

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

JOEL CUPERTINO RODRIGUES NETO

**Manutenção Preditiva de um Centro de Usinagem CNC Através de Análise de
Vibrações**

Uberlândia
2017

Joel Cupertino Rodrigues Neto

Manutenção Preditiva de um Centro de Usinagem CNC Através de Análise de Vibrações

Trabalho de conclusão de curso de graduação, apresentado à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica

Área de habilitação: Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Dr. Wisley Falco Sales

Uberlândia
2017

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por todas as bênçãos recebidas e por me conceder o dom da vida para que eu possa, sobre sua proteção, buscar realizar meus ideais.

Também agradeço a toda minha família que tanto empenharam em minha formação acadêmica me dando apoio e condições de continuar esta jornada de lutas e aprendizagem.

Agradeço também a todos os meus amigos pela força e apoio que dedicaram para que eu pudesse seguir em frente neste caminho de conhecimentos.

Muito grato também sou aos meus professores e especialmente ao meu orientador Dr. Wisley Falco Sales, que com tanto conhecimento e empenho, muito tem me ensinado no decorrer deste trabalho, da mesma forma que com grande atenção dedicou seus ensinamentos aos alunos deste curso.

Agradeço a todos aqueles que contribuíram para que este curso fosse realizado e que chegasse ao fim mais uma etapa desta busca pelo saber e conhecimento.

RESUMO

Na indústria a maioria das máquinas opera a partir de motores, os quais podem apresentar defeitos e falhas durante a operação. Tais problemas podem acarretar em paradas e perda de eficiência de produção, dessa maneira se faz importante que os serviços de manutenção saibam as medidas corretas para cuidar dos equipamentos sob sua responsabilidade para que todas as intervenções feitas sejam realmente necessárias e eficientes. O emprego da manutenção preditiva vem ganhando força no cenário atual, consistindo na manutenção programada do equipamento, baseando-se em diagnósticos das condições de operação das máquinas, com o objetivo de evitar quebras e paradas desnecessárias. Na realização do trabalho, foi realizada uma pesquisa sobre técnicas de manutenção preditiva passíveis de aplicação em máquinas utilizadas no processo de usinagem, mas especificamente de um Centro de Usinagem CNC. Posteriormente a técnica definida para aplicação foi a Análise de Vibrações, a qual foi feita sobre a máquina. O objetivo inicial era buscar frequências naturais as quais deveriam ser evitadas para garantir que a máquina operasse de maneira estável. Com os ensaios, foi possível notar que não ocorrem frequências naturais na faixa de operação da máquina, nem com rotação máxima, no entanto outras características foram obtidas, como o eixo mais estável e pontos de instabilidade.

Palavras Chave: Manutenção preditiva; Usinagem; Vibrações; Análise dinâmica.

ABSTRACT

In the industry most of the machines operate from motors, which can present defects and failures during the operation. Such problems can result in downtime and loss of production efficiency, so it is important that the maintenance services know the correct measures to take care of the equipment under their responsibility so that all the interventions made are really necessary and efficient. The use of predictive maintenance has been gaining strength in the current scenario, consisting of the scheduled maintenance of the equipment, based on diagnoses of the operating conditions of the machines, in order to avoid unnecessary breaks and stops. In the accomplishment of the work, a research was carried out on predictive maintenance techniques that can be applied in machines used in the machining process, but specifically in a CNC Machining Center. Subsequently the technique defined for application was the Vibration Analysis, which was done on the machine. The initial goal was to look for natural frequencies which should be avoided to ensure that the machine operates in a stable manner. With the tests, it was possible to observe that there are no natural frequencies in the operating range of the machine, nor with maximum rotation, however other characteristics were obtained, such as the most stable axis and points of instability.

Key-words: predictive maintenance; Machining; Vibrations; Dynamic analysis.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	7
1.1 OBEJTIVOS	8
1.1.1 Objetivo Geral:	8
1.1.2 Objetivos específicos:	8
1.2 JUSTIFICATIVA	8
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	9
2.1 Tipos de Manutenção	10
2.1.1 Principais técnicas de manutenção preditiva	13
2.2 Vibrações	16
2.2.1 Vibrações na manutenção preditiva	18
2.2.2 Frequência Natural.....	18
2.3 Usinagem	26
2.3.1 Vibrações na usinagem	30
2.4 Máquinas CNC	31
3. Materiais e Métodos	34
3.1 Montagem	37
3.2 Execução	38
4. Resultados e discussões.....	41
5. Conclusões.....	48

1. INTRODUÇÃO

O termo manutenção tem sua origem no vocábulo militar, cujo sentido era manter nas unidades de combate o efetivo e o material num nível constante de aceitação (MONCHY, 1987). Tem como objetivo garantir a disponibilidade da função dos equipamentos e instalações de modo a atender a um processo de produção e a preservação do meio ambiente, com confiabilidade, segurança e custos adequados.

Em 1975, a Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, pela norma TB-116, definiu o termo manutenção como sendo o conjunto de todas as ações necessárias para que um item seja conservado ou restaurado de modo a poder permanecer de acordo com uma condição desejada. Anos mais tarde, em 1994, a NBR-5462 trazia uma revisão do termo como sendo a combinação de todas as ações técnicas e administrativas, incluindo as de supervisão, destinadas a manter ou recolocar um item em um estado no qual possa desempenhar uma função requerida (ABNT, 1994).

A manutenção está sempre tomando novos rumos e caminhando cada vez mais próxima da operação. Mudanças profundas têm-se apresentado na última década nos mercados. Eles estão sendo marcados por conceitos como: globalização, redução de custos e melhoria da qualidade de serviços. Hoje sua gestão é integrada com as estratégias e objetivos estratégicos da empresa, tendo a produção como foco principal.

Entre as grandes empresas é nítida a preocupação em ser o benchmark, ou seja, ser a empresa referência no mundo. Em consequência, a área de Manutenção dessas empresas deve também procurar a excelência, pois não há empresa excelente sem que seus diversos segmentos não o sejam. Apoiados nessa necessidade, a manutenção nas grandes empresas deve buscar a melhoria de modo constante, utilizando as melhores práticas conhecidas, (COMITTI, 2004).

Um sistema de manutenção eficiente deve visar o aproveitamento total das instalações, a disponibilidade plena do equipamento, isto é, Quebra Zero, para garantia da competitividade e do sucesso da empresa.

Geralmente as máquinas necessitam de manutenção. Quando esta manutenção não é feita de forma planejada e correta, mais cedo ou mais tarde, levam a parada das máquinas. Resta saber se essa parada será inesperada ou programada, ou seja, Manutenção Corretiva Não Planejada ou Manutenção Corretiva Planejada. Dentro deste enfoque, a equipe de manutenção deve fazer de tudo para que não ocorram as paradas inesperadas.

Com as paradas não programadas tem-se, por exemplo, problemas como a introdução de falhas oriunda de uma intervenção inadequada e defeitos que se propagaram de um componente para o outro dentro da máquina. Isto faz com que as paradas sejam mais prolongadas do que em uma Manutenção Corretiva Planejada. Como consequência este fato trará prejuízos para a produção e, obviamente, aumentará os custos da manutenção, o que poderia ser evitado com paradas programadas.

Dessa forma vem ocorrendo uma mudança de mentalidade de manutenção voltada para a corretiva ou para a preventiva, incorporando técnicas de manutenção preditiva, vem ganhando força nos sistemas modernos de manutenção no Brasil. Hoje já é visível o crescimento do interesse de empresas e profissionais ligados aos serviços de manutenção, em

busca da utilização das técnicas de manutenção preditiva tais como termografia, análise de vibração, dentre outras que veremos mais adiante.

Atualmente a técnica de manutenção deve ser necessariamente desenvolvida sob a estratégia de redução dos tempos de intervenção nos equipamentos, buscando obter o menor tempo de indisponibilidade para o serviço.

1.1 OBEJTIVOS

1.1.1 Objetivo Geral:

O objetivo geral deste projeto é apresentar o emprego de uma técnica de manutenção preditiva, como maneira de garantir o bom funcionamento de um Centro de Usinagem CNC. A técnica utilizada foi a análise de vibrações.

1.1.2 Objetivos específicos:

1. Entender os conceitos dos principais tipos de manutenção utilizados na indústria, visando o entendimento de técnicas modernas;
2. Compreender a necessidade do conhecimento histórico sobre a máquina a qual será realizada a manutenção;
3. Buscar conceitos inovadores que possam contribuir para a manutenção preditiva;
4. Abordar a situação atual da máquina e vislumbrar o seu funcionamento no longo prazo;
5. Estabelecer possíveis limitações para o uso da máquina;
6. Dar garantias com relação a possibilidade de futuras falhas provocadas pelas vibrações oriundas da rotação da máquina.

1.2 JUSTIFICATIVA

O serviço de manutenção busca eficiência de modo a proporcionar todas as condições para a produção e ainda não atrapalhar seu desenvolvimento e continuidade, além de acontecer de forma competente e eficaz.

Este trabalho oferece elementos significativos na tomada de decisão para adoção de uma manutenção eficiente, competente e de qualidade. O mesmo pode trazer benefícios para pesquisas desenvolvidas nesta área, assim como da observação de fatores importantes no processo de desenvolvimento das manutenções atuais realizadas em todo âmbito industrial por meio da análise de ocorrências de cada equipamento e de seus componentes.

O presente trabalho se justifica pela necessidade de garantir que as operações possam ser realizadas sem risco de falha ou quebra súbita devida às vibrações provadas pela própria máquina.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Desde os primórdios das civilizações é possível constatar que eram executadas formas simples de manutenção, como a conservação de ferramentas de trabalho e objetos. No entanto, foi com a chegada de Revolução Industrial do século XVIII, onde ocorreu grande avanço tecnológico, que a manutenção passou a se tornar atividade primordial na indústria, como meio de garantir trabalho contínuo. Nesse momento os próprios operadores de máquinas eram responsáveis pela manutenção, sendo treinados para tal.

Assim continuou sendo realizada a atividade até a I Guerra Mundial, onde o Fordismo com suas linhas de montagem aumentou a demanda por sistemas de manutenção de maior agilidade e eficácia, direcionados em sua maioria para o que chamamos hoje de manutenção corretiva.

Embora existissem na indústria pessoas que tomavam conta da manutenção, estes continuavam subordinados à função operação e realizavam manutenção corretiva emergencial, o que significava consertar equipamentos após falha ou eventual indisposição. Foi somente com a II Guerra Mundial e com a necessidade de produções cada vez maiores e mais enxutas, que se iniciou o processo de monitoramento de máquinas e equipamentos com base no tempo, o que hoje é chamado de manutenção preventiva.

O crescimento dos registros de ocorrências de manutenção, aliado aos altos gastos com peças de reposição, impulsionaram as grandes empresas a buscar evoluir o setor, entre as décadas de 40 e 50, aprimorando o planejamento e a gestão da manutenção, com a emergência da Engenharia de Manutenção a nível de departamento, subordinada a uma gerência (CAMPOS JÚNIOR, 2006).

A equipe de manutenção passou a ter foco no controle e prevenção de falhas rotineiramente, o que trouxe bons resultados quando o assunto é aumento da confiabilidade e disponibilidade de máquinas e equipamentos, redução dos riscos de segurança e saúde dos trabalhadores. No entanto, interrupções frequentes e custos gerados pela manutenção preventiva provocaram repercussões negativas na produtividade, influenciando nos custos dos produtos.

O avanço tecnológico, com difusão dos computadores a partir de meados da década de 60, trouxe inovações para controle, medição e análise de falhas, tanto em termos de tratamento de dados quanto em termos de disponibilidade de novos instrumentos e equipamentos. Assim, foram desenvolvidos critérios de previsão de falhas, com equipes focadas no melhor aproveitamento dos recursos disponíveis, através de controles estatísticos, estudos das avarias e uso de sistemas informatizados. Neste contexto, surge a Manutenção Preditiva e a área de Planejamento e Controle da Manutenção – PCM.

Com a chegada da década de 80, o desenvolvimento de microcomputadores de custos reduzidos e controles mais simples, uma maior independência foi adquirida pelas equipes de manutenção, o que permitiu que seus programas fossem criados e aplicados sem necessidade de analista externo à área. Isso possibilitou um grande avanço no manejo de informações e na análise de dados. Dessa forma houve grande aproximação entre essas duas áreas, buscando trabalhar com sinergia para otimizar tanto a qualidade quanto a produtividade (TAVARES, 2000). Observou-se aumento da confiabilidade dos processos industriais e da disponibilidade

de equipamentos e máquinas; intervenções mais curtas, conscientes e precisas com análises dos riscos envolvidos; melhoria da segurança e condições ambientais em geral; sistematização dos programas de manutenção, favorecendo a interseção com a própria produção (NETTO, 2008).

Outro aspecto importante dos avanços na manutenção foi a dependência cada vez maior das organizações na capacidade de criação e resposta deste setor, já que as novas exigências do mercado tornaram visíveis as limitações dos sistemas de gestão (MOUBRAY, 1996). Em muitos casos, a necessidade de inovação e otimização demandava criação de equipes multidisciplinares para interações nas fases de projeto, fabricação e manutenção de equipamentos e máquinas, proporcionando resultados ainda melhores em termos de produtividade e eficiência em custos. Além disso, com a crescente exigência de qualidade dos produtos por parte dos consumidores, a manutenção foi obrigada a responder por suas intervenções com maior rigor e confiabilidade, diminuindo retrabalhos e falhas na produção. Neste contexto, a Manutenção assumiu papel não apenas importante, mas estratégico dentro das empresas.

2.1 Tipos de Manutenção

Ainda é comum certa confusão quanto à nomenclatura utilizada para definir os tipos de manutenção. Os nomes podem até variar, mas o conceito deve estar bem compreendido. A conceituação, conforme mostrado a seguir, permite a escolha do tipo mais conveniente para um determinado equipamento, instalação ou sistema (COMITTI, 2004).

1. Manutenção Corretiva

Utilizada na correção da falha ou do desempenho menor que o esperado. A Manutenção Corretiva pode ser dividida em duas classes: Corretiva Não Planejada e Corretiva Planejada.

Manutenção Corretiva Não Planejada: corrige a falha de maneira aleatória, ou seja, é a correção da falha ou desempenho menor que o esperado após a ocorrência do fato. A aplicação desse tipo de manutenção implica em custos elevados, pois provoca perdas de produção e extensão de danos em equipamentos. Quando só existe corretiva, a manutenção é comandada pelos equipamentos, o que torna a manutenção reativa.

Manutenção Corretiva Planejada: correção que se faz em função de um acompanhamento preditivo, detectivo ou até pela decisão gerencial de se operar até a falha. Esse tipo de manutenção é planejado. Tudo que é planejado representa economia, mais segurança e agilidade.

2. Manutenção Preventiva

Tipo de manutenção utilizado para reduzir ou evitar possível falha ou queda no desempenho de equipamentos, obedecendo um planejamento baseado em intervalos definidos de tempo.

Um dos pilares para uma boa prevenção é a determinação dos intervalos de tempo entre as operações de manutenção. Usualmente a tendência de ser mais conservador predomina, fazendo que os intervalos aplicados sejam menores que os necessários de fato, o que implica em paradas e troca de peças muitas vezes desnecessárias.

