

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
DEES – Departamento de Engenharia de Estruturas  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas**

Jonas Paulo Costa Silveira

**ANÁLISE DINÂMICA DE BASE DE BRITADORES CÔNICOS**

Belo Horizonte  
2019

Jonas Paulo Costa Silveira

## **ANÁLISE DINÂMICA DE BASE DE BRITADORES CÔNICOS**

Monografia apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial para a obtenção do título de Especialista em Engenharia de Estruturas.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Barreto Caldas

Belo Horizonte  
2019



## ATA DA DEFESA DA MONOGRAFIA DO ALUNO JONAS PAULO COSTA SILVEIRA

Realizou-se, no dia 12 de fevereiro de 2020, às 08:00 horas, Escola de Engenharia, sala 4409, bloco 1, da Universidade Federal de Minas Gerais, a defesa de monografia, intitulada *ANÁLISE DINÂMICA DE BASE DE BRITADORES CÔNICOS*, apresentada por JONAS PAULO COSTA SILVEIRA, número de registro 2018698634, graduado no curso de ENGENHARIA CIVIL, como requisito parcial para a obtenção do certificado de Especialista em ANÁLISE E DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO E AÇO, à seguinte Comissão Examinadora: Prof(a). Rodrigo Barreto Caldas - Orientador (...), Prof(a). Sebastiao Salvador Real Pereira (UFMG).

A Comissão considerou a monografia:

Aprovada

Reprovada

Finalizados os trabalhos, lavrei a presente ata que, lida e aprovada, vai assinada por mim e pelos membros da Comissão.  
Belo Horizonte, 12 de fevereiro de 2020.

  
Alessandra Cristina Rodrigues Souza - Secretário(a)

  
Prof(a). Rodrigo Barreto Caldas (Doutor)

  
Prof(a). Sebastiao Salvador Real Pereira (Doutor)

## RESUMO

O presente estudo insere-se no contexto de cálculos dinâmicos aplicados à engenharia de estruturas. Por vezes o comportamento dinâmico das estruturas é ignorado, ou aproximado de maneira incoerente através de uma análise estática suposta equivalente. Portanto, destaca-se a importância da compreensão das solicitações e respostas dinâmicas em estruturas para o seu correto dimensionamento, vida útil e segurança. O objetivo deste trabalho é avaliar o comportamento do conjunto base-radier diante das solicitações dinâmicas oriundas do funcionamento de britadores cônicos. Verificar o dimensionamento normativo dos componentes em concreto armado da base dos britadores, bem como as consequências dos níveis de vibração para a vida útil dos equipamentos e para a resposta humana (critério fisiológico). As atividades foram desenvolvidas a partir de um estudo de caso aprofundado de uma estrutura integrante de uma planta de mineração no estado de Minas Gerais. Os resultados indicaram que a solicitação causada pela operação em regime dos britadores cônicos em fase, resulta na condição crítica para a estrutura, porém em níveis inferiores aos estipulados pelas normas de referência. A partir das análises realizadas pode-se verificar, que para a condição avaliada os valores de velocidade e aceleração calculados estão abaixo dos limites recomendados pelas normas de referência utilizadas, sendo a estrutura aprovada para os critérios verificados, a saber: dinâmico estrutural, de equipamento e fisiológico.

Palavras-Chave: Análise Dinâmica; Análise Estrutural Dinâmica; Método dos Elementos Finitos; Base de Equipamentos Rotativos.

## **ABSTRACT**

The present study fits into the context of dynamic calculations applied to structural engineering. Sometimes the dynamic behavior of structures is ignored, or approximated incoherently through an assumed equivalent static analysis. Therefore, it is highlighted the importance of understanding dynamic forces and responses in structures for their correct design, life span and safety. The objective of this work is to evaluate the behavior of the base-raft foundation assembly in face of the dynamic forces arising from the operation of cone crushers. Verify the normative dimensioning of the reinforced concrete components of the crusher base, as well as the consequences of vibration levels for equipment life and human response (physiological criterion). The activities were developed from an in-depth case study of a structure of a mining plant in the state of Minas Gerais - Brazil. The results indicated that the dynamic excitation caused by the regime operation of the conical crusher in phase results in the critical condition for the structure, but at levels lower than those stipulated by the reference standards. From the analyzes performed it can be verified that, for the evaluated condition the calculated, velocity and acceleration values are below the limits recommended by the adopted standards, being the structure approved for the verified criteria, namely: structural dynamic, equipment and physiological.

**Keywords:** Dynamic Analysis; Dynamic Structural Analysis; Finite Element Method; Rotary-Equipment Base.

## Lista de Figuras

Figura 1.1: Esquemático dos estágios de construção da base. ....	8
Figura 1.2: Locação dos pilares. ....	9
Figura 1.3: Planta da EL. 760,180. ....	9
Figura 1.4: Planta da EL. 762,648. ....	10
Figura 1.5: Planta da EL. 765,710. ....	10
Figura 1.6: Corte longitudinal. ....	11
Figura 1.7: Corte transversal. ....	12
Figura 1.8: Vista isométrica do radier de apoio da Base. ....	12
Figura 1.9: Radier – identificação dos blocos de coroamento das colunas de <i>jet grouting</i> . ....	13
Figura 6.1: Modelo estrutural em elementos finitos. ....	18
Figura 6.2: Interação com o solo, representada por molas lineares de Winkler. ....	19
Figura 7.1: Corte esquemático do britador. ....	23
Figura 10.1: Forças dinâmicas aplicadas ao modelo por coxim (hipótese de base rígida) – um britador em funcionamento em regime permanente. ....	30
Figura 10.2: Pontos de cálculo de velocidade e aceleração – EL 765,710. ....	33
Figura 10.3: Pontos de cálculo de velocidade e aceleração – EL 762,648. ....	33
Figura 10.4: Pontos de cálculo de velocidade e aceleração – EL 757,310 e 758,310. ....	34
Figura 10.5: Diagrama de interação – P-1. ....	38
Figura 10.6: Diagrama de interação – P-2. ....	39
Figura 10.7: Diagrama de interação – P-3. ....	39
Figura 10.8: Diagrama de interação – P-4. ....	40
Figura 10.9: Diagrama de interação – P-5. ....	40
Figura 10.10: Diagrama de interação – P-6. ....	41
Figura 11.1: Limites de aceleração (RMS) em função da frequência e tempo de exposição para nível reduzido de eficiência (fadiga) – Figura modificada da ISO 2631. ....	46
Figura 11.2: Definição das classes dos equipamentos – Figura adaptada da ISO 10816. ....	47
Figura 11.3: Zonas de avaliação – imagem retirada da ISO 10816. ....	48
Figura 11.4: Limites de vibração conforme ISO 10816. ....	48
Figura 12.1: Modo 1 – frequência de 5,66 Hz. ....	51
Figura 12.2: Modo 2 – frequência de 5,94 Hz. ....	51
Figura 12.3: Modo 3 – frequência de 8,12 Hz. ....	52
Figura 12.4: Modo 4 – frequência de 9,15 Hz. ....	52
Figura 12.5: Modo 5 – frequência de 9,26 Hz. ....	53
Figura 12.6: Modo 6 – frequência de 10,07 Hz. ....	53
Figura 12.7: Modo 7 – frequência de 13,37 Hz. ....	54
Figura 12.8: Modo 8 – frequência de 16,49 Hz. ....	54
Figura 12.9: Modo 9 – frequência de 18,27 Hz. ....	55
Figura 12.10: Modo 10 – frequência de 21,93. ....	55

