



ANÁLISE DO PROCESSO PRODUTIVO DE SERRAS CIRCULARES PARA O CORTE DE MADEIRA NA EMPRESA FREZITE

RUI MIGUEL GOLIM FERNANDES ALVES

novembro de 2019

**ANÁLISE DO PROCESSO PRODUTIVO DE SERRAS
CIRCULARES PARA O CORTE DE MADEIRA NA EMPRESA
FREZITE®**

Rui Miguel Golim Fernandes Alves
1140483

2019

Instituto Superior de Engenharia do Porto
Departamento de Engenharia Mecânica



POLITÉCNICO
DO PORTO

isep

ANÁLISE DO PROCESSO PRODUTIVO DE SERRAS CIRCULARES PARA O CORTE DE MADEIRA NA EMPRESA FREZITE®

Rui Miguel Golim Fernandes Alves
Número de aluno: 1140483

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação do Professor Doutor Hernâni Miguel Reis Lopes, coorientação do Professor Doutor Jorge Manuel Costa Da Fonseca Justo e supervisão do Eng. Paulo Neves.

2019

Instituto Superior de Engenharia do Porto
Engenharia Mecânica



POLITÉCNICO
DO PORTO

isep

JÚRI

Presidente

Doutor Arnaldo Manuel Guedes Pinto

Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Orientador

Doutor Hernâni Miguel Reis Lopes

Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Coorientador

Doutor Jorge Manuel Costa Da Fonseca Justo

Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Arguente

Doutor Mário Augusto Pires Vaz

Professor Associado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

AGRADECIMENTOS

No decorrer esta tese foram enumeras as pessoas que acreditaram incansavelmente no meu trabalho, assim sendo gostaria de agradecer a todas as pessoas que contribuíram para o bom desenrolar deste projeto.

Há, no entanto, algumas pessoas que foram fundamentais para o bom desenrolar do trabalho. Agradeço desde já ao Professor Doutor Hernâni Miguel Reis Lopes pelo conhecimento transmitido e pelo apoio na realização deste trabalho, além da motivação dada ao longo de todo o projeto. Agradeço também ao Professor Doutor Jorge Manuel Costa Da Fonseca Justo pela cedência do Laboratório de Mecânica Aplicada, LMA e pelo conhecimento em outras áreas das vibrações.

Uma vez que grande parte do trabalho foi desenvolvido na *FREZITE*[®], gostaria de agradecer as condições de trabalho oferecida e a oportunidade dada para demonstrar o meu conhecimento. Agradeço ao Eng. Paulo Neves pelo conhecimento transmitido e pela sua contribuição ao nível da minha integração na empresa e ao Eng. Willian Afonso pela confiança e preocupação transmitida ao longo do desenvolvimento desta dissertação, bem como na transmissão de conhecimento noutras áreas desenvolvidas pela empresa. Agradeço a todas as pessoas que ajudaram na minha integração dentro da empresa e pelos bons momentos passados.

Por fim, gostaria de agradecer a toda a minha família e amigos pelo apoio firme ao longo desta etapa.

Nome do autor: Rui Miguel Golim Fernandes Alves

Palavras-chave

Serras circulares, Vibrações, Processo produtivo, Controlo de Qualidade

RESUMO

Este trabalho resultou da necessidade de controlo do processo produtivo das serras circulares produzida pela fábrica de ferramentas para o corte de madeira pertencente ao grupo *FREZITE*[®]- Ferramentas de Corte, S.A. O principal objetivo é identificar as etapas mais críticas do processo produtivo e propor soluções corretivas para minimizar a variabilidade no desempenho das serras fabricadas. Para concretizar este objetivo realizou-se um estudo sobre o comportamento das serras circulares em serviço e sobre o seu processo de fabrico. A partir deste estudo foi identificado como melhor parâmetro para o controlo do processo produtivo das serras em cada etapa, as frequências naturais de vibração da serra. Para a identificação das frequências naturais de vibração da serra por via experimental foi necessário aprofundar os conhecimentos sobre os conceitos fundamentais da análise de vibrações e procedimentos para a sua medição experimental. Ao nível da montagem experimental, foi necessário desenvolver um sistema de apoio e analisar a influência da rigidez, da massa e dos pontos de excitação na medição das frequências naturais de vibração. Um estudo preliminar foi realizado em 5 serras retiradas de diferentes etapas do processo de fabrico, com a finalidade de determinar a variabilidade das frequências naturais e afinar todo o processo de medição. Seguiu-se um estudo detalhado baseado na medição da massa, excentricidade, batimento, tensionamento e frequências naturais de 3 serras selecionadas ao longo de todo o processo fabrico, com o objetivo de averiguar a sensibilidade do método, bem como, cimentar estes conhecimentos. Numa primeira fase, esta metodologia foi aplicada a um sistema de controlo de qualidade implementada em cada etapa da linha de produção, com o intuito de validar cada etapa e verificar as variações introduzidas pelas mesmas.

Como primeira abordagem ao problema é apresentado um estudo detalhado sobre as serras circulares, processo de corte e processo produtivo de uma ferramenta de corte. Os produtores de ferramentas para o corte de madeira, como é o caso das serras circulares, tem cada vez maior preocupação com o comportamento dinâmico, visto que as vibrações influenciam as condições de corte (acabamento e desperdício de corte). Durante o processo produtivo são desenvolvidos desequilíbrios que influenciam as velocidades críticas e dão origem baixa qualidade de corte. Assim sendo, foi avaliada cada uma das etapas, com recurso aos conhecimentos adquiridos na área das vibrações, retirando todos os parâmetros para o conhecimento do comportamento dinâmico da serra, através de métodos experimentais em regime quase livre.

Através da comparação de resultados percebe-se quais as etapas mais críticas, que aplicam variações sem padrão, ao longo de um lote de serras. Pode-se, após esta

análise, reduzir a variabilidade entre serras, através do ajuste de parâmetros e sistemas de posicionamento, entre outras melhorias expostas durante esta dissertação.

Com a implementação do sistema de controlo de cada uma das etapas do processo produtivo, fica, então, desenvolvido o controlo de qualidade do sistema produtivo em regime contínuo, que conseqüentemente fornece uma quantificação em termos de comportamento dinâmico das serras ao longo da linha de produção.

KEYWORDS

Circular saws, Vibrations, Production process, Quality control

ABSTRACT

This work resulted from the need to control the production process of the circular saws for cutting wood, produced by the FREZITE®-Cutting Tools, S.A.. The main objective is to identify the most critical stages of the production process and to propose corrective solutions to minimize variability in the performance of the manufactured saws. To achieve this objective, a study was conducted on the behavior of the circular saws in service and their manufacturing process. From this study the natural frequencies of saw were identified as the best parameter for the control of the productive process of the saws in each stage. For the identification of the natural frequency of vibration of the saw by experimental method it was necessary to deepen the knowledge about the fundamental concepts of the vibration analysis and procedures for its experimental measurement. At the experimental set up, it was necessary to develop a support system and to analyze the influence of stiffness, mass, excitation and measurement points on the natural vibration frequencies. A preliminary study was carried out on 5 saws taken from different stages of the manufacturing process in order to determine the variability of natural frequencies and to fine tune the entire measurement process. This was followed by a detailed study based on the measurement of mass, eccentricity, tapping, tensioning and natural frequencies of 3 selected saws throughout the manufacturing process, with the objective of ascertaining sensitivity of the method and to cement this knowledge. In a first phase, this methodology was applied to a quality control system implemented at each stage of the production line, in order to validate each stage and check the variations introduced by them.

As a first, it is presented a detailed study to approach to the problem on the circular saws, cutting process and productive process of a cutting tool. Producers of wood-cutting tools, such as circular saws, are increasingly concerned about their dynamic behavior, as vibrations influence cutting conditions (finishing and cutting waste). Imbalances are generated during the production process giving rise to critical speeds and poor cut quality. Thus, each stage was evaluated, using the knowledge acquiring in the area of vibrations, removing all parameters for the knowledge of the dynamic behavior of the saw, through the use of experimental methods.

Comparing the results, it can be seen which are the most critical stages of the production line, by analyzing a lot of saws. After this analysis, it is possible to reduce the variability between saws by adjusting parameters and positioning systems, among other improvements presented during this dissertation.

With the implementation of the control system in each stage, we can say that the quality control of the continuous production system is developed and can provides us a quantification in terms of the dynamic behavior of the saws along the production line.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Lista de Abreviaturas

VLE	Valor Limite de Exposição
FW	Forward Whirling
BW	Backward Whirling
NP	Norma Portuguesa
ISO	International Organization for Standardization
EN	Norma Europeia
FRF	Função de Resposta em Frequência
MACij	Modal Assurance Criterion
ZTA	Zona Termicamente Afetada
DOF	Graus de Liberdade
FFT	Fast Fourier Transform
PME	Pequena Média Empresa
MEF	Método de Elementos Finitos
3D	Três Dimensões
SISO	Single Input Single Output
MIMO	Multiple Input Multiple Output
f_r	Frequência de Ressonância
$H(\omega)$	Função Deslocabilidade
$F(\omega)$	Espetro da Excitação
$X(\omega)$	Espetro da Resposta
$G_{FX}(\omega)$	Espetro Cruzado Força e Resposta
$G_{XX}(\omega)$	Auto Espetro Resposta
$G_{FF}(\omega)$	Auto Espetro Força
$\gamma(\omega)^2$	Função Coerência
H_1	Função Deslocabilidade Ruído na Saída
H_2	Função Deslocabilidade Ruído na Entrada
$\phi(\omega)$	Fase
ΣF	Somatório de todas as forças que atuam na direção
m	Massa
\ddot{x}	Aceleração
e	Espessura do material

Lista de Unidades

HRC	Dureza Rockwell C
Hz	Hertz
m	Metro
°	Grau
s	Segundo
Kg	Quilograma

Lista de Símbolos

n	Diâmetros nodais
m	Círculos nodais

GLOSSÁRIO DE TERMOS

Termo	Designação
<i>Aliasing</i>	É um tipo de erro que se verifica quando a frequência de amostragem é inferior ao do sinal analisado.
<i>Leakage</i>	É um tipo de erro que ocorre no domínio da frequência devido à limitação do comprimento do registo temporal antes do cálculo da FFT.
<i>Shift</i>	Variação.
<i>Pack</i>	Pacote.
<i>Windowing</i>	Processo para forçar o sinal a ser nulo no início e no fim da amostra.
Anti-nodos	Pontos onde a amplitude de vibração é a máxima.
Nodos	Pontos onde a amplitude de vibração é nula.

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1- ORIENTAÇÃO DAS FIBRAS DA MADEIRA [3].	3
FIGURA 2- TRANSIÇÃO DE FERRAMENTAS DE CORTE [5]–[8].	4
FIGURA 3- MODOS DE VIBRAÇÃO DA SERRA EM SERVIÇO [16].	6
FIGURA 4- LOGOTIPO DA FREZITE.	7
FIGURA 5- FERRAMENTAS DE CORTE DE ALTA QUALIDADE[20].	13
FIGURA 6- OPERAÇÃO DE CORTE A LASER DO CORPO DA SERRA.	14
FIGURA 7- CONJUNTO MONTADO CONSTITUÍDO PELOS PRATOS DE APERTO, ANILHAS DE ALUMÍNIO, PINO DE GUIAMENTO E PELO CONJUNTO DE SERRAS A PROCESSAR [21].	15
FIGURA 8- OPERAÇÃO DE TENSIONAMENTO DO CORPO DA SERRA CIRCULAR.[1].	16
FIGURA 9- CONTROLO DO BATIMENTO E TENSIONADO [1].	17
FIGURA 10- OPERAÇÃO DE RETIFICAÇÃO DO FURO.	17
FIGURA 11- OPERAÇÃO DE RETIFICAÇÃO DOS ENCAIXES PARA RECEBER AS PASTILHAS DE CORTE.	18
FIGURA 12- OPERAÇÃO DE SOLDADURA DAS PASTILHAS DE CORTE AO CORPO DA SERRA.	18
FIGURA 13- OPERAÇÃO DE POLIMENTO COM MÓ DA SERRA.	19
FIGURA 14- OPERAÇÃO DE AFIAMENTO DA SERRA.	20
FIGURA 15- GEOMETRIA DO DENTE DO TIPO TF.	20
FIGURA 16- GRAVAÇÃO DO LOGOTIPO DA EMPRESA E DA REFERÊNCIA DA SERRA.	21
FIGURA 17- LAYOUT DA LINHA DE PRODUÇÃO DAS SERRAS.	21
FIGURA 18- GRAUS DE LIBERDADE E REPRESENTAÇÃO DO MODO DE VIBRAÇÃO A PARTIR DE MEDIÇÕES EXPERIMENTAIS (QUADRATURE PICKING) [23].	28
FIGURA 19- MODOS DE VIBRAÇÃO NUMA PLACA CIRCULAR, PARA: (A) EXTREMIDADE LIVRE E (B) EXTREMIDADE FIXA. O NÚMERO DO MODO (N,M) CORRESPONDE AO NÚMERO DE DIÂMETROS NODAIS (N) E DE CÍRCULOS NODAIS (M)[26].	29
FIGURA 20- PROPRIEDADES DA ONDA SINUSOIDAL, REPRESENTAÇÃO DE UMA RESPOSTA HARMÓNICA.	31
FIGURA 21- REPRESENTAÇÃO DO DIAGRAMA DE CAMPBELL[1].	32
FIGURA 22- REPRESENTAÇÃO DA FRF DO TIPO ACELERÂNCIA E A RESPECTIVA FUNÇÃO COERÊNCIA [31].	36
FIGURA 23- IDENTIFICAÇÃO DAS FREQUÊNCIAS NATURAIS DE VIBRAÇÃO A PARTIR DOS VALORES MÁXIMOS DA FRF.	36
FIGURA 24- REPRESENTAÇÃO DO GRÁFICO CORRESPONDENTE À MATRIZ MAC [32].	37
FIGURA 25- A) EXCITADOR ELETROMAGNÉTICO. B) MARTELO DE IMPACTO.	38
FIGURA 26- REPRESENTAÇÃO DO AUTOESPECTRO DO SINAL DA FORÇA E DEFINIÇÃO DA GAMA ÚTIL DE FREQUÊNCIAS.	38
FIGURA 27- REPRESENTAÇÃO DA FORÇA NO TEMPO PRODUZIDA PELO MARTELO DE IMPACTO.	39
FIGURA 28- REPRESENTAÇÃO DA ACELERAÇÃO NO TEMPO PRODUZIDA REGISTRADA PRA UMA ESTRUTURA EM VIBRAÇÃO LIVRE.	39
FIGURA 29- IMAGENS DE TRANSDUTORES USADOS NA MEDIÇÃO DA RESPOSTA DA ESTRUTURA: A) ACELERÓMETRO[33]. B) LASER VIBROMETER[34]. C) MICROFONE[35].	40
FIGURA 30- FORMAS DE LIGAÇÃO DE UM ACELERÓMETRO À ESTRUTURA [29].	41
FIGURA 31- ANALISADOR DINÂMICO DE SINAL OROS® MODELO OR35.	42

FIGURA 32- FLUXOGRAMA COM AS ETAPAS PARA A IDENTIFICAÇÃO DAS FREQUÊNCIAS NATURAIS DE VIBRAÇÃO DA SERRA.....	45
FIGURA 33- POSIÇÕES UTILIZADAS NOS ENSAIOS DE VALIDAÇÃO.....	49
FIGURA 34- MONTAGEM EXPERIMENTAL PARA A MEDIÇÃO DAS FREQUÊNCIAS NATURAIS DE VIBRAÇÃO DA SERRA COM O SISTEMA DE APOIO EM BORRACHA.....	50
FIGURA 35- MONTAGEM EXPERIMENTAL PARA A MEDIÇÃO DAS FREQUÊNCIAS NATURAIS DE VIBRAÇÃO DA SERRA SUSPENSA POR FIO.....	50
FIGURA 36- MONTAGEM EXPERIMENTAL PARA A IDENTIFICAÇÃO DAS FREQUÊNCIAS NATURAIS DE VIBRAÇÃO COM BASE NA ACELERAÇÃO MEDIDA EM DIFERENTES POSIÇÕES ATRAVÉS DO ACELERÓMETRO.....	52
FIGURA 37- MONTAGEM EXPERIMENTAL PARA A IDENTIFICAÇÃO DAS FREQUÊNCIAS NATURAIS DE VIBRAÇÃO COM BASE NA PRESSÃO ACÚSTICA MEDIDA ATRAVÉS DO MICROFONE.....	52
FIGURA 38- A) GUIA DESENVOLVIDO PARA APLICAR NO APOIO. B) CENTRADOR.....	54
FIGURA 39- APOIO FREZITE COM AS MELHORIAS APLICADAS.....	54
FIGURA 40- SERRAS ENSAIADAS: A) APÓS A RETIFICAÇÃO DO CORPO, B) APÓS O TENSIONADO, C) APÓS RETIFICAÇÃO DO FURO E DOS ENCAIXES, C) APÓS A BRASAGEM DAS PASTILHAS DE CORTE, E) APÓS O AFIAMENTO DAS PASTILHAS DE CORTE.....	55
FIGURA 41- DESENHO DA SERRA 863.350.054.30.....	57
FIGURA 42- CHAPA UTILIZADA PARA O CORTE DO CORPO DA SERRA.....	58
FIGURA 43- DISPOSIÇÃO DAS SERRAS CONSOANTE O LOCAL DA CHAPA.....	58
FIGURA 44- MEDIÇÃO DA EXCENTRICIDADE DA SERRA NA MÁQUINA SEMIAUTOMÁTICA.....	59
FIGURA 45- ESQUEMA EXPLICATIVO DA MONTAGEM DAS SERRA NA PRESENÇA, COM: A) IDENTIFICAÇÃO DA POSIÇÃO, B) IMAGEM DA COLOCAÇÃO NO FORNO.....	61
FIGURA 47- ETAPA DE TENSIONAMENTO DA SERRA.....	65
FIGURA 48- ETAPA DE RETIFICAÇÃO DO FURO COM UMA TOLERÂNCIA G6.....	66
FIGURA 49- ETAPA DE RETIFICAÇÃO DO ENCAIXE.....	68
FIGURA 50- PROCESSO DE BRASAGEM DAS PASTILHAS DE CORTE AO CORPO DA SERRA.....	69
FIGURA 51- PROCESSO DE DECAPAGEM POR JATO DE AREIA.....	71
FIGURA 52- IMAGEM DAS SERRAS CIRCULARES PARA O CORTE DE MADEIRA NO FINAL DO PROCESSO PRODUTIVO.....	74
FIGURA 53- CARATERÍSTICAS TÉCNICAS DO MARTELO DE IMPACTO, MODELO 086C01, UTILIZADO NA REALIZAÇÃO DAS MEDIÇÕES DAS FREQUÊNCIAS NATURAIS.....	91
FIGURA 54- CARATERÍSTICAS TÉCNICAS DO MARTELO DE IMPACTO, MODELO 086C03, UTILIZADO NA REALIZAÇÃO DAS MEDIÇÕES DAS FREQUÊNCIAS NATURAIS.....	91
FIGURA 55- CARATERÍSTICAS TÉCNICAS DO ACELERÓMETRO, MODELO 352C22, UTILIZADO NA REALIZAÇÃO DAS MEDIÇÕES DAS FREQUÊNCIAS NATURAIS.....	92
FIGURA 56- CARATERÍSTICAS TÉCNICAS DO ACELERÓMETRO, MODELO 357A08, UTILIZADO NA REALIZAÇÃO DAS MEDIÇÕES DAS FREQUÊNCIAS NATURAIS.....	92
FIGURA 57- CARATERÍSTICAS TÉCNICAS DO CONVERSOR, MODELO 422E52, UTILIZADO NA REALIZAÇÃO DAS MEDIÇÕES DAS FREQUÊNCIAS NATURAIS.....	93
FIGURA 58- PRINCIPAIS CARATERÍSTICAS DO MODELO UTILIZADO NOS TESTES DESENVOLVIDOS DURANTE ESTA DISSERTAÇÃO [37].....	95
FIGURA 59- EXEMPLO DA FRF MEDIDA NA SERRA 3 APÓS O CORTE A LASER.....	97

FIGURA 60- ESQUEMA DIMENSIONAL DA ANILHA PARA MEDIÇÃO DA EXCENTRICIDADE DA SERRA..... 111

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1- TIPO DE EXCITAÇÃO.	37
TABELA 2- COMPARAÇÃO DAS FREQUÊNCIAS NATURAIS DA SERRA MODELO 860.300.096.30, COM APOIOS EM BORRACHA PARA DIFERENTES POSIÇÕES E LIVRE NO ESPAÇO.	51
TABELA 3- IDENTIFICADAS A PARTIR DA PRESSÃO ACÚSTICA E DA ACELERAÇÃO MEDIDA EM 4 DIFERENTES PONTOS.	52
TABELA 4- VARIAÇÃO DAS FREQUÊNCIAS NATURAIS DE VIBRAÇÃO OBTIDOS COM O ACELERÓMETRO RELATIVAMENTE ÀS OBTIDAS ATRAVÉS DO MICROFONE;	53
TABELA 5- FREQUÊNCIAS NATURAIS DAS SERRAS IDENTIFICADAS NAS DIFERENTES ETAPAS DO PROCESSO DE FABRICO.	56
TABELA 6- VALORES MÉDIOS E DESVIO PADRÃO DAS FREQUÊNCIAS NATURAIS DE TRÊS SERRA APÓS O CORTE LASER.	59
TABELA 7- PARÂMETROS MEDIDOS DURANTE CONTROLO DAS SERRAS APÓS A ETAPA DE POLIMENTO COM LIXA.	60
TABELA 8- VALOR MÉDIO E DESVIO PADRÃO DA VARIAÇÃO DAS FREQUÊNCIAS NATURAIS NAS TRÊS SERRAS, PRODUZIDO PELO POLIMENTO COM LIXA.	61
TABELA 9- PARÂMETROS MEDIDOS DURANTE CONTROLO DAS SERRAS APÓS O REVENIDO.	62
TABELA 10- VALOR MÉDIO E DESVIO PADRÃO DA VARIAÇÃO DAS FREQUÊNCIAS NATURAIS NAS TRÊS SERRAS, PRODUZIDO PELO REVENIDO.	63
TABELA 11- PARÂMETROS MEDIDOS DURANTE CONTROLO DAS SERRAS APÓS A RETIFICAÇÃO DO CORPO.	63
TABELA 12- VALOR MÉDIO E DESVIO PADRÃO DA VARIAÇÃO DAS FREQUÊNCIAS NATURAIS NAS TRÊS SERRAS PELA RETIFICAÇÃO DO CORPO DA SERRA.	64
TABELA 13- PARÂMETROS MEDIDOS DURANTE CONTROLO DAS SERRAS APÓS O TENSIONAMENTO.	65
TABELA 14- VALOR MÉDIO E DESVIO PADRÃO DA VARIAÇÃO DAS FREQUÊNCIAS NATURAIS NAS TRÊS SERRAS, PRODUZIDO PELO TENSIONAMENTO.	66
TABELA 15- PARÂMETROS MEDIDOS DURANTE CONTROLO DAS SERRAS APÓS A RETIFICAÇÃO DO FURO.	67
TABELA 16- VALOR MÉDIO E DESVIO PADRÃO DA VARIAÇÃO DAS FREQUÊNCIAS NATURAIS NAS TRÊS SERRAS, PRODUZIDO PELA RETIFICAÇÃO DO FURO.	67
TABELA 17- PARÂMETROS MEDIDOS DURANTE CONTROLO DAS SERRAS APÓS A RETIFICAÇÃO DOS ENCAIXES.	68
TABELA 18- VALORES MÉDIOS E DESVIO PADRÃO DA VARIAÇÃO DAS FREQUÊNCIAS NATURAIS NAS TRÊS SERRAS, PRODUZIDO PELA RETIFICAÇÃO DO ENCAIXE.	69
TABELA 19- PARÂMETROS MEDIDOS DURANTE CONTROLO DAS SERRAS APÓS A BRASAGEM DAS PASTILHAS DE CORTE.	70
TABELA 20- VALOR MÉDIO E DESVIO PADRÃO DA VARIAÇÃO DAS FREQUÊNCIAS NATURAIS NAS TRÊS SERRAS, PRODUZIDO PELA BRASAGEM DA PASTILHA DE CORTE.	70
TABELA 21- PARÂMETROS MEDIDOS DURANTE CONTROLO DAS SERRAS APÓS A DECAPAGEM.	71
TABELA 22- VALOR MÉDIO E DESVIO PADRÃO DA VARIAÇÃO DAS FREQUÊNCIAS NATURAIS NAS TRÊS SERRAS, PRODUZIDO PELA DECAPAGEM POR JATO DE AREIA.	71

TABELA 23- PARÂMETROS MEDIDOS DURANTE CONTROLO DAS SERRAS APÓS O POLIMENTO COM MÓ.	72
TABELA 24- VALOR MÉDIO E DESVIO PADRÃO DA VARIAÇÃO DAS FREQUÊNCIAS NATURAIS NAS TRÊS SERRAS, PRODUZIDO PELO POLIMENTO COM MÓ.	72
TABELA 25- PARÂMETROS MEDIDOS DURANTE CONTROLO DAS SERRAS APÓS O AFIAMENTO DAS PASTILHAS.....	73
TABELA 26- VALOR MÉDIO E DESVIO PADRÃO DA VARIAÇÃO DAS FREQUÊNCIAS NATURAIS NAS TRÊS SERRAS PRODUZIDO PELO AFIAMENTO.	73
TABELA 27- APRESENTAÇÃO DO FATOR DE INFLUÊNCIA F_M , OBTIDO PARA CADA OPERAÇÃO DO PROCESSO PRODUTIVO DAS SERRAS.;.....	74
TABELA 28- APRESENTAÇÃO DO PARÂMETRO GRAU DE CONTROLO S/F, OBTIDO PARA CADA OPERAÇÃO DO PROCESSO PRODUTIVO DAS SERRAS.	76
TABELA 29- TIPOS DE AFIAMENTOS DAS PASTILHAS UTILIZADOS, QUE PROPORCIONA DIFERENTES FORÇAS DE CORTE.....	94
TABELA 30- ESPESSURA DA CHAPA EM 4 PONTOS E RESPECTIVA MÉDIA.	95
TABELA 31- VALORES DA EXCENTRICIDADE MEDIDOS NAS 6 SERRAS OBTIDAS DA MESMA CHAPA APÓS O CORTE A LASER.....	96
TABELA 32- VALORES DA MASSA MEDIDOS NAS 6 SERRAS OBTIDAS DA MESMA CHAPA APÓS O CORTE A LASER.....	96
TABELA 33- VALORES DA ESPESSURA MEDIDOS NAS 6 SERRAS OBTIDAS DA MESMA CHAPA APÓS O CORTE A LASER.....	96
TABELA 34- VALORES DO BATIMENTO MEDIDO NAS 6 SERRAS APÓS O CORTE A LASER.....	97
TABELA 35- FREQUÊNCIAS NATURAIS MEDIDAS DAS 3 SERRAS APÓS O CORTE A LASER.	97
TABELA 36- VALORES DA EXCENTRICIDADE MEDIDOS NAS 3 SERRAS APÓS O POLIMENTO COM LIXA. ...	98
TABELA 37- VALORES DA MASSA MEDIDOS NAS 3 SERRAS APÓS O POLIMENTO COM LIXA.....	98
TABELA 38- VALORES DA ESPESSURA MEDIDOS NAS 3 SERRAS APÓS O POLIMENTO COM LIXA.	98
TABELA 39- VALORES DO BATIMENTO MEDIDOS NAS 3 SERRAS APÓS O POLIMENTO COM LIXA.....	98
TABELA 40- FREQUÊNCIAS NATURAIS MEDIDAS DAS 3 SERRAS APÓS O POLIMENTO COM LIXA.	99
TABELA 41- VALORES DA EXCENTRICIDADE MEDIDOS NAS 3 SERRAS APÓS O REVENIDO.	99
TABELA 42- VALORES DA ESPESSURA MEDIDOS NAS 3 SERRAS APÓS O REVENIDO.	100
TABELA 43- VALORES DA MASSA MEDIDOS NAS 3 SERRAS APÓS O REVENIDO.....	100
TABELA 44- VALORES DO BATIMENTO MEDIDOS NAS 3 SERRAS APÓS O REVENIDO.....	100
TABELA 45- FREQUÊNCIAS NATURAIS MEDIDAS DAS 3 SERRAS APÓS O REVENIDO.	101
TABELA 46- VALORES DA MASSA MEDIDOS NAS 3 SERRAS APÓS A RETIFICAÇÃO DO CORPO.	102
TABELA 47- VALORES DA ESPESSURA MEDIDOS NAS 3 SERRAS APÓS A RETIFICAÇÃO DO CORPO.....	102
TABELA 48- VALORES DO BATIMENTO MEDIDOS NAS 3 SERRAS APÓS A RETIFICAÇÃO DO CORPO	102
TABELA 49- FREQUÊNCIAS NATURAIS MEDIDAS DAS 3 SERRAS APÓS A RETIFICAÇÃO DO CORPO.	103
TABELA 50- VALORES DO BATIMENTO MEDIDOS NAS 3 SERRAS APÓS O TENSIONAMENTO.....	103
TABELA 51- FREQUÊNCIAS NATURAIS MEDIDAS DAS 3 SERRAS APÓS O TENSIONAMENTO.	104
TABELA 52- VALORES DO DIÂMETRO INTERNO MEDIDOS NAS 3 SERRAS APÓS A RETIFICAÇÃO DO FURO.	104
TABELA 53- VALORES DA MASSA MEDIDOS NAS 3 SERRAS APÓS A RETIFICAÇÃO DO FURO.....	104
TABELA 54- VALORES DO BATIMENTO MEDIDOS NAS 3 SERRAS APÓS A RETIFICAÇÃO DO FURO.	104

TABELA 55- FREQUÊNCIAS NATURAIS MEDIDAS DAS 3 SERRAS APÓS A RETIFICAÇÃO DO FURO.	105
TABELA 56- VALORES DA EXCENTRICIDADE MEDIDOS NAS 3 SERRAS APÓS A RETIFICAÇÃO DO FURO. .	105
TABELA 57- VALORES DA MASSA MEDIDOS NAS 3 SERRAS APÓS A RETIFICAÇÃO DO FURO.....	105
TABELA 58- VALORES DO BATIMENTO MEDIDOS NAS 3 SERRAS APÓS A RETIFICAÇÃO DO FURO.	105
TABELA 59- FREQUÊNCIAS NATURAIS MEDIDAS DAS 3 SERRAS APÓS A RETIFICAÇÃO DO ENCAIXE.	106
TABELA 60- VALORES DA MASSA MEDIDOS E DA VARIAÇÃO EXISTENTE NAS 3 SERRAS APÓS A SOLDADURA DA PASTILHA DE CORTE POR BRASAGEM.....	106
TABELA 61- VALORES DO BATIMENTO E TENSIONAMENTO EXISTENTE NAS 3 SERRAS APÓS A SOLDADURA DA PASTILHA DE CORTE POR BRASAGEM.....	106
TABELA 62- FREQUÊNCIAS NATURAIS MEDIDAS DAS 3 SERRAS APÓS A SOLDADURA DA PASTILHA DE CORTE POR BRASAGEM.....	107
TABELA 63- VALORES DA MASSA MEDIDOS NAS 3 SERRAS APÓS A DECAPAGEM.	107
TABELA 64- VALORES DA ESPESSURA MEDIDOS NAS 3 SERRAS APÓS A DECAPAGEM.....	107
TABELA 65- VALORES DO BATIMENTO MEDIDOS NAS 3 SERRAS APÓS A DECAPAGEM.....	108
TABELA 66- FREQUÊNCIAS NATURAIS MEDIDAS DAS 3 SERRAS APÓS A DECAPAGEM.	108
TABELA 67- VALORES DA MASSA MEDIDOS NAS 3 SERRAS APÓS O POLIMENTO COM MÓ.....	108
TABELA 68- VALORES DA ESPESSURA MEDIDOS NAS 3 SERRAS APÓS O POLIMENTO COM MÓ.	109
TABELA 69- FREQUÊNCIAS NATURAIS MEDIDAS DAS 3 SERRAS APÓS O POLIMENTO COM MÓ.	109
TABELA 70- VALORES DA MASSA MEDIDOS NAS 3 SERRAS APÓS O AFIAMENTO.....	109
TABELA 71- VALORES DO BATIMENTO E TENSIONAMENTO MEDIDOS NAS 3 SERRAS APÓS O AFIAMENTO.	110
TABELA 72- FREQUÊNCIAS NATURAIS MEDIDAS DAS 3 SERRAS APÓS O AFIAMENTO.	110

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	3
1.1	Processo de corte de madeira	3
1.2	Apresentação da empresa	7
1.3	Objetivos e metodologia de trabalho.....	8
1.4	Organização da dissertação	8
2	PROCESSO PRODUTIVO DAS SERRAS CIRCULARES PARA O CORTE DE MADEIRA ...	13
2.1	Introdução	13
2.2	Descrição das etapas do processo de fabrico das serras	13
2.3	Disposição espacial das etapas do processo de fabrico e máquinas utilizadas	21
3	MEDIÇÃO EXPERIMENTAL DE VIBRAÇÕES	27
3.1	Introdução aos conceitos fundamentais.....	27
3.1.1	Classificação das vibrações	30
3.2	Determinação experimental dos parâmetros modais.....	31
3.2.1	Análise Espectral.....	31
3.2.2	Análise do Sistema	32
3.2.3	Medição da forma modal operacional	33
3.2.4	Análise modal experimental.....	33
3.2.5	Excitação (entrada)	37
3.2.5.1	Excitação produzida pelo martelo de impacto.....	38
3.2.6	Resposta (saída)	39
3.2.6.1	Formas de fixação do acelerómetro.....	41
3.2.7	Analisador.....	42
3.2.7.1	Resolução	42
3.2.7.2	Tipo de janela.....	42
3.2.7.3	Médias.....	43
3.2.7.4	Sinal de disparo.....	43
3.2.7.5	Função de Resposta em Frequência (FRF)	43
3.2.8	Identificação das frequências naturais de vibração na serra	43
4	ANÁLISE DO PROCESSO DE FABRICO DA SERRA.....	49

4.1	Desenvolvimento de um sistema de apoio para a medição das frequências naturais da serra	49
4.1.1	Influência do sistema de apoio	49
4.1.2	Influência da massa do acelerómetro	51
4.1.3	Proposta de melhorias.....	53
4.2	Estudo preliminar das frequências naturais da serra	55
4.3	Sistema de controlo da linha de produção	57
4.4	Etapas críticas do processo de fabrico	74
4.5	Proposta de ações de melhoria.....	76
4.5.1	Retificação do corpo.....	76
4.5.2	Tensionamento	77
4.5.3	Brasagem	77
4.5.4	Retificação do encaixe e polimento com mó	77
4.5.5	Afiamento.....	78
4.6	Implementação do controlo de qualidade ao longo de toda a linha de produção	78
5	CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS	83
5.1	CONCLUSÕES.....	83
5.2	PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS	84
6	BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO.....	87
6.1	Artigos, livros e páginas de internet.....	87
7	ANEXOS.....	91
7.1	Equipamento para medição das frequências naturais vibrações.....	91
7.1.1	Caraterísticas técnicas dos dois martelos de impacto utilizados na realização das medições das frequências naturais.	91
7.1.2	Caraterísticas técnicas dos dois acelerómetros utilizados na realização das medições das frequências naturais.	92
7.1.3	Caraterísticas técnicas do conversor de sinal usado como acelerómetro PCB-Piezotronics modelo 357A08.	93
7.2	Processo de Fabrico	94
7.2.1	Tipos de afiamento.....	94
7.3	Testes Finais.....	95
7.3.1	Serra em teste (863.350.054.30).....	95

7.3.2	Etapa de corte laser.....	95
7.3.3	Etapa de polimento com lixa	98
7.3.4	Etapa de revenido	99
7.3.5	Etapa da retificação do corpo	102
7.3.6	Etapa de tensionamento	103
7.3.7	Etapa de retificação do furo.....	104
7.3.8	Etapa de retificação do encaixe	105
7.3.9	Etapa de soldadura da pastilha de corte por brasagem	106
7.3.10	Etapa de decapagem.....	107
7.3.11	Etapa de polimento com mó	108
7.3.12	Etapa de afiamento	109
7.3.13	Anilha para medição da excentricidade serra	111
7.3.14	Manual de utilização do OROS	112

INTRODUÇÃO

- 1.1 Processo de corte de madeira
- 1.2 Apresentação da empresa
- 1.3 Objetivos e metodologia de trabalho
- 1.4 Organização da dissertação

1 INTRODUÇÃO

1.1 Processo de corte de madeira

A madeira é o material mais antigo utilizado pelo homem. Desde cedo foi necessário trabalhar e dar forma à madeira, sendo necessário desenvolver ferramentas para produzir as peças desejadas com boa qualidade de acabamento.