A Manutenção Preventiva é muito aplicada em instalações/equipamentos cuja falha pode provocar catástrofes ou risco ambiental, sistemas complexos e/ou de operação contínua ou ainda em locais onde não é possível fazer inspeção preditiva e/ou detectiva.

3. Manutenção Preditiva

É o conjunto de atividades de acompanhamento de diversos parâmetros e variáveis que indicam o desempenho ou a performance de máquinas e equipamentos, de maneira sistemática, buscando definir possível necessidade de intervenção.

Possibilita que equipamentos operem por um intervalo de tempo mais longo, e que as intervenções necessárias ocorram com base em dados e informações. Quando essas intervenções são realizadas, ocorre uma Manutenção Corretiva Planejada.

A prática da Manutenção Preditiva reduzirá significativamente o número de manutenções corretivas e preventivas. A seguir têm-se os principais benefícios da Manutenção Preditiva.

- Fim das trocas de componentes e intervenções preventivas desnecessárias;
- Redução do custo e dos prazos de intervenção;
- Aumento da disponibilidade de equipamentos e da segurança durante a operação;
- Diminuição das quebras de equipamentos durante operação, o que danificaria de maneira secundária muitos componentes.

De uma maneira geral, a aplicação de programas de Manutenção Preditiva em indústrias de processo resulta em reduções da ordem de 2/3 nos prejuízos com paradas inesperadas de produção e 1/3 nos gastos com a manutenção (BRITO, 2002).

4. Manutenção Detectiva

É o tipo de manutenção efetuado em sistemas de proteção ou comando, visando a detecção de falhas ocultas ou imperceptíveis aos responsáveis pela operação e manutenção.

Pode-se citar como exemplo clássico, o circuito que comanda a entrada de um gerador em um hospital. Caso ocorra falta de energia e o circuito falhar, o gerador não entra em funcionamento. Dessa maneira é necessário que este circuito seja acionado de tempos em tempos para garantir sua funcionalidade.

À medida que aumenta a utilidade de instrumentação de comando, controle e automação nas indústrias, maior é a necessidade de Manutenção Detectiva para garantir a confiabilidade dos sistemas e da planta.

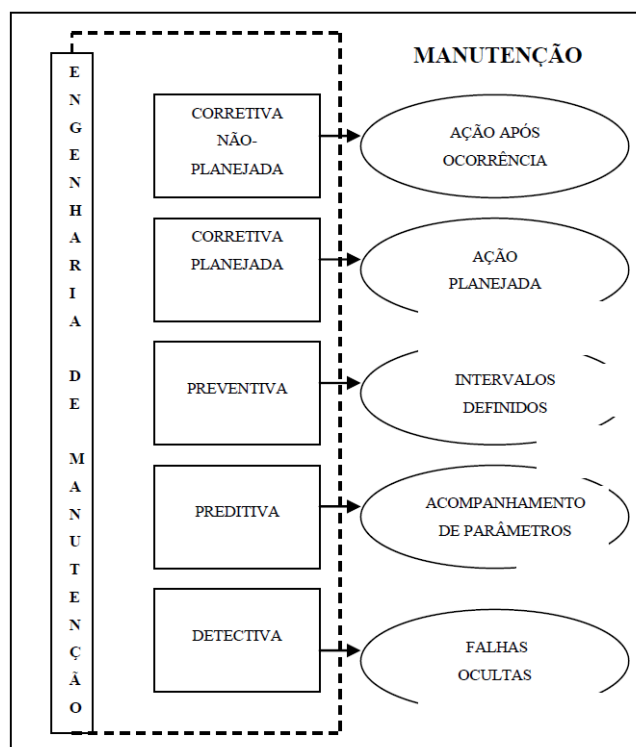
5. Engenharia de Manutenção

Com o aumento da aplicação de manutenção preditiva, a prática da Engenharia de Manutenção pode ser considerada como uma quebra de paradigma, isso devido as mudanças na rotina da atividade e da consolidação de uma política de melhoria contínua para a área de manutenção.

De acordo com KARDEC & NASCIF (2009) a Engenharia de Manutenção significa “perseguir benchmarks, aplicar técnicas modernas, estar nivelado com a manutenção do Primeiro Mundo”. Para tanto, visa, dentre outros fatores, aumentar a confiabilidade, disponibilidade, segurança e manutenibilidade; eliminar problemas crônicos e solucionar problemas tecnológicos; melhorar gestão de pessoal, materiais e sobressalentes; participar de novos projetos e dar suporte à execução; fazer análise de falhas e estudos; elaborar planos de manutenção, fazer análise crítica e acompanhar indicadores, zelando sempre pela documentação técnica.

Uma empresa que pratique Engenharia de Manutenção não estará somente realizando um acompanhamento preditivo de seus equipamento e máquinas, mas também alimentando sua estrutura de dados e informações a respeito de manutenção, o que irá permitir que sejam realizadas análises e estudos para melhorias futuras. A figura 1 ilustra as diferenças entre os tipos de manutenção.

Figura 1: Tipos de manutenção



Fonte: (KARDEC & NASCIF, 2009)

2.1.1 Principais técnicas de manutenção preditiva

A principal maneira de garantir sucesso ao detectar e isolar falhas específicas é acompanhar o funcionamento da máquina através de técnicas adequadas. Algumas destas mencionadas abaixo:

1. Análise de Lubrificante

De certa forma a fadiga em máquinas pode ser significativamente reduzida a partir da coleta de amostra de óleo e seu diagnóstico, isso permite que as trocas sejam feitas em momentos ótimos, o que melhora o operação. A análise em campo permite ter controle do programa de lubrificação, controlando o tempo de lubrificação a partir dos resultados. A partir disso é possível obter um melhor tempo de resposta para os problemas de lubrificação, o que reduz os custos de manutenção.

Atualmente, pode-se encontrar mini laboratórios de Tribologia, ciência que estuda o fenômeno do atrito em suas diversas manifestações, no mercado. Nestes laboratórios são realizadas análises das amostras de óleo obtidas, o que ajuda a identificar a correta causa dos problemas associados com vários aspectos da lubrificação.

É possível instalar esses laboratórios com diferentes tipos de configurações, dependendo da necessidade, levando em consideração a relação de custo e benefício combinando instrumentos e software. Este recebe os dados adquiridos pelo mini laboratório, e permite a realização de uma análise automática, plotar, indicar tendências, salvar dados. Pode-se mencionar os benefícios trazidos:

- Controle da seleção do lubrificante, consolidação e qualidade.
- Aumento da vida da máquina.
- Monitoramento das condições da máquina e do lubrificante.
- Redução de energia consumida.
- Controle proativo da contaminação.

A análise do lubrificante através da Análise de Partículas de Degradação permite o monitoramento da condição do óleo fornecendo um indicativo do aumento de substâncias estranhas, tais como água, que podem prejudicar as propriedades lubrificantes do óleo e causar falhas.

Através de Ferrografia faz-se uma análise das partículas contidas no óleo lubrificante. A composição, o tamanho e a quantidade relativa das partículas podem ser registrados, analisados quanto às suas tendências e examinados com intuito de se chegar a deduções sobre problemas associados com o desgaste e a contaminação.

Através da Degradação do Óleo faz-se o monitoramento da viscosidade e o nível de acidez do lubrificante. Pela viscosidade é possível detectar características de oxidação, estresse mecânico excessivo, contaminação e a presença de correntes parasitas em eixos de motores elétricos.

Encontra-se disponíveis no mercado vários tipos de mini laboratórios onde é possível fazer uma análise da condição do óleo e da máquina. São excelentes para detectar falhas em motores, compressores, moinhos, pulverizadores, prensas e engrenagens. Detectam problemas

que provocam danos nas máquinas e desgaste em componentes mais cedo do que vibração. A análise de desgaste de partícula reduz paradas não programadas, detectando a falha de componente, o tipo de dano (químico, abrasivo, fadiga, etc.) e a localização do dano (composição). Além disso, traz a conscientização dos problemas relativos ao lubrificante incorreto e deterioração do lubrificante (SILVA, 2012).

2. Termometria

A medição de temperatura é, geralmente, um indicador importante da condição mecânica que se encontra determinado componente, como por exemplo um rolamento.

Técnicas como a Termometria Infravermelha tem sido amplamente utilizadas em diversos segmentos industriais, com o objetivo de quantificar perdas de energia e monitorar a temperatura de equipamentos, como motores.

É possível dizer que a maior vantagem dessa tecnologia é o fato das medições poderem ser obtidas instantaneamente e de maneira segura, sem a necessidade de contato com objetos quente ou em movimento, ou de acessar superfícies de acesso complicado. Para tal são usados radiômetros infravermelhos que são capazes de medir temperaturas em apenas um ponto de determinada superfície.

3. Termografia

A Termografia é uma técnica que se utiliza de uma câmara que captura imagens e medições infravermelhas com o objetivo de "ver" e "medir" a energia térmica emitida por determinado objeto ou sistema.

A energia térmica, ou infravermelha, é uma luz que normalmente não pode ser vista porque possui um comprimento de onda muito longo para ser detectado pelo olho humano. Esta técnica nos habilita ver o que é impossível enxergar a olho nu.

As câmeras termográficas infravermelhas produzem imagens a partir da radiação infravermelha invisível, ou do “calor”, e possibilitam a obtenção de medições precisas de temperatura, sem necessidade de contato físico com o objeto. É uma técnica de campo contínuo.

A maioria dos equipamentos apresenta variação de temperatura antes de apresentar falha. Isso faz com que as câmeras infravermelhas sejam extremamente eficazes em termos de custo/benefício. É uma ferramenta de diagnóstico valiosa para várias e diferentes aplicações. Além disso, à medida que as indústrias lutam para melhorar a eficiência dos processos de fabricação, de controle de energia, de qualidade dos produtos e de segurança dos seus funcionários, novas aplicações para as câmeras termográficas infravermelhas continuam a aparecer (VARGAS, 2012).

4. Ultrassom

A técnica de Ultrassom possui diversas aplicações, principalmente em instalações industriais como detecções de vazamentos em sistemas como caldeiras a vapor, trocadores de calor, condensadores; regulação do fluxo de válvulas; garantir a integridade das vedações e das juntas de tanques; entre outras (SILVA, 2012)..

Em geral, qualquer equipamento em operação ou vazamentos produzem diversos tipos de sons. As características ultrassônicas desses sons produzem ondas de natureza extremamente curtas, e o sinal dessas ondas tende a ser direcionado. Dessa maneira, é necessário isolar os sinais e quaisquer ruídos que também estejam presentes e detectar o local de sua origem. Quando ocorrem alterações súbitas nos equipamentos mecânicos, os tradutores ultrassônicos detectam os sinais de aviso antes da falha acontecer.

5. Análise de Vibração

A Análise de Vibração é considerada a ferramenta mais valiosa para o monitoramento da condição das máquinas rotativas. Segundo Art Crawford, "Atualmente na indústria, de todos os parâmetros que podem ser medidos não invasivamente, o que contém mais informação é a assinatura por vibração".

Esta tecnologia possui fundamentos técnicos e históricos sólidos, que podem comprovar o alto valor das informações que são adquiridas. Sem contar no fato de existir uma vastada quantidade de dados disponíveis a respeito sua aplicação.

Existem várias ferramentas que podem ser utilizadas nas análises de vibração. Desde instrumentos básicos, onde as leituras são registradas manualmente, até instrumentos de funções complexas, que possuem capacidade para realizar análises sofisticadas, como sistemas programáveis de obtenção e monitoramento de dados.

Essa técnica apresenta excelentes resultados, permitindo obter informações importantes a respeito da estabilidade das máquinas. Dessa maneira a análise de vibrações foi a técnica de manutenção preditiva escolhida para a realização deste trabalho.

2.2 Vibrações

Qualquer movimento que se repita após um intervalo de tempo é denominado vibração ou oscilação. (RAO)

O processo de usinagem pode resultar em três diferentes tipos de vibrações que podem aumentar com a falta de rigidez dinâmica de um ou mais elementos da estrutura, como o eixo-árvore, o mandril da ferramenta ou mesmo a ferramenta de corte. Estes três tipos de vibração podem ser descritos por vibrações livres, forçadas e auto excitadas (TOBIAS, 1965).

Vibrações livres ocorrem quando um sistema mecânico é deslocado de sua condição de equilíbrio e sua vibração ocorre livremente sem excitação externa. Pode-se citar, como exemplo, uma operação de usinagem em que uma coordenada é programada incorretamente e ocorre uma colisão entre a ferramenta e a peça ou mesmo após a quebra de uma aresta de corte de uma fresa de topo.

Vibrações forçadas são causadas devido a fontes externas de excitações. Podem ser oriundas da entrada das arestas de corte de uma fresa de topo no material a ser removido da peça ou ainda devido ao desbalanceamento do eixo-árvore da máquina.

Já as vibrações auto excitadas conhecidas pelo termo em inglês chatter, tem a propriedade de extrair energia do sistema ao iniciar e depois aumentar o nível de energia empregado devido as interações da ferramenta com a peça durante o processo de usinagem (ALTINTAS, 2000). Este tipo de vibração torna o processo instável e, portanto, é o mais indesejável e difícil de controlar.

As vibrações podem ter origem em uma ou mais fontes: vibrações externas à máquina-ferramenta, vibrações geradas pela própria usinagem, falta de homogeneidade da peça, corte interrompido e vibrações causadas pela máquina-ferramenta. Podendo ser classificadas como:

1. Vibrações externas à máquina-ferramenta

Geralmente geradas por outras máquinas (prensa, motores, compressores e outras máquinas operatrizes), são transmitidas pelo solo e pelas suas fundações. Estas vibrações contêm um espectro de frequência muito amplo, de forma que a frequência natural de algum componente de uma máquina-ferramenta pode estar contida nesta ampla faixa de frequência. Assim, este componente pode apresentar níveis de vibrações muito altos e influenciar negativamente os resultados do processo.

2. Vibrações causadas pela máquina-ferramenta

Surgem tanto em acionamentos de componentes dotados de movimento rotativo quanto de acionamento de componentes com movimento de translação. Estas podem se apresentar sob duas formas já descritas anteriormente: livres e forçadas. As vibrações forçadas são causadas por rotação de massas desbalanceadas, acionamentos por engrenagens e correias, rolamentos com irregularidades e por forças periódicas nos próprios motores de acionamento.

3. Vibrações causadas por corte interrompido

Na usinagem com corte interrompido, a ferramenta sofre impactos consideráveis que podem levar a níveis indesejáveis de vibrações. No fresamento, vibrações forçadas são excitadas pela componente periódica da força de usinagem na frequência de passagem dos dentes.

