

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

DANTE VECCHIA ROCHA E SILVA

ESTUDO NUMÉRICO E EXPERIMENTAL DAS
RIGIDEZES DE CONTATO DE UMA ESTRUTURA DE
ESPELHO DA LINHA MOGNO DO SIRIUS

SÃO CARLOS -SP

2021

Dante Vecchia Rocha e Silva

ESTUDO NUMÉRICO E EXPERIMENTAL DAS RIGIDEZES DE CONTATO DE UMA
ESTRUTURA DE ESPELHO DA LINHA MOGNO DO SIRIUS

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Universidade Federal de
São Carlos, como parte dos requisitos
para obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Mecânica.

Orientador: Luis Antonio Oliveira Araujo

São Carlos-SP

2021



FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA - CCEMec/CCET

Rod. Washington Luís km 235 - SP-310, s/n - Bairro Monjolinho, São Carlos/SP, CEP 13565-905

Telefone: (16) 33519703 - <http://www.ufscar.br>

DP-TCC-FA nº 30/2021/CCEMec/CCET

Graduação: Defesa Pública de Trabalho de Conclusão de Curso

Folha Aprovação (GDP-TCC-FA)

FOLHA DE APROVAÇÃO

Dante Vecchia Rocha e Silva

**ESTUDO NUMÉRICO E EXPERIMENTAL DAS RIGIDEZES DE CONTATO DE UMA
ESTRUTURA DE ESPELHO DA LINHA MOGNO DO SIRIUS**


Trabalho de Conclusão de Curso


Universidade Federal de São Carlos – Campus São Carlos


São Carlos, 25 de novembro de 2021


ASSINATURAS E CIÊNCIAS

Cargo/Função	Nome Completo
Orientador	Luis Antonio Oliveira Araujo
Membro da Banca 1	Sidney Bruce Shiki
Membro da Banca 2	Flavio Yukio Watanabe

	Documento assinado eletronicamente por Luis Antonio Oliveira Araujo, Docente , em 25/11/2021, às 18:05, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015 .
---	--

	Documento assinado eletronicamente por Sidney Bruce Shiki, Docente , em 25/11/2021, às 18:06, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015 .
---	--

	Documento assinado eletronicamente por Flavio Yukio Watanabe, Docente , em 25/11/2021, às 18:06, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015 .
---	---

	A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufscar.br/autenticacao , informando o código verificador 0539217 e o código CRC F16572EB .
--	--

Referência: Caso responda a este documento, indicar expressamente o Processo nº 23112.022090/2021-61

SEI nº 0539217

Modelo de Documento: Grad: Defesa TCC: Folha Aprovação, versão de 02/Agosto/2019

AUTORIZAÇÃO

Eu, _____,
_____, _____, _____,
residente e domiciliado em _____, _____, na

portador do documento de identidade _____, nº _____,
na qualidade de titular dos direitos morais e patrimoniais de autor que recaem sobre a
minha produção do tipo _____, intitulada

em consonância com as disposições da Lei nº 9.610, de 19 de fevereiro de 1998, autorizo a UFSCar a:

- a) Reproduzi-la por meios eletrônicos, mediante cópia digital, para armazená-la permanentemente no Repositório Institucional da UFSCar (RI-UFSCar), disponibilizando-a de acordo com os termos de uma licença Creative Commons;
- b) Colocá-la ao alcance do público, a partir de _____ por meios eletrônicos, em especial mediante acesso *on-line* pela Web;
- c) Permitir a quem a ela tiver acesso, por meios eletrônicos, inclusive pela Internet, que a reproduza, dela extraindo cópias, gratuita ou onerosamente, a critério da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar).



DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho à minha família e aos meus amigos que me deram todo suporte para que eu pudesse chegar até aqui.

AGRADECIMENTO

Um agradecimento especial ao meu orientador, ao Centro Nacional de Pesquisa em Energia e Materiais e ao grupo de Projetos de Linhas de Luz, pela possibilidade de desenvolver um trabalho tão gratificante cujos resultados me motivam a continuar pesquisando, divulgando e compartilhando, com o meio científico, os novos conhecimentos cotidianamente adquiridos.

“O que realmente importa na vida é o que se faz com o tempo que nos é
dado.”

Tolkien, John R. R.

RESUMO

Um dos desafios do projeto das novas fontes de luz síncrotron de 4ª geração, como o Sirius (Laboratório Nacional de Luz Síncrotron – LNLS), é o projeto de estabilidade mecânica dos componentes das novas linhas de luz, em que é possível realizar experimentos com feixes de dimensões nanométricas. Com a existência de vibrações mecânicas inerentes ao processo em todas as suas etapas, é necessário que o projeto seja elaborado de forma a reduzir ao máximo seus efeitos, visto que afetam diretamente na estabilidade do feixe podendo causar uma perda de resolução da linha de luz. Uma etapa crucial para a avaliação da estabilidade é a análise modal, na qual é importante conhecer e utilizar valores adequados de rigidezes de contato para garantir a qualidade do projeto. Por se tratar de um conceito complexo e estar relacionado a diversos fatores, tais como a rigidez dos materiais, a rugosidade do contato, a força de união dos corpos e a qualidade superficial, é difícil obter resultados confiáveis analiticamente e a réplica de estudos realizados em diferentes projetos. Logo, a proposta deste estudo é, inicialmente, estimar os valores coerentes das rigidezes de contato de uma das estruturas de espelho da Linha Mogno, que está sendo projetada para ser líder mundial em micro e nano imagens utilizando raio-X, através de uma metodologia que concilie uma análise modal experimental do sistema com um estudo numérico de otimização utilizando o programa Ansys. Em seguida, procura-se identificar os contatos mais sensíveis para o sistema e, por fim, propor mudanças nas geometrias com o objetivo de melhorar a estabilidade mecânica. Assim, a partir dos valores encontrados neste trabalho, constitui-se a expectativa de que tais valores possam ser utilizados em futuros projetos de linhas de luz.

Palavras-chave: Rigidez de contato. Sirius. Vibrações mecânicas. Ajuste de Modelo.

ABSTRACT

One of the challenges in the project of new 4th generation synchrotron light sources, such as Sirius (LNLS), is the design of the mechanical stability of the components of the new beamlines, where it is possible to carry out experiments with nanometer-sized light beams. With the existence of mechanical vibrations inherent to the process in all its stages, it is necessary to reduce its effects as much as possible, as they directly affect the beam stability and may cause a loss of beamline resolution. A crucial step in the stability assessment is the modal analysis, in which it is important to know and use adequate contact stiffness values to ensure the quality of the design. As it is a complex concept and dependent on several factors, such as material stiffness, contact roughness, body bond strength, surface quality, among others, it is difficult to obtain analytically reliable results and even to replicate studies carried out in different projects. Therefore, the purpose of this study is to acquire the coherent values of the contact stiffnesses of one of the mirror structures of the Mogno Line, which is being projected to be the world leader in micro and nano images using X-rays, through a methodology that combines an experimental modal analysis of the system with a numerical optimization study using the Ansys program. Finally, identify the most sensitive contacts for the system and propose changes in geometries to improve mechanical stability. The values found in this work can be used in beamline projects in the future.

Keyword: Contact Stiffness. Sirius. Mechanical Vibrations. Model Updating.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Linha de Luz Carnaúba até a Tarumã.....	15
Figura 2 - Estrutura do espelho M1 da Carnaúba	16
Figura 3 - Sistema massa mola com um grau de liberdade	18
Figura 4 - Avaliação de um sinal no domínio do tempo e no domínio da frequência.....	19
Figura 5 - Função de Resposta em Frequência de um Sistema de Primeira Ordem.....	22
Figura 6 - Função de Resposta em Frequência de um Sistema de Segunda Ordem.....	23
Figura 7 - Sistema de dois graus de liberdade	24
Figura 8 - Tipos de contatos Hertzianos: (a) contato suave (b) contato rugoso.....	27
Figura 9 - Tipos de contatos entre duas superfícies planas	28
Figura 10 - Setup experimental para determinar rigidez de contato normal entre duas superfícies planas.....	29
Figura 11 - Estrutura do espelho M1 da Linha Mogno	31
Figura 12 - Setup do teste de estabilidade na estrutura completa	33
Figura 13 - Esquema do setup utilizado no teste de estabilidade	34
Figura 14 - Setup do teste modal.....	35
Figura 15 - Setup esquemático do teste modal	36
Figura 16 - Etapas de desmontagem dos testes experimentais.....	36
Figura 17 - Setup do teste de avaliação dos modos internos da bomba iônica	37
Figura 18 - Modelo simplificado dos granitos para simulação no Ansys	38
Figura 19 - Esquemático da metodologia de simulação utilizada.....	39
Figura 20 - Superfície de resposta da rigidez com o chão e a primeira frequência natural	40
Figura 21 - Setup da simulação harmônica com componentes de força nas 3 direções	41
Figura 22 - Sinal da PSD obtida experimentalmente pelo sismógrafo no solo e sua simplificação	42
Figura 23 - Comparação da CAS entre o sinal experimental e o simplificado	43
Figura 24 - Modelo da base de granitos e câmara de vácuo	43
Figura 25 - Modelo da estrutura completa	44
Figura 26 - Imagem da estrutura de espelho em CAD e zoom nas fixações que terão propostas de melhoria.....	44
Figura 27 - Fixação da bomba no granito e simplificação em associação de molas	45
Figura 28 - Simulação de rigidez da fixação superior da bomba iônica	46
Figura 29 – Imagem da estrutura de espelho em CAD e zoom nos flanges de conexão entre bomba e câmara	47
Figura 30 - Setup de simulação para avaliação rigidez na direção Y	47
Figura 31 - Deslocamento simulado para cálculo de rigidez da conexão câmara e bomba	48
Figura 32 - PSD do deslocamento da medida de estabilidade dos granitos	49

Figura 33 - Acumulado RMS do deslocamento da medida de estabilidade dos granitos	50
Figura 34 - PSD do deslocamento da medida de estabilidade dos granitos com a câmara	51
Figura 35 - Acumulado RMS do deslocamento da medida de estabilidade dos granitos com a câmara	51
Figura 36 – PSD do deslocamento da medida de estabilidade dos granitos com a câmara e bomba iônica.....	52
Figura 37 – Acumulado RMS do deslocamento da medida de estabilidade dos granitos com a câmara e bomba iônica.....	52
Figura 38 – Função de resposta em frequência em um dos pontos medidos.....	53
Figura 39 – Coerência média considerando todos os pontos medidos no teste.....	53
Figura 40 – Função de resposta em frequência em um dos pontos medidos.....	54
Figura 41 – Coerência média considerando todos os pontos medidos no teste.....	55
Figura 42 – Função de resposta em frequência em um dos pontos medidos.....	56
Figura 43 – Coerência média considerando todos os pontos medidos no teste.....	56
Figura 44 – Função de resposta em frequência em um dos pontos medidos.....	57
Figura 45 – Função de resposta em frequência em um dos pontos medidos.....	58
Figura 46 – Função de resposta em frequência em um dos pontos medidos.....	58
Figura 47 – Coerência média considerando todos os pontos medidos no teste.....	58
Figura 48 - FRF comparativa entre Ansys e experimental dos granitos	59
Figura 49 - PSD do eixo Z no chão e no granito experimental e numérico.....	59
Figura 50 - CAS do eixo Z no chão e no granito experimental e numérico.....	60
Figura 51 - FRF comparativa entre Ansys e experimental dos granitos com a câmara.....	61
Figura 52 - PSD do eixo Z no chão e no granito com a câmara experimental e numérico.....	61
Figura 53 - CAS do eixo Z no chão e no granito com a câmara experimental e numérico.....	61
Figura 54 - FRF comparativa entre Ansys e experimental dos granitos com a câmara e bomba iônica	62
Figura 55 - PSD do eixo Z no chão e no granito com a câmara e bomba iônica experimental e numérico.....	63
Figura 56 - CAS do eixo Z no chão e no granito com a câmara e bomba iônica experimental e numérico.....	63
Figura 57 - Modo de desacoplamento da tampa da câmara de vácuo	67
Figura 58 - Modo interno da câmara de vácuo	67
Figura 59 - FRF com picos em 60 Hz e 120 Hz por causa da rede elétrica.....	68
Figura 60 - Modo de vibrar de desacoplamento da câmara dos granitos	69
Figura 61 - FRF mostrando o modo interno da bomba no teste coma estrutura completa.....	70
Figura 62 - Sinal no tempo da medida de estabilidade dos granitos.....	75
Figura 63 - Sinal no tempo da medida de estabilidade dos granitos com a câmara	75

Figura 64 – Sinal no tempo da medida de estabilidade dos granitos com a câmara e bomba iônica .	76
Figura 65 - Coerência média considerando todos os pontos medidos no teste.....	76
Figura 66 - Coerência média considerando todos os pontos medidos no teste.....	76
Figura 67 - Coerência média considerando todos os pontos medidos no teste.....	77
Figura 68 - Coerência média considerando todos os pontos medidos no teste.....	77
Figura 69 - Coerência média considerando todos os pontos medidos no teste.....	77
Figura 70 - Coerência média considerando todos os pontos medidos no teste.....	78
Figura 71 - Coerência média considerando todos os pontos medidos no teste.....	78
Figura 72 - Coerência média considerando todos os pontos medidos no teste.....	78
Figura 73 - PSD do eixo X no chão e no granito experimental e numérico.....	79
Figura 74 - PSD do eixo Y no chão e no granito experimental e numérico.....	79
Figura 75 - CAS do eixo X no chão e no granito experimental e numérico.....	80
Figura 76 - CAS do eixo Y no chão e no granito experimental e numérico.....	80
Figura 77 - PSD do eixo X no chão e no granito com a câmara experimental e numérico.....	81
Figura 78 - PSD do eixo Y no chão e no granito com a câmara experimental e numérico.....	81
Figura 79 - CAS do eixo X no chão e no granito com a câmara experimental e numérico.....	82
Figura 80 - CAS do eixo Y no chão e no granito com a câmara experimental e numérico.....	82
Figura 81 - PSD do eixo X no chão e no granito com a câmara e bomba iônica experimental e numérico	83
Figura 82 - PSD do eixo Y no chão e no granito com a câmara e bomba iônica experimental e numérico.....	83
Figura 83 - CAS do eixo X no chão e no granito com a câmara e bomba iônica experimental e numérico.....	84
Figura 84 - CAS do eixo Y no chão e no granito com a câmara e bomba iônica experimental e numérico.....	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Materiais utilizados e suas propriedades	38
Tabela 2 - Máximo e mínimo de rigidezes consideradas	40
Tabela 3 – Modos naturais obtidos no primeiro teste	54
Tabela 4 - Modos naturais obtidos no segundo teste	55
Tabela 5 - Modos naturais obtidos no terceiro teste	57
Tabela 6 – Comparação entre os modos experimentais e numéricos do primeiro teste	60
Tabela 7 - Comparação entre os modos experimentais e numéricos do segundo teste	62
Tabela 8 - Comparação entre os modos experimentais e numéricos do terceiro teste	64
Tabela 9 - Tabela de rigidezes de contato otimizadas	65

LISTA DE SIGLAS

CAD – *Computer Aided Design*

CARNAUBA – *Coherent X-ray Nanoprobe Beamline*

CAS – Cumulative Amplitude Spectrum

CNPEM – Centro Nacional de Pesquisa em Energia e Materiais

CPS – Cumulative Power Spectrum

DAQ – *Data Acquisition System*

DFT – Transformada Discreta de Fourier

FRF – Função de Resposta em Frequência

FT – Função de Transferência

LNBio – Laboratório Nacional de Biociências

LNBR – Laboratório Nacional de Biorrenováveis

LNLS – Laboratório Nacional de Luz Síncrotron

LNNano – Laboratório Nacional de Nanotecnologia

PSD – Power Spectral Density

RMS – Root Mean Square

LISTA DE SÍMBOLOS

τ	Constante de tempo
φ	Fase
ω	Frequência
ω_n	Frequência natural não amortecida
a_{RMS}	Aceleração RMS
A_i	Sinal de entrada
A_p	Área da seção transversal do pescoço do parafuso
A_r	Área da seção transversal da rosca do parafuso
$\frac{A_o}{A_i}$	Relação de Amplitudes
$[c]$	Matriz de amortecimentos
<i>CAS</i>	<i>Cumulative Amplitude Spectrum</i>
<i>CPS</i>	<i>Cumulative Power Spectrum</i>
d	Deslocamento medido na simulação
D_p	Diâmetro do pescoço do parafuso
D_r	Diâmetro da rosca do parafuso
f	Frequência
E^*	Módulo de elasticidade equivalente entre os dois materiais em contato
F	Força aplicada na simulação
\vec{F}	Vetor de forças
i	Número complexo
k	Rigidez
$[k]$	Matriz de rigidezes
K	Ganho
k_1	Rigidez do parafuso que prende a fixação na bomba iônica
k_2	Rigidez da fixação superior
k_3	Rigidez axial do parafuso
k_4	Rigidez da fixação inferior
k_5	Rigidez do parafuso que prende a fixação na base de granito
k_{3p}	Rigidez axial do pescoço do parafuso
k_{3r}	Rigidez axial da rosca do parafuso
k_{eq}	Rigidez equivalente do das fixações que prendem a bomba iônica no granito
k_{Hr}	Rigidez normal de um contato Hertziano com rugosidade
k_{Hs}	Rigidez normal de um contato Hertziano sem rugosidade
L_p	Comprimento do pescoço do parafuso

L_r	Comprimento da rosca do parafuso
m	Massa
$[m]$	Matriz de massas
n	Número de graus de liberdade
N	Número de pontos
q_o	Resposta no tempo
$\frac{Q_o}{Q_i}$	Função de transferência
P	Carga aplicada normal ao contato
PSD	<i>Power Spectral Density</i>
R	Raio de curvatura da peça com contato circular
s	Variável de Laplace
t	Tempo
$x(t)$	Sinal no tempo
$X(k)$	Coefficiente de Fourier
\vec{x}	Vetor de deslocamentos
$\dot{\vec{x}}$	Vetor de velocidades
$\ddot{\vec{x}}$	Vetor de acelerações

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	LINHA CARNAÚBA	14
1.1.1	Estrutura do Espelho M1	15
1.1.2	Excitações em Uma Estrutura de Uma Linha de Luz	17
1.2	MEDIDAS DE VIBRAÇÃO	17
1.2.1	Análise Modal	18
1.2.2	Análise de Estabilidade	25
1.3	RIGIDEZES DE CONTATO	27
1.3.1	Cálculos Teóricos	27
1.3.2	Estimativas Experimentais	29
2	OBJETIVO	31
3	MATERIAIS E MÉTODOS	33
3.1	ETAPA EXPERIMENTAL	33
3.2	ETAPA NUMÉRICA	37
3.3	RIGIDEZ DAS FIXAÇÕES	44
3.3.1	Fixações da Bomba Lônica no Granito	44
3.3.2	Fixação da Bomba Lônica na Câmara	47
4	RESULTADOS	49
4.1	ETAPA EXPERIMENTAL	49
4.2	ETAPA NUMÉRICA	58
4.3	RIGIDEZ DAS FIXAÇÕES	65
5	DISCUSSÃO	66
6	CONCLUSÃO	71
	REFERÊNCIAS	73
	APÊNDICE A – SINAIS NO TEMPO E COERÊNCIAS	75
	APÊNDICE B – COMPARAÇÕES NUMÉRICO-EXPERIMENTAIS	79

1 INTRODUÇÃO

Característica cada vez mais acentuada, no âmbito das pesquisas científicas, sobretudo, nos dias de hoje, tem sido a busca por respostas em torno de inúmeros temas que auxiliem na produção de novos conhecimentos e que possam produzir mudanças e avanços científicos no intuito, principalmente, de revolucionar o mundo. Tais temas abarcam, por exemplo, as novas fontes de energia renováveis ou a compreensão de novos materiais para a criação de remédios nano tecnológicos para combater doenças como o câncer.

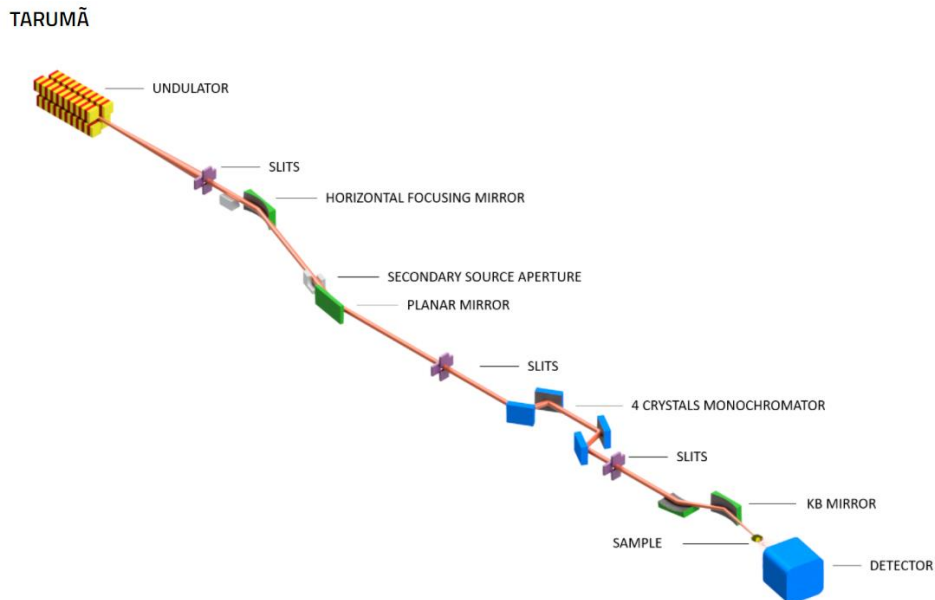
Tendo em vista essas questões, o Centro Nacional de Pesquisa em Energia e Materiais – CNPEM – tem como missão integrar todos esses elementos com quatro diferentes Laboratórios Nacionais, sendo eles o de Luz Síncrotron (LNLS), o de Biociências (LNBio), o de Biorrenováveis (LNBR) e o de Nanotecnologia (LNNano).

Para integrar todos os laboratórios, o Centro conta com uma fonte de luz síncrotron de quarta geração do acelerador de elétrons Sirius. Com o acelerador, os pesquisadores têm capacidade de realizar pesquisas em matérias orgânicas e inorgânicas com níveis de resolução micro e nanométricas. E, para que isso seja possível, o acelerador conta com linhas de luz projetadas e capazes de selecionar a radiação e as energias desejadas do feixe de luz e o incidir no foco de estudo desejado para poder compreender, nanometricamente, a composição dos materiais que nos rodeiam cotidianamente.

1.1 LINHA CARNAÚBA

Um dos exemplos de linha já existentes e em funcionamento do Sirius, é a linha CARNAUBA (*Coherent X-ray Nanoprobe Beamline*) que já contribui significativamente em diversos campos de pesquisas atuais e tem um dos seus trechos apresentados na Figura 1. Um dos exemplos trazidos para elucidar o leitor na vasta gama de possibilidades é a pesquisa Rodella et al. (2019), que visa a estudar catalisadores com diversas técnicas possíveis dessa linha de luz. Um segundo exemplo consiste no uso da linha de luz para compreender os efeitos de um solo contaminado com chumbo em uma raiz em seu estado natural, como explica Mera et al. (2018).

Figura 1 - Linha de Luz Carnaúba até a Tarumã



Fonte: <https://www.lns.cnpem.br/facilities/carnauba/>

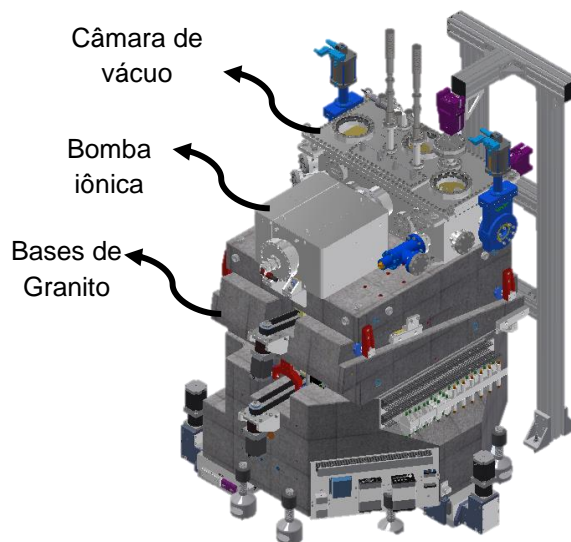
Como o foco do estudo não é o funcionamento exato das linhas, mas uma de suas estruturas, o tema acima não será aprofundado. Assim, a seguir serão explicados as componentes consideradas e função do sistema de espelhos da Linha Carnaúba, que é replicável para a nova Linha Mogno, que está sendo projetada.

1.1.1 Estrutura do Espelho M1

A Figura 1 mostra alguns elementos como espelhos e cristais. Cada uma dessas etapas possui uma funcionalidade para que o feixe seja preparado ao chegar na amostra. A exemplo disso, tem-se a etapa do espelho M1 (análogo na Figura 1 como *horizontal focusing mirror*, visto que a determinação M1 é o primeiro espelho pelo qual o feixe de luz passa na linha de luz) cujo objetivo é focalizar o feixe de luz enquanto os cristais, por exemplo, buscam definir a faixa de energia desejada do feixe para o experimento.

A Figura 2 mostra como é a estrutura do espelho M1 da Linha Carnaúba em que serão indicados os componentes relevantes para o estudo abordado.