O corte de madeira é um processo com características altamente variáveis devido a sua estrutura, caracterizada pela elevada anisotropia, ou seja, é fortemente depende das direções de corte (longitudinal, radial e tangencial), ver Figura 1, que advém das diferentes orientações e propriedades das fibras. A heterogeneidade é outra das características que influênciam o corte da madeira, dependendo das diferentes propriedades mecânicas das estruturas que a constituem. Esta resulta da presença de uma granulometria irregular, provocada pela variação na largura dos anéis de crescimento e sua excentricidade, presença de nós, tecidos de cicatrização, resinas, óleos, gomas, compostos aromáticos e sais de ácidos orgânicos. O teor de humidade na madeira também influencia o seu corte, sendo que este varia entre 13% a 17% [1-2].

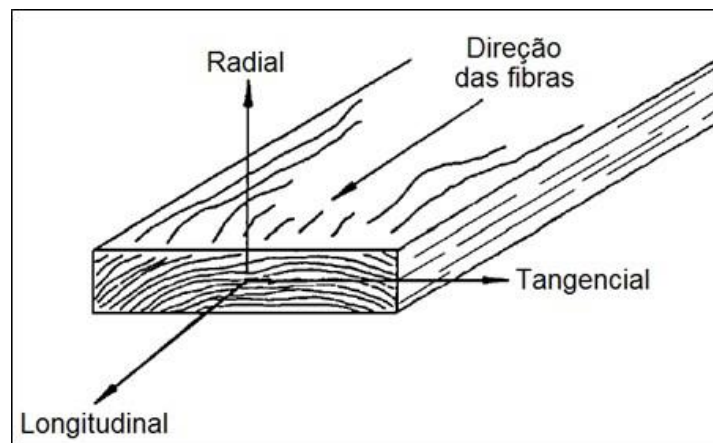


Figura 1- Orientação das fibras da madeira [3].

A grande variação na matéria-prima apresenta desafios substanciais para projetar e operar equipamentos de processamento de madeira. Devido a esta variação, os métodos de processamento têm de ser projetados para aceitar uma ampla gama de condições de entrada, continuando a trabalhar de forma confiável, rápida e precisa.

O desenvolvimento de técnicas óticas aplicadas à caracterização da madeira veio permitir a otimização do processo de corte, através do fabrico de ferramentas dedicadas e, assim, reduzir a influência de alguns dos principais fatores referidos anteriormente[4].

Uma das características mais importantes de uma ferramenta é a dureza da aresta de corte, a qual deve ser elevada à temperatura de trabalho. Essa característica torna-se cada vez mais preponderante com o aumento da velocidade de rotação, uma vez que este conduz ao aumento da temperatura da zona de corte e à aceleração do processo de desgaste da aresta.

Inicialmente, as serras eram ferramentas manuais com dentes abrasivos, mas com a necessidade do aumento da velocidade de corte, redução do desperdício e aumento da qualidade do acabamento, surgiram as serras circulares e as serras de fitas, ver Figura 2. A primeira serra circular foi patenteada em 1777, por *Samuel Miller*, mas foi apenas introduzida na indústria em 1805, motivada pelas guerras napoleônicas. Já as serras de fita só foram desenvolvidas em 1808, por *William Newberry* [5].

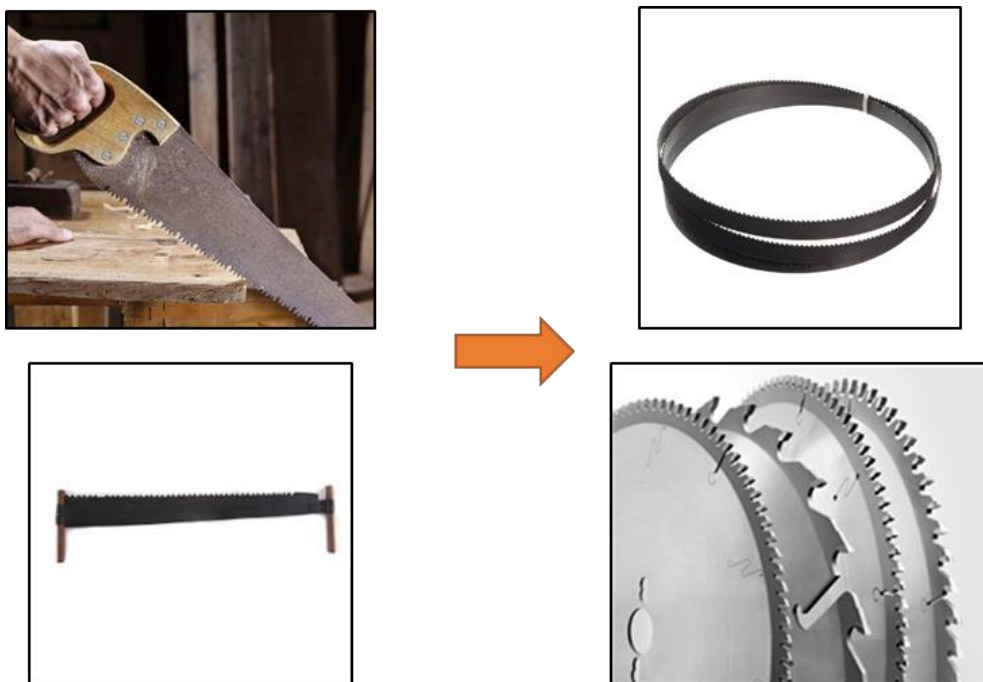


Figura 2- Transição de ferramentas de corte [5]–[8].

As serras circulares apresentam inicialmente problemas associados ao desgaste prematuro, aumento de temperatura e do ruído produzido, o que levou à incorporação de expansores térmicos, para reduzir as tensões internas provocado pelo aumento da temperatura, introdução de silenciadores, para diminuir o ruído gerado, e aplicação de pastilhas de metal duro, para aumentar o ciclo de vida da ferramenta. A introdução de rasgos na serra permite criar movimento relativo entre os seus segmentos e, assim, aumentar a dissipação da energia e a instabilidade da serra em serviço. Porém, estes têm um efeito negativo com a redução da rigidez e das frequências naturais da serra.

O ruído gerado pela serra aumenta com a velocidade de rotação, diâmetro da serra, número de dentes e a redução da espessura da serra [9]. Também o aumento da temperatura no processo de corte faz diminuir a rigidez lateral das serras circulares, devido à introdução de tensões internas de compressão [10].

Desde cedo se percebeu a importância da estabilidade da serra durante o corte, para garantir a produção de cortes limpos e regulares, com menor desperdício de

material. Por esse motivo, desenvolveram-se patins de guiamento que permitem aumentar a estabilidade da serra em funcionamento. Estes sistemas de guiamento podem ser com ou sem contacto, servindo, também, para reduzir o calor gerado por atrito entre a serra e a madeira, permitindo que a serra trabalhe acima da velocidade crítica [11]. Contudo, estes podem conduzir, em certos casos, à instabilidade da serra. Uma outra forma de aumentar a estabilidade da serra é através da aplicação superficial de materiais com propriedades viscoelásticas, para promover o aumento do amortecimento e reduzir o ruído gerado pela serra. Todavia, esta solução aumenta a complexidade do processo de fabrico da serra e conduz ao aumento da sua espessura[10].

A instabilidade da serra ocorre quando a velocidade de rotação está próxima da sua velocidade crítica, sendo que esta está associada às frequências naturais da serra. *Southwell* descobriu que as velocidades críticas das serras em serviço podem ser deduzidas a partir das frequências naturais da serra em repouso, ver Figura 3 [12]. Estas velocidades críticas sofrem um aumento pelo sistema de aperto e guiamento [13-14].

De forma a diminuir a instabilidade lateral do corpo da serra, este é sujeito a uma laminagem circunferencial, denominada de tensionamento, a qual tem o objetivo de afastar a velocidade crítica da gama de velocidades de trabalho da serra. Para que este seja eficaz, é necessário conhecer o estado de tensão presente nos diferentes regimes de funcionamento da serra. Porém, não existe um método preciso e não destrutivo para medir o estado de tensão nas serras em serviço. O tensionamento desempenha um papel importante para o desempenho da serra, especialmente quando estas são finas e possuem grandes diâmetros. Contudo, os níveis de tensões residuais introduzidas pelo processo de tensionamento podem ser observados indiretamente através da medição das frequências e modos naturais de vibração[15].

A redução da oscilação lateral da serra, designado de batimento lateral, é imprescindível para melhorar a qualidade da superfície de corte, obter maior precisão de corte, aumentar a vida útil da serra e reduzir o ruído gerado. Para a resolução de problemas associados à instabilidade da serra circular é necessário identificar as frequências predominantes da serra em serviço, através da análise da vibração.

Uma das maiores preocupações no projeto de serras circulares é a definição da largura do dente, que, por um lado, levanta a questão da rentabilidade do material a cortar e, por outro, tem implicações no diâmetro máximo da serra, limitado por razões de instabilidade a altas velocidades [16].

A maioria dos trabalhos de investigação em serras circulares têm-se focado na área da atenuação das vibrações e no desenvolvimento de soluções para evitar fenómenos de ressonância. Através da análise das frequências naturais e modos naturais da serra é possível identificar que estas são influenciadas pelas forças centrífugas produzidas pela rotação e pelo aumento de temperatura, ver Figura 3. Ao nível do controlo do processo produtivo, a análise das frequências naturais das serras são a metodologia mais indicada para identificar variações no processo produtivo.

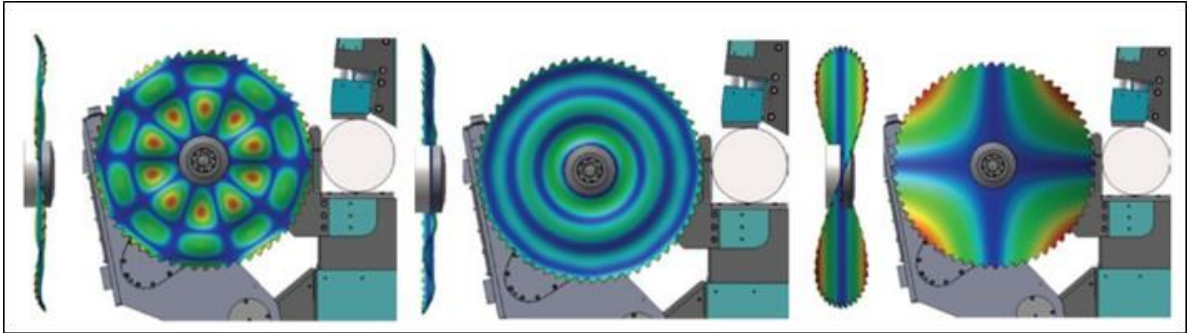


Figura 3- Modos de vibração da serra em serviço [16].

As vibrações desenvolvidas pelo processo de corte são responsáveis pelo desenvolvimento de ondas sonoras que se propagam pelo ar, gerando ruído. Este ruído advém da vibração da serra e da peça a cortar, mas também é originado pela interação entre os dentes e a atmosfera envolvente. O nível elevado de ruído gerado pode levar a problemas de saúde por parte do operador que trabalha com este tipo de ferramentas. Dai, este é considerado um dos principais problemas na indústria de fabrico de componentes em madeira, pois praticamente todas as operações de corte excedem o nível de ruído de 87 dB (Valor Limite de Exposição, VLE), geralmente considerado o máximo permitido por 8 horas de exposição contínua [17]. Para além de ser prejudicial para a saúde do operador que trabalha com este tipo de equipamento, também diminui a qualidade do corte, a vida da ferramenta e aumenta o desperdício de material. *Cudworth* foi, em 1960, o primeiro a classificar o ruído das serras circulares como de alta intensidade, produzido pela vibração da própria serra [18].

A vibração lateral da serra em serviço é formada por dois tipos de ondas, as ondas progressivas, *FW (Forward whirling)*, e as ondas regressivas, *BW (Backward whirling)* [1]. A frequência da onda regressiva diminui com a velocidade de rotação, sendo designada de velocidade crítica da serra quando a sua frequência é zero.

O principal objetivo das empresas que fabricam serras de corte é a produção de ferramentas capazes de desempenhar a sua função para vários regimes funcionamento dentro de parâmetros aceitáveis. No caso particular de se pretender produzir uma serra com desempenho superior, estas terá de ser projetada especificamente para uma máquina, considerando todos os seus parâmetros de funcionamento [19].

1.2 Apresentação da empresa

A FREZITE®- Ferramentas de Corte, S.A. é um grupo de empresas que fornece soluções de engenharia aos seus clientes na área das ferramentas de corte, usadas para o corte de madeira, plástico, compósitos e metal. A primeira empresa foi fundada em 1978 pelo Engenheiro José Manuel Fernandes, sendo a primeira empresa em Portugal no ramo da produção de ferramentas de corte, possuindo neste momento uma vasta experiência no projeto, desenvolvimento e produção deste tipo de ferramentas.

A empresa dedicada ao fabrico de ferramentas para madeira está sediada na Trofa, tendo dois pavilhões independentes, um para a produção de serras circulares e o outro dedicado à produção de fresas. Esta fornece ao mercado profissional e industrial uma vasta área de ferramentas de qualidade, bem como, um acompanhamento cuidado ao cliente, o que leva ao desenvolvimento de soluções únicas e diferenciadoras de cliente para cliente. Neste momento, a FREZITE® está presente em mais de 50 países distribuídos pelos 5 continentes, entre eles Alemanha, República Checa, Polónia, Reino Unido, Espanha, Brasil, Finlândia e México.

A estratégia de internacionalização adotada já valeu à FREZITE® a distinção com o Prémio de internacionalização na categoria PME, no ano de 2011.

Segundo os ideais da empresa, as pessoas são dos mais importantes ativos de qualquer instituição, deste modo procura proporcionar condições para melhoria e desenvolvimento contínuo dos colaboradores, com o intuito de aumentar a excelência desta empresa.

Desde 1993 que a FREZITE® é certificada, cumprindo os requisitos da norma NP EN ISO 9001 e foi uma das primeiras empresas deste sector a ser certificada pela norma NP EN ISO 14001 em Portugal. Possui desde 2012 a certificação de inovação pela NP 4457.

Qualidade, Inovação, Internacionalização e Ética são os valores intrínsecos do Grupo FREZITE® que têm contribuído para o seu continuado sucesso, assente numa estratégia de criação de valor.



Figura 4- Logotipo da FREZITE.

1.3 Objetivos e metodologia de trabalho

Este trabalho resulta da necessidade de melhorar as condições de controlo de qualidade ao longo do processo produtivo da serra circular para o corte de madeira. O reforço do controlo de qualidade prende-se com a necessidade de aumento da velocidade de corte e da diminuição da espessura da serra que, conseqüentemente, conduzem ao aumento da sua instabilidade. Assim sendo, para desenvolver ferramentas mais eficientes e de elevado desempenho é necessário criar metodologias de controlo ao longo do processo produtivo. Apesar do procedimento de desenvolvimento das serras estar já completamente implementado, verificou-se que existiam falhas no controlo de qualidade do processo produtivo, o que introduzia uma forte variabilidade no desempenho das serras. Neste sentido, foi proposto realizar um estudo, em ambiente industrial, do nível de controlo nas várias etapas do processo produtivo das serras para corte de madeira. A partir desta análise, pretende-se identificar as etapas com maior influência na produção e, simultaneamente, caracterizar o nível de controlo de cada processo. Esta análise realizar-se-á a partir da medição das frequências naturais de vibração da serra em repouso, entre as diferentes etapas do processo produtivo. Como resultados desta análise, pretende-se definir medidas corretivas que promovam a melhoria do nível de controlo nas etapas mais críticas do processo produtivo.

1.4 Organização da dissertação

Este trabalho encontra-se dividido em seis capítulos, cujo conteúdo se sintetiza em seguida:

Capítulo 1- É realizada uma breve introdução ao funcionamento das serras circulares para corte de madeira e são descritos alguns dos principais problemas relacionados com o seu funcionamento. Em seguida, faz-se uma apresentação da empresa, são descritos os principais objetivos do trabalho e a metodologia a ser usada. O capítulo termina com apresentação da estrutura deste trabalho e com a breve descrição dos temas abordados em cada capítulo.

Capítulo 2- É descrito todo o processo de fabrico da serra e as diferentes etapas deste processo. Faz-se uma apresentação da disposição dos equipamentos no processo produtivo das serras circulares.

Capítulo 3- São apresentados os conceitos fundamentais de vibrações. É descrito o procedimento para a realização de medições experimentais e extração dos parâmetros principais. O capítulo termina com a análise ao sistema de medição de frequências naturais existente e com a sugestão de melhorias.

Capítulo 4- O processo de fabrico influencia o comportamento da serra, assim sendo, é exposto neste capítulo quais as etapas que maior variação produzem ao nível das frequências naturais e qual a variabilidade de todo o processo de fabrico. Procede-se ainda, a uma análise estatística, a qual requer o uso de amostragens significativas, com o objetivo de identificar a etapa mais crítica. Neste capítulo é ainda exposto as possíveis melhorias para as etapas mais críticas e para as etapas com menor grau de controlo. É

proposto um sistema de controlo de qualidade automático, com enfoque na caracterização do comportamento dinâmico da serra, ao longo de todo o processo de fabrico, sem que haja intervenção humana.

Capítulo 5-Por fim, neste capítulo apresentam-se as conclusões gerais do trabalho realizado, em que se identificam os principais problemas e são propostas soluções de melhoria. São ainda definidas linhas orientadoras para trabalhos futuros, que permitam melhorar o controlo da qualidade, do desempenho da serra e da linha de produção

PROCESSO DE FABRICO

- 2.1 Introdução
- 2.2 Descrição das etapas do processo de fabrico das serras
- 2.3 Disposição espacial das etapas do processo de fabrico e máquinas utilizadas

2 PROCESSO PRODUTIVO DAS SERRAS CIRCULARES PARA O CORTE DE MADEIRA

2.1 Introdução

A produção de serras de elevado desempenho requer um equivalente grau de sofisticação do seu processo produtivo, ver Figura 5. O corpo da serra, a solda e o material das pastilhas de corte têm uma influência decisiva sobre o comportamento global da serra, com repercussões sobre a qualidade do corte e a sua vida útil. Para que a serra apresente um desempenho adequado, é necessário garantir um elevado controlo nas diferentes etapas do seu processo de fabrico. Contudo, devido à elevada complexidade que envolve alguns destes processos, torna o seu controlo difícil de ser alcançado.



Figura 5- Ferramentas de corte de alta qualidade[20].

O processo produtivo da serra está dividido em 12 etapas. Estas envolvem as operações de corte da chapa por laser e polimento com lixa, tratamento térmico, retificação da espessura, tensionamento, retificação do furo central, retificação do encaixe, brasagem da pastilha de corte, decapagem da ZTA, polimento com mó do corpo da serra, afiamento das pastilhas de corte e, finalmente, a gravação a laser.

De seguida, descreve-se sucintamente cada uma das operações do processo de fabrico das serras e definição dos requisitos de fabrico antes e após cada etapa.

2.2 Descrição das etapas do processo de fabrico das serras

O processo de fabrico das serras circulares para o corte de madeira inicia-se com a receção e verificação da conformidade das chapas de aço. Após a verificação das

conformidades, a chapa é enviada para a primeira etapa do processo de fabrico das serras. Nesta etapa, não é efetuado qualquer medições dimensionais, contudo recomenda-se uma medição da espessura da chapa, através de um micrómetro, e do seu tamanho, só depois é realizado o corte a laser do corpo da serra com a geometria próxima da sua forma final, ver Figura 6.



Figura 6- Operação de corte a laser do corpo da serra.

Na serra devem ser criados rasgos de expansão e silenciadores em número ímpar, para evitar a formação de ondas estacionárias [9]. Após a operação de corte, o operador executa um controlo visual de todos os contornos da serra, para identificar anomalias no acabamento. Em seguida, o corpo da serra passa pela operação de desbaste por lixa, onde é retirada a rebarba produzida pelo processo de corte a laser.

Com o aumento da preocupação da estabilidade da serra e o uso de serras cada vez mais finas, houve a necessidade de efetuar um tratamento térmico de revenido para aliviar tensões residuais resultantes do processo de fabrico da chapa laminada, a qual provoca um batimento da serra, ou seja, provoca empeno no corpo da serra em relação ao seu eixo central. Para assegurar que as serras, após o revenido, apresentam uma redução do seu batimento, estas devem ser empilhadas corretamente, garantindo que não apresentam rebarba ou sujidade na superfície. A pilha de serras é montada numa prensa e apertada através de dois pratos, ver Figura 7. Para manter as forças de compressão elevadas e constantes, o aperto dos pratos é realizado através de uma máquina pneumática. O conjunto é colocado no forno previamente programado com o ciclo térmico, que é definido em função das especificações do aço.

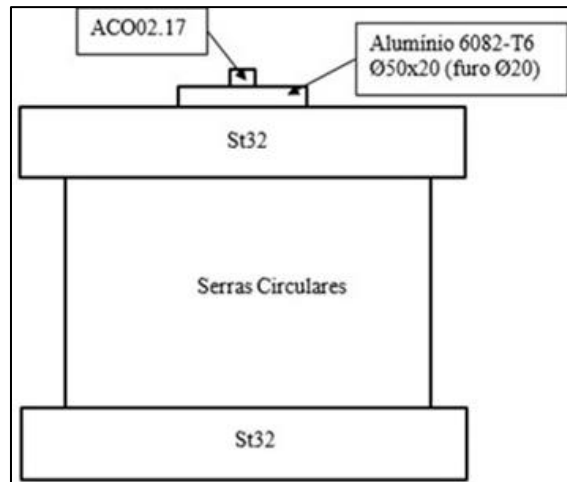


Figura 7- Conjunto montado constituído pelos pratos de aperto, anilhas de alumínio, pino de guiamento e pelo conjunto de serras a processar [21].

Após o tratamento térmico, deixa-se arrefecer o conjunto dentro do forno até atingir a uma determinada temperatura pretendida, sendo de seguida retirado do forno repousando até a temperatura ambiente. No final deste processo, é verificada a dureza da serra e o seu batimento. A medição do batimento da serra é realizada através de um comparador posicionado perto da extremidade.

Na próxima etapa é efetuada a retificação da espessura do corpo com o objetivo de diminuir os desequilíbrios. Visto que a superfície da serra vai estar em contacto com a peça a cortar, esta deve possuir uma rugosidade superficial baixa para reduzir o efeito de aquecimento e aumentar a eficiência da serra. Após fazer algumas verificações, define-se os parâmetros da máquina. É ainda medida a espessura do corpo de forma a definir a quantidade de material a retirar, para garantir que todas as serras da mesma série possuem uma espessura uniforme.

Após esta etapa é de novo verificado o batimento da serra. Por último, é controlada a espessura do corpo, sendo esta medição realizada em vários pontos na direção radial da serra. Desta forma, é garantido que a espessura final e a sua variação se encontram dentro dos limites pré-estabelecidos. Caso se verifique um batimento excessivo nas serras, este deve ser corrigido manualmente por impacto do martelo. Caso o batimento excessivo permaneça devem ser alterados os parâmetros da máquina.

De seguida, a serra passa por uma etapa onde se pretende aumentar a estabilidade lateral da mesma, sendo o processo designado por tensionamento, ver Figura 8. Este processo passou por grandes melhorias nos últimos anos, visto ser de difícil controlo quando executado manualmente. O processo consiste em aplicar uma deformação plástica na direção circunferencial através da compressão de 2 rolos [1]. Um ou os dois rolos são acionados, fazendo com que a serra gire lentamente e crie na sua superfície um encalque de raio constante pouco profundo em cada lado da serra. O material na região de contacto sofre uma deformação plástica, dando origem a um anel de deformação que induz diferentes tensões nas direções radial e circunferencial da serra e nas regiões internas e externas ao anel. O estado de tensão gerado em cada região da serra é fundamental para garantir o bom comportamento dinâmico da serra.

Este é dependente do raio do anel, do raio da curvatura da superfície de contacto dos rolos com a superfície da serra e da pressão aplicada. Quando o estado de tensão gerado promove o aumento da rigidez à torção da serra relativamente ao eixo, obtém-se um aumento da estabilidade da serra em funcionamento. No final desta etapa é aferido indiretamente o nível de tensões gerado pelo tensionamento da serra, através da medição do seu batimento. Caso haja um desvio no batimento devido ao tensionado excessivo, a serra deve passar novamente pelo tratamento térmico para reduzir o nível de tensões internas. Um bom tensionamento é conseguido quando há um aumento da frequência natural mais baixa da onda correspondente ao primeiro modo da serra, a qual apresenta diâmetros nodais. Para tal, a área do encaixe deve ser igual a $0,07\text{mm}^2$, identificada como a deformação óptima para maximizar a frequência mais baixa da onda regressiva [15].

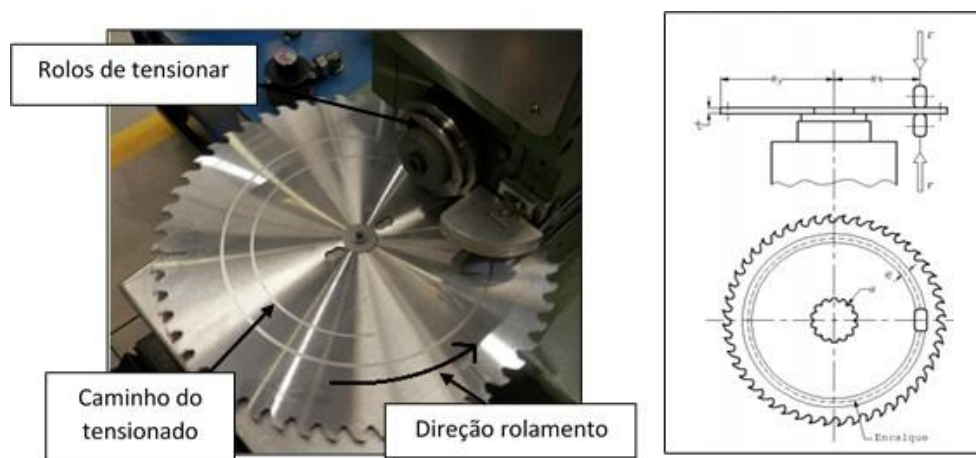


Figura 8- Operação de tensionamento do corpo da serra circular. [1]

O tensionamento é um processo que pode ser automatizada e controlada por computador, tornando-a mais consistente e reduzindo a sua variabilidade. Como já foi referido, o controlo do tensionamento é importantíssimo, pelo que existem duas máquinas para realizar a medição do batimento da serra, ver Figura 9 [1]. Embora este seja um processo de controlo empírico e propenso a erros é, no entanto, expedito e de fácil utilização na produção. A máquina manual aplica um carregamento pontual na direção perpendicular à superfície e avalia a amplitude de flexão ao longo do perímetro. Contudo esta máquina tem intervenção humana e os valores obtidos são fortemente dependentes do binário de aperto da flange para fixação das serras na máquina. Já a máquina semiautomática aplica um deslocamento que é igual em todas as serras testadas. Esta máquina só necessita de intervenção humana para o posicionamento da serra. Contudo, o melhor processo para se avaliar o estado de tensão interna gerada pelo processo de tensionamento é através da medição das frequências naturais de vibração da serra.

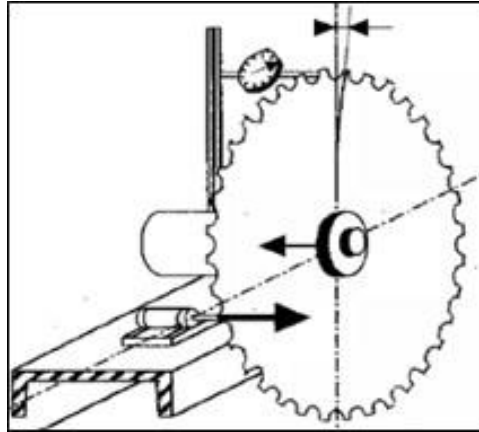


Figura 9- Controle do batimento e tensionado [1].

Após o tensionamento, os furos centrais são retificados e chanfrados por motivos de centramento da serra e para garantir elevada qualidade do corte, cuja imagem se apresenta na Figura 10. Após este processo de fabrico, os diâmetros dos furos das serras são controlados através de um calibre passa/ não passa e verificado o seu acabamento.

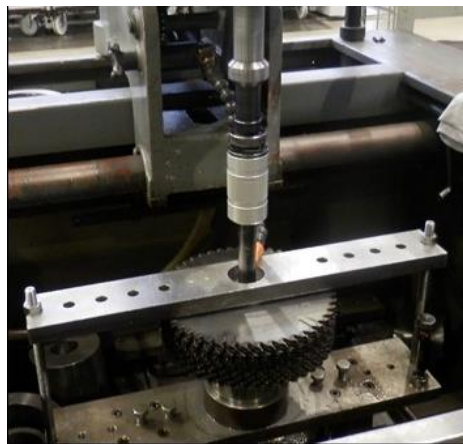


Figura 10- Operação de retificação do furo.

Para que o corpo seja capaz de receber a pastilha de corte, este passa pela operação de retificação do encaixe da pastilha de corte, com o objetivo de se obter um bom ajuste geométrico entre o corpo e a pastilha de corte, cujo a operação é apresentada na Figura 11.

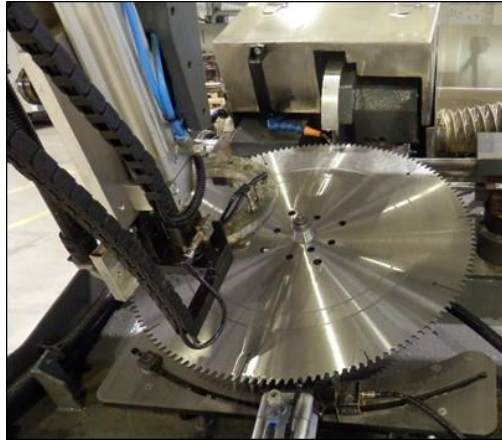


Figura 11- Operação de retificação dos encaixes para receber as pastilhas de corte.

Com o intuito de incorporar no corpo da serra o componente cortante (pastilhas de corte), utiliza-se o processo de brasagem para fazer a ligação entre as pastilhas de corte e o corpo da serra, mostrada na imagem Figura 12. Neste momento, são amplamente usadas pastilhas de carboneto de tungstênio, diamante policristalino e, ainda, CVD [1]. Este processo levou ao aparecimento de materiais compensadores da dilatação térmica sofrida aquando da operação de brasagem. Essa compensação é efetuada pelo material que serve de ligante, que difere do material da pastilha de corte e do material do corpo da serra. Dos pontos mais importantes nesta etapa são o posicionamento da pastilha de corte em relação ao corpo da serra, bem como, a execução da brasagem. Quando as serras possuem um número elevado de dentes e para evitar o sobreaquecimento da serra na região periférica que conduzam a empenos, a solda dos dentes é realizada de forma espaçada. Após o processo de soldadura das pastilhas, é inspecionada visualmente a região da soldadura, para verificar se está bem escorrida e se não apresenta poros. É analisada a qualidade da ligação, batendo com um martelo de Nylon, e se estão corretamente centradas em relação ao corpo da serra, através da sua medição com um comparador.

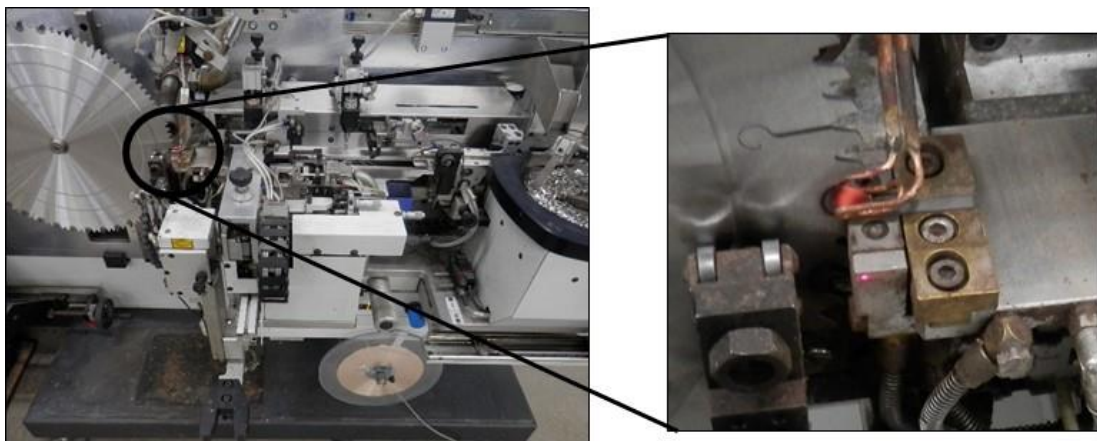


Figura 12- Operação de soldadura das pastilhas de corte ao corpo da serra.

Depois da serra passar pelo controlo de qualidade é enviada para o processo de decapagem. Esta operação tem como objetivo remover da superfície as marcas produzidas pelo processo de brasagem da pastilha ao corpo da serra. Este processo de decapagem pode ser executado em máquinas manuais e em máquinas semiautomáticas, dependendo do tamanho e do número de serras a produzir. No final da decapagem, deve ser inspecionada visualmente a zona de ligação da pastilha ao corpo da serra.

De modo a melhorar a estética da serra e a rugosidade do corpo, esta passa por um processo de polimento com mó, mostrado na Figura 13, com o intuito de retirar manchas de oxidação da serra e tornar a superfície limpa e espelhada. No final, existe uma inspeção visual da superfície, não devendo apresentar marcas da mó, nem manchas de oxidação e apresentar uma zona de transição entre o decapado e o polido. Após o polimento com mó e de modo a retirar pequenas impurezas da serra, esta passa por uma lavagem.

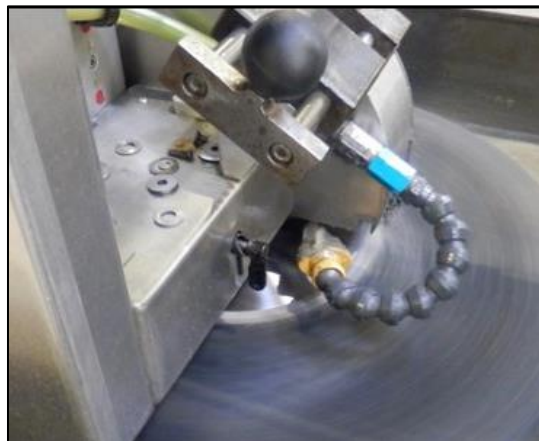


Figura 13-Operação de polimento com mó da serra.