## Lista de Tabelas

Tabela 4.1: Atividades realizadas. ....	16
Tabela 5.1: Folha de dados da base dos britadores e radier. ....	17
Tabela 6.1: Propriedades dos materiais utilizados no modelo. ....	18
Tabela 6.2: Interação estrutura-solo – Rigidezes verticais. ....	19
Tabela 6.3: Interação estrutura-solo – Rigidezes horizontais - Blocos BL1 e BL2. ....	19
Tabela 6.4: Interação estrutura-solo – Rigidezes horizontais - Blocos BL3 e BL6. ....	20
Tabela 6.5: Interação estrutura-solo – Rigidezes horizontais - Bloco BL4. ....	21
Tabela 6.6: Interação estrutura-solo – Rigidezes horizontais - Bloco BL5. ....	21
Tabela 7.1: Cargas dinâmicas para um britador em operação – fonte METSO. ....	23
Tabela 7.2: Massas contempladas nas análises dinâmicas. ....	24
Tabela 7.3: Carregamentos estáticos considerados no modelo. ....	24
Tabela 7.4: Combinações de carregamento. ....	24
Tabela 7.5: Peso próprio das estruturas e equipamentos. ....	24
Tabela 7.6: Valores do carregamento de sobrecarga. ....	25
Tabela 7.7: Valores do carregamento de entupimento do chute. ....	25
Tabela 8.1: Resumo dos resultados – Máximos fatores de amplificação dinâmicos. ....	26
Tabela 8.2: Resumo dos resultados – Máximos valores de velocidade e aceleração no regime permanente. ....	26
Tabela 8.3: Resumo dos resultados - Máximos índices de utilização dos componentes em concreto armado da Base. ....	27
Tabela 8.4: Resumo dos resultados – Máximos índices de utilização à fadiga. ....	27
Tabela 10.1: Principais modos naturais de vibração das estruturas. ....	29
Tabela 10.2: Fator de Amplificação Dinâmico (DAF) – Britadores em fase. ....	30
Tabela 10.3: Fator de Amplificação Dinâmico (DAF) – Britadores fora de fase. ....	31
Tabela 10.4: Fator de Amplificação Dinâmico (DAF) – Apenas britador BR-1231EE-01. ....	31
Tabela 10.5: Fator de Amplificação Dinâmico (DAF) – Apenas britador BR-1231EE-02. ....	32
Tabela 10.6: Vibração em regime permanente – britadores em fase (condição crítica). ....	34
Tabela 10.7: Análise das armaduras longitudinais das vigas. ....	35
Tabela 10.8: Análise das armaduras transversais das vigas. ....	37
Tabela 10.9: Análise das armaduras das lajes. ....	37
Tabela 10.10: Análise de fadiga - Concreto. ....	42
Tabela 10.11: Análise de fadiga - Armadura. ....	43
Tabela 11.1: Propriedades do concreto armado. ....	44
Tabela 11.2: Valores de razão de amortecimento viscoso equivalente para concreto armado – CEB. ....	45
Tabela 11.3: Velocidades de vibração admissíveis – DIN 4150-3. ....	45
Tabela 11.4: Resposta humana para vibração - CEB. ....	46
Tabela 11.5: $\Delta\sigma_s$ para armadura passiva em aço CA-50, MPa. ....	50

## Sumário

1.0	INTRODUÇÃO .....	8
2.0	OBJETIVOS .....	14
3.0	BIBLIOGRAFIA.....	15
3.1	NORMAS REQUERIDAS.....	15
3.2	BIBLIOGRAFIA CONSULTADA.....	15
4.0	ESCOPO .....	16
5.0	FOLHA DE DADOS .....	17
6.0	MODELO ESTRUTURAL .....	18
7.0	CARGAS E COMBINAÇÕES .....	23
7.1	IDENTIFICAÇÃO DOS CARREGAMENTOS DINÂMICOS.....	23
7.2	IDENTIFICAÇÃO DOS CARREGAMENTOS ESTÁTICOS.....	24
7.2.1	Peso próprio das estruturas e equipamentos – PP:.....	24
7.2.2	Cargas dos Britadores – CD:.....	25
7.2.3	Cargas devidas à sobrecarga na estrutura – SC:.....	25
7.2.4	Cargas devidas ao entupimento de chute – EC: .....	25
8.0	RESUMO DOS RESULTADOS .....	26
8.1	ANÁLISE DINÂMICA.....	26
8.2	VERIFICAÇÃO DO DIMENSIONAMENTO DOS ELEMENTOS EM CONCRETO ARMADO.....	27
8.3	VERIFICAÇÃO DE FADIGA.....	27
9.0	CONCLUSÕES .....	28
10.0	RESULTADOS GERAIS .....	29
10.1	ANÁLISES DINÂMICAS.....	29
10.1.1	Análise Modal.....	29
10.1.2	Análise de Vibração Forçada – Regime Permanente.....	29
10.2	VERIFICAÇÕES COMPLEMENTARES.....	35
10.2.1	VERIFICAÇÃO DO DIMENSIONAMENTO DOS ELEMENTOS EM CONCRETO ARMADO .....	35
10.2.2	VERIFICAÇÃO DE FADIGA .....	41
11.0	ANEXO I – METODOLOGIA E DESENVOLVIMENTO .....	43
11.1	Modelagem da estrutura .....	44
11.2	Definição dos carregamentos .....	44
11.2.1	Carregamento 1: Peso Próprio – PP .....	44
11.2.2	Carregamento 2: Cargas dos Britadores – CD:.....	44
11.2.3	Carregamento 3: Cargas devidas à sobrecarga na estrutura – SC: ...	44
11.2.4	Carregamento 4: Cargas devidas ao entupimento de chute – EC: ...	44
11.3	CRITÉRIOS PARA ANÁLISE DINÂMICA.....	45
11.3.1	Critério estrutural .....	45
11.3.2	Critério fisiológico .....	46
11.3.3	Critério de equipamento .....	47
11.4	ANÁLISES COMPLEMENTARES.....	48
11.4.1	ANÁLISE DO DIMENSIONAMENTO EM CONCRETO ARMADO .....	48
11.4.2	ANÁLISE DE FADIGA .....	49
12.0	ANEXO II – MODOS NATURAIS DE VIBRAÇÃO DAS ESTRUTURAS.....	51



## 1.0 INTRODUÇÃO

O presente estudo descreve a análise estrutural dinâmica da base dos britadores cônicos GP 500S de fabricação METSO.

A base é uma estrutura em concreto armado e possui função de dar suporte aos britadores, absorvendo as cargas e repassando-as de forma segura ao radier na qual se apoia. O radier suporta a base dos britadores e o prédio de britagem secundária, este construído em estrutura metálica.

O sistema construtivo da base contempla uma etapa de montagem de componentes pré-fabricados e posteriormente o capeamento (concretagem dos nichos, furos e aberturas) da estrutura. Apesar de ser constituída de elementos pré-fabricados, a base em seu estágio final se comporta como uma estrutura monolítica. Os dois estágios são apresentados de forma esquemática na Figura 1.1.

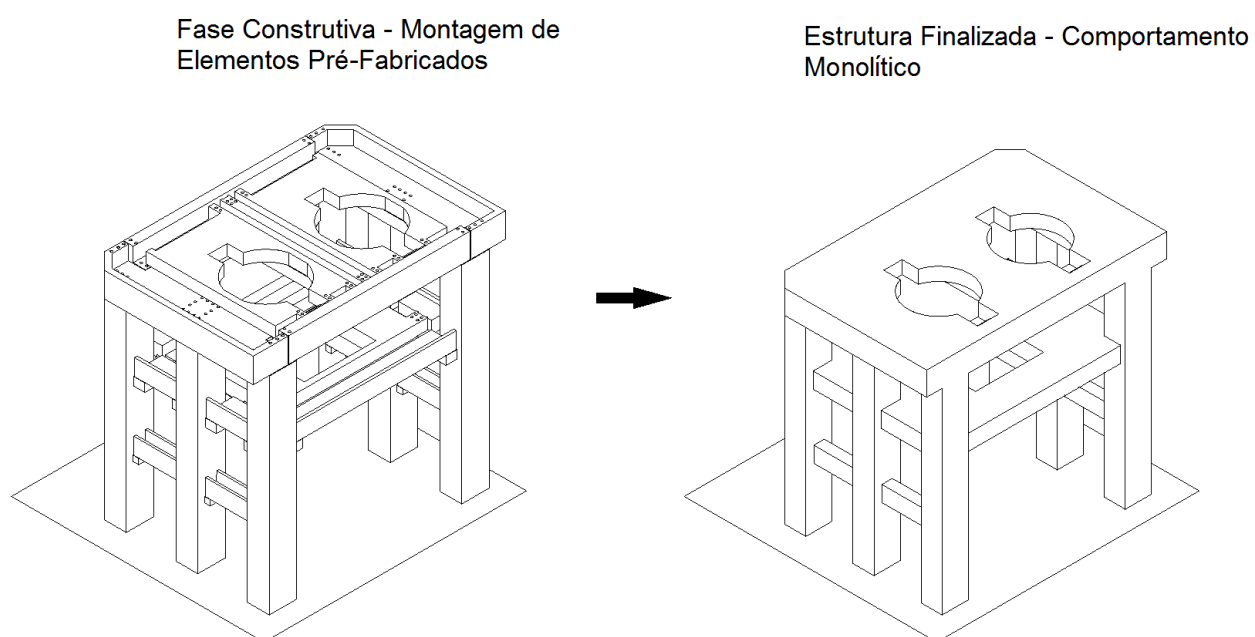


Figura 1.1: Esquemático dos estágios de construção da base.