Figura 2 - Estrutura do espelho M1 da Carnáuba



Fonte: Próprio Autor

Dessa forma, observa-se que os focos de estudo são compostos pela câmara de vácuo, pela bomba iônica e pelas bases de granito. Suas funções são, para a câmara, garantir que o sistema ótico, e por onde o feixe vai passar esteja em completo vácuo para que partículas de ar não atrapalhem no seu caminho. A bomba iônica, por sua vez, funciona puxando as partículas a fim de criar o vácuo desejado na linha. Por fim, as bases de granito têm como objetivo de não amplificar as vibrações provenientes do solo de mais alta energia, que são em baixa frequência, para os outros componentes como a câmara de vácuo e, conseqüentemente, o sistema ótico dentro dela.

As bases de granitos são apoiadas umas nas outras por três regiões de contato, que definem um plano, da mesma forma que o granito inferior é apoiado nos niveladores que são fixos ao chão através de varões. A bomba iônica é presa ao granito através de fixações parafusadas e à câmara de vácuo por um flange parafusado. A câmara é presa por parafusos nos granitos.

Como pode-se observar dessa estrutura, existe um grande foco em garantir que os componentes óticos que focalizam o feixe se mantenham estáveis dados vibrações provenientes do solo. São utilizadas três bases de granitos empilhadas

que buscam se manter acopladas à câmara de vácuo para que o que estiver dentro também se mantenha acoplado ao resto do sistema. O que justifica a necessidade de estudos e experimentos para validar os projetos que consideram as vibrações.

1.1.2 Excitações em Uma Estrutura de Uma Linha de Luz

Então, como pôde-se observar, é importante entender e identificar quais efeitos podem afetar negativamente a estabilidade do feixe. De acordo com Lesourd, Ravelli e Zhang (2002), as principais fontes de instabilidade são possíveis deformações térmicas em sistemas sensíveis como os espelhos, vibrações mecânicas ligadas ao solo, sendo sísmicas ou excitadas por turbo bombas, que são o foco do presente estudo.

Logo, como as vibrações decorrentes de excitações vindas do solo são cruciais para o desempenho do experimento a ser realizado, diversas técnicas para atenuar ao máximo essas vibrações são utilizadas. Uma solução comumente utilizada é a criação de camadas no solo, como areia, cascalho e concreto que sejam capazes de aumentar a estabilidade que chega nas estruturas das linhas de luz e aceleradores, como explica Simos, Chu, Broadbent et al. (2011).

Com esse pensamento, voltando para a própria Linha de Luz da Carnaúba, existem esses pisos especiais como mostrado por Rodrigues (2019) em que o ondulador está localizado e com o trabalho apresentado por Bueno et al. (2021), tem-se que uma das estruturas da Tarumã possui estabilidades em até 15 nm RMS nas 3 direções, obtendo resultados robustos das performances dinâmicas.

Portanto, fica evidente que o desenvolvimento do Sirius leva em consideração e desenvolve diversos sistemas mecânicos capazes de absorver e manter suas linhas de luz estáveis. Contudo, ao se desenvolver projetos teóricos e simulações computacionais, ainda existem alguns aspectos que devem ser mais bem compreendidos a fim de seguir avançando na busca de menores resoluções dos feixes.

1.2 MEDIDAS DE VIBRAÇÃO

O primeiro passo para a compreensão de como o projeto e suas estruturas se comportam é o desenvolvimento de uma metodologia de instrumentação robusta e

confiável. Portanto, há a necessidade de entender quais as medidas que devem ser feitas, suas utilidades e conceitos teóricos.

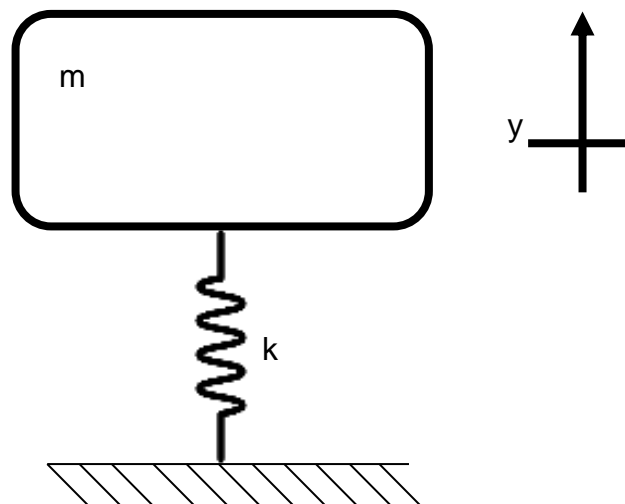
Para fins do desenvolvimento do presente projeto, dois testes experimentais foram estabelecidos e estruturados para tornar possível a obtenção de dados suficientes para progredir no projeto, sendo elas a análise modal e a análise de estabilidade.

1.2.1 Análise Modal

1.2.1.1 Conceitos básicos

Para se compreender o que é uma análise modal, alguns conceitos de vibrações mecânicas devem ser esclarecidos. A primeira parte fundamental para se entender como interpretar uma análise de vibrações é simplificar tudo para um sistema massa mola de 1 grau de liberdade, como representado na Figura 3, em que m é a massa, k a rigidez da mola e y o deslocamento vertical.

Figura 3 - Sistema massa mola com um grau de liberdade



Fonte: Próprio Autor

Assim, com base nessa representação, é possível explicar os dois tipos de vibração básicos, que são as vibrações livres e as vibrações forçadas. Como é apresentado por Rao (2008), uma vibração livre é quando um sistema, após uma perturbação inicial, se mantém vibrando por conta própria, enquanto uma vibração forçada é quando o sistema está submetido a uma força externa, sendo um exemplo, a força periódica ou a aleatória.

O que se buscou com a análise modal para esse trabalho, foi entender quais eram as frequências de ressonância da estrutura do espelho M1 da Mogno, dessa forma, ao simplificar para o modelo de massa mola é necessário entender como fazer para obter seu valor analítico e como o seria feito experimentalmente.

Analiticamente, tem-se que a frequência natural não amortecida de um corpo massa mola em uma direção se dá através da sua massa m , e sua rigidez k , com a Equação 1.

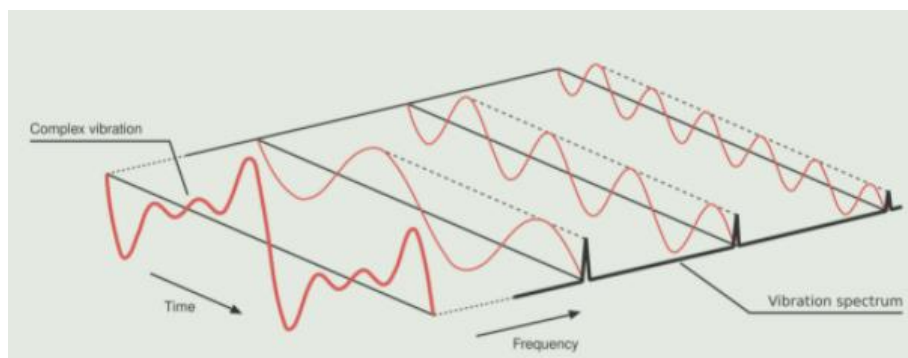
$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (1)$$

Contudo, como é de se esperar, calcular esse valor de frequência natural para corpos flexíveis não é tão simples, dado que em corpos flexíveis existem os modos internos de cada componente e que nem sempre a consideração de corpos rígidos pode ser utilizada. Todavia, existem maneiras de se extrair esses dados experimentalmente, em que, com o auxílio de ferramentas matemáticas é viável avaliar as frequências de ressonância, ou seja, os modos de vibrar de uma estrutura.

1.2.1.2 Vibrações forçadas nos domínios do tempo e da frequência

Para compreender esse conceito, entra-se na área de vibrações forçadas pois o que se busca é observar a resposta desse corpo para um impacto determinado e conhecido no espectro da frequência. A Figura 4 exemplifica a ideia de que, ao se observar os gráficos de um sinal complexo ao longo do tempo, é possível analisar tais gráficos no domínio da frequência de forma mais simples em que suas as frequências no sinal do tempo.

Figura 4 - Avaliação de um sinal no domínio do tempo e no domínio da frequência



Fonte: <https://power-mi.com/content/study-vibration>

Todavia, apenas isso não basta para avaliar adequadamente a resposta de um sistema específico, visto que o sinal pode estar contaminado com ruídos ou excitações externas que não são interessantes, assim, o desejável é avaliar a função de resposta em frequência (FRF) do sistema. Logo, ao se aplicar uma excitação de entrada como um impulso, ou força harmônica é possível prever o comportamento de saída.

A questão se torna compreender qual é o comportamento real do sistema dada essa força de entrada e, para isso, são realizados os testes modais pois, ao se medir, simultaneamente, uma força de entrada que exponha a dinâmica do sistema (como impulso, chirp e aleatória) e acelerações de saída em pontos específicos, os dois sinais se relacionam e a relação de amplitudes entre saída e entrada para diferentes frequências resulta na característica do sistema.

Sendo assim, alguns conceitos devem ser elaborados e explicados com maior aprofundamento para que o processo de tratamento dos dados dos testes seja mais bem compreendido pelo leitor.

1.2.1.3 Transformada Discreta de Fourier

A primeira questão é sobre o sinal no domínio no tempo ser tratado com a Transformada Discreta de Fourier (DTF) para o domínio da frequência e, através de um Diagrama de Bode se torna possível observar os picos de ressonância característicos do sistema. A equação capaz de realizar essa transformada para o domínio da frequência é indicada pela Equação 2, como apresenta Shoukens (2018). É importante compreender que essa equação difere da Transformada de Fourier analítica, visto que ela depende de integrar uma função no tempo bem conhecida e, como os dados experimentais não satisfazem essa questão, a solução é discretizar o sinal e o tratar dessa forma. Onde tem-se que $X(k)$ é a transformada, N o número de pontos, $x(t)$ o sinal a ser tratado, t o tempo e k os coeficientes de Fourier.

$$X(k) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{t=0}^{N-1} x(t) e^{-j2\pi tk/N} \quad (2)$$

1.2.1.4 Resposta no Tempo e o Domínio da Frequência

Agora, retomando o exemplo de um corpo massa mola com um grau de

liberdade, o primeiro passo é explicar o que é uma função de transferência (FT). Resumidamente, segundo Felício (2010) tem-se que uma função de transferência é a relação entre uma única entrada e uma única saída que contemple as condições de que todas as outras entradas sejam nulas ao longo de todo o tempo e a entrada considerada tenha condição inicial nula. Ou seja, quando avaliamos um corpo como o da Figura 3, sabe-se que ao se aplicar uma força na direção y, esse corpo terá uma resposta característica e dada de acordo com seus parâmetros de massa, rigidez e amortecimento. A Equação 3 apresenta uma função de transferência de um sistema de 1º grau.

$$\frac{Q_o}{Q_i}(s) = \frac{1}{\tau s + 1} \quad (3)$$

Contudo, a função de transferência, que é representada no domínio “s” de Laplace pode ser transformada para diferentes domínios, sendo os de maior interesse o do tempo, na medida em que é possível prever o comportamento dinâmico de uma estrutura e para o domínio da frequência que, como referido anteriormente, permite a compreensão dos aspectos de ressonância de um corpo e das características do sistema.

Analiticamente, ao se obter a função no domínio de Laplace como mostrado na Equação 3, o caminho para os dois domínios de interesse é simples, sendo o primeiro a realização da Laplace Inversa na Equação 3, como está exemplificado na Equação 4 e explicado de acordo com referência de Felício (2010), de forma que se tem a resposta no tempo dado uma entrada conhecida, que no caso é a de impulso.

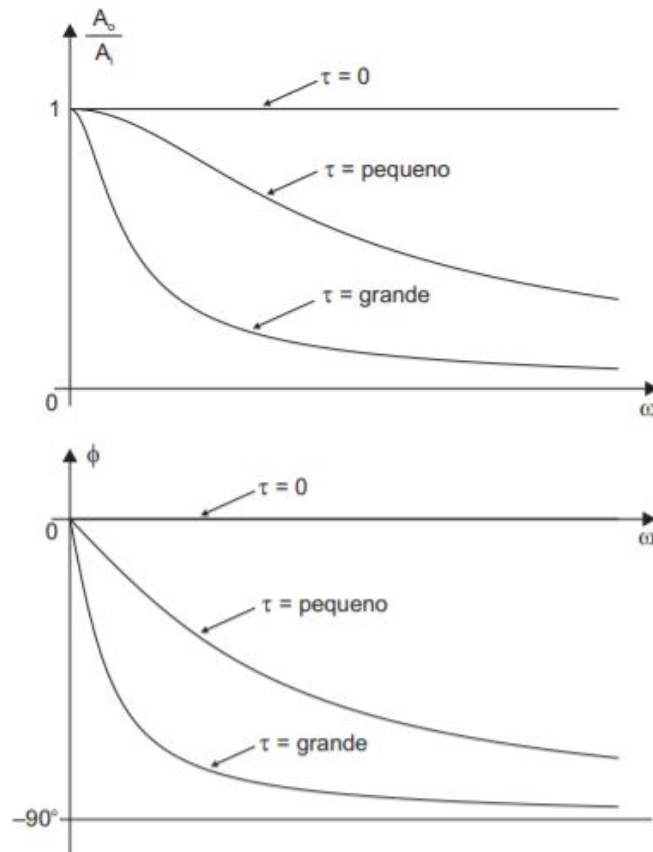
$$q_o = \frac{KA_i}{\tau} e^{-\left(\frac{t}{\tau}\right)} \quad (4)$$

Já o segundo caminho consiste na substituição da variável s por $i\omega$, como mostrado na Equação 5 e, assim, ao se trabalhar e simplificar é possível alcançar a função de resposta em frequência (FRF) e através da Equação 6 se obtém a fase do sistema como explicado por Felício (2010) e apresentado pela Figura 5.

$$\frac{A_o}{A_i} = \left| \frac{Q_o}{Q_i}(i\omega) \right| = \frac{1}{\sqrt{1+(\tau\omega)^2}} \quad (5)$$

$$\varphi = 0 - \arctg\left(\frac{\tau\omega}{1}\right) = -\arctg(\tau\omega) \quad (6)$$

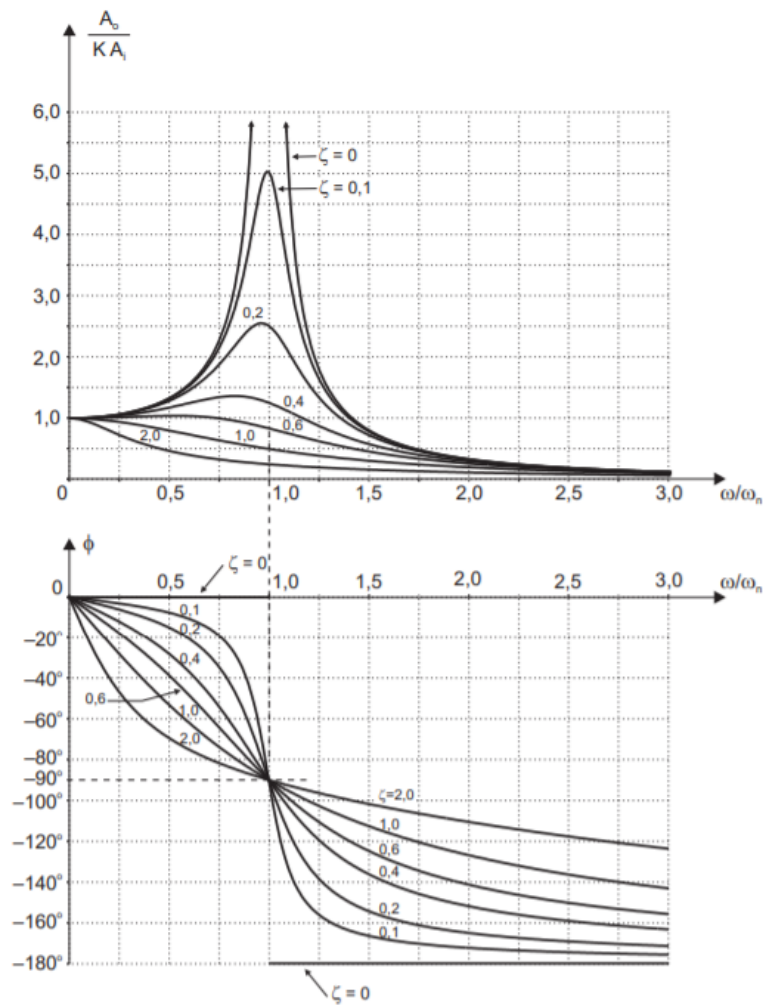
Figura 5 - Função de Resposta em Frequência de um Sistema de Primeira Ordem



Fonte: Felício (2010)

Como é de se esperar, para um sistema de segunda ordem, os gráficos e equações se tornam mais complexos e, a cada grau de liberdade adicionado no sistema, mais difícil é de se resolver analiticamente. A fim de exemplificar, a Figura 6 mostra um sistema de segunda ordem cujo pico da relação de amplitudes evidenciado é a frequência de ressonância do sistema. Vale ressaltar que as amplitudes da frequência natural do sistema variam de acordo com diferentes amortecimentos adotados, como não é foco desse trabalho, esse conceito não será aprofundado.

Figura 6 - Função de Resposta em Frequência de um Sistema de Segunda Ordem



Fonte: Felício (2010)

Então, como a dificuldade aumenta proporcionalmente com a complexidade do sistema analisado, resta a questão de como extrair o Diagrama de Bode de um sistema experimentalmente.

1.2.1.5 Autovalores e Autovetores

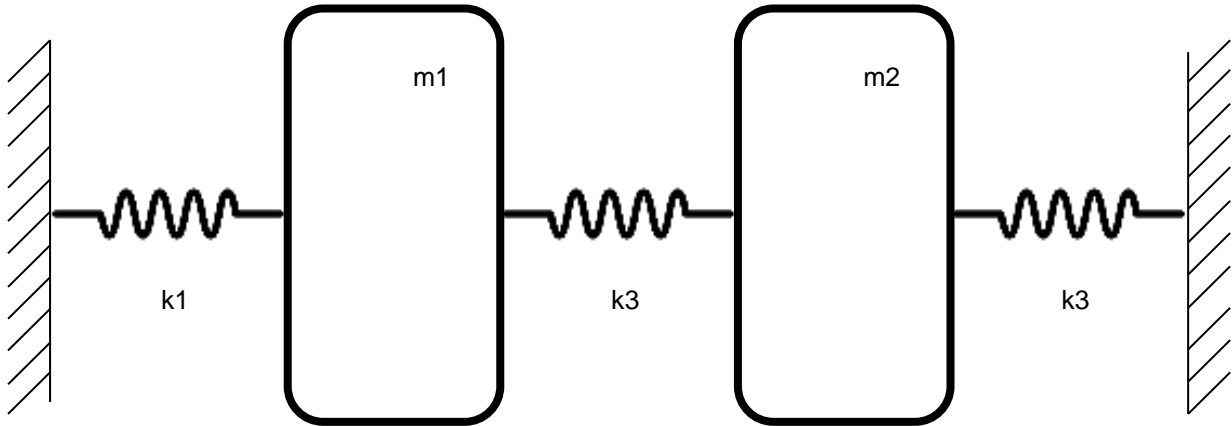
Para ser possível compreender como sistemas com múltiplos graus de liberdade são tratados, um conceito fundamental é o de Autovalores e Autovetores que são obtidos a partir de uma representação matricial de um sistema, como explica Rao (2008). A Equação matricial 7 mostra o sistema de massas, rigidezes e amortecimentos, igualados às suas forças de entradas.

$$[m]\ddot{\vec{x}} + [c]\dot{\vec{x}} + [k]\vec{x} = \vec{F} \tag{7}$$

E ao se considerar um sistema não amortecido e de vibrações livres, pode-se

zerar a matriz de amortecimentos e de forças de entrada para que, ao serem rearranjadas, forma a Equação matricial 8 para um caso com 2 graus de liberdade apresentado pela Figura 7.

Figura 7 - Sistema de dois graus de liberdade



Fonte: Próprio Autor

$$\begin{bmatrix} -m_1\omega^2 + (k_1 + k_2) & -k_2 \\ -k_2 & -m_2\omega^2 + (k_2 + k_3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

Portanto, basta diagonalizar essa matriz, evitando suas soluções triviais, para obter os autovalores sendo as frequências naturais não-amortecidas, que correspondem às ressonâncias e os autovetores os modos que esse sistema vibra.

1.2.1.6 Método de Elementos Finitos

Como foi apresentado anteriormente, um corpo flexível não pode ser aproximado para esse comportamento, visto que esse método analítico calcula interações de corpos rígidos. Entretanto, existe o método de elementos finitos que, ao dividir os corpos em um número finito de elementos, para o caso de um elemento tridimensional, pode-se avaliar os três graus de liberdade de translação em cada um dos nós. Cada elemento possui seus dados de massa, rigidez e amortecimento que conecta os nós e, dessa forma a metodologia de cálculos apresentada na seção anterior pode ser replicada, mesmo considerando um corpo flexível. A única diferença é o tamanho da matriz a ser diagonalizada, que vai ter um tamanho $n \times n$ em que n se dá pelo número de graus de liberdade estipulados.

1.2.1.7 Análise Modal Experimental

Por fim, com todos os conceitos de vibração elaborados, resta explicar como

os utilizar para tratar os dados experimentais.

Com o martelo de impacto e um acelerômetro sendo aquisitados simultaneamente, é possível criar gráficos de força e aceleração para um mesmo vetor de tempo. Esses sinais devem ser tratados com as transformadas de Fourier, independentemente e, ao dividirmos a saída (aceleração) pela entrada (força), obtém-se a relação de amplitudes e a fase apresentadas por Felício (2010). A seguir, é necessário calcular a coerência do sinal que consiste em uma análise de quantas vezes se faz o teste e quão replicável ele é para cada ponto em todo o domínio da frequência.

Então, com esses dados obtidos, as frequências naturais são observáveis nos picos como mostrado no sistema de segunda ordem e o modo como o sistema vibra é avaliado através do gráfico de fases, que podem ambos ser comparados com resultados computacionais calculados numericamente, como explicado na seção anterior.

1.2.2 Análise de Estabilidade

Os conceitos de análises de estabilidade dependem da compreensão de conceitos de vibrações apresentados na seção 1.2.1, mas também dependem da compreensão diferentes formas de representar os resultados obtidos experimentalmente. Têm-se então as definições de *Power Spectral Density* (PSD), *Cumulative Power Spectrum* (CPS) e de *Cumulative Amplitude Spectrum* (CAS), que auxiliam na interpretação de amplificação ou atenuação de vibração entre diferentes pontos de uma estrutura e amplitudes de deslocamento que um sinal sísmico, por exemplo, pode causar.

1.2.2.1 Power Spectral Density

Dessa forma, o primeiro passo é compreender o conceito de uma PSD e como um sinal no tempo deve ser tratado para obtê-la.

A PSD, conceitualmente, é simples de se entender pois, de acordo com Rogers et al., consiste em uma estimativa da distribuição de energia com respeito à frequência. Ou seja, é possível medir qualquer sinal no tempo e entender como as energias das acelerações, velocidades e deslocamentos ocorrem em cada frequência, como apresentado por Bueno et al. (2021) sobre a Linha Carnaúba do

Sirius.

Então, é necessário compreender o procedimento para se calcular a PSD e como sua análise pode ser benéfica para um estudo de sinais.

A partir de Rogers et al. (1997), tem-se uma metodologia detalhada de como se realizar os cálculos necessários para obter a PSD, a CPS e a CAS. Primeiramente, deve-se calcular a DFT (Transformada Discreta de Fourier) do sinal conforme mostrado pela Equação 2, com algumas variações para considerar a análise de um sinal medido.

Avaliar a equivalência abaixo do gráfico da PSD com o RMS de um sinal é simples, pois basta elevar ao quadrado a aceleração RMS e dividir pela frequência, como mostrado por Khaksar, Ahmadi e Mohtasebi (2013) e apresentado pela Equação 9.

$$PSD = \frac{a_{RMS}^2}{f} \quad (9)$$

1.2.2.2 Cumulative Power Spectrum

Uma das maneiras de se utilizar o sinal de uma PSD é avaliando seu CPS que consiste na soma da energia de um dado intervalo de frequências e é calculado com base no sinal de uma PSD. De acordo com Nasser et al. (2017), seu cálculo é dado conforme mostrado pela Equação 10.

$$CPS = \sum_{u=v}^k PSD(u) \quad (10)$$

Essa equação consiste na integral do sinal da PSD para se avaliar toda a potência do espectro em questão. Com esse sinal, é possível quantificar as contribuições das componentes espectrais para o nível de aceleração RMS geral pelo sinal de tempo estudado.

1.2.2.3 Cumulative Amplitude Spectrum

Por fim, resta comentar sobre o CAS de um sinal de vibrações. Esse conceito auxilia na avaliação de quanto um sinal no tempo é capaz de deslocar uma dada estrutura através da avaliação de sua PSD e sua CPS. Como tem-se que a CPS é a soma da potência no espectro de um dado intervalo de frequência, a CAS nada mais é do que a avaliação do quanto essa soma de potências desloca a estrutura em questão. Ou seja, ao se integrar o sinal da CPS, da mesma forma que foi feito

com a PSD, se obtém esse efeito prático que possibilita avaliar a estabilidade de uma estrutura para um sinal de entrada específico. A Equação 11 exemplifica o cálculo que deve ser feito com sinal.

$$CAS = \sum_{u=v}^k CPS(u) \quad (11)$$

Um exemplo de estudo utilizando o conceito de CAS pode ser visto no trabalho elaborado por Boryczko (2012), que avalia o acumulado do perfil de uma superfície.