A última etapa do processo de fabrico da serra consiste no afiamento das pastilhas de corte, com o intuito de diminuir as forças produzidas na aresta de corte, visível na Figura 14.

Este processo está dividido em função tipo operação de afiamento a realizar. O seu toleranciamento é muito apertado para garantir o bom acabamento da peça a cortar. Por exemplo, no afiamento definido do tipo TF, ver Figura 15, apresenta um dente trapezoidal intercalado com o dente plano, o trapezoidal serve para remover o material do centro do corte, enquanto que o plano serve para remove o material das bordas do corte, conseguindo-se, assim, um bom acabamento superficial. O ângulo de saída do dente de corte deve apresentar valores bem definidos, para minimizar o contacto entre o dente e o material a cortar, promovendo a redução da força de corte e da força de atrito [22].



Figura 14- Operação de afiamento da serra.

No final desta etapa, a serra passa pelo controlo de qualidade, sendo analisados o batimento, o tensionamento, a excentricidade do furo e o ângulo de saída toda as pastilhas de corte, o seu afiamento, o ângulo de corte e de saída, a espessura de corte, passo e forma do dente através do uso de um sistema de visão artificial.



Figura 15- Geometria do dente do tipo TF.

Após o controlo final, a serra passa ao processo de gravação a laser, sendo gravada a sua referência, dimensões, rotação máxima, ordem de fabrico, data de gravação e o logotipo da empresa, conforme se pode observar Figura 16. Depois da gravação a serra é embalada e armazenada, estando prontas para ser expedida para o cliente.

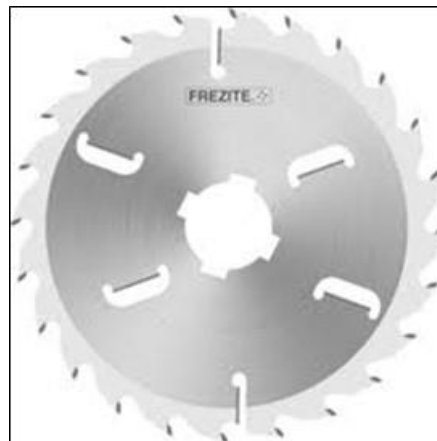


Figura 16- Gravação do logotipo da empresa e da referência da serra.

2.3 Disposição espacial das etapas do processo de fabrico e máquinas utilizadas

A disposição das diversas etapas do processo de fabrico das serras é apresentada na Figura 17 na forma de layout para uma descrição mais detalhada do tipo de máquinas de fabrico e de controlo nelas utilizadas. É de frisar que a etapa de gravação da serra por laser não está representada, uma vez que é mais prático para empresa ser realizado junto ao local de armazenamento das serras.

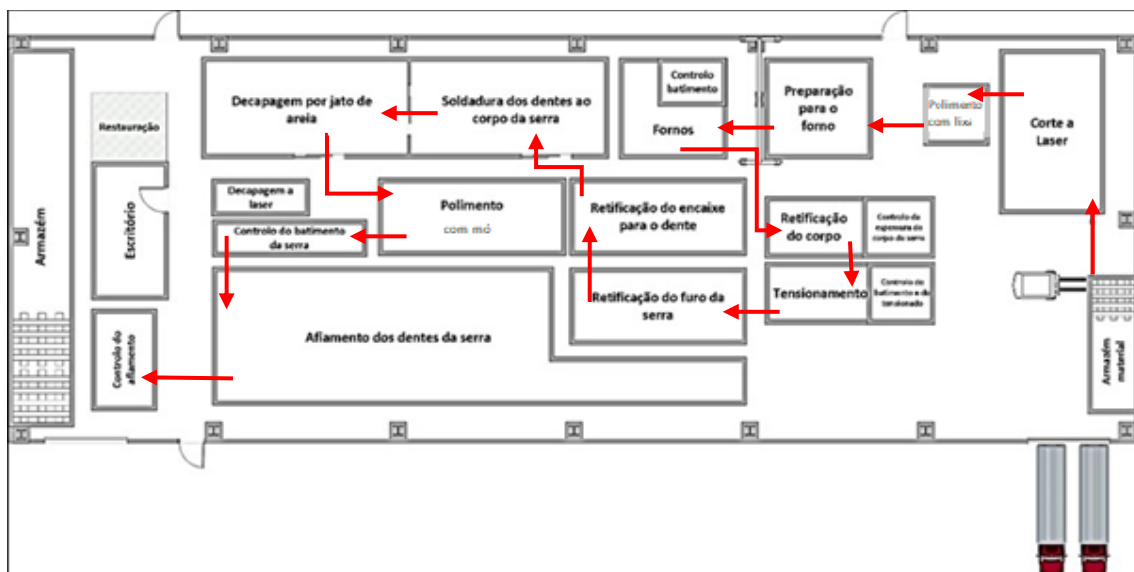


Figura 17- Layout da linha de produção das serras.

Todas as máquinas utilizadas em cada etapa do processo de fabrico das serras estão indicadas de seguida, bem como os sistemas de controlo utilizados para o controlo das serras após cada etapa.

Na etapa de corte a laser e polimento com lixa são utilizadas máquinas de corte a laser, assim como todas as unidades necessárias para o corte e máquinas lixadoras, para remover a rebarba resultante do processo de corte.

Na etapa referente ao processo de tratamento térmico, a empresa possui uma ponte rolante para a movimentação das pilhas de serras e fornos onde são realizados os tratamentos térmicos, que neste caso, se trata de um revenido. Para o controlo existem durómetros, para medir a dureza do corpo e máquinas de medir o batimento da serra após o tratamento térmico.

No que diz respeito à retificação do corpo, existem máquinas para realizarem estas operações, umas delas dedicada à produção de grandes séries e outras para a produção de serras de grande diâmetro superior a 1 m ou para a produção de pequenas séries. A espessura do corpo após a retificação é controlada numa bancada com instrumentação de medida.

Para o processo de tensionamento da serra existem várias máquinas, sendo que parte dedicadas à produção de pequenas séries, outras para serras que requerem mais que um anel de tensionamento e a outras para a produção de grandes séries. Após esta etapa é realizado um controlo do tensionado através da medição do batimento da serra. Caso as serras apresentem um batimento excessivo, este é corrigido passando as serras pela máquina de rolos.

Para retificação do furo é utilizada uma só máquina. Caso exista necessidade de alargar o furo antes da operação de retificação é utilizado o torno ou as duas máquinas de furar. O controlo do diâmetro final do furo é realizado manualmente através da utilização de calibres, existindo uma bancada para esse efeito.

Na operação retificação do encaixe, são utilizadas máquinas semiautomáticas e máquinas automáticas, sendo que as automáticas são dedicadas à produção principalmente de grandes séries e as máquinas semiautomáticas são dedicadas à produção de séries mais pequenas. É de referir que não está implementado qualquer sistema para o controlo dimensional após esta operação.

Depois da retificação do encaixe, a serra tem no seu corpo aparas/impurezas provenientes do processo de retificação e para as remover deve passar por uma lavagem, utilizando máquinas existente na zona de produção das serras.

A operação de brasagem da pastilha de corte ao corpo é realizada de forma automática. No caso de a serra possuir pastilhas com a função de raspadores, utiliza-se a máquina de soldar os raspadores. As máquinas que alimentam as máquinas de soldadura com pastilhas de corte, têm também a função de alinhar e orientar as pastilhas.

A decapagem é feita com recurso a máquinas granalhadoras, sendo que as granalhadoras semiautomáticas são utilizadas na produção de séries mais pequenas e em serras de maior diâmetro, enquanto as granalhadoras automáticas são utilizadas para séries maiores e em serras de menor diâmetro. Nestas operações é necessário utilizar aspiradores para remover as partículas da superfície.

Na operação de polimento com mó são usadas polidoras de disco. Nesta etapa existem máquinas automáticas e semiautomáticas, sendo que as polidoras automáticas são mais dedicadas à produção de grandes séries.

No que se refere à operação de afiamento da pastilha de corte, esta operação é executada, para grandes séries, por máquinas automáticas, sendo que algumas delas

têm vários centros de afiamento, para a cara, o diâmetro e lateral. Para este tipo de máquinas o abastecimento é executado com a ajuda de braços robóticos.

Para serras com um grande diâmetro ou para pequenas séries, a operação de afiamento é executada por máquinas semiautomáticas com só uma estação de afiamento.

A última etapa do processo de fabrico das serras, consiste na gravação a laser da informação relevante. A gravação é efetuada através de sistema automático em que é utilizado um laser de baixa potência, sendo o posicionamento da serra realizado por um braço robótico. Existe, ainda, um sistema de visão artificial que faz o controlo de todo este processo.

VIBRAÇÕES

- 3.1 Introdução aos conceitos fundamentais
- 3.2 Determinação experimental dos parâmetros modais
- 4.1 Desenvolvimento de um sistema de apoio para a medição das frequências naturais da serra
- 4.2 Estudo preliminar das frequências naturais da serra
- 4.3 Sistema de controlo da linha de produção
- 4.4 Etapas críticas do processo de fabrico
- 4.5 Proposta de ações de melhoria.
- 4.6 Implementação do controlo de qualidade ao longo de toda a linha de produção

3 MEDIÇÃO EXPERIMENTAL DE VIBRAÇÕES

3.1 Introdução aos conceitos fundamentais

Qualquer movimento que se repete ao fim de um intervalo de tempo é chamado de vibração ou oscilação. Como exemplos típicos de movimento vibratório são a oscilação de um pêndulo ou o movimento de uma corda de guitarra. A teoria das vibrações está associada ao estudo do movimento oscilatório do corpo e das forças que lhes estão associadas.

Um sistema vibratório, em geral, inclui um meio para armazenar energia potencial (mola ou elemento elástico), um meio para armazenar energia cinética (massa ou inércia) e um meio pelo qual a energia é gradualmente dissipada através da transformação noutros tipos de energia (amortecedor). A vibração de um sistema envolve geralmente uma transferência de energia potencial para energia cinética e vice-versa. Na presença de amortecimento, existe uma perda de energia em cada oscilação, para que a amplitude de vibração se mantenha constante deve existir uma fonte externa que compensa essa perda de energia.

Na resolução de problemas relacionados com as vibrações devem ser analisados três componentes: a fonte de energia (local de geração das forças dinâmicas), o caminho percorrido pela energia (como a energia de vibração é transmitida), e o recetor de energia (representado pelo nível de ruído/vibração gerado).

Vibração e ruído estão intimamente relacionados. O ruído representa, simplesmente, uma parte de energia da vibração de uma estrutura, que é transformada numa variação de pressão do ar. Habitualmente os efeitos do ruído e das vibrações nas pessoas são indesejados e provocam redução do conforto, segurança e risco para a saúde. Em máquinas, veículos e edifícios, o efeito pode traduzir-se em desgaste, redução do desempenho, funcionamento defeituoso ou mesmo danos irreversíveis. No entanto, as vibrações também são desejáveis nalguns casos, como, por exemplo, na compactação de asfalto.

Às frequências naturais estão associados modos naturais de vibração, sendo estas influenciadas pela rigidez e pela massa da estrutura. Já a sua amplitude, além de depender da massa e rigidez, também depende da força de excitação, localização e do amortecimento do sistema. Para evitar os fenómenos de ressonância deve-se atuar ao nível da fonte da vibração, sua propagação e do recetor da vibração, através da alteração, respetivamente das forças motrizes, isolamento das estruturas e alteração das suas frequências naturais. Estas técnicas são na prática empregues todos os dias na indústria. No caso das serras circulares, a alteração das forças motrizes é produzida pelo afiamento dos dentes, pela variação da velocidade de avanço ou da rotação, enquanto

a alteração das suas frequências naturais é controlada pelo tensionamento, tratamento térmico, revestimentos, etc.

Os modos de vibração podem ser descritos como as formas de comportamento do corpo flexível a uma das suas frequências naturais de vibração. Os modos de vibração são uma característica padronizada num sistema vibratório, onde alguns dos pontos da estrutura atingem o seu deslocamento máximo e este se repete periodicamente no tempo. Para a descrição dos modos naturais de vibração é necessário definir um número mínimo de coordenadas independentes que permite determinar completamente as posições de todos os elementos de um sistema, os quais são designados de número de graus de liberdade, sendo que o seu número permite definir o grau de precisão do modo, ver Figura 18.

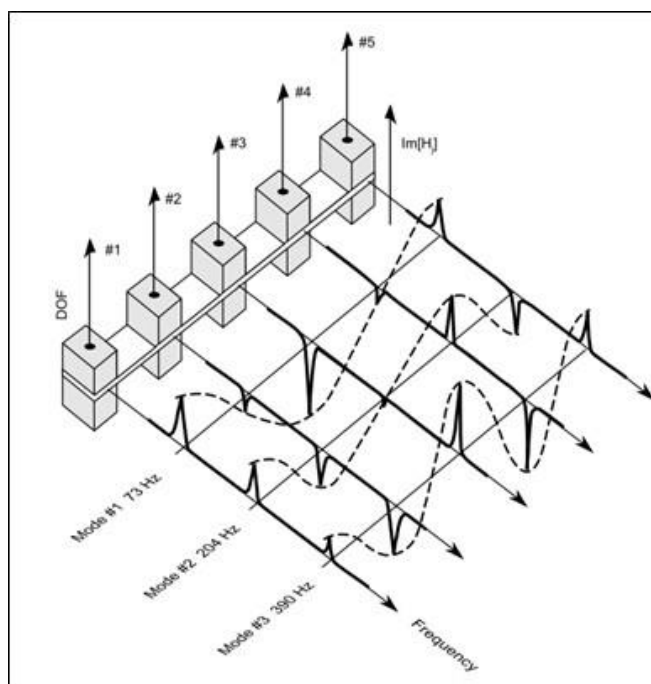


Figura 18- Graus de liberdade e representação do modo de vibração a partir de medições experimentais (Quadrature Picking) [23].

O comportamento dinâmico da serra é caracterizado pelos círculos nodais (m) e pelos diâmetros nodais (n), ver Figura 19 [1]. Os modos naturais de vibração podem ser observado através do método proposto por *Chladni* [24], usualmente utilizado no estudo de vibração em placas finas. Este assenta na observação de padrões na areia depositada sobre a superfície quando esta é excitada às suas frequências naturais. As zonas onde permanece o padrão de areia correspondem às posições de amplitude de vibração nula, que se designam por regiões nodais. As regiões em que a amplitude de vibração é a máxima designam-se por regiões anti-nodais. No caso das serras, os modos com diâmetros nodais são os mais críticos no processo de corte, por estarem associados a fenómenos de instabilidade da serra [25].

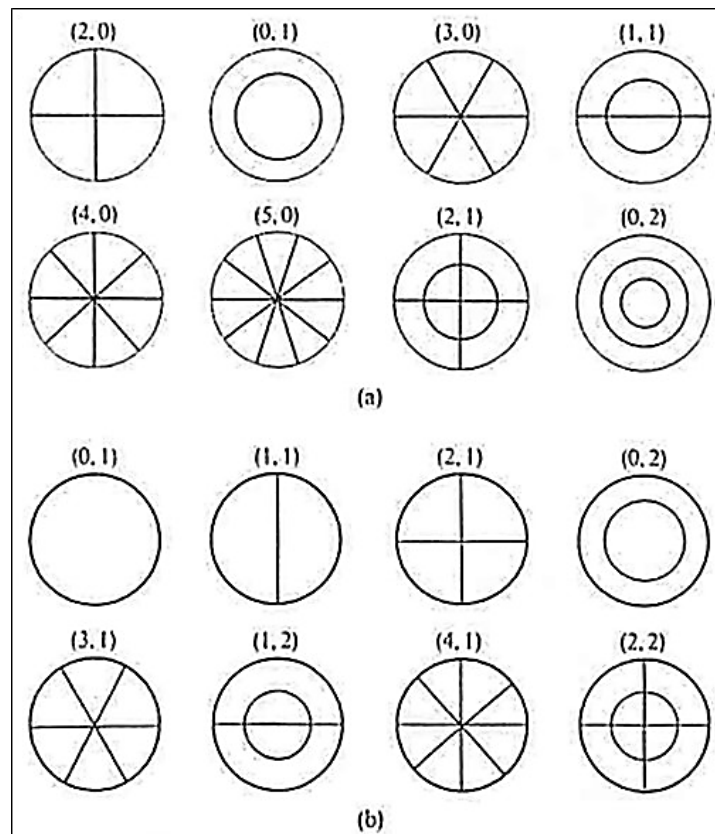


Figura 19- Modos de vibração numa placa circular, para: (a) extremidade livre e (b) extremidade fixa. O número do modo (n,m) corresponde ao número de diâmetros nodais (n) e de círculos nodais (m) [26].

Ao nível da manutenção de equipamentos, o nível de vibrações gerado está relacionado com as forças de todos os componentes rotativos (forças dinâmicas). Através da análise da sua amplitude consegue-se detetar a presença de irregularidades nalguns dos componentes do equipamento. A vibração medida é resultante, por um lado, da magnitude das forças dinâmicas, e, por outro lado, da massa, rigidez e amortecimento da estrutura. Quanto as serras, essas vibrações dependem da geometria da serra, da relação geométrica entre a falange e o diâmetro da serra, das propriedades do material, das tensões de membrana instaladas no corpo e do escoamento aerodinâmico.

3.1.1 Classificação das vibrações

As vibrações podem ser classificadas de várias formas, sendo uma das mais importantes características, o tipo de comportamento da estrutura.[27]:

- **Vibração livre**- Se um sistema após uma perturbação inicial for deixado a vibrar livremente, não existindo forças externas a atuar no sistema. Esta é a situação utilizada para a medição das frequências naturais de um sistema;
- **Vibração forçada**- Se o sistema for sujeito a uma força externa, que poderá se repetir no tempo;
- **Vibração não amortecida**- Se não houver perda ou dissipação de energia devido ao atrito ou outro tipo de resistência. Muitas vezes a quantidade de amortecimento é muito reduzida;
- **Vibração amortecida**- Se há dissipação da energia vibratória no tempo fazendo com que o nível da amplitude vibratória no regime livre diminua progressivamente;
- **Vibração linear**- Se todos os componentes do sistema vibratório (molas, massa e amortecedor) possuem um comportamento linear e se a amplitude da resposta for diretamente proporcional á amplitude da excitação;
- **Vibração não-linear**- Se algum dos componentes do sistema vibratório (molas, massa e amortecedor) possuem um comportamento não-linear. Todos os sistemas vibratórios tendem para o comportamento não-linear quando se aumenta a amplitude da oscilação;
- **Vibração determinista**- Se a amplitude da excitação for conhecida em qualquer instante;
- **Vibração não determinista ou aleatória**- Se a amplitude da excitação num determinado instante, não poder ser previsto ou se a excitação for aleatória, o que provoca uma resposta também aleatória, só podendo ser descrita com base em parâmetros estatísticos.

Para uma vibração do tipo harmónico, ver Figura 20, as características mais importantes são as que seguidamente estão expostas:

- O **Período** é a característica que descreve o tempo de uma oscilação completa, [s];
- A **Frequência** é o número de oscilações que ocorrem no intervalo de 1 segundo, ou seja, a frequência é o inverso do período, [Hz];
- A **Amplitude** é a característica que descreve a severidade da vibração, e poderá ser quantificada de diversas formas, [m];
- O **Valor de Pico-a-Pico** indica a gama da vibração e que pode ser útil na determinação do máximo valor de tensão ou de folga mecânica, [m];
- O **Valor de Pico** indica o nível de curta duração dos impactos, [m];
- O **Valor Eficaz (RMS- root mean square)** é uma medida estatística da magnitude de uma quantidade variável no tempo, [m];
- O **Valor Médio** é um termo raramente usado, que consiste no valor em torno do qual a vibração ocorre, [m];

- O **Ângulo de Fase** é o desfasamento no tempo entre dois sinais, [rad].

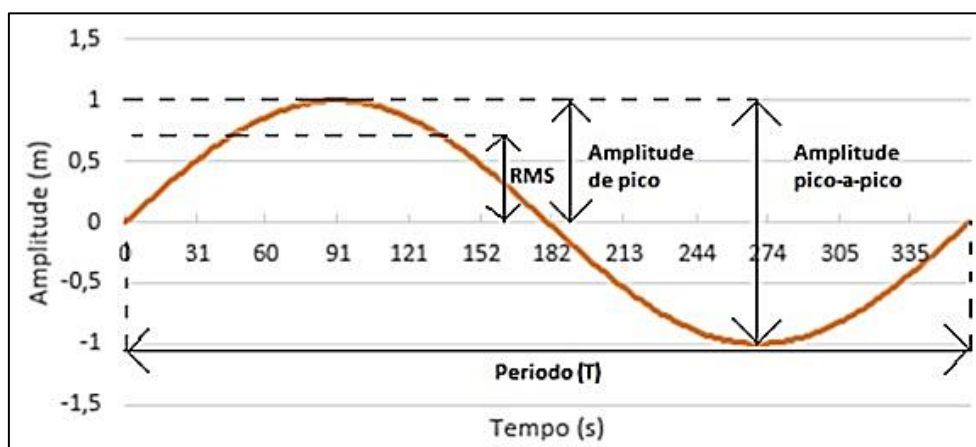


Figura 20- Propriedades da onda sinusoidal, representação de uma resposta harmónica.

A compreensão da dinâmica estrutural é essencial para o projeto e desenvolvimento de uma estrutura, bem como para resolver os problemas associados à vibração e ao ruído produzido nas estruturas já existentes.

3.2 Determinação experimental dos parâmetros modais

A análise modal experimental é uma ferramenta eficaz para descrever, entender e modelar o comportamento estrutural e, deste modo, obter uma sólida compreensão do seu comportamento estrutural. O conhecimento do comportamento dinâmico de uma estrutura permite evitar situações de ressonância mecânica que poderiam conduzir à sua destruição. Para tal situação, é necessário identificar os seus parâmetros modais, como frequências naturais, modos de vibração e amortecimento modal.

Para a resolução de problemas de vibrações e ruído podem ser adotadas a metodologia baseada na análise espectral, onde se determina a resposta do sistema devido a uma fonte genérica desconhecida ou adotada a metodologia baseada na análise do sistema, onde se determina as propriedades do sistema vibratório, através de uma excitação conhecida e analisando a razão resposta/força. Para sistemas lineares, esta relação é uma propriedade intrínseca do sistema e independente do sistema estar a ser solicitado ou em repouso [28-30].

3.2.1 Análise Espectral

Ao efetuar uma análise espectral consegue-se retirar informação da estrutura através da análise em frequência dos sinais da resposta em condições de operação, sendo habitualmente usado um acelerómetro para recolha do sinal no tempo. Este espetro, mostra as frequências mais importantes e as de maior energia. Por outro lado, o bom conhecimento mecânico do sistema permite distinguir a frequência de cada componente e relacioná-las com a frequência de trabalho, podendo assim identificar o componente responsável pela anomalia da máquina.

3.2.2 Análise do Sistema

A análise do sistema permite caracterizar o comportamento dinâmico de cada um dos seus componentes e estabelecer a relação entre eles. O caminho de transmissão da vibração desde a fonte de vibração e ao recetor, representam as características dos sistemas constituídos por diferentes componentes. As características de vibração de um sistema podem ser descritas a partir de um ensaio de aceleração/desaceleração, durante o qual a resposta é medida para diferentes velocidades de rotação. A resposta é expressa em função da velocidade de rotação. Este gráfico fornece uma indicação qualitativa de ressonâncias significativas na banda de frequência de trabalho, uma vez que as frequências de excitação são proporcionais à velocidade de rotação. No caso específico de corpos em rotação, como são o caso das serras, a resposta do sistema pode ser representado em função da velocidade e frequência, o qual é designado por diagrama de Campbell e que se representa na Figura 21.

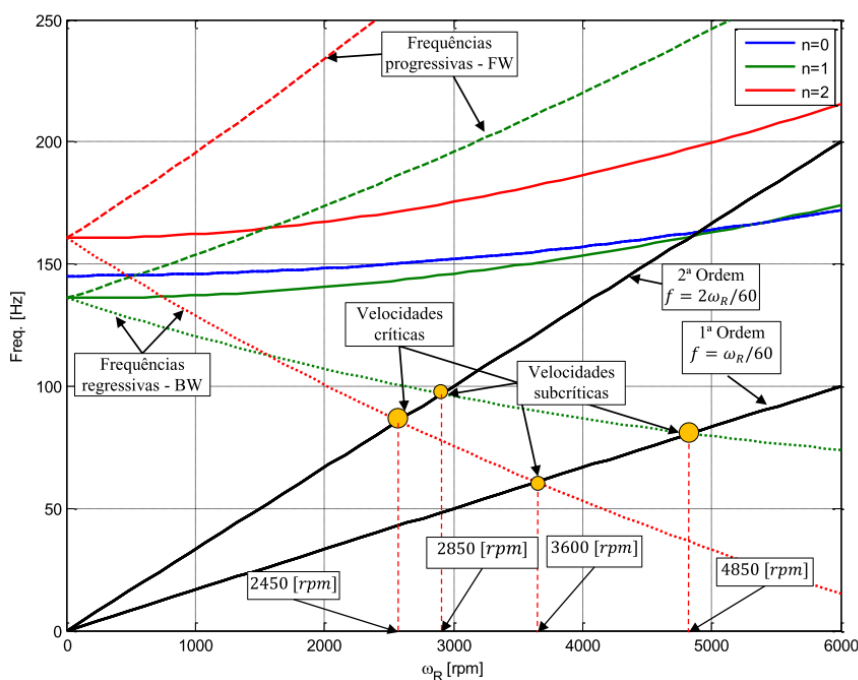


Figura 21- Representação do Diagrama de Campbell[1].

No diagrama de Campbell existe a informação relativa às frequências naturais, linhas de ordem de excitação e possíveis ressonâncias. Contudo, não é possível avaliar a ordem de importância das ressonâncias, o valor do seu amortecimento, nem a amplificação dinâmica a cada rotação. Conhecidas as velocidades críticas através da análise do diagrama de Campbell, podemos então definir a gama de trabalho do sistema, sendo que este deverá ser inferior em 15% à velocidade crítica [18].

As amplitudes máximas identificadas na resposta espectral, representam as ressonâncias e as velocidades críticas do sistema. No ensaio de aceleração/desaceleração, apenas a resposta à frequência de excitação é medida.

Portanto, as medições só fornecem informações qualitativas e pouco precisas relativamente às características do sistema.

3.2.3 Medição da forma modal operacional

Para tratar os problemas de vibração em estruturas é necessário conhecer a amplitude da resposta vibratória da estrutura à frequência de funcionamento. Podemos seguir duas abordagens: análise espectral, baseada na medição da forma modal operacional (*Operational Modal Analysis*), e análise do sistema, baseada na Análise modal do sistema.

O principal objetivo de conhecer o comportamento dinâmico do sistema envolve a determinação da deformação da estrutura à frequência crítica de funcionamento. A técnica mais simples e precisa para medir o comportamento dinâmico de uma estrutura recorre à medição da função de transferência entre um ponto de referência e de pontos igualmente distribuídos na estrutura. O desfasamento entre os pontos de medição deve ser suficientemente reduzido para obter uma boa resolução espacial do comportamento da estrutura. Em todos os pontos, as diferenças de magnitude e fase entre um par de pontos são medidas durante a operação em regime permanente. A instrumentação usada pode ser dois sistemas individuais de canal único ou um analisador dinâmico de sinal com dois canais. As amplitudes da resposta em frequência são então traçadas de modo a se obter o comportamento da estrutura, tanto de forma absoluta, como umas em relação às outras.

3.2.4 Análise modal experimental

Devido às propriedades de ortogonalidade entre as formas naturais de vibração, a análise modal resume-se à determinação de um conjunto discreto de parâmetros modais, frequências, modos e amortecimento. A análise modal consiste em obter, para uma dada gama dinâmica em estudo, todos os parâmetros modais necessários à construção do modelo matemático do sistema. Os modos de vibração representam uma propriedade dinâmica inerente a uma estrutura em regime livre. O amortecimento modal é uma das propriedades que se obtêm na análise modal.

A representação do comportamento linear do sistema no domínio da frequência é descrita pela Função de Resposta em Frequência (FRF). O movimento pode ser descrito em termos de deslocamento, velocidade ou aceleração, sendo as correspondentes FRF's do tipo receptância $H(\omega)$, mobilidade $\dot{H}(\omega)$ e acelerância $\ddot{H}(\omega)$. Estas representam a quantidade complexa da razão entre o espectro da resposta e o espectro da excitação. A quantidade complexa da função $H(\omega)$ pode ser representada em termos de magnitude $|H(\omega)|$ e fase $\phi(\omega)$. A FRF é interpretada como uma resposta harmónica de amplitude $|H(\omega)|$ mas com um ângulo de desfasamento $\phi(\omega)$ relativamente à força unitária de excitação.

$$H(\omega) = \frac{X(\omega)}{F(\omega)}; \quad \dot{H}(\omega) = \frac{\dot{X}(\omega)}{F(\omega)}; \quad \ddot{H}(\omega) = \frac{\ddot{X}(\omega)}{F(\omega)} \quad (3.1)$$

$X(\omega)$ - Espectro da resposta

$F(\omega)$ - Espectro da excitação

A força de excitação pode percorrer sequencialmente um conjunto discreto de frequências ou excitar simultaneamente uma banda de frequências. Neste segundo caso, é reduzido drasticamente o tempo de medição em relação à excitação sinusoidal. A aplicação do analisador dinâmico de sinal de dois canais permite, recorrendo à transformada rápida de Fourier (FFT), medir para uma banda de frequências as FRFs do tipo entre a excitação em força e a resposta do sistema.

O acelerómetro é o transdutor habitualmente usado para medir a resposta da estrutura devido à larga banda útil de medição e baixa massa, sendo a FRF do tipo aceleração $\ddot{H}(\omega)$. Devido às baixas amplitudes de vibração produzidas pela excitação, a medição das FRFs apresenta um conjunto de problemas, entre eles estão: o ruído mecânico na estrutura provocado pelo comportamento não linear, o ruído elétrico da instrumentação e resolução em frequência da análise. Para minimizar estes problemas são aplicados diferentes métodos estatísticos para estimar a FRF da medição. O sinal da resposta (saída) vem afetado pelo ruído elétrico de baixa amplitude. Além deste, pode conter ruído ambiente. Neste caso, a melhor estimativa da FRF é determinada pelo espectro cruzado entre a força de excitação e resposta a dividir pelo autoespectro da força.

$$H_1(\omega) = \frac{G_{FX}(\omega)}{G_{FF}(\omega)} \quad (3.2)$$

O sinal da excitação (entrada) vem afetado das limitações da energia de excitação, da não linearidade do transdutor, do nível elevado de ruído, entre outros. Assim, a melhor estimativa da FRF para diminuir o ruído à entrada, é determinada pelo auto espectro da excitação a dividir pelo espectro cruzado entre a força de excitação e resposta.

$$H_2(\omega) = \frac{G_{XX}(\omega)}{G_{XF}(\omega)} \quad (3.3)$$

No caso de existir ruído no sinal da resposta e da excitação, os dois parâmetros de estimação H_1 e H_2 fornecem um intervalo de confiança do verdadeiro valor da FRF.

A função coerência fornece-nos um meio de avaliar o grau de linearidade entre o sinal de entrada e o sinal de saída. O espectro cruzado (*Cross Spectrum*) estabelece que, se algum dos autoespectros contiver ruído, então a magnitude do espectro cruzado ao quadrado é menor que o produto dos autoespectros.

$$|G_{FX}(\omega)|^2 \leq G_{XX}(\omega) * G_{FF}(\omega) \quad (3.4)$$

Esta desigualdade verifica-se na presença do ruído, uma vez que este não é coerente. Esta relação dá origem à definição da função de coerência $\gamma(\omega)^2$:

$$\gamma(\omega)^2 = \frac{|G_{FX}(\omega)|^2}{G_{XX}(\omega) * G_{FF}(\omega)}, \quad 0 \leq \gamma(\omega)^2 \leq 1 \quad (3.5)$$

Esta função toma o valor de 1 na ausência de ruído na medição e 0 para ruído puro, aferindo, assim, o grau de confiança da medição e de coerência entre as medições realizadas. A aquisição dos dois sinais assenta na filtragem, amostragem e digitalização dos sinais analógicos, numa sequência de registos. A taxa de amostragem e o tamanho do registo são definidos em função da gama de frequências e da resolução da análise. Posteriormente, os sinais são processados através de sua multiplicação no tempo por uma função pesada. A função pesada no tempo é convertida pela aplicação da FFT no domínio da frequência, obtendo-se a representação de cada sinal no domínio da frequência. O autoespectro do sinal G_{XX} é calculado multiplicando o espectro pelo seu complexo conjugado. O espectro cruzado G_{XY} é determinado pelo produto do espectro complexo de um sinal pelo complexo conjugado do sinal.

A seleção do tipo de excitação, a localização dos transdutores, o tipo de transdutores, a montagem, os cabos de ligação, a calibração, e a redução ou eliminação de erros causados pelo efeito de *Aliasing* e *Leakage*, não linearidades e incoerência das fontes de ruído são fatores importantes para garantir a aquisição de FRFs de elevada qualidade.

A função H_2 é o estimador da FRF na presença de excitação aleatória e porque cancela o ruído na entrada e é menos sensível ao efeito de *Leakage*. Por outro lado, o estimador H_1 apresenta melhor representação das antirressonâncias porque cancela o ruído na saída. Numa excitação por impacto função os estimadores H_1 e H_2 apresentam igual desempenho, embora H_1 apresente um melhor comportamento nas antirressonâncias. A FRF do tipo aceleração e a respetiva função coerência estão representados na Figura 22. Esta revela que a função coerência apresenta valores próximos de zero quando à frequência a FRF possui antirressonâncias, os quais correspondem a situações de baixa razão sinal/ruído ou na presença de comportamento não-linear da estrutura.

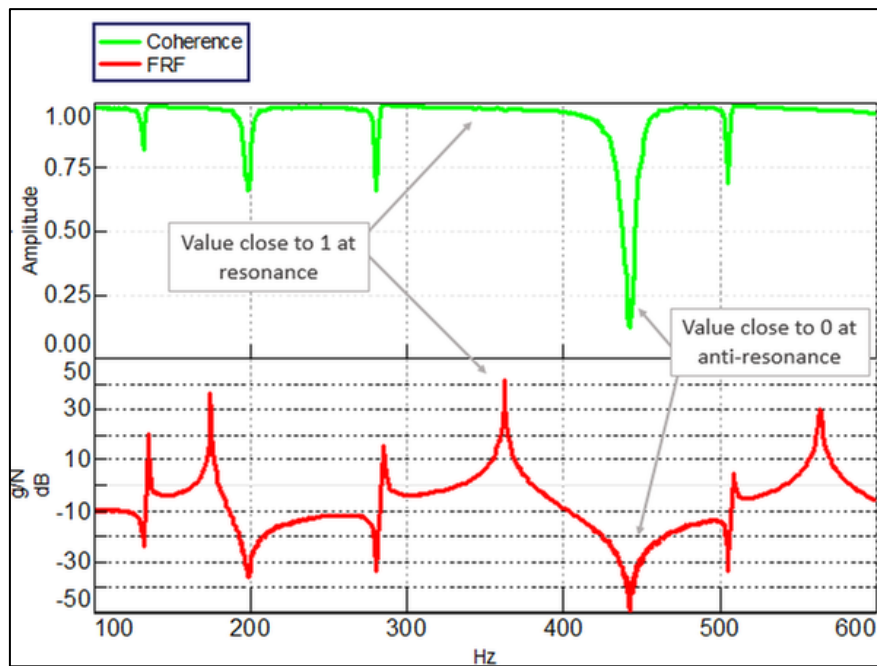


Figura 22- Representação da FRF do tipo aceleração e a respetiva função coerência [31].