Da Figura 1.2 a Figura 1.8 são mostrados os eixos, cortes, elevações e os elementos estruturais (vigas, pilares e lajes) da base dos britadores 01 e 02, bem como o radier na qual a mesma se apoiará.

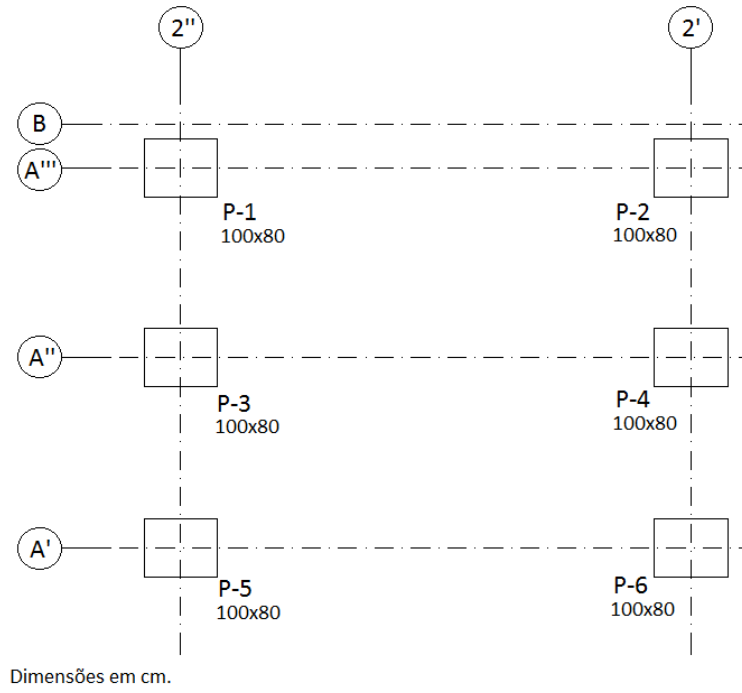


Figura 1.2: Locação dos pilares.

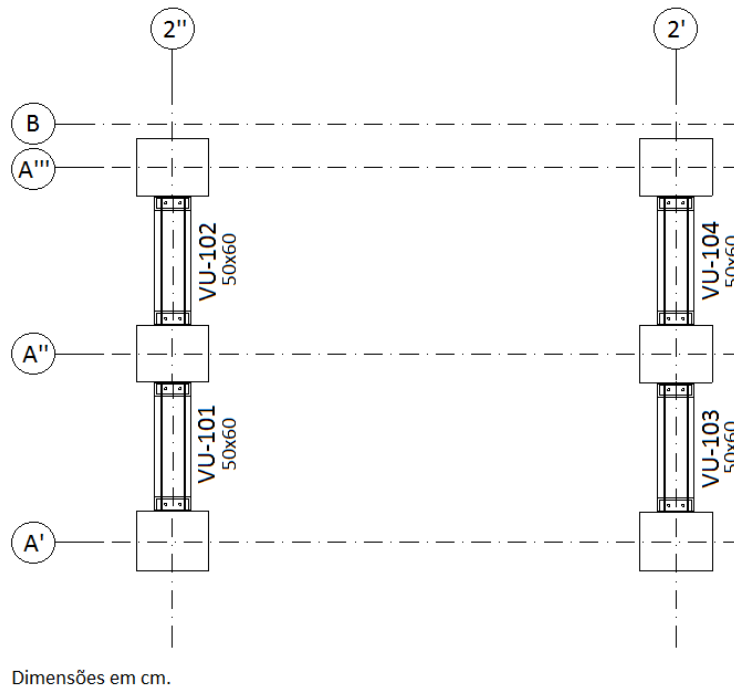
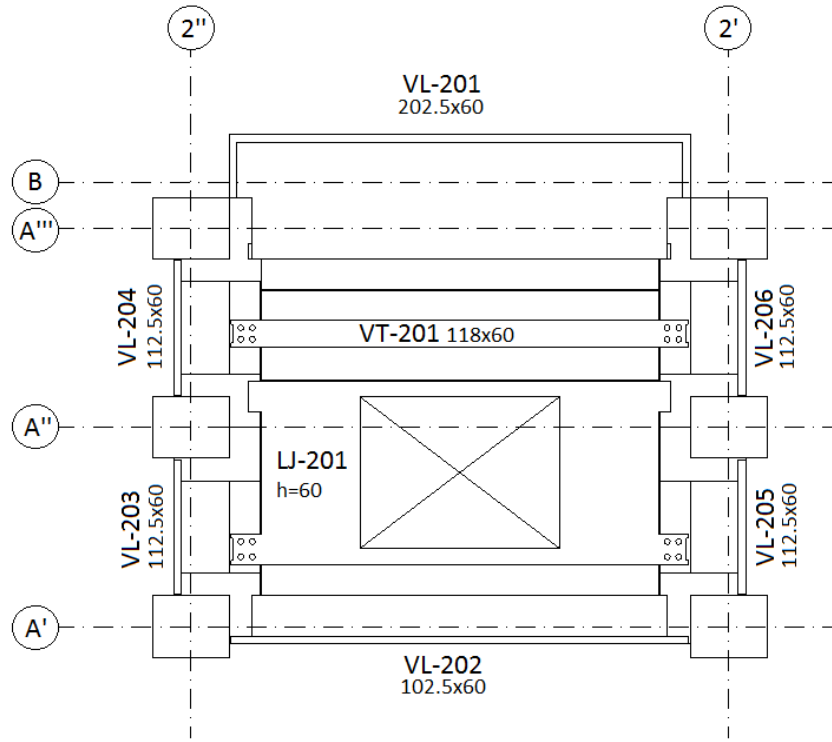
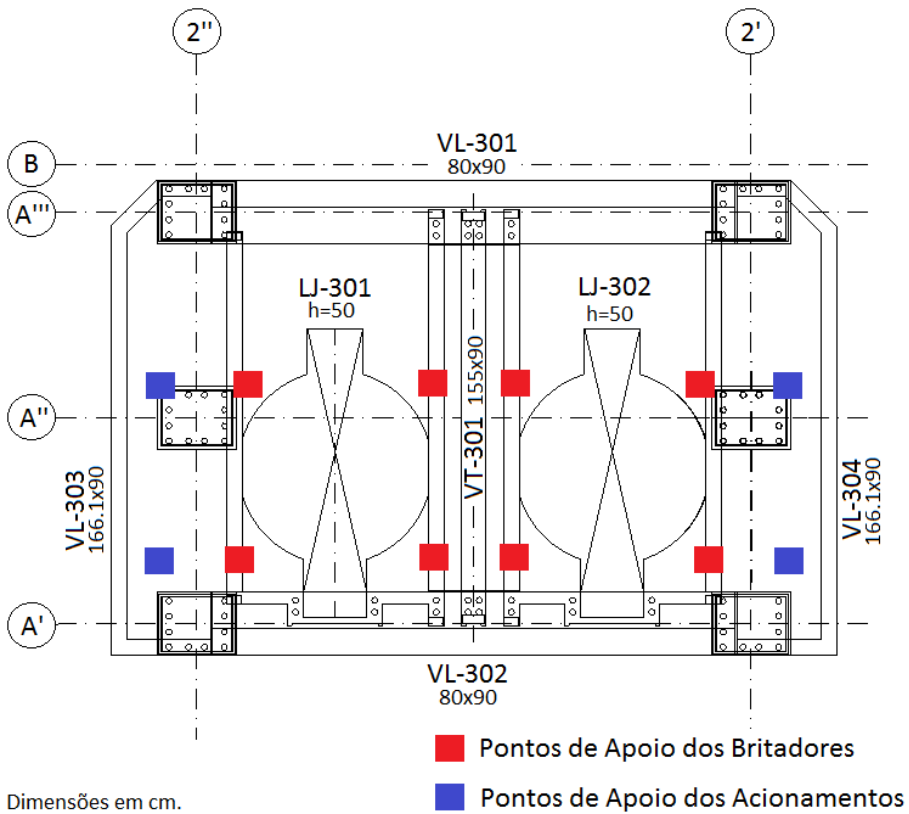


Figura 1.3: Planta da EL. 760,180.