4. Vibrações devido à falta de homogeneidade da peça

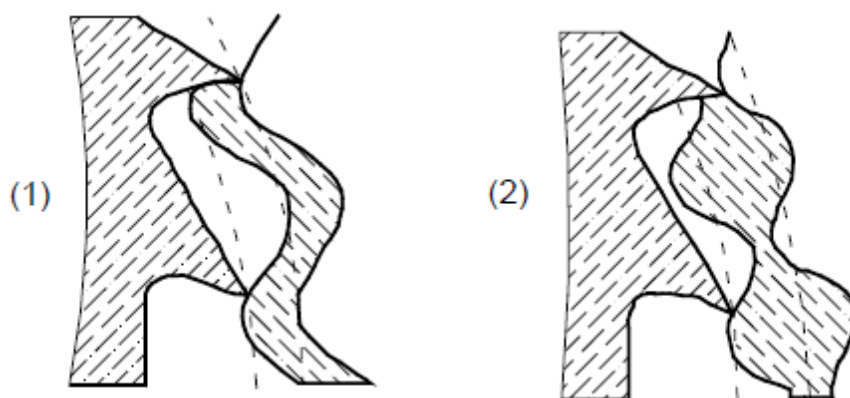
A presença de regiões de diferentes durezas em uma peça causa pequenos choques sobre a ferramenta, resultando em vibrações. Sendo estes impactos absorvidos, os efeitos não são consideráveis, fazendo parte apenas do “ruído de fundo” da usinagem. Entretanto, se estes pequenos choques sobre a ferramenta não forem rapidamente amortecidos, originam vibrações de grande amplitude prejudiciais ao processo.

5. Vibrações Auto-excitadas ou regenerativas

Não são causadas por forças externas, mas por forças geradas pelo próprio corte do material pela ferramenta. Resultam de um mecanismo de auto-excitação na geração da espessura do cavaco durante as operações de usinagem. Um dos modos estruturais do sistema máquina-ferramenta-peça é excitado por forças de corte inicialmente. Uma superfície ondulada resultante da passagem de um gume é removida pelo subsequente, que também deixa uma superfície ondulada devido a vibrações estruturais. Dependendo da diferença de fase entre duas ondulações sucessivas as vibrações podem ser atenuadas ou ampliadas.

Podem ser causadas por acoplamento de modos ou regeneração da espessura do cavaco. As vibrações devido ao acoplamento de modos ocorrem quando há vibrações nas duas direções do plano de corte. As vibrações regenerativas resultam da diferença de fase entre as ondas de vibrações deixadas em ambos os lados do cavaco e ocorrem antes do efeito de acoplamento dos modos, na maioria dos casos de usinagem. (POLLI, 2005)

Figura 2: Efeito regenerativo



Fonte: Polli, 2005

2.2.1 Vibrações na manutenção preditiva

A análise de falhas através da manutenção preditiva baseada na monitoração da vibração tem sido utilizada com sucesso em máquinas e equipamentos industriais desde o início dos anos 70. As bases de refinaria e petroquímicas adotaram o uso desta técnica obtendo economia notável e aumentando a disponibilidade do equipamento produtivo resultando no aumento também da produtividade. Em busca de maior ganho produtivo e durabilidade dos equipamentos é realizada a monitoração de máquinas rotativas em geral e em seus componentes visando proporcionar maior produtividade nas indústrias.

Por meio do monitoramento dos equipamentos com análise de vibração é obtida a redução de intervenções de manutenção em até 70%, depois de reduzido período de monitoração e pela possibilidade de planejamento de intervenções com conhecimento prévio da época e causa das falhas. Situações reais demonstram economia de até 75% nos custos de manutenção nas empresas que adotaram esse procedimento, sendo então um retorno garantido e satisfatório para qualquer indústria.

O investimento com a instrumentação para a monitoração de vibração é alto, porém é amortizado em pouco tempo, já que este investimento será responsável por reduzir os custos de manutenção e trazer maior lucratividade para a organização. Pode-se inicialmente trabalhar apenas com medidores e analisadores de vibração analógicos de baixo custo e funcionamento simplificado, que pode atender a um elevado número de equipamentos de diversos tipos. Sendo, portanto, necessário que os equipamentos de coleta de dados sejam confiáveis e robustos, capazes de suportar os rigores do trabalho diário, em ambientes agressivos, apresentando resultados confiáveis e que sejam manejados por profissionais capazes de entender suas informações e intervir na manutenção adequada a cada diagnóstico.

De acordo com Souza e Lima (2003), por meio da análise de vibração são passadas inúmeras informações das condições do equipamento analisado, uma vez que todas as máquinas em funcionamento produzem vibrações. Estas provocam desgastes dando origem a processos de deterioração resultante da modificação da distribuição de energia vibratória e fricção existente no conjunto dos elementos que constituem a máquina. A informação deste processo e do estado funcional da máquina é observada por meio dos espectros apresentados durante a análise de vibração realizada no software de monitoramento.

2.2.2 Frequência Natural

As frequências para as quais se verificam maiores amplitudes de vibração correspondem as frequências naturais do sistema: frequência que um sistema oscila após distúrbio inicial e deixado vibrar por si próprio, com a qual ele oscila sem a presença de forças externas. Estas dependem fortemente do tamanho da máquina (WECK, 2006).

Na usinagem de metais, o número de frequências naturais de interesse prático é geralmente limitado, isto é, o comportamento do sistema máquina-ferramenta ou de qualquer subconjunto pode ser simplificado reduzindo-se a análise a poucos modos de vibração e as frequências associadas.

Determinação das frequências naturais

É possível determinar as frequências naturais de uma máquina-ferramenta tanto por meio de cálculos quanto experimentalmente. Podemos citar três parâmetros que determinam o comportamento dinâmico de máquinas-ferramenta em geral: a distribuição de massa, a rigidez e o amortecimento do sistema.

Estes parâmetros determinam as frequências naturais e os respectivos modos de vibração do sistema, que não dependem diretamente dos esforços. Para estruturas complexas como máquinas-ferramenta, o conhecimento dos modos de vibração se faz especialmente importante para identificar quais componentes são os principais responsáveis pelas vibrações (análise dos pontos críticos). Segundo Weck (2006), mesa e cabeçote normalmente vibram com movimentos de flexão e torção, enquanto guias vibram com movimentos de corpo rígido no plano de movimentação da guia.

A análise destas frequências e de seus respectivos modos de vibração deve se limitar a um número finito de graus de liberdade, sendo as frequências mais baixas as mais importantes, uma vez que a elas estão associadas as maiores amplitudes de vibração. O bom desempenho estático e dinâmico de uma máquina depende muitas vezes da flexibilidade, do amortecimento e especialmente da frequência natural de um componente individual (Weck, 2006).

Embora as frequências naturais da estrutura da máquina como um todo sejam menores que as do conjunto eixo-arvore, elas não representam um problema tão grande no que diz respeito às vibrações, uma vez e necessária uma energia muito grande para excitar os modos correspondentes. Assumem maior importância as vibrações do eixo-arvore, que além de serem excitadas por fontes de menor energia estão mais próximas à ferramenta, portanto afetam mais o acabamento de peças fabricadas.

Para o caso de vibrações harmônicas, o sistema vibra de acordo com a frequência natural excitada. Não somente a magnitude dos esforços, mas também a fase entre a força e a deformação são variáveis importantes no estudo das vibrações. Verifica-se a ocorrência de vibrações excessivas do sistema quando a frequência de operação e a frequência natural se sobrepõem, o que também ocorre quando uma fonte externa excita o sistema com uma frequência próxima a natural (Weck, 2006).

Existem algumas maneiras de se determinar as frequências naturais de um sistema, as quais serão explicadas na sequência.

Determinação experimental:

Segundo a apostila The Fundamental of Modal Testing da Agilent Technologies, uma das maneiras de se determinar experimentalmente as frequências naturais de um sistema é por meio do ensaio de batida com um martelo (impact hammer test). Este ensaio consiste em excitar o sistema utilizando-se um martelo instrumentado com célula de carga ou uma ferramenta e analisar a resposta, medida normalmente por um acelerômetro fixo em regiões específicas do conjunto, nos domínios do tempo e da frequência (Vargas, 2016). De acordo com Vance (1988), neste ensaio devem ser testados diferentes martelos, duros e macios, para se determinar qual deles resulta em um melhor sinal de vibração livre.

Por meio da análise modal operacional (operational modal analysis) é possível estimar os parâmetros modais a partir do sinal de saída sem conhecer a entrada, análise classificada como análise do sinal de resposta (output only analysis). Rantatalo (2006) desenvolveu um método para levantamento dos parâmetros modais baseado na excitação por forças magnéticas. (Vargas, 2016). Todavia este não é muito representativo em relação à usinagem, uma vez que o simples ensaio de rotação difere da operação de usinagem, especialmente no que se refere as condições de contorno.

Como o presente trabalho tem por objetivo analisar as vibrações de um Centro de Usinagem CNC operando sem de fato usinar, levando em conta apenas seu movimento de rotação, esta foi a técnica escolhida.

Teste de impacto:

Mecanismo muito comum e de técnica relativamente simples de implementação, no entanto obter-se resultados consistentes não é tão fácil.

O mais conveniente dessa técnica é o fato dela requerer pouco hardware, e garantir pequenos intervalos de medição. O método de aplicar o impulso, inclui um martelo, uma arma elétrica ou uma massa suspensa. Destes o equipamento mais comum é o martelo.

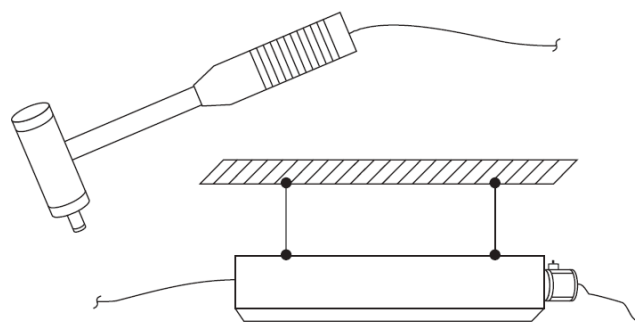
Na medida que a força é um impulso, o nível de amplitude da energia aplicada sobre a estrutura é função da massa e da velocidade do martelo. Isso devido ao conceito de momento linear, que é definido por massa x velocidade, assim impulso linear é igual ao incremento de momento linear.

No entanto é difícil controlar a velocidade do martelo, dessa forma a força normalmente é controlada variando a massa. Para tal, martelos de impacto estão disponíveis com massas que variam de algumas gramas até alguns quilos. Além disso, é possível adicionar ou remover massa de diversos martelos, os tornando úteis no teste de objetivos de diversos pesos e tamanhos.

A frequência da energia aplicada à estrutura é função da rigidez das superfícies de contato e, em menor grau, da massa do martelo. A rigidez das superfícies de contato afeta a forma do pulso da força, que por sua vez influencia a frequência.

Na Figura 3 abaixo vemos um exemplo de dispositivos utilizados nos testes.

Figura 3: Dispositivos utilizados em testes de impacto



Não é viável, no entanto alterar a rigidez do objeto a ser testado, dessa forma é obtido controle variando a rigidez da ponta do martelo. Quanto mais dura for a ponta do martelo, mais curta

será a duração do pulso e maior será a força. As Figuras 4 e 5 ilustram esse efeito no espectro de frequência.

Figura 4: Efeito da alteração da rigidez do martelo no espectro de frequências

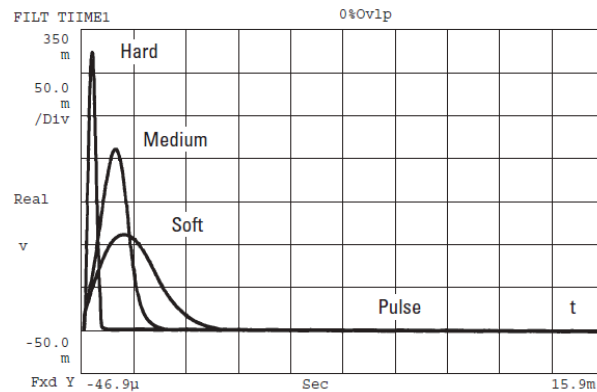
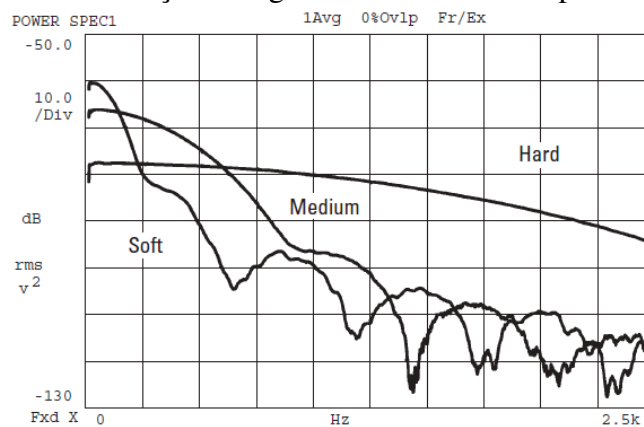
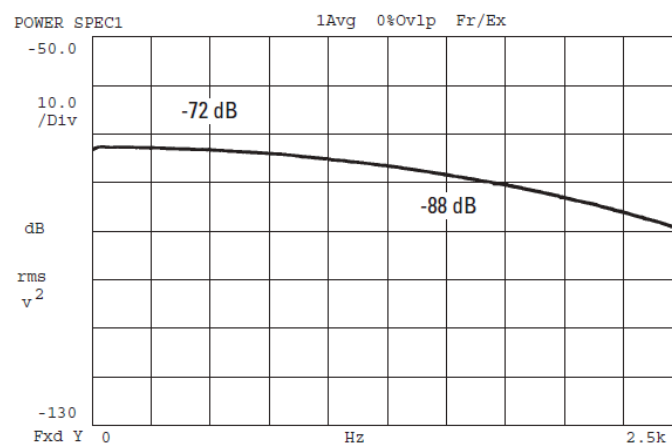


Figura 5: Efeito da alteração da rigidez do martelo no espectro de frequências



A regra é escolher um martelo de maneira que a amplitude não seja maior que 10 dB até 20 dB abaixo da máxima frequência de interesse, como mostra a Figura 6:

Figura 6: amplitude com o martelo adequado



Transdução:

Com o sistema de excitação montado é necessário selecionar os transdutores. Embora existam muitos tipos de transdutores, os piezoelétricos são os mais utilizados, tem alto alcance de frequência, boa linearidade e é relativamente durável. O equipamento é um sensor eletromagnético que gera uma resposta elétrica quando sujeito a uma vibração, isso é possível graças a um elemento de cristal que cria uma carga elétrica quando deformado mecanicamente.

O mecanismo do transdutor de força, chamado de célula de carga, funciona de maneira simples. Quando o elemento de cristal é deformado, seja tracionado ou comprimido, ele gera uma carga proporcional à força aplicada.

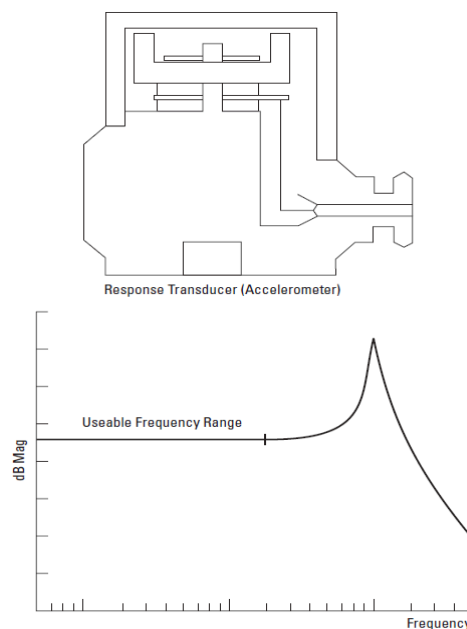
A resposta do transdutor é obtida atrás de um equipamento chamado acelerômetro, que funciona de maneira similar. Quando o acelerômetro vibra, uma massa interna aplica uma força ao elemento de cristal, a qual é proporcional a aceleração.