A partir da análise da FRF que se apresenta na Figura 23 é possível identificar as frequências naturais do sistema e modos de vibração correspondentes. A partir deste conjunto e do modelo geométrico da estrutura é possível sintetizar um modelo matemático. Como o modelo sintetizado são extraídos os parâmetros modais: as frequências, modos e amortecimento modal. Através deste é também possível prever o comportamento do sistema mediante a introdução de alterações.

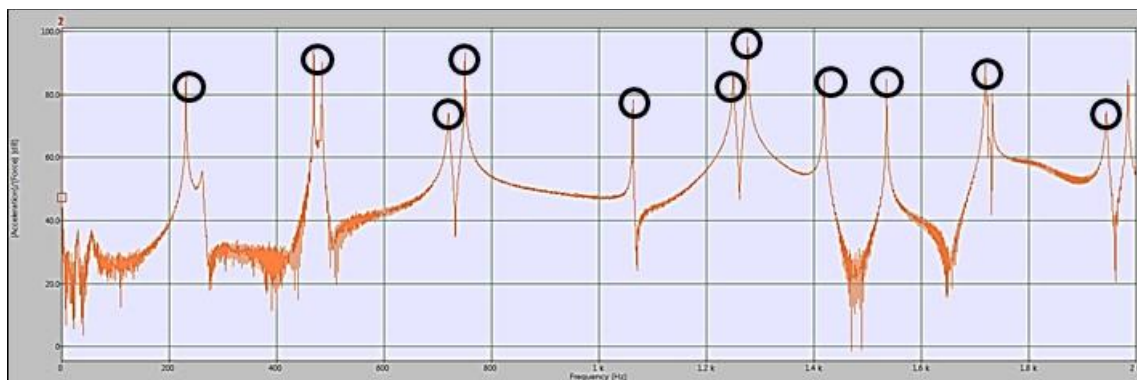


Figura 23- Identificação das frequências naturais de vibração a partir dos valores máximos da FRF.

A validação do modelo sintetizado é baseada na qualidade do ajuste das FRFs experimental e sintetizada e na análise da matriz Modal Assurance Criterion (MAC). Esta última avalia quantitativamente o grau de correlação entre os modos de vibração identificados e os sintetizados no modelo matemático, isto é, quando existe uma perfeita correlação, os valores da diagonal da matriz MAC aproximam-se de um, enquanto para valores fora da diagonal aproximam-se de zero, ver Figura 24.

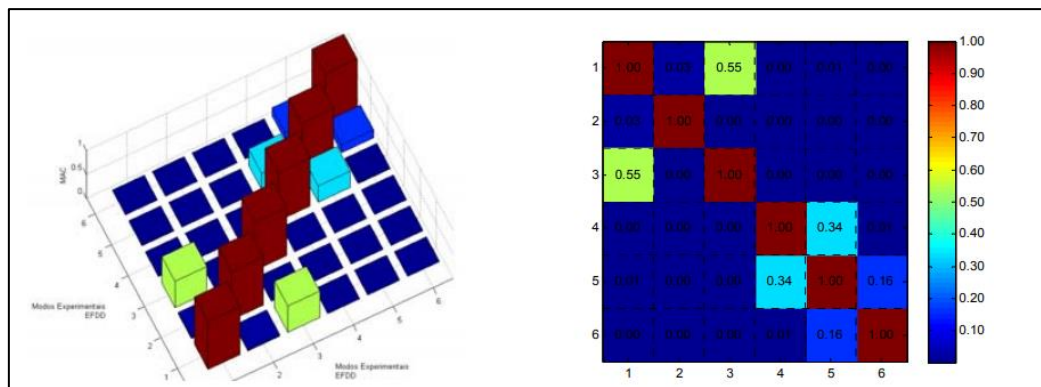


Figura 24- Representação do gráfico correspondente à matriz MAC [32].

3.2.5 Excitação (entrada)

Para a medição das FRF, a estrutura deve ser excitada através de uma força, medindo o seu valor no tempo. No que se refere à excitação, existem alguns parâmetros a ter em consideração, entre eles estão a sua aplicação, o tipo de excitação, a uma frequência ou numa banda de frequências, o controlo do espetro, a amplitude da excitação, a repetibilidade, a duração do ensaio e o comportamento linear ou não linear da estrutura.

Forças de excitação podem ser geradas por muitos tipos diferentes de dispositivos, ver Tabela 1. Para a excitação com grande espetro, são consideradas duas classes, excitadores de contacto permanente e sem contacto permanente.

Tabela 1- Tipo de excitação.

Excitadores	
Contacto Permanente	Sem Contacto Permanente
Excitador eletromagnético	Martelo de impacto
Excitador electro-hidráulico	Pêndulos de impacto
Rotação de massas excêntricas	Rutura de cabos sob tensão
Excitação acústica	Forças impulsivas
Excitação piezoelétrica	-

Para medir a força de excitação é usado habitualmente um transdutor piezoelétrico. Estes transdutores apresentam um tamanho e uma massa reduzidos, permite realizar medições numa gama ampla de amplitudes e de frequências e possui uma resposta linear ao longo de toda a gama. No caso do martelo de impacto, não existe acréscimo da massa do sistema, ao contrário do excitador eletromagnético que obriga ao contacto permanente com a estrutura, ver Figura 25.

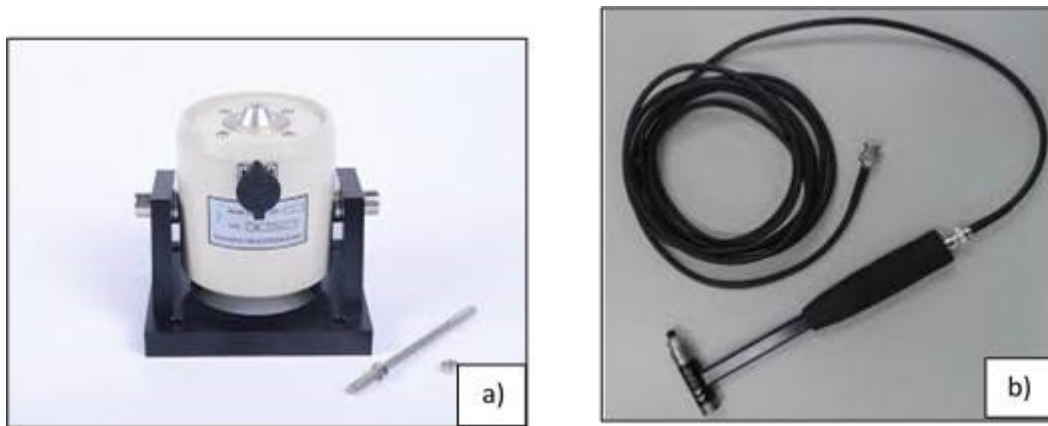


Figura 25- a) Excitador eletromagnético. b) Martelo de Impacto.

3.2.5.1 Excitação produzida pelo martelo de impacto

A técnica de excitação por impacto é a mais usada na análise modal, visto que é capaz de excitar uma ampla banda de frequências sem requerer elevado tempo de preparação do ensaio. O impacto produz uma transferência de energia transiente de curta duração. O espectro é contínuo, com uma amplitude máxima de 0 Hz e que decresce com a frequência. A gama de frequências útil vai desde 0 Hz até uma dada frequência, limitada pelo decréscimo da amplitude do autoespectro entre 10 dB a 20 dB, dependendo da razão sinal/ruído, ver Figura 26.

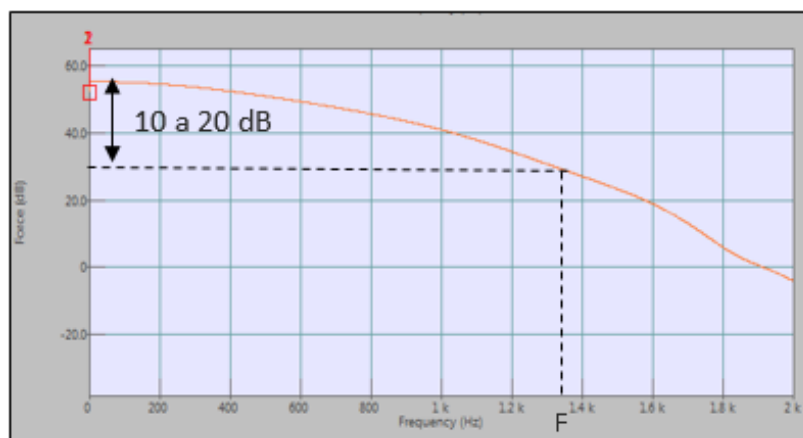


Figura 26- Representação do autoespectro do sinal da força e definição da gama útil de frequências.

A duração, o valor e a forma da força de impacto dependem da relação entre a massa e a rigidez do martelo e da estrutura, sendo representado um exemplo na Figura 27. A ponta do martelo de impacto atua como um filtro mecânico, o qual pode ser substituído para gerar forças de impacto de menor ou maior duração, conseguindo desta forma controlar a gama de frequências da excitação. As pontas em borracha produzem tempos de impacto mais longo que se traduz numa menor banda útil de frequências, já as pontas em aço produzem tempos de contacto mais curto e bandas de frequências maiores. A massa do martelo deve ser seleccionada de acordo com a energia de excitação, a qual depende da massa e rigidez da estrutura a excitar. O martelo de

impacto tem um transdutor de força na extremidade. Os martelos podem gerar forças de excitação que podem alcançar frequências de 10 kHz, dependendo do seu tamanho.

A utilização do martelo de impacto tem algumas vantagens em relação aos outros tipos de excitação. Requer menor tempo de preparação do ensaio, não necessita de acessórios elaborados, não existe adição de massa à estrutura, é adequado para medições de campo e o seu custo é relativamente mais baixo quando comparado com o excitador eletromagnético. Contudo, também existem desvantagens, uma vez que apresenta um elevado fator de pico, as estruturas de grandes dimensões podem ficar danificadas, o sinal é altamente determinístico, a função de coerência não permite detetar erros de *leakage* ou comportamento não linear e o espectro só pode ser controlado na sua frequência superior.

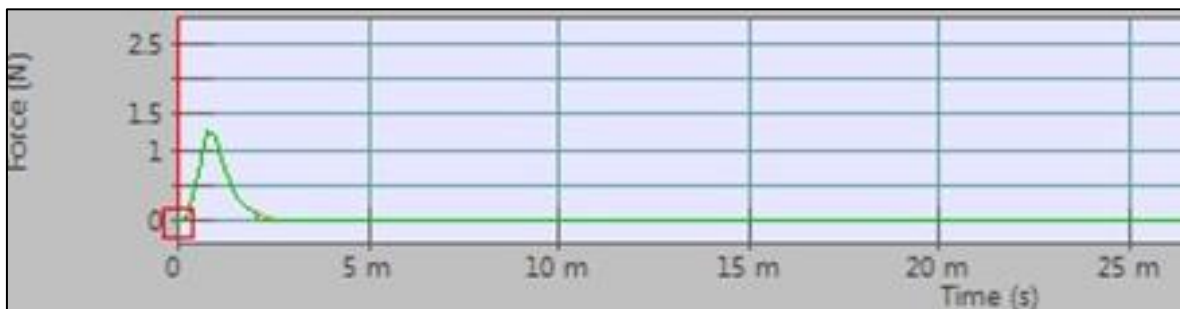


Figura 27- Representação da força no tempo produzida pelo martelo de impacto.

3.2.6 Resposta (saída)

A resposta pode ser medida na forma de deslocamento, velocidade ou aceleração, sendo necessário usar diferentes tipos de transdutores. No entanto, a medição da aceleração através de um acelerómetro piezoelétrico apresenta inúmeras vantagens relativamente aos outros transdutores, uma vez que apresenta boa linearidade, baixa massa, tem uma grande gama dinâmica, uma larga banda de frequência, uma estrutura rígida e compacta, resiste a ambientes agressivos, tem baixa sensibilidade transversal e é de simples montagem. Na Figura 28 apresenta-se a resposta no tempo da vibração livre de uma estrutura medida com um acelerómetro. Por integração numérica do sinal em aceleração podem ser determinados os correspondentes sinais em velocidade e em deslocamento.

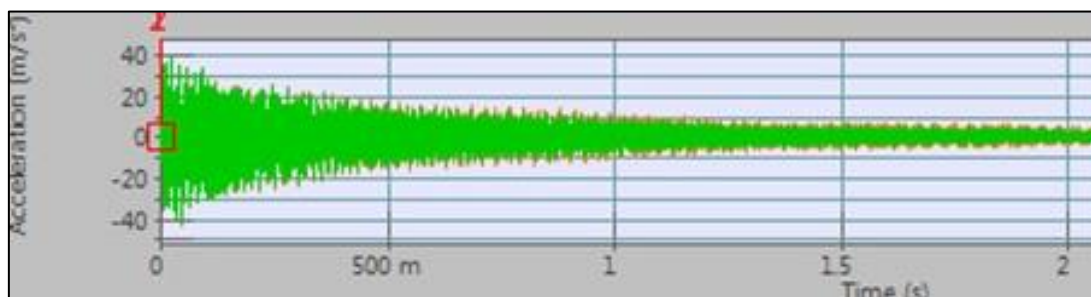


Figura 28- Representação da aceleração no tempo produzida registada pra uma estrutura em vibração livre.

Na seleção de um acelerómetro existem parâmetros que se devem ter especial atenção, os quais são definidos em função do tipo de aplicação, ver Figura 29. De entre os diversos parâmetros destacam-se a gama de frequências, sensibilidade, frequência de ressonância, tensão de polarização e a gama de temperatura[23]. Contudo, a utilização do acelerómetro pode influenciar de forma significativa a massa da estrutura, a sua rigidez e, conseqüentemente, o seu amortecimento. Para a correta medição das frequências naturais da estrutura deve-se ter em consideração a massa e a banda útil de frequências do acelerómetro, bem como o modo de fixação à estrutura.

Outras formas de medir a resposta da estrutura sem adição de massa é através da aplicação de sensores sem contacto, como são o caso do microfone e do Laser Vibrometer, pode ser observado na Figura 29. Contudo, estes têm a desvantagem de serem mais sensíveis a perturbações ambientais. O microfone é um transdutor capacitivo sensível à pressão acústica produzida pela resposta da estrutura. Uma vez que a medição é feita por proximidade à estrutura, não é possível estabelecer a relação entre a fase do movimento e a fase da pressão lida. Por este motivo não é possível identificar o modo de vibração da estrutura. Já o Laser Vibrometer é um transdutor baseado num interferómetro laser que permite medir a velocidade da resposta da estrutura em função da variação relativa da distância ao sensor. Neste caso, é possível determinar a amplitude e a fase do sinal da resposta, pelo que pode ser usado na determinação dos modos naturais de vibração. É importante referir que uma das ações mais importantes para a correta medição das vibrações é a seleção do transdutor que melhor se adapte a cada aplicação. Cada transdutor pode apresentar vantagens e limitações que são função do tipo de aplicação, não existindo um transdutor que satisfaça todos os requisitos.



Figura 29- Imagens de transdutores usados na medição da resposta da estrutura: a) Acelerómetro[33]. b) Laser Vibrometer[34]. c) Microfone[35].

3.2.6.1 Formas de fixação do acelerómetro

Para que o acelerómetro possa registar corretamente a vibração gerada na estrutura é aconselhado que a sua fixação seja realizada através de uma ligação aparafusada, uma vez que esta garante uma transmissão da vibração mais ampla em frequência e é uma ligação mais estável. Porém, este método nem sempre é o mais conveniente, visto que é necessário danificar a superfície. A montagem com base magnética e com cera de abelha são utilizadas para diminuir o tempo de montagem sem reduzir substancialmente a banda útil da análise. Na Figura 30 estão representadas a banda útil de frequências em função do tipo de fixação do acelerómetro [28]. Conclui-se que na prática, para a recolha do sinal em contínuo utiliza-se a fixação aparafusada, de modo a não ocorrer alteração da posição do acelerómetro. Caso haja necessidade de realizar medições em diferentes posições da estrutura, utiliza-se a fixação com base magnética ou com cera de abelha, com o intuito de facilitar o reposicionamento do acelerómetro.

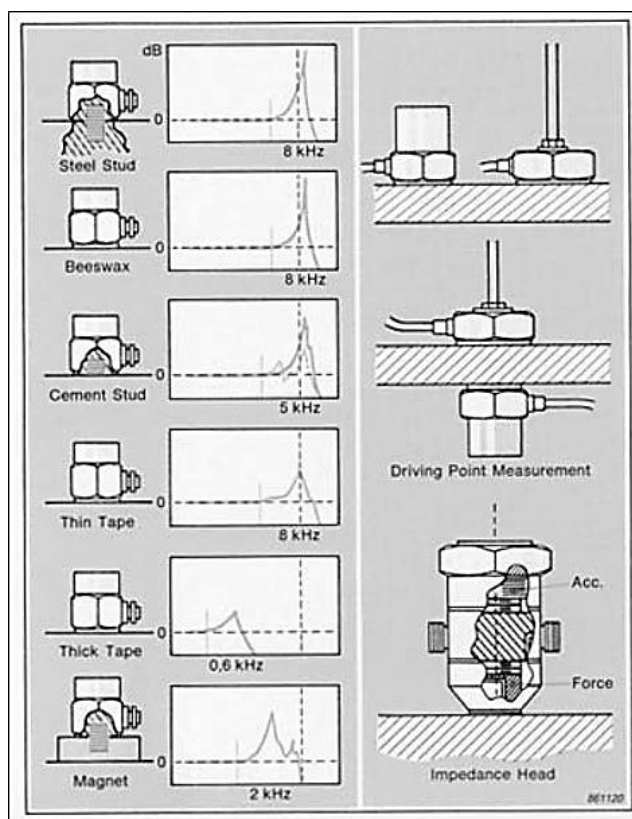


Figura 30- Formas de ligação de um acelerómetro à estrutura [29].

A adição da massa à estrutura através da montagem de um acelerómetro produz um decréscimo das suas frequências naturais. Para minimizar este efeito é recomendado utilizar um transdutor de massa reduzida, devendo a razão entre massas ser de 1/100. Por outro lado, a sua montagem vai introduzir restrições na flexão da estrutura e atrito na interface, produzindo um aumento da rigidez e do amortecimento. Quanto menores forem as dimensões do acelerómetro menor serão estes efeitos sobre a estrutura.

3.2.7 Analisador

Neste trabalho foi usado um analisador dinâmico de sinal Oros® modelo OR 35, representado na Figura 31, para medir a FRF de aceleração do tipo H_1 , tendo sido usado o martelo de impacto para excitação e um acelerómetro para a medição da resposta. Os dois sinais são adquiridos e processados no analisador dinâmico de sinal.



Figura 31- Analisador dinâmico de sinal Oros® modelo OR35.

3.2.7.1 Resolução

O número de linhas em que é dividido o espectro definem a resolução em frequência da análise. Refira-se que, uma maior resolução em frequência obriga a maior tempo de aquisição dos sinais e processamento dos dados. Todavia, maior tempo de aquisição resulta em maior ruído na medição para estruturas com médio e elevado amortecimento. Por estas razões, é importante encontrar um equilíbrio entre a resolução em frequência e o tempo de aquisição dos sinais. É usual utilizar-se um número de linhas de resolução mais elevada em estruturas pouco amortecidos, quando se pretende identificar frequências naturais com maior precisão ou para distinguir quando estas são muito próximas.

3.2.7.2 Tipo de janela

O problema de *Leakage* está associado ao problema da janela de amostragem ser inferior à duração do sinal da resposta da estrutura e à aplicação da transformada de Fourier, que resulta na observação dos picos de ressonâncias muito amplos. Este problema é ultrapassado através da aplicação ao sinal no tempo de janelas de ponderação. No caso concreto deste trabalho, foi usado para excitação uma força de impacto e a resposta medida com um acelerómetro. Ao sinal da força foi aplicada uma janela retangular com a duração do impulso para eliminar da análise o remanescente ruído e ao sinal da aceleração foi aplicado uma função de ponderação do tipo exponencial negativa com o mesmo decaimento, obrigando que o valor final fosse zero [36].

3.2.7.3 Médias

O cálculo das médias das FRFs tem como principal objetivo minimizar o efeito de variações aleatórias devido a ruído e remover as não linearidades do comportamento da estrutura. As médias são calculados no domínio do espectro, podendo ser usadas média aritmética simples ou média aritmética ponderada. A primeira é usada quando o número de medições é reduzido, enquanto a segunda é usada na presença de um número elevado de medições. No caso da excitação por impacto, foi realizada três médias aritméticas simples para determinação das FRFs.

3.2.7.4 Sinal de disparo

Nos fenómenos transientes é necessário definir o início para a aquisição dos dados. No caso concreto da excitação por impacto, o sinal da força é definido como sinal de disparo (*trigger*) para aquisição dos sinais. Os analisadores dinâmicos de sinal já vêm preparados para iniciar a aquisição dos sinais mediante a definição de um nível de disparo num dos canais, permitindo também registar valores anteriores a esse disparo. Um outro exemplo de aplicação é a aquisição da pressão acústica no ensaio com o microfone, em que é definido um nível em decibel de disparo da pressão acústica registado pelo microfone durante o impacto do martelo com a estrutura.

3.2.7.5 Função de Resposta em Frequência (FRF)

A Função de Resposta em Frequência aplica-se em sistemas lineares e não variáveis no tempo, descrevendo a relação entre a resposta e a força de excitação aplicada a um sistema mecânico. A partir da análise da FRF é possível:

- Identificar e avaliar as vibrações mecânicas;
- Detetar danos e/ou modificações estruturais;
- Desenvolver modelos numéricos a partir de dados experimentais;
- Qualificar e certificar estruturas e equipamentos;
- Criar critérios e especificações para projetos.

A FRF pode ser obtida com recurso a uma única entrada e uma saída (*SISO-Single Input Single Output*) ou com recurso a várias entradas e várias saídas (*MIMO- Multiple Input Multiple Output*) [36].

3.2.8 Identificação das frequências naturais de vibração na serra.

A resposta dinâmica de uma serra circular em repouso pode ser determinada através da análise modal experimental, sendo que neste caso não são contabilizados outros efeitos que influenciam o comportamento dinâmico da serra, como: a velocidade de rotação, o escoamento do ar, o contacto com o material a cortar, o aquecimento, etc.

Antes de realizar as medições das FRFs é necessário primeiro selecionar os dispositivos de excitação e de medição da resposta da estrutura. Neste trabalho foi selecionado o martelo de impacto para excitar a serra e a resposta foi medida usando um de três dispositivos: o acelerómetro, o microfone ou o laser Vibrometer. Através da leitura da resposta com o acelerómetro e com o laser Vibrometer é possível identificar para além das frequências naturais os modos naturais de vibração e o amortecimento modal.

Os sinais são adquiridos pelo analisador de sinal Oros® modelo OR35, sendo posteriormente analisados com o software NVGate®. Para a programação do software NVGate® é necessário seguir um procedimento de configuração do equipamento que é função dos sensores utilizados, tipo de sinal adquirido e da análise a realizar, sendo o procedimento detalhado no Anexo 7.1. Após a configuração do analisador, procede-se ao ajuste dos seus parâmetros através da realização de algumas medições. Quando se pretende realizar uma análise comparativa do comportamento vibratório entre várias serras, devem ser tidos em consideração vários fatores importantes durante a medição, como: o posicionamento da serra, o local de impacto e o local de leitura da resposta. Só assim é possível identificar variabilidades nas frequências naturais, associadas ao processo de fabrico das serras e que não são resultantes do procedimento de medição. O impacto deve ser realizado para produzir uma força transiente única. Contudo, não é só o local de impacto que influencia as medições, mas também a massa do acelerómetro, pois este pode provocar uma redução nas frequências, caso a sua massa seja significativa relativamente à massa da serra. Neste contexto, há também que contabilizar o aumento da rigidez introduzido pelo apoio da serra e que se reflete no aumento das frequências naturais. O procedimento para a identificação das frequências naturais de vibração a partir da medição FRFs está descrito no fluxograma apresentado na Figura 32. Para minimizar a influência do apoio sobre as frequências naturais da serra, recorreu-se a uma solução baseado em elementos em borracha com elevada flexibilidade, sobre os quais é colocada a serra. Numa segunda fase, procede-se à montagem do acelerómetro ou posicionamento do laser Vibrometer e definição da região de impacto. No caso da fixação do acelerómetro é utilizado cera de abelha, já a medição da velocidade com o laser Vibrometer requer a colocação na superfície de uma fita refletora. Em seguida procede-se à realização de 3 medições, sendo os sinais adquiridos pelo analisador e processados para determinação da média espectral das três FRFs. A validação do procedimento é realizada com base na análise da função coerência e esta representada na Figura 22, a qual deve apresentar valores próximos de 1 com a exceção das antirressonâncias. Por fim, as frequências naturais de vibração são identificadas a partir da seleção dos picos nas FRFs medidas.

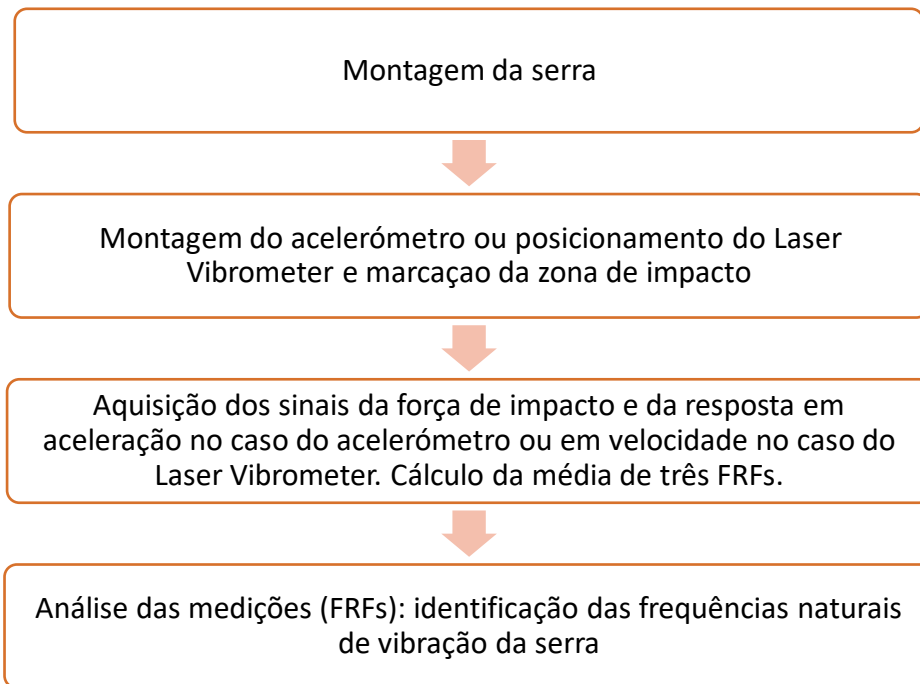


Figura 32- Fluxograma com as etapas para a identificação das frequências naturais de vibração da serra

Na seleção dos pontos de medição e excitação há que ter o cuidado de evitar linhas nodais dos modos analisados e para a banda de frequência selecionada. O mesmo problema não se coloca quando à medição da resposta através de um microfone, uma vez que a medição deixa de ser pontual. Para além disto, as medições com microfone têm a vantagem de não adicionar massa à serra e requerer menor tempo de preparação dos ensaios. O procedimento para a identificação das frequências naturais de vibração da serra segue o fluxograma da Figura 32. Este caso, distingue-se pelo registo somente da pressão acústica captada pelo microfone e a identificação das frequências naturais de vibração ser baseada somente na seleção dos picos do autoespectro da pressão acústica.

ANÁLISE DO PROCESSO DE FABRICO DA SERRA

- 4.1 Desenvolvimento de um sistema de apoio para a medição das frequências naturais da serra
- 4.2 Estudo preliminar das frequências naturais da serra
- 4.3 Sistema de controlo da linha de produção
- 4.4 Etapas críticas do processo de fabrico
- 4.5 Proposta de ações de melhoria.
- 4.6 Implementação do controlo de qualidade ao longo de toda a linha de produção

4 ANÁLISE DO PROCESSO DE FABRICO DA SERRA

4.1 Desenvolvimento de um sistema de apoio para a medição das frequências naturais da serra

É pretendido que a montagem experimental permita medir de forma consistente e rápida as frequências naturais da serra, causando o mínimo de interferência no seu comportamento. Só assim será possível identificar variações nas frequências associadas a cada etapa do processo produtivo. Para levar a cabo este objetivo é necessário caracterizar a influência nas frequências naturais da serra provocado pelo sistema de apoio, massa do acelerómetro e escolha dos pontos de medição e excitação. Este estudo será apresentado em seguida tendo como referência a medição das frequências naturais de vibração para as condições próximas das ideais.

4.1.1 Influência do sistema de apoio

O desenvolvimento do sistema de apoio das serras teve como principal objetivo reduzir a influência de rigidez introduzida na serra e, por consequência, a variação introduzida nas suas frequências naturais de vibração. O sistema desenvolvido utiliza três apoios em borrachas de elevada flexibilidade e montados igualmente desfasados entre si de 120 graus, ver Figura 33. Esta solução foi escolhida por permitir a rápida realização dos ensaios ao contrário de outras soluções. A posição dos apoios pode ser ajustada na direção radial para permitir a análise de serras com diferente diâmetro. Com o objetivo de determinar qual o acréscimo de rigidez introduzido pelos apoios para as suas diferentes posições, são determinadas as frequências naturais da serra Modelo 860.300.096.30. Estas são comparadas com as obtidas para a serra suspensa por fios flexíveis, percebendo, assim, qual a situação mais próxima da condição livre-livre, ou seja, a posição que menor variação introduz nas frequências naturais da serra.



Figura 33- Posições utilizadas nos ensaios de validação.

Seguindo o procedimento descrito anteriormente em que é usado um martelo de impacto PCB Piezotronics®- modelo 086C01 para excitação da estrutura e um acelerómetro PCB Piezotronics®- modelo 352C22 para medir a resposta em aceleração,

ver Figura 34. A partir dos sinais da força e aceleração são obtidas as FRFs do tipo $\dot{H}_1(\omega)$, para uma resolução em frequência de 312.5mHz e na gama de frequências até 2kHz, limitada pela energia de excitação do martelo.



Figura 34- Montagem experimental para a medição das frequências naturais de vibração da serra com o sistema de apoio em borracha.

Na Figura 35 é apresentada a montagem experimental da serra suspensa por fio flexível de modo a simular as condições mais próximas de apoio livre no espaço. As medições das FRFs do tipo $\dot{H}_1(\omega)$, seguiram o mesmo procedimento descrito anteriormente para a montagem da serra nos três apoios em borracha flexível.

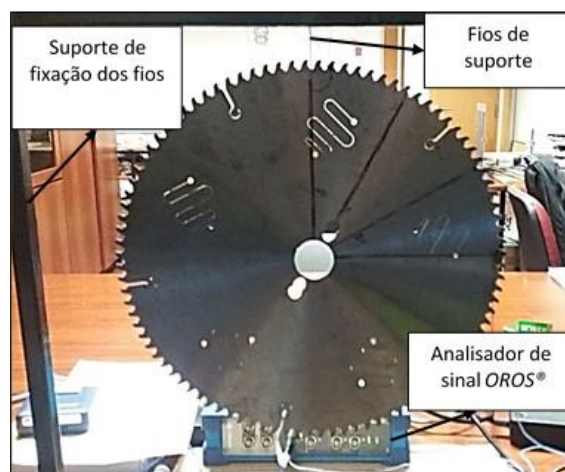


Figura 35- Montagem experimental para a medição das frequências naturais de vibração da serra suspensa por fio.

A partir da análise dos picos da magnitude das FRFs são identificadas as frequências naturais de vibração da serra modelo 860.300.096.30 antes do tensionamento, para posições do apoio em borracha colocados na extremidade interna da serra ($d=30$ mm), a 80 mm da extremidade interna ($d=80$ mm) e na extremidade externa da serra ($d=300$ mm), as quais são comparadas na Tabela 2 com as frequências para a serra suspensa por fio flexível para a banda de frequências de 0-1kHz. Refira-se que a primeira frequência natural de vibração foi omitida porque corresponde ao modo de corpo rígido da serra.

Como seria espectável, os apoios em borracha conduzem ao aumento das frequências naturais, devido ao acréscimo de rigidez introduzida na serra. Tomando como referência as frequências naturais da serra suspensa por fio, verifica-se que a menor variação nas frequências introduzida pelos apoios em borracha ocorre para $d=30$ mm e $d=80$ mm, sendo mais significativas, respetivamente, na segunda e primeira frequência. Todavia, constata-se que, no global, a menor variação da vibração ocorre para os apoios em borracha colocados na extremidade interna da serra ($d=30$ mm).

Tabela 2- Comparação das frequências naturais da serra modelo 860.300.096.30, com apoios em borracha para diferentes posições e livre no espaço.

f_n	Frequências Naturais [Hz]			
	Livre	$d=30$ mm	$d=80$ mm	$d=300$ mm
f_1	123,4	124,1	129,4	145,9
f_2	208,8	224,7	209,7	216,6
f_3	278,4	278,4	278,8	279,4
f_4	460,3	462,8	460,9	471,6
f_5	482,2	484,4	482,2	494,4
f_6	682,8	683,1	686,6	686,6
f_7	716,6	716,6	716,6	721,3
f_8	726,3	728,4	739,7	728,8
f_9	831,9	833,4	836,6	833,8
f_{10}	926,3	926,9	927,8	928,8

4.1.2 Influência da massa do acelerómetro

A montagem do acelerómetro na estrutura provoca um aumento da massa ou inércia da estrutura, podendo, ainda, influenciar a rigidez e amortecimento da mesma. O efeito da adição da massa do acelerómetro conduz à diminuição das frequências naturais da serra. De modo a avaliar o nível de influência da massa do acelerómetro, em função da sua localização, realizou-se uma análise comparativa das frequências naturais medidas com o acelerómetro e com o microfone, para o apoio colocado a $d=30$ mm. A seleção dos pontos de medição teve em consideração a localização das linhas nodais dos modos abrangidos na banda de análise. Foram definidos quatro pontos na extremidade da serra igualmente desfasados de um ângulo de 30 graus para a medição da resposta em aceleração, conforme representado na Figura 36. Seguindo o mesmo procedimento anterior, com a excitação fixa na posição fixa 1, foram medidas as FRFs nos quatro pontos e identificadas as frequências naturais da serra. As frequências naturais de vibração foram igualmente identificadas com base na análise do autoespectro da pressão acústica registado pelo microfone G.R.A.S modelo 46AE e produzida pelo impacto na posição 1, ver Figura 37.

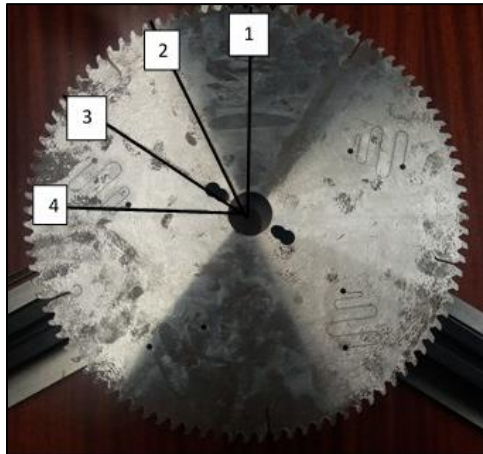


Figura 36- Montagem experimental para a identificação das frequências naturais de vibração com base na aceleração medida em diferentes posições através do acelerómetro.