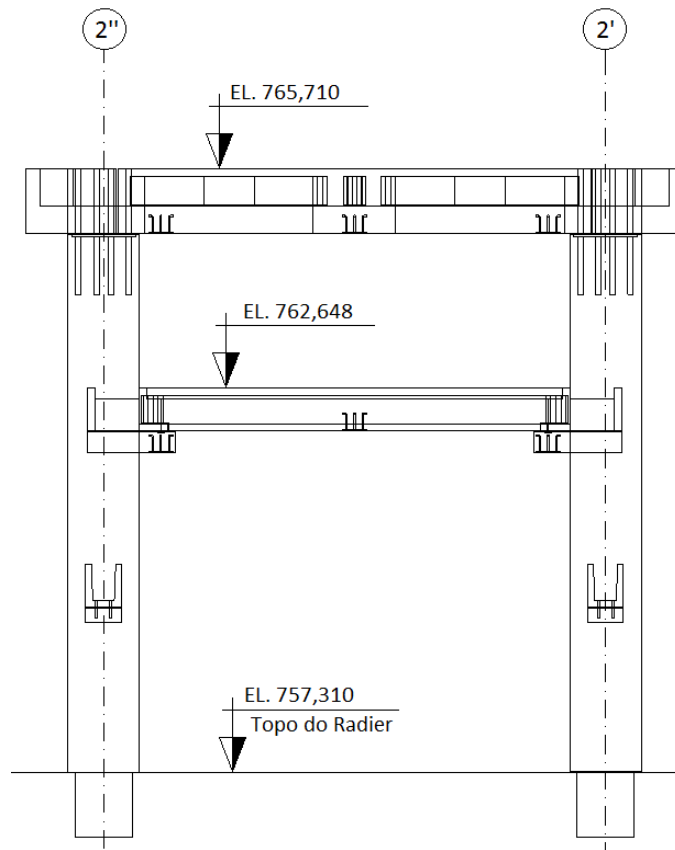
Dimensões em cm.

Figura 1.4: Planta da EL. 762,648.



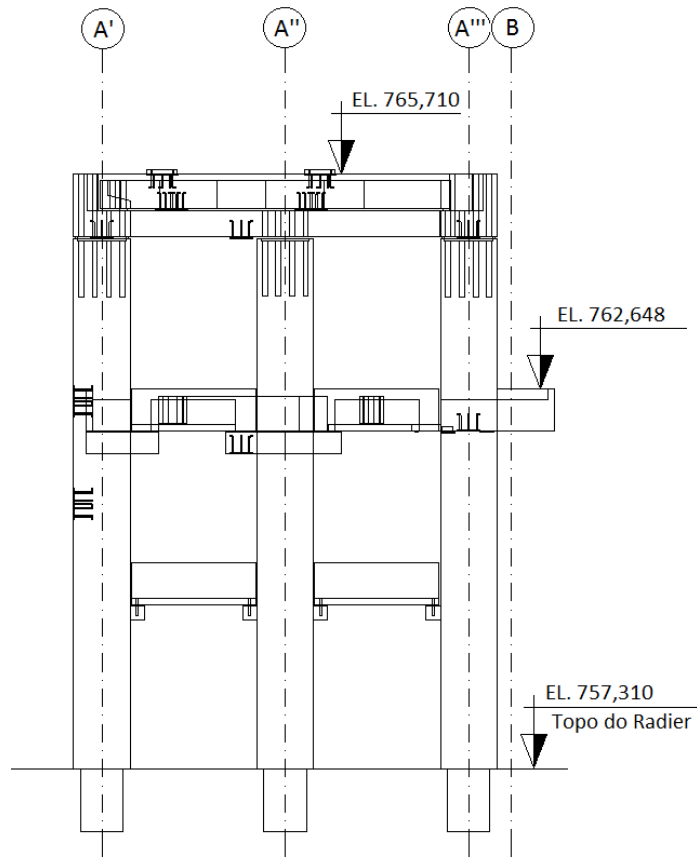
Dimensões em cm.

Figura 1.5: Planta da EL. 765,710.



Elevações em m.

Figura 1.6: Corte longitudinal.



Elevações em m.

Figura 1.7: Corte transversal.

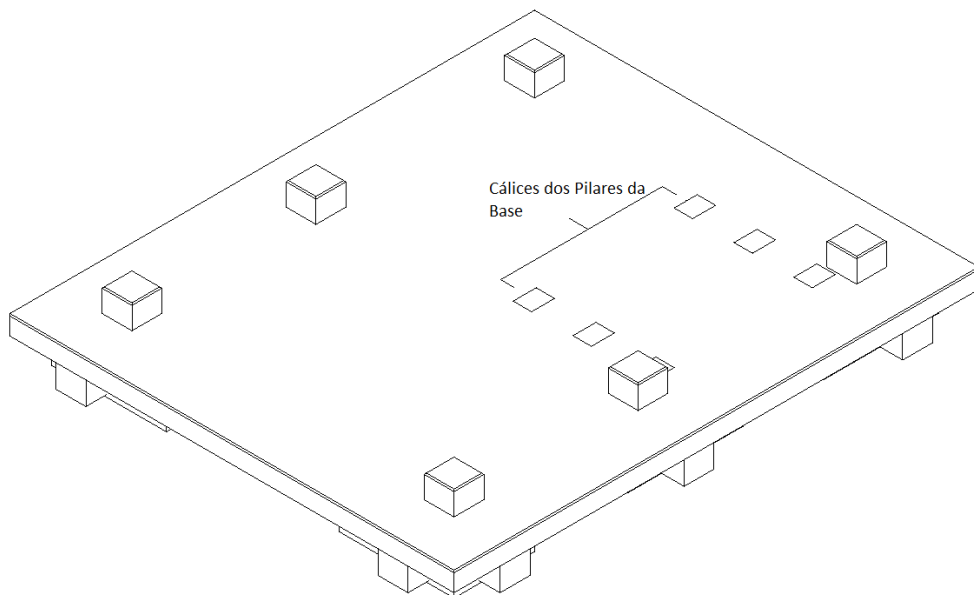


Figura 1.8: Vista isométrica do radier de apoio da Base.

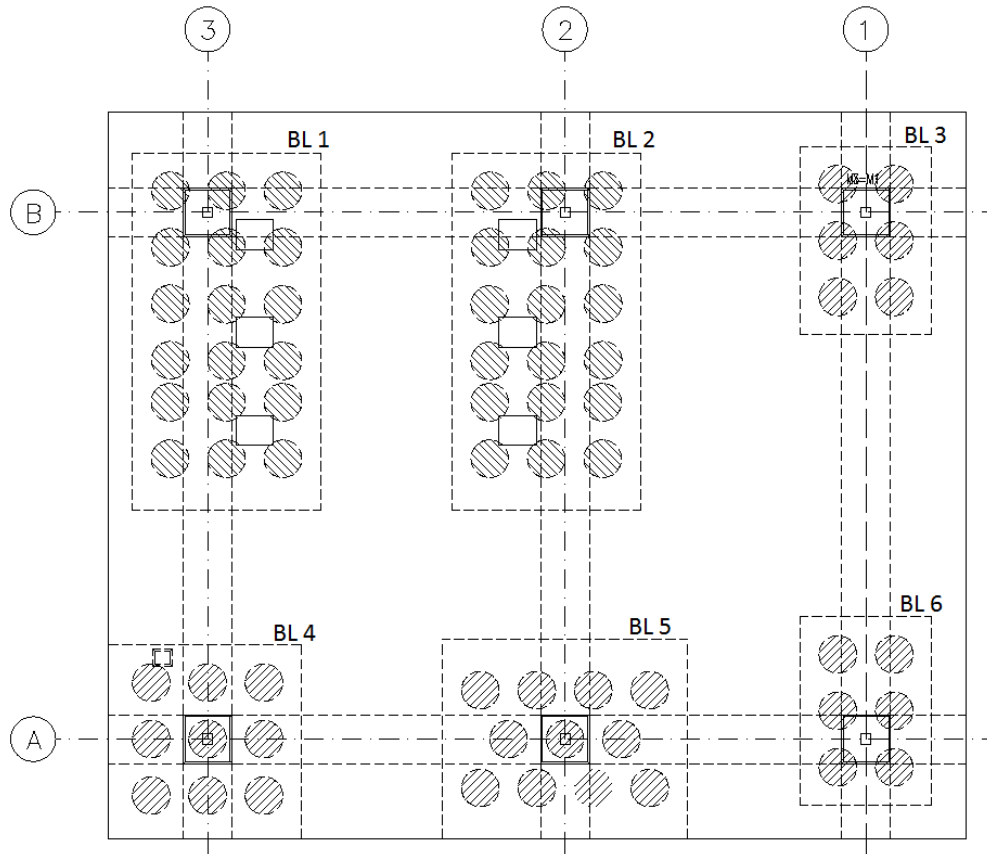


Figura 1.9: Radier – identificação dos blocos de coroamento das colunas de *jet grouting*.

