOVA com 95% de confiabilidade entre os resultados encontrados. As etapas do desenvolvimento deste trabalho seguiram esquematicamente o fluxograma da Fig. 16.

4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Os valores referentes à característica de circularidade que foi mensurada em cada mancal fixo os valores referentes à característica de R_a são as médias das posições das medições 0° e 180° graus. Todos os resultados são dados em micrometro (μm). O primeiro corpo de prova (01) foi produzido com a velocidade de avanço de corte 30% menor e o corpo de prova dois (02) com a velocidade de avanço de corte 30% maior em relação à velocidade normalizada para a produção diária. Os resultados das medições de forma e rugosidade para os corpos de prova utilizados são apresentados nos gráficos da Fig. 17.



(a) Resultados dos valores de forma



(b) Resultados médios dos valores de rugosidade

Fig. 17. Resultados de medição para as características de circularidade e Rugosidade (R_a) em função do avanço de $\pm 30\%$ no avanço de corte.

4.1. Arranjos fatoriais entre as variáveis

Foram feitos quatro ensaios (corridas) com cada componente, sendo cada faixa de rotação uma medição independente. Este arranjo foi aplicado para as duas peças utilizadas na experiência. Foram utilizadas para os ensaios as velocidades de rotação 1000, 2000, 3000 e 4000 rpm.

Tabela 4. Resultado do ruído gerado - Nível de Pressão Sonora (NPS).

Ensaio	A	B	Respostas (ruído)		Diferença R_1-R_2	$D^2/2$	Média	
			R_1	R_2				
Rotações rpm	1000	-	-	53	52,2	0,8	0,32	52,6
	2000	+	-	61	60,2	0,8	0,32	60,6
	3000	-	+	66,4	67	0,6	0,18	66,7
	4000	+	+	72,6	74,3	1,7	1,45	73,5
Soma				253	253,7	3,9	2,27	253,4

As variáveis circularidade e rugosidade foram analisadas simultaneamente no nível inferior, superior com inferior, inferior com superior e ambas no nível superior. Com este arranjo o experimento foi delineado.

Os resultados apresentados na tabela 4 são referentes às respostas da pressão acústica (ruído) produzida, considerando-se os valores máximos mensurados (os picos na coleta dos dados) para as duas peças. A circularidade é representada pela letra (A) e a rugosidade por (B). Nesta tabela são apresentadas as diferenças entre a resposta do corpo de prova 01 (R_1) e 02 (R_2), além do quadrado da diferença dividido por dois, valor o qual seu somatório foi utilizado para estimar a variância entre os resultados, além da média entre as medições e sua soma total.

Como os valores encontrados estão muito próximos entre as experimentações, a modelagem para as duas peças também seria muito próxima. Assim, foi utilizado o valor médio entre os resultados dos corpos de prova 01 e 02 para representar o comportamento das interações das variáveis. O efeito é calculado subtraindo-se a resposta média no nível superior da resposta média no nível inferior dessa variável. O efeito da circularidade foi encontrado utilizado à relação dada pela Eq. 3.

$$Efeito_A = \frac{1}{2} [(A_+) - (A_-)] = 7,4 \text{ NPS} \quad (3)$$

O efeito da rugosidade foi encontrado utilizando à relação dada pela Eq. 4.

$$Efeito_B = \frac{1}{2} [(B_+) - (B_-)] = 13,5 \text{ NPS} \quad (4)$$

O efeito da interação entre circularidade e rugosidade foi encontrado utilizando à relação dada pela Eq. 5.

$$Efeito_{AB} = \frac{1}{2} [(AB_+) - (AB_-)] = -0,6 \text{ NPS} \quad (5)$$

Com base no conhecimento dos efeitos das variáveis de controle pode-se descrever a equação que relaciona a variável de resposta ruído com os fatores significativos. A equação é dada pela média das respostas mais os coeficientes que são dados pelos efeitos encontrados para cada fator e por suas interações. Assim, têm-se a relação dada pela Eq. 6. Esta equação apresenta todos os coeficientes para os fatores em dois níveis.

$$Y_n = 63,35 + 7,4A + 13,5B - 0,6AB \quad (6)$$

Na Fig. 18 pode ser visto graficamente a interação entre os efeitos médios para os dois experimentos. Como as linhas dos efeitos se cortam, é confirmada a interação entre as variáveis, o que vai de encontro com as conclusões de [52, 53] e [51].