Ao selecionar uma célula de carga, é necessário levar em consideração o tipo de força do sensor e suas características de performance. O tipo de força para o qual a célula de carga for suportar deve incluir compressão, tração e impacto. A maioria dos testes requer pelo menos tração e compressão, mas no caso do teste com o martelo, deve estar preparada para impacto também.

Algumas das especificações de operação a considerar são sensibilidade, frequência de ressonância, faixa de temperatura e classificação de choque. A sensibilidade é medida em termos de tensão / força com unidades de mV / lb ou mV / N. Os analisadores têm uma gama de configurações de tensão de entrada; portanto, a sensibilidade deve ser escolhida juntamente com um nível de amplificação da fonte de energia para gerar uma tensão mensurável.

A frequência de ressonância de uma célula de carga é simplesmente uma função de suas características de massa física e rigidez. A faixa de frequência do teste deve cair dentro do intervalo linear abaixo do pico ressonante da resposta de frequência da célula de carga, como mostrado na Figura 7. A regra de ouro para a classificação de choque é que o nível máximo de vibração esperado durante o teste não deve exceder um terço da classificação de choque .

Figura 7: Acelerômetro e faixa de frequência



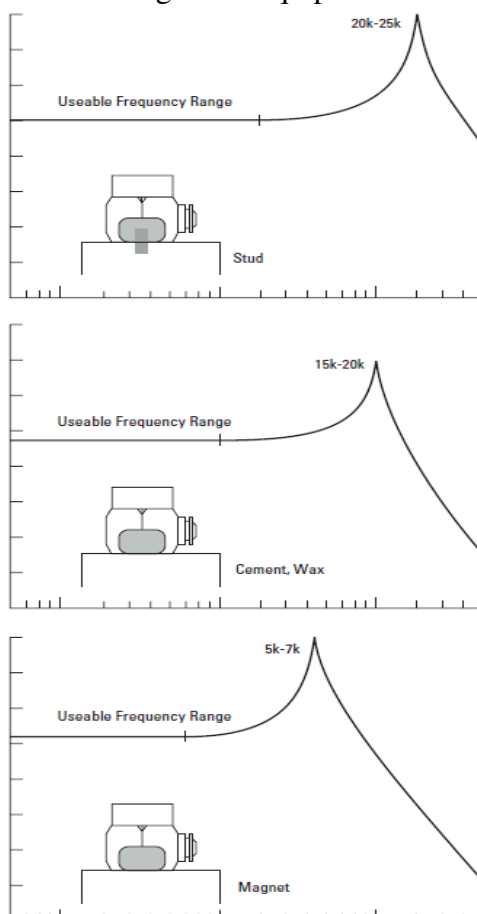
A célula de carga deve ser montada na estrutura com um parafuso roscado para obter melhores resultados. Se isso não for viável, então um método alternativo é fixar a estrutura com algum tipo de adesivo (como o cimento dental).

As propriedades a serem consideradas na seleção de um acelerômetro são muito semelhantes às da célula de carga, embora estejam relacionadas à aceleração e não à força. O tipo de resposta é limitado à aceleração conforme o termo implica, uma vez que os transdutores de deslocamento e velocidade não estão disponíveis no tipo piezoelétrico. No entanto, se as respostas de deslocamento ou velocidade forem desejadas, a resposta de aceleração pode ser artificialmente integrada uma ou duas vezes para dar respostas de velocidade e deslocamento, respectivamente.

Em geral, o acelerômetro ótimo possui alta sensibilidade, ampla faixa de frequência e pequena massa. Os "trade-offs" geralmente são feitos, uma vez que a alta sensibilidade geralmente dita uma massa maior para todos, exceto os acelerômetros mais caros. A sensibilidade, medida em mV / G, e a classificação de choque devem ser selecionadas da mesma maneira que com a célula de carga.

Embora a frequência de ressonância do acelerômetro seja função de suas características de massa e rigidez, a frequência natural real (quando montada) é geralmente ditada pela rigidez do método de montagem utilizado. O efeito de vários métodos de montagem é mostrado na Figura 8. A regra é definir a frequência máxima do teste em não mais de um décimo da frequência natural montada do acelerômetro. Isso está dentro da faixa linear da resposta de frequência montada do acelerômetro.

Figura 8: Efeito da montagem do equipamento sobre a frequência natural

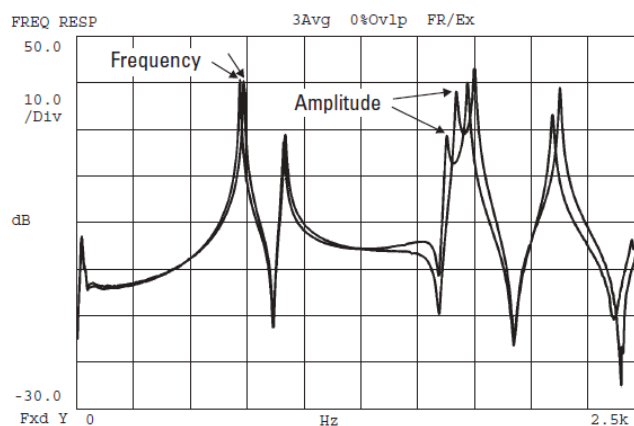


Outra consideração importante é o efeito do carregamento em massa do acelerômetro. Isso ocorre porque a massa do acelerômetro é uma fração significativa da massa efetiva de um modo particular. Um procedimento simples para determinar se esse carregamento é significativo pode ser feito da seguinte maneira:

1. Medir uma função de resposta de frequência típica do objeto de teste usando o acelerômetro desejado.
2. Monte outro acelerômetro (além do primeiro) com a mesma massa no mesmo ponto e repita a medição.
3. Compare as duas medidas e procure mudanças de frequência e mudanças de amplitude.

Se as duas medidas diferirem significativamente, como ilustrado na Figura 9, o carregamento em massa é um problema e um acelerômetro com menos massa deve ser usado. Em estruturas muito pequenas, pode ser necessário medir a resposta com um transdutor sem contato como um sensor acústico ou óptico, para eliminar todo o carregamento em massa.

Figura 9: Efeito do carregamento em massa sobre as medições

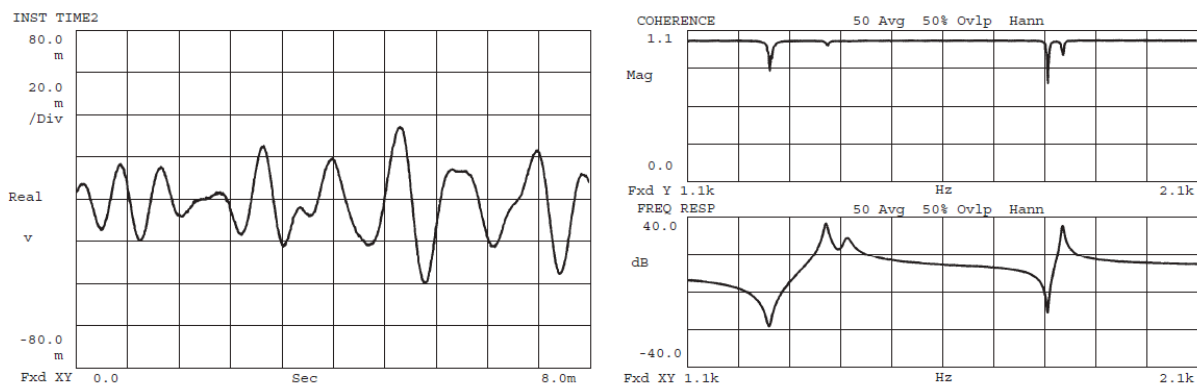


Interpretação das medições:

Tendo discutido a mecânica da montagem de um teste modal, é apropriado neste momento fazer algumas medições de teste e examinar suas tendências antes de proceder à coleta de dados. É importante realizar investigações preliminares ao teste, como nos excitadores ou locais de resposta, vários tipos de funções de excitação e diferentes parâmetros de processamento de sinal levarão a medições de maior qualidade. Esta seção inclui verificações preliminares, como níveis de sinal adequados, medições mínimas de vazamento e linearidade e verificações de reciprocidade. O conceito e as tendências da medição do ponto de condução e as combinações de medidas que constituem um levantamento modal completo são discutidas.

Depois que a estrutura foi instalada e instrumentada para o teste, os sinais do domínio do tempo devem ser examinados antes de fazer medições. As configurações do intervalo de entrada no analisador devem ser definidas em no máximo duas vezes o nível máximo de sinal, conforme mostrado na Figura 10. Muitas vezes chamado de meia gama, isso tira proveito do alcance dinâmico do conversor analógico-digital sem subjugar ou superar os sinais.

Figura 10: Configurações do intervalo de entrada no analisador



O efeito resultante de subjugar um sinal, onde o nível de entrada de resposta é severamente baixo em relação à configuração do analisador, está ilustrado na Figura 11. Observe o ruído aparente entre os picos na resposta de frequência e o resultado: má coerência. Na Figura 12, a resposta está sobrecarregando gravemente a seção de entrada do analisador e está sendo cortada. Isso resulta em baixa resposta de frequência e, conseqüentemente, baixa coerência, uma vez que a resposta real não está sendo medida corretamente.

Figura 11: Exemplo de entrada *under ranging*

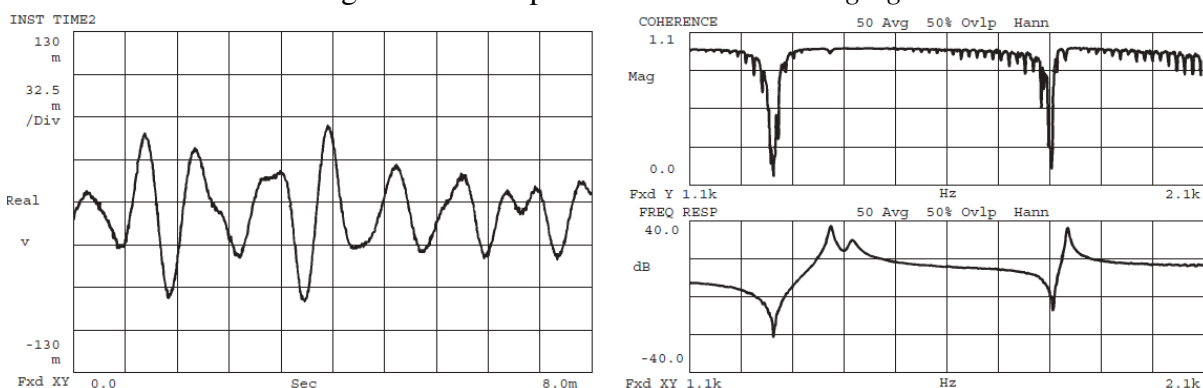
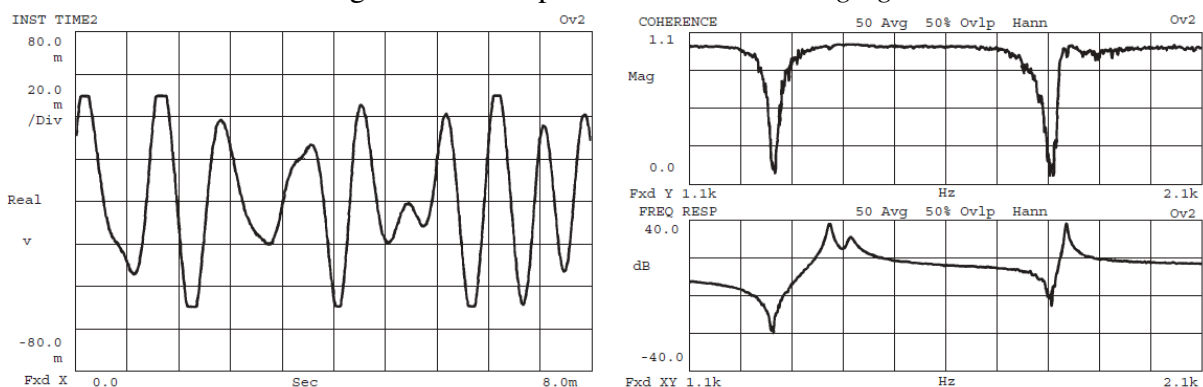


Figura 12: Exemplo de entrada *over ranging*



Também é aconselhável verificar se os sinais são realmente o tipo esperado (por exemplo, ruído aleatório). Com um sinal aleatório, é aconselhável medir o histograma para verificar se ele não está contaminado com outros componentes do sinal, ou seja, ele possui uma distribuição gaussiana como mostrado na Figura 13. Isso pode ser verificado visualmente como ilustrado com os sinais transitórios na Figura 14.

Figura 13: Sinal aleatório

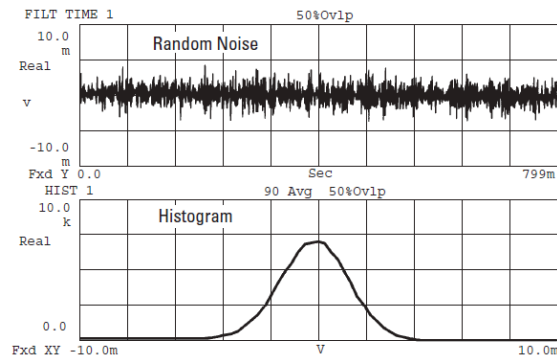
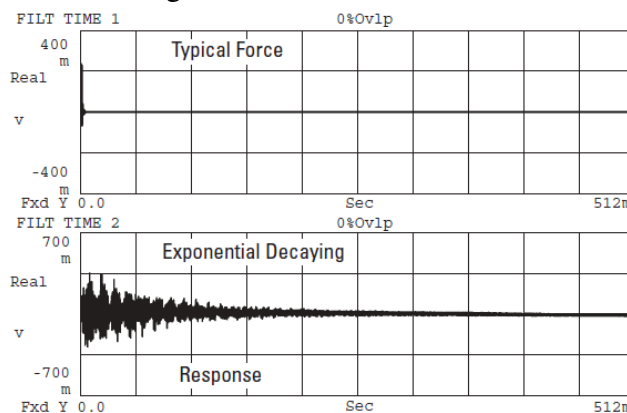


Figura 14: Sinais transitórios



2.3 Usinagem

1. Conceito

A usinagem é um processo de fabricação que confere à peça a forma, as dimensões, o acabamento pretendido ou ainda uma combinação desses três itens, com a remoção de material e a produção de cavaco. (FERRARESI, 1970). É reconhecidamente o mais popular do mundo, sendo muito versátil, porém relativamente complexo devido ao grande número de variáveis que o influenciam.

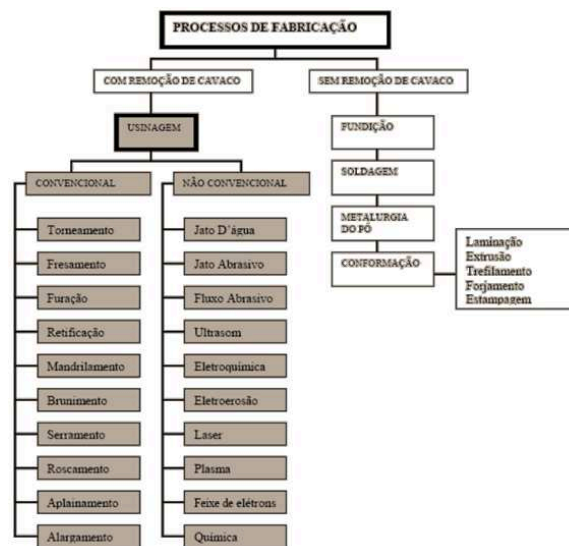
É possível dividir os processos de usinagem em duas grandes categorias: convencionais e não-convencionais. No primeiro caso, as operações de corte empregam energia mecânica na remoção do material. No segundo, as operações utilizam-se de outros tipos de energia de usinagem.