## **2.0 OBJETIVOS**

Avaliar o comportamento do conjunto base-radier diante das solicitações dinâmicas oriundas do funcionamento dos britadores cônicos.

Verificar o dimensionamento normativo dos componentes em concreto armado da base dos britadores, bem como as consequências dos níveis de vibração para a vida útil dos equipamentos e para a resposta humana (critério fisiológico), conforme a lista de atividades apresentada no item 4.0.

### **3.0 BIBLIOGRAFIA**

#### **3.1 NORMAS REQUERIDAS**

Para a presente análise as seguintes normas foram adotadas:

- [1] ABNT, NBR 6118, Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimentos, 2014;
- [2] ABNT, NBR 8681, Ações e segurança nas estruturas – Procedimento, 2003;
- [3] DIN 4150-3:1999, Structural Vibration in Buildings: Effects on Structures;
- [4] ISO 2631-1:1997, Mechanical vibration and shock – Evaluation of human exposure to whole-body vibration -Part 1: General requirements;
- [5] ISO 10816-1:1995, Mechanical vibration – Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts - Part 1: General guidelines;
- [6] Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings, 2004.

#### **3.2 BIBLIOGRAFIA CONSULTADA**

Para a presente análise estrutural as seguintes referências foram consultadas:

- [7] CEB, Vibration Problems in Structures, Practical Guidelines, 1991;
- [8] Properties of Concrete for use in Eurocode 2 – Cement and Concrete Industry Publication.



#### 4.0 ESCOPO

A Tabela 4.1 lista as atividades que foram desenvolvidas no estudo e que são apresentadas neste documento.

Tabela 4.1: Atividades realizadas.

Nº	Descrição	Item apresentado
1	Modelagem da estrutura em elementos finitos	6.0
2	Cálculo e combinações de cargas	7.0
3	Análise dinâmica da estrutura da base dos britadores	10.1
4	Verificação da resistência dos elementos em concreto armado da base dos britadores	10.2.1
5	Verificação à fadiga dos elementos em concreto armado da base dos britadores	10.2.2

## 5.0 FOLHA DE DADOS

A Tabela 5.1 apresenta os dados gerais da base dos britadores e radier.

Tabela 5.1: Folha de dados da base dos britadores e radier.

<b>Dados Gerais</b>	
Elevações	760,180 m
	762,648 m
	765,710 m
Número de filas	3
Número de eixos	2
Largura total	8,00 m
Altura total	8,40 m
Britadores	01 e 02
Largura do radier	19,30 m
Comprimento do radier	22,80 m
Altura máxima do radier	2,45 m
Espessura da laje do radier	0,85 m

## 6.0 MODELO ESTRUTURAL

Este item apresenta o modelo computacional utilizado para as análises do presente estudo, com seu respectivo sistema de coordenadas.

O modelo estrutural em elementos finitos contempla além da Base, o radier na qual a mesma se apoia, e foi elaborado utilizando-se o software *Femap/NX Nastran*®. O modelo é exibido na Figura 6.1.

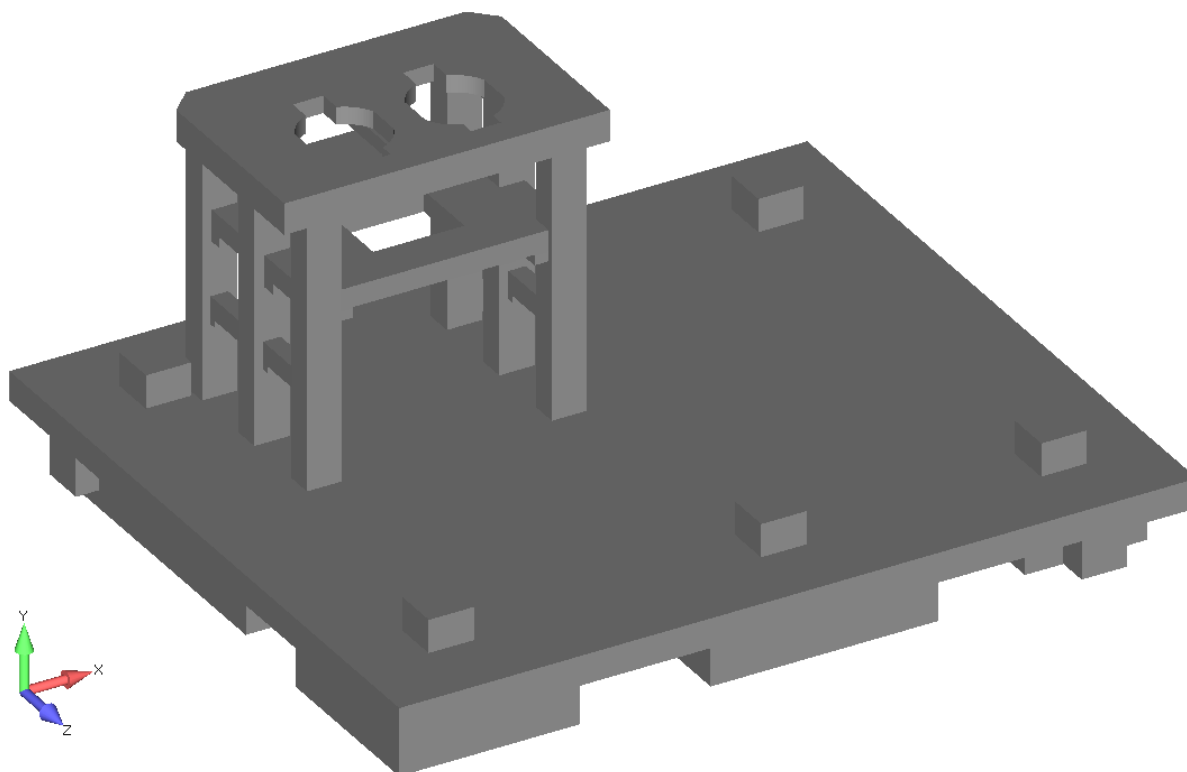


Figura 6.1: Modelo estrutural em elementos finitos.

As propriedades dos materiais utilizados no modelo computacional são listadas Tabela 6.1.

Tabela 6.1: Propriedades dos materiais utilizados no modelo.

Concreto	
fck [MPa]	30
E <sub>Tangencial</sub> [GPa]	30,67
E <sub>Secante</sub> [GPa]	26,84
Densidade [kg/m <sup>3</sup> ]	2500
Coef. Dilatação [°C <sup>-1</sup> ]	1,0x10 <sup>-5</sup>
Razão de Amortecimento viscoso - ζ [-]	0,04
Aço das Armaduras	
f <sub>yk</sub> [MPa]	500
E [GPa]	210

Densidade [kg/m <sup>3</sup> ]	7850
Coef. Dilatação [°C <sup>-1</sup> ]	1,2x10 <sup>-5</sup>

A modelagem numérica da interação entre o radier e o solo, ou seja, a determinação das várias rigidezes do solo foi realizada utilizando as informações contidas no documento específico, com descrição da condição reforçada do solo por injeção de *Jet Grouting*.

A rigidez vertical foi determinada como a rigidez em série da coluna de *Jet Grouting* e o solo de embutimento da mesma. Por sua vez, as rigidezes laterais foram adotadas como crescente linearmente com a profundidade.