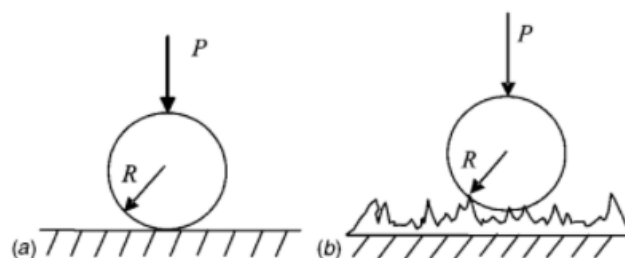
1.3 RIGIDEZES DE CONTATO

Para finalizar a introdução teórica do presente trabalho, resta explicar o tema central da pesquisa que são as rigidezes de contato. Para isso, serão abordadas duas formas de cálculo teórico das rigidezes normais e tangenciais de contato e os conceitos que as envolvem além de duas formas de obtenção desses valores experimentalmente. Assim, serão apontados os efeitos de se considerar as rigidezes dos contatos em uma análise modal e, conseqüentemente, sua importância para a elaboração de modelos realistas.

1.3.1 Cálculos Teóricos

Antes de serem introduzidas os cálculos que avaliam todas essas rigidezes de contato, é fundamental compreender alguns conceitos que as definem, além de entender exatamente o que são em uma estrutura como a do espelho M1 da Linha Mogno, que será apresentada.

Figura 8 - Tipos de contatos Hertzianos: (a) contato suave (b) contato rugoso



Fonte: Shi (2005)

A Figura 8 traz a representação de dois tipos de contato, sendo eles contatos com uma interface suave e o segundo com uma interface rugosa. De acordo com Shi (2005), esses contatos são denominados por contatos Hertzianos cujas rigidezes podem ser calculadas de duas maneiras diferentes, sendo a primeira

como um contato suave que está apresentada pela Equação 12.

Onde R , E^* e P são, respectivamente, o Raio da região de contato, o módulo de elasticidade equivalente entre os dois materiais e a carga de compressão aplicada no contato, resultado na rigidez dada por k_{Hs} .

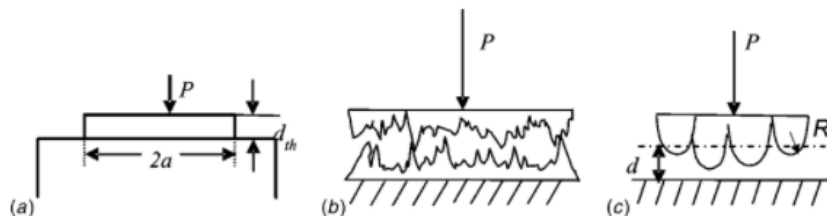
$$k_{Hs} = \frac{3}{2} \left(\frac{16RE^{*2}}{9} \right) P^{\frac{1}{3}} \quad (12)$$

Contudo, como todas as superfícies possuem um grau de rugosidade, é esperado que o contato Hertziano para cargas baixas e com superfícies rugosas, seja de um terço do valor da Equação 12, como explicado por Shi (2005). Portanto, tem-se que seu valor é regido pela Equação 13 e dado por k_{Hr} .

$$k_{Hr} = \frac{k_{Hs}}{3} \quad (13)$$

Porém, os contatos hertzianos não são os únicos que existem entre dois corpos, visto que existem inúmeros casos de contatos entre faces planas, por exemplo, que são os casos existentes na Estrutura M1 da Mogno. Seus cálculos já divergem consideravelmente das equações acima como apresentados pelo próprio Shi (2005), que utiliza análises estatísticas considerando a rugosidade superficial entre as superfícies planas como mostrados pela Figura 9.

Figura 9 - Tipos de contatos entre duas superfícies planas



Fonte: Shi (2005)

Além da rigidez normal entre dois corpos, não se deve esquecer a existência da rigidez tangencial, que consiste na resistência entre dois corpos escorregarem entre si.

Seus cálculos teóricos consideram a relação entre rugosidades superficiais, rigidezes dos materiais e forças de união entre os corpos. A fim de confirmar que a rigidez tangencial entre os contatos depende linearmente da força de união dos corpos e da rugosidade superficial, Medina, Nowell e Dini (2012) apresentam, em seus resultados, que apesar de não ser intuitivo, a rigidez não depende do raio de

aspereza e nem da rigidez dos materiais, visto que o aumento na força de contato aumenta sua área efetiva e, portanto, aumenta sua rigidez com maior grau de relevância que outros parâmetros.

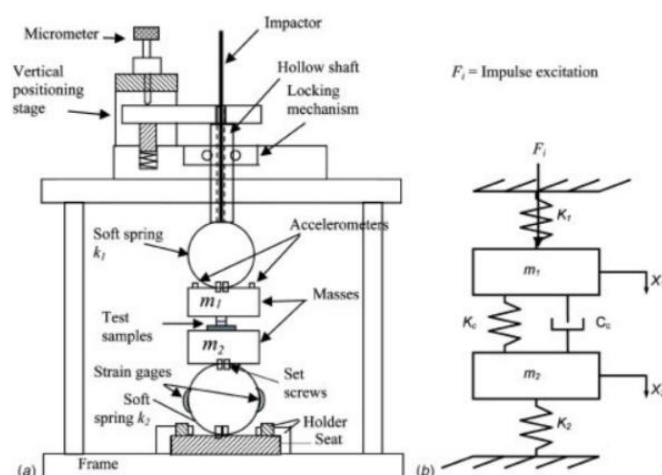
1.3.2 Estimativas Experimentais

Porém, esses cálculos e estimativas em muitos casos são difíceis de serem aplicados, visto que os contatos reais em estruturas podem possuir forças e apertos não igualmente distribuídas, pontos de contatos distintos e com rugosidades diferentes entre si.

Então, apesar de existirem resultados em testes controlados que sejam próximos do comportamento analítico esperado, como apresenta Shi (2005) na Figura 10, esse contato dificilmente é reproduzido em montagens reais.

Tem-se, na Figura 10, uma estrutura que possui duas amostras cujas rigidezes de contato devem ser avaliadas. Para que esse experimento seja realizado, são montadas em cada uma dessas amostras massas conhecidas e molas com rigidezes conhecidas, em que são montados diversos extensômetros e acelerômetros nas massas e molas. Além disso, existe um atuador mecânico que excita o sistema com forças em formas de impulsos para que, com um tratamento nos dados lidos pelos sensores, seja possível obter o valor direto dessa rigidez de contato.

Figura 10 - Arranjo experimental para determinar rigidez de contato normal entre duas superfícies planas



Fonte: Shi (2010)

Logo, um possível caminho para contornar essa dificuldade é através de

experimentos realizados nas estruturas que auxiliem a avaliar tanto a rigidez do contato como o quanto essas rigidezes influenciam a estrutura dinamicamente.

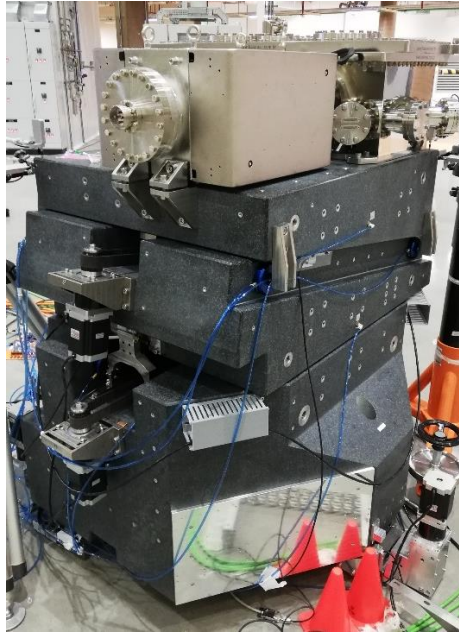
De acordo com o estudo realizado por Zhao et al. (2018), é evidente que conforme se aumenta a rigidez de contato em uma união parafusada, ao se aumentar o seu aperto, há um aumento nas frequências naturais do conjunto, devido ao aumento na rigidez.

Portanto, com testes e simulações modais é possível determinar quais são as rigidezes de contato de uma determinada estrutura ao se comparar suas ressonâncias numéricas e experimentais. Por fim, o próximo capítulo explicará os objetivos do presente trabalho que consiste, basicamente, na avaliação das rigidezes de contato da estrutura do espelho M1 da Linha Mogno com uma metodologia numérico experimental.

2 OBJETIVO

O intuito do estudo foi a realização de experimentos de vibração na estrutura do espelho M1 da linha Mogno, como pode ser vista na Figura 11, para se obter seus modos naturais e medidas de estabilidade.

Figura 11 - Estrutura do espelho M1 da Linha Mogno



Fonte: Próprio autor

O objetivo do trabalho consistiu em realizar medidas da estrutura em etapas de desmontagem, ou seja, uma medida com as bases de granito, câmara e bomba iônica montadas. Uma segunda medida com apenas a bomba iônica e suas fixações desmontadas e uma terceira medida apenas das três bases de granitos. Por fim, o experimento conta com uma medida da bomba iônica suspensa para ser possível adquirir os modos naturais internos dela e, dessa forma, auxiliar na compreensão de sua influência para a estrutura como um todo.

A segunda parte do projeto foi uma otimização, no software Ansys, das rigidezes de contato entre os componentes. Para isso, foi feita em etapas para diminuir o número de parâmetros estudados simultaneamente. Primeiro, foram avaliados apenas as 3 pedras de granito, com 2 regiões de contato entre elas e a região de contato entre o granito inferior e o chão. Dessa forma, como as rigidezes de contato são divididas em normal e tangencial, foram otimizados apenas 6 parâmetros de entrada. Para os parâmetros de saída, a comparação foi entre as

frequências dos modos obtidos experimentalmente com os obtidos computacionalmente e, a fim de auxiliar nessa avaliação, também foram analisadas as direções de movimentação dos modos, as respostas em frequência dos testes e a densidade espectral acumulada para garantir que todos os modos foram considerados.

Esse processo se repetiu para cada uma das montagens feitas no teste em que, a cada nova etapa, as rigidezes encontradas na anterior se tornaram fixas, para que o número de parâmetros de entrada se mantivesse o menor possível sempre.

Por fim, o objetivo final do estudo foi identificar os pontos de menores rigidezes com base nas medidas experimentais feitas e em estudos prévios do Grupo de Projetos de Linhas de Luz do Laboratório Nacional de Luz Síncrotron e propor sugestões de melhorias para projetos futuros.

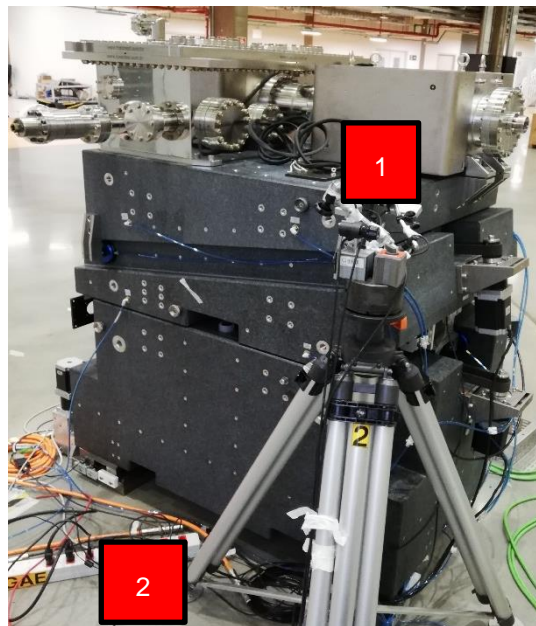
3 MATERIAIS E MÉTODOS

O método está dividido em três etapas separadas e complementares, como já explicado no objetivo do trabalho. Portanto, primeiro será explicada a metodologia da parte experimental, a metodologia da etapa numérica e, por fim, a metodologia da proposta de aumento de rigidez das fixações da bomba iônica.

3.1 ETAPA EXPERIMENTAL

Essa parte do estudo consistiu em testes em um processo de desmontagem do sistema. Primeiro, foi feito um teste de estabilidade da estrutura do granito com o uso de dois sismógrafos da marca Wilcoxon modelo 731A nas posições 1 e 2 indicadas na Figura 12.

Figura 12 - Setup do teste de estabilidade na estrutura completa



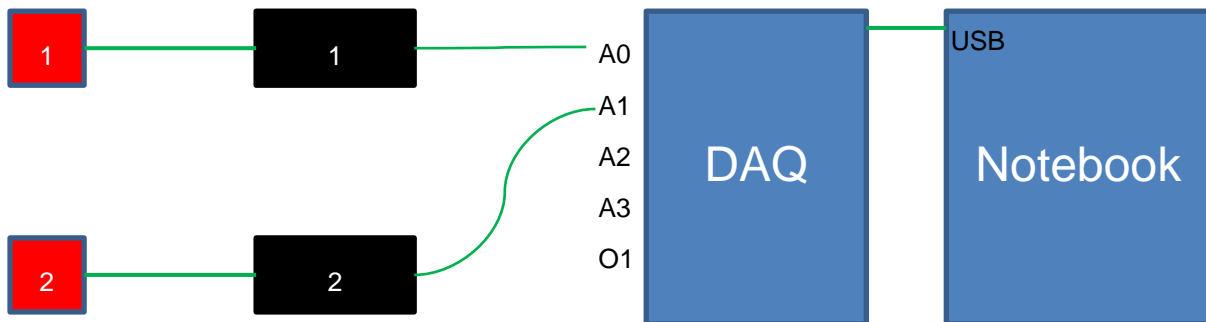
Fonte: Próprio Autor

Dessa forma, foram medidas as acelerações em m/s^2 no tempo do chão e do granito simultaneamente, que são tratados para se avaliar as PSD's e então, os RMS's acumulados que auxiliam a compreender qual é o deslocamento acumulado causado pelo sinal medido no tempo.

Para esse teste, foram utilizadas eletrônicas próprias ao sismógrafo para fornecer a tensão necessária, uma DAQ (*Data Acquisition System*) da National Instruments e um Notebook com o software Signal Express, que adquire os dados

obtidos pelos sismógrafos e os exporta como arquivo de texto. A Figura 13 representa a configuração utilizada.

Figura 13 - Esquema do setup utilizado no teste de estabilidade



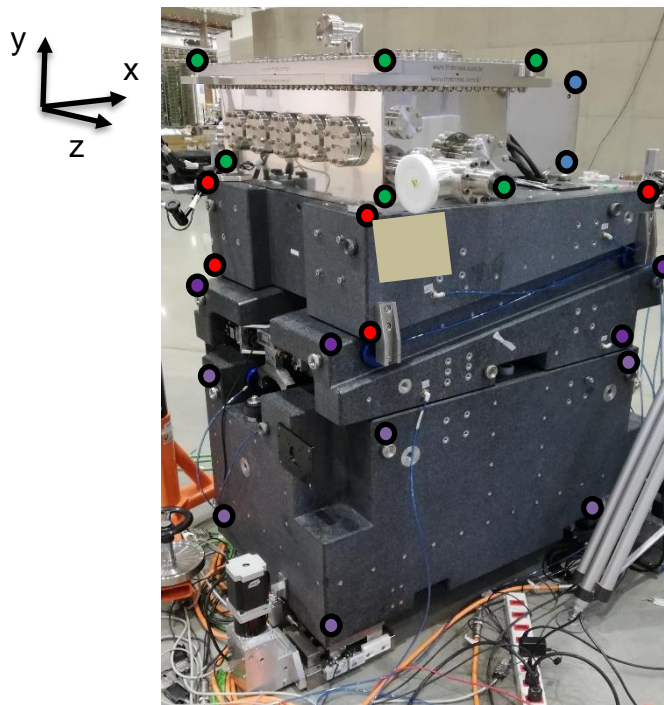
Fonte: Próprio Autor

A seguir, foi realizado um teste modal na estrutura completa do espelho M1 da Mogno para que fosse possível avaliar as FRF's em diversos pontos da estrutura. Para que isso seja feito, foi utilizado um acelerômetro tri-axial, capaz de realizar leituras das acelerações em 3 eixos, e um martelo de impacto para dar o impulso de entrada. Dessa forma, foi possível avaliar 3 funções de transferência em cada ponto proposto, que estão apresentados na Figura 14.

O acelerômetro tri-axial da marca Kistler e modelo 8762A5 foi posicionado em cada um dos pontos coloridos por vez, enquanto era aquisitado o impulso de força feito na direção negativa do eixo Z, ou seja, normal à face do granito que está destacada em cinza. Em cada ponto que o acelerômetro foi posicionado, foram realizados 4 impulsos com o martelo de impacto da marca Kistler 0862A5 para que fosse possível adquirir a coerência do sinal, cujo objetivo era estar acima de 80% de coerência em todos os pontos de medição.

Vale destacar que foi considerada uma região para o impacto por causa das imperfeições da medida realizada pela mão humana. Outro ponto de desataque é com relação à aplicação da força na direção Z, que não deve ser considerada como pura nessa direção visto que a batida não é perfeitamente normal à superfície.

Figura 14 - Setup do teste modal

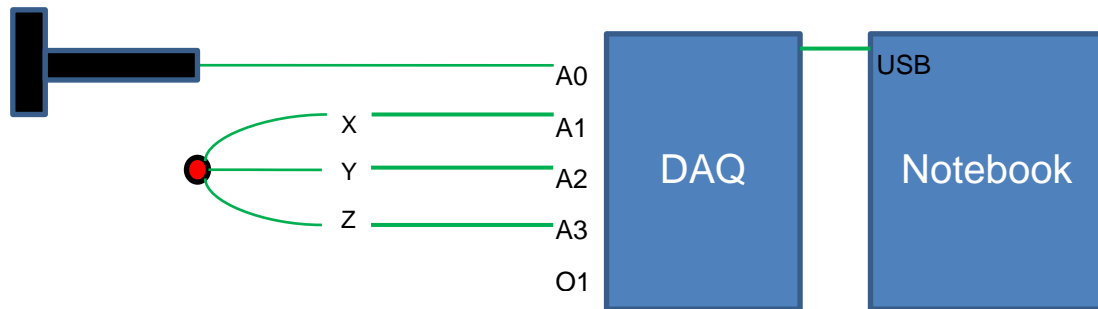


Fonte: Próprio Autor

Portanto, ao se obter as respostas das acelerações por força em cada um dos pontos, é possível avaliar os movimentos existentes em cada uma das 3 direções principais, normalizá-los com relação à sua movimentação máxima e avaliar qual é o modo de vibrar de uma dada frequência.

Logo, para a realização do teste, foi utilizado um martelo de impacto que corrige as diferenças das forças exercidas em cada medição, um acelerômetro triaxial capaz de ler as acelerações desejadas nos 3 eixos, uma DAQ da National para captar os dados e um notebook com o software Signal Express que tratou os dados obtidos, calculando as FRF's, fases e coerências dos pontos e os exportou, junto com os sinais no tempo, em arquivos de texto. A Figura 15 mostra o esquemático utilizado do setup do teste.

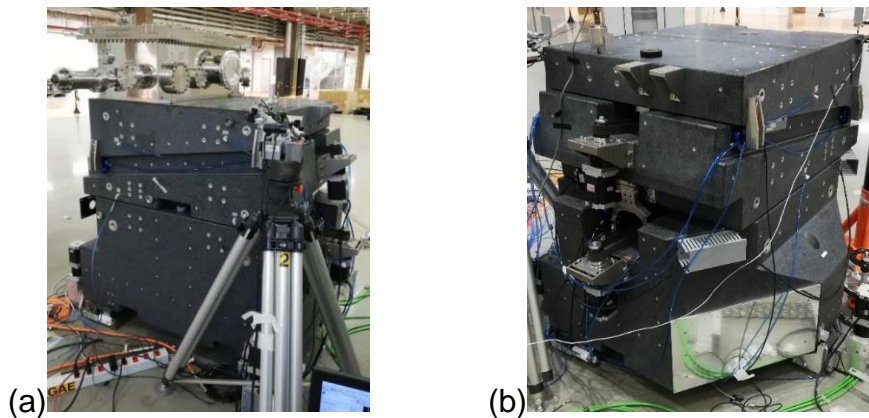
Figura 15 - Setup esquemático do teste modal



Fonte: Próprio Autor

Dessa forma, o procedimento experimental se repetiu do mesmo modo para as outras duas etapas de desmontagem, sendo uma delas sem a bomba iônica e suas fixações e a outra sem a câmara também, que estão mostradas, respectivamente, Figura 16 (a) e (b).

Figura 16 - Etapas de desmontagem dos testes experimentais



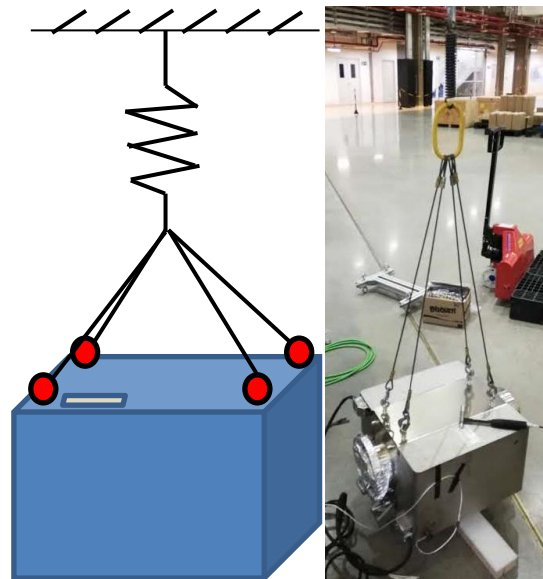
Fonte: Próprio Autor

Por fim, um último teste foi realizado com a intenção de compreender melhor as frequências naturais internas da bomba iônica, dado que é o único componente em que não se possui o modelo 3D em CAD e não se conhece exatamente o seu interior. Com isso em mente, ao estudar seus modos internos se torna possível avaliar quais as suas influências na estrutura estudada.

Desse modo, um setup experimental foi pensado com a finalidade de isolar a peça para que nenhum modo de vibrar, a não ser seus internos, influenciassem nos resultados. Logo, o setup consistiu em suspender a bomba de forma que não encostasse em nada e, para isolá-la da ponte rolante utilizada, a fixação contou com uma mola de rigidez conhecida em sua interface para que seu modo fosse

facilmente reconhecido e relevado ao se observar as FRF's obtidas. A Figura 17 mostra o setup idealizado e sua concretização.

Figura 17 - Setup do teste de avaliação dos modos internos da bomba iônica



Fonte: Próprio Autor

Para a realização do teste, o acelerômetro 3D foi posicionado em 12 posições diferentes a fim de mapear os possíveis modos internos da estrutura e, com o martelo de impacto, uma força de entrada foi aplicada na forma de impulso na região cinza mostrada na Figura 17, em que se buscou acertar o centro dessa região em cada uma das medições feitas.

Com a realização desse último teste apresentado, a parte experimental do estudo foi finalizada e se avançou para a etapa numérica.

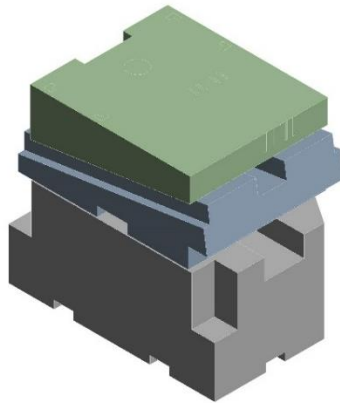
3.2 ETAPA NUMÉRICA

A fase do estudo numérico buscou otimizar as rigidezes de contato inseridas nos modelos do Ansys para encontrar as frequências corretas obtidas experimentalmente.

Essa parte foi feita inversamente com relação ao método experimental. Buscou-se uma otimização em ordem de montagem, a fim de facilitar o estudo com um número reduzido de parâmetros visto que, a cada nova etapa, a rigidez obtida anteriormente não deve mudar.

Então, primeiro foi elaborado um modelo para ser estudado que contivesse apenas as 3 bases de granitos e seus contatos entre si e com o solo, conforme observado pela Figura 18. Os materiais utilizados e suas propriedades estão apresentados na Tabela 1.

Figura 18 - Modelo simplificado dos granitos para simulação no Ansys



Fonte: Próprio Autor

Tabela 1 - Materiais utilizados e suas propriedades

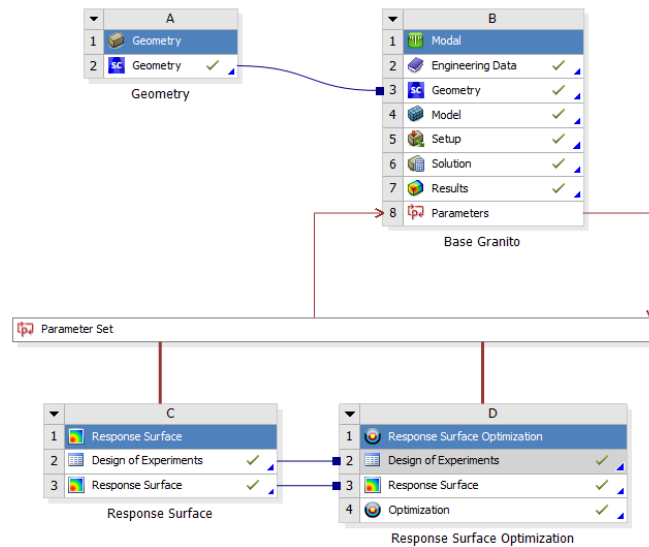
Propriedades Materiais	Módulo de Young [GPa]	Densidade [kg/m ³]
Granito Tai Shan Black Nº 2	109	3040
Aço inoxidável AISI 316	195	7970
Bomba Iônica	200	19916

Fonte: Próprio Autor

Os dados da bomba iônica apresentadas na tabela são apresentadas conforme utilizadas no modelo do Ansys, visto que não se sabe nada do seu interior, além de sua massa total de, aproximadamente, 120 kg. Então foi avaliado o volume total do componente utilizado e a massa foi dividida por esse valor, que resulta em $19916 \frac{kg}{m^3}$.