Dentro dos processos convencionais de usinagem é possível ainda fazer uma subdivisão em duas classes: usinagem com ferramentas de corte com geometria definida – exemplo: torneamento, fresamento, furação; e usinagem com ferramentas de corte com geometria não-definida – exemplo: retificação, brunimento, lapidação (SOUZA, 2004).

2. Classificação dos Processos de Usinagem

Os processos de fabricação podem ser classificados com remoção de cavaco e sem remoção de cavaco, conforme é mostrado na figura. No primeiro caso, esse processo é chamado de usinagem o qual é abordado por esse trabalho. Na figura 15 vemos um esquema que mostra como se classificam os processos.

Figura 15: Classificação dos processos de fabricação



Fonte: SOUZA, 2011.

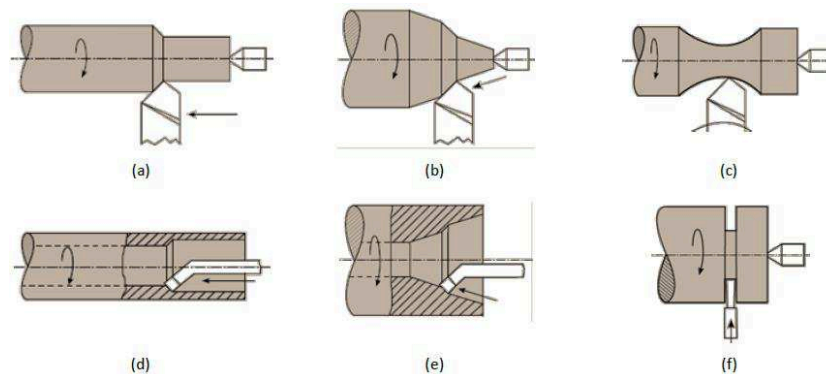
Pode-se definir como principais operações de usinagem (SOUZA, 2011):

I) Torneamento

Processo mecânico de usinagem destinado à obtenção de superfícies de revolução com auxílio de uma ou mais ferramentas monocortantes. Para tanto, a peça gira em torno do eixo principal de rotação da máquina e a ferramenta se desloca simultaneamente segundo uma trajetória coplanar com o referido eixo. Quanto à forma da trajetória, o torneamento pode ser retilíneo ou curvilíneo.

Na figura 16 vemos alguns tipos de torneamento.

Figura 16: Alguns processos de torneamento: (a) cilíndrico externo; (b) cônico externo; (c) curvilíneo; (d) cilíndrico interno; (e) cônico interno; (f) sangramento radial

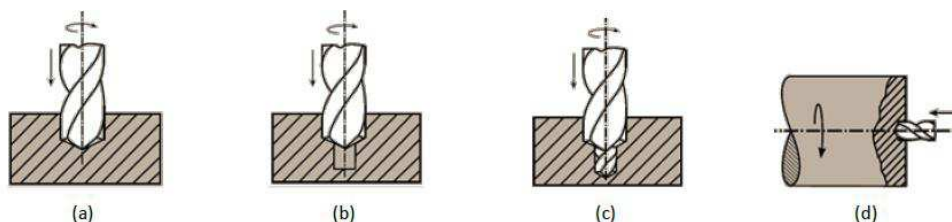


- Torneamento retilíneo: processo de torneamento no qual a ferramenta se desloca segundo uma trajetória retilínea.
- Torneamento curvilíneo: processo de torneamento, no qual a ferramenta se desloca segundo uma trajetória curvilínea.
- Aplainamento: Processo mecânico de usinagem destinado à obtenção de superfícies regradas, geradas por um movimento retilíneo alternativo da peça ou da ferramenta. O aplainamento pode ser horizontal ou vertical. Quanto à finalidade, as operações de aplainamento podem ser classificadas ainda em aplainamento de desbaste a aplainamento de acabamento

II) Furação

Processo mecânico de usinagem destinado à obtenção de um furo geralmente cilíndrico numa peça, com auxílio de uma ferramenta geralmente multicortante. Para tanto, a ferramenta ou a peça giram e simultaneamente a ferramenta ou a peça se deslocam segundo uma trajetória retilínea, coincidente ou paralela ao eixo principal da máquina. A furação subdivide-se nas operações apresentadas na Figura 17:

Figura 17: Alguns processos de furação: (a) em cheio; (b) escareamento; (c) escalonada; (d) de centro

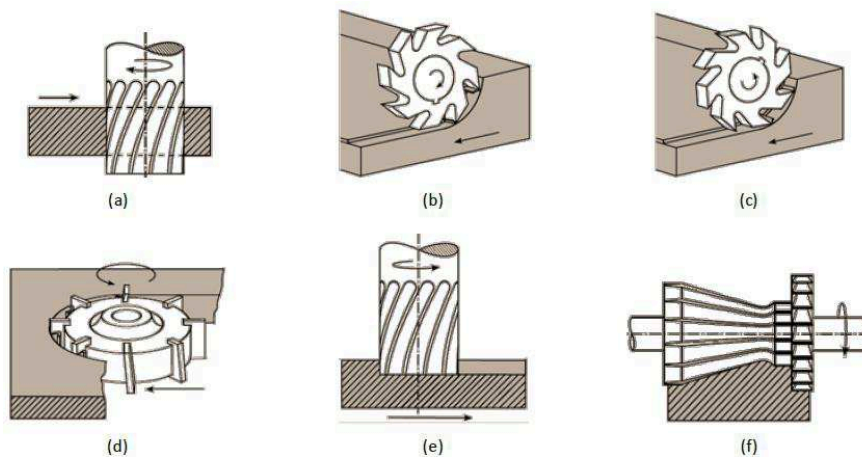


- Furação em cheio: processo destinado à abertura de um furo cilíndrico numa peça, removendo todo o material compreendido no volume do furo final, na forma de cavaco. No caso de furos de grande profundidade há necessidade de ferramenta especial.
- Escareamento: processo destinado à abertura de um furo cilíndrico numa peça pré-furada.
- Furação escalonada: processo destinado à obtenção de um furo com dois ou mais diâmetros, simultaneamente.
- Furação de centros: processo destinado à obtenção de furos de centro, visando uma operação posterior na peça.
- Trepanação: processo de furação em que apenas uma parte de material compreendido no volume do furo final é reduzida a cavaco, permanecendo um núcleo maciço.

III) Fresamento

Processo mecânico de usinagem destinado à obtenção de superfícies quaisquer com o auxílio de ferramentas geralmente multicortantes. Para tanto, a ferramenta gira e a peça ou a ferramenta se deslocam segundo uma trajetória qualquer. Distinguem-se dois tipos básicos de fresamento: tangencial e frontal. Há casos que os dois tipos básicos de fresamento compõem simultaneamente, podendo haver ou não predominância de um sobre outro. A figura 18 mostra alguns tipos de fresamento.

Figura 18: Alguns processos de fresamento: (a) cilíndrico tangencial; (b) cilíndrico tangencial concordante; (c) cilíndrico tangencial discordante; (d) frontal; (e) frontal de canal com fresa de topo; (f) composto



- Fresamento cilíndrico tangencial: processo de fresamento destinado à obtenção de superfície plana paralela ao eixo de rotação da ferramenta. Quando a superfície obtida não for plana ou o eixo de rotação da ferramenta for inclinado em relação à superfície originada na peça, será considerado um processo especial de fresamento tangencial.
- Fresamento frontal: processo de fresamento destinado à obtenção de superfície plana perpendicular ao eixo de rotação da ferramenta.

2.3.1 Vibrações na usinagem

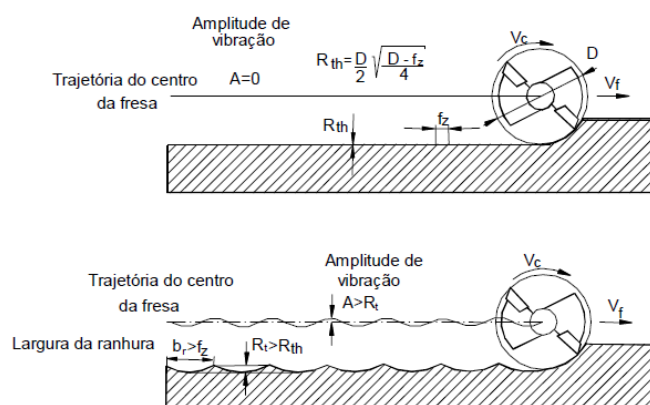
A usinagem dos materiais é invariavelmente acompanhada de vibrações entre a peça e a ferramenta.

A máquina-ferramenta representa um sistema vibracional composto por diversos elementos. Caso ultrapassem determinadas amplitudes, as vibrações deste sistema podem prejudicar tanto o acabamento da superfície quanto a integridade de componentes do conjunto máquina-ferramenta. Ondulações na superfície usinada são provocadas devido a essas vibrações, consequência da variação da seção de usinagem, que provoca variações na força de corte, prejudicando a vida da ferramenta e da máquina (WECK, 2006).

O nível máximo das vibrações tolerável, ou seja, a máxima amplitude das vibrações em um processo de usinagem, depende da sua aplicação. Em operações de desbaste, o que determina este nível é principalmente o efeito que as vibrações exercem sobre a vida da ferramenta. Em operações de acabamento, a qualidade da superfície e precisão dimensional são os parâmetros que determinam o nível máximo das vibrações. (POLLI, 2005)

Existe uma relação entre as vibrações durante o processo e o resultado de trabalho. Em um trabalho isento de vibrações, o movimento relativo entre a ferramenta e a peça é dado pela combinação do avanço e da velocidade de corte. A rugosidade cinemática pode ser teoricamente calculada em função do diâmetro da ferramenta e do avanço por dente. A parte superior da figura abaixo mostra as relações geométricas para esta condição. Contudo, sendo sobrepostas a este movimento as vibrações da ferramenta, que apresentam uma componente na direção normal a de avanço, altera-se a estrutura do acabamento superficial original (parte inferior da figura). Disso resulta uma piora na qualidade da superfície, que pode ser empregada na avaliação da dinâmica do processo (POLLI, 2005).

Figura 19: Trajetória da ferramenta para processo em vibrações



No que diz respeito aos parâmetros que influenciam as vibrações do conjunto, estes podem ser inerentes à própria máquina-ferramenta e seus componentes, ao processo de usinagem e ao posicionamento/ orientação do processo com relação ao sistema vibratório da máquina. De uma forma geral, o comportamento dinâmico de uma máquina-ferramenta pode ser melhorado pela redução das fontes de vibração da própria máquina, da ferramenta e de seus componentes de fixação.

O processo de vibrações tem sido estudado com a intenção de primeiramente criar regras de forma a escolher quais as condições de usinagem podem ser utilizadas e também diretrizes para o projeto de máquinas-ferramentas estáveis. Para eliminar fontes de vibrações, são tomadas medidas como: despojamento de engrenagens, lubrificação de guias de escorregamento, utilização de mancais de rolamento, pela minimização do comprimento em balanço das ferramentas e pelo dimensionamento adequado do suporte da ferramenta de corte. (VARGAS, 2016)

2.4 Máquinas CNC

O Comando Numérico Computadorizado (CNC) é uma técnica que permite a operação automática de uma máquina ou processo por meio de uma série de instruções codificadas que contêm números, letras e outros símbolos. Sua aplicação original seria para controle automático de máquinas ferramentas, no entanto, atualmente, o emprego do CNC foi estendido para uma grande variedade de máquinas e processos, pois tem uma facilidade de adaptação a diferentes situações de produção (NASCIMENTO, 2011).

1. Funcionamento e componentes:

As máquinas CNC possuem algumas características próprias no seu funcionamento, nelas é necessária a presença de um programa da peça para ser utilizado, a armazenagem do programa CNC na memória da máquina, a edição e modificação dos programas da peça, armazenagens de rotina que podem ser utilizados em sequência por diferentes programas de peça. A utilização do CNC traz uma série de vantagens:

- a compensação de diâmetro da ferramenta;
- grande facilidade de comunicação com outros sistemas computacionais;
- permite a simulação do programa no visor da máquina;
- possui auto-diagnóstico
- permite gerenciamento de informações

Devido a essas características, o CNC possui diversas aplicações industriais, sendo elas: usinagem, soldagem, corte (puncionadeiras, prensas, etc.), injeção de materiais, inspeção e medição, sistemas de montagem e manuseio de materiais dentre outros.

Os componentes mecânicos de uma máquina CNC, são basicamente:

- Guias e barramentos: elementos muito importantes em uma máquina operatriz, determinam a precisão geométrica da máquina. Esses componentes são encarregados por sustentar os carros porta-ferramentas e orientar seus deslocamentos. Com o objetivo de amortecer as vibrações, são adotados barramentos com rigidez elevadas construídos em ferro fundido.
- Dispositivos de troca de ferramentas: nos processos de usinagem, a maioria das peças necessita de uma mais uma ferramenta para ser usinada por completa. Dessa forma, o sistema de troca de ferramentas em máquinas CNC tem sido otimizado. Nos tornos CNC a troca de ferramentas é pode ser feita automaticamente. Buscando minimizar os tempos passivos durante a execução de um trabalho, pode-se utilizar um suporte porta-ferramentas, nesse sistema a troca é comandada pelo programa, necessitando apenas que o posicionamento das peças esteja correto.
- Sistema de refrigeração e transporte de cavaco: As máquinas CNC podem operar em altas velocidades de corte, dessa maneira se faz necessário um sistema que refrigere, lubrifique e auxilie na remoção de cavacos. Existem máquinas que apresentam sistemas de ferramentas onde o fluído refrigerante é conduzido através de canais no interior do suporte porta-ferramentas. Outras utilizam mangueiras.
- Motor de acionamento do eixo-árvore: é o motor responsável para o funcionamento da máquina CNC, em que as transmissões de rotação para a peça nos tornos e para a ferramenta nas fresadoras são realizadas pelo eixo-árvore. O acionamento da árvore é realizado através de um motor de corrente alternada ou de corrente contínua.
- Motor de acionamento dos fusos: os movimentos de avanço devem ser realizados de forma a gerar a geometria desejada da peça atendendo exigências de uniformidade de movimentos e de rapidez de reação na alteração de velocidades. A interferência de forças externas, como a força de corte e de atrito, provoca erros nos movimentos dos carros. Em geral são utilizados motores de corrente contínua para o acionamento dos avanços, que são regulados por um circuito de potência e podem acionar ou frear em ambas as direções de movimento.
- Transmissão de movimento por fuso de esferas recirculantes: durante a usinagem de peças nas máquinas operatrizes são realizados movimentos de peças, ferramentas e carros. O sistema de transmissão de movimento para os carros porta-ferramentas é o sistema de fuso e porca, que permite converter a rotação de um motor em um movimento linear. O conjunto parafuso/porca de rosca trapezoidal utilizado em máquinas convencionais possui o inconveniente de introduzir baixo rendimento à transmissão por efeito do atrito gerado no contato da rosca do parafuso e da porca.
- Painel de comando: o comando CNC é um equipamento eletrônico, dotado de um processador ou mais de um, e de memórias de armazenamento, capaz de receber informações através de entrada própria de dados, processar e compilar estas informações, transmitindo-as em forma de impulsos à máquina ferramenta, gerando o movimento simultâneo dos eixos em combinação com seu sistema de medição e funções de programação, de modo que esta sem a intervenção do operador, realize as operações de usinagem na seqüência programada.