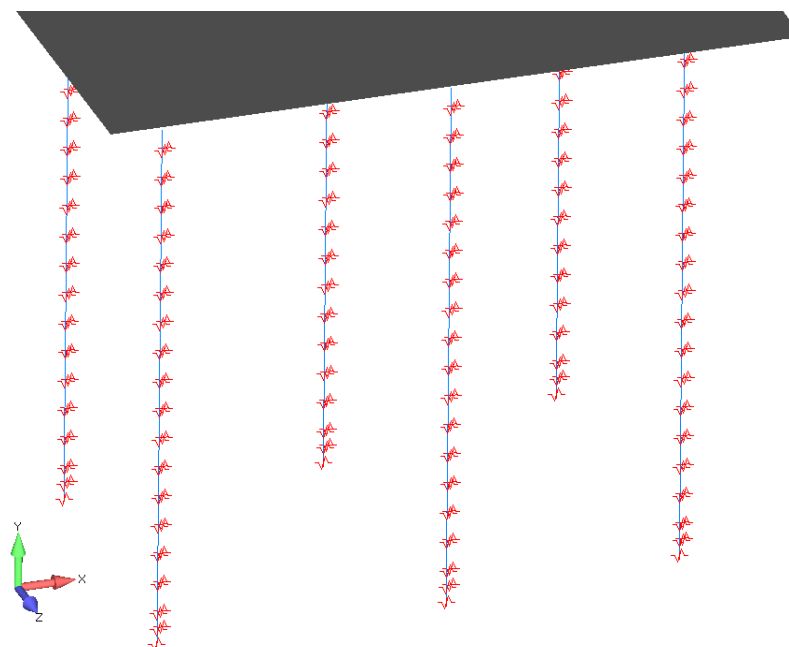


Figura 6.2: Interação com o solo, representada por molas lineares de Winkler.

A Tabela 6.2 apresenta as rigidezes verticais destacadas por bloco de coroamento (ver Figura 1.9). De forma análoga, da Tabela 6.3 a Tabela 6.6 são exibidas as rigidezes horizontais com as direções conforme sistema de referência apresentado na Figura 6.2.

Tabela 6.2: Interação estrutura-solo – Rigidezes verticais.

Bloco/Coluna de Jet Grouting	Rigidez RY [N/m]
BL1	4,87E+09
BL2	4,87E+09
BL3	1,80E+09
BL4	2,72E+09
BL5	3,54E+09
BL6	1,80E+09

Tabela 6.3: Interação estrutura-solo – Rigidezes horizontais - Blocos BL1 e BL2.

Profundidade [m]	Rigidez RX [N/m]	Rigidez RZ [N/m]
1,0	1,40E+08	7,36E+07
2,0	2,80E+08	1,47E+08
3,0	4,19E+08	2,21E+08
4,0	5,59E+08	2,94E+08
5,0	6,99E+08	3,68E+08
6,0	8,39E+08	4,41E+08
7,0	9,79E+08	5,15E+08
8,0	1,12E+09	5,89E+08
9,0	1,26E+09	6,62E+08
10,0	1,40E+09	7,36E+08
11,0	1,54E+09	8,09E+08
12,0	1,68E+09	8,83E+08
13,0	1,82E+09	9,56E+08
14,0	1,96E+09	1,03E+09
15,0	2,10E+09	1,10E+09
16,0	2,24E+09	1,18E+09
17,0	2,38E+09	1,25E+09
17,6	2,47E+09	1,30E+09

Tabela 6.4: Interação estrutura-solo – Rigidezes horizontais - Blocos BL3 e BL6.

Profundidade [m]	Rigidez RX [N/m]	Rigidez RZ [N/m]
1,0	7,36E+07	5,15E+07
2,0	1,47E+08	1,03E+08
3,0	2,21E+08	1,55E+08
4,0	2,94E+08	2,06E+08
5,0	3,68E+08	2,58E+08
6,0	4,41E+08	3,09E+08
7,0	5,15E+08	3,61E+08
8,0	5,89E+08	4,12E+08
9,0	6,62E+08	4,64E+08
10,0	7,36E+08	5,15E+08
11,0	8,09E+08	5,67E+08
12,0	8,83E+08	6,18E+08
13,0	9,56E+08	6,70E+08
14,0	1,03E+09	7,21E+08
15,0	1,10E+09	7,73E+08
16,0	1,18E+09	8,24E+08

17,0	1,25E+09	8,76E+08
17,6	1,30E+09	9,09E+08

Tabela 6.5: Interação estrutura-solo – Rigidezes horizontais - Bloco BL4.

Profundidade [m]	Rigidez RX [N/m]	Rigidez RZ [N/m]
1,0	7,58E+07	7,58E+07
2,0	1,52E+08	1,52E+08
3,0	2,27E+08	2,27E+08
4,0	3,03E+08	3,03E+08
5,0	3,79E+08	3,79E+08
6,0	4,55E+08	4,55E+08
7,0	5,30E+08	5,30E+08
8,0	6,06E+08	6,06E+08
9,0	6,82E+08	6,82E+08
10,0	7,58E+08	7,58E+08
11,0	8,34E+08	8,34E+08
12,0	9,09E+08	9,09E+08
13,0	9,85E+08	9,85E+08
14,0	1,06E+09	1,06E+09
15,0	1,14E+09	1,14E+09
16,0	1,21E+09	1,21E+09
17,0	1,29E+09	1,29E+09
17,6	1,34E+09	1,34E+09

Tabela 6.6: Interação estrutura-solo – Rigidezes horizontais - Bloco BL5.

Profundidade [m]	Rigidez RX [N/m]	Rigidez RZ [N/m]
1,0	7,80E+07	9,56E+07
2,0	1,56E+08	1,91E+08
3,0	2,34E+08	2,87E+08
4,0	3,12E+08	3,83E+08
5,0	3,90E+08	4,78E+08
6,0	4,68E+08	5,74E+08
7,0	5,46E+08	6,70E+08
8,0	6,24E+08	7,65E+08
9,0	7,02E+08	8,61E+08
10,0	7,80E+08	9,56E+08
11,0	8,58E+08	1,05E+09
12,0	9,36E+08	1,15E+09

13,0	1,01E+09	1,24E+09
14,0	1,09E+09	1,34E+09
15,0	1,17E+09	1,43E+09
16,0	1,25E+09	1,53E+09
17,0	1,33E+09	1,63E+09
17,6	1,38E+09	1,69E+09

## 7.0 CARGAS E COMBINAÇÕES

Nesta seção são definidos os carregamentos atuantes, que são combinados para que se verifique a estrutura em suas diferentes condições de operação. A determinação das combinações de carregamento foi realizada conforme as normas ABNT NBR 6118:2014 [1] e ABNT NBR 8681:2003 [2].

### 7.1 IDENTIFICAÇÃO DOS CARREGAMENTOS DINÂMICOS

As cargas dinâmicas atuantes na Base são originadas pela operação dos britadores 01 e 02, do tipo GP 500S de fabricação METSO. A Figura 7.1 apresenta um corte esquemático do britador, apontando seus principais componentes.

#### Componentes Principais

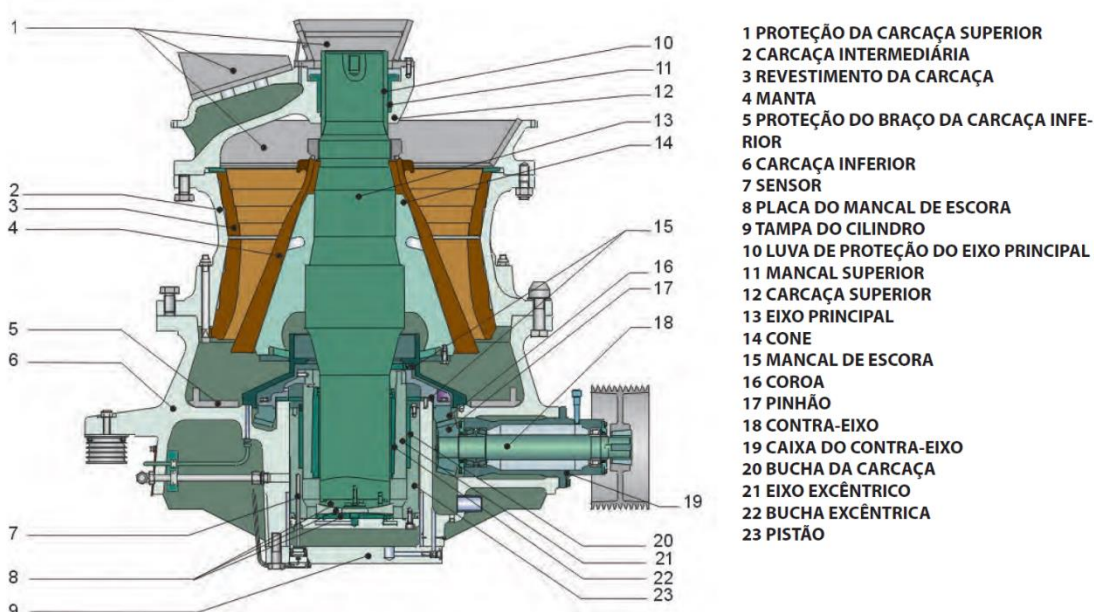


Figura 7.1: Corte esquemático do britador.