Com esse modelo, criou-se uma metodologia, mostrada na Figura 19, de simulação que parametriza as rigidezes de contato como inputs e as frequências naturais com outputs.

Figura 19 - Esquemático da metodologia de simulação utilizada



Fonte: Próprio Autor

Além disso, a metodologia conta com a ferramenta de otimização do próprio Ansys que simula diversos pontos para criar um experimento e é capaz de criar superfícies correlacionando os parâmetros de entrada e de saída que são utilizadas para rodar a otimização. Ou seja, o Ansys realiza um número determinado de simulações, que é proporcional ao número de parâmetros de entradas utilizadas, e com os resultados dessas simulações, é realizada uma correlação entre os parâmetros de entrada (rigidezes de contato) e parâmetros de saída (frequências de ressonância experimentais).

A partir dessa correlação, são criadas superfícies, cujas curvas passam por todos esses pontos que relacionam duas entradas com uma saída (as rigidezes de contato normal e tangencial do granito com o solo com o primeiro modo de vibrar, por exemplo). Então, ao invés de se avaliar as melhores rigidezes de contato realizando incontáveis simulações, o Ansys busca nessas superfícies criadas, representadas pela Figura 20, quais são os melhores parâmetros.

Portanto, a otimização se torna mais rápida, dado que não é necessário simular todos os pontos até definir algum que seja de interesse, pois basta buscar na superfície que é capaz de avaliar 15000 pontos no tempo de uma simulação.

É importante ressaltar que quanto mais parâmetros de entrada e saída são utilizados, mais complexa e difícil é a análise, reforçando o conceito de se calcular

as rigidezes em ordem de montagem limitando o número de parâmetros.

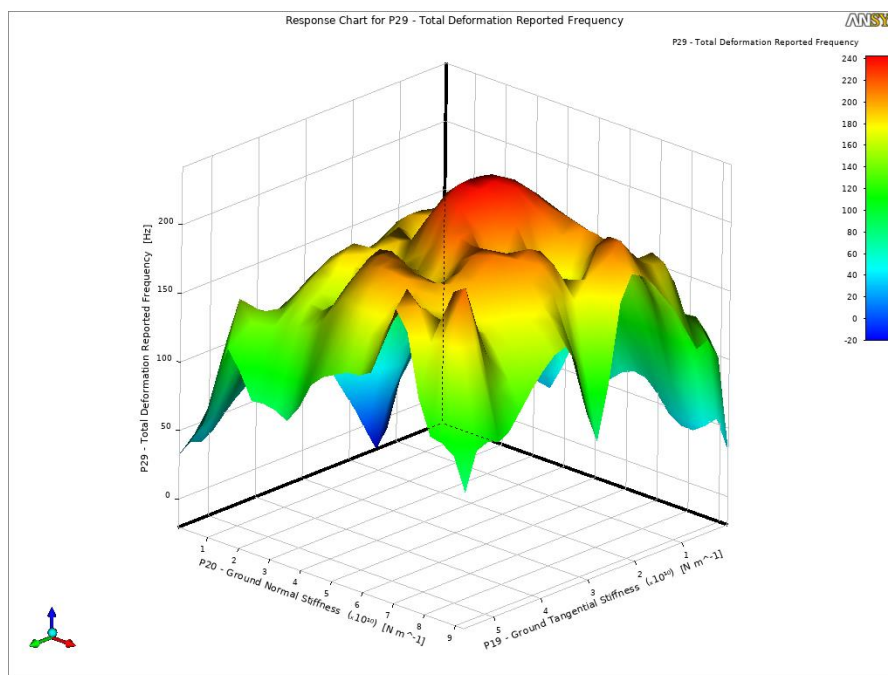
A Tabela 2 mostra os parâmetros considerados na otimização enquanto a Figura 20 exemplifica uma das superfícies criadas na qual o software se baseia para a otimização. Esses valores são referentes aos dados tabelados utilizados pelo Grupo de Projetos de Linhas de Luz do LNLS, em que se utilizou como valor central o que é comumente utilizado pela equipe e se buscou avaliar uma faixa de valores coerentes para as possíveis rigidezes de contato.

Tabela 2 - Máximo e mínimo de rigidezes consideradas

Contato	Rigidez Normal [N/m]	Rigidez Tangencial [N/m]
Granito Superior/Intermediário	6,3 E8 – 9,27 E10	2,7 E10 – 5,63 E8
Granito Intermediário/Inferior	6,3 E8 – 9,27 E10	2,7 E10 – 5,63 E8
Granito inferior e solo	6,3 E8 – 9,27 E10	2,7 E10 – 5,63 E8

Fonte: Próprio Autor

Figura 20 - Superfície de resposta da rigidez com o chão e a primeira frequência natural



Fonte: Próprio Autor

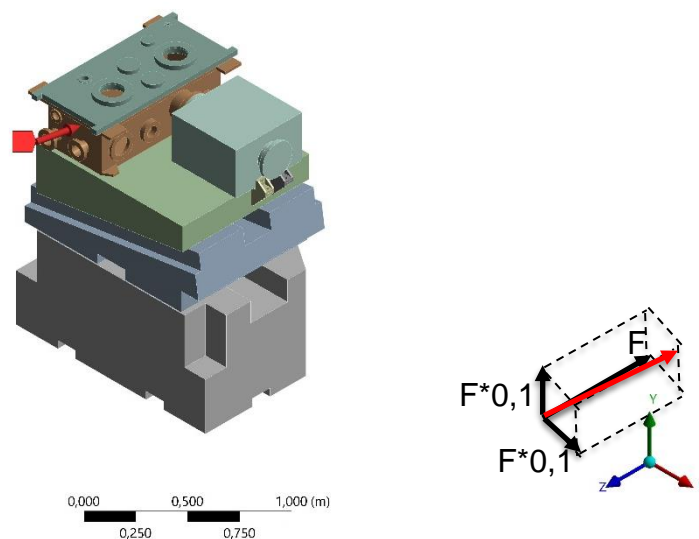
Dessa maneira, com as rigidezes dos granitos otimizadas, é necessário validar se os modos de vibrar também se mantêm coerentes com o que foi

observado nos testes. Para isso, é realizada uma simulação harmônica no Ansys que busca reproduzir a força de excitação do experimento em que se pode obter os modos de vibrar, considerando a superposição entre eles e a FRF simulada.

Um aspecto importante da simulação harmônica é a força de excitação que está sendo feita no sistema. No experimento, a força de entrada é um impulso causado pelo martelo de impacto utilizado, enquanto o Ansys considera uma força harmônica e oscilante no sistema.

Outro ponto importante a se considerar é a questão da direção da força aplicada, visto que o impacto realizado pelo martelo não é puramente unidirecional e normal à face do granito escolhida e, como não é possível diferenciar essa direção foi adotado que a força aplicada no Ansys seria unitária na direção normal ao granito com contribuições de 10% dessa força nas outras direções do sistema de coordenadas, como mostra a Figura 21.

Figura 21 - Setup da simulação harmônica com componentes de força nas 3 direções



Fonte: Próprio Autor

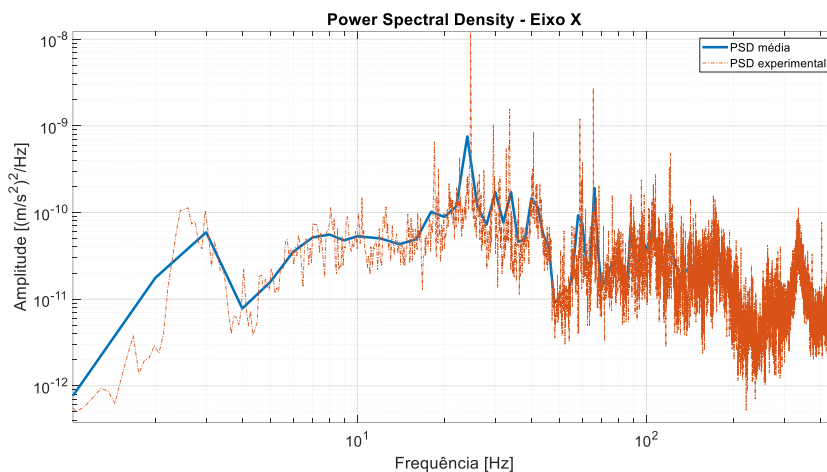
Por fim, a simulação randômica é feita para ser mais um critério de avaliação de que as rigidezes escolhidas estão coerentes. Nessa simulação é inserida a PSD experimental do sismógrafo no solo na base do modelo e é retirada a PSD numérica na quina da pedra superior mais próxima à posição do sismógrafo colocado no teste. Ao se obter esse valor numérico, é feita a integração duas vezes do sinal para se obter o acumulado RMS a fim de o comparar com o acumulado obtido

experimentalmente.

Para que o sinal inserido na base do granito inferior não tivesse mais pontos do que o Ansys é capaz de processar, foi elaborada uma rotina em Matlab que, a partir do sinal experimental e de um espaçamento de frequências definidas pelo usuário, calcula a média e simplifica o sinal. Essa média é feita ao se definir qual o intervalo de frequências que quer ser utilizado em cada década do gráfico logarítmico, ou seja, ao se definir um intervalo de 1 em 1 Hz, é calculada a média em torno desse ponto. Para exemplificar melhor, será utilizado o caso do ponto em 15 Hz para um intervalo de 1 Hz, em que é calculada a média de todos os pontos em torno de 15 Hz com mais ou menos 0,5 Hz.

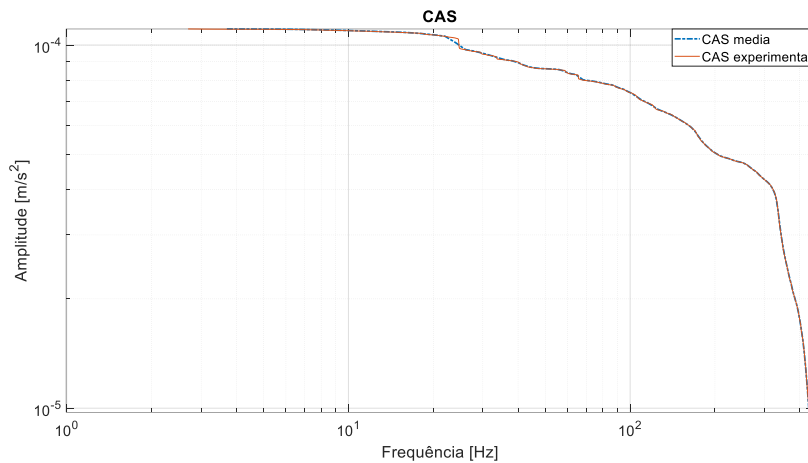
A Figura 22 mostra a diferença do sinal experimental para o sinal simplificado e a Figura 23 evidencia que o acumulado RMS dos dois sinais é o mesmo. Portanto, foi possível utilizar um sinal de 124 pontos ao invés de um com 5899.

Figura 22 - Sinal da PSD obtida experimentalmente pelo sismógrafo no solo e sua simplificação



Fonte: Próprio Autor

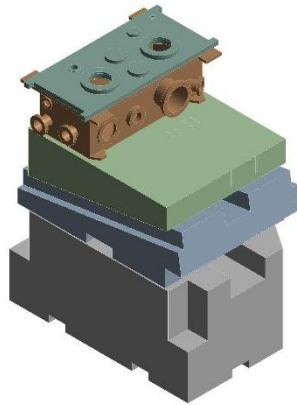
Figura 23 - Comparação da CAS entre o sinal experimental e o simplificado



Fonte: Próprio Autor

Ao se finalizar essa etapa para os granitos, deve-se acrescentar a câmara de vácuo no modelo conforme a Figura 24 e travar os parâmetros antes utilizados de acordo com o resultado obtido. Os novos parâmetros devem ser inseridos, que são os contatos entre a câmara e o granito e entre a câmara e sua tampa. Ao se fazer isso, o mesmo procedimento de otimização deve ser realizado até que os resultados satisfatórios sejam atingidos.

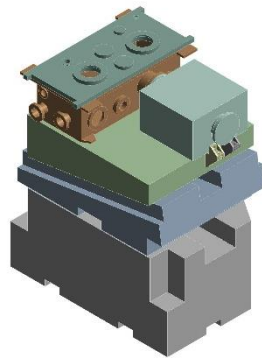
Figura 24 - Modelo da base de granitos e câmara de vácuo



Fonte: Próprio Autor

Por fim, o último modelo a simular está representado na Figura 25, em que é considerada a montagem completa do granito com câmara de vácuo, bomba iônica e suas fixações e, assim, é possível identificar os pontos fracos das fixações e contatos entre componentes, caso haja, e sugerir propostas de melhoria.

Figura 25 - Modelo da estrutura completa



Fonte: Próprio Autor

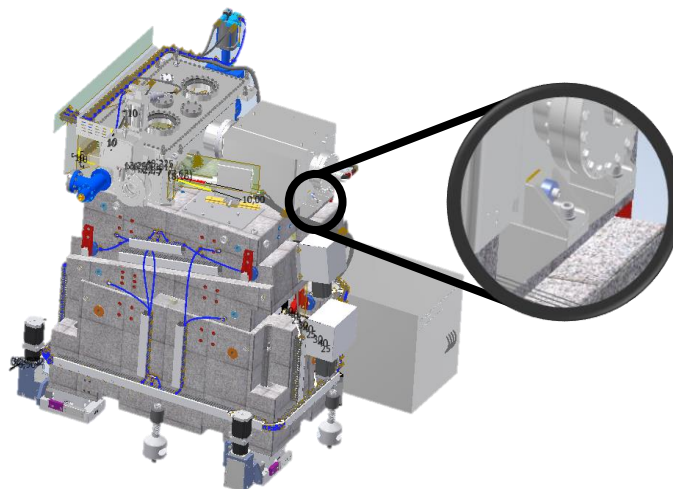
3.3 RIGIDEZ DAS FIXAÇÕES

Como foi avaliado em testes experimentais de estruturas de linha de luz, um dos maiores problemas encontrados foi com relação à rigidez encontrada nas fixações da bomba iônica. Portanto, a primeira proposta de aumento da rigidez do sistema é na geometria das fixações para buscar um aumento nas frequências naturais da estrutura.

O foco ocorre em dois pontos da estrutura. A primeira é o par de fixações indicados na Figura 26, em que o objetivo é aumentar a rigidez na direção Y.

3.3.1 Fixações da Bomba Iônica no Granito

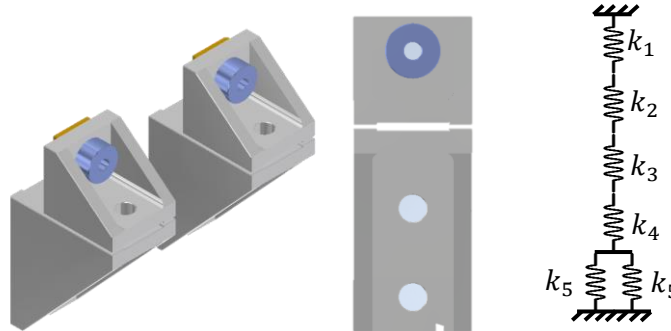
Figura 26 - Imagem da estrutura de espelho em CAD e ampliação nas fixações que terão propostas de melhoria



Fonte: Próprio Autor

Então, como o objetivo do estudo é aumentar a rigidez do conjunto das fixações, pode-se simplificá-la para uma associação de molas exemplificada na Figura 27. Considerou-se k_1 como a rigidez do parafuso que prende a fixação superior à bomba iônica, k_2 como a rigidez da fixação superior, k_3 como a rigidez axial do parafuso que prende uma fixação na outra, k_4 a fixação inferior e k_5 a rigidez de cada parafuso que prende a fixação inferior no granito.

Figura 27 - Fixação da bomba no granito e simplificação em associação de molas



Fonte: Próprio autor

A rigidez e número de parafusos que prendem as fixações na bomba e no granito não serão alterados por questões geométricas da montagem, restando alterações nas fixações e parafuso entre elas para aumentar a rigidez do conjunto.

Para calcular a rigidez axial de um parafuso, a metodologia é simples e consolidada, visto que é feita com o módulo de Young do material, sua área de seção transversal e seu comprimento. Portanto, da Equação 14, tem-se como se calcula a rigidez da parcela do pescoço do parafuso, da sua rosca e a associação em série entre as duas.

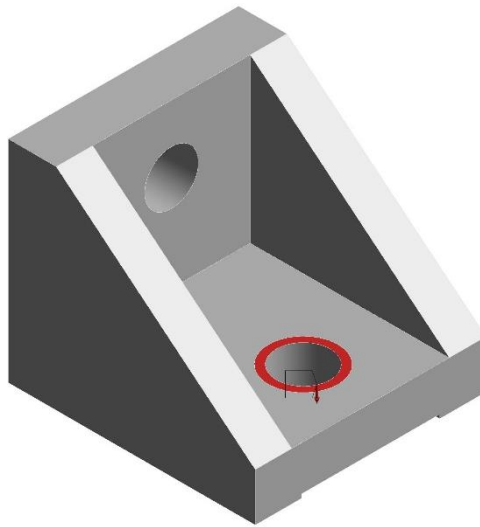
Tem-se que k_{3p} e k_{3r} são, respectivamente, a rigidez axial do pescoço do parafuso e da rosca do parafuso, E é o módulo de Young do parafuso, A_p , L_p e A_r , L_r são as áreas de seção transversal e comprimento das regiões do pescoço e da rosca em que os diâmetros dessas áreas são dados por D_p e D_r .

$$k_3 = \frac{k_{3p} * k_{3r}}{k_{3p} + k_{3r}} = \frac{\frac{E * A_p}{L_p} * \frac{E * A_r}{L_r}}{\frac{E * A_p}{L_p} + \frac{E * A_r}{L_r}} = \frac{E \left(\frac{A_p}{L_p} * \frac{A_r}{L_r} \right)}{\frac{A_p}{L_p} + \frac{A_r}{L_r}} = \frac{E \left(\frac{\pi \frac{D_p^2}{4}}{L_p} * \frac{\pi \frac{D_r^2}{4}}{L_r} \right)}{\frac{\pi \frac{D_p^2}{4}}{L_p} + \frac{\pi \frac{D_r^2}{4}}{L_r}} \quad (14)$$

Portanto, como os dados do projeto são conhecidos, sabe-se que a rigidez axial equivalente do parafuso de fixação é de $k_3 = 4 * 10^8 \frac{N}{m}$.

Para as rigidezes referentes às fixações, a metodologia estabelecida consiste em uma simulação numérica com o auxílio do Ansys em que é aplicada uma força e, dado um deslocamento, obtém-se a rigidez de cada uma delas. A Figura 28 mostra o setup do Ansys que foi utilizado para a fixação superior e a Equação 15 mostra qual o cálculo realizado para a obtenção da rigidez equivalente em que a força aplicada foi de 1 N normal à face e o deslocamento de $6,3157 * 10^{-9}m$.

Figura 28 - Simulação de rigidez da fixação superior da bomba iônica



Fonte: Próprio Autor

Logo, tem-se que

$$k_2 = \frac{F}{d} = \frac{1}{6,1701 * 10^{-9}} = 6,3157 * 10^9 \frac{N}{m} \quad (15)$$

E, analogamente, a rigidez obtida para a fixação inferior é de,

$$k_4 = \frac{F}{d} = \frac{1}{3,9678 * 10^{-9}} = 3,9678 * 10^9 \frac{N}{m} \quad (16)$$

Por fim, é possível obter a rigidez equivalente considerando k_1, k_2, k_3 a partir da Equação 17.

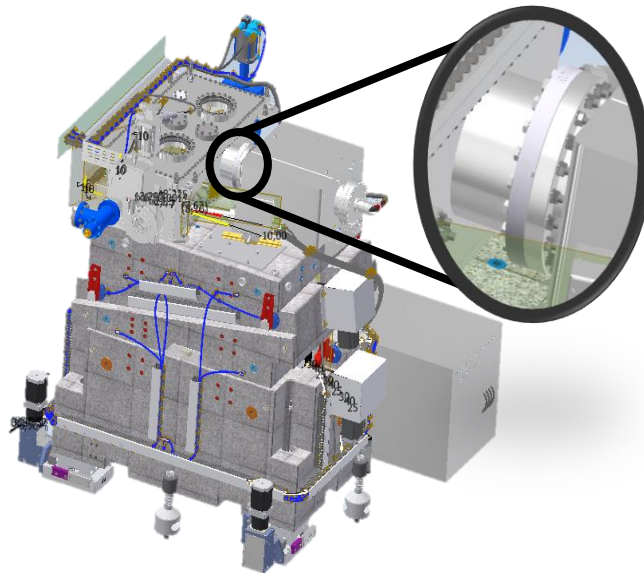
$$\frac{1}{k_{eq}} = \frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_3} + \frac{1}{k_4} \Rightarrow k_{eq} = 3,4360 * 10^8 \frac{N}{m} \quad (17)$$

Portanto, essa rigidez é a fixação que deverá ser melhorada dependendo dos resultados das frequências naturais e de seus modos.

3.3.2 Fixação da Bomba Iônica na Câmara

A segunda proposta de aumento de rigidez é da conexão entre a bomba e a câmara, conforme indicado pela Figura 29.

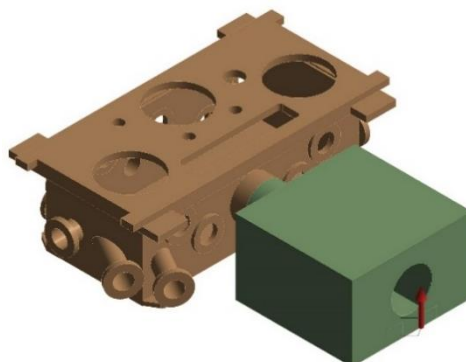
Figura 29 – Imagem da estrutura de espelho em CAD e ampliação nos flanges de conexão entre bomba e câmara



Fonte: Próprio Autor

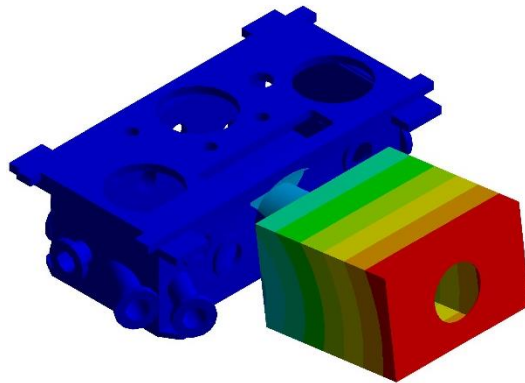
Para esse estudo será utilizada a mesma metodologia utilizada para calcular a rigidez das fixações explicadas acima. Portanto, foi aplicada uma força de 1N na direção Y conforme mostrado na Figura 30 e avaliado o seu resultado de deslocamento como exemplificado na Figura 31 e, com a Equação 15, obtém-se a rigidez nessa direção de $3,4104 * 10^6 \frac{N}{m}$, para um deslocamento de $2,9322 * 10^{-2} mm$.

Figura 30 - Setup de simulação para avaliação rigidez na direção Y



Fonte: Próprio Autor

Figura 31 - Deslocamento simulado para cálculo de rigidez da conexão câmara e bomba



Fonte: Próprio Autor

Por fim, com os resultados experimentais e da simulação de otimização de rigidez de contatos será possível averiguar a necessidade de se aumentar a rigidez desses componentes ao se avaliar possíveis desacoplamentos da câmara de vácuo com relação ao granito, visto que o desacoplamento da bomba iônica com relação ao granito e câmara não é problemático para o feixe de luz.

4 RESULTADOS

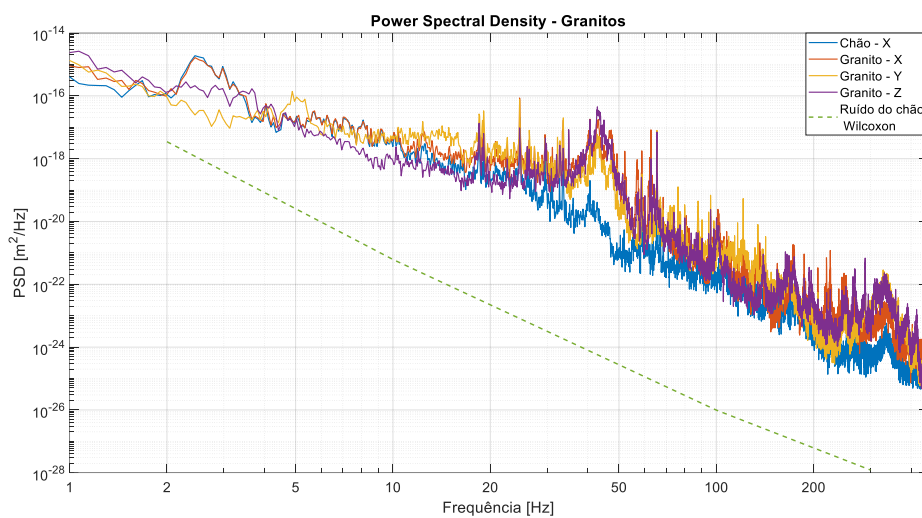
Os resultados obtidos também estão divididos em etapas experimental e numérica, seguidos de uma comparação que avalia o erro obtido após a otimização das rigidezes de contato. Além do erro ao se comparar as frequências naturais da estrutura, foi elaborado um gráfico comparando as PSD's, CAS's e FRF's de cada uma das etapas de desmontagem experimental com seu respectivo estudo numérico.

Por fim, serão apresentados os resultados das rigidezes das fixações com as propostas e análises sendo feitas no capítulo de discussões desse trabalho.