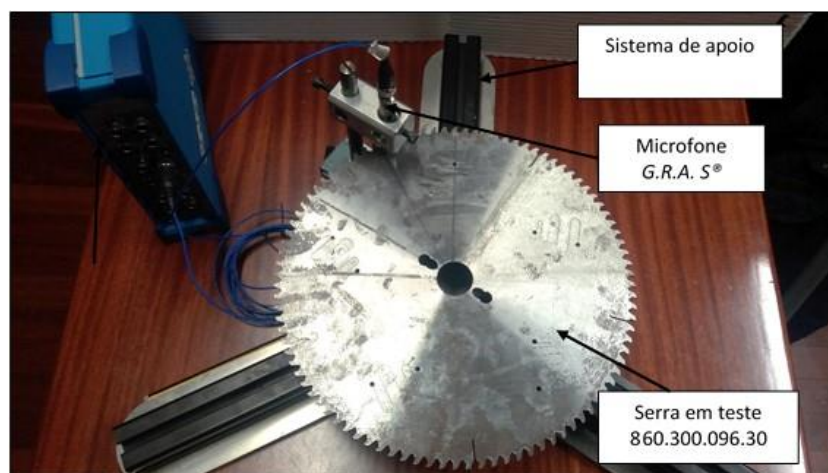


Figura 37- Montagem experimental para a identificação das frequências naturais de vibração com base na pressão acústica medida através do microfone.

Na Tabela 3 são comparadas as frequências identificadas com base na análise da pressão acústica e da aceleração medida nas quatro posições.

Tabela 3- Identificadas a partir da pressão acústica e da aceleração medida em 4 diferentes pontos.

f_n	Frequências naturais [Hz]			
	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4
f_1	124,1	124,1	123,8	124,4
f_2	224,1	224,7	224,7	224,7
f_3	278,4	278,4	278,4	278,8
f_4	462,8	462,8	463,1	463,1
f_5	484,4	484,4	485,6	484,4
f_6	683,1	683,1	683,1	683,1
f_7	716,6	716,6	716,9	716,9
f_8	729,1	728,4	727,2	727,5

Da variação da frequência para diferentes posições do acelerómetro apresentado na Tabela 4 mostra que a massa é pouco influente sobre as frequências naturais da serra, confirmado pelo erro relativo.

Tabela 4- Variação das frequências naturais de vibração obtidos com o acelerómetro relativamente às obtidas através do microfone;

f_n	Frequências Naturais [Hz]		Erro Relativo [%]
	Microfone	Ponto 1	Ponto 1
f_1	124,4	124,1	0,3
f_2	224,4	224,7	0,1
f_3	278,8	278,4	0,1
f_4	463,1	462,8	0,1
f_5	485,31	484,4	0,2
f_6	683,8	683,1	0,1
f_7	717,2	716,6	0,1
f_8	729,4	728,4	0,1

Na Tabela 4 é apresentado o erro relativo entre as frequências naturais de vibração identificadas através da medição com o acelerómetro e as obtidas tomando a média das frequências medidas nos quatro pontos da serra. Estes valores confirmam que a massa do acelerómetro tem pequena influência na determinação das frequências naturais de vibração desta serra na banda de 0-1kHz, sendo que os desvios observados podem ser justificados pela incerteza associada à resolução das FRFs, que foi neste caso de 312,5 mHz.

4.1.3 Proposta de melhorias

Com objetivo de garantir o posicionamento das serras em todas as medições, foi desenvolvido um encaixe que serve de guia para o centramento das serras. Este é formado por um elemento guia e por um elemento centrador, conforme se mostra na Figura 38. Deste modo, é garantido que as medições são realizadas com as serras na mesma posição e assim é evitado o aparecimento de variações nas frequências resultantes do seu incorreto posicionamento. O elemento que serve de guia é montado na zona central do sistema de apoio e fixo à base através de fita-cola de dupla face, ver Figura 39.

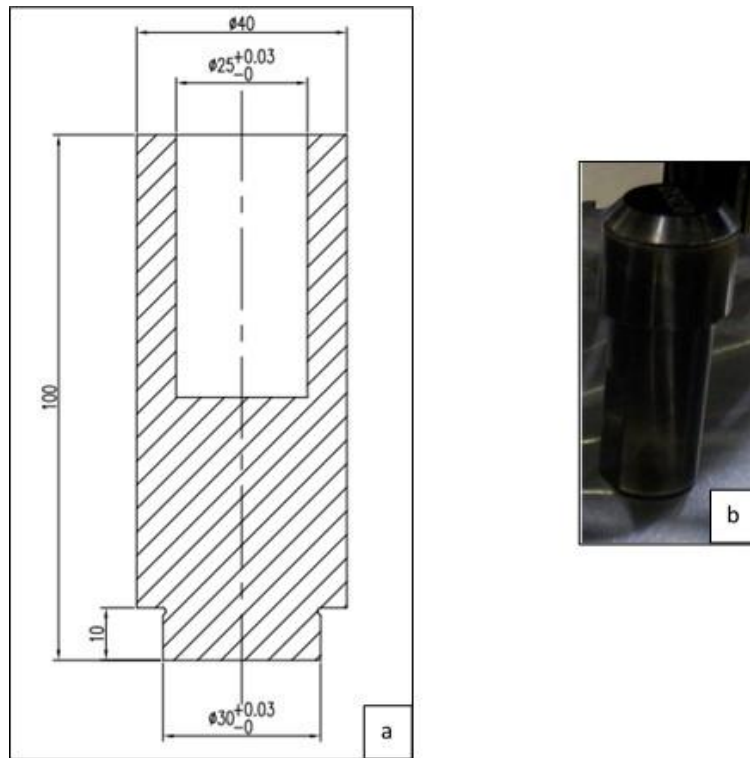


Figura 38- a) Guia desenvolvido para aplicar no apoio. b) Centrador.

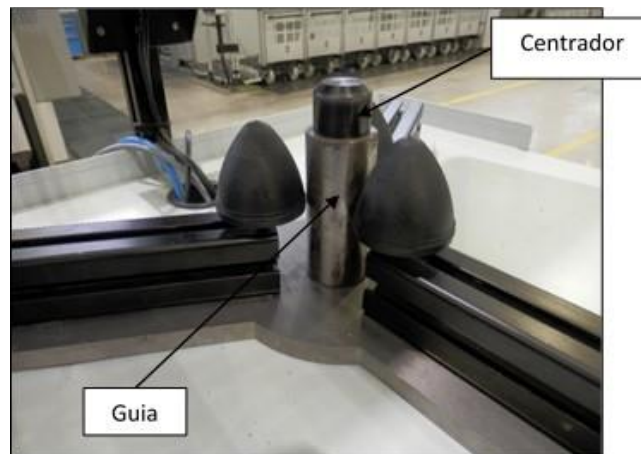


Figura 39- Apoio FREZITE com as melhorias aplicadas.

4.2 Estudo preliminar das frequências naturais da serra

Uma análise preliminar foi realizada a 5 serras retiradas de diferentes etapas do seu processo de fabrico, com objetivo de avaliar a sensibilidade das frequências naturais de vibração às alterações produzidas na serra. Assim, foram analisadas as frequências naturais de vibração da serra após a operação de retificação do corpo, tensionamento, retificação dos furos e dos encaixes, soldadura das pastilhas de corte, e, por fim, afiamento, sendo as suas imagens apresentadas na Figura 40.

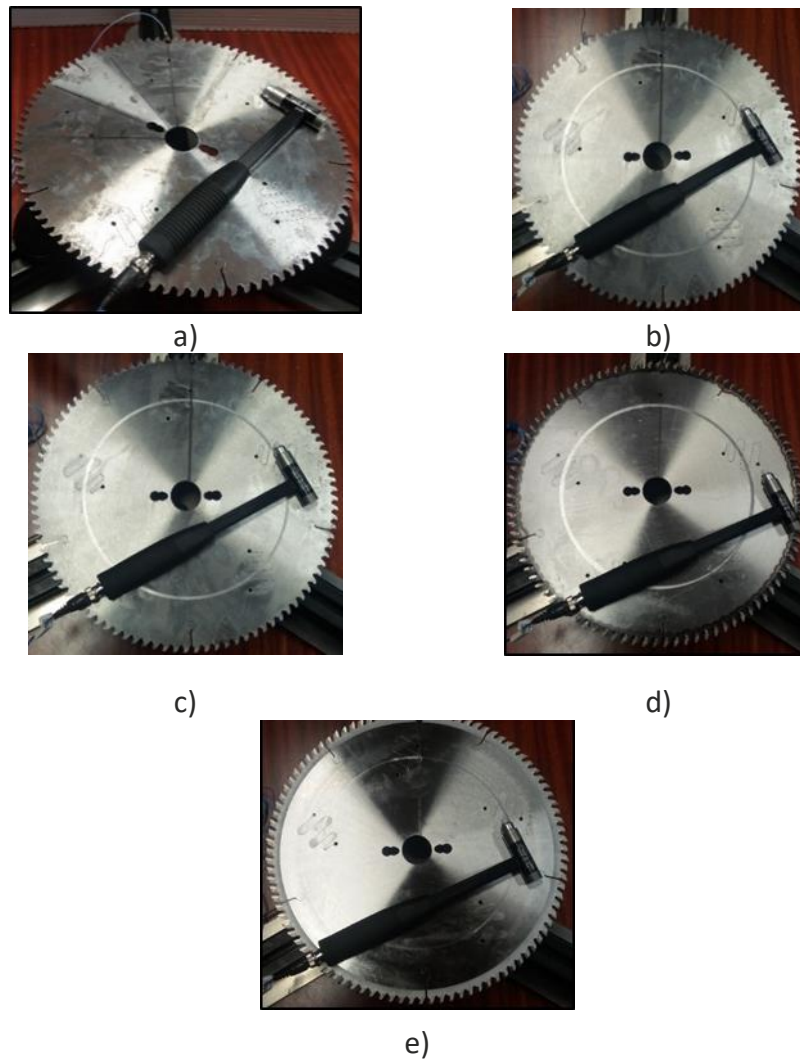


Figura 40- Serras ensaiadas: a) após a retificação do corpo, b) após o tensionado, c) após retificação do furo e dos encaixes, c) após a brasagem das pastilhas de corte, e) após o afiamento das pastilhas de corte.

A excitação da serra foi aplicada através do martelo de impacto e a resposta em aceleração foi medida com o acelerómetro. Os sinais foram adquiridos e processados usando um analisador dinâmico de sinal OROS modelo OR35, tendo-se obtido as FRFs do tipo $\hat{H}_1(\omega)$, com a resolução de 312,5 mHz e para uma gama de frequências 0-2kHz. Estes ensaios foram realizados usando o dispositivo de apoio desenvolvido e descrito neste trabalho. A partir da análise dos valores de pico da magnitude das FRFs foram

identificadas as frequências naturais de vibração para as diferentes etapas de fabrico das serras, cujos valores agora se apresenta na Tabela 5. Para a banda de frequências de 0-1kHz foram identificadas as dez primeiras frequências naturais de vibração da serra.

Tabela 5- Frequências naturais das serras identificadas nas diferentes etapas do processo de fabrico.

Frequências naturais [Hz]					
f_n	Após a retificação do corpo	Após o tensionamento	Após a retificação furos e encaixes	Após a soldadura das pastilhas de corte	Após o afiamento das pastilhas
f_1	124,1	151,6	149,7	142,5	155,9
f_2	224,7	180,9	187,8	-	-
f_3	278,4	317,8	314,1	292,5	315,9
f_4	462,8	440,0	444,7	402,2	404,1
f_5	484,4	519,1	515,0	467,5	503,4
f_6	683,1	695,9	708,1	634,7	647,5
f_7	716,6	758,8	756,3	662,2	712,8
f_8	728,4	788,4	-	729,1	-
f_9	833,4	812,8	820,3	750,0	764,4
f_{10}	926,9	949,1	965,3	855,6	913,4

Estes resultados revelam que as operações de tensionamento e soldaduras das pastilhas de corte são os que produzem maior variação nas frequências. Em particular, o tensionamento produz um aumento das frequências mais altas correspondentes ao maior número de diâmetros nodais e uma diminuição nas frequências mais baixas com o número de diâmetros nodais igual a 0 e 1. Estes resultados podem ser explicados pelo aumento das tensões de membrana circunferenciais, que têm maior influência nas frequências mais elevadas [1]. O processo de soldadura das pastilhas de corte vai conduzir ao aumento de massa na extremidade externa da serra, pelo que produz uma redução das frequências, principalmente nos modos com maior amplitude na zona de adição de massa. Após a soldadura, a serra passa pelo processo de decapagem na zona termicamente afetada e pelo processo de polimento com mó. Segue-se o processo de afiamento das pastilhas de corte, o que conduz a uma redução da massa na extremidade externa e o conseqüente aumentar das suas frequências naturais, conforme se pode comprovar pelos resultados apresentados na Tabela 5.

4.3 Sistema de controlo da linha de produção

Numa abordagem mais detalhada, decidiu-se acompanhar um conjunto de serras desde a primeira etapa do processo de fabrico até ao afiamento da pastilha de corte. Para que a serra apresente no final um desempenho desejado é necessário garantir ao longo do processo produtivo o controlo da espessura, massa, excentricidade, batimento, tensionado e frequências naturais. As serras apresentam variações indesejáveis desde o processo de corte laser, as quais têm como principal origem o facto de a chapa usado no fabrico das serras ser produzida pelo processo de laminagem, originando ortogonalidade das propriedades, variações de espessura, de massa, batimento e excentricidade. Estes fatores vão influenciar de forma decisiva todo o processo de fabrico das serras ao longo das diferentes etapas da linha de produção. O objetivo de algumas destas etapas é uniformizar as serras para que todas apresentem no final da linha as mesmas propriedades geométricas e dinâmicas. De modo a perceber a variabilidade introduzida por algumas das operações do processo de fabrico, bem como a origem dessa variabilidade, foi analisada a serra modelo 863.350.054.30 representada na Figura 41, cujo corpo foi fabricado por corte laser a partir de chapas de aço, com a designação ACO24.10- Ref.:2,54x360x2160, apresentada na Figura 42.

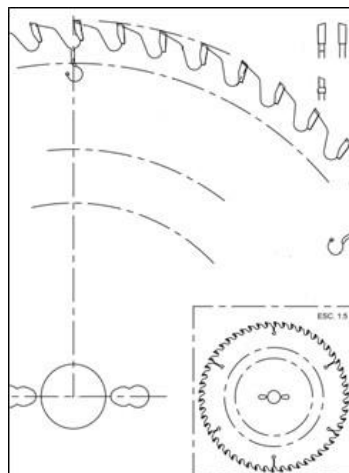


Figura 41- Desenho da serra 863.350.054.30.

Como primeiro passo, decidiu-se realizar o controlo da espessura da chapa ao longo do seu comprimento, com o objetivo de identificar variações. Foram realizadas quatro medições da espessura da chapa usando um micrómetro, as quais foram comparadas com a ficha técnica fornecida pelo fabricante. Só no caso de estas estarem em conformidade é que seguem para o processo de corte laser.



Figura 42- Chapa utilizada para o corte do corpo da serra.

O processo de corte laser da chapa inclui um algoritmo de otimização para maximizar o número de serras a serem cortadas. Para um controlo mais preciso das características do corpo das serras, foi decidido selecionar 4 serras obtidas de uma única chapa, sendo estas dispostas uniformemente ao longo do seu comprimento, conforme se mostra na Figura 43. Destas, foram selecionadas 6 serras para controlar a sua espessura, a massa, a excentricidade, e batimento.

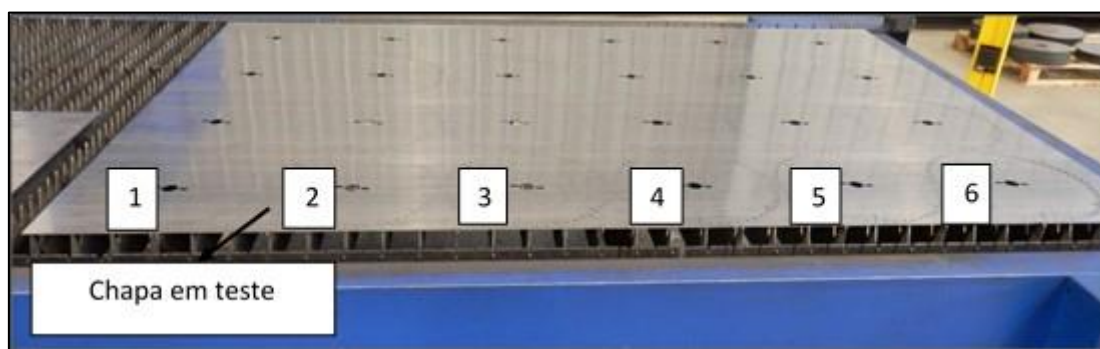


Figura 43- Disposição das serras consoante o local da chapa.

Através do controlo visual foi detetado que o corte apresenta um desvio ao longo da espessura e na direção perpendicular à serra, o qual está relacionado com um deficiente ajuste no plano de focagem do laser. Por esta razão, recomenda-se que sejam revistos os parâmetros da máquina de forma a diminuir este efeito. Devido à sobre-espessura imposta de 0,3 mm referente ao furo no corte a laser e de modo a poder verificar a sua excentricidade, ver Figura 44, foi desenvolvida uma anilha, em aço CK45, ver Anexo 7.3.13, com o intuito de centrar a serra nesta máquina. Através da medição da excentricidade pretende-se identificar as regiões da periferia da serra com maior e menor afastamento ao seu centro. Para agilizar este processo de controlo da excentricidade, recomenda-se que no futuro este seja substituído por um sistema de fixação que permita a rotação da serra, devendo o desvio ser medido por um comparador.

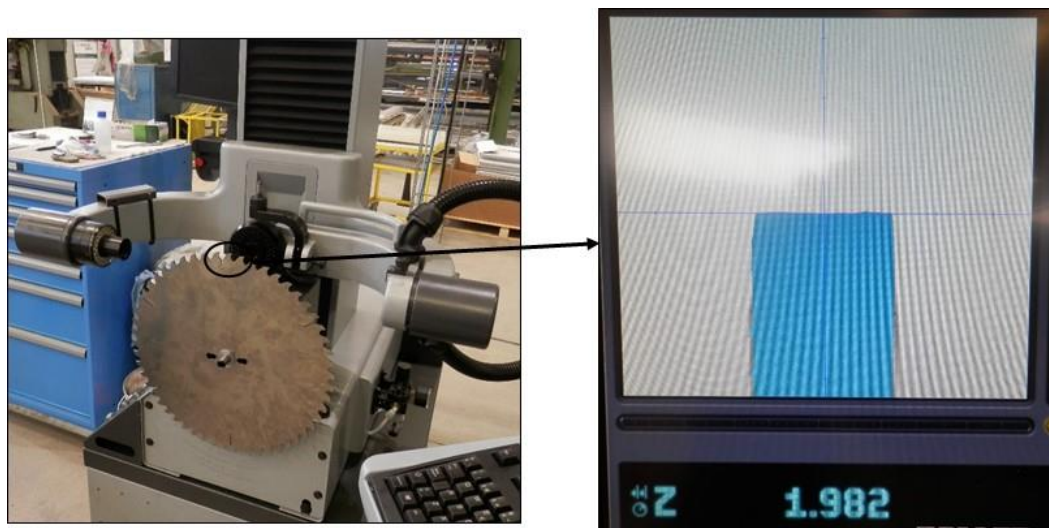


Figura 44- Medição da excentricidade da serra na máquina semiautomática.

A medição do batimento da serra foi medida para o diâmetro de 316 mm. Após o controlo destes 4 parâmetros, ver Anexo 7.3.2, foram seleccionadas as 3 serras com os valores mais próximos, para serem usadas como base de comparação ao longo de todo o processo produtivo. As serras escolhidas foram as serras 3, 4 e 5, das quais as serras 3 e 4 são as que apresentam maior proximidade nos valores medidos.

No sentido de comprovar a semelhança entre as serras seleccionadas foram igualmente medidas as suas frequências naturais de vibração para a condição livre-livre, seguindo o procedimento descrito anteriormente e cujos seus valores médios e desvio padrão se apresentam na Tabela 6. Os valores obtidos, permite afirmar que estas possuem propriedades muito semelhantes, o que valida a análise anteriormente realizada.

Tabela 6- Valores médios e desvio padrão das frequências naturais de três serra após o corte laser.

Frequências naturais f_n	Média [Hz]	Desvio Padrão [Hz]
f_1	115,1	0,3
f_2	203,1	0,9
f_3	260,3	0,3
f_4	440,6	0,3
f_5	452,4	0,2
f_6	654,1	0,3
f_7	763,2	0,2
f_8	842,3	0,2
f_9	867,2	0,3
f_{10}	917,3	0,4
f_{11}	1116,4	0,2
f_{12}	1141,2	0,4
f_{13}	1164,5	0,2

Na operação de polimento com lixa, é esperado que se verifique uma ligeira redução da massa da serra, provocado pela remoção da rebarba existente nas arestas de corte, e uma alteração do seu batimento, produzido pela operação de laminagem. Assim, foi realizado um novo controlo dos quatro parâmetros para as três serras, os quais são apresentados na Tabela 7, sendo os restantes valores apresentados no Anexo 7.3.3. Os resultados para a massa mostram que houve igual redução para a serra 3 e 4, enquanto para a serra 5 existe uma menor variação. Quanto à espessura, observa-se, como esperado, uma ligeira redução do seu valor nas três serras. Em relação ao batimento, obteve-se uma diminuição nas 3 serras, sendo menor na serra 5. O aumento da excentricidade nas três serras produzido por este processo, principalmente nas serras 4 e 5, pode ser justificado pela remoção dos empenos aquando do processo de laminagem.

Tabela 7- Parâmetros medidos durante controlo das serras após a etapa de polimento com lixa.

Parâmetros		
Massa [kg]	Serra 3	1,690
	Serra 4	1,685
	Serra 5	1,695
Excentricidade [mm]	Serra 3	0,133
	Serra 4	0,125
	Serra 5	0,141
Espessura Média [mm]	Serra 3	2,545
	Serra 4	2,545
	Serra 5	2,542
Batimento [mm]	Serra 3	0,12
	Serra 4	0,12
	Serra 5	0,15

À semelhança do estudo anterior, as frequências naturais de vibração das três serras foram medidas, sendo a variação média e respetivo desvio padrão apresentados na Tabela 8.

Tabela 8- Valor médio e desvio padrão da variação das frequências naturais nas três serras, produzido pelo polimento com lixa.

Varição das frequências naturais Δ_f	Média [Hz]	Desvio Padrão [Hz]
Δ_{f1}	0,0	0,0
Δ_{f2}	0,7	0,9
Δ_{f3}	0,0	0,0
Δ_{f4}	-0,1	0,2
Δ_{f5}	-0,2	0,2
Δ_{f6}	0,0	0,0
Δ_{f7}	0,0	0,0
Δ_{f8}	-0,1	0,2
Δ_{f9}	-0,1	0,2
Δ_{f10}	0,1	0,2
Δ_{f11}	0,0	0,0
Δ_{f12}	0,0	0,3
Δ_{f13}	0,0	0,0

As variações observadas nas frequências naturais das serras produzidas pelo processo de polimento com lixa não são significativas, uma vez que estão dentro dos limites do erro da medição $\pm 0,325$ Hz. Segue-se a etapa do revenido para homogeneizar as propriedades do material e para a redução da sua dureza de 65 HRC para 42-44HRC. Para evitar o aumento do batimento, as serras são montadas numa prensa mecânica, seguindo a sequência descrita no capítulo 2.2. As serras de teste foram montadas na posição mais próxima do prato do topo, ver Figura 45, para minimizar o efeito de mola existente nas posições intermédias da pilha, o que poderia conduzir ao aparecimento de empenos.

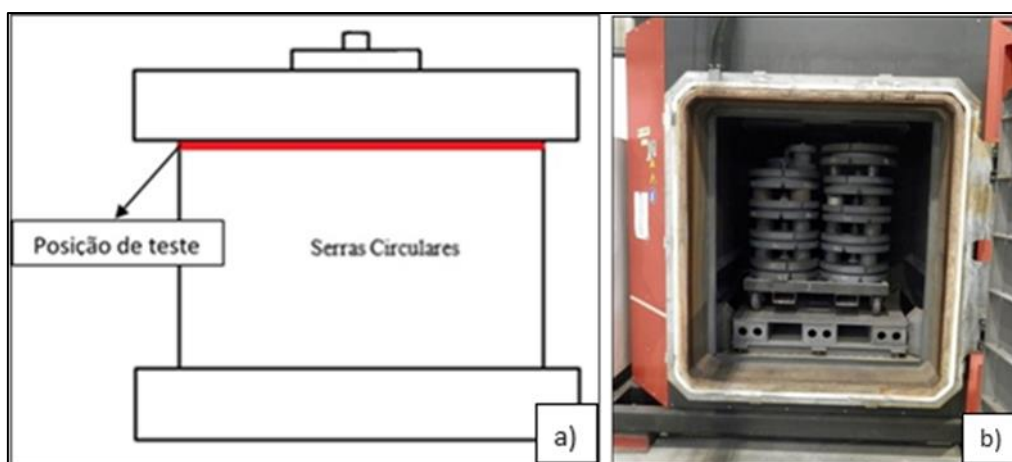


Figura 45- Esquema explicativo da montagem da serra na prensa, com: a) identificação da posição, b) imagem da colocação no forno.

Após o tratamento térmico de revenido, seguiu-se um novo controlo dos quatro parâmetros que agora se apresentam Tabela 9, sendo de esperar que o revenido produza uma redução no batimento das serras.

Tabela 9- Parâmetros medidos durante controlo das serras após o revenido.

Parâmetros		
Massa [kg]	Serra 3	1,690
	Serra 4	1,685
	Serra 5	1,695
Excentricidade [mm]	Serra 3	0,149
	Serra 4	0,148
	Serra 5	0,145
Espessura Média [mm]	Serra 3	2,545
	Serra 4	2,545
	Serra 5	2,542
Batimento [mm]	Serra 3	0,05
	Serra 4	0,03
	Serra 5	0,04

Os resultados mostram que este processo permitiu reduzir substancialmente o batimento que passou de 0,2mm para 0,05mm. Como seria de esperar, não se verificaram variações da massa e da espessura das serras. Contudo, observou-se um aumento na excentricidade e na espessura das serras, ver Anexo 7.3.4.

Seguindo a mesma metodologia de controlo das serras, foram identificadas as novas frequências naturais, as quais foram comparadas com as medidas antes do tratamento térmico e cuja variação média e respetivo desvio padrão se apresenta na Tabela 10.

Tabela 10- Valor médio e desvio padrão da variação das frequências naturais nas três serras, produzido pelo revenido.

Varição das frequências naturais Δ_f	Média [Hz]	Desvio Padrão [Hz]
Δ_{f1}	-3,8	0,7
Δ_{f2}	4,8	0,9
Δ_{f3}	-5,0	0,7
Δ_{f4}	-5,1	1,0
Δ_{f5}	4,5	0,3
Δ_{f6}	-5,2	0,8
Δ_{f7}	4,9	0,2
Δ_{f8}	3,1	0,4
Δ_{f9}	-4,2	1,0
Δ_{f10}	-4,8	1,0
Δ_{f11}	5,7	0,3
Δ_{f12}	-3,5	1,0
Δ_{f13}	4,2	0,4

Esta mostra que há uma variação distintas nas frequências naturais, com um desvio padrão pouco significativo, inferior a 1 Hz, o que representa um elevado nível de controlo do processo. A dispersão na média das frequências é previsível, uma vez que o revenido produz uma relaxação das tensões na direção de laminagem e um consequente aumento na outra direção.

O processo de retificação pretende uniformizar a espessura de todo o corpo da serra. A Tabela 11 apresenta os valores medidos após esta operação, sendo de destacar que se verificou uma redução significativa da espessura da serra devido à remoção de material. Não se observaram variações relevantes no batimento e na excentricidade da serra.

Tabela 11- Parâmetros medidos durante controlo das serras após a retificação do corpo.

Parâmetros		
Massa [kg]	Serra 3	1,659
	Serra 4	1,658
	Serra 5	1,663
Espessura Média [mm]	Serra 3	2,497
	Serra 4	2,501
	Serra 5	2,499
Batimento [mm]	Serra 3	0,03
	Serra 4	0,04
	Serra 5	0,03

A média das frequências naturais, apresentadas na Tabela 12, mostra que ocorreu uma redução em todas as frequências naturais da serra devido redução de rigidez à flexão provocado pela diminuição da espessura. A média da variação nas frequências introduzida pelo processo é baixa quando comparadas com o seu desvio padrão.

Tabela 12- Valor médio e desvio padrão da variação das frequências naturais nas três serras pela retificação do corpo da serra.

Varição das frequências naturais Δf	Média [Hz]	Desvio Padrão [Hz]
Δf_1	-0,3	0,8
Δf_2	-7,5	0,9
Δf_3	-3,4	0,9
Δf_4	-8,0	1,2
Δf_5	-13,0	0,5
Δf_6	-13,1	1,1
Δf_7	-19,5	0,3
Δf_8	-24,4	0,7
Δf_9	-18,2	1,2
Δf_{10}	-19,6	1,2
Δf_{11}	-27,1	0,4
Δf_{12}	-25,1	1,3
Δf_{13}	-28,2	0,6

O processo de tensionamento da serra tem como finalidade aumentar a sua estabilidade em serviço, isto é, aumentar a rigidez à torção do corpo. Nesta operação, são introduzidos na serra anéis de deformação plástica através do encalque de dois rolos, visíveis na Figura 46. Os quatros parâmetros de controlo foram de novo avaliados, sendo o seu resultado apresentado na Tabela 13. Os resultados permitem verificar que o processo de tensionamento não produz variações de relevo. Por outro lado, já a análise das frequências mostra que ocorreram variações significativas, sendo os desvios das frequências entre as serras muito pequenos. Este resultado prova, mais uma vez, que a análise das frequências naturais é o meio mais eficaz para o controlo do processo produtivo.



Figura 46- Etapa de tensionamento da serra.

Tabela 13- Parâmetros medidos durante controlo das serras após o tensionamento.

Parâmetros		
Tensionamento [mm]	Serra 3	0,18
	Serra 4	0,20
	Serra 5	0,19
Batimento [mm]	Serra 3	0,04
	Serra 4	0,04
	Serra 5	0,04

As variações das frequências naturais das três serras produzidas pelo tensionamento são apresentadas na Tabela 14 na forma de valor médio e desvio padrão. A sua interpretação é complexa, uma vez que esta variação não é uniforme para as frequências naturais da serra analisadas. Este facto pode ser explicado pela alteração substancial do estado de tensão gerado pelo processo de tensionamento. De salientar que a segunda frequência natural de vibração não está apresentada na Tabela 14, uma vez que o modo associado apresenta uma linha nodal no ponto de medição.

Tabela 14- Valor médio e desvio padrão da variação das frequências naturais nas três serras, produzido pelo tensionamento.

Variação das frequências naturais Δ_f	Média [Hz]	Desvio Padrão [Hz]
Δ_{f1}	29,9	0,7
Δ_{f2}	-	-
Δ_{f3}	93,3	0,4
Δ_{f4}	-15,7	0,8
Δ_{f5}	32,0	0,8
Δ_{f6}	48,9	0,8
Δ_{f7}	-30,0	0,9
Δ_{f8}	-20,4	0,6
Δ_{f9}	42,4	0,7
Δ_{f10}	52,5	1,1
Δ_{f11}	-29,8	1,2
Δ_{f12}	2,8	0,3
Δ_{f13}	16,0	0,6

A subespessura do furo é criada aquando do processo de corte laser para que este possa ser retificado para uma tolerância G6, sendo o processo ilustrado na Figura 47. Esta operação requer que serra seja corretamente posicionada para evitar o descentramento do furo em relação ao corpo da serra. Todavia, o processo de posicionamento atualmente usado tem como referência o furo existente, pelo que não permite corrigir qualquer excentricidade criado pelo processo de corte laser. Com a exceção de uma redução ligeira da massa, os restantes parâmetros permanecem inalterados, conforme se pode observar pelos valores apresentado na Tabela 15. Quanto às frequências naturais apresentadas na Tabela 16, observa-se que as variações introduzidas por este processo são inferiores à resolução das medições, sendo por isso consideradas insignificantes.

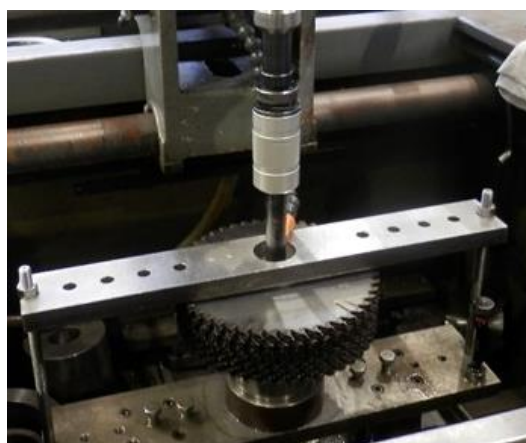


Figura 47- Etapa de Retificação do furo com uma tolerância G6.

Tabela 15- Parâmetros medidos durante controlo das serras após a retificação do furo.

Parâmetros		
Massa [kg]	Serra 3	1,659
	Serra 4	1,658
	Serra 5	1,663
Batimento [mm]	Serra 3	0,04
	Serra 4	0,04
	Serra 5	0,04
Diâmetro interno [mm]	Serra 3	30,02
	Serra 4	30,03
	Serra 5	30,02

Tabela 16- Valor médio e desvio padrão da variação das frequências naturais nas três serras, produzido pela retificação do furo.

Varição das frequências naturais Δ_f	Média [Hz]	Desvio Padrão [Hz]
Δ_{f1}	0,5	0,4
Δ_{f2}	-	-
Δ_{f3}	0,1	0,3
Δ_{f4}	0,5	0,5
Δ_{f5}	0,2	0,2
Δ_{f6}	0,2	0,2
Δ_{f7}	0,5	0,3
Δ_{f8}	0,7	0,8
Δ_{f9}	0,4	0,2
Δ_{f10}	0,5	0,2
Δ_{f11}	0,5	0,2
Δ_{f12}	0,9	0,3
Δ_{f13}	0,6	0,4

Conforme já foi referido, a operação de retificação do encaixe tem como propósito preparar os entalhes para garantir uma correta montagem e soldadura das pastilhas de corte. Este é um processo semi-automático que não tem controlo sobre o desgaste da mó, ver Figura 48. As compensações do desgaste são realizadas de tempos em tempos manualmente pelo operador em função do nível de ruído gerado pelo processo.



Figura 48- Etapa de Retificação do encaixe.

Os resultados após a retificação dos entalhes são expostos na Tabela 17, os quais não apresentam variações significativas em relação ao processo anterior. A mesma leitura é feita a partir da análise da variação das frequências naturais que são apresentadas na Tabela 18. Este resultado prova que o processo tem pouca relevância para o comportamento da serra.

Tabela 17- Parâmetros medidos durante controlo das serras após a retificação dos encaixes.

Parâmetros		
Massa [kg]	Serra 3	1,658
	Serra 4	1,657
	Serra 5	1,662
Batimento [mm]	Serra 3	0,04
	Serra 4	0,04
	Serra 5	0,04
Excentricidade [mm]	Serra 3	0,09
	Serra 4	0,08
	Serra 5	0,10

Tabela 18- Valores médios e desvio padrão da variação das frequências naturais nas três serras, produzido pela retificação do encaixe.