Nos planejamentos de experimentos utiliza-se o desvio padrão (estimado ou calculado) dividido pela raiz quadrada dos níveis dos experimentos elevados a $(k-1)$ fatores para se estimar o erro padrão dos efeitos, como na Eq. 7.

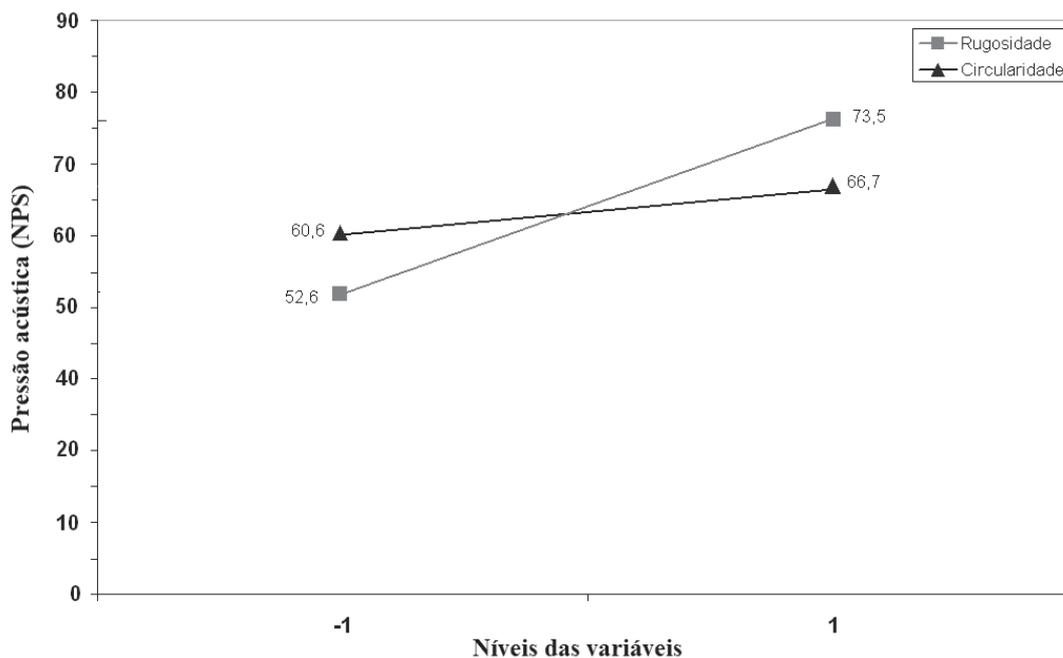


Fig. 18. Interações entre os efeitos da circularidade e rugosidade.

Tabela 5. Levantamento dos resíduos entre os experimentos – Valores das respostas em nível de potência sonora (NPS).

Ensaio	A	B	Respostas (Y_i) (ruído)		Ruído médio (\bar{Y})	$R_1 = Y_1 - \bar{Y}$	$R_2 = Y_2 - \bar{Y}$	
			Peça 01	Peça 02				
Rotação s rpm	1000	-	-	53	52,2	52,6	0,4	-0,4
	2000	+	-	61	60,2	60,6	0,4	-0,4
	3000	-	+	66,4	67	66,7	-0,3	0,3
	4000	+	+	72,6	74,3	73,5	-0,9	0,8

$$E_{ef} = \frac{S}{\sqrt{2^{k-1}}} = \frac{0,754}{1,414} = 0,53 \rightarrow E_{ef} = \pm 0,53 \text{ NPS} \quad (7)$$

Os erros para as respostas referentes ao ruído gerado pelos corpos de prova 01 e 02 são mostrados na tabela 5.

Na Fig. 19 os resíduos referentes aos valores encontrados nas experimentações dos corpos de prova 01 e 02 estão distribuídos aleatoriamente em torno da média zero. Pode ser verificado que eles se distribuem normalmente em torno de uma média zero ($\bar{x} = 0$) e variância (S^2).

A Fig. 20 apresenta a distribuição dos resíduos para uma distribuição normal padronizada Z entre os resultados das medições da peça 01 e 02.