4.1 ETAPA EXPERIMENTAL

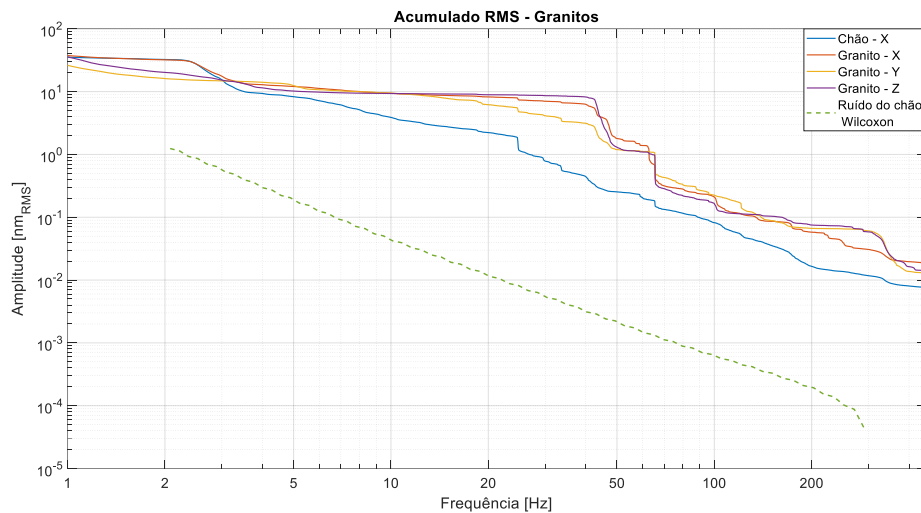
Primeiramente, nas Figuras 32 e 33 estão apresentados, respectivamente, o sinal no tempo, a PSD e a CAS das medidas realizadas apenas nas bases de granito.

Figura 32 - PSD do deslocamento da medida de estabilidade dos granitos



Fonte: Próprio Autor

Figura 33 - Acumulado RMS do deslocamento da medida de estabilidade dos granitos

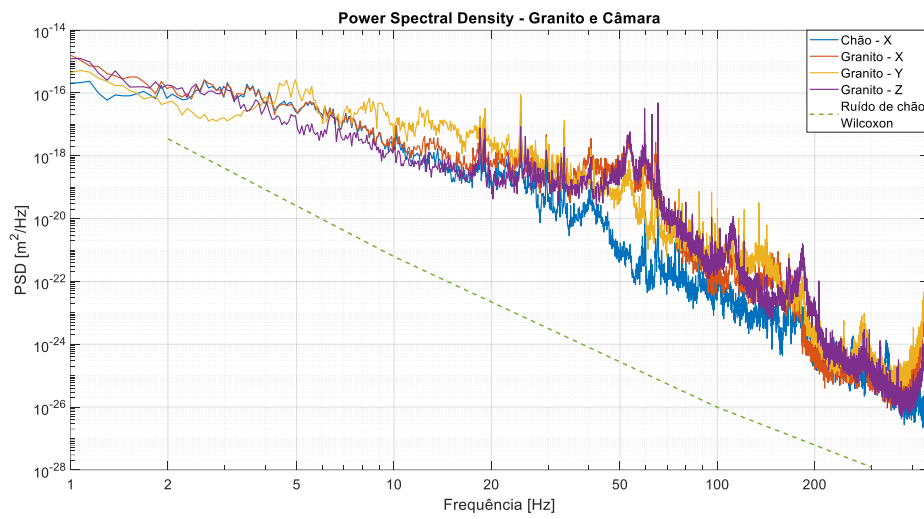


Fonte: Próprio Autor

Como a CAS representa a amplitude RMS que o sinal medido causa na estrutura, é interpretada como uma medida de estabilidade, em que é possível avaliar o quanto do ponto medido está se movimentando dada a excitação sísmica ambiental. Dessa forma, como o acumulado é avaliado da direita para a esquerda, ou seja, da maior para a menor frequência, vê-se em 2 Hz o total do deslocamento que o ponto medido sofre, que pode ser avaliado como a estabilidade desse ponto medido. Deve-se avaliar a medida em 2 Hz por se tratar da resolução do sismógrafo da marca Wilcoxon, que é capaz de realizar leituras entre 2 e 450 Hz.

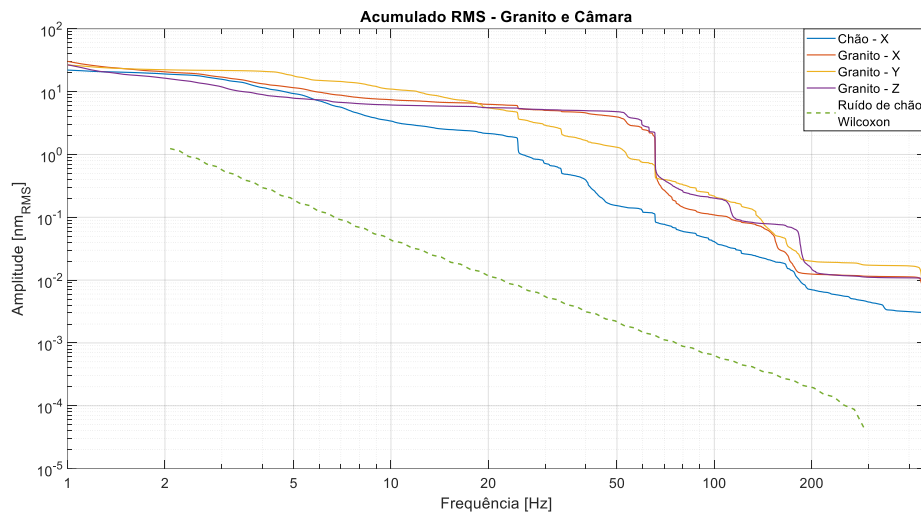
A seguir, tem-se nas Figuras 34 e 35 apresentados também o sinal no tempo, PSD e CAS, respectivamente, das medidas das bases de granitos com a câmara de vácuo montada.

Figura 34 - PSD do deslocamento da medida de estabilidade dos granitos com a câmara



Fonte: Próprio Autor

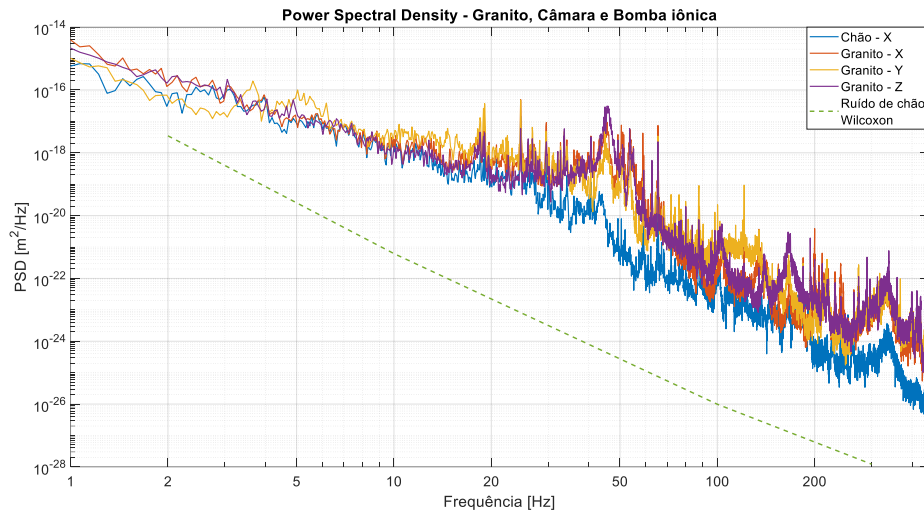
Figura 35 - Acumulado RMS do deslocamento da medida de estabilidade dos granitos com a câmara



Fonte: Próprio Autor

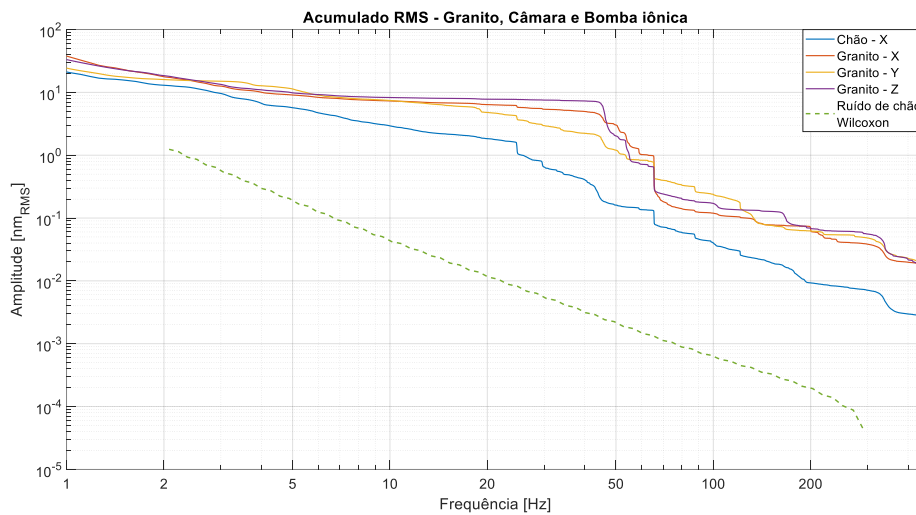
Finalizando as medidas de estabilidade, tem-se os mesmos gráficos de tempo, PSD e CAS nas bases de granitos com câmara de vácuo e bomba iônicas montadas.

Figura 36 – PSD do deslocamento da medida de estabilidade dos granitos com a câmara e bomba iônica



Fonte: Próprio Autor

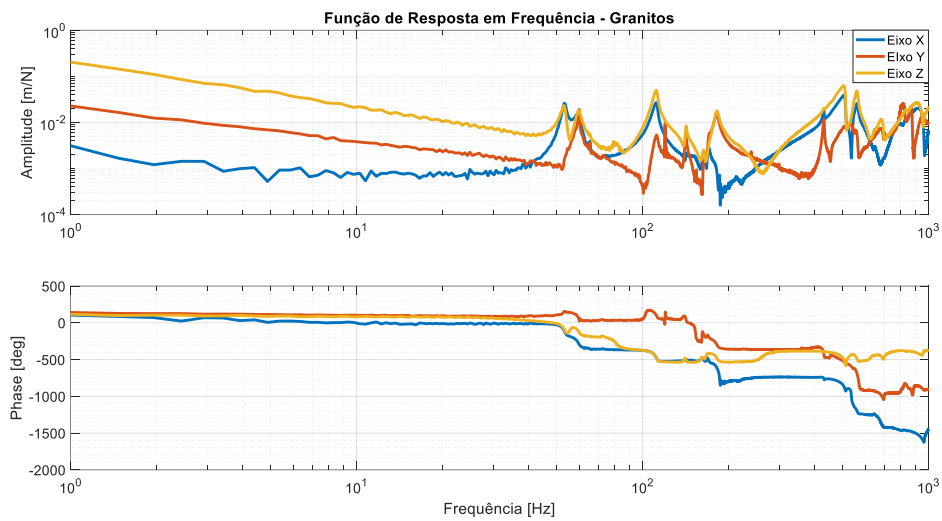
Figura 37 – Acumulado RMS do deslocamento da medida de estabilidade dos granitos com a câmara e bomba iônica



Fonte: Próprio Autor

A seguir, são apresentados os resultados das medidas modais. A Figura 38 aponta a FRF nas 3 direções em um dos pontos medidos.

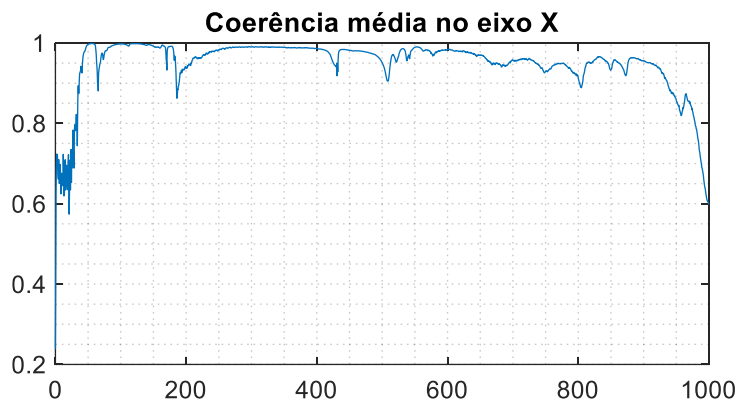
Figura 38 – Função de resposta em frequência em um dos pontos medidos



Fonte: Próprio Autor

Então, para avaliar se as medidas realizadas estão boas e representativas, foi feita uma análise de coerência do sinal em que se buscou estar acima de 0,8 em todas as direções.

Figura 39 – Coerência média considerando todos os pontos medidos no teste



Fonte: Próprio Autor

E, com as análises da FRF de todos os pontos medidos foi possível obter as frequências naturais da estrutura.

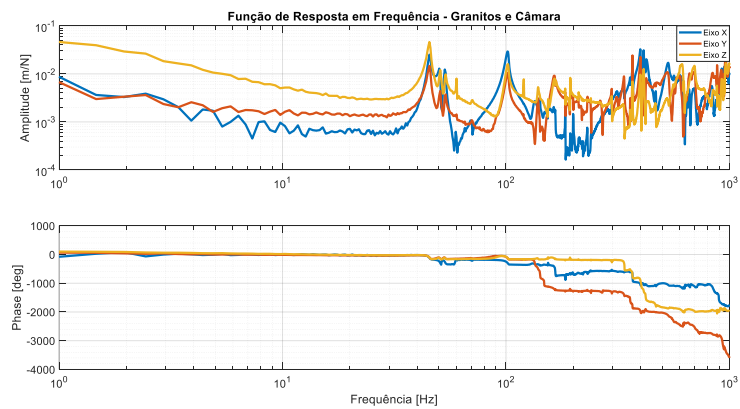
Tabela 3 – Modos naturais obtidos no primeiro teste

Modos	Frequências naturais [Hz]
1	53
2	60
3	110
4	142
5	162
6	180
7	429
8	506
9	540
10	562
11	650
12	685
13	813
14	873
15	916

Fonte: Próprio Autor

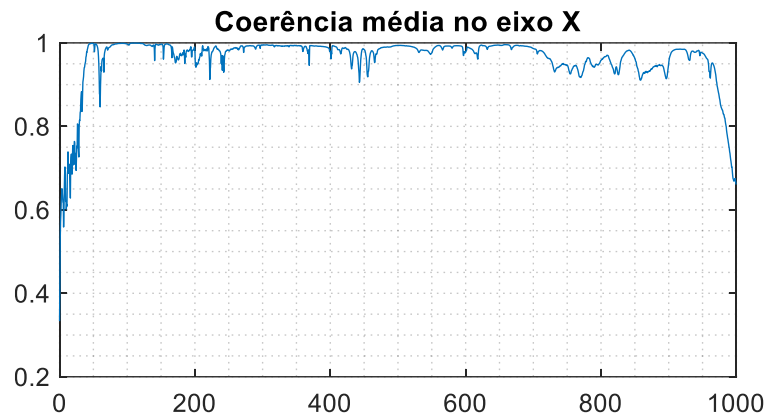
O processo das bases de granito foi reproduzido para o caso com a câmara de vácuo e estão apresentados nas Figuras 40 e 41 e na Tabela 4.

Figura 40 – Função de resposta em frequência em um dos pontos medidos



Fonte: Próprio Autor

Figura 41 – Coerência média considerando todos os pontos medidos no teste



Fonte: Próprio Autor

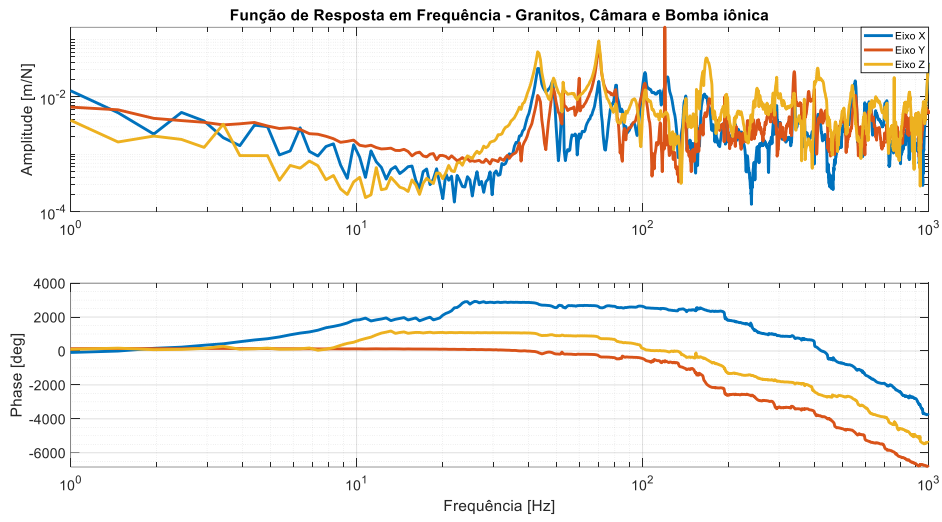
Tabela 4 - Modos naturais obtidos no segundo teste

Modos	Frequências naturais [Hz]
1	44,95
2	45,03
3	51
4	53
5	70
6	102
7	132
8	139
9	154
10	163
11	184
12	194
13	200
14	211
15	219

Fonte: Próprio Autor

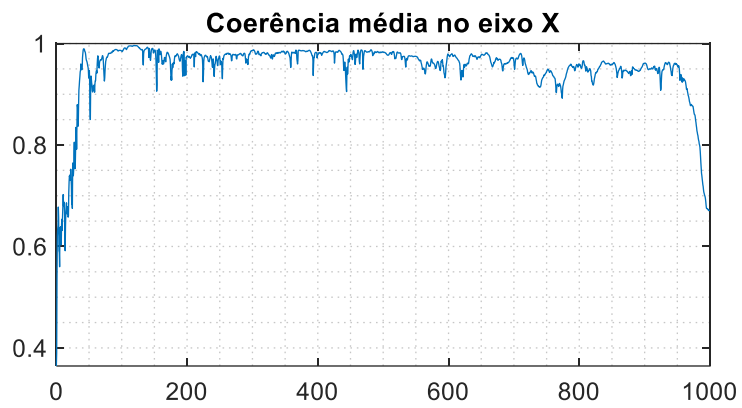
Abaixo, tem-se os mesmos resultados considerando a montagem completa, com câmara e bomba iônica.

Figura 42 – Função de resposta em frequência em um dos pontos medidos



Fonte: Próprio Autor

Figura 43 – Coerência média considerando todos os pontos medidos no teste



Fonte: Próprio Autor

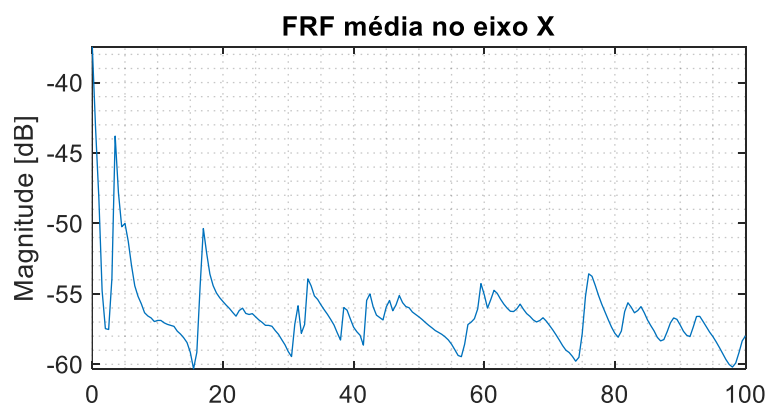
Tabela 5 - Modos naturais obtidos no terceiro teste

Modos	Frequências naturais [Hz]
1	42,97
2	43,09
3	47
4	53
5	58
6	63
7	70
8	81
9	100
10	123
11	127
12	132
13	141
14	154
15	160

Fonte: Próprio Autor

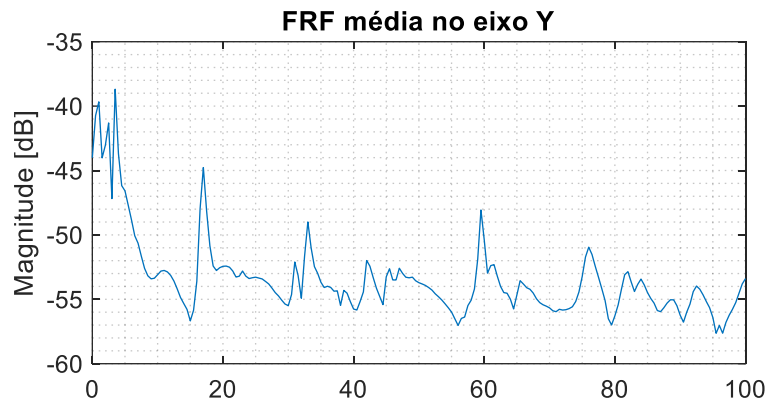
Por fim, o procedimento experimental é finalizado com os resultados do teste modal realizado na bomba iônica. Para facilitar a visualização dos modos de vibrar, optou-se pela apresentação da FRF média e limitou a sua visualização em até 100 Hz por ser a faixa de frequência de interesse da análise e pode ser vista nas Figura 44 até 46 com sua coerência em X na Figura 47.

Figura 44 – Função de resposta em frequência em um dos pontos medidos



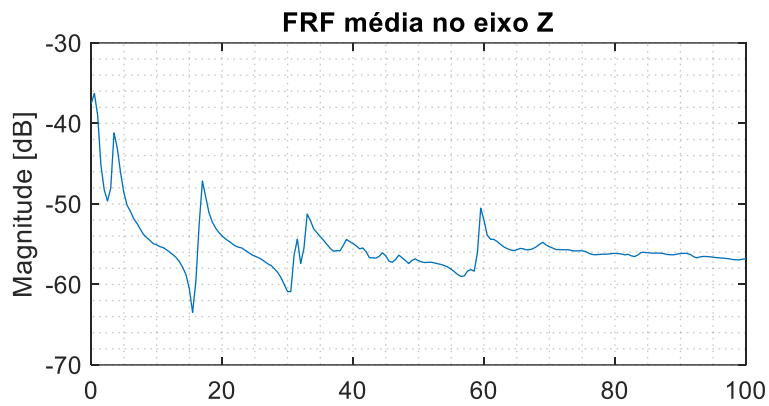
Fonte: Próprio Autor

Figura 45 – Função de resposta em frequência em um dos pontos medidos



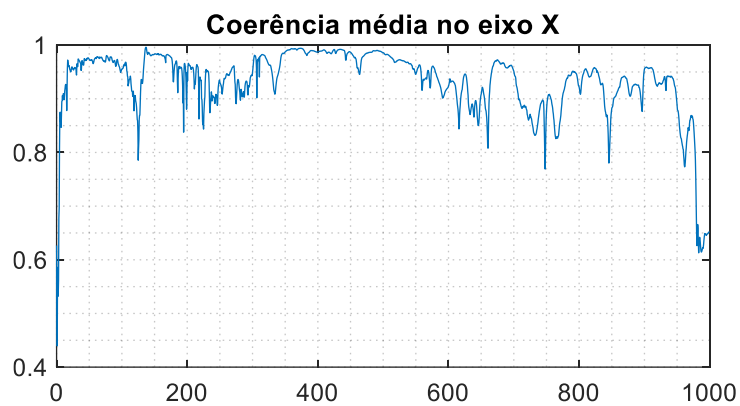
Fonte: Próprio Autor

Figura 46 – Função de resposta em frequência em um dos pontos medidos



Fonte: Próprio Autor

Figura 47 – Coerência média considerando todos os pontos medidos no teste



Fonte: Próprio Autor

4.2 ETAPA NUMÉRICA

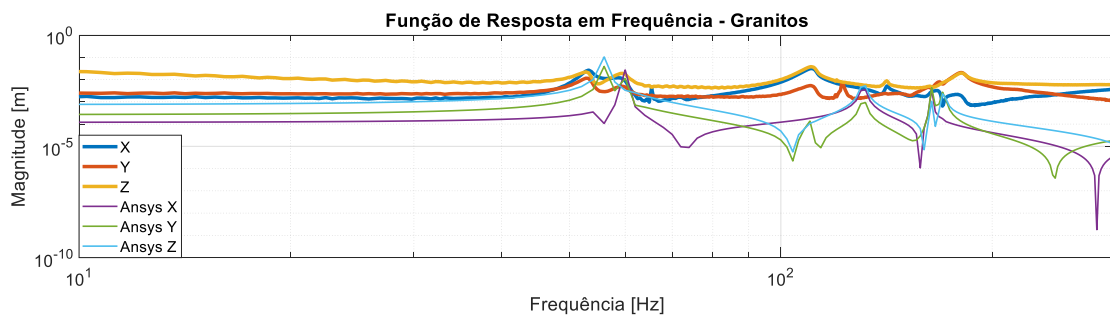
Nos resultados da etapa numérica constam as comparações de todos os dados obtidos experimentalmente. Portanto, tem-se o comparativo das FRF's,

PSD's e CAS's, além da comparação de mais importância para o trabalho que são as frequências naturais.

Para essa etapa, serão apresentadas as melhores aproximações obtidas em cada uma das etapas e as tabelas de comparação das frequências. O Apêndice A e B mostram todos os outros resultados obtidos.