Varição das frequências naturais Δ_f	Média [Hz]	Desvio Padrão [Hz]
Δ_{f1}	-0,6	0,6
Δ_{f2}	-	-
Δ_{f3}	0,1	1,3
Δ_{f4}	0,1	1,7
Δ_{f5}	0,3	1,3
Δ_{f6}	0,7	0,8
Δ_{f7}	0,5	2,0
Δ_{f8}	0,4	1,7
Δ_{f9}	1,0	0,3
Δ_{f10}	0,9	0,9
Δ_{f11}	1,2	1,9
Δ_{f12}	0,8	1,7
Δ_{f13}	1,5	0,6

Após a lavagem da serra segue-se a operação da soldadura por brasagem das pastilhas de corte, a qual conduz ao aumento da massa na extremidade livre da serra, sendo o processo mostrado na Figura 49. Os valores apresentados na Tabela 19 e na Tabela 20, mostram que um ligeiro aumento da massa provoca uma redução muito significativa das frequências naturais. Os valores do desvio padrão apresentados na Tabela 20 são insignificantes quando comparados com a média da variação das frequências naturais, podendo-se afirmar que a automatização de processo permite obter elevados níveis de controlo do processo.

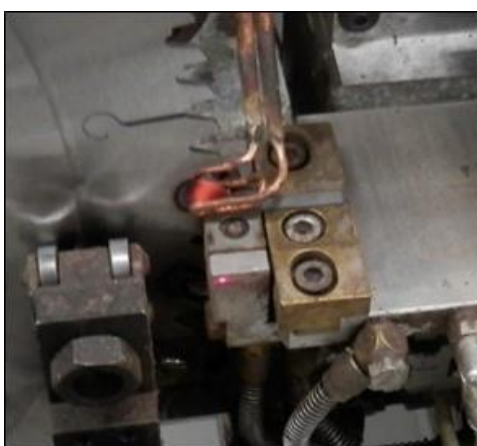


Figura 49- Processo de brasagem das pastilhas de corte ao corpo da serra.

Tabela 19- Parâmetros medidos durante controlo das serras após a brasagem das pastilhas de corte.

Parâmetros		
Massa [kg]	Serra 3	1,738
	Serra 4	1,734
	Serra 5	1,735
Batimento [mm]	Serra 3	0,03
	Serra 4	0,03
	Serra 5	0,02

Tabela 20- Valor médio e desvio padrão da variação das frequências naturais nas três serras, produzido pela brasagem da pastilha de corte.

Varição das frequências naturais Δf	Média [Hz]	Desvio Padrão [Hz]
Δ_{f1}	-6,1	0,2
Δ_{f2}	-	-
Δ_{f3}	-17,2	0,0
Δ_{f4}	-23,3	0,2
Δ_{f5}	-36,7	0,2
Δ_{f6}	-63,4	0,4
Δ_{f7}	-41,0	0,2
Δ_{f8}	-41,4	0,2
Δ_{f9}	-104,7	0,3
Δ_{f10}	-92,3	0,4
Δ_{f11}	-73,9	0,1
Δ_{f12}	-112,8	1,1
Δ_{f13}	-95,3	0,9

A operação de decapagem destina-se à remoção do excesso de solda e limpar a zona afetada termicamente pela soldadura. Esta é normalmente realizada através da projeção de areia simultaneamente em ambas as faces da serra, sendo a máquina usada para esse efeito apresentada na Figura 50. As variações na serra introduzidas por este processo podem ser determinados com base nos valores apresentados nas Tabela 21 e na Tabela 22, as quais são referentes aos quatro parâmetros de controlo e variações produzidas nas frequências naturais. Mais uma vez se conclui que esta etapa tem pouco influente no comportamento da serra.



Figura 50- Processo de decapagem por jato de areia.

Tabela 21- Parâmetros medidos durante controlo das serras após a decapagem.

Parâmetros		
Massa [kg]	Serra 3	1,739
	Serra 4	1,733
	Serra 5	1,734
Batimento [mm]	Serra 3	0,03
	Serra 4	0,03
	Serra 5	0,04
Espessura Média [mm]	Serra 3	2,498
	Serra 4	2,500
	Serra 5	2,499

Tabela 22- Valor médio e desvio padrão da variação das frequências naturais nas três serras, produzido pela decapagem por jato de areia.

Varição das frequências naturais Δ_f	Média [Hz]	Desvio Padrão [Hz]
Δ_{f1}	-0,9	0,0
Δ_{f2}	-	-
Δ_{f3}	-1,4	0,2
Δ_{f4}	0,8	0,2
Δ_{f5}	-2,2	0,3
Δ_{f6}	-2,4	0,2
Δ_{f7}	0,6	0,0
Δ_{f8}	0,2	0,4
Δ_{f9}	-2,4	0,2
Δ_{f10}	-2,8	0,3
Δ_{f11}	1,4	0,3
Δ_{f12}	-2,7	0,2
Δ_{f13}	-0,3	0,0

A serra passa em seguida pelo processo de polimento com mó para remover riscos da região central do corpo e melhorar a sua aparência. Esta operação é realizada por uma mó em rotação centrada com o corpo da serra. Como seria de esperar, há uma ligeira variação nos parâmetros analisados, conforme mostram os resultados das Tabela 23 e na Tabela 24. Inesperadamente, verifica-se um aumento da dispersão na variação das frequências entre as serras.

Tabela 23- Parâmetros medidos durante controlo das serras após o polimento com mó.

Parâmetros		
Massa [kg]	Serra 3	1,738
	Serra 4	1,732
	Serra 5	1,734
Batimento [mm]	Serra 3	0,03
	Serra 4	0,03
	Serra 5	0,04
Espessura Média [mm]	Serra 3	2,495
	Serra 4	2,495
	Serra 5	2,496

Tabela 24- Valor médio e desvio padrão da variação das frequências naturais nas três serras, produzido pelo polimento com mó.

Varição das frequências naturais Δ_f	Média [Hz]	Desvio Padrão [Hz]
Δ_{f1}	0,5	1,1
Δ_{f2}	-	-
Δ_{f3}	0,7	1,5
Δ_{f4}	-0,2	1,3
Δ_{f5}	0,6	1,6
Δ_{f6}	0,6	1,4
Δ_{f7}	0,0	1,3
Δ_{f8}	-1,3	1,7
Δ_{f9}	0,7	1,0
Δ_{f10}	0,4	1,6
Δ_{f11}	0,2	1,4
Δ_{f12}	0,7	0,7
Δ_{f13}	-0,4	1,4

Por fim, o processo de afiamento pretende dar forma e definir a aresta de corte das pastilhas. Esta operação reduz a massa das pastilhas conforme se pode comprovar pelos valores apresentados na Tabela 25 e provoca aumento significativo das frequências naturais das serras, ver Tabela 26.

Tabela 25- Parâmetros medidos durante controlo das serras após o afiamento das pastilhas.

Parâmetros		
Massa [kg]	Serra 3	1,716
	Serra 4	1,713
	Serra 5	1,714
Batimento [mm]	Serra 3	0,05
	Serra 4	0,03
	Serra 5	0,04
Tensionamento [mm]	Serra 3	0,15
	Serra 4	0,15
	Serra 5	0,20

Tabela 26- Valor médio e desvio padrão da variação das frequências naturais nas três serras produzido pelo afiamento.

Varição das frequências naturais Δ_f	Média [Hz]	Desvio Padrão [Hz]
Δ_{f1}	2,0	0,2
Δ_{f2}	-	-
Δ_{f3}	4,9	0,2
Δ_{f4}	5,0	0,3
Δ_{f5}	10,0	0,5
Δ_{f6}	16,5	0,9
Δ_{f7}	9,4	0,4
Δ_{f8}	9,6	0,5
Δ_{f9}	25,8	1,2
Δ_{f10}	25,0	1,1
Δ_{f11}	16,5	1,0
Δ_{f12}	35,3	1,0
Δ_{f13}	15,6	0,7

Em suma, as três serras seleccionadas para este estudo apresentam no final do processo produtivo, massa, batimento, tensionamento e frequências naturais muito semelhantes, o que são um bom indicador do nível de controlo de todo o processo produtivo das serras. Contudo, poderão ser introduzidas algumas melhorias que conduzam à redução das variações identificadas nalgumas das etapas. Na Figura 51 é apresentada a imagem das três serras no final do processo produtivo.

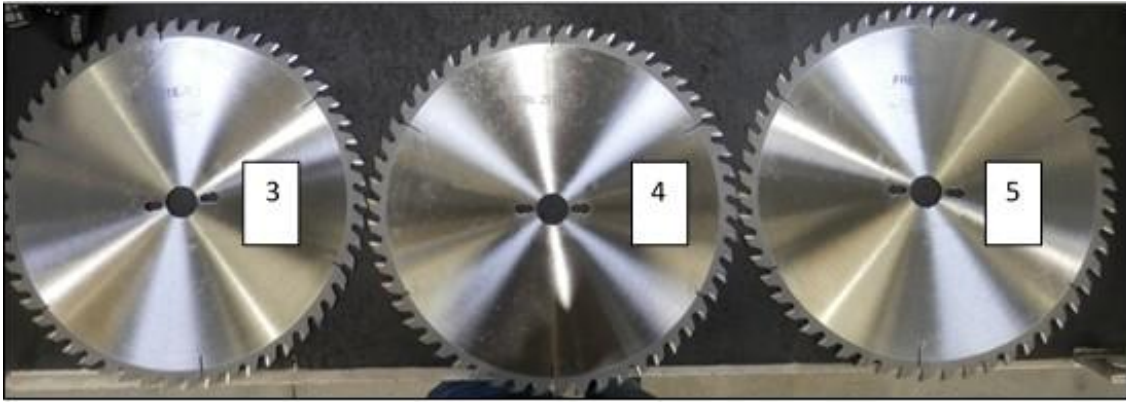


Figura 51- Imagem das serras circulares para o corte de madeira no final do processo produtivo.

4.4 Etapas críticas do processo de fabrico

Após estas medições e depois de uma profunda reflexão sobre os resultados obtidos, decidiu-se estabelecer um critério objetivo para identificar as etapas mais críticas do processo de fabrico das serras, o qual é baseado na média das variações das frequências naturais das três serras analisadas, tomando como referências as suas primeiras treze frequências naturais. Este fator $F_{méd}$ procura descrever o grau de influência da operação realizado em cada etapa no processo de fabrico da serra, sendo determinado pela seguinte expressão,

$$F_{méd} = \frac{1}{13} * \sum_{i=1}^{13} |f_i^{p+1} - f_i^p| \quad (4.6)$$

onde f_i^p é a frequência natural de ordem i e p é representa a ordem da operação realizada. A partir das frequências naturais de vibração medidas antes e após cada operação são determinados os valores do fator de influência $F_{méd}$, sendo estes apresentados na Tabela 27.

Tabela 27- Apresentação do fator de influência F_m , obtido para cada operação do processo produtivo das serras.;

Operação	Fator $F_{méd}$ [Hz]
Polimento com lixa	0,1
Tratamento térmico	4,6
Retificação do corpo	16,0
Tensionamento	31,8
Retificação do furo	0,4
Retificação do encaixe	0,1
Brasagem da pastilha de corte	54,5
Decapagem	1,3
Polimento com mó	0,5
Afiamento	13,2

Este resultado mostra que as operações de brasagem das pastilhas, o tensionamento, a retificação do corpo e o afiamento das pastilhas de corte são as operações que maior variação produzem nas frequências naturais e, por isso, são consideradas as mais influentes no processo de fabricação das serras. As operações de soldadura, retificação do corpo, tensionamento e afiamento das pastilhas correspondem a operações em que há variação substancial da massa da serra. Já a operação de tensionamento resulta na alteração do estado de tensão interna da serra através da operação de laminagem, produzindo um aumento da rigidez circunferencial e diminuição na direção radial da serra, refletidas na variação das frequências naturais em função da predominância da curvatura modal nestas duas direções.

Depois de identificar quais as etapas mais influentes no processo de fabricação das serras, procedeu-se à caracterização do seu nível de controlo. À semelhança da análise anterior, é agora introduzido o parâmetro grau de controlo S/F , que procura aferir o nível de controlo de cada operação. Este é definido para cada operação como a média da razão entre os desvios padrão e o respetivo fator de influência $F_{méd}$ das variações das frequências produzidas por cada operação. O grau de controlo de cada operação é inversamente proporcional ao valor S/F , sendo este definido pela expressão,

$$S/F = \frac{1}{13} * \sum_{i=1}^{13} \frac{\sigma_i^{p+1} - \sigma_i^p}{|f_i^{p+1} - f_i^p|} \quad (4.7)$$

onde σ_i^p é desvio padrão da frequência natural de ordem i e p é a ordem da operação. A Tabela 28 apresenta os valores S/F correspondentes a cada uma das operações do processo de fabricação da serra analisadas. Os resultados mostram que estão implementados procedimentos e sistema de controlo adequados nas operações de brasagem das pastilhas, tensionamento, afiamento, retificação do corpo, decapagem, e tratamento térmico. Pelo contrário, verifica-se que existem desvios significativos nas operações de retificação do furo, retificação do encaixe, polimento com lixa e polimento com mó. Para uma leitura correta dos resultados, este deve ser combinado com a informação do fator de influência apresentado na Tabela 27. No que concerne à operação de polimento com lixa e retificação do furo, os valores do S/F são justificados pelo grau de incerteza na medição e pela pequena variação nas frequências naturais $F_{méd}$. No que se refere às operações de retificação do encaixe e polimento com mó, os elevados valores do fator S/F são sinónimo de descontrolo. Isto significa que o procedimento e/ou o sistema de controlo não são eficazes e têm de ser revistos.

Tabela 28- Apresentação do parâmetro grau de controlo S/F, obtido para cada operação do processo produtivo das serras.

Operação	Fator S/F
Polimento com lixa	1,7
Tratamento térmico	0,2
Retificação do corpo	0,1
Tensionamento	0,0
Retificação do furo	0,9
Retificação do encaixe	1,7
Brasagem da pastilha de corte	0,0
Decapagem	0,1
Polimento com mó	2,5
Afiamento	0,1

As etapas de soldadura, retificação do corpo, tensionamento e afiamento das pastilhas são operações com maior influência no comportamento dinâmico da serra, sendo mais sensível a variações dos seus parâmetros e, por isso, considerados críticos. Assim, estas operações devem ser automatizadas e implementados sistemas de controlo não só das serras, mas também dos elementos de desgaste das máquinas. Nos casos do polimento com lixa, do tratamento térmico de revenido, retificação do furo, são operações que menos influenciam o comportamento dinâmico da serra, pelo que não se considera necessários tomar quaisquer ações corretivas.

Ao longo deste capítulo foram identificadas as etapas críticas no processo de fabrico e referenciados os problemas associados a cada uma das operações deste processo. Na sequência desta análise são a seguir propostas algumas soluções de melhorias no controlo das operações em cada operação.

4.5 Proposta de ações de melhoria.

Na sequência das análises realizadas anteriormente, são propostas a seguir ações de melhoria das operações consideradas mais críticas para o fabrico das serras. Estas ações têm por base as variações identificadas na massa, excentricidade, batimento e espessura, bem como, a variação das frequências naturais entre operações e entre as três serras analisadas.

4.5.1 Retificação do corpo

Na operação de retificação da espessura do corpo é especificado uma tolerância muito reduzida. Um dos fatores com maior influência nesta operação é o tipo de mó utilizada pela máquina retificadora. A mó de desbaste possui um elevado número de arestas de corte que diferem na forma e na profundidade de corte. Quando a mó de

desbaste apresenta um desgaste significativo, esta deve ser retificada para restaurar a sua capacidade de corte e garantir maior uniformidade no desbaste. Por outro lado, acresce o problema de provocar maior remoção de material no centro da serra relativamente às extremidades, devido à máquina retificadora possuir uma velocidade de rotação da mó constante. Este poderá ser ultrapassado através de uso de máquinas com controlo de velocidade de rotação.

4.5.2 Tensionamento

A operação de tensionamento tem como função principal aumentar a estabilidade da serra em serviço. Todavia, o estado de tensão gerado na serra é fortemente dependente da pressão que é aplicada nos rolos de laminagem e raio de curvatura do rolo. Para além disto, devido à elevada dureza do material, os rolos sofrem igualmente deformação plástica a cada passagem, alterando o seu raio de curvatura e, por conseguinte, o estado de tensão criado na serra. Por estes motivos, deverá ser desenvolvido um sistema de controlo capaz de aferir o estado de tensão na serra durante esta operação. Como alternativa à operação de laminagem por rolos, é proposto o uso da técnica baseada na aplicação de calor. Este tipo de tensionamento consiste no uso de uma chama de oxy-acetileno ou de uma outra fonte de calor, capaz de gerar uma temperatura de aproximação 350-400°C, o qual permite transformar a martensite em bainite, reproduzindo o mesmo efeito do tensionamento por rolos, sem os problemas decorrentes do uso dos rolos.

4.5.3 Brasagem

Na operação de soldadura por brasagem, o centramento das pastilhas em relação ao corpo da serra, a quantidade de solda depositada e a porosidade na solda, são parâmetros críticos deste processo. O deficiente posicionamento das pastilhas e o excesso de solda conduz a desvios nas frequências naturais significativos os quais não poderão ser completamente corrigidos nas etapas seguintes. Por esse motivo, recomenda-se que seja incorporado um sistema mecânico de guiamento e posicionamento das pastilhas para assim se reduzir tanto os desvios na posição como também garantir a deposição da mesma quantidade de solda.

4.5.4 Retificação do encaixe e polimento com mó

Conforme já foi referido anteriormente, estes dois processos carecem de uma revisão de todo o procedimento e, muito provavelmente, da introdução de sistemas automáticos para o controlo destas operações. Uma vez que foi identificada uma elevada variabilidade nas frequências das três serras analisadas. A operação de retificação do encaixe é controlada manualmente e requer ser ajustada de tempos em tempos para a compensação do desgaste da mó. Neste caso, recomenda-se a introdução de um sistema de visão artificial para controlo da geometria do encaixe. No que se refere ao processo de polimento com mó, este partilha do mesmo problema que o processo de retificação do corpo, isto é, a máquina de polimento com mó deveria ajustar a

velocidade de rotação em função da região da serra a polir. Assim, recomenda-se que um sistema de controlo seja implementado ou, em alternativa, que a máquina de polimento com mó seja substituída por modelos mais recentes com controlo de velocidade.

4.5.5 Afiamento

O afiamento é realizado com o objetivo de criar nas pastilhas o formato e ângulos adequados, conferindo-lhes a capacidade de corte. O afiamento é realizado em máquinas automáticas, com mós de óxido de alumínio, cuja espessura deve ser aproximadamente 1/3 do passo do dente. É importante que a mó usada seja de dureza relativamente mais baixa que a do material da pastilha, pois quando é dura ou mal posicionada, desenvolve um aquecimento excessivo, obtendo-se uma têmpera abrasiva na superfície do dente com a respetiva perda de dureza. Como este é o último passo do processo de fabrico das serras, é recomendado que seja implementado um sistema de controlo automático para 100 % das serras, baseado na medição das frequências naturais de vibração, devendo estas ser seriadas por classes de qualidade mediante o desvio relativamente ao valor alvo.

4.6 Implementação do controlo de qualidade ao longo de toda a linha de produção

A implementação de um sistema de qualidade constitui, nos dias de hoje, uma vantagem competitiva para as empresas, na medida em que se torna um critério diferenciador perante a concorrência. Para se obter serras com o mesmo nível de qualidade é necessário que todas as etapas do seu processo de fabrico sejam devidamente controladas. Assim, deve ser criado um sistema integrado de qualidade capaz de obter informação sobre o comportamento dinâmico e características geométricas das serras, tais como: excentricidade, espessura do corpo, diâmetro interno do furo, ângulo de ataque, batimento e tensionamento. Este sistema deverá ser completamente automatizado para acelerar o processo de caracterização das serras e sem perturbar a linha de produção.

Um sistema automático para medição das frequências naturais de vibração das serras pode ser facilmente implementado através de um sistema de impacto e medição da resposta através de um microfone. Este sistema poderá ser usado em qualquer etapa do processo produtivo para controlar as frequências naturais da serra, devendo-se criar tabelas com os valores de referência das frequências naturais para cada modelo de serra.

CONCLUSÕES

- 5.1 CONCLUSÕES
- 5.2 PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS

5 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

5.1 CONCLUSÕES

A partir do trabalho realizado é possível extrair conclusões importantes sobre o processo de fabrico da serra circular para o corte de madeira, as quais são a seguir resumidas.

Na primeira fase do trabalho, foi realizado um estudo sobre o processo de fabrico das serras circulares, o qual foi fundamental para conhecer as operações necessárias ao fabrico das serras e compreender a sua finalidade. Atendendo às variações das propriedades das serras ao longo das diferentes etapas do processo de fabrico, foram selecionados os seguintes parâmetros de controlo: a massa, a excentricidade, o batimento, o tensionamento e frequências naturais. De entre estes, destacam-se as frequências naturais de vibração, devido à sua eficácia na identificação das variações de propriedades de massa, rigidez e amortecimento, e por permitir a rápida análise dos resultados. O procedimento para a realização da análise modal experimental da serra foi apresentado, assim como a descrição dos seus principais parâmetros. A determinação experimental das frequências naturais é realizada através da aplicação de uma excitação transiente, por um martelo de impacto, e medição da resposta do tipo exponencial negativa, através de acelerómetro, laser Vibrometer ou microfone. Para garantir uma elevada repetibilidade da medição das frequências naturais de vibração da serra e minimizar a influência do apoio usado durante as medições, foi conduzido um estudo experimental com o objetivo de identificar a influência da rigidez dos apoios, da massa do acelerómetro e das posições de excitação e medição da resposta. Através deste estudo foi identificado que a menor influência na rigidez é alcançada com três apoios em borracha localizados junto ao centro da serra ($d=30\text{mm}$), que a influência da adição da massa do acelerómetro é desprezável para a resolução em frequência da medição e que a excitação deve ser aplicada e a resposta medida na extremidade externa da serra para evitar as linhas nodais.

Com o objetivo de identificar quais as operações do processo de fabrico que maior variabilidade introduzem nas frequências naturais da serra, foram analisadas 5 serras retiradas aleatoriamente, após: a retificação do corpo, o tensionamento, a retificação do furo e dos encaixes, a brasagem das pastilhas de corte e o afiamento das pastilhas de corte. A partir deste estudo preliminar foram identificadas as operações de tensionamento e brasagem das pastilhas de corte como as mais influentes para o comportamento dinâmico da serra. Seguiu-se-lhe um estudo mais completo em que foram controlados a massa, a excentricidade, o batimento, o tensionamento e as frequências naturais de três serras ao longo de todo o processo produtivo. Este

iniciou-se com a seleção, na etapa de corte laser, de três serras com propriedades e frequências naturais semelhantes. Em cada etapa foram identificadas a variação média das frequências naturais e respetivo desvio padrão nas três serras. Para a identificação das etapas mais críticas do processo de fabrico foram definidos o fator de influência $F_{méd}$ e o parâmetro grau de controlo S/F, tendo por base a variação média e o desvio padrões das frequências naturais em cada etapa. O fator de influência $F_{méd}$ fornece a informação sobre as etapas com mais impacto nas frequências próprias da serra. Os resultados revelam que a brasagem das pastilhas, o tensionamento, a retificação do corpo e o afiamento das pastilhas de corte são os que introduzem maior variação nas frequências naturais e, por isso, são consideradas as mais influentes no processo de fabrico das serras. O parâmetro grau de controlo S/F permite avaliar o grau de controlo de cada etapa do processo de fabrico. As operações de retificação do encaixe e o polimento com mó são as operações que têm maior valor do fator S/F, sinónimo de menor controlo da operação, sugerindo-se que os procedimentos sejam revistos.

Na sequência das análises realizadas são propostas ações de melhoria nas operações de retificação do corpo, tensionamento, brasagem das pastilhas, afiamento das pastilhas de corte, retificação do encaixe e polimento com mó. Estas assentam na automatização das operações realizadas nestas etapas e na implementação de sistemas de controlo de qualidade através de sistema de visão artificial.

A medição das frequências naturais da serra demonstrou ser uma ferramenta muito eficaz na deteção de desvios das operações de fabrico em cada etapa. Por esse motivo, é sugerido que seja desenvolvida um sistema capaz de determinar de forma automática as frequências naturais de vibração das serras. Esta pode ser facilmente implementada, utilizando um sistema de impacto e um sistema de medição da resposta através de um microfone. Este poderá ser usado em qualquer etapa do processo produtivo para controlar as frequências naturais da serra, devendo-se criar tabelas com os valores de referência das frequências naturais para cada modelo de serra.

5.2 PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS

Ao longo deste trabalho de análise do processo de fabrico de serras circulares, foi desenvolvido um sistema baseado na medição das frequências naturais de vibração para controlo de todas as etapas do processo de fabrico. Todavia, a operação deste sistema requer um elevado nível de conhecimento e a medição das frequências naturais é um processo moroso, o qual é incompatível com o processo produtivo. Por estas razões, recomenda-se que seja desenvolvido e implementado um sistema automático de medição das frequências naturais das serras, baseado na excitação por impacto e medição da resposta por microfone. A partir de estudos anteriormente realizados [1], é possível atualmente definir quais as frequências naturais de projeto para alguns modelos de serra, pelo que se recomenda a aplicação do mesmo sistema de medição para classificar a qualidade das serras em função dos desvios em relação aos valores de projeto.

BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

6.1 Artigos, livros e páginas de internet

6 BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

6.1 Artigos, livros e páginas de internet

- [1] P. Paiva, “Departamento de Engenharia Mecânica Desenvolvimento de ferramentas de projeto para atenuação do ruído de funcionamento em serras circulares,” FEUP, 2016.
- [2] D. W. Green, J. E. Winandy, and D. E. Kretschmann, “Mechanical properties of wood determined,” *Science (80-.)*, vol. 46, no. 1195, pp. 516–517, 1917.
- [3] J. K. Stanislav Kurjatko, *Wood Structure and Properties '06*. .
- [4] R. E. Alves, “Caracterização de fibras lignocelulósicas pré-tratadas por meio de técnicas espectroscópicas e microscópicas ópticas de alta resolução,” p. 115, 2011.
- [5] I. Venson, “Disciplina : Processos de Corte em Madeiras ‘ Usinagem da madeira e de produtos base - madeira .’”
- [6] Directindustry, “Serras de fita,” 2019. [Online]. Available: <https://www.directindustry.com/pt/>. [Accessed: 28-Aug-2019].
- [7] Tuiuti, “Serrote manual para madeira,” 2019. [Online]. Available: <https://www.epi-tuiuti.com.br/blog/>. [Accessed: 28-Aug-2019].
- [8] Frezite, “Serras circulares,” 2019. [Online]. Available: <https://frezite.pt/pt/produtos/serras-circulares>. [Accessed: 28-May-2019].
- [9] S. Nishio and E. Marui, “Effects of slots on the lateral vibration of a circular saw blade,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 36, no. 7, pp. 771–787, 1996.
- [10] M. Pohl, “Noise and vibration attenuation of a circular saw blade with applied piezoceramic patches and negative capacitance shunt networks,” *Isma 2010*, pp. 411–424, 2010.
- [11] R. Szymani and C. D. Mote, “Principal developments in thin circular saw vibration and control research: Part 2: Reduction and control of saw vibration,” *Holz als Roh- und Werkst. Eur. J. Wood Wood Ind.*, vol. 35, no. 6, pp. 219–225, 1977.
- [12] The Sawing Academy, “Modos vibracionais da serra em trabalho,” 2019. [Online]. Available: <https://www.ame.com/sawing-academy-articles/2017/07/03/effect-and-prevention-of-vibration-in-carbide-sawing/>. [Accessed: 28-Mar-2019].
- [13] L. Guoping, H. Zhenyong, Z. Wenzhen, F. E. Analysis, and C. S. Blades, “Research on Dynamic Characteristic on the Circular Saw Blade of the Plastic Doors and Windows Corner Cleaning Based on ANSYS,” pp. 12–18, 2016.
- [14] A. Skoblar, N. Andjelic, and R. Zigulic, “Determination of Critical Rotational Speed of Circular Saws From Natural Frequencies of Annular Plate With Analogous Dimensions,” *Int. J. Qual. Res.*, vol. 10, no. 1, pp. 177–192, 2016.
- [15] G. S. Schajer and C. D. Mote, “Analysis of optimal roll tensioning for circular saw stability,” *Wood Fiber Sci.*, vol. 16, no. 3, pp. 323–338, 1984.
- [16] W. T. Chang and L. C. Chen, “Design and experimental evaluation of a circular saw blade with self-clamped cutting inserts,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 83, no. 1–4, pp. 365–379, 2016.
- [17] Apsei, “VLE, Valor limite de exposição,” 2019. [Online]. Available: <https://www.apsei.org.pt/areas-de-atuacao/seguranc>. [Accessed: 28-Feb-2019].
- [18] C. D. Mote and R. Szymani, “A review report on principal developments in thin circular saw vibration and control research: Part 1: Vibration of circular saws,” *Holz als Roh- und Werkst. Eur. J. Wood Wood Ind.*, vol. 35, 1977.

- [19] A. C. Néri, R. Gonçalves, and R. E. Hernandez, "Forças De Corte Ortogonal 90-90 Em Três Espécies of Eucalyptus," *Rev. Bras. Eng. Agrícola e Ambient.*, vol. 4, no. 418, pp. 275–280, 2000.
- [20] Frezite, "serras circulares," 2019. [Online]. Available: www.frezite.pt. [Accessed: 13-Jun-2019].
- [21] Frezite, "Procedimento Operativo – PO DPS05," 2017.
- [22] Acrylite, "Blade characteristic," 2017.
- [23] S. Gade, H. Herlufsen, and H. Konstantin-Hansen, "How to determine the modal parameters of simple structures," *Brüel Kjaer*, vol. 36, no. 1, pp. 72–73, 2002.
- [24] T. D. Rossing, "Chladni's law for vibrating plates," *Am. J. Phys.*, vol. 50, no. 3, pp. 271–274, 1982.
- [25] S. Weiland and C. Birenbaum, "Optimization of geometric features of circular saw blades and parameters of the manufacturing process aided by optiSLang," no. November 2014, pp. 1–21.
- [26] J. C. da Silva, "Estudos de vibrações em Placas: Figuras de Chladni," pp. 1–37, 2004.
- [27] J. Justo, "Dinâmica de Estruturas," 2016.
- [28] O. Døssing and Bruel & Kjae, "Part I : Mechanical Mobility Measurements," 1998.
- [29] Bruel & Kjae, "Measuring vibration."
- [30] H. Lopes, "Ramo : Engenharia Mecânica VIBRAÇÕES E RUÍDO Laboratórios," 2007.
- [31] Siemens, "Função coerencia," 2019. [Online]. Available: <https://community.plm.automation.siemens.com/t5/Te>. [Accessed: 10-Apr-2019].
- [32] A. Santos, "Análise Numérica E Experimental De Um Modelo Dinâmico Da Ponte Ferroviária De Antuã," p. 201, 2014.
- [33] P. Piezotronic, "Acelerómetros PCB," 2019. [Online]. Available: https://www.pcb.com/products?m=w356a12_003ca_nc. [Accessed: 28-Jul-2019].
- [34] L. D. Vibrometer, "VibroMet™ 500 V Electronics Controller : Diverse VibroMet 500V Applications," *Aerospace*, no. 949, 1988.
- [35] Y. Of, E. Manufacturing, and A. Products, "MICROPHONE," pp. 1–24.
- [36] D. G. Costa, A. A. Roque, and J. M. F. Calado, "Técnicas Avançadas de Análise de Vibração no âmbito do Controlo de Condição," 2017.
- [37] Frezite, "CATÁLOGO FREZITE." 2014.


ANEXOS

- 7.1 Equipamento para medição das frequências naturais vibrações
- 7.2 Processo de Fabrico
- 7.3 Testes Finais

7 ANEXOS

7.1 Equipamento para medição das frequências naturais vibrações


7.1.1 Características técnicas dos dois martelos de impacto utilizados na realização das medições das frequências naturais.

Model Number 086C01	ICP® IMPACT HAMMER		Revision: L ECN #: 48526
Performance	ENGLISH	SI	OPTIONAL VERSIONS
Sensitivity(± 15 %)	50 mV/1bf	11.2 mV/N	Optional versions have identical specifications and accessories as listed for the standard model except where noted below. More than one option may be used.
Measurement Range	± 100 lbf pk	± 444 N pk	TLD - TEDS Capable of Digital Memory and Communication Compliant with IEEE 1451.4
Resonant Frequency	≥ 15 kHz	≥ 15 kHz	
Non-Linearity	≤ 1 %	≤ 1 %	
Electrical			NOTES:
Excitation Voltage	20 to 30 VDC	20 to 30 VDC	[1] Typical
Constant Current Excitation	2 to 20 mA	2 to 20 mA	[2] See PCB Declaration of Conformance PS068 for details.
Output Impedance	<100 Ohm	<100 Ohm	
Output Bias Voltage	8 to 14 VDC	8 to 14 VDC	
Discharge Time Constant	≥ 500 sec	≥ 500 sec	
Physical			SUPPLIED ACCESSORIES:
Sensing Element	Quartz	Quartz	Model 081B05 Mounting Stud (10-32 to 10-32) (2)
Sealing	Epoxy	Epoxy	Model 084A06 Extender - aluminum, 0.6" diameter (1)
Hammer Mass	0.23 lb	0.10 kg	Model 084B03 Hard Tip- Hard (S.S) (1)
Head Diameter	0.62 in	1.57 cm	Model 084B04 Hammer Tip- Medium (White Plastic) (1)
Tip Diameter	0.25 in	0.63 cm	Model 084C05 Hammer Tip- Soft (Black) (2)
Hammer Length	8.5 in	21.6 cm	Model 084C11 Hammer Tip- Supersoft (Red) (2)
Electrical Connection Position	Bottom of Handle	Bottom of Handle	Model 085A10 Vinyl Cover For Medium Tip (Blue) (2)
Extender Mass Weight	0.9 oz	25 gm	Model HCS-2 Calibration of Series 086 instrumented impact hammers (1)
Electrical Connector	BNC Jack	BNC Jack	
			Entered: LK Engineer: KW Sales: AT Approved: BAM Spec Number:
			Date: 8/9/2018 Date: 8/9/2018 Date: 8/9/2018 Date: 8/9/2018 9120
			 Phone: 716-684-0001 3425 Walden Avenue, Depew, NY 14043 Fax: 716-684-0987 E-Mail: info@pcb.com



All specifications are at room temperature unless otherwise specified.
In the interest of constant product improvement, we reserve the right to change specifications without notice.
ICP® is a registered trademark of PCB Group, Inc.

Figura 52- Características técnicas do martelo de impacto, modelo 086C01, utilizado na realização das medições das frequências naturais.