Como visto no gráfico da Fig. 20 pode-se concluir que 84,23% das variações no corpo de prova 01 e 88,02% no corpo de prova 02 para as respostas Y , são explicadas pelas variações de X . Ou seja, quanto mais próximo de um menor a quantidade de resíduos.

4.2. Análise da variância (ANOVA)

Neste experimento, houve a necessidade de se verificar se existe diferença considerável entre as respostas dos experimentos, que equivale testar as hipóteses de que as médias dos dois experimentos são

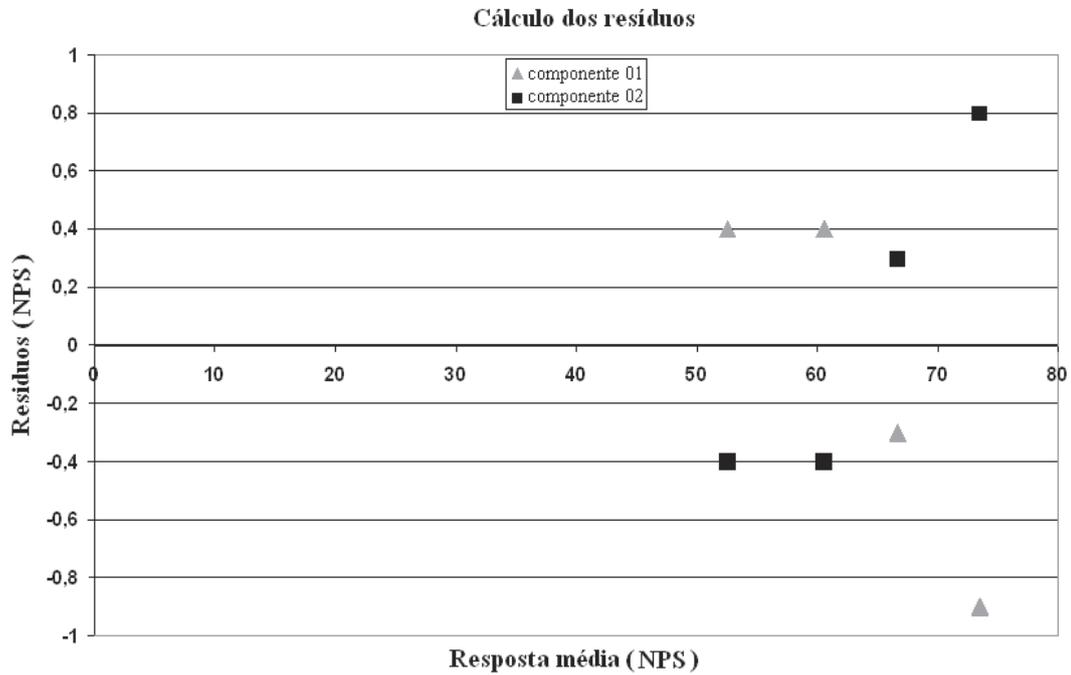


Fig. 19. Distribuição aleatória dos resíduos.