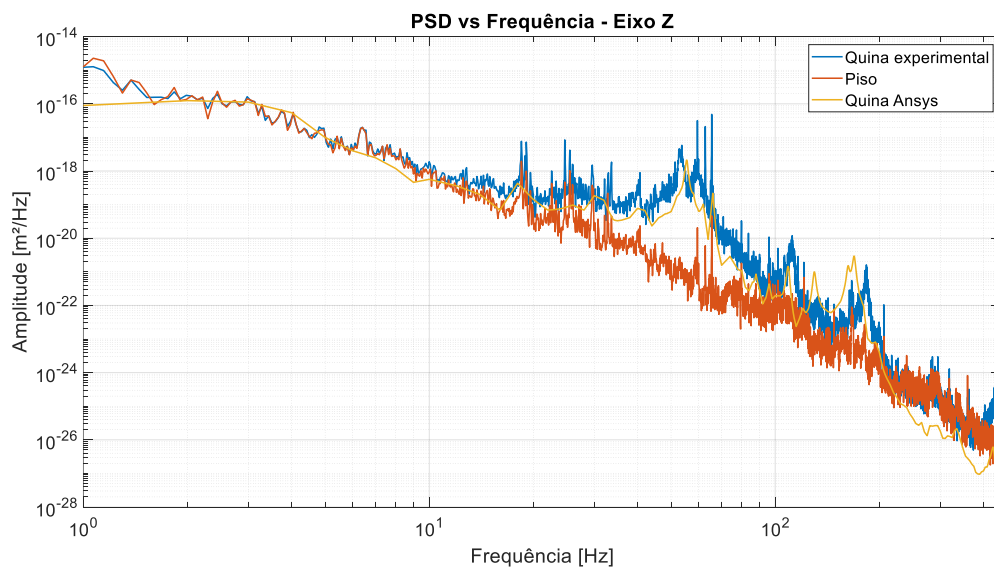
As Figuras 48 a 50 mostram o comparativo entre as FRF's, PSD's e CAS's da primeira simulação realizada que continha apenas as três bases de granitos. A Tabela 6 mostra as frequências obtidas experimental e numericamente com a avaliação de seu erro.

Figura 48 - FRF comparativa entre Ansys e experimental dos granitos



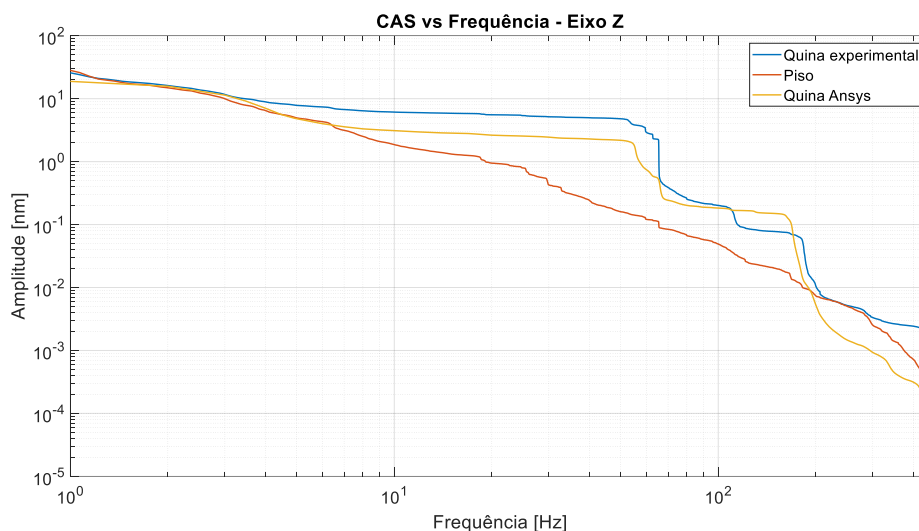
Fonte: Próprio Autor

Figura 49 - PSD do eixo Z no chão e no granito experimental e numérico



Fonte: Próprio Autor

Figura 50 - CAS do eixo Z no chão e no granito experimental e numérico



Fonte: Próprio Autor

Tabela 6 – Comparação entre os modos experimentais e numéricos do primeiro teste

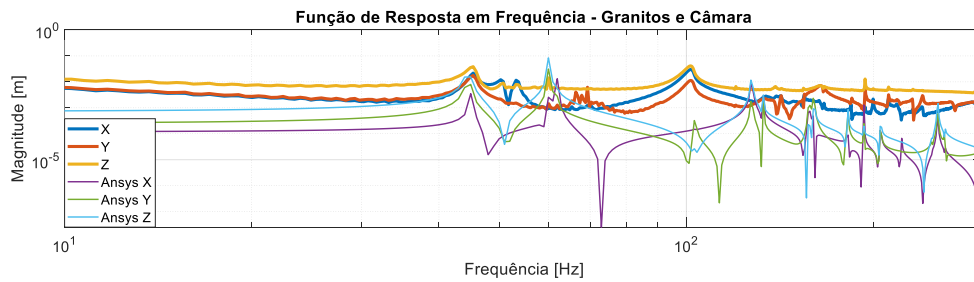
Modos	Frequências experimentais [Hz]	Frequências do Ansys [Hz]	Erro
1	53	56	5%
2	60	60	0%
3	110	109	0%
4	142	131	-8%
5	162	164	1%
6	180	170	-5%
7	429	430	0%
8	506	489	-3%
9	540	546.0	1%
10	562	573.7	2%
11	650	667.4	3%
12	685	687.7	0%
13	813	818.8	1%
14	873	853.0	-2%
15	916	914.2	0%

Fonte: Próprio Autor

As Figuras 51 a 53 mostram o comparativo entre as FRF's, PSD's e CAS's da segunda simulação realizada que continha as três bases de granitos e a câmara de vácuo em que a escala da FRF é de 1 até 200 Hz por serem os 15 primeiros modos observados.

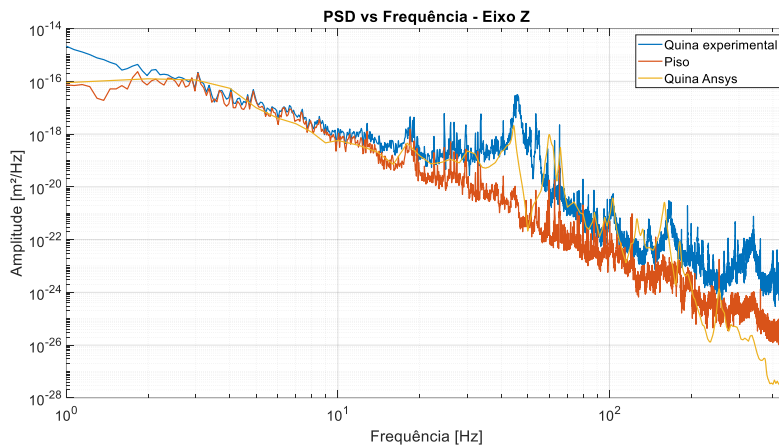
A Tabela 7 mostra as frequências obtidas experimental e numericamente com a avaliação de seu erro.

Figura 51 - FRF comparativa entre Ansys e experimental dos granitos com a câmara



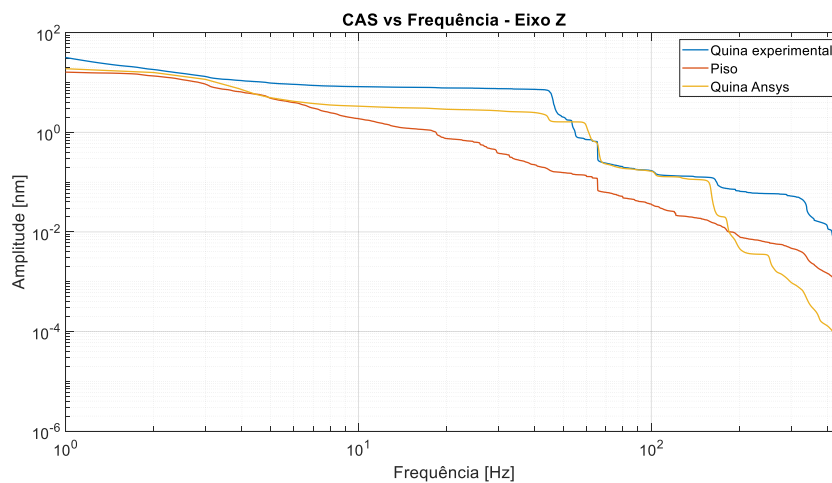
Fonte: Próprio Autor

Figura 52 - PSD do eixo Z no chão e no granito com a câmara experimental e numérico



Fonte: Próprio Autor

Figura 53 - CAS do eixo Z no chão e no granito com a câmara experimental e numérico



Fonte: Próprio Autor

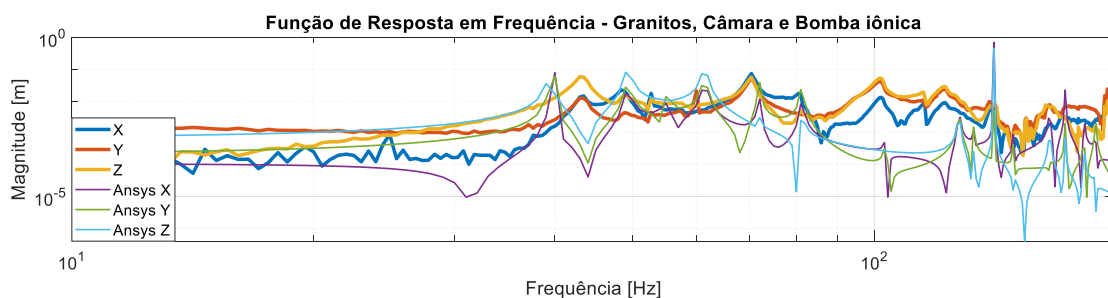
Tabela 7 - Comparação entre os modos experimentais e numéricos do segundo teste

Modos	Frequências experimentais [Hz]	Frequências do Ansys [Hz]	Erro
1	45	45	-1%
2	45	45	0%
3	51	60	18%
4	53	62	17%
5	70	64	-8%
6	102	103.27	1%
7	132	127.35	-4%
8	139	132.92	-4%
9	154	157.44	2%
10	163	160.38	-2%
11	184	181.79	-1%
12	194	193.04	0%
13	200	205.29	3%
14	211	221.69	5%
15	219	248.57	14%

Fonte: Próprio Autor

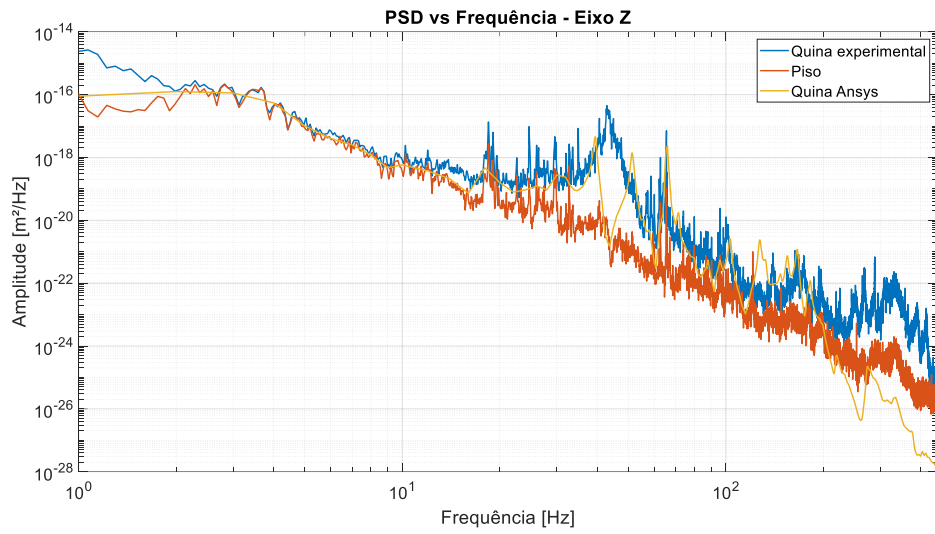
As Figuras 54 a 56 mostram o comparativo entre as FRF's, PSD's e CAS's da primeira simulação realizada que continha as três bases de granitos, a câmara de vácuo e a bomba iônica, com a mesma faixa de frequências de 1 a 20 Hz. A Tabela 8 mostra as frequências obtidas experimental e numericamente com a avaliação de seu erro.

Figura 54 - FRF comparativa entre Ansys e experimental dos granitos com a câmara e bomba iônica



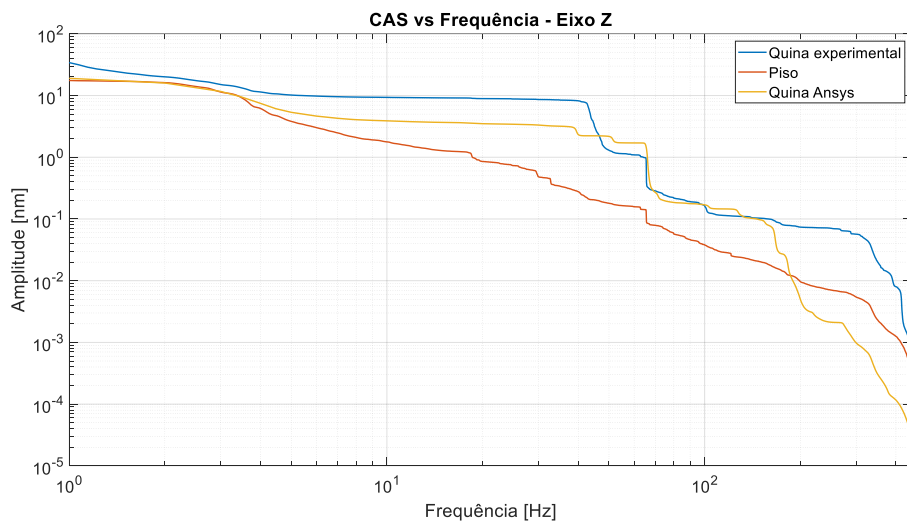
Fonte: Próprio Autor

Figura 55 - PSD do eixo Z no chão e no granito com a câmara e bomba iônica experimental e numérico



Fonte: Próprio Autor

Figura 56 - CAS do eixo Z no chão e no granito com a câmara e bomba iônica experimental e numérico



Fonte: Próprio Autor

Tabela 8 - Comparação entre os modos experimentais e numéricos do terceiro teste

Modos	Frequências experimentais [Hz]	Frequências do Ansys [Hz]	Erro
1	43	39	-8%
2	43	40	-7%
3	47	49	5%
4	53	55	4%
5	58	56	-4%
6	63	61	-2%
7	70	72	3%
8	81	81	0%
9	100	103.47	3%
10	123	127.58	4%
11	127	133.14	5%
12	132	141	7%
13	141	149.11	6%
14	154	165.5	7%
15	160	173.11	8%

Fonte: Próprio Autor

Por fim, a Tabela 9 apresenta o resultado das rigidezes de contato obtidas que resultam nas frequências com erros abaixo de 10% para os 15 primeiros modos. Tem-se que a rigidez total consiste na rigidez equivalente de todos os pontos de contato existentes entre dois componentes, ou seja, no caso dos contatos entre granitos que possuem três regiões de contato, essa rigidez total equivale à soma dessas três regiões. E, portanto, a rigidez efetiva de cada contato é considerada a total dividida pelo número de pontos ou regiões de contatos existentes .

Tabela 9 - Tabela de rigidezes de contato otimizadas

Contato	Direção	Rigidez total [N/m]	Rigidez do contato [N/m]
Granito inf – Granito int	Normal	1.51E+11	5.02E+10
	Tangencial	3.53E+10	1.18E+10
Granito int – Granito sup	Normal	1.58E+10	5.25E+09
	Tangencial	1.88E+10	6.25E+09
Granito – Solo	Normal	1.51E+09	5.03E+08
	Tangencial	1.17E+09	3.90E+08
Câmara – Granito	Normal	3.08E+09	6.15E+08
	Tangencial	2.75E+08	5.51E+07
Câmara - Tampa	Normal	7.24E+07	7.24E+07
	Tangencial	8.27E+06	8.27E+06
Granito – Fixações	Normal	6.40E+08	8.01E+07
	Tangencial	2.47E+08	3.09E+07
Bomba iônica – Fixações	Normal	6.32E+08	1.58E+08
	Tangencial	2.60E+07	6.49E+06
Câmara – Bomba iônica	Normal	6.97E+10	6.97E+10
	Tangencial	8.91E+07	8.91E+07

Fonte: Próprio Autor

4.3 RIGIDEZ DAS FIXAÇÕES

Como foi apresentado na metodologia, um dos objetivos do trabalho foi propor aumentos de rigidez em locais específicos como nas fixações da bomba iônica na base superior de granito e na conexão entre a câmara de vácuo e a bomba iônica.

Com a metodologia estabelecida, observou-se que a rigidez das fixações e seu parafuso possuem rigidezes suficientes para manter acima de $10^8 \frac{N}{m}$. Contudo, pelos resultados apresentados na Tabela 9, observa-se que as rigidezes de contato equivalentes da fixação variam de $10^6 \frac{N}{m}$ até $10^8 \frac{N}{m}$, o que nos leva a entender que o problema do conjunto de fixação se encontra no próprio contato da fixação com a bomba e com o granito.

5 DISCUSSÃO

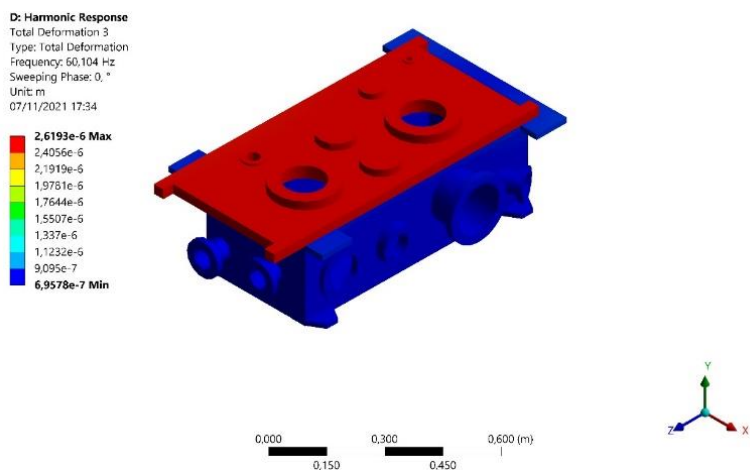
O primeiro aspecto que será observado é com relação à qualidade dos dados experimentais obtidos. Junto com cada PSD e cada CAS foi inserida a linha de ruído do sismógrafo Wilcoxon e, como todos os dados – a partir de 2 Hz e até 450 Hz – estão acima da linha de ruído do chão, tem-se que são valores coerentes do teste de estabilidade.

Para os testes modais, buscou-se garantir que os impactos causados pelo martelo em cada ponto fossem consistentes e, como o impacto foi feito 4 vezes em cada ponto, pôde-se aferir a coerência do sinal que se mostrou excelente, visto que em todas as etapas possuem uma coerência acima de 0,8. Portanto, os dados obtidos experimentalmente se mostram confiáveis e capazes de serem tratados com coerência.

Com relação aos testes com a estrutura completa e com a estrutura de granitos com a câmara apenas houve um problema que pôde ser observado ao se analisar as FRF's de ambos os testes. Ao fim do procedimento experimental, observou-se que a tampa da câmara de vácuo não estava fixada adequadamente, o que contaminou os dados ao surgirem picos de ressonância no diagrama de Bode em ambos os testes.

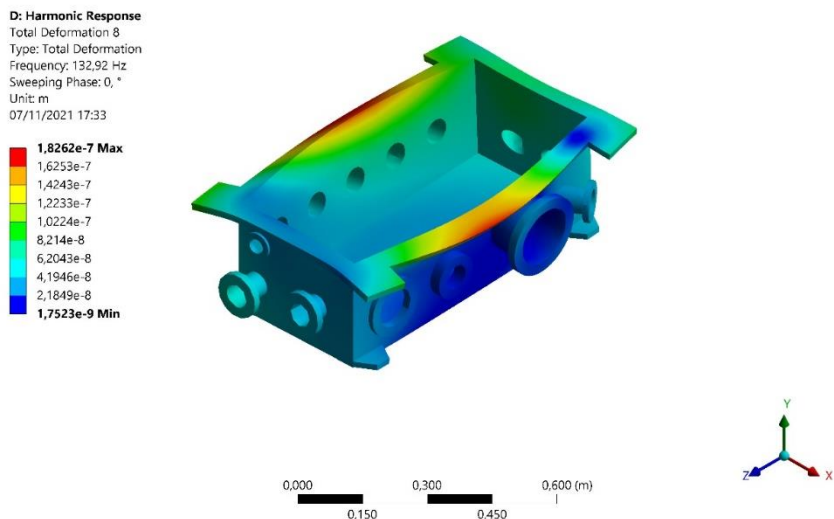
Essa contaminação ocorre pelo surgimento de modos de vibrar, mostrados nas Figuras 57 e 58, que são relacionados à tampa se desacoplando da câmara e relacionados à modos internos da tampa e da câmara que, em condições reais de operação possuiriam maior rigidez no contato e esses modos teriam frequências mais elevadas.

Figura 57 - Modo de desacoplamento da tampa da câmara de vácuo



Fonte: Próprio Autor

Figura 58 - Modo interno da câmara de vácuo



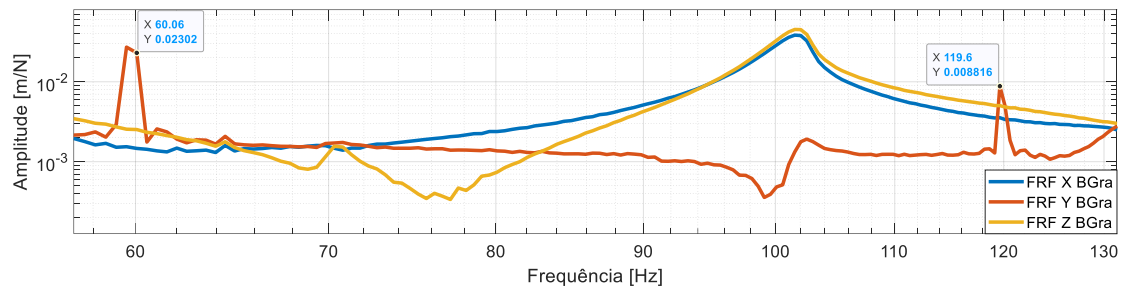
Fonte: Próprio Autor

Apesar desse problema, os resultados ainda puderam ser atingidos. A maior dificuldade foi tratar e filtrar o que seriam modos reais e rigidezes coerentes dado a existência desses empecilhos. Portanto, melhorias para próximos testes relacionados a esse tema é a criação de um procedimento de confirmação das condições de apertos de parafusos antes desse iniciar o processo.

Outro ponto de atenção que deve ser considerado ao se observar as FRF's é com relação aos picos existentes nas frequências 60 Hz e 120 Hz, como mostrado na Figura 59, pois são referentes à rede elétrica que pôde ser aferida porque o computador estava conectado ao carregador durante os testes, mas devem,

geralmente, ser desconsideradas como frequências das estruturas.

Figura 59 - FRF com picos em 60 Hz e 120 Hz por causa da rede elétrica



Fonte: Próprio Autor

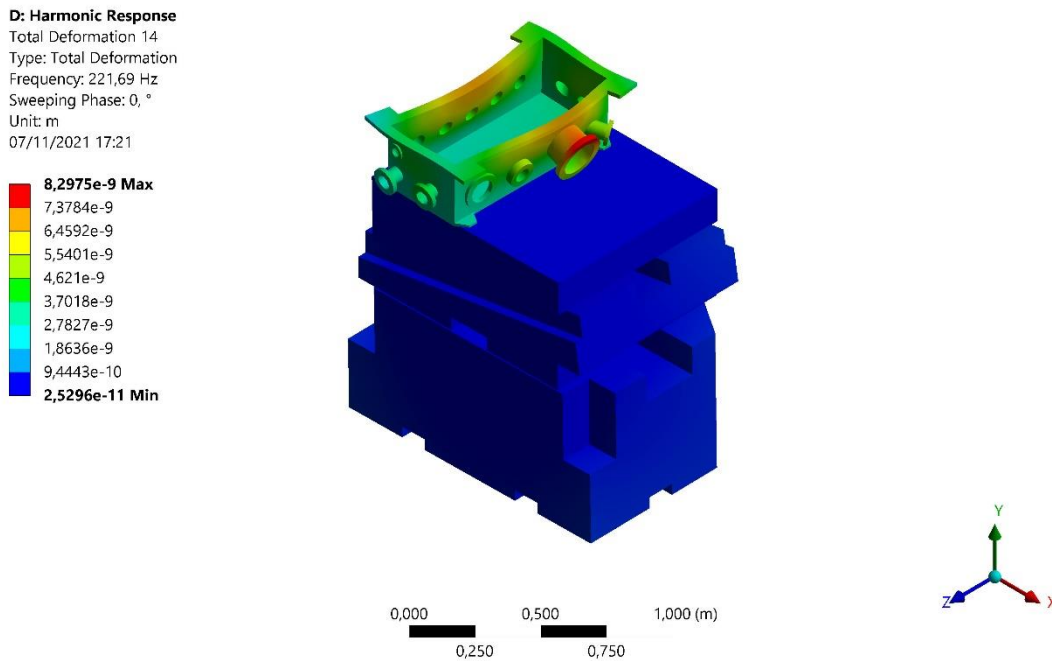
Com relação às três etapas de testes, as fixações nos niveladores da base estrutura não estavam com a rigidez real por não estarem na posição final de operação na linha de luz. Logo, as frequências referentes a essa rigidez devem ser analisadas com cuidado por não serem as reais, mas para as rigidezes entre granitos, granito e fixações, granito e câmara e câmara e bomba são as reais e a otimização de rigidezes se mostrou possível para todos esses contatos.

Com todas essas considerações feitas, pode-se discutir e interpretar os resultados das rigidezes obtidas.

A rigidez dos contatos entre os granitos se mostra coerente em ordem de grandeza comparativamente entre os granitos inferior e intermediário e granitos intermediário e superior. Como tanto a rigidez normal quanto a tangencial dependem do peso, é esperado que o contato que possui maior massa em cima, possua uma rigidez maior, que foi a solução que a otimização obteve.