Model Number 086C03	ICP® IMPACT HAMMER		Revision: L ECN #: 32387
Performance	ENGLISH	SI	OPTIONAL VERSIONS
Sensitivity(± 15 %)	10 mV/1bf	2.25 mV/N	Optional versions have identical specifications and accessories as listed for the standard model except where noted below. More than one option may be used.
Measurement Range	± 500 lbf pk	± 2224 N pk	T - TEDS Capable of Digital Memory and Communication Compliant with IEEE P1451.4
Resonant Frequency	≥ 22 kHz	≥ 22 kHz	TLD - TEDS Capable of Digital Memory and Communication Compliant with IEEE 1451.4
Non-Linearity	≤ 1 %	≤ 1 %	
Electrical			NOTES:
Excitation Voltage	20 to 30 VDC	20 to 30 VDC	[1] Typical
Constant Current Excitation	2 to 20 mA	2 to 20 mA	[2] See PCB Declaration of Conformance PS068 for details.
Output Impedance	<100 ohm	<100 ohm	
Output Bias Voltage	8 to 14 VDC	8 to 14 VDC	
Discharge Time Constant	≥ 2000 sec	≥ 2000 sec	
Physical			SUPPLIED ACCESSORIES:
Sensing Element	Quartz	Quartz	Model 081B05 Mounting Stud (10-32 to 10-32) (2)
Sealing	Epoxy	Epoxy	Model 084A08 Extender - Steel, 0.6" Diameter (1)
Hammer Mass	0.34 lb	0.16 kg	Model 084B03 Hard Tip- Hard (S.S) (1)
Head Diameter	0.62 in	1.57 cm	Model 084B04 Hammer Tip- Medium (White Plastic) (1)
Tip Diameter	0.25 in	0.63 cm	Model 084C05 Hammer Tip- Soft (Black) (2)
Hammer Length	8.5 in	21.6 cm	Model 084C11 Hammer Tip- Supersoft (Red) (2)
Electrical Connection Position	Bottom of Handle	Bottom of Handle	Model 085A10 Vinyl Cover For Medium Tip (Blue) (2)
Extender Mass Weight	2.6 oz	75 gm	Model HCS-2 Calibration of Series 086 instrumented impact hammers (1)
Electrical Connector	BNC Jack	BNC Jack	
			Entered: <i>HA</i> Engineer: <i>SOS</i> Sales: <i>DDM</i> Approved: <i>CB</i> Spec Number:
			Date: <i>2/24/10</i> Date: <i>12/8/09</i> Date: <i>2/17/10</i> Date: <i>2/17/10</i> 15273
			 Phone: 716-684-0001 3425 Walden Avenue, Depew, NY 14043 Fax: 716-685-3886 E-Mail: vibration@pcb.com



All specifications are at room temperature unless otherwise specified.
In the interest of constant product improvement, we reserve the right to change specifications without notice.
ICP® is a registered trademark of PCB Group, Inc.

Figura 53- Características técnicas do martelo de impacto, modelo 086C03, utilizado na realização das medições das frequências naturais.

7.1.2 Características técnicas dos dois acelerómetros utilizados na realização das medições das frequências naturais.

Model Number 352C22	ICP® ACCELEROMETER		Revision: H ECN #: 42346		
Performance	ENGLISH	SI	OPTIONAL VERSIONS		
Sensitivity(± 15 %)	10 mV/g	1.0 mV/(m/s ²)	Optional versions have identical specifications and accessories as listed for the standard model except where noted below. More than one option may be used.		
Measurement Range	± 500 g pk	± 4900 m/s ² pk			
Frequency Range(± 5 %)	1.0 to 10,000 Hz	1.0 to 10,000 Hz			
Frequency Range(± 10 %)	0.7 to 13,000 Hz	0.7 to 13,000 Hz			
Frequency Range(± 3 dB)	0.3 to 20,000 Hz	0.3 to 20,000 Hz			
Resonant Frequency	≥ 50 kHz	≥ 50 kHz			
Broadband Resolution(1 to 10,000 Hz)	0.004 g rms	0.04 m/s ² rms	[1]		
Non-Linearity	± 1 %	± 1 %	[2]		
Transverse Sensitivity	± 5 %	± 5 %			
Environmental					
Overload Limit(Shock)	± 10,000 g pk	± 98,000 m/s ² pk			
Temperature Range(Operating)	-65 to +250 °F	-54 to +121 °C	[1]		
Temperature Response	See Graph	See Graph			
Electrical					
Excitation Voltage	18 to 30 VDC	18 to 30 VDC			
Constant Current Excitation	2 to 20 mA	2 to 20 mA			
Output Impedance	≤ 300 Ohm	≤ 300 Ohm			
Output Bias Voltage	7 to 12 VDC	7 to 12 VDC			
Discharge Time Constant	1.0 to 3.5 sec	1.0 to 3.5 sec			
Settling Time(within 10% of bias)	<3 sec	<3 sec			
Spectral Noise(1 Hz)	800 µg/√Hz	7840 (µm/sec ²)/√Hz	[1]		
Spectral Noise(10 Hz)	250 µg/√Hz	2450 (µm/sec ²)/√Hz	[1]		
Spectral Noise(100 Hz)	60 µg/√Hz	590 (µm/sec ²)/√Hz	[1]		
Spectral Noise(1 kHz)	50 µg/√Hz	490 (µm/sec ²)/√Hz	[1]		
Spectral Noise(10 kHz)	40 µg/√Hz	392 (µm/sec ²)/√Hz	[1]		
Electrical Isolation(Base)	>10 ⁹ Ohm	>10 ⁹ Ohm			
Physical					
Size (Height x Length x Width)	0.14 in x 0.45 in x 0.25 in	3.6 mm x 11.4 mm x 6.4 mm	[1]		
Weight	0.017 oz	0.5 gm			
Sensing Element	Ceramic	Ceramic			
Sensing Geometry	Shear	Shear			
Housing Material	Anodized Aluminum	Anodized Aluminum			
Sealing	Epoxy	Epoxy			
Electrical Connector	3-56 Coaxial Jack	3-56 Coaxial Jack			
Electrical Connection Position	Side	Side			
Mounting	Adhesive	Adhesive			
	<p>NOTES:</p> <p>[1] Typical</p> <p>[2] Zero-based, least-squares, straight line method.</p> <p>[3] See PCB Declaration of Conformance PS023 for details.</p>				
	<p>SUPPLIED ACCESSORIES:</p> <p>Model 030A10 Coax Cable, 10 ft (3 m), 3-56 plug to 10-32 plug. (1)</p> <p>Model 038A27 One-piece removal tool for Models 352C22, 357C10, 352A21, & 357A09 (1)</p> <p>Model 080A109 Petro Wax (1)</p> <p>Model ACS-1 NIST traceable frequency response (10 Hz to upper 5% point). (1)</p>				
	Entered: AP	Engineer: JUB	Sales: WDC	Approved: JUB	Spec Number:
	Date: 12/16/2013	Date: 12/16/2013	Date: 12/16/2013	Date: 12/16/2013	10668
	<p>PCB PIEZOTRONICS™</p> <p>3425 Walden Avenue, Depew, NY 14043</p>		<p>Phone: 716-684-0001</p> <p>Fax: 716-684-0987</p> <p>E-Mail: info@pcb.com</p>		

Figura 54- Características técnicas do acelerómetro, modelo 352C22, utilizado na realização das medições das frequências naturais.

Model Number 357A08	CHARGE OUTPUT ACCELEROMETER		Revision: C ECN #: 46956		
Performance	ENGLISH	SI	OPTIONAL VERSIONS		
Sensitivity(± 20 %)	0.35 pC/g	0.036 pC/(m/s ²)	Optional versions have identical specifications and accessories as listed for the standard model except where noted below. More than one option may be used.		
Measurement Range	± 1000 g pk	± 9800 m/s ² pk			
Frequency Range(± 5 %)	12 kHz	12 kHz	[2]		
Frequency Range(± 10 %)	20 kHz	20 kHz	[2]		
Resonant Frequency	≥ 70 kHz	≥ 70 kHz			
Non-Linearity	± 1 %	± 1 %	[3]		
Transverse Sensitivity	± 5 %	± 5 %			
Environmental					
Overload Limit(Shock)	± 10,000 g pk	± 98,100 m/s ² pk			
Temperature Range	-100 to +350 °F	-100 to +350 °F			
Temperature Range	-100 to +350 °F	-73 to +177 °C			
Temperature Response	See Graph	See Graph	[1]		
Electrical					
Capacitance	140 pF	140 pF	[1]		
Insulation Resistance(at 70° F [21°C])	>10 ¹⁰ Ohm	>10 ¹⁰ Ohm			
Output Polarity	Negative	Negative			
Electrical Isolation(Base)	≥ 10 ⁹ Ohm	≥ 10 ⁹ Ohm			
Physical					
Sensing Element	Ceramic	Ceramic			
Sensing Geometry	Shear	Shear			
Housing Material	Aluminum	Aluminum			
Sealing	Epoxy	Epoxy			
Size (Height x Diameter x Width)	0.11 in x 0.15 in x 0.27 in	2.8 mm x 4.1 mm x 6.9 mm	[1]		
Weight	0.006 oz	0.16 gm			
Electrical Connector	3-56 Coaxial Jack	3-56 Coaxial Jack			
Electrical Connection Position	Side	Side			
	<p>NOTES:</p> <p>[1] Typical</p> <p>[2] Low frequency response is determined by external signal conditioning electronics.</p> <p>[3] Zero-based, least-squares, straight line method.</p> <p>[4] See PCB Declaration of Conformance PS081 for details.</p>				
	<p>SUPPLIED ACCESSORIES:</p> <p>Model 030A10 Coax Cable, 10 ft (3 m), 3-56 plug to 10-32 plug. (1)</p> <p>Model 038A29 Removal Tool (1)</p> <p>Model 080A109 Petro Wax (1)</p> <p>Model ACS-1 NIST traceable frequency response (10 Hz to upper 5% point). (1)</p>				
	Entered: LK	Engineer: BAM	Sales: WDC	Approved: BAM	Spec Number:
	Date: 8/8/2017	Date: 8/8/2017	Date: 8/8/2017	Date: 8/8/2017	19271
	<p>PCB PIEZOTRONICS™</p> <p>3425 Walden Avenue, Depew, NY 14043</p>		<p>Phone: 716-684-0001</p> <p>Fax: 716-684-0987</p> <p>E-Mail: info@pcb.com</p>		

Figura 55- Características técnicas do acelerómetro, modelo 357A08, utilizado na realização das medições das frequências naturais.

7.1.3 Características técnicas do conversor de sinal usado como acelerómetro PCB-Piezotronics modelo 357A08.

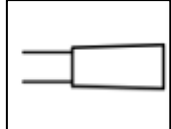
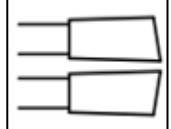
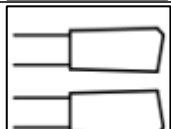
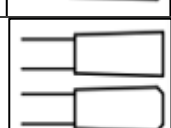

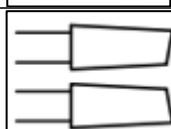


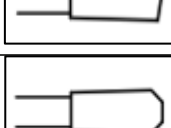
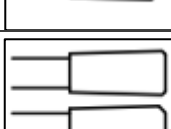

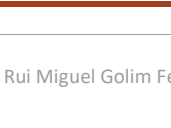
Model Number 422E52	IN-LINE CHARGE CONVERTER		Revision: D ECN #: 37900
Performance	ENGLISH	SI	OPTIONAL VERSIONS
Sensitivity(± 2.5 %)(Charge Conversion)	10 mV/pC	10 mV/pC	Optional versions have identical specifications and accessories as listed for the standard model except where noted below. More than one option may be used.
Input Range	± 500 pC	± 500 pC	
Overrange	± 8 V	± 8 V	
Low Frequency Response(-5 %)	5 Hz	5 Hz	
High Frequency Response(-5 %)	100 kHz	100 kHz	
Non-Linearity	≤ 1.0 % FS	≤ 1.0 % FS	[3]
Environmental			
Temperature Range(Operating)	-65 to +250 °F	-54 to +121 °C	
Maximum Shock	5000 g pk	49,050 m/s ² pk	
Maximum Vibration(5 to 2000 Hz)	100 g pk	981 m/s ² pk	
Electrical			
Excitation Voltage	18 to 28 VDC	18 to 28 VDC	
Constant Current Excitation	2 to 20 mA	2 to 20 mA	
Output Voltage	± 5.0 V	± 5.0 V	
Output Impedance	100 ohm	100 ohm	
Output Bias Voltage	9 to 13 VDC	9 to 13 VDC	
Maximum Input Voltage	40 V	40 V	
Broadband Electrical Noise(1 to 10,000 Hz)	33 µV	-90 dB	[1]
Spectral Noise(1 Hz)	9.8 µV/√Hz	-100 dB	[1]
Spectral Noise(100 Hz)	3 µV/√Hz	-110 dB	[1]
Spectral Noise(1 kHz)	0.8 µV/√Hz	-122 dB	[1]
Spectral Noise(10 kHz)	0.2 µV/√Hz	-134 dB	[1]
Capacitance(Feedback)	100 pF	100 pF	
Overload Recovery Time	10 µsec	10 µsec	
Discharge Time Constant	>0.1 sec	>0.1 sec	
Resistance(Feedback)	4.8x10 ⁹ ohm	4.8x10 ⁹ ohm	[2]
Source Capacitance Loading	0.0005 %/pF	0.0005 %/pF	
Physical			
Housing Material	Stainless Steel	Stainless Steel	
Sealing	Epoxy	Epoxy	
Electrical Connector(Input)	10-32 Coaxial Jack	10-32 Coaxial Jack	
Electrical Connector(Output)	BNC Jack	BNC Jack	
Size (Diameter x Length)	0.52 in x 3.4 in	13 mm x 86 mm	
Weight	1.15 oz	32.7 gm	
<p>NOTES:</p> <p>[1] Tested using voltage source and input capacitor equal to the feedback capacitor, to simulate a charge output sensor.</p> <p>[2] Effective feedback resistance for time constant is 3 times tested value due to circuitry (i.e. 1x10E9 = 3x10E9 ohm)</p> <p>[3] High frequency response may be limited by supply current and output cable length.</p> <p>[4] See PCB Declaration of Conformance PS024 for details. A low impedance connection from case to earth ground is required to maintain CE compliance.</p>			
<p>Entered: DMW Engineer: KL Sales: JJM Approved: BAM Spec Number:</p> <p>Date: 12/14/2011 Date: 12/14/2011 Date: 12/14/2011 Date: 12/14/2011 25580</p>			
<p>CE [4]</p> <p>All specifications are at room temperature unless otherwise specified. In the interest of constant product improvement, we reserve the right to change specifications without notice. ICP® is a registered trademark of PCB Group, Inc.</p>			
<p>PCB PIEZOTRONICS™ Phone: 716-684-0001 ELECTRONICS DIVISION Fax: 716-684-0987 3425 Walden Avenue, Depew, NY 14043 E-Mail: electronics@pcb.com</p>			

Figura 56- Características técnicas do conversor, modelo 422E52, utilizado na realização das medições das frequências naturais.

7.2 Processo de Fabrico


7.2.1 Tipos de afiamento

Tabela 29- Tipos de afiamentos das pastilhas utilizados, que proporciona diferentes forças de corte.

Tipos de afiamento		
Referência	Designação	Desenho
F	Plano	
W	Inclinado alternado	
WE	Inclinado alternado com bisel	
TF	Trapezoidal plano	
DH	Côncavo com ponta de diamante	
KW	Cônico com inclinação alternada	
FV	Reto extensível	
EL	Inclinado para a esquerda	
ER	Inclinado para a direita	
T	Trapezoidal	
TFE	Trapezoidal plano com bisel	
FE	Plano com bisel	

7.3 Testes Finais

7.3.1 Serra em teste (863.350.054.30)



863 Universal circular saw blades
Lames de scie universelles

Application: Circular saw blade for longitudinal and cross cutting of softwood and hardwood, dry, uncoated wood based material.
Machine: For sliding table saw machines, table saws, portable machines, etc.
Technical information: Circular saw blade with alternate top bevel grinded carbide teeth (HW).
Application: Lame de scie pour coupe en long et en travers de bois (tendres et durs), dérivés du bois sans revêtements, pour application de coupe universelle.
Machine: Pour scie à format, scies à table, machines portatives.
Caractéristiques Techniques: Lame de scie à denture alternée en carbure (HW).

MAN HW W

D	B	b	d	Z	NL/TK	Ref.
150	3,2	2,2	30	24		863.150.024.30
	3,2	2,2	30	36		863.150.036.30
	3,2	2,2	30	48		863.150.048.30 ■
180	3,2	2,2	30	30		863.180.030.30
	3,2	2,2	30	42		863.180.042.30
	3,2	2,2	30	56		863.180.056.30 ■
200	3,2	2,2	30	36	NL03	863.200.036.30
	3,2	2,2	30	48	NL03	863.200.048.30
	3,2	2,2	30	60	NL03	863.200.060.30 ■
250	3,2	2,2	30	40	NL03	863.250.040.30
	3,2	2,2	35	40		863.250.040.35 new
	3,2	2,2	30	48	NL03	863.250.048.30
275	3,2	2,2	30	60	NL03	863.250.060.30
	3,2	2,2	30	80	NL03	863.250.080.30 ■
	3,2	2,2	20	48	NL03	863.275.048.20
300	3,2	2,2	20	72	NL03	863.275.072.20
	3,2	2,2	30	36	NL03	863.300.036.30
	3,2	2,2	30	48	NL03	863.300.048.30
330	3,2	2,2	35	48		863.300.048.35 new
	3,2	2,2	30	60	NL03	863.300.060.30
	3,2	2,2	30	72	NL03	863.300.072.30
350	3,2	2,2	30	96	NL03	863.300.096.30 ■
	3,2	2,2	30	80	NL03	863.330.080.30
350	3,5	2,5	30	54	NL03	863.350.054.30

Figura 57- Principais características do modelo utilizado nos testes desenvolvidos durante esta dissertação [37].

7.3.2 Etapa de corte laser

Tabela 30- Espessura da chapa em 4 pontos e respetiva média.

Chapa	Espessura [mm]	Média [mm]
Chapa 1	2,534	2,5445
	2,545	
	2,555	
	2,544	

Tabela 31- Valores da excentricidade medidos nas 6 serras obtidas da mesma chapa após o corte a laser.

Excentricidade [mm]						
Variaçã o Max.	Variaçã o Serra 1	Variaçã o Serra 2	Variaçã o Serra 3	Variaçã o Serra 4	Variaçã o Serra 5	Variaçã o Serra 6
ΔE	0,170	0,290	0,112	0,07	0,08	0,10

Tabela 32- Valores da massa medidos nas 6 serras obtidas da mesma chapa após o corte a laser.

Serra	Massa [Kg]
Serra 1	1,6874
Serra 2	1,6844
Serra 3	1,6912
Serra 4	1,6867
Serra 5	1,6961
Serra 6	1.6855

Tabela 33- Valores da espessura medidos nas 6 serras obtidas da mesma chapa após o corte a laser.

Serra	Espessura [mm]	Média [mm]
Serra 1	2.544	2,546
	2.547	
	2.547	
Serra 2	2.546	2,544
	2.541	
	2.545	
Serra 3	2,545	2,545
	2.547	
	2,545	
Serra 4	2,552	2,549
	2,551	
	2,446	
Serra 5	2.545	2,544
	2,540	
	2,546	
Serra 6	2,551	2,548
	2,547	
	2,546	

Tabela 34- Valores do batimento medido nas 6 serras após o corte a laser.

Serra	Batimento [mm]
Serra 1	0,22
Serra 2	0,19
Serra 3	0,18
Serra 4	0,18
Serra 5	0,19
Serra 6	0,20

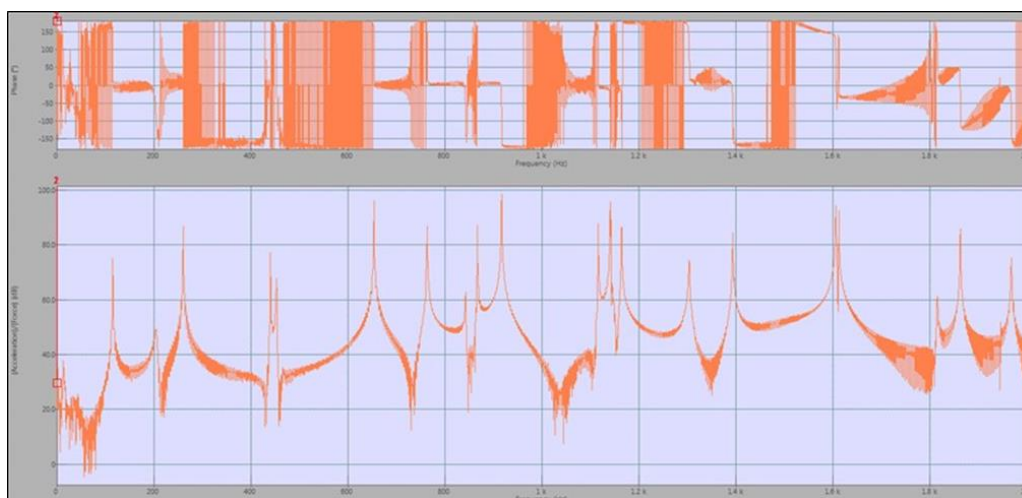


Figura 58- Exemplo da FRF medida na serra 3 após o corte a laser.

Tabela 35- Frequências naturais medidas das 3 serras após o corte a laser.

f_n	Frequências naturais [Hz]				
	Serra 3	Serra 4	Serra 5	Média	Desvio Padrão
f_1	115,3	115,3	114,7	115,1	0,3
f_2	202,5	204,4	202,5	203,1	0,9
f_3	260,6	260,3	260,0	260,3	0,3
f_4	440,9	440,6	440,3	440,6	0,3
f_5	452,2	452,5	452,5	452,4	0,2
f_6	654,4	654,1	653,8	654,1	0,3
f_7	763,4	763,1	763,1	763,2	0,2
f_8	842,2	842,2	842,5	842,3	0,2
f_9	867,5	867,2	866,9	867,2	0,3
f_{10}	917,8	917,2	916,9	917,3	0,4
f_{11}	1116,6	1116,3	1116,3	1116,4	0,2
f_{12}	1141,6	1141,3	1140,6	1141,2	0,4
f_{13}	1164,7	1164,4	1164,4	1164,5	0,2

7.3.3 Etapa de polimento com lixa

Tabela 36- Valores da excentricidade medidos nas 3 serras após o polimento com lixa.

Excentricidade [mm]			
Varição Max.	Varição Serra 3	Varição Serra 4	Varição Serra 5
ΔE	0,133	0,125	0,141

Tabela 37- Valores da massa medidos nas 3 serras após o polimento com lixa.

Serra	Massa [kg]
Serra 3	1,6900
Serra 4	1,6846
Serra 5	1,6951

Tabela 38- Valores da espessura medidos nas 3 serras após o polimento com lixa.

Serra	Espessura [mm]	Média [mm]
Serra 3	2,546	2,545
	2,545	
	2,545	
Serra 4	2,544	2,545
	2,548	
	2,543	
Serra 5	2,543	2,542
	2,541	
	2,543	

Tabela 39- Valores do batimento medidos nas 3 serras após o polimento com lixa.

Serra	Batimento [mm]
Serra 3	0,12
Serra 4	0,12
Serra 5	0,15

Tabela 40- Frequências naturais medidas das 3 serras após o polimento com lixa.

f_n	Frequências naturais [Hz]				Desvio Padrão
	Serra 3	Serra 4	Serra 5	Média	
f_1	115,3	115,3	114,7	115,1	0,3
f_2	203,1	204,1	204,4	203,9	0,5
f_3	260,6	260,3	260,0	260,3	0,3
f_4	440,9	440,6	440,0	440,5	0,4
f_5	452,2	452,2	452,2	452,2	0,0
f_6	654,4	654,1	653,8	654,1	0,3
f_7	763,4	763,1	763,1	763,2	0,2
f_8	842,2	841,9	842,5	842,2	0,3
f_9	867,5	867,2	866,6	867,1	0,4
f_{10}	917,8	917,5	916,9	917,4	0,4
f_{11}	1116,6	1116,3	1116,3	1116,4	0,2
f_{12}	1141,3	1141,6	1140,6	1141,1	0,4
f_{13}	1164,7	1164,4	1164,4	1164,5	0,2

7.3.4 Etapa de revenido

Tabela 41- Valores da excentricidade medidos nas 3 serras após o revenido.

Variação Max.	Excentricidade [mm]		
	Variação Serra 3	Variação Serra 4	Variação Serra 5
ΔE	0,149	0,148	0,145

Tabela 42- Valores da espessura medidos nas 3 serras após o revenido.

Serra	Espessura [mm]	Média [mm]
Serra 3	2,546	2,545
	2,545	
	2,545	
Serra 4	2,544	2,545
	2,548	
	2,543	
Serra 5	2,543	2,542
	2,541	
	2,543	

Tabela 43- Valores da massa medidos nas 3 serras após o revenido.

Serra	Massa [kg]
Serra 3	1,6900
Serra 4	1,6847
Serra 5	1,6950

Tabela 44- Valores do batimento medidos nas 3 serras após o revenido.

Serra	Batimento [mm]
Serra 3	0,05
Serra 4	0,03
Serra 5	0,04

Tabela 45- Frequências naturais medidas das 3 serras após o revenido.

f_n	Frequências naturais [Hz]				
	Serra 3	Serra 4	Serra 5	Média	Desvio Padrão
f_1	110,9	111,3	111,9	111,4	0,4
f_2	209,1	208,8	208,1	208,7	0,4
f_3	255,0	255,0	255,9	255,3	0,4
f_4	435,0	435,0	436,3	435,4	0,6
f_5	456,9	456,9	456,3	456,7	0,3
f_6	648,4	648,4	649,7	648,9	0,6
f_7	768,1	768,1	768,1	768,1	0,0
f_8	845,6	845,3	845,0	845,3	0,3
f_9	862,5	862,5	863,8	862,9	0,6
f_{10}	912,2	912,2	913,4	912,6	0,6
f_{11}	1121,9	1122,2	1122,2	1122,1	0,2
f_{12f}	1136,9	1137,5	1138,4	1137,6	0,6
f_{13}	1168,4	1168,4	1169,1	1168,7	0,3

7.3.5 Etapa da retificação do corpo

Tabela 46- Valores da massa medidos nas 3 serras após a retificação do corpo.

Serra	Massa [kg]
Serra 3	1,6592
Serra 4	1,6583
Serra 5	1,6631

Tabela 47- Valores da espessura medidos nas 3 serras após a retificação do corpo

Serra	Espessura [mm]	Média [mm]
Serra 3	2,495	2,497
	2,494	
	2,501	
Serra 4	2,500	2,501
	2,505	
	2,499	
Serra 5	2,498	2,499
	2,498	
	2,502	

Tabela 48- Valores do batimento medidos nas 3 serras após a retificação do corpo

Serra	Batimento [mm]	Chapéu
Serra 3	0,03	x
Serra 4	0,04	x
Serra 5	0,03	x

Tabela 49- Frequências naturais medidas das 3 serras após a retificação do corpo.

f_n	Frequências naturais [Hz]				Desvio Padrão
	Serra 3	Serra 4	Serra 5	Média	
f_1	111,6	110,9	110,6	111,0	0,4
f_2	200,6	200,9	201,9	201,1	0,5
f_3	252,5	251,9	251,3	251,9	0,5
f_4	428,1	427,5	426,6	427,4	0,6
f_5	443,1	444,1	443,8	443,6	0,4
f_6	636,3	635,9	635,0	635,7	0,5
f_7	748,4	749,1	748,4	748,6	0,3
f_8	820,3	821,6	820,9	820,9	0,5
f_9	845,0	845,3	843,9	844,7	0,6
f_{10}	893,4	893,4	892,2	893,0	0,6
f_{11}	1094,7	1095,6	1094,7	1095,0	0,4
f_{12f}	1112,8	1113,1	1111,6	1112,5	0,7
f_{13}	1140,3	1140,9	1140,0	1140,4	0,4

7.3.6 Etapa de tensionamento

Tabela 50- Valores do batimento medidos nas 3 serras após o tensionamento.

Serra	Batimento [mm]	Chapéu	Tensionado [mm]
Serra 3	0,04	x	0,18
Serra 4	0,04	x	0,20
Serra 5	0,04	x	0,19

Tabela 51- Frequências naturais medidas das 3 serras após o tensionamento.

f_n	Frequências naturais [Hz]				
	Serra 3	Serra 4	Serra 5	Média	Desvio Padrão
f_1	140,9	140,3	141,6	140,9	0,5
f_2	-	-	-	-	-
f_3	294,4	293,8	295,3	294,5	0,6
f_4	411,6	412,8	410,6	411,7	0,9
f_5	475,3	475,0	476,6	475,6	0,7
f_6	684,4	684,4	685,0	684,6	0,3
f_7	719,1	719,7	717,2	718,7	1,1
f_8	800,0	801,9	799,7	800,5	0,7
f_9	886,9	887,2	887,2	887,1	0,2
f_{10}	945,0	945,3	946,3	945,5	0,5
f_{11}	1066,3	1065,9	1063,4	1065,2	1,3
f_{12f}	1115,6	1116,3	1114,1	1115,3	0,9
f_{13}	1155,9	1156,6	1156,9	1156,5	0,4

7.3.7 Etapa de retificação do furo

Tabela 52- Valores do diâmetro interno medidos nas 3 serras após a retificação do furo.

Diâmetro interno [mm]		
Serra 3	Serra 4	Serra 5
30,02	30,03	30,02

Tabela 53- Valores da massa medidos nas 3 serras após a retificação do furo.

Serra	Massa [kg]
Serra 3	1,6589
Serra 4	1,6580
Serra 5	1,6628

Tabela 54- Valores do batimento medidos nas 3 serras após a retificação do furo.

Serra	Batimento [mm]
Serra 3	0,04
Serra 4	0,04
Serra 5	0,04

Tabela 55- Frequências naturais medidas das 3 serras após a retificação do furo.

f_n	Frequências naturais [Hz]				
	Serra 3	Serra 4	Serra 5	Média	Desvio Padrão
f_1	141,3	141,3	141,6	141,4	0,1
f_2	-	-	-	-	-
f_3	294,1	294,1	295,6	294,6	0,7
f_4	412,8	412,8	410,9	412,2	0,9
f_5	475,3	475,3	476,9	475,8	0,7
f_6	684,7	684,4	685,3	684,8	0,4
f_7	720,0	720,0	717,5	719,2	1,2
f_8	801,9	801,9	800,0	801,3	0,9
f_9	887,5	887,5	887,5	887,5	0,0
f_{10}	945,6	945,6	946,9	946,0	0,6
f_{11}	1066,6	1066,6	1064,1	1065,7	1,2
f_{12f}	1116,9	1116,9	1115,0	1116,3	0,9
f_{13}	1157,2	1156,9	1157,2	1157,1	0,2

7.3.8 Etapa de retificação do encaixe

Tabela 56- Valores da excentricidade medidos nas 3 serras após a retificação do furo.

Variação Max.	Excentricidade [mm]		
	Variação Serra 3	Variação Serra 4	Variação Serra 5
ΔE	0,09	0,08	0,10

Tabela 57- Valores da massa medidos nas 3 serras após a retificação do furo.

Serra	Massa [kg]
Serra 3	1,6578
Serra 4	1,6567
Serra 5	1,6617

Tabela 58- Valores do batimento medidos nas 3 serras após a retificação do furo.

Serra	Batimento [mm]
Serra 3	0,04
Serra 4	0,04
Serra 5	0,04

Tabela 59- Frequências naturais medidas das 3 serras após a retificação do encaixe.

f_n	Frequências naturais [Hz]				Desvio Padrão
	Serra 3	Serra 4	Serra 5	Média	
f_1	140,6	141,6	140,3	140,8	0,5
f_2	-	-	-	-	-
f_3	294,4	295,6	294,1	294,7	0,7
f_4	412,2	411,3	413,4	412,3	0,9
f_5	475,6	477,2	475,6	476,2	0,7
f_6	685,0	686,3	685,3	685,5	0,5
f_7	720,0	718,4	720,6	719,7	0,9
f_8	801,3	800,9	802,8	801,7	0,8
f_9	888,1	888,8	888,8	888,5	0,3
f_{10}	946,3	947,8	946,9	947,0	0,6
f_{11}	1067,8	1065,3	1067,5	1066,9	1,1
f_{12f}	1117,2	1115,9	1118,1	1117,1	0,9
f_{13}	1157,8	1158,8	1159,1	1158,5	0,5

7.3.9 Etapa de soldadura da pastilha de corte por brasagem

Tabela 60- Valores da massa medidos e da variação existente nas 3 serras após a soldadura da pastilha de corte por brasagem.

Serra	Massa [kg]	Variação Massa [kg]
Serra 3	1,740	0,082
Serra 4	1,734	0,077
Serra 5	1,735	0,074

Tabela 61- Valores do batimento e tensionamento existente nas 3 serras após a soldadura da pastilha de corte por brasagem.

Serra	Batimento [mm]	Tensionamento [mm]
Serra 3	0,03	0,25
Serra 4	0,03	0,24
Serra 5	0,02	0,21

Tabela 62- Frequências naturais medidas das 3 serras após a soldadura da pastilha de corte por brasagem.

f_n	Frequências naturais [Hz]				
	Serra 3	Serra 4	Serra 5	Média	Desvio Padrão
f_1	134,3	135,6	134,4	134,8	0,6
f_2	-	-	-	-	-
f_3	277,2	278,4	276,9	277,5	0,7
f_4	388,8	388,1	390,0	389,0	0,8
f_5	438,8	440,6	439,1	439,5	0,8
f_6	620,9	623,1	622,2	622,1	0,9
f_7	678,8	677,5	679,7	678,7	0,9
f_8	759,7	759,7	761,6	760,3	0,9
f_9	783,1	784,1	784,34	783,9	0,5
f_{10}	853,4	855,6	855,0	854,7	0,9
f_{11}	993,8	991,6	993,8	993,0	1,0
f_{12f}	1003,8	1004,7	1004,4	1004,3	0,4
f_{13}	1062,2	1062,5	1065,0	1063,2	1,3

7.3.10 Etapa de decapagem

Tabela 63- Valores da massa medidos nas 3 serras após a decapagem.

Serra	Massa [kg]
Serra 3	1,7389
Serra 4	1,7332
Serra 5	1,7350

Tabela 64- Valores da espessura medidos nas 3 serras após a decapagem.

Serra	Espessura [mm]	Média [mm]
Serra 3	2,498	2,498
	2,499	
	2,497	
Serra 4	2,502	2,500
	2,497	
	2,502	
Serra 5	2,501	2,499
	2,498	
	2,499	

Tabela 65- Valores do batimento medidos nas 3 serras após a decapagem.

Serra	Batimento [mm]
Serra 3	0,03
Serra 4	0,03
Serra 5	0,04

Tabela 66- Frequências naturais medidas das 3 serras após a decapagem.

f_n	Frequências naturais [Hz]				
	Serra 3	Serra 4	Serra 5	Média	Desvio Padrão
f_1	133,3	134,7	133,4	133,8	0,6
f_2	-	-	-	-	-
f_3	275,6	277,2	275,6	276,2	0,7
f_4	389,7	389,1	390,6	389,8	0,6
f_5	436,9	438,4	436,6	437,3	0,8
f_6	618,8	620,6	619,7	619,7	0,8
f_7	679,4	678,1	680,3	679,3	0,9
f_8	760,0	760,3	761,2	760,5	0,5
f_9	780,9	781,6	781,9	781,5	0,4
f_{10}	850,9	852,5	852,2	851,9	0,7
f_{11}	995,3	992,6	995,3	994,4	1,3
f_{12f}	1001,3	1001,9	1001,6	1001,6	0,3
f_{13}	1061,9	1062,2	1064,7	1062,9	1,3

7.3.11 Etapa de polimento com mó

Tabela 67- Valores da massa medidos nas 3 serras após o polimento com mó.

Serra	Massa [kg]
Serra 3	1,7381
Serra 4	1,7322
Serra 5	1,7340

Tabela 68- Valores da espessura medidos nas 3 serras após o polimento com mó.