2. Comparação entre uma máquina CNC e uma máquina convencional

Existem certas diferenças entre a máquina CNC e as máquinas convencionais, que são de grande importância na determinação da escolha da empresa por qual máquina optar. Uma das diferenças é que, a máquina convencional depende da habilidade do operador, de modo que, para chegar à dimensão final, há uma necessidade constante de medir a peça. Também depende do operador intervir para trocar a ferramenta e estabelecer seu pré-set, assim como a matéria-prima necessita de ajuste. O tempo de corte na máquina convencional também é mais longo e há mudança nas definições de rotações e avanços, repetitividade e tolerâncias, assim como no lead-time.

Desta forma, podemos destacar como principais vantagens no CNC:

- Aumento da flexibilidade;
- Redução do tempo de usinagem, consequentemente maior lucro;
- Menor intervenção humana, diminuindo erros e acidentes;
- Redução nos circuitos de "hardware" e simplificação dos remanescentes bem como disponibilidade de programas automáticos de diagnósticos, diminuindo pessoal de manutenção;
- Eliminação do uso de fita perfurada;
- Aumento das possibilidades de corrigir programas (edição);
- Possibilidade do uso de equipamentos periféricos computacionais;
- "Display" para operação.

E também desvantagens:

- Investimento inicial elevado ;
- Mão-de-obra especializada para programação;
- Manutenção exigente e especializada;
- Uso de ferramental específico;
- Não elimina completamente os erros humanos;
- Não tem vantagens tão evidentes para séries pequenas e muito pequenas.

3. Materiais e Métodos

O presente trabalho tem como objetivo investigar a influência das vibrações num centro de usinagem CNC, analisando uma possível proximidade às frequências naturais da máquina, como método de manutenção preditiva. Caso as operações resultem em vibrações de frequências próximas às de ressonância, isso poderia provocar falhas.

Este capítulo apresenta todas as condições de realização dos experimentos, como: as especificações do centro de usinagem CNC, das ferramentas de medição e os equipamentos e metodologia escolhidos para os ensaios.

1. Centro de Usinagem CNC

A máquina sobre o qual o experimento foi realizado foi o centro de usinagem do Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU) da Universidade Federal de Uberlândia, cujas especificações estão explicitas abaixo:

- Máquina: Centro de Usinagem
- Fabricante: Industrias ROMI
- Modelo: Discovery 760 (similares – 560 e 1250)
- Máxima rotação do eixo árvore: 10.000 rpm
- Máxima velocidade de avanço: 25 m/min
- Potência do eixo árvore: 12,5 CV
- Comando numérico, Siemens, Sinumerik, Série 810D
- Magazine – 22 Ferramentas, com trocador pneumático
- Ano de fabricação: 09/2011
- Curso longitudinal (eixo X): 760 mm
- Curso transversal (eixo y): 406 mm
- Curso vertical (eixo z): 508 mm
- Avanço rápido (z): 20 m/min
- Precisão de posicionamento: $\pm 0,004$ mm
- Precisão de repetibilidade: 0,001 mm
- Peso máximo admissível: 900 Kg

Obs: A faixa de rotação para a máquina standard varia de 6 a 6.000 rpm e da máquina opcional varia de 10 a 10.000 rpm. No caso específico da máquina presente no laboratório, a rotação máxima atinge 10.000 rpm; o motor AC possui 12,5 CV de potência com variação contínua de velocidades acionado por variador de frequência; o deslocamento da DISCOVERY 760 nos 3 eixos (x, y e z) são feitos por fusos de esferas recirculantes de alta precisão acionados por servomotores AC (sem escovas) através de polias e correias.

A máquina é muito versátil, destinada a uma ampla gama de operações de usinagem. Oferece alta rigidez mesmo em operações severas, além de estabilidade térmica e geométrica, apresentando normalmente boa precisão.

Figura 20: Centro de Usinagem CNC



2. Acelerômetros

Para realizar as medições de vibração foram utilizados 2 acelerômetros, cedidos pelo Laboratório de Mecânica de Estruturas (LMest) da Universidade Federal de Uberlândia, um deles fixado no cabeçote do centro de usinagem e outro na ponta de uma marreta.

As especificações dos mesmos seguem abaixo:

- Equipamento: Acelerômetro
- Fabricante: PCB Piezotronics
- Modelo: 352C22
- Tamanho: 3,6 mm x 11,4 mm x 6,4 mm
- Montagem (fixação): Adesivo lateral
- Sensibilidade: 1,0 mV/(m/s²)
- Faixa de medição: ± 4900 m/s² pk
- Alcance de frequência ($\pm 5\%$): 1,0 Hz a 10.000 Hz
- Alcance de frequência ($\pm 10\%$): 0,7 a 13.000 Hz
- Alcance de frequência (± 3 dB): 0,3 a 20.000 Hz
- Frequência de ressonância: ≥ 50 /kHz
- Limite de Impacto: ± 90.000 m/s² pk

Esses sensores são equipados com simples condicionadores de sinal de corrente constante, de fácil operação.

Figura 21: Acelerômetro e cabo de ligação ao condicionador de sinal



3. Analisador de sinais dinâmico

Para realizar a análise dos sinais obtidos com o experimento, foi utilizado um analisador de sinais dinâmico, cedido pelo Laboratório de Mecânica de Estruturas (LMEst) da Universidade Federal de Uberlândia. Ambos os acelerômetros foram ligados a este analisador, o que permitiu a medição das frequências.

As especificações são aplicadas depois de 15 minutos de aquecimento e dentro de 2 horas da última calibração. Quando o sistema de refrigeração interno estiver desligado, as especificações se aplicam dentro de 5 minutos da última calibração. Todas as especificações são com resolução de frequência de 400 linhas. Segue abaixo:

- Equipamento: Analisador de sinais dinâmico
- Fabricante: Keysight Technologies
- Modelo: 35670A
- Alcance de frequência (1 canal): 102,4kHz
- Alcance de frequência (2 canais): 51,2 kHz
- Alcance de frequência (4 canais): 25,6 kHz
- Resolução mínima (1 canal): 122 μ Hz
- Resolução mínima (2 canais): 61 μ Hz
- Resolução mínima (4 canais): 122 μ Hz
- Taxa de medição (1 canal): ≥ 70 médias / segundo
- Taxa de medição (2 canais): ≥ 33 médias / segundo
- Taxa de medição (4 canais): ≥ 15 médias / segundo
- Precisão: ± 30 ppm
- Alcance dinâmico: 90 dB
- Resolução: 100, 200, 400, 800 e 1600 linhas

Figura 22: Analisador de sinais



4. Martelo de impacto

Inicialmente, os ensaios foram realizados com um martelo de impacto padrão, cedido pelo LMEst da Universidade Federal de Uberlândia, no entanto devido à grande massa da máquina, o mesmo não produzia excitações grandes o bastante para possibilitar as medições.

Dessa forma foi utilizada uma marreta de massa de 4 Kg, a qual era suficiente para excitar a máquina, sem necessidade de provocar colisões de grandes proporções. Nessa marreta foi fixado um dos acelerômetros com a utilização de uma cera própria para tal aplicação.

3.1 Montagem

Para a execução do experimento, os acelerômetros foram montados de forma que fosse possível medir a frequência das vibrações provocadas pela colisão da marreta no centro de usinagem CNC, e posteriormente ligados ao analisador de dados que foi instalado ao lado da máquina.

No centro de usinagem, o primeiro acelerômetro foi fixado no cabeçote da máquina, utilizando uma cera que o manteve aderido o suficiente para garantir boa precisão durante as medições. A Figura 23 mostra o local exato dessa instalação:

Figura 23: Cabeçote do Centro de Usinagem CNC



A fixação do segundo acelerômetro foi feita na marreta que fez a função do martelo de impacto, na sua parte superior, permitindo que a colisão ocorresse sem que o equipamento fosse danificado.

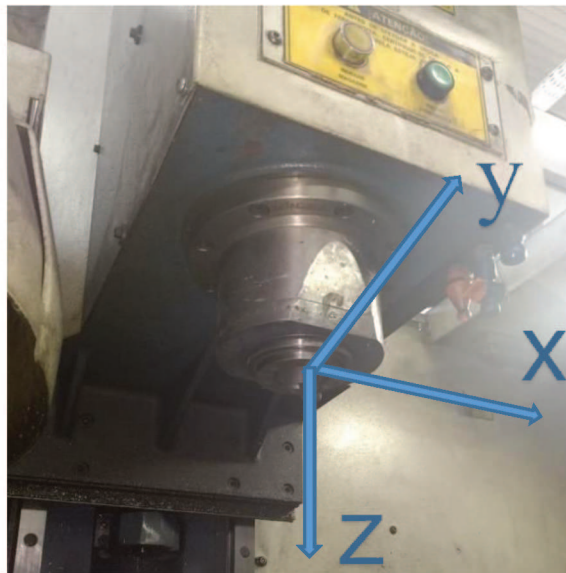
Ambos os acelerômetros foram ligados ao analisador de dados, que foi instalado ao lado do centro de usinagem, cada um deles num canal, permitindo assim que os resultados do experimento fossem capturados.

3.2 Execução

Durante o experimento, foram realizadas 10 colisões entre a marreta e o centro de usinagem, cada uma delas com o objetivo de capturar as frequências naturais de vibração da máquina em configurações diferentes, já que uma simples mudança de distribuição de massa pode alterar completamente os resultados obtidos.

As medições foram realizadas nos 3 eixos, para tal foi necessário que o impacto fosse realizado em cada eixo de maneira separada. Os eixos da máquina foram estabelecidos com o X sendo o longitudinal (na direção do curso), o Y sendo o frontal e o Z como eixo vertical, conforme apresentado a seguir:

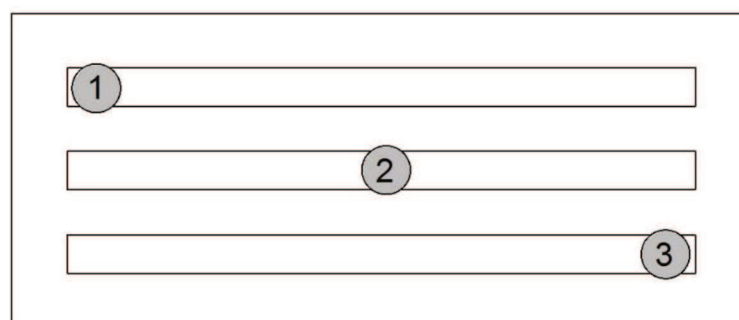
Figura 24: Cabeçote do Centro de Usinagem e eixos adotados nos ensaios



Outro parâmetro considerado foi a posição do curso da máquina, foram feitas medições com o curso em 3 posições diferentes, no início, no meio e no fim. Dessa maneira um total de 9 ensaios foram realizados, com o objetivo de avaliar o comportamento da máquina em cada eixo com o curso em posições diferentes.

A imagem seguinte mostra as posições de curso que foram adotadas:

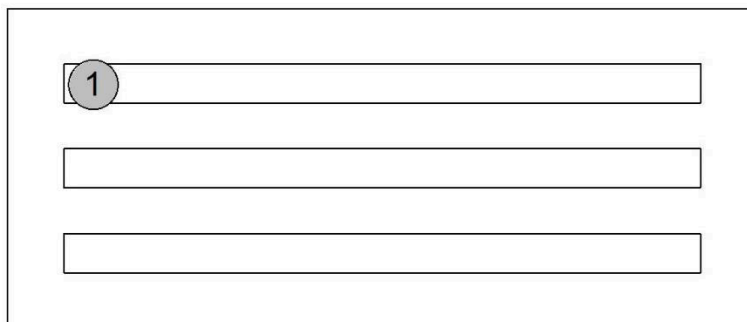
Figura 25: Representação da mesa do Centro de Usinagem e posições utilizadas



Dessa maneira, os ensaios podem ser especificados:

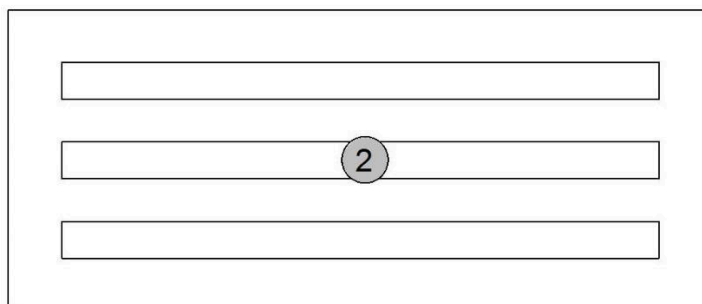
1. Primeira série de medições: A primeira medição foi realizada com o eixo-árvore posicionado no início do curso da máquina, tanto no eixo X, quanto no eixo Y, na posição 1. O impacto foi provocado na direção de X.

Figura 26: Posição 1



2. Segunda série de medições: A segunda medição também foi realizada com o eixo-árvore da máquina na posição 1. O impacto foi provocado na direção Y.
3. Terceira série de medições: A terceira medição foi a última realizada com o eixo-árvore na posição 1. O impacto foi provocado na direção Z.
4. Quarta série de medições: A quarta medição foi realizada com o eixo-árvore posicionado na metade do curso, tanto no eixo X, quanto no eixo Y, na posição 2. O impacto foi na direção X.

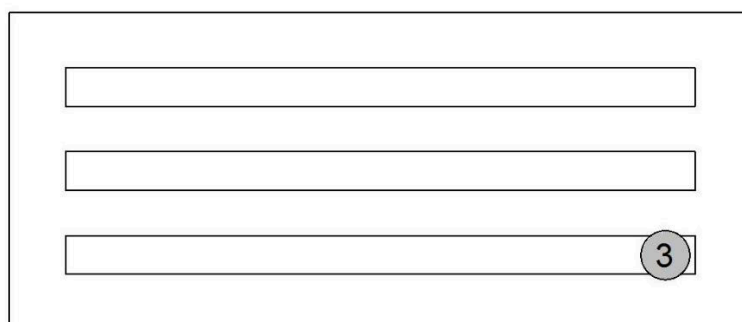
Figura 27: Posição 2



5. Quinta série de medições: A quinta medição também foi realizada com o eixo-árvore na posição 2. O impacto foi na direção Y.
6. Sexta série de medições: A sexta medição foi a última realizada com o eixo-árvore na posição 3. O impacto foi na direção Z.

7. Sétima série de medições A sétima medição foi realizada com o eixo-árvore posicionado no fim do curso da máquina, tanto no eixo X, quanto no eixo Y, na posição 3. O impacto foi na direção X.