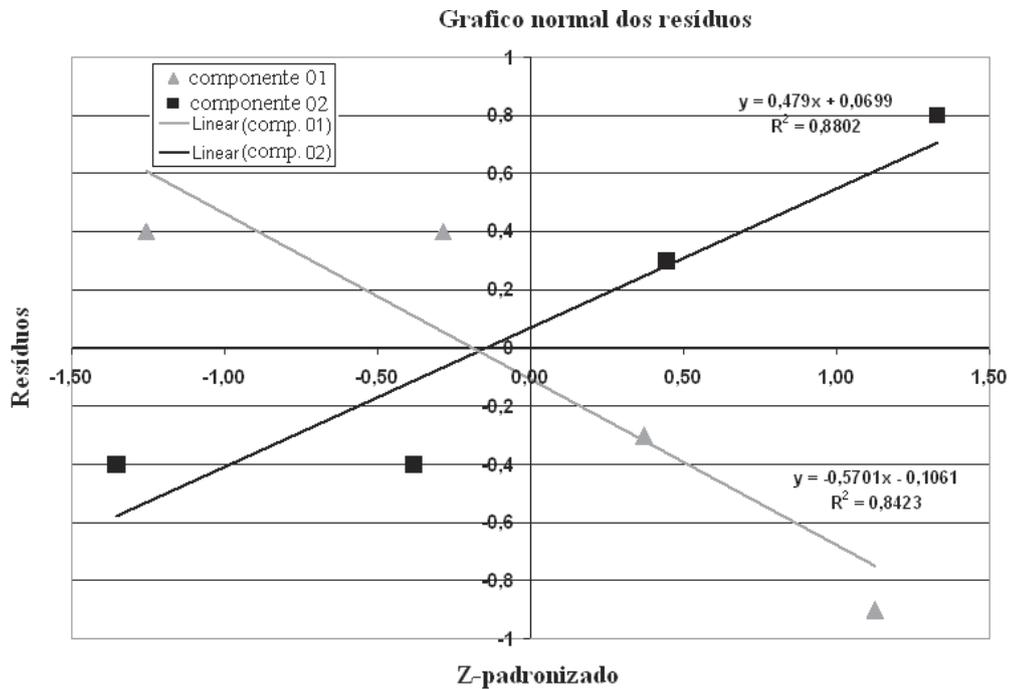


Fig. 20. Gráfico normal para os resíduos nos resultados dos ensaios para as duas peças.

iguais (H_0) e que as médias dos dois experimentos não são iguais (H_1). Matematicamente, o teste pode ser proposto do seguinte modo:

$$\begin{cases} H_0 : Y_1 = Y_2 \\ H_1 : Y_1 \neq Y_2 \end{cases} \quad (8)$$

Tabela 6. ANOVA do experimento – Comparação entre as médias das medições de ruído.

<i>Variação</i>	<i>GL</i>	<i>Soma Quadrados</i>	<i>Quadrados médios</i>	<i>F₀ calc.</i>	<i>F_{tab} a 5%</i>
Tratamentos	$(i - 1) = 4 - 1 = 3$	472,71	157,57	278,27	6,59
Resíduos	$i(j - 1) = 4(2 - 1) = 4$	2,265	0,566		
Total	$((i \cdot j) - 1) = (4 \cdot 2) - 1 = 7$	474,979	-----		

Se a hipótese nula for verdadeira, todos os tratamentos terão uma resposta comum Y . A mesma condição vale para a média \bar{x} das respostas. Os graus de liberdade utilizados são definidos pelos termos i e j . O i -ésimo termo é referente ao número de experimentos que são no total de 04 e representa às linhas da matriz de experimentos, o j -ésimo é referente à quantidade de vezes que o experimento foi repetido, neste caso foram 02 vezes.

Na Tabela 6 são destacados os resultados encontrados. O valor encontrado foi comparado dentro de uma significância de 5% de margem de erro, onde os resultados apresentam 95% de confiabilidade baseados no teste F de Sneydecor.

De acordo com o teste F , foram encontradas evidências de diferenças significativas, ao nível de 5% de probabilidade, entre os tratamentos, com relação ao ruído. Rejeita-se, portanto, a hipótese de nulidade H_0 . As respostas médias não são estatisticamente iguais.

4.3. Análise dos modos de vibração

A vibração mais relevante para o estudo é a do eixo vertical (Z), pois, ela contempla o sentido de movimentação do pistão. Os parâmetros utilizados para gerar a FFT foram os seguintes:

- Janela - *hanning*;
- Número de médias - 21;
- Tipo de média - *energy average*;
- Escala do *spectrum* - RMS;
- Formato do *spectrum* - linear;
- Resolução em frequência - 1,5625 Hz