O princípio de funcionamento destes britadores consiste no movimento de um cone (cabeça) fabricado de forma excêntrica, que ao girar sobre um eixo, ora se aproxima do bojo, ora se afasta. O material é admitido durante o afastamento, e é comprimido durante a aproximação do cone, reduzindo assim sua granulometria. As cargas verticais e laterais são geradas por esse movimento.

Tabela 7.1: Cargas dinâmicas para um britador em operação – fonte METSO.

Direção	Carga [kN]	
	Por coxim (apoio)	Total (x4 coxins)
Horizontal - Regime Permanente	4,20	16,80
Horizontal - Regime Transiente	19,40	77,60
Vertical (Permanente e Transiente)	11,70	46,80

A Tabela 7.2 apresenta as massas consideradas nas análises dinâmicas realizadas.



Tabela 7.2: Massas contempladas nas análises dinâmicas.

Descrição	Peso [t]
Base	252,48
Radier	1721,77
Britadores 01 e 02	92,78
Unidades hidráulicas dos britadores	0,70
Chute de descarga dos britadores	11,46
Prédio de britagem secundária e equipamentos	385,65
Total	2464,84

## 7.2 IDENTIFICAÇÃO DOS CARREGAMENTOS ESTÁTICOS

Nesta seção são definidos os demais carregamentos na estrutura (Tabela 7.3), que são combinados na Tabela 7.4. A descrição completa desses carregamentos está apresentada no item 11.0.

Tabela 7.3: Carregamentos estáticos considerados no modelo.

Número	Descrição	Símbolo
1	Peso próprio	PP
2	Cargas dos Britadores	CD
3	Sobrecarga de Operação	SC
4	Entupimento de Chute	EC

Tabela 7.4: Combinações de carregamento.

Identificação da combinação	Carregamentos
A	1,4(PP)
B	1,4(PP)+1,4(CD)+0,98*(SC)+0,84*(EC)
C	1,4(PP)+1,4(SC)+0,98*(CD)+0,84*(EC)
D	1,4(PP)+1,2(EC)+0,98*(CD+SC)

### 7.2.1 Peso próprio das estruturas e equipamentos – PP:

Tabela 7.5: Peso próprio das estruturas e equipamentos.

Descrição	Peso [tf]
Base	252,48
Radier	1721,77
Britadores 01 e 02 com unidades hidráulicas	93,48
Prédio de britagem secundária e equipamentos	385,65
Total	2257,59

### 7.2.2 Cargas dos Britadores – CD:

Estas são as cargas dinâmicas apresentadas na Tabela 7.1, consideradas de forma pseudo-estática, devidamente amplificadas pelo DAF (Fator de Amplificação Dinâmica).

### 7.2.3 Cargas devidas à sobrecarga na estrutura – SC:

A Tabela 7.6 exibe o valor da sobrecarga considerada nas análises e as respectivas cargas aplicadas no modelo computacional, nas lajes das elevações da base do britador. Tais cargas ocorrem para condições de manutenção ou acúmulo de material.

Tabela 7.6: Valores do carregamento de sobrecarga.

Elevação	Área [m <sup>2</sup> ]	Valor [kgf/m <sup>2</sup> ]	Carga [tf]
762.648	39,97	500	19,99
765.710	43,71		21,86
Total			41,85

### 7.2.4 Cargas devidas ao entupimento de chute – EC:

A Tabela 7.6 apresenta o valor da carga aplicada no modelo referente à condição de entupimento do chute de descarga dos britadores.

Tabela 7.7: Valores do carregamento de entupimento do chute.

Equipamento	Volume do chute [m <sup>3</sup> ]	Densidade do minério [kg/m <sup>3</sup> ]	Carga total [tf]
Chute de descarga dos britadores	4,83	2700	13,04

## 8.0 RESUMO DOS RESULTADOS

Neste item são apresentados os resumos dos resultados das análises realizadas. Os resultados detalhados estão no item 10.0.

### 8.1 ANÁLISE DINÂMICA

A Tabela 8.1 exibe os maiores valores dos fatores de ampliação dinâmicos (DAF's) calculados para regime permanente, para cada uma das quatro condições de operação dos britadores.

Tabela 8.1: Resumo dos resultados – Máximos fatores de amplificação dinâmicos.

Condição de operação	DAF
Britadores em fase	3,22
Britadores fora de fase	3,19
Apenas britador 01	3,07
Apenas britador 02	3,10

Os valores de DAF para cada componente estrutural da Base, nas quatro condições de operação, são apresentados no item 10.1.2.

Por sua vez, a tabela abaixo lista os máximos valores de velocidade e aceleração por elevação, destacando o respectivo ponto de cálculo, para o regime permanente.

Tabela 8.2: Resumo dos resultados – Máximos valores de velocidade e aceleração no regime permanente.

Elevação	Velocidade de pico [mm/s]	Aceleração de pico [mm/s <sup>2</sup> ]	Ponto
765.710	9,88	273,0	H
762.648	6,70	182,7	N
757.310 / 758.310	1,46	39,9	U

Para critério dinâmico estrutural, os valores calculados estão abaixo do limite recomendado pela DIN 4150-3 [3] em regime permanente (10 mm/s). Portanto, a estrutura encontra-se em conformidade neste quesito.

O maior nível de vibração RMS calculado para a estrutura foi 6,99 mm/s, abaixo do limite de 7,1 mm/s estabelecido pela ISO 10816 [5] para condição de operação contínua classificada como “normal”, para este tipo de equipamento (classe IV). Logo, na avaliação dos níveis de vibração para critério de equipamento, a estrutura também se encontra conforme.

Analogamente, em termos de critério fisiológico (resposta humana) de acordo com a CEB [7] a vibração se enquadra como “desagradável”, porém abaixo da faixa que a tornaria intolerável.

A ISO 2631 [4] estabelece um tempo de exposição máximo permissível de aproximadamente 16 horas (acima da duração de um turno de trabalho), diante da

vibração causada pelo funcionamento dos britadores, deste modo, a estrutura também se encontra adequada neste critério.

Os resultados detalhados estão apresentados no item 10.1.2.

## 8.2 VERIFICAÇÃO DO DIMENSIONAMENTO DOS ELEMENTOS EM CONCRETO ARMADO

A análise realizada para os componentes em concreto armado da Base dos britadores indicou que os mesmos estão adequados para resistir aos esforços dinâmicos solicitantes, bem como atendem aos critérios da norma NBR 6118:2014 [1].

A Tabela 8.3 exibe os maiores valores de índice de utilização (I.U.) por tipo de elemento estrutural em concreto armado da Base. Os resultados detalhados estão no item 10.2.1.

Tabela 8.3: Resumo dos resultados - Máximos índices de utilização dos componentes em concreto armado da Base.

Tipo de elemento	IUmáx	Critério	Condição
Laje	0,98	Armadura longitudinal mínima	Aprovado
Viga	0,81	Armadura transversal mínima	Aprovado
Pilar	0,54	Estabilidade	Aprovado

## 8.3 VERIFICAÇÃO DE FADIGA

Análise de fadiga foi realizada conforme as prescrições da NBR 6118:2014 [1]. Observou-se que as variações de tensões, ocasionadas pela operação dos britadores cônicos, estão abaixo dos valores limites para o concreto e armadura.

A Tabela 8.4 sintetiza os maiores valores verificados para ambos os materiais

Tabela 8.4: Resumo dos resultados – Máximos índices de utilização à fadiga.

Tipo de elemento	Material	IUmáx	Condição
Laje	Concreto	0,41	Aprovado
	Armadura	0,38	Aprovado
Viga	Concreto	0,23	Aprovado
	Armadura	0,21	Aprovado
Pilar	Concreto	0,15	Aprovado
	Armadura	0,13	Aprovado

Os resultados de forma detalhada são apresentados no item 10.2.2.