As rigidezes referentes ao contato da câmara com o granito também se mostraram coerentes ao se observar os modos de vibrar do experimento com os simulados no Ansys, em que há o desacoplamento em ambos por volta de 220 Hz, como mostrado na Figura 60.

Figura 60 - Modo de vibrar de desacoplamento da câmara dos granitos



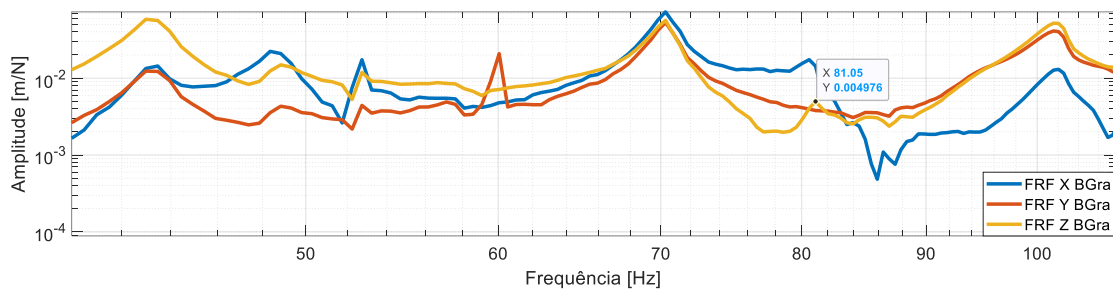
Fonte: Próprio Autor

Agora, resta discutir sobre as rigidezes obtidas na terceira etapa da otimização. Como comentado no capítulo de resultados, tem-se que são os pontos de menor rigidez os contatos relacionados às fixações com a bomba iônica. Como o contato é fixado apenas por um parafuso, ser a menor rigidez normal e tangencial se mostra coerente com o esperado.

Portanto, como um dos focos foi o aumento da rigidez nesses contatos, existem algumas soluções simples que poderiam ser implementadas para aumentar essas rigidezes. Para a estrutura atual não há muitas possibilidades de mudança, mas em projetos de estruturas de espelhos futuras, uma possibilidade é adicionar fixações nas laterais da bomba iônica pois como pôde ser observado, as rigidezes normais estão na ordem de $10^8 \frac{N}{m}$, logo aumentando a rigidez normal nas faces ortogonais à rigidez tangencial existente atualmente, é esperado que esses modos observados referentes a deslocamentos da bomba iônica melhorem.

Quanto à influência dos modos internos da bomba na estrutura como um todo, não se observou nenhum dos modos internos nas FRF's da estrutura inteira, com exceção de um pico à 81 Hz, como se mostra na Figura 61.

Figura 61 - FRF mostrando o modo interno da bomba no teste como estrutura completa



Fonte: Próprio Autor

Logo, como é um modo coincidente com os internos da bomba, vê-se uma possibilidade de melhoria na otimização das rigidezes, visto que para atingir os 81 Hz o estudo reduziu drasticamente a rigidez tangencial do contato entre os flanges da bomba iônica e da câmara de vácuo e então, se imagina um valor de rigidez mais próximo ao da direção normal.

6 CONCLUSÃO

O estudo realizado possuía alguns objetivos estipulados para que fosse possível atingir a otimização das rigidezes de contato. O primeiro deles era realizar testes de vibração em diferentes etapas de desmontagem para avaliar tanto os modos de vibrar quanto a sua estabilidade.

A seguir, buscou-se elaborar um modelo simplificado para realizar simulações modais, harmônicas e randômicas no Ansys com a finalidade de rodar um estudo de otimização que fosse capaz de alcançar valores ideais das rigidezes.

Por fim, com o estudo finalizado, o trabalho teve como objetivo identificar pontos de menor rigidez com a intenção de propor melhorias de projeto para aumentar esses pontos mais fracos.

Com os resultados apresentados, conclui-se que o procedimento experimental adotado é confiável e seus resultados interpretações consistentes. Infelizmente, houve o problema de aperto de parafusos e, como os prazos para realizar os testes eram apertados, não foi possível os repetir, mas pela consistência da metodologia, ainda foram obtidos ótimos resultados com que foi possível avançar com o projeto.

As simulações realizadas com esses resultados experimentais também se mostraram eficientes e atingiram os resultados esperados de frequências. Um dos aspectos difíceis de interpretar são os modos de vibrar que foram analisados apenas visualmente, então uma proposta de implementação nesse estudo é a definição de um critério para comparação numérica, como o *modal assurance criterion* (MAC). Contudo, apenas utilizando o critério de frequências, o *update* do modelo pode ser considerado adequado, principalmente para as rigidezes dos granitos.

Outro ponto para ressaltar é quanto à complexidade da estrutura analisada. Ficou claro que as FRF's da etapa de teste dos granitos foi a mais simples e mais fácil de tratar. Então, para projetos futuros o mais adequado é buscar simplificar ao máximo a estrutura para alcançar resultados mais confiáveis.

Quanto à proposta de aumento de rigidez, é sugerido um estudo aprofundado sobre novas maneiras de fixar a bomba iônica que sejam capazes de prendê-la com maior rigidez a fim de elevar as frequências naturais observadas. Contudo, como o

foco se dá em manter o sistema ótico dentro da câmara de vácuo estável, se esses modos de desacoplamento da bomba não afetarem significativamente a estabilidade relevante, não é estritamente necessária uma mudança no sistema de fixações.

Logo, como o foco do estudo foi o desenvolvimento de uma metodologia que otimizasse as rigidezes de contato com relação às frequências de ressonância da estrutura e, como foram obtidos resultados coerentes e relevantes, pode-se afirmar que o trabalho foi bem-sucedido e que apresenta possibilidades de melhorias para futuros projetos das linhas de luz do Sirius.

REFERÊNCIAS

BORYCZKO, A. **Effect of waviness and roughness components on transverse profiles of turned surfaces.** Measurement: journal of the International Measurement Confederation, 2013-01, Vol.46 (1), p.688-696. DOI: 10.1016/j.measurement.2012.09.007

BUENO, C.S.N.C., et al. **Vibration Assessment at the CARNAÚBA Beamline at Sirius/LNLS** In: International Workshop on Mechanical Engineering Design of Synchrotron Radiation Equipment and Instrumentation, 11, 2021, Chicago.

FELÍCIO, L. C., **Modelagem da Dinâmica de Sistemas e Estudo da Resposta.** 2ª Edição, RiMa, 2010.

KHAKSAR, Z., AHMADI, H., MOHTASEBI, S.S. **Whole body vibration analysis of tractor operators using power spectral density.** In: Journal of Mechanical Engineering and Technology, Jun. 2013, Vol. 1 Iss. 1, PP. 6-12

LABORATÓRIO NACIONAL DE LUZ SÍNCROTRON. **Linha de Luz Carnaúba.** Disponível em: <<https://www.lnls.cnpem.br/facilities/carnauba/>>. Acesso em: 08/11/2021.

LESOURD, M., RAVELLI, R.B.G., ZHANG, L. **Identification of X-ray Beam Instability Sources for a MX Beamline at the ESRF.** In: International Workshop on Mechanical Engineering Design of Synchrotron Radiation Equipment and Instrumentation, 2, 2002, Argonne.

MEDINA, S., NOWELL, D., DINI, D. **Analytical and Numerical Models for Tangential Stiffness of Rough Elastic Contacts.** Tribol Lett 49, 103–115 (2013). <https://doi.org/10.1007/s11249-012-0049-y>

MERA, M.F. et al. **Prospective studies on plant science and environmental toxicology research using advanced techniques at CARNAÚBA beamline of Sirius.** In: Anual Users Meetings LNLS/CNPEM, 28, 2018, Campinas.

NASSER, A., MANSOUR, A., YAO, K., HANI, A., CHARARA, H. **Spectrum Sensing Based on Cumulative Power Spectral Density.** 2017, EURASIP journal on advances in signal processing. 38. 10.1186/s13634-017-0475-y.

RAO, S., **Vibrações Mecânicas**, 4a edição, Pearson Prentice Hall, 2008.

RODELLA, C.B., PEREZ, C. A., DIAS, C. S. B, et al. **CARNAUBA beamline at Sirius: micro and nano coherent x-ray probe to study catalysts.** In: Congresso Brasileiro de Catálise. 20, 2019, São Paulo.

ROGERS, M. J. B., et al. **Accelerometer data analysis and presentation techniques**. Tal-Cut Company at NASA Lewis Research Center. 1997, Ohio

SCHOUKENS, J., GODFREY, K. SCHOUKENS, M., **Nonparametric Data-Driven Modeling of Linear Systems: Estimating the Frequency Response and Impulse Response Function**, in *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 38, no. 4, pp. 49-88, Aug. 2018, doi: 10.1109/MCS.2018.2830080.

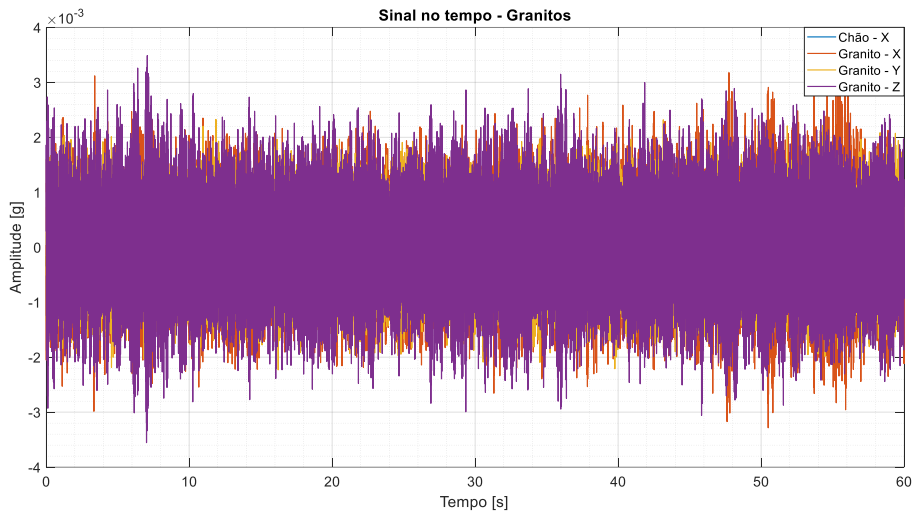
SHI, X., POLYCARPOU, A., **Measurement and Modeling of Normal Contact Stiffness and Contact Damping at the Meso Scale**. 2005, *Journal of Vibration and Acoustics*. 127. 10.1115/1.1857920.

SIMOS, N., CHU, Y. S., BROADBENT, A. et al. **Achieving Vibration Stability of the NSLS-II Hard X-ray Nanoprobe Beamline**. In: *AIP Conference Proceedings* 1365, 148 (2011); <https://doi.org/10.1063/1.3625326>

ZHAO, G., XIONG, Z., JIN, X., HOU, L., GAO, W. **Prediction of contact stiffness in bolted interface with natural frequency experiment and FE analysis**. *Tribology International*, v. 127, 2018, p. 157-164. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2018.05.044>.

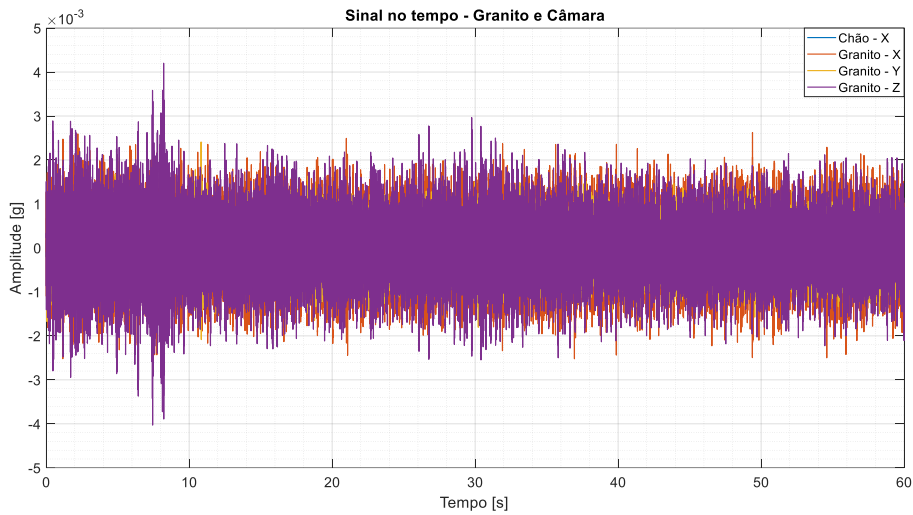
APÊNDICE A – Sinais no Tempo e Coerências

Figura 62 - Sinal no tempo da medida de estabilidade dos granitos



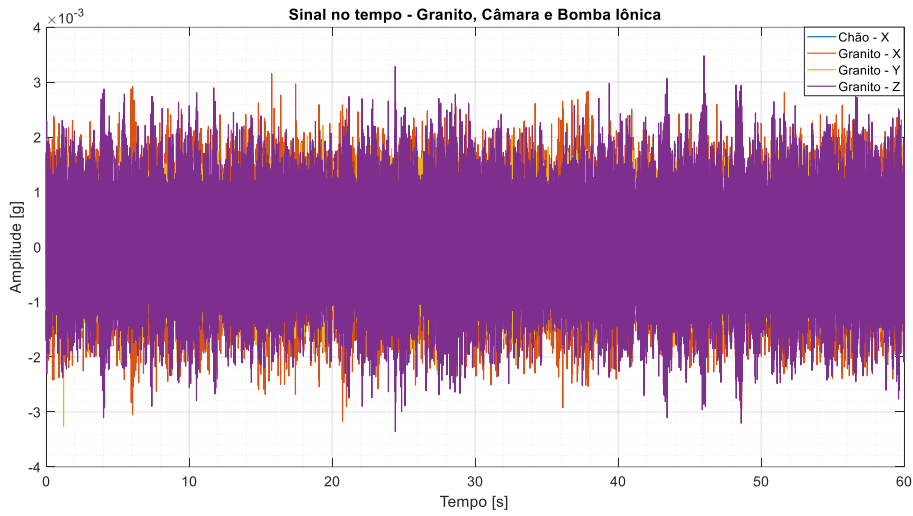
Fonte: Próprio Autor

Figura 63 - Sinal no tempo da medida de estabilidade dos granitos com a câmara



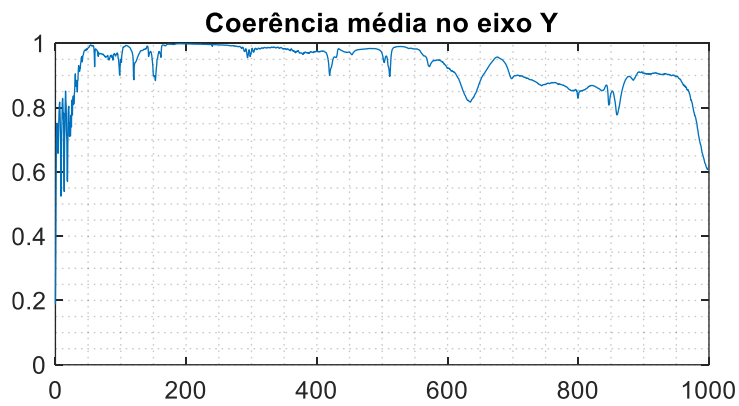
Fonte: Próprio Autor

Figura 64 – Sinal no tempo da medida de estabilidade dos granitos com a câmara e bomba iônica



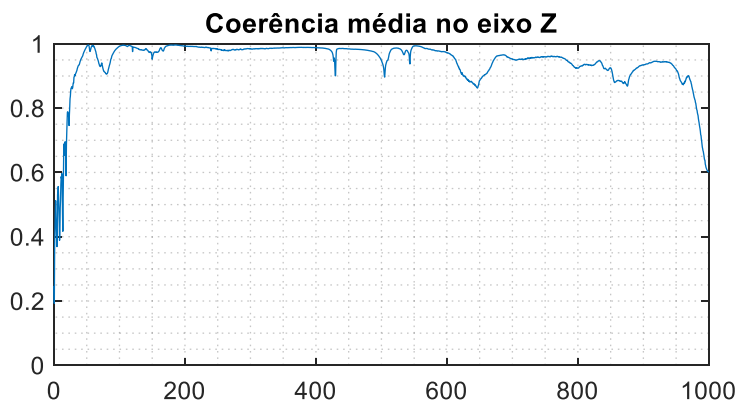
Fonte: Próprio Autor

Figura 65 - Coerência média considerando todos os pontos medidos no teste



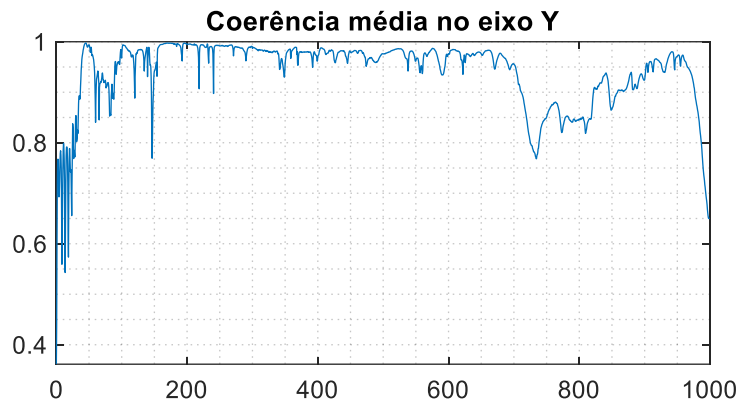
Fonte: Próprio Autor

Figura 66 - Coerência média considerando todos os pontos medidos no teste



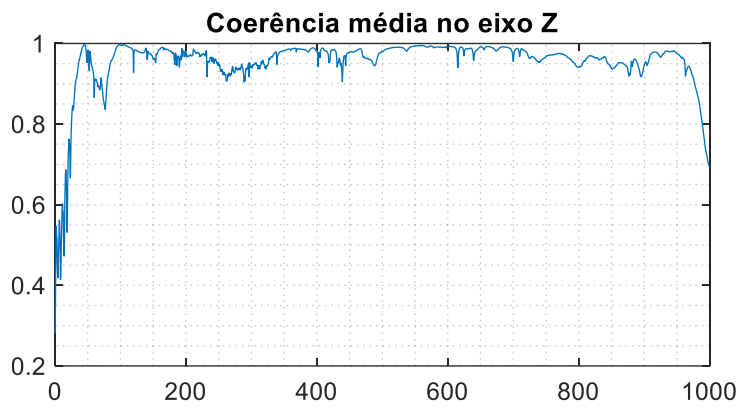
Fonte: Próprio Autor

Figura 67 - Coerência média considerando todos os pontos medidos no teste



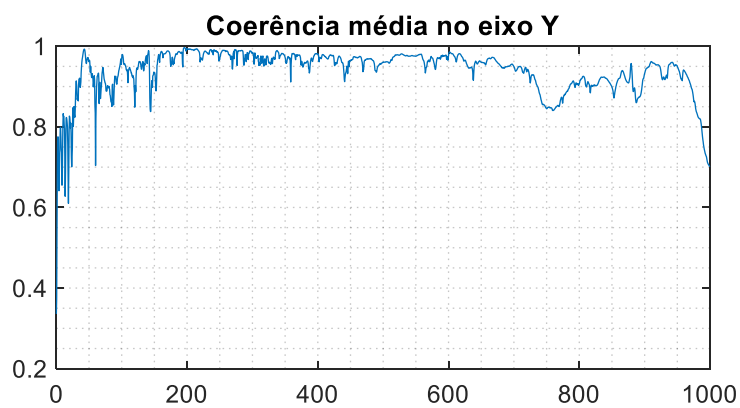
Fonte: Próprio Autor

Figura 68 - Coerência média considerando todos os pontos medidos no teste



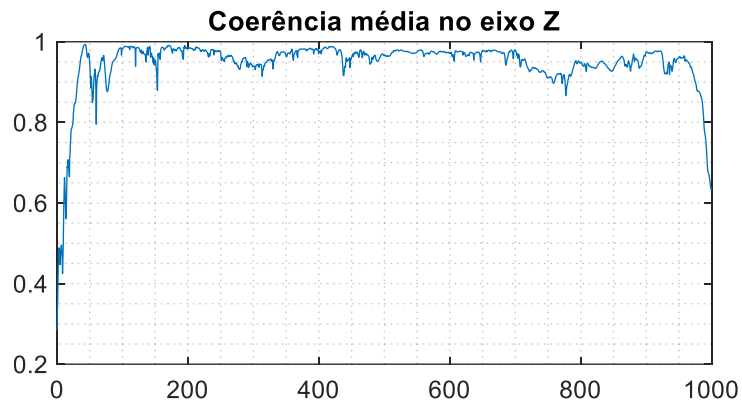
Fonte: Próprio Autor

Figura 69 - Coerência média considerando todos os pontos medidos no teste



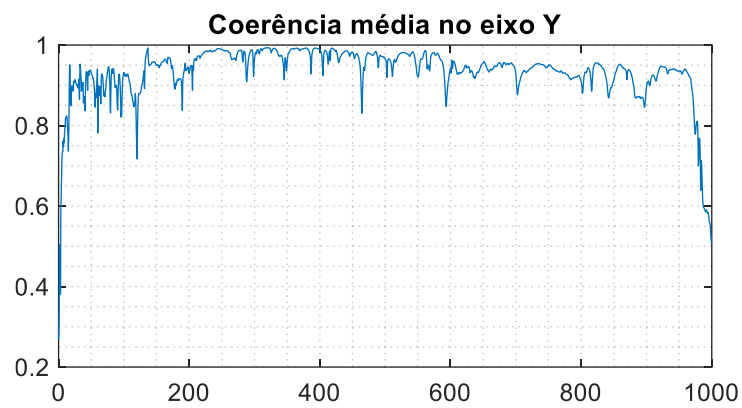
Fonte: Próprio Autor

Figura 70 - Coerência média considerando todos os pontos medidos no teste



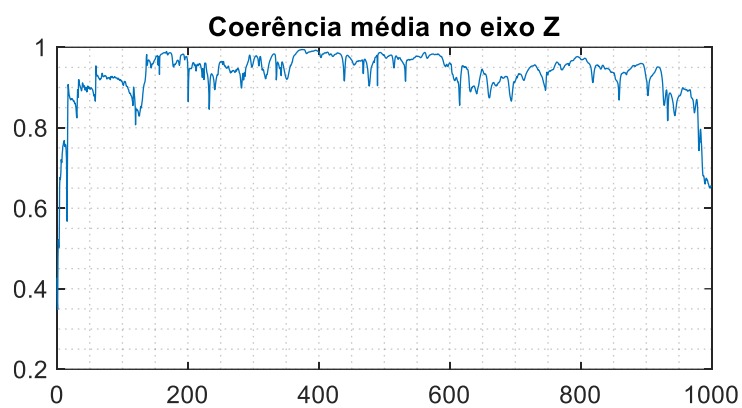
Fonte: Próprio Autor

Figura 71 - Coerência média considerando todos os pontos medidos no teste



Fonte: Próprio Autor

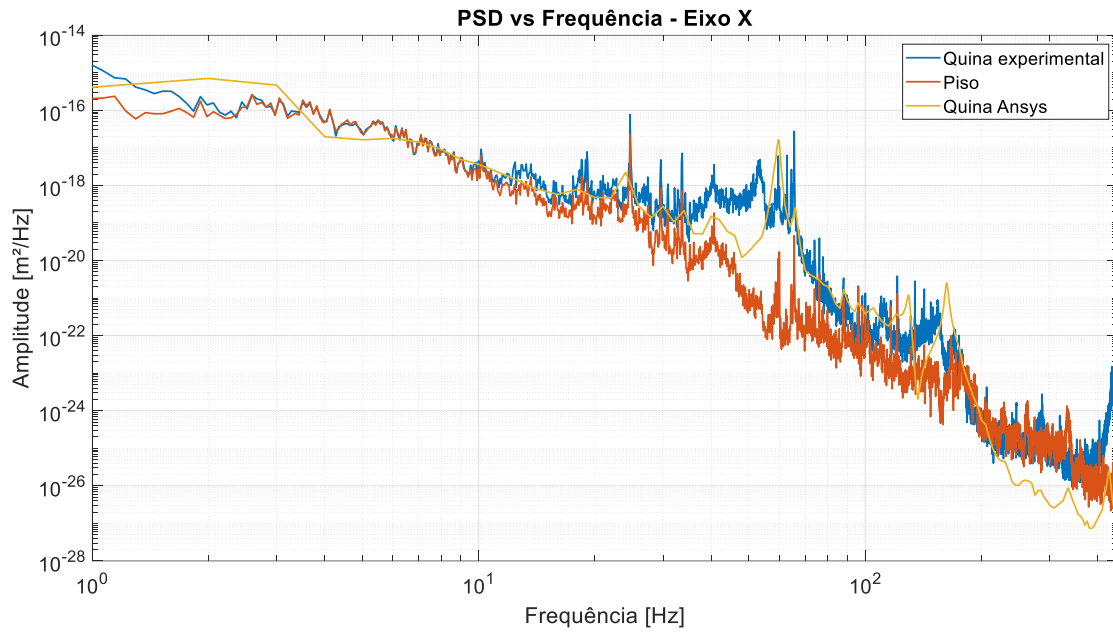
Figura 72 - Coerência média considerando todos os pontos medidos no teste