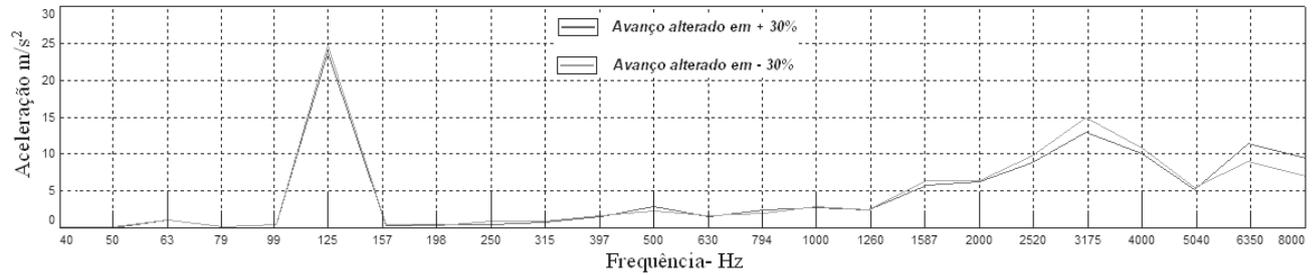
O sinal coletado apresenta uma configuração robusta, pois foi utilizada uma análise de primeira ordem com um terço de oitava. Foi verificado que as condições do sinal não eram suficientes para interpretar se as alterações em função das alterações de $\pm 30\%$ no avanço de corte alteraram o comportamento vibracional dos corpos de prova ensaiados. A Fig. 21 mostra a configuração do sinal e do espectro de frequência obtido para a faixa de 4000 rpm.

Devido aos dados coletados e sua respectiva configuração, não se pode inferir se as mudanças inseridas no processo de fabricação causaram mudanças significativas no comportamento dinâmico da peça, principalmente no que tange seu funcionamento e seus modos de vibração. As peças apresentaram praticamente as mesmas respostas

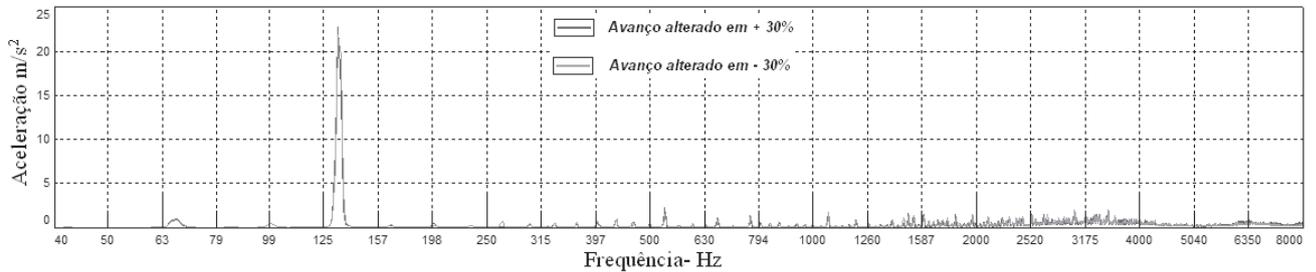
5. DISCUSSÕES SOBRE OS RESULTADOS

Quanto às interações entre as variáveis circularidade e rugosidade média, verificou-se por meio dos efeitos médios que há influência entre as variáveis e a resposta ruído em função das faixas de rotação em que as peças foram experimentadas. Com base nos resultados experimentais, verificou-se que existe interação entre as condições de acabamento superficial e a circularidade devido à amplitude dos efeitos médios que foram encontrados.

Estas interações apresentam erro padrão de pequena amplitude ($\pm 0,53NPS$) em relação ao valor médio total (63,5NPS) que equivale a menos de 1%, ou seja, 0,8%.



(a) Eixo vertical



(b) Espectro de frequência

Fig. 21. Vibração mancal fixo – 4000 rpm (1/3 oitava).

Fonte: FPT Technologies, 2010

A análise de variância utilizada para verificar se os resultados dos experimentos eram estatisticamente iguais comprovou que não eram. Deste modo, a hipótese de igualdade com um grau de confiabilidade escolhido de 95% foi refutada. Isso pode ser verificado pelos resultados calculados na Tab. 6, pois comparando o resultado encontrado (278,27) com o tabelado (6,59) verifica-se uma diferença considerável.

Como mostrado nos gráficos da Fig. 21, para a análise do espectro de frequência, a resolução não foi suficiente para se concluir se realmente há ou não interação relevante, pois o ruído se confundia com as frequências de vibração que poderiam estar presentes na análise. Devido a esta condição imposta pelo espectro de frequência coletado no sinal, não se pode concluir se existe interação relevante ou não.

A análise modal não pode ser contemplada, devido à configuração do sinal do espectro de frequência apresentar uma resolução inadequada tanto em frequência, quanto em amplitude. Este problema pode ser devido a um erro de ajuste do sistema de aquisição de dados que engloba os acelerômetros, placa de aquisição de dados e processador que não foram configurados para uma resolução mínima em comum.