Figura 28: Posição 3



8. Oitava série de medições: A oitava medição também foi realizada com o eixo-árvore na posição 3. O impacto foi na direção Y.
9. Nona série de medições: A nona medição foi a última realizada com o eixo-árvore na posição 3. O impacto foi na direção Z

4. Resultados e discussões

A partir dos experimentos, foi possível gerar 9 gráficos que determinaram as frequências de vibração do centro de usinagem CNC, para cada uma das configurações aplicadas. Os mesmos estão apresentados abaixo, e em seguida será feita uma análise do que é possível concluir:

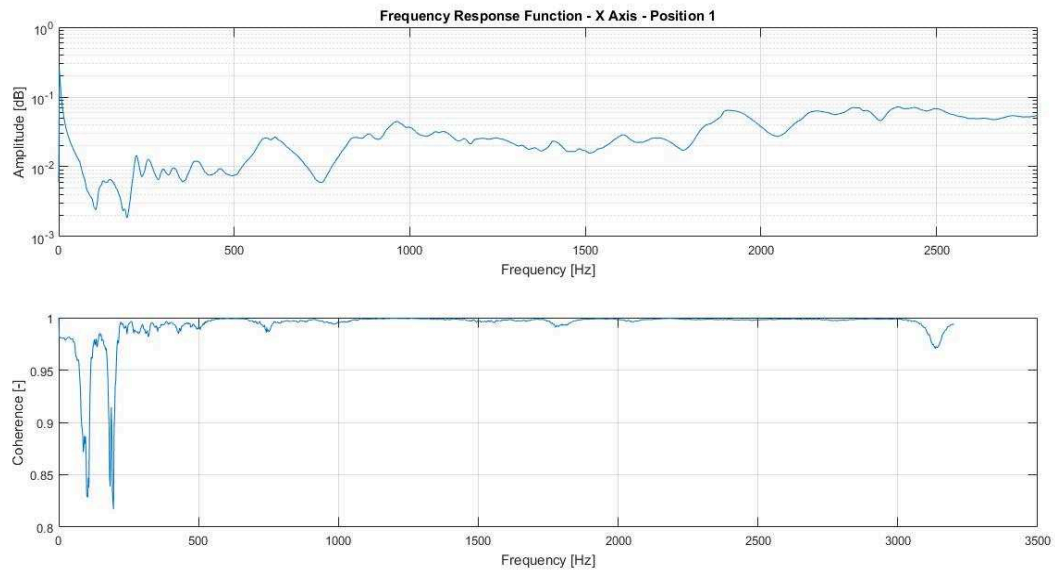
Medições realizadas com impacto na direção do eixo X:

- Posição 1:

Com a máquina na posição 1 e impacto no eixo X, foi obtido o seguinte espectro de frequências como resposta. É possível notar que até cerca de 250 Hz os valores da coerência são muito baixos, se fazendo necessário que os valores de amplitude até esse ponto sejam descartados.

Na faixa de operação da máquina, até 166,67 Hz, as amplitudes das vibrações variaram entre 10^{-3} dB e 10^{-2} dB e não ocorreram grandes picos que sinalizariam alguma frequência natural. O mesmo pode ser observado em frequências muito superiores às de rotação máxima da máquina que é de 166,67 Hz.

Figura 29: Espectro de frequência obtido com a máquina na posição 1 e impacto em X

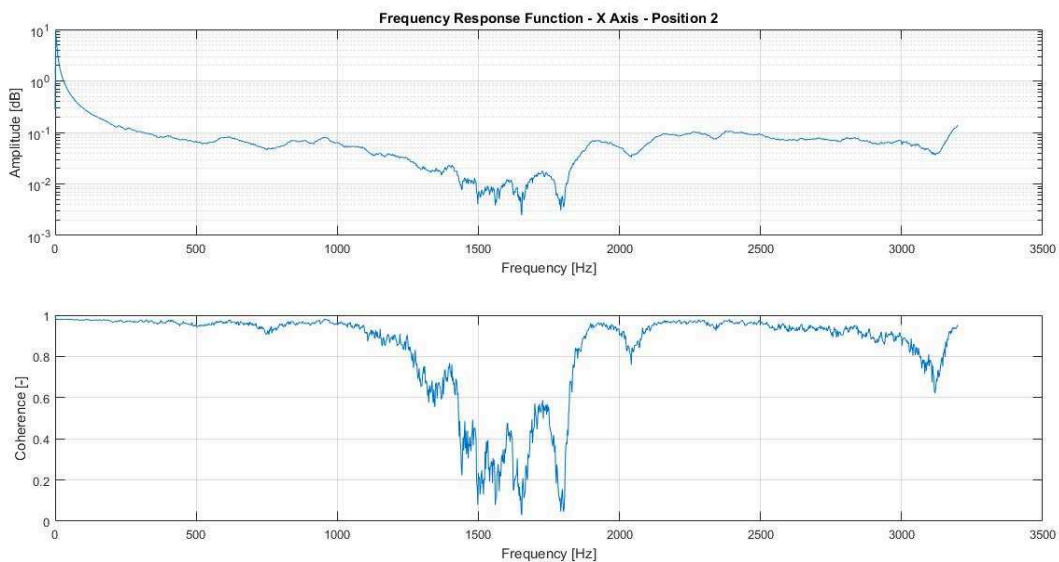


- Posição 2:

Com a máquina na posição 2 e impacto no eixo X, foi obtido o seguinte espectro de frequências como resposta. É possível notar que os valores de coerência são bons para frequências abaixo de 250 Hz, ao contrário do que ocorre na posição 1, estes caem na faixa entre 1200 e 2100 Hz, valores que já seriam ignorados de qualquer forma por estarem mais de 10 vezes superiores à rotação da máquina.

As amplitudes obtidas ficaram na faixa de 10^{-1} dB, inclusive na faixa de operação com rotação máxima (166,67 Hz). Também não houve a ocorrência de picos na amplitude, o que sinaliza que inexistem frequências naturais nessa faixa.

Figura 30: Espectro de frequência obtido com a máquina na posição 2 e impacto em X

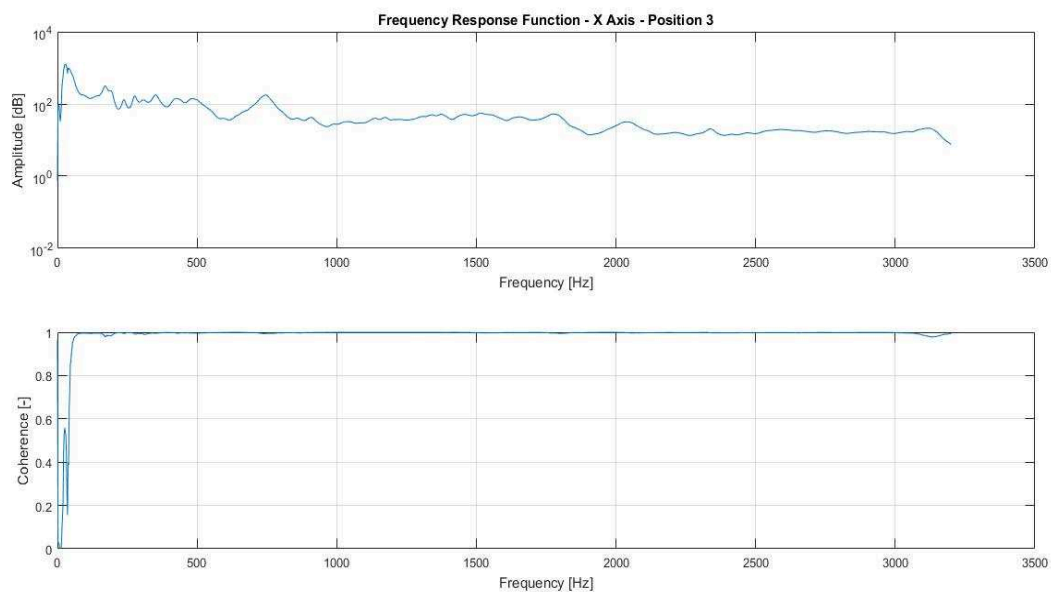


- Posição 3:

Com a máquina na posição 3 e impacto no eixo X, foi obtido o seguinte espectro de frequências como resposta. É possível notar que os valores de coerência são muito bons para qualquer frequência acima de aproximadamente 100 Hz, ainda dentro da faixa de operação do centro de usinagem, o que garante medições com maior precisão.

O resultado, no entanto, foi muito diferente dos obtidos nas posições 1 e 2 (que foram curvas relativamente similares), aqui foram constatadas amplitudes entre 10^2 dB e 10^4 dB, indicando que nesse ponto a máquina se torna muito menos estável. Entretanto, assim como nos ensaios anteriores não ocorreram grandes picos de amplitude, o que sinaliza que inexitem frequências naturais nessa faixa.

Figura 31: Espectro de frequência obtido com a máquina na posição 3 e impacto em X



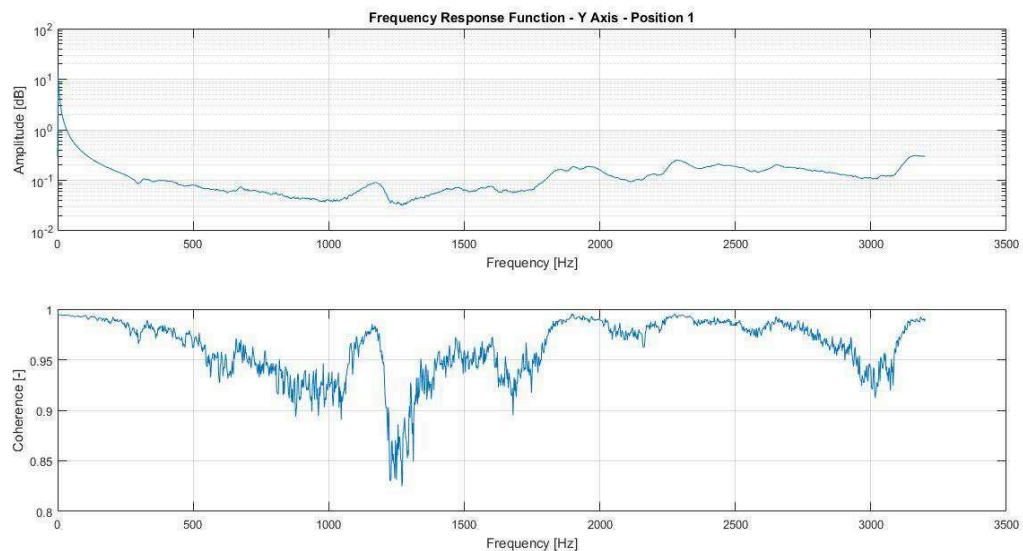
Medições realizadas com impacta na direção do eixo Y:

- Posição 1:

Com a máquina na posição 1 e impacto no eixo Y, foi obtido o seguinte espectro de frequências como resposta. É possível notar que a partir de 500 Hz os valores da coerência caem consideravelmente, tornando as medições de amplitudes posteriores incertas, porém como a faixa de operação do centro de usinagem é até 166,67 Hz isso não trará problemas.

É notável que as amplitudes medidas nesta posição com o impacto na direção Y são maiores do que as obtidas na direção X. Aqui observam-se amplitudes entre 10^0 e 10^{-1} Hz na faixa de operação, o que indica que num mesmo ponto o eixo Y da máquina é menos estável do que o eixo X. Novamente não foram percebidos picos de amplitude, comprovando que não existem frequências naturais nessa faixa.

Figura 32: Espectro de frequência obtido com a máquina na posição 1 e impacto em Y

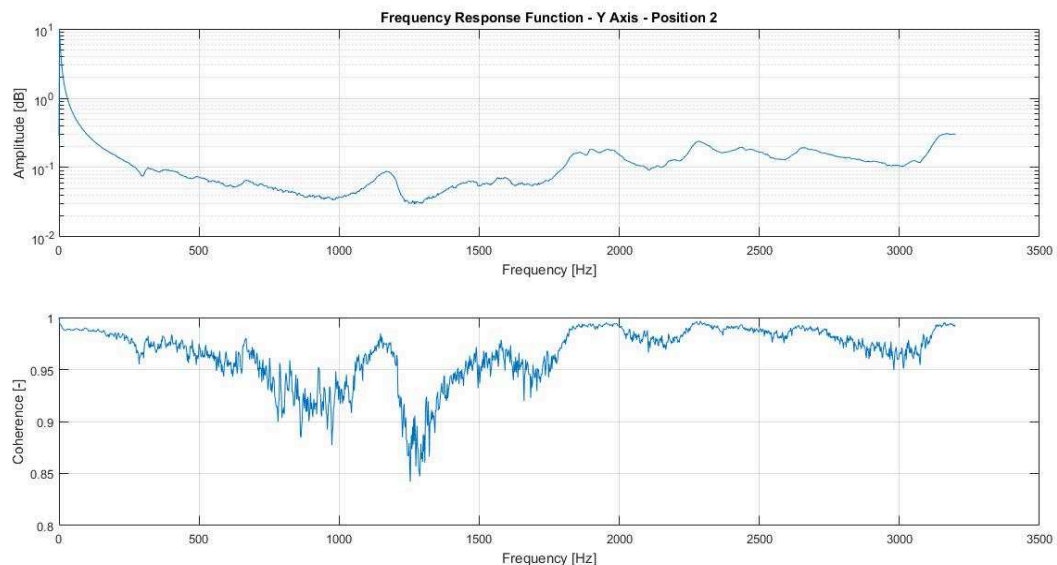


- Posição 2:

Com a máquina na posição 2 e impacto no eixo Y, foi obtido o seguinte espectro de frequências como resposta. É possível notar que os valores de coerência oscilam bastante, porém permanecem em valores relativamente bons até 500 Hz, como a rotação da máquina não passa de 166,67 Hz as medições tem boa utilidade.

Nesse ensaio, as amplitudes das vibrações variaram entre 10^0 dB e pouco mais que 10^{-1} dB na faixa de operação da máquina, sem a presença de picos de frequência natural. Os valores obtidos são ligeiramente superiores aos testes na mesma posição e com impacto no eixo X.

Figura 33: Espectro de frequência obtido com a máquina na posição 2 e impacto em Y

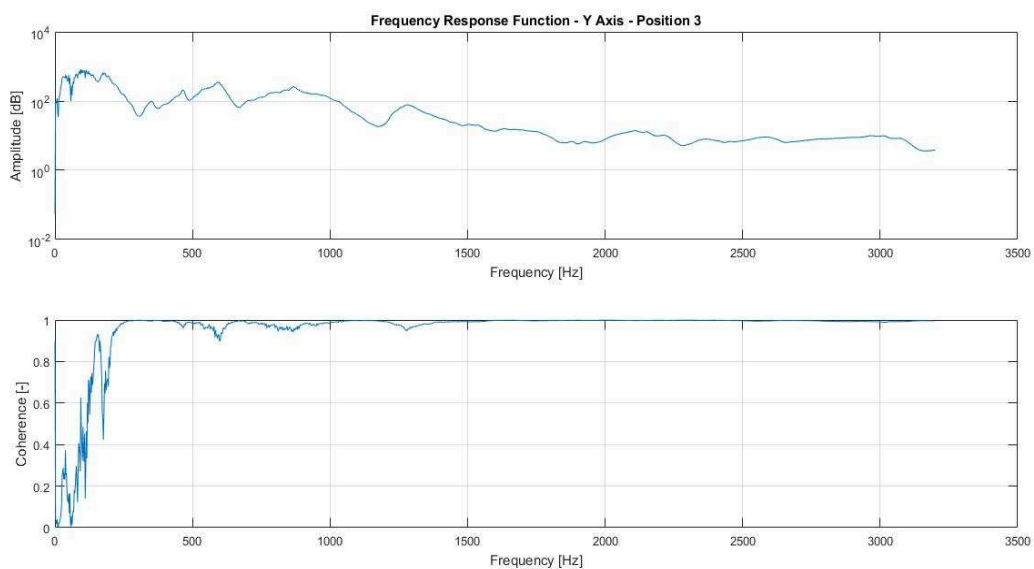


- Posição 3:

Com a máquina na posição 3 e impacto no eixo Y, foi obtido o seguinte espectro de frequências como resposta. É possível notar que os valores de coerência são baixos até cerca de 250 Hz, se estabilizando posteriormente.