Fonte: Próprio Autor

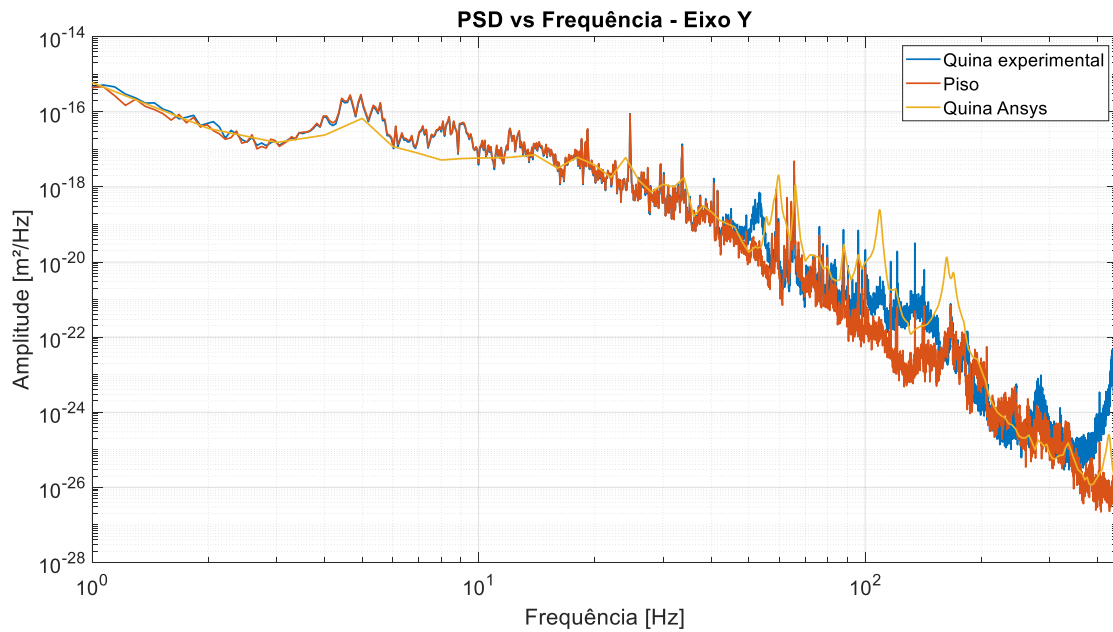
APÊNDICE B – Comparações Numérico-Experimentais

Figura 73 - PSD do eixo X no chão e no granito experimental e numérico



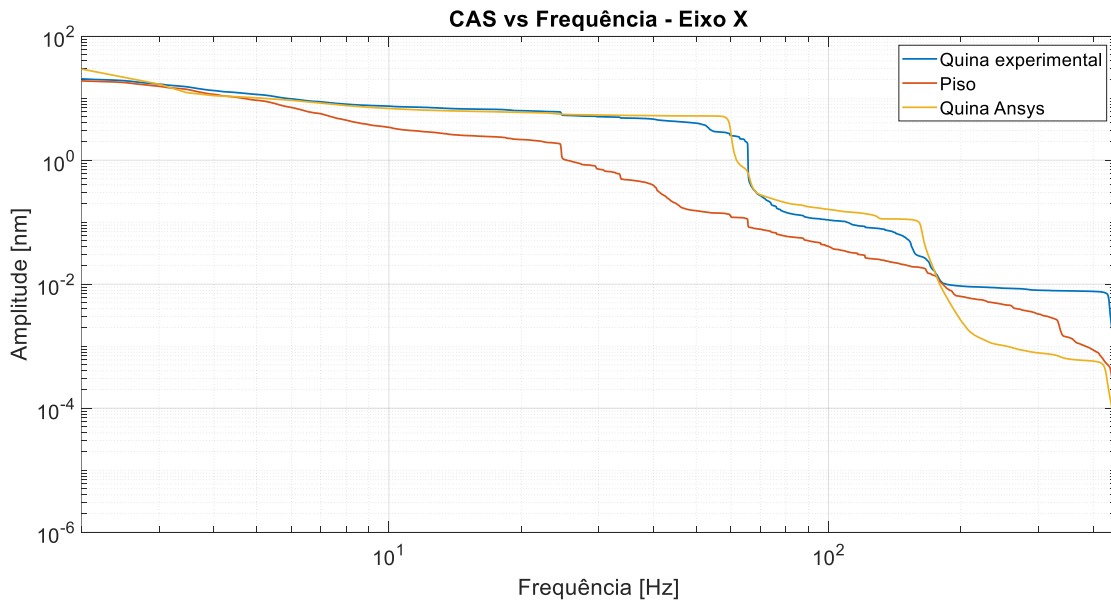
Fonte: Próprio Autor

Figura 74 - PSD do eixo Y no chão e no granito experimental e numérico



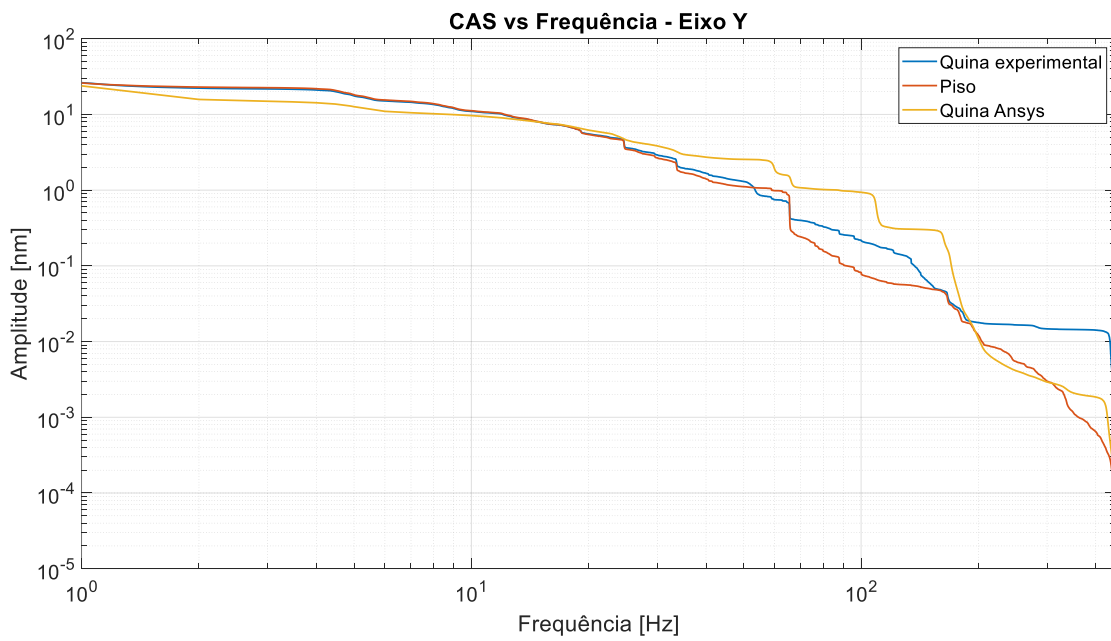
Fonte: Próprio Autor

Figura 75 - CAS do eixo X no chão e no granito experimental e numérico



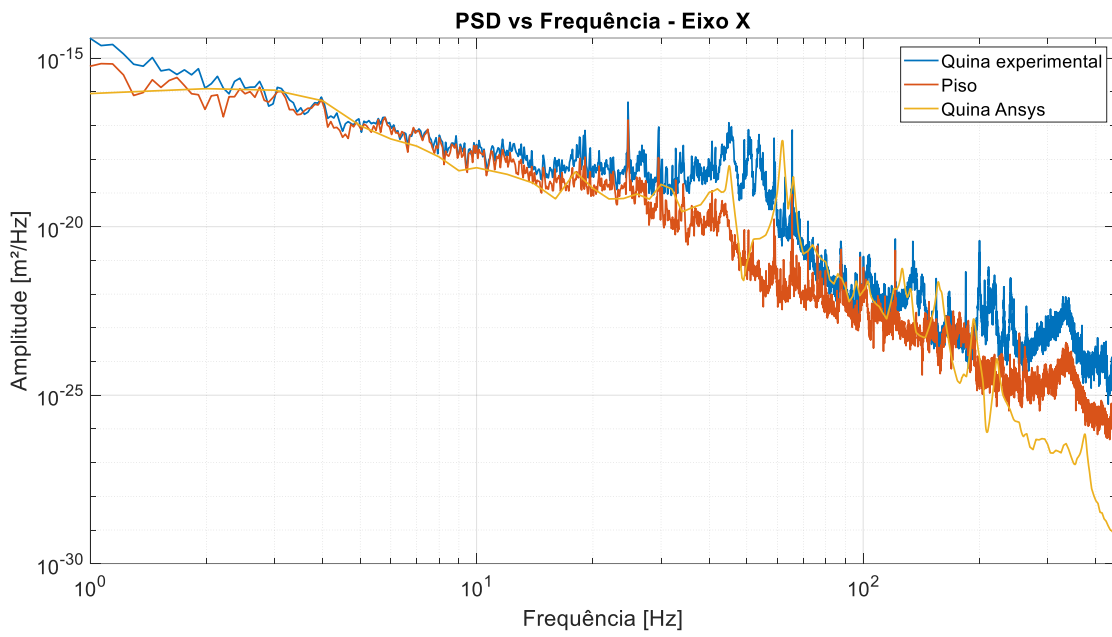
Fonte: Próprio Autor

Figura 76 - CAS do eixo Y no chão e no granito experimental e numérico



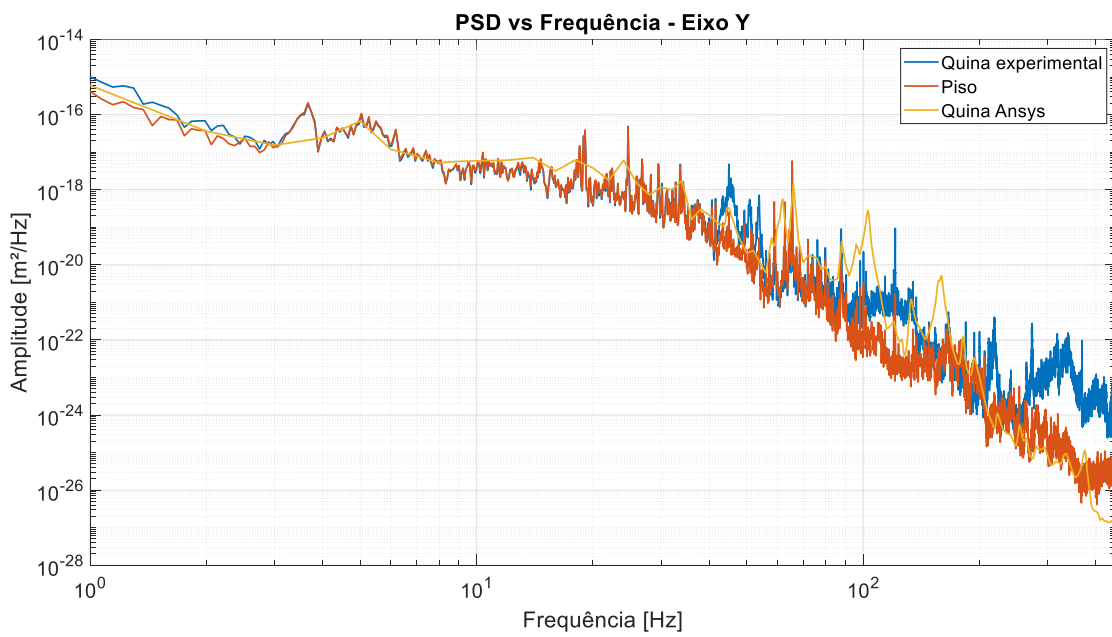
Fonte: Próprio Autor

Figura 77 - PSD do eixo X no chão e no granito com a câmara experimental e numérico



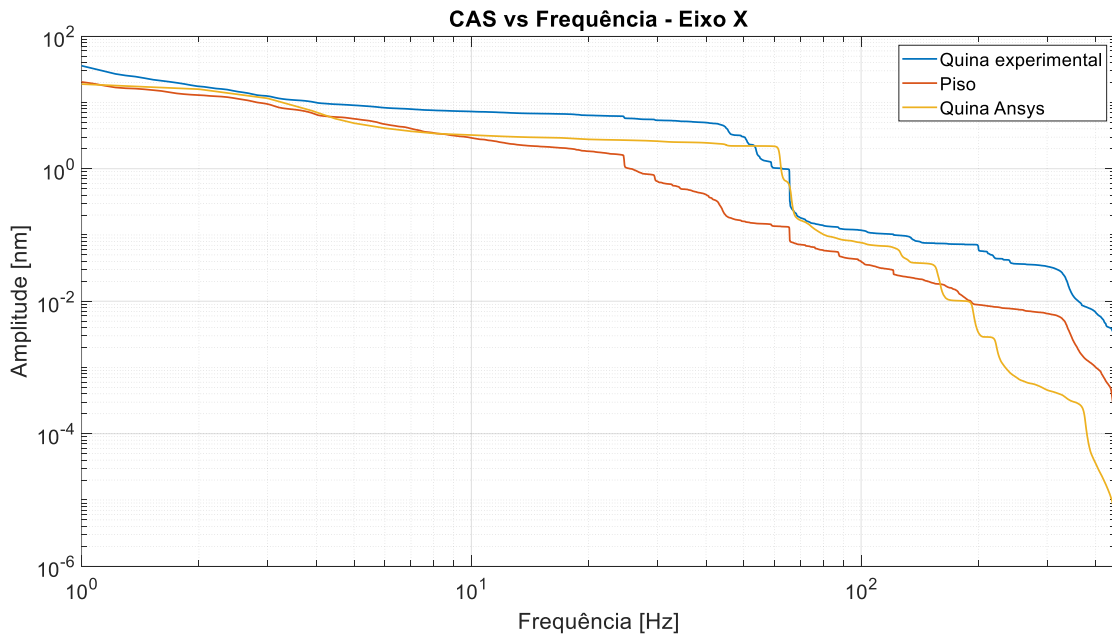
Fonte: Próprio Autor

Figura 78 - PSD do eixo Y no chão e no granito com a câmara experimental e numérico



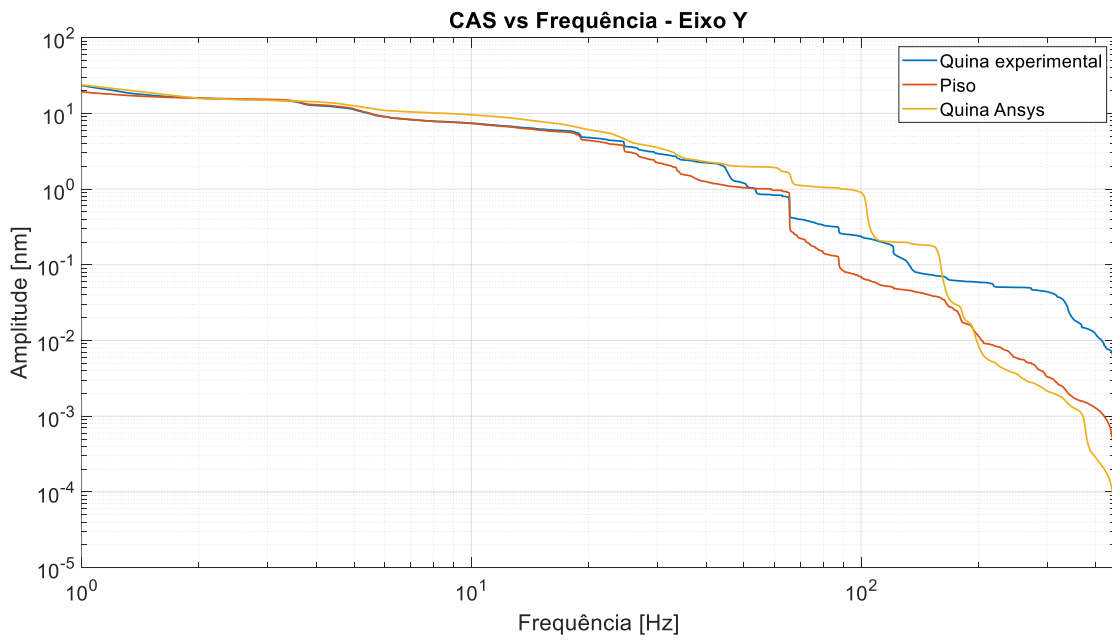
Fonte: Próprio Autor

Figura 79 - CAS do eixo X no chão e no granito com a câmara experimental e numérico



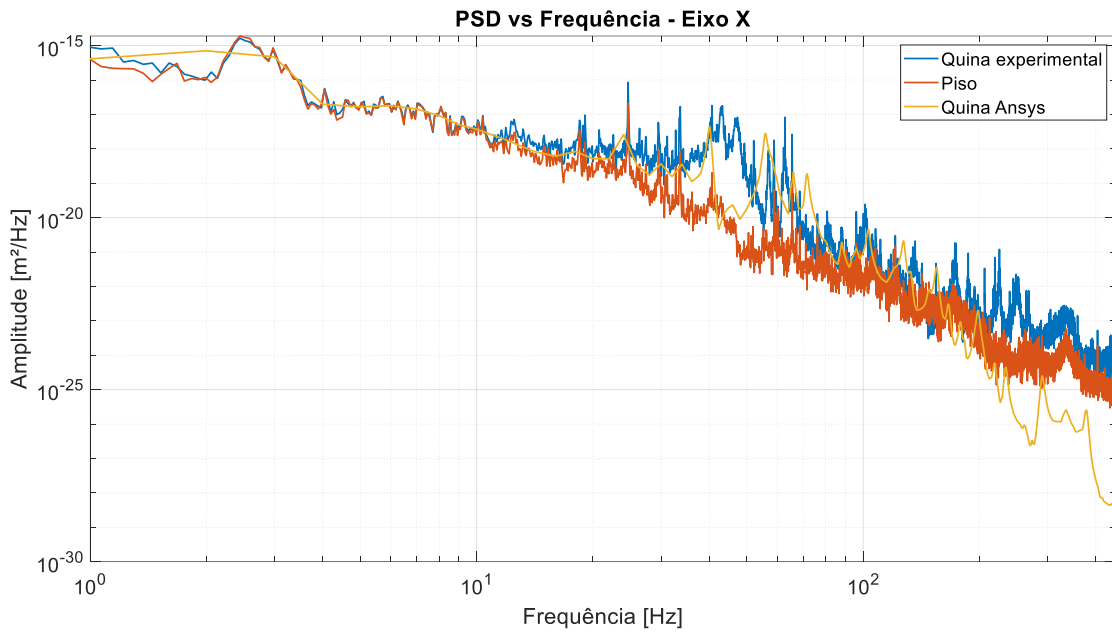
Fonte: Próprio Autor

Figura 80 - CAS do eixo Y no chão e no granito com a câmara experimental e numérico



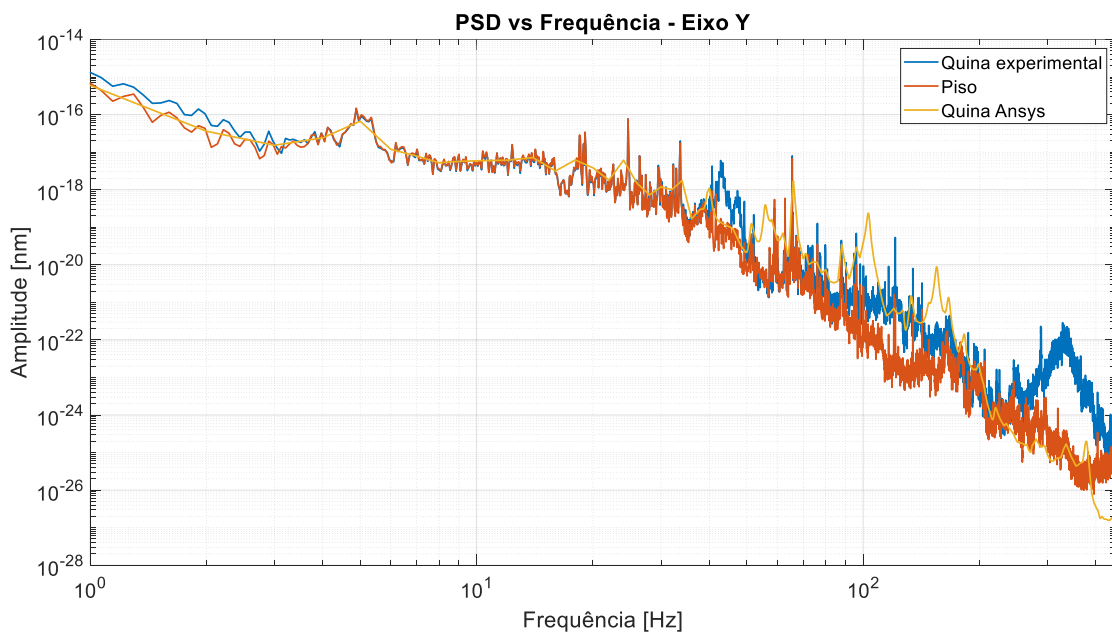
Fonte: Próprio Autor

Figura 81 - PSD do eixo X no chão e no granito com a câmara e bomba iônica experimental e numérico



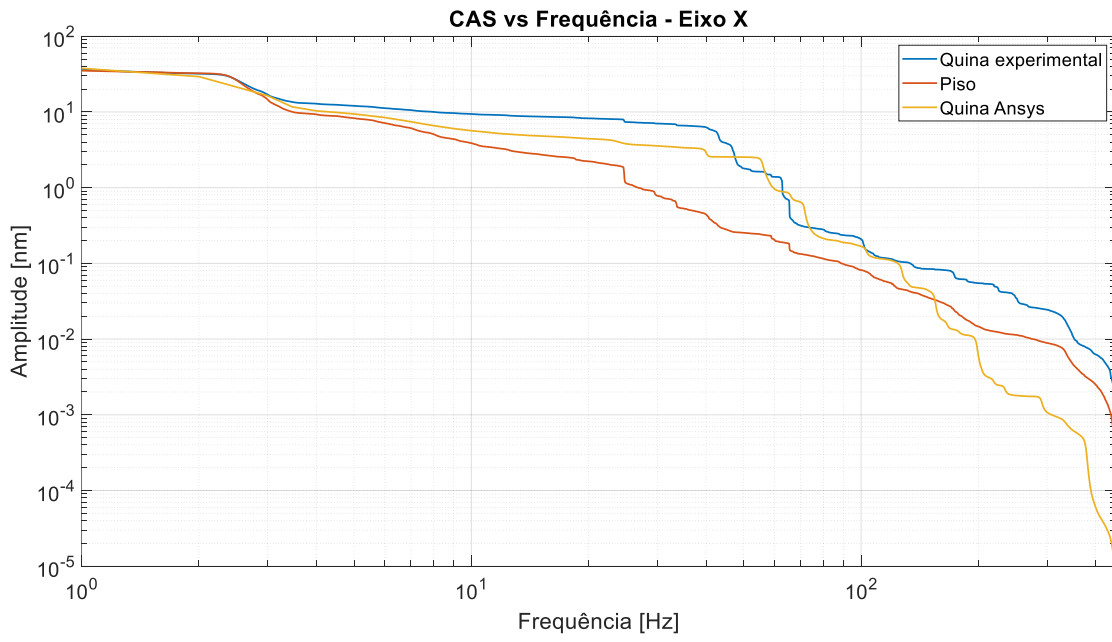
Fonte: Próprio Autor

Figura 82 - PSD do eixo Y no chão e no granito com a câmara e bomba iônica experimental e numérico



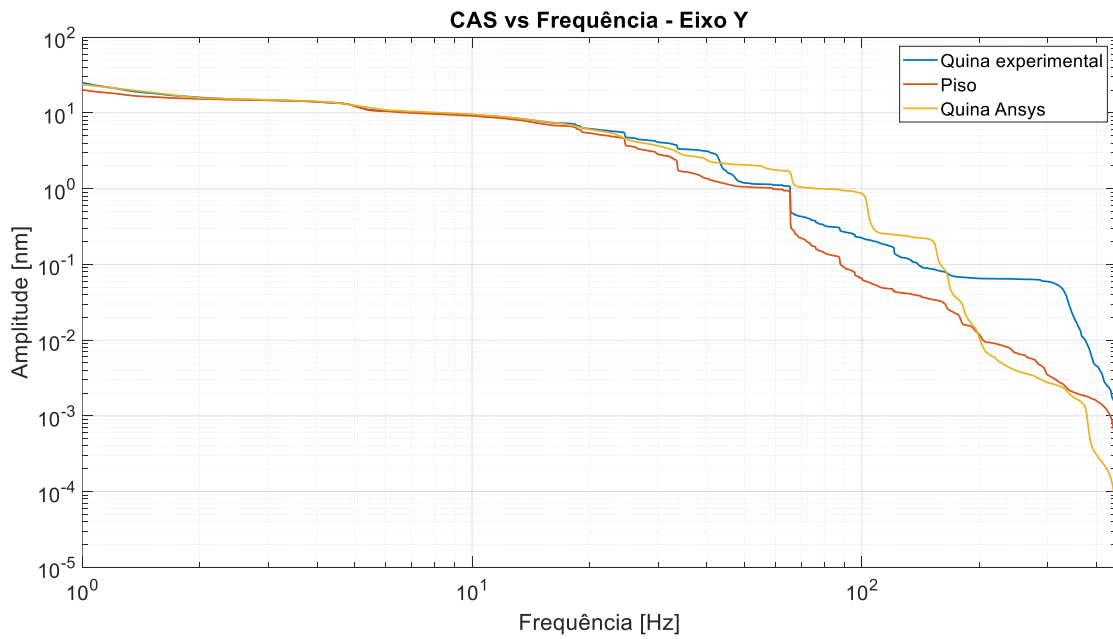
Fonte: Próprio Autor

Figura 83 - CAS do eixo X no chão e no granito com a câmara e bomba iônica experimental e numérico



Fonte: Próprio Autor

Figura 84 - CAS do eixo Y no chão e no granito com a câmara e bomba iônica experimental e numérico



Fonte: Próprio Autor