As condições em que os dados foram coletados não foram às ideais, a resolução do espectro coletado nas experimentações não permitiu verificar se dentro das rotações experimentadas, se as alterações inseridas na usinagem dos corpos de prova seriam suficientes para que se aproximassem de um dos modos de vibração ou de harmônicos dele. No sinal coletado é impossível separar a vibração do ruído.

Embora o número de corpos de prova seja pequeno pelas condições impostas durante o período de experimentações em laboratório. Essas conclusões podem ser conjecturadas com base no comportamento individual das superfícies em contato e dos erros de forma, ambas as características provocam comportamentos que são descritos em trabalhos acadêmicos já publicados e citados no referencial teórico.

Ainda, quanto à qualidade dos dados coletados para a variável resposta ruído, estes apresentaram melhor configuração, devido à resolução da amplitude e da frequência apresentarem condições de analisar os resultados encontrados.

6. CONCLUSÕES

Pode ser concluído para este trabalho que:

- As variáveis circularidade e textura superficial (R_a) quando associadas, realmente influenciam o comportamento dinâmico no que se refere à geração de ruído;
- As condições de rugosidade nas superfícies de contato poder aumentar o atrito entre as superfícies e com isso, a energia liberada durante o movimento é transformada em calor e ruído.
- Erros de circularidade podem provocar vibrações em componentes que trabalham em rotação devido ao desbalanceamento, provocando instabilidades dinâmicas.
- A utilização da ferramenta fatorial para delineamento de experimentos se mostrou muito eficaz para verificar os efeitos das interações entre as variáveis em estudo, e também para limitar o número de ensaios, que em certas situações são de elevado custo;

REFERÊNCIAS

- [1] Matos, C.S.S. de, Rocha, R. de O., Matos, W.S. de, Zindeluk, M., “Estudo de efeitos dinâmicos induzidos por folga em mancais de rolamento em um rotor vertical”, *12º Congresso de Manutenção - ABRAMAN* (1996)
- [2] Wilkinson, P., Reuben, R.L., Jones, J.D.C., Barton, J.S., Hand, D.P., Carolan, T.A., Kidd, S.R., “Surface finish parameters as diagnostics of tool wear in face milling”, *Wear*, **205**, 47-54 (1997)
- [3] Xiao, L., Rosen, B. G., Amini, N., Nilsson, P.H., “A study on the effect of surface topography on rough friction in roller contact”, *Wear*, **254**, 1162-1169 (2003)
- [4] Ludema, K.C., *Friction, wear, lubrication: A textbook in Tribology*, CRC Press, Boca Raton, Florida (1996)
- [5] Ferrante, J., Abel, P.B., *Handbook of micro/ nanotribology- Mechanics and Material Science*, Chapter 3, CRC Press, Boca Raton, Florida (1999)
- [6] Stolarsky, T.A., “Tribology in machine design”, Butterworth-Heinemann. A Division of Reed Education and Professional Publishing Ltd (2000)
- [7] Santner, E., Klaffke, D., Meine, K., Polaczyk, C.H., Spaltmann, D., “Effects of friction on topography and vice versa”, *Wear*, **261**, 101-106 (2006)
- [8] Bhushan, B., Gupta, B.K., *Handbook of hard coatings - Deposition Technologies, Properties and Applications*, Chapter 6, NOYES PUBLICATIONS, Park Ridge, New Jersey - USA (2001)
- [9] Torrance, A.A., “The influence of surface deformation on mechanical wear”, *Wear*, **200**, 45-54 (1996)
- [10] Liang, H., Craven, D., *Tribology in chemical-mechanical planarization*, Chapter 2, Taylor and Francis Group, Boca Raton (2005)
- [12] Hsu, S.M., Klaus, E.E., Cheng, H.S., “A mechano-chemical descriptive model for wear under mixed lubrication conditions”, *Wear*, **128**, 307-323 (1988)
- [13] Quinn, T.F.J., Sullivan, J.I., Rowson, D.M., “Origins and development of oxidational wear at low ambient temperatures”, *Wear*, **94**, 175-191 (1984)
- [14] Oliveira, C.J., Palma, E.S., Sales, W.F., “Evaluation of the ISO 2CR and gaussian filters systems applied on surface texture measurements”, SAE (Sociedade Americana de Engenheiros) (2006)
- [15] Oliveira, C.J., “Avaliação da influência de sistemas de filtragem aplicados à topografia de superfície em usinagem”. Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte (2004)
- [16] Zahavi, E., Torbilo, V., Press, S., *Fatigue design - Life expectancy of machine parts*, CRC Press, Boca Raton, Florida (1996)
- [17] Whitehouse, D.J., *Handbook of surface metrology*, Leicester - England (1994)
- [18] Thomas, T.R., *Rough surface*, Longmans Green, London (1982)
- [19] Whitehouse, D.J., Archard, J.F., “The properties of random surfaces of significance in their contact”, *Proc. R. Soc. London, Serie A* **316**, 97-121 (1970)
- [20] ISO 4288 “Regras e procedimentos para avaliar a textura da superfície” (1996)