Serra	Espessura [mm]	Média [mm]
Serra 3	2,496	2,495
	2,495	
	2,495	
Serra 4	2,494	2,495
	2,497	
	2,495	
Serra 5	2,497	2,496
	2,496	
	2,495	

Tabela 69- Frequências naturais medidas das 3 serras após o polimento com mó.

f_n	Frequências naturais [Hz]				Desvio Padrão
	Serra 3	Serra 4	Serra 5	Média	
f_1	134,9	133,8	134,4	134,3	0,5
f_2	-	-	-	-	-
f_3	277,8	275,9	276,9	276,9	0,8
f_4	387,8	390,3	390,6	389,6	1,3
f_5	438,4	436,9	438,4	437,9	0,7
f_6	620,6	619,4	620,9	620,3	0,7
f_7	677,8	678,1	681,9	679,3	1,8
f_8	756,6	759,1	761,9	759,2	2,2
f_9	782,2	780,9	783,4	782,2	1,0
f_{10}	852,5	850,6	853,8	852,3	1,3
f_{11}	993,8	994,4	995,6	994,6	0,8
f_{12f}	1002,5	1001,6	1002,8	1002,3	0,5
f_{13}	1060,3	1060,9	1066,3	1062,5	2,7

7.3.12 Etapa de afiamento

Tabela 70- Valores da massa medidos nas 3 serras após o afiamento.

Serra	Massa [kg]
Serra 3	1,7156
Serra 4	1,7136
Serra 5	1,7136

Tabela 71- Valores do batimento e tensionamento medidos nas 3 serras após o afiamento.

Serra	Batimento [mm]	Tensionamento [mm]
Serra 3	0,04	0,19
Serra 4	0,03	0,19
Serra 5	0,04	0,20

Tabela 72- Frequências naturais medidas das 3 serras após o afiamento.

f_n	Frequências naturais [Hz]				Desvio Padrão
	Serra 3	Serra 4	Serra 5	Média	
f_1	136,8	135,6	136,6	136,3	0,5
f_2	-	-	-	-	-
f_3	282,5	280,9	281,9	281,8	0,6
f_4	392,5	395,6	395,6	394,6	1,5
f_5	447,8	447,5	448,4	447,9	0,4
f_6	635,9	636,9	637,5	636,8	0,6
f_7	686,9	688,1	690,9	688,6	1,7
f_8	765,9	769,4	770,9	768,7	2,1
f_9	806,6	808,1	809,4	808,0	1,2
f_{10}	879,0	875,3	877,5	877,3	1,5
f_{11}	1009,1	1012,2	1011,9	1011,1	1,4
f_{12f}	1036,6	1038,1	1038,1	1037,6	0,7
f_{13}	1075,3	1077,5	1081,6	1078,1	2,6

7.3.13 Anilha para medição da excentricidade serra

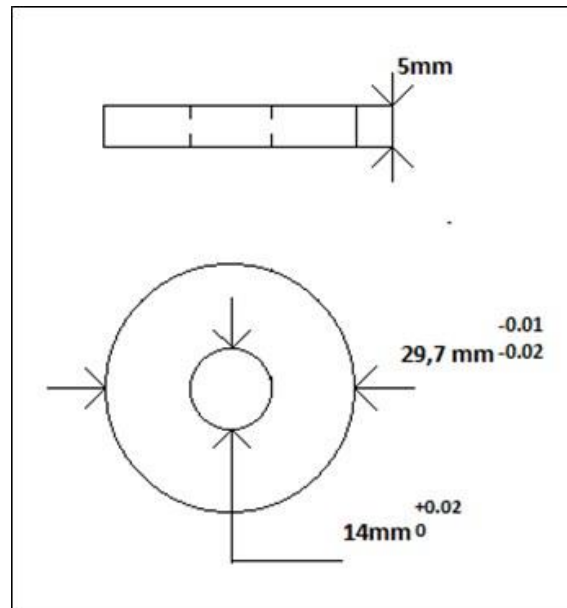


Figura 59- Esquema dimensional da anilha para medição da excentricidade da serra.

7.3.14 Manual de utilização do OROS



Manual de utilização do equipamento/Programas -OROS (NVGate)



Rui Miguel Golim Fernandes Alves



Prefácio

Este manual tem como intuito ajudar a programar o OROS (NVGate), de modo a medir a FRF para analisar, retirar as frequências naturais da estrutura e compreender o comportamento dinâmico da serra a partir da análise do seu comportamento estático.

Segue-se a programação de *software* NVGate utilizando: 1) o Martelo de impacto e o Acelerómetro; 2) o Microfone; 3) o Martelo de impacto e o Laser VibroMet;

Para a programação foi utilizado um Martelo de impacto PCB Piezotronics®- modelo 086C01, um Acelerómetro PCB Piezotronics®- modelo 352C22, um Laser VibroMet e um analisador de sinal OROS®- modelo OR35.

Rui Miguel Golim Fernandes Alves



Índice

1) Martelo de impacto e um Acelerómetro	4
2) Microfone	11
3) Martelo de impacto e VibroMet	16

Rui Miguel Golim Fernandes Alves



Definir cada um dos “inputs”

Label	Component	Node	Direction	Type	Transducer	Physical qty.	Sensitivity	Range pk	External Gain	Polarity	Offset comp.	Coupling	Input filter	Enable auto-range	
Input1	Martelo	Martelo	0	Scalar	Translation	Default Force sensor	Force	11.25 mV/(N)	889 N	1	Normal	0 V	ICP	None	On
Input2	acelerometro	Acelerometro	0	Scalar	Translation	Default Accelerometer	Acceleration	1.022 mV/(m/s ²)	9.8 km/s ²	1	Normal	0 V	ICP	None	On

Definir o nome do “Label”

- LABEL 1: **MARTELO**
- LABEL 2: **ACELEROMETRO**

Definir o tipo de transdutor “Traducer”

- DEFAULT FORCE SENSOR (MARTELO)**
- DEFAULT ACCELAROMETER (ACELEROMETRO)**

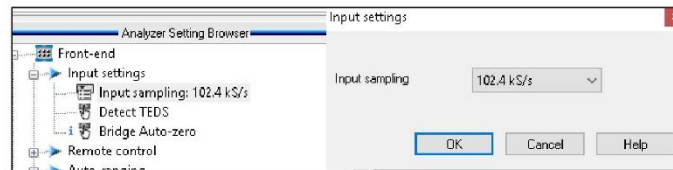
Definir a sensibilidade “sensivity”

- MARTELO: **11.25 mV/N**
- ACCELEROMETRO: **1.022 mV/m/s²**

Definir o “coupling”

- MARTELO: **ICP**
- ACCELEROMETRO: **ICP**

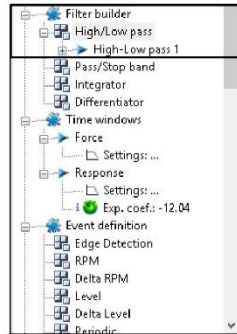
Definir “Input settings”- definir “Input sampling”- **102.4kS/s**



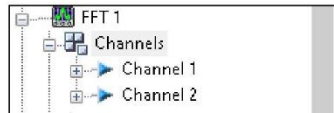
Rui Miguel Golim Fernandes Alves



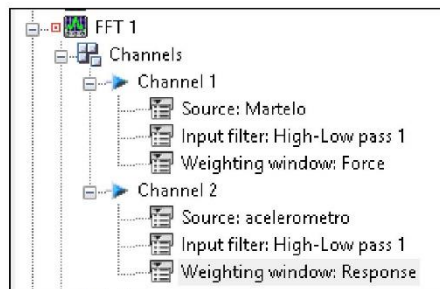
Filtros- High/Low pass-“add”



FFT 1- Criar canais



Definir cada um dos canais



-Channel 1 –Source: **Input 1 (Martelo)**

– Input filter: **High/Low pass 1**

– Weighting window: **Force**

-Channel 2 –Source: **Input 2 (Acelerometro)**

– Input filter: **High/Low pass 1**

– Weighting window: **Response**

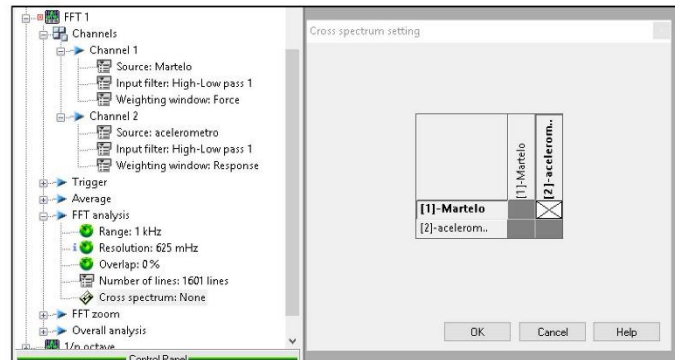
Rui Miguel Golim Fernandes Alves



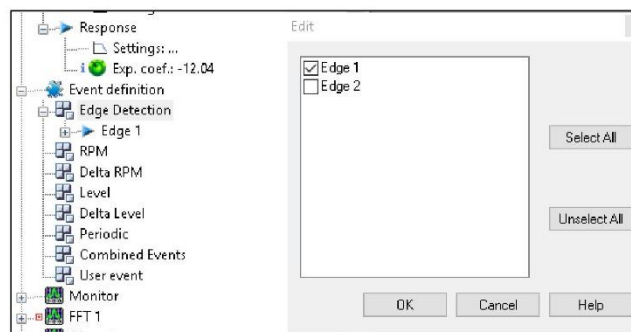
FFT analysing – Range: **1kHz**

- Number of lines :**1601 lines**

Cross spectrum: **por um “X” no local onde é possível colocar.**

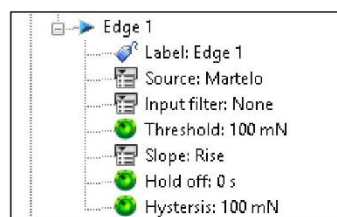


Definir eventos – Edge detetion-“add”-escolher “**edge 1**”



Definir Edge 1- Source: **Input 1 (Martelo)**

Threshold: **100mN**



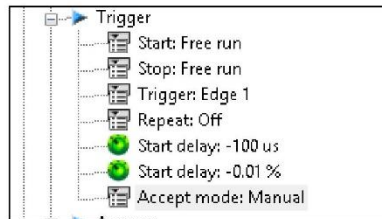
Rui Miguel Golim Fernandes Alves



FFT 1- Trigger – Trigger: **Edge 1**

- Tempo de delay: **-0.1ms**

- Accept mode: **Manual**



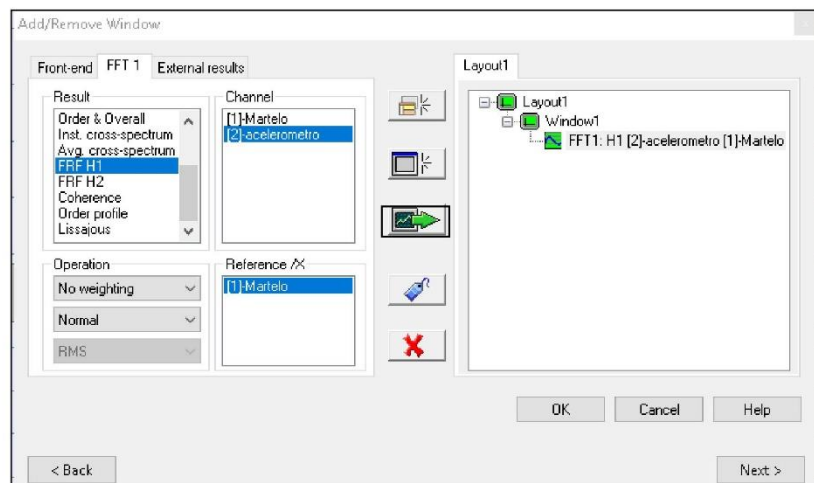
Display/Graphs- **Add/Remove**

FFT 1 –Result: **FRF H1**

–Channel: **(2) Acelerómetro**

–Reference /X: **(1) Martelo**

Carregar no botão indicado em baixo para adicionar



Rui Miguel Golim Fernandes Alves



FFT 1 –Result: **Trigger block**

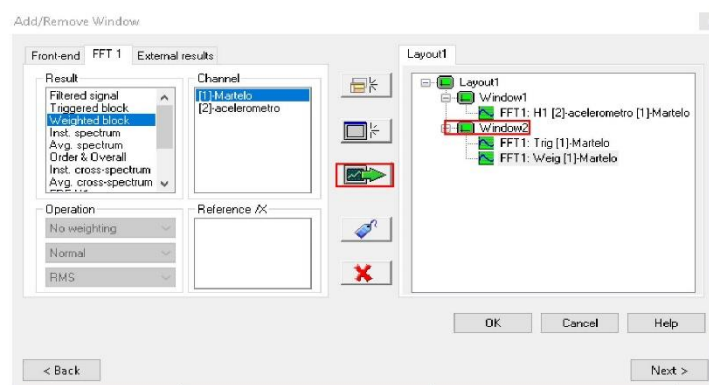
–Channel: **(1) Martelo**

Carregar no botão indicado abaixo.

– Result: **Weighted block**

–Channel: **(1) Martelo**

Selecionar a janela onde esta o **Trigger block (1)** e depois carregar no botão indicado em baixo.



FFT 1 –Result: **Trigger block**

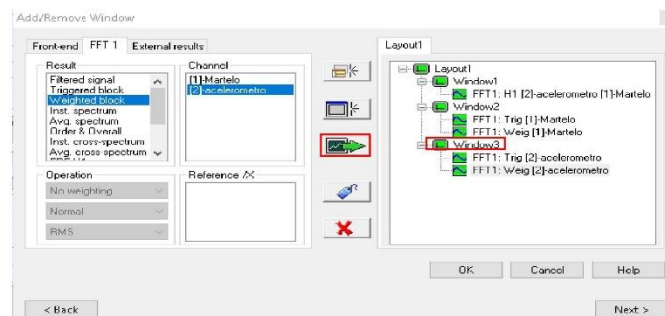
–Channel: **(2) Acelerometro**

Carregar no botão indicado abaixo.

– Result: **Weighted block**

– Channel: **(2) Acelerometro**

Selecionar a janela onde esta o **Trigger block (2)** e depois carregar no botão indicado em baixo.

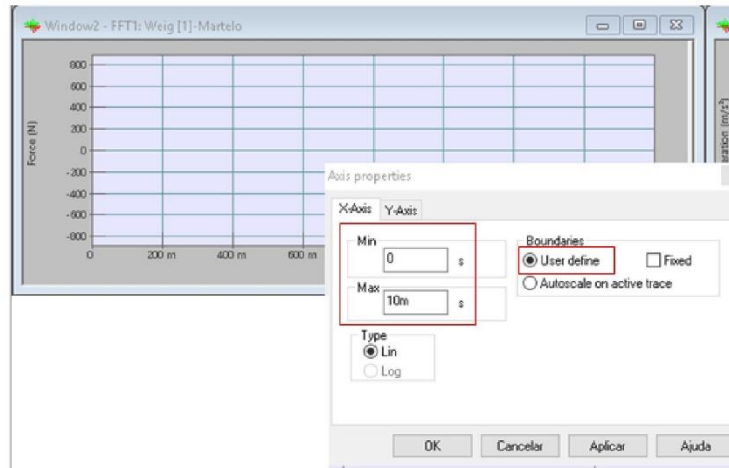


9

Rui Miguel Golim Fernandes Alves



Por cima da janela da Força- Botão direito- **Axis Proprieties**

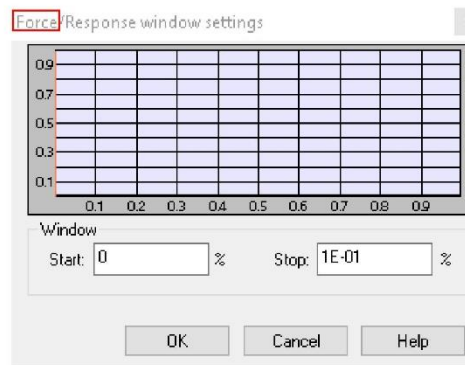
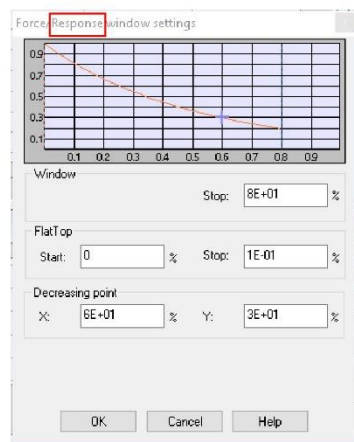


Time Windows- Force - Start: **0%**

- Stop: **0.1%**

- Response - Start: **0%**

- Stop: **0.1%**

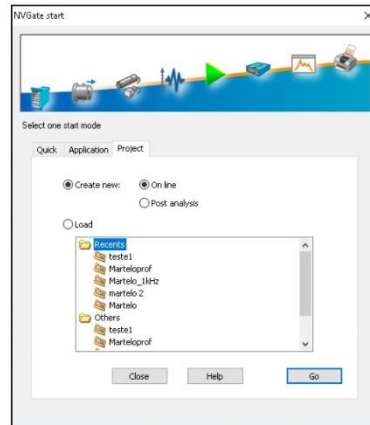


Rui Miguel Golim Fernandes Alves

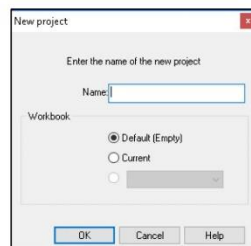


2) Microfone

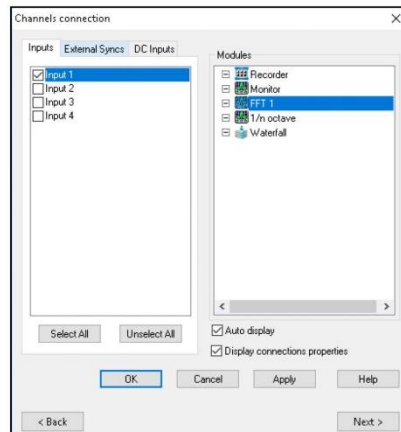
Criar um novo projeto – “GO”



Digitar o nome do projeto



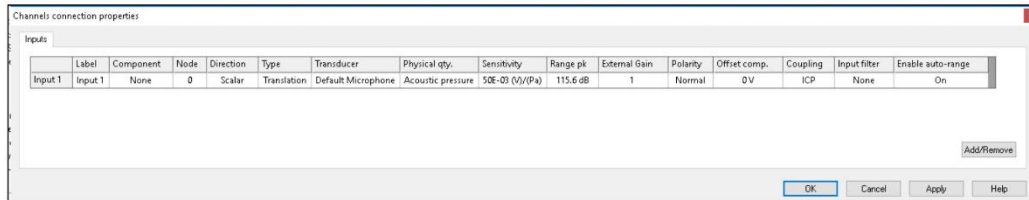
Definir “input” e criar FFT1



Rui Miguel Golim Fernandes Alves



Definir o "input"



Definir o nome do "Label"

- LABEL 1: **MICROFONE**

Definir o tipo de tradutor "Traducer"

-**DEFAULT MICROPHONE (MICROFONE)**

Definir a sensibilidade "sensivity"

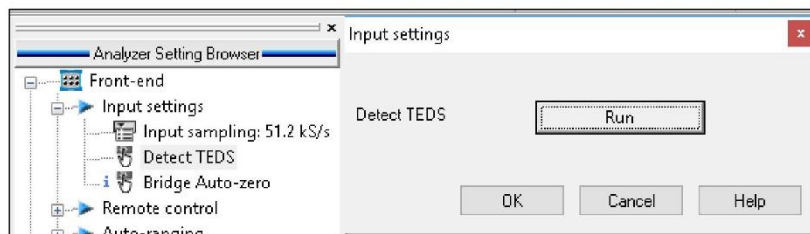
- MICROFONE: **5 mV/Pa**

Definir o "coupling"

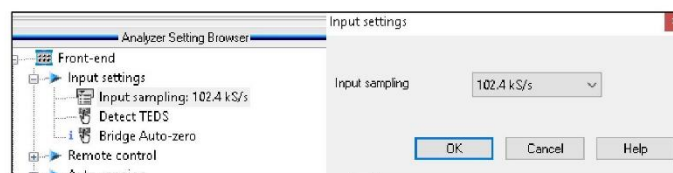
- MICROFONE: **ICP**

Se o equipamento tiver TEDS

"Input settings"- "Detect TEDS"- **RUN**



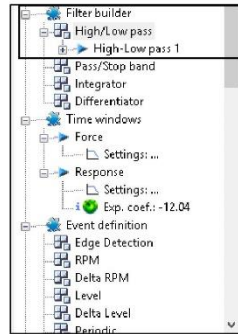
Definir "Input settings"- definir "Input sampling"- **102.4kS/s**



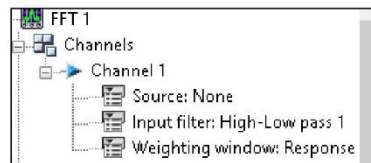
Rui Miguel Golim Fernandes Alves



Filtros- High/Low pass-“add”



FFT 1- Criar canal e definir o canal



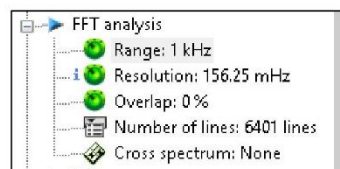
-Channel 1 –Source: **Input 1 (Microfone)**

– Input filter: **High/Low pass 1**

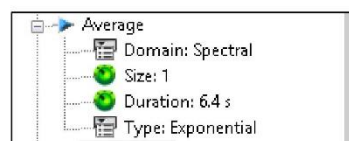
– Weighting window: **Response**

FFT analysing – Range: **1kHz**

- Number of lines :**6401 lines**



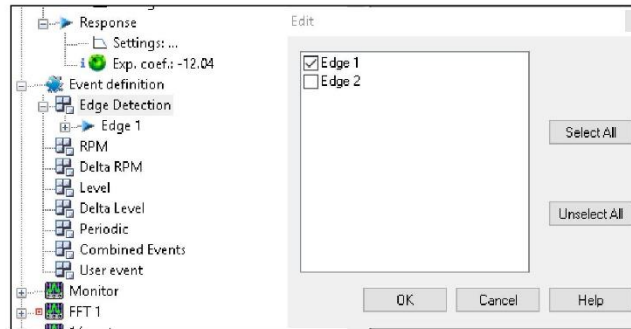
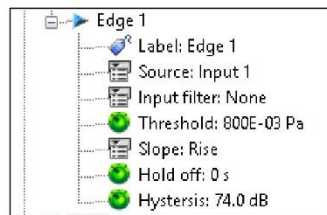
Average- Size:1



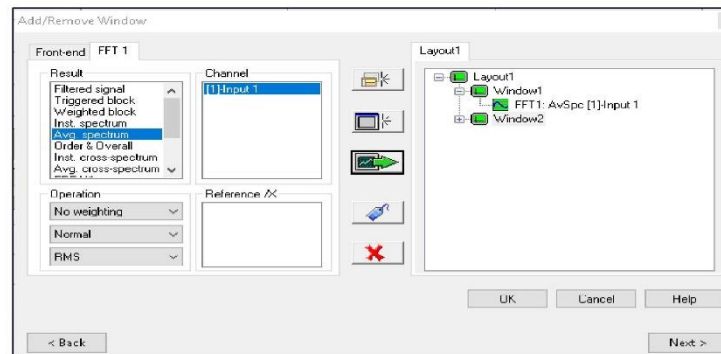
Rui Miguel Golim Fernandes Alves



Definir eventos – Edge detection-“add”-escolher “edge 1”

Definir Edge 1- Source: **Input 1 (Microfone)**Threshold: **800E-3 Pa**Display/Graphs- **Add/Remove**FFT 1 –Result: **Avg. Spectrum**–Channel: **(1) Microfone**

Carregar no botão indicado em baixo para adicionar



14

Rui Miguel Golim Fernandes Alves



FFT 1 –Result: **Trigger block**

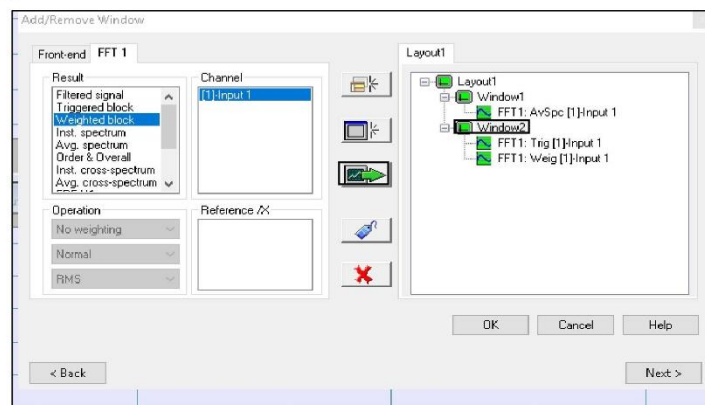
–Channel: **(1) Microfone**

Carregar no botão indicado abaixo.

– Result: **Weighted block**

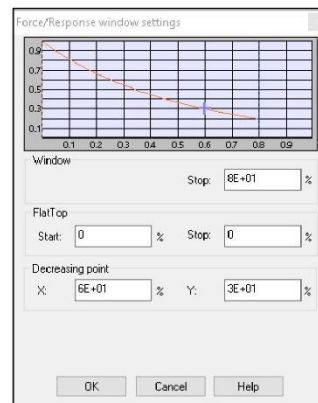
–Channel: **(1) Microfone**

Selecionar a janela onde esta o **Trigger block (1)** e depois carregar no botão indicado em baixo.



Time Windows- Response - Start: **0%**

- Stop: **0%**



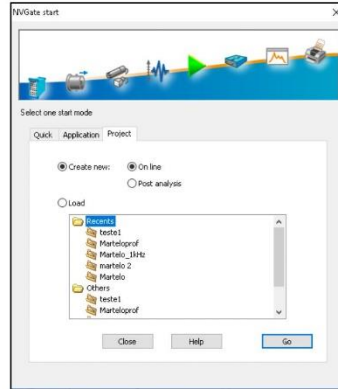
15

Rui Miguel Golim Fernandes Alves

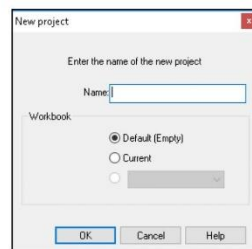


3) Martelo de impacto e VibroMet

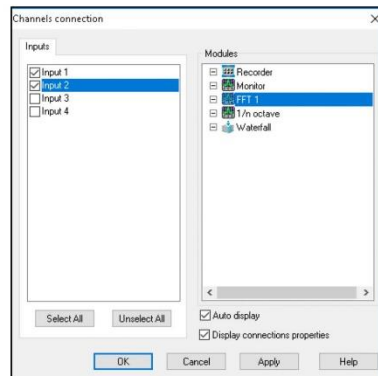
Criar um novo projeto – “GO”



Digitar o nome do projeto



Definir “inputs” e criar FFT1



Rui Miguel Golim Fernandes Alves



Definir cada um dos “inputs”

Label	Component	Node	Direction	Type	Transducer	Physical qty.	Sensitivity	Range pk	External Gain	Polarity	Offset comp.	Coupling	Input filter	Enable auto-range	
Input 1	Input 1	None	0	Scalar	Translation	Default Force sensor	Force	21.7 mV/(N)	2.76 N	1	Normal	0V	ICP	None	On
Input 2	Input 2	None	0	Scalar	Translation	Default Velocity sensor	Velocity	191.93 (V)/(m/s)	52.1 mm/s	1	Normal	0V	AC floating	None	On

Definir o nome do “Label”

- LABEL 1: **MARTELO**
- LABEL 2: **VIBROMET**

Definir o tipo de transdutor “Traducer”

- DEFAULT FORCE SENSOR (MARTELO)**
- DEFAULT VELOCITY SENSOR (VIBROMET)**

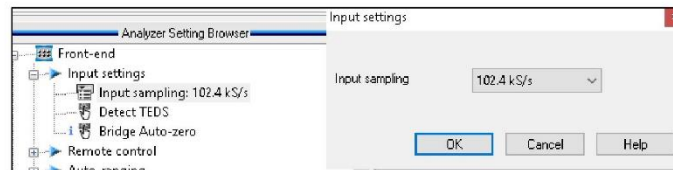
Definir a sensibilidade “sensivity”

- MARTELO: **21.7 mV/N**
- VIBROMET: **191.93 V/m/s**

Definir o “coupling”

- MARTELO: **ICP**
- VIBROMET: **AC floating**

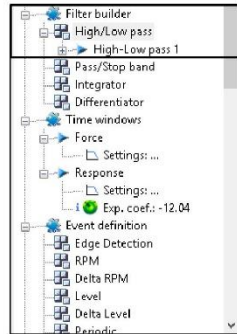
Definir “Input settings”- definir “Input sampling”- **102.4kS/s**



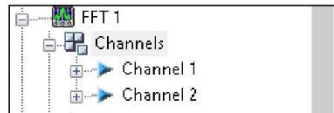
Rui Miguel Golim Fernandes Alves



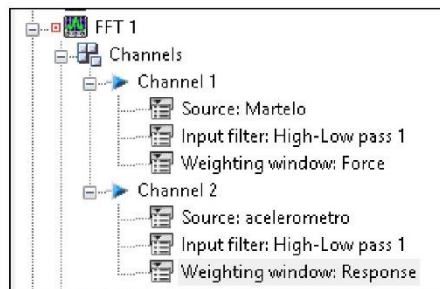
Filtros- High/Low pass-“add”



FFT 1- Criar canais



Definir cada um dos canais



-Channel 1 –Source: **Input 1 (Martelo)**

– Input filter: **High/Low pass 1**

– Weighting window: **Force**

-Channel 2 –Source: **Input 2 (VibroMet)**

– Input filter: **High/Low pass 1**

– Weighting window: **Response**

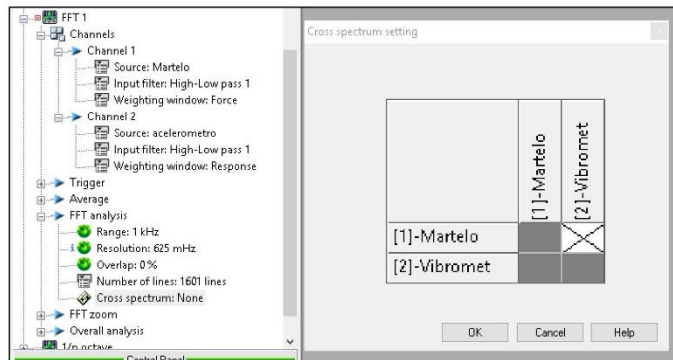
Rui Miguel Golim Fernandes Alves



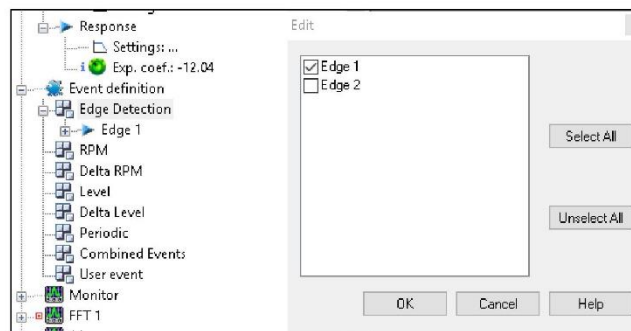
FFT analysing – Range: **1kHz**

- Number of lines :**1601 lines**

Cross spectrum: **por um “X” no local onde é possível colocar.**

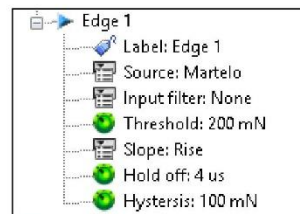


Definir eventos – Edge detetion-“add”-escolher “**edge 1**”



Definir Edge 1- Source: **Input 1 (Martelo)**

Threshold: **200mN**



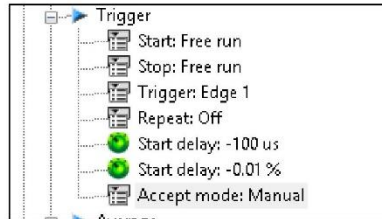
Rui Miguel Golim Fernandes Alves



FFT 1- Trigger – Trigger: **Edge 1**

- Tempo de delay: **-0.1ms**

- Accept mode: **Manual**



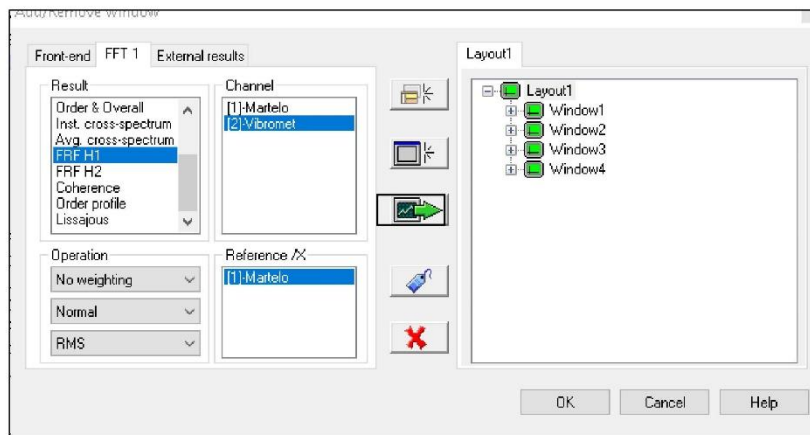
Display/Graphs- **Add/Remove**

FFT 1 –Result: **FRF H1**

–Channel: **(2) Acelerómetro**

–Reference /X: **(1) Martelo**

Carregar no botão indicado em baixo para adicionar



Rui Miguel Golim Fernandes Alves



FFT 1 –Result: **Trigger block**

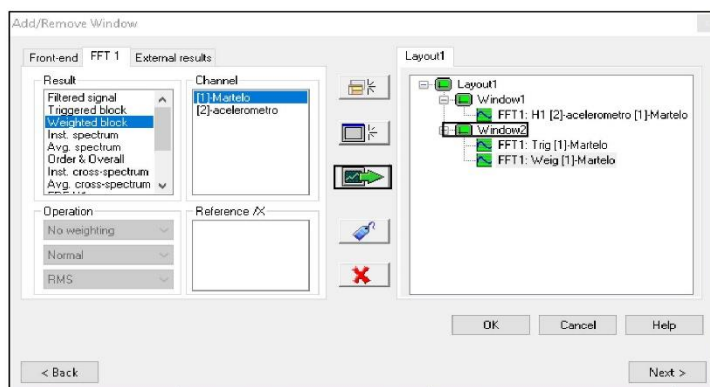
–Channel: **(1) Martelo**

Carregar no botão indicado abaixo.

– Result: **Weighted block**

–Channel: **(1) Martelo**

Selecionar a janela onde esta o **Trigger block (1)** e depois carregar no botão indicado em baixo.



FFT 1 –Result: **Trigger block**

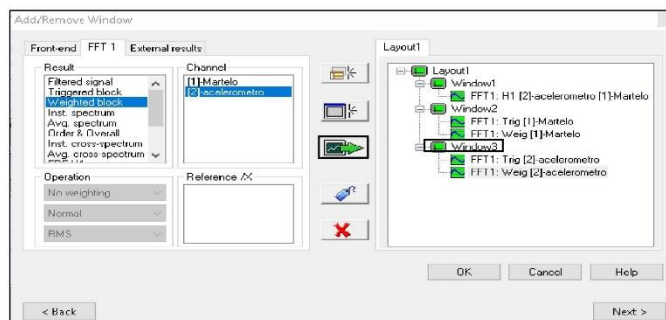
–Channel: **(2) VibroMet**

Carregar no botão indicado abaixo.

– Result: **Weighted block**

– Channel: **(2) VibroMet**

Selecionar a janela onde esta o **Trigger block (2)** e depois carregar no botão indicado em baixo.



21