Nesse ensaio, as amplitudes de medição e a própria forma do espectro divergiram muito se comparados com os ensaios nas posições 1 e 2. Assim como no eixo X os valores das amplitudes foram muito superiores, variando de 10^2 dB e 10^4 dB, aumentando as evidências de que esse é um ponto de instabilidade da máquina, mas ainda sem influência de frequências naturais.

Figura 34: Espectro de frequência obtido com a máquina na posição 3 e impacto em Y



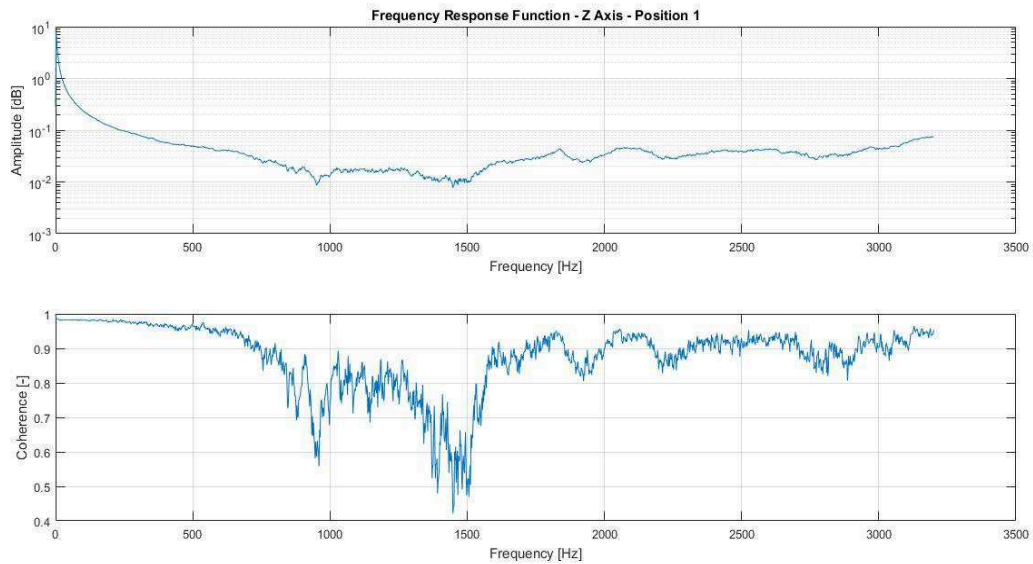
Medições realizadas com impacto na direção do eixo Z:

- Posição 1:

Com a máquina na posição 1 e impacto no eixo Z, foi obtido o seguinte espectro de frequências como resposta. É possível notar que a partir de 700 Hz os valores da coerência caem consideravelmente, tornando as medições de amplitudes posteriores incertas, porém como a faixa de operação do centro de usinagem é até 166,67 Hz isso não trará problemas.

Neste ensaio, foram obtidas amplitudes de vibração entre 10^1 dB e 10^{-2} dB. Como nos anteriores, não foram percebidos picos de amplitude, comprovando que não existem frequências naturais nessa faixa.

Figura 35: Espectro de frequência obtido com a máquina na posição 1 e impacto em Z

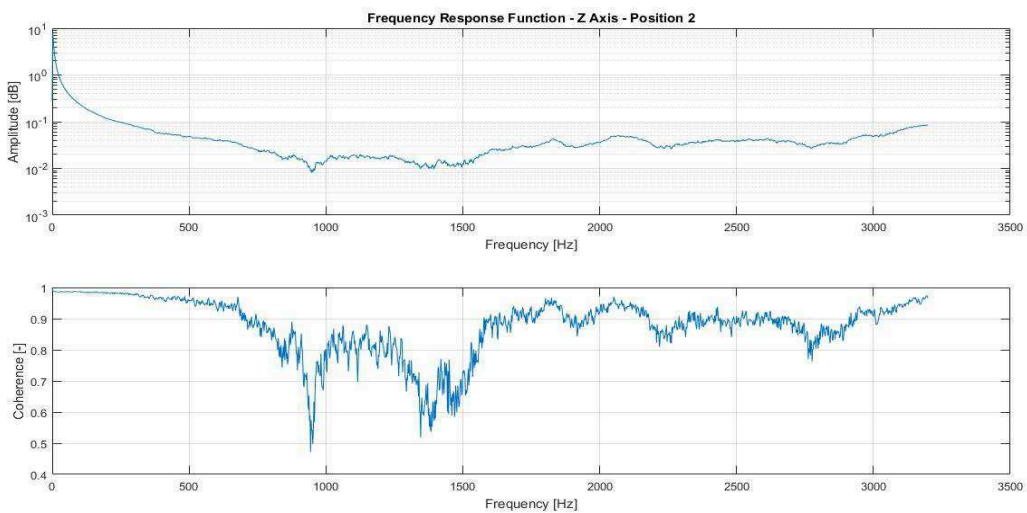


- Posição 2:

Com a máquina na posição 2 e impacto no eixo Z, foi obtido o seguinte espectro de frequências como resposta. Como na posição 1, é possível notar que a partir de 700 Hz os valores da coerência caem consideravelmente, tornando as medições de amplitudes posteriores incertas, porém como a faixa de operação do centro de usinagem é até 166,67 Hz isso não trará problemas.

Neste ensaio, foram obtidas amplitudes de vibração entre 10^{-1} dB e 10^{-2} dB. Como nos anteriores, não foram percebidos picos de amplitude, comprovando que não existem frequências naturais nessa faixa.

Figura 36: Espectro de frequência obtido com a máquina na posição 2 e impacto em Z

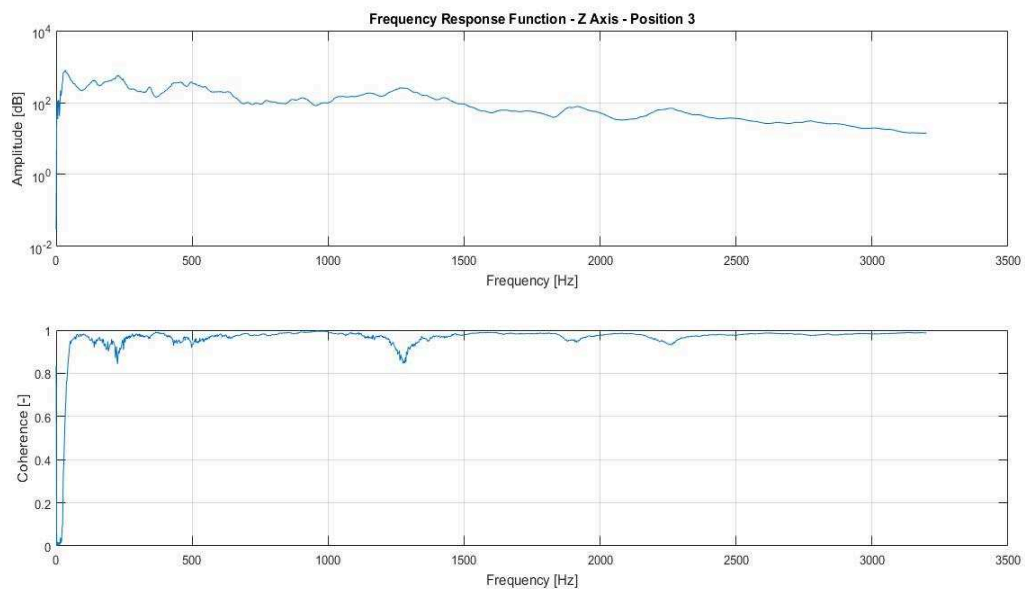


- Posição 3:

Com a máquina na posição 3 e impacto no eixo Z, foi obtido o seguinte espectro de frequências como resposta. Como na posição 1, é possível notar que a partir de cerca de 80 Hz os valores da coerência se estabilizam tornando as medições confiáveis.

Novamente o resultado obtido divergiu muito dos outros pontos. Como quando se realizaram impactos nos eixos X e Y, as amplitudes obtidas foram altas em comparação às outras posições da máquina, entre 10^2 dB e 10^4 dB, agravando ainda mais os indícios da posição 3 ser uma de instabilidade. Continuaram não havendo picos de frequência natural.

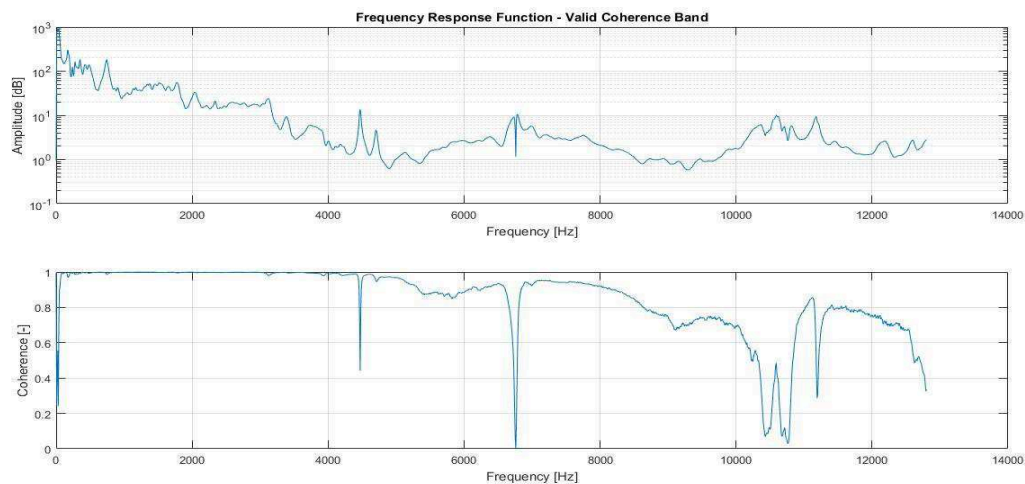
Figura 37: Espectro de frequência obtido com a máquina na posição 3 e impacto em Z



Buscando encontrar alguma frequência natural do centro de usinagem, foi realizado um último teste.

Neste a faixa de frequência utilizada foi muito alta, no entanto as amplitudes obtidas continuaram entre 10^0 dB e 10^3 dB, sem a presença de picos que indicariam se tais frequências fossem alcançadas.

Figura 38: Espectro de frequência obtido com altas frequências



5. Conclusões

A partir dos resultados coletados, foi possível tirar uma série de conclusões.

A primeira e mais importante delas, com certeza é o fato da máquina sem muito bem projetada, como é perceptível nos gráficos obtidos, as frequências naturais de vibração do centro de usinagem não ficaram evidentes nem mesmo em frequências altíssimas, muito superiores à rotação máxima do eixo da máquina (10.000 rpm ou 166,67 Hz). Dessa maneira não é necessário tomar nenhum tipo de precaução nesse sentido, a máquina não sofrerá com instabilidade devido a esse efeito, nem em rotação máxima.

Essa afirmação, no entanto, pode mudar. Se for utilizada durante uma operação de usinagem, alguma ferramenta que possa atenuar instabilidade do sistema, uma broca longa e de pequeno diâmetro por exemplo, essas vibrações poderiam gerar frequências altas, o que abriria possibilidade para aproximação às naturais.

Outra constatação importante, foi a determinação do eixo mais estável da máquina. Através dos gráficos, foi possível notar que o eixo “X” é cerca de 70 vezes mais rígido que o eixo “Y”. Dessa forma pode-se dizer que é mais recomendado guiar uma operação através desse eixo.

A respeito dos locais da máquina onde foram feitas as medições (posições 1, 2 e 3), conclui-se que a posição 3 é menos estável que as demais, visto que as amplitudes de frequências obtidas quando medidas nos 3 eixos foram imensamente superiores às das posições 1 e 2. Uma possível causa para esse fenômeno é o fato da posição se encontrar no final do eixo, eliminando possíveis folgas que aliviaríamos as vibrações da máquina.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Rio de Janeiro: ABNT, 1994.

ALTINTAS, Y. **Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations, and CNC Design**, 2000.

BRITO, J. N. **Desenvolvimento de um sistema inteligente híbrido para diagnóstico de falhas em motores de indução trifásicos**. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2002.

CAMPOS JÚNIOR, E. E. **Reestruturação da área de planejamento, programação e controle na Gerência de manutenção Portuária – CVRD**, 2006.

COMITTI, A. **Por que Investir em Manutenção Preditiva**, Revista Mecatronica Atual, 2004.

FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Materiais**. Editora Edgard Blücher, 1977.

FONSECA, A. **Vibrações**, 1964.

KARDEC, A.; NASCIF J. **Manutenção: função estratégica**. 3ª edição. Rio de Janeiro: Qualitymark: Petrobrás, 2009.

MONCHY, F. **A Função Manutenção**. São Paulo: Durban, 1987.

MOUBRAY, John. **RCM – Reliability Centered Maintenance**. Ed. SQL Brasil - 2ª edição, 1999.

NASCIMENTO, T. E. **Estudo de Máquinas CNC**, 2011.

NETTO, W. A. C. **A Importância e a Aplicabilidade da Manutenção Produtiva Total (TPM) nas Indústrias**. 2008.

POLLI, M. L. **Análise da Estabilidade Dinâmica do Processo de Fresamento a Altas Velocidades de Corte**, 2005.

RAO, S. S. **Vibrações Mecânicas**, 1986.

SILVA, M. P. T. **Aplicação de técnicas de manutenção preditiva para o aumento da confiabilidade de locomotivas diesel-elétricas**, 2012.

SOUZA, A. J. **Aplicação de multisensores no prognóstico da vida da ferramenta de corte em torneamento**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina, 2004.

SOUZA, A. J. **Processo de Fabricação por Usinagem**, 2011.

SOUZA, S. S.; LIMA, C. R. C. **Manutenção Centrada em Confiabilidade como Ferramenta Estratégica**, 2003.

TAVARES, L. A. **Administração Moderna de Manutenção**. 1ª edição. Rio de Janeiro: Novo Pólo, 2000.

TOBIAS, S.A. **Machine Tool Vibration**. Blackie and Sons Ltd, 1965.

VARGAS, B. R. M. **Análises Numérica e Experimental de Vibrações do Conjunto Eixo-Árvore de Um Centro de Usinagem**, 2016.

VARGAS, B. R. M., **Desvios dimensionais e geométricos induzidos no fresamento do aço ABNT D2**. 2012.

WECK, M., **Werkzeugmaschinen**. Aachen, Ed. Springer-Verlag, 2006.