- [21] Whitehouse, D.J., *Handbook of surface and nanometrology*, IOP Publishing Ltd (2003)
- [22] Oliveira, C.J., Palma, E.S., Sales, W.F., “Avaliação dos aspectos de filtragem em textura superficial e desvios de forma geométrica na análise de resultados”, *Revista Máquinas e Metais*, 148-175, Agosto (2007)
- [23] Oliveira, C.J., “Interação dinâmica entre irregularidades dimensionais em componentes mecânicos que trabalham em movimento de rotação”. Tese de Doutorado, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte (2010)
- [24] Taylor Hobson Precision, *Guide to surface texture parameters* (2000)
- [25] Novovic, D., Dewes, R.C., Aspinwall, D.K., Voice, W., Bowen, P., “The effect of machined topography and integrity on fatigue life”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **44**, 125-134 (2004)
- [26] Silva, M. de C., “Vida em fadiga da liga de alumínio AA 7175-T1”, Projeto de iniciação científica, Universidade Federal de Itajubá (2001)
- [27] Arola, D., Williams, C.L., “Estimating the fatigue stress concentration factor of machined surfaces”. *International Journal of Fatigue*, **24**, 923-930 (2002)
- [28] Atzori, B., Meneghetti, G., Susmel, L., “Material fatigue properties for assessing mechanical components weakened by notches and defects”, Blackwell publishing Ltd, *Fatigue Fracture Engineering Master Structure*, **28**, 83-97 (2005)
- [29] Williams, J.A., Dwyer-Joyce, R.S., *Modern Tribology handbook - Contact Between Solid Surfaces*, Chapter 3 Boca Raton, CRC Press LLC (2001)
- [30] Rezende, C.R., “Correlação entre modelagem numérica e resultados experimentais na análise de estabilidade dinâmica do torneamento de aços”, Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte (2006)
- [31] Zhao, Y., Chen S., Chai, S., Qu, Q., “An improved modal truncation method for responses to harmonic excitation”, *Computers and Structures*, **80**, 99-103 (2002)
- [32] Ewins, D.J., *Modal testing: theory and practice*, Imperial College of Science, Technology and Medicine, London - England (1984)
- [33] Saturnino, L.J.M., “Desenvolvimento de ferramentas para definição, análise e avaliação de desempenho de veículos automotivos”, Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte (2004)
- [34] Bathe, K., *Finite element procedures*, Prentice Hall, Nova Jersey (1996)
- [35] Bathe, K., *Finite element procedures in engineering analysis*, Prentice-Hall, Massachusetts Institute of Technology - USA (1982)
- [36] Dal Molin, D.C.C., Kulakowski, M.P., Ribeiro, J.L.D., “Contribuições ao planejamento de experimentos em projetos de pesquisa de engenharia civil”, *Ambiente Construído*, Porto Alegre, 37-49 (2005)
- [37] Coleman, D.E., Montgomery, D.C., “A systematic approach to planning for a designed industrial experiment”, *Techometrics*, **35**, 1-12 (1993)
- [38] Myers, R.H., Montgomery, D.C., *Response surface methodology - Process and product optimization using designed experiments*, John Wiley & sons Inc, Canada (1995)
- [39] Steinberg, M.D., Hunter, W.G., “Experimental design: review and comment”, *Technometrics*, **26**(2), 71-130 (1984)
- [40] Chew, V., *Experimental designs in industry*, John Wiley and Sons Inc, New York (1957)
- [41] Flesch, G., “Aplicação de projeto de experimentos como suporte no projeto e melhoria de produtos no setor de autopeças”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (2002)
- [42] Galdámez, E.V.C., “Aplicação das técnicas de planejamento e análise de experimentos na melhoria da qualidade de um processo de fabricação de produtos plásticos”, Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo (2002)
- [43] Aranda, M.H., Jung, C.F., Caten, C.S.T., “Aplicação do projeto de experimentos para otimização de uma inovação tecnológica”, *Universidade Tecnológica Federal do Paraná*, **4**(2), 116-132 (2008)
- [44] Silva, N.P., Saramago, S.F.P., “Uma introdução ao estudo de superfícies de resposta”, *Revista Eletrônica Horizonte Científico*, Universidade Federal de Uberlândia (2005)
- [45] Arbizu, I.P., Pérez, C.J.L., “Surface roughness prediction by factorial design of experiments in turning processes”, *Journal Materials Processing and Technology*, 390-396 (2003)

- [46] Axinte, D.A., Belluco, W., de Chiffre, L., “Reliable tool life measurements in turning - an application to cutting fluid efficiency evaluation”. *Journal machine tools and manufacture*, **41**, 1003-1014 (2001)
- [47] Dabnun, M.A., Hashmi, M.S.J., El-Baradie, M.A., “Surface roughness prediction model by design of experiments for turning machinable glass–ceramic (Macor)”, *Journal materials, Processing and Technology* (2005)
- [48] Button, S.T., “Metodologia para planejamento experimental e análise de resultado”, Universidade Estadual Paulista de Campinas, São Paulo (2001)
- [49] Vieira, S., *Estatística experimental*, Atlas, São Paulo (1999)
- [50] Devor, R.E., Chang, T., Sutherland, J.W., *Statistical quality design and control – Contemporary concepts and methods*, Prentice Hall, New Jersey, 503-744 (1992)
- [51] Montgomery, D.C., “Diseño y análisis de experimentos”, Iberoamericana, Tradução: Jaime Delgado Saldivar. Mexico (1991)
- [52] Galdamez, E.V.C., Carpinetti, L.C.R., “Aplicação das técnicas de planejamento e análise de experimentos no processo de injeção plástica”, *Gestão e produção* (2004)
- [53] Azeredo, M.B. de V., e Silva, S.S. da, “Análise da influência das variáveis do processo de injeção de plásticos na temperatura do material fundido utilizando planejamento de experimentos”, Encontro Nacional de engenharia de Produção - ENEGEP (2001)

ANALYSIS DYNAMIC THE INTERACTION BETWEEN SUPERFICIAL ROUGHNESS AND DEVIATIONS IN THE FORM IN NOISE GENERATION IN MECHANICAL COMPONENTS

Abstract – This paper addresses the relationship between the dimensional characteristics error of form (roundness) and surface roughness in the proper functioning of mechanical components that were manufactured by varying the speed of cutting feed during machining to $\pm 30\%$ compared to standard parameters in production. These components were analyzed after manufacture and the results were used in a statistical matrix, in which we used the methodology of factorial experiments (design of experiments - DOE), which was verified by the interaction between these characteristics and their responses in the experiments. The chosen parameters were evaluated at two levels (minimum and maximum) in a factorial 22. The rotation speeds used in the experiment varied according to their commercial use. The results show that the interaction proves the dynamic interaction between the selected variables. Specifically in this work, experiments were performed on a crankshaft which is a major component of an internal combustion engine. This component works in an engine of 1365 cc bi-fuel, known commercially by 1.4 flex. The crankshaft in its final form has a mass of about 9.8 kg and a length of 392.3 ± 0.05 mm. After the machining process, the component must undergo a second process which is the hardening surface, giving it greater hardness and mechanical strength. A form results experimentally, we applied a linear arrangement (modeling), thus determining the coefficients used to relate the answers on the input variables. Knowing the coefficients of the arrangements between the factors, it was found and what factors had higher levels which interact with the least possible waste.

Keywords – Error form, Roughness, Experimental design, Work speed, Dynamic interaction.