## 9.0 CONCLUSÕES

- As análises dinâmicas indicaram, que mesmo para a condição de operação crítica, correspondente à operação simultânea e em fase dos britadores 01 e 02, os valores de velocidade e aceleração calculados estão abaixo dos limites recomendados por norma, sendo a estrutura aprovada para os critérios verificados, a saber: dinâmico estrutural, de equipamento e fisiológico.
- A análise dos componentes em concreto armado da Base não indicou índices de utilização acima do permissível. Portanto, os elementos se encontram adequados para resistir aos esforços solicitantes, bem como atendem aos critérios normativos aplicáveis.
- A verificação da fadiga em concreto e armadura dos componentes da base, diante das solicitações dinâmicas, apresentou baixa probabilidade instauração do fenômeno, com todos os índices de utilização inferiores ao limite estabelecido por norma.
- Os valores de velocidade e aceleração nos pontos de vinculação entre as colunas do Prédio de Britagem (estrutura metálica) e o radier foram calculados. Apesar de não se observar valores elevados, não é possível determinar com precisão as consequências desses para o prédio no âmbito deste estudo. Portanto, recomenda-se a verificação específica da estrutura do prédio, contemplando seus parâmetros estruturais.

## 10.0 RESULTADOS GERAIS

Nessa seção são apresentados os resultados obtidos em todas as análises estruturais realizadas. A metodologia utilizada é descrita no item 11.0.

### 10.1 ANÁLISES DINÂMICAS

#### 10.1.1 Análise Modal

A Tabela 10.1 apresenta os dez principais modos de vibração do sistema Base-Radier, indicando o respectivo grau de liberdade predominante na vibração. As direções indicadas na tabela são referentes ao sistema de coordenadas exibido na Figura 6.1.

O detalhe dos modos é apresentado no Anexo II (item 12.0).

Tabela 10.1: Principais modos naturais de vibração das estruturas.

Modo Natural		Descrição do Modo de Vibração
Nº	Frequência [Hz]	
1	5,66	Translação Longitudinal (TX)
2	5,94	Translação Transversal (TZ)
3	8,12	Rotação Vertical (RY)
4	9,15	Rotação Vertical (RY)
5	9,26	Translação Longitudinal (TX)
6	10,07	Translação Transversal (TZ)
7	13,37	Translação Vertical (TY)
8	16,49	Translação Vertical (TY)
9	18,27	Translação Vertical (TY)
10	21,93	Rotação Longitudinal (RX)

#### 10.1.2 Análise de Vibração Forçada – Regime Permanente

O objetivo dessa análise é avaliar a resposta da estrutura no tempo diante das excitações provocadas pela operação dos britadores em regime permanente. Definiram-se, como entrada, forças de excitação senoidais (harmônicas) para simular a operação de cada britador, aplicadas diretamente à estrutura da Base nos pontos destacados na Figura 1.5 nas três direções ortogonais.

As cargas dinâmicas devidas ao funcionamento de um britador em regime permanente nos planos vertical e horizontal, por coxim, são respectivamente 11,7 e 4,2 kN. Por sua vez, a frequência de rotação do cone (excêntrico), conseqüentemente a frequência de oscilação das cargas, foi 260 RPM (4,33 Hz).

A razão de amortecimento estrutural foi determinada como 0,04, conforme as recomendações da CEB [7].

O módulo de elasticidade utilizado foi o tangencial ( $E_{\text{Tangencial}} = 30,67$  GPa). A opção pela escolha deste em detrimento ao módulo de elasticidade secante ( $E_{\text{Secante}} = 28,84$  GPa), baseia-se no fato de que o módulo de elasticidade dinâmico aproxima-se significativamente do módulo de elasticidade estático tangencial (ver ref. [8]). Adicionalmente, conforme a CEB (ref. [7]), o módulo de elasticidade determinado sobre solicitações dinâmicas, excludente situações de impacto, pode alcançar valores

até 20% superiores ao módulo de elasticidade determinado para cargas quasi-estáticas.

A Figura 10.1 apresenta graficamente um trecho da função de forças utilizada como entrada do programa, para a simulação da operação de um britador GP 500S em regime permanente.

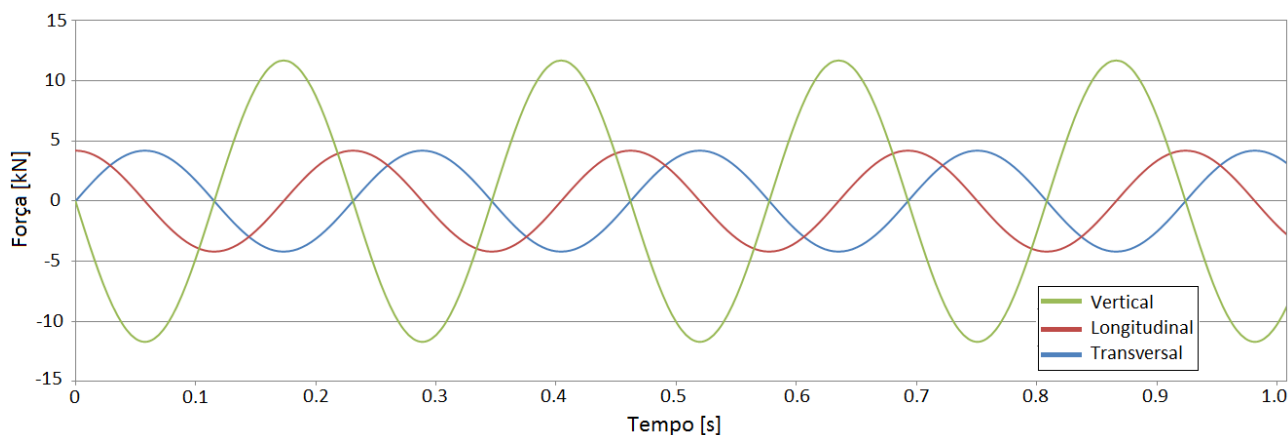


Figura 10.1: Forças dinâmicas aplicadas ao modelo por coxim (hipótese de base rígida) – um britador em funcionamento em regime permanente.

Durante as análises quatro condições foram avaliadas: os dois britadores operando simultaneamente e em fase; ambos operando simultaneamente fora de fase e apenas um britador operando por vez.

Para a posterior verificação estrutural dos componentes da base, calculou-se o fator de amplificação dinâmico (DAF - Dynamic Amplification Factor). Esse fator pode ser determinado como a razão entre o deslocamento dinâmico e o estático, conforme descrito na Equação 7.1.

$$DAF = \frac{\delta_{\text{dinâmico}}}{\delta_{\text{estático}}}$$

Equação 7.1: Equação do fator de amplificação dinâmico (DAF).

Abaixo estão listados os valores dos fatores de amplificação (*DAF's*) calculados para cada elemento estrutural da base, para as quatro situações de operação consideradas.

Tabela 10.2: Fator de Amplificação Dinâmico (DAF) – Britadores em fase.

Elemento	DAF
LJ-301/302	3,12
VL-301	3,11
VL-302	3,18
VL-303	3,13
VL-304	3,12
VT-301	3,10
LJ-201	2,69

VL-201	2,74
VL-202	2,74
VL-203	2,77
VL-204	2,75
VL-205	2,66
VL-206	2,68
VT-201	2,69
VU-101	2,42
VU-102	2,69
VU-103	2,36
VU-104	2,66
P-1	3,10
P-2	3,00
P-3	3,13
P-4	3,05
P-5	3,22
P-6	3,14

Tabela 10.3: Fator de Amplificação Dinâmico (DAF) – Britadores fora de fase.

<b>Elemento</b>	<b>DAF</b>
LJ-301/302	2,81
VL-301	3,10
VL-302	3,14
VL-303	2,74
VL-304	3,14
VT-301	3,18
LJ-201	3,09
VL-201	2,54
VL-202	3,19
VL-203	2,66
VL-204	2,49
VL-205	3,17
VL-206	3,08
VT-201	2,64
VU-101	2,35
VU-102	2,27
VU-103	3,09
VU-104	2,46
P-1	2,76
P-2	3,09
P-3	2,78
P-4	3,15
P-5	2,96
P-6	3,13

Tabela 10.4: Fator de Amplificação Dinâmico (DAF) – Apenas britador BR-1231EE-01.



<b>Elemento</b>	<b>DAF</b>
LJ-301/302	2,68
VL-301	2,45
VL-302	2,82
VL-303	2,70
VL-304	3,07
VT-301	2,50
LJ-201	2,04
VL-201	2,09
VL-202	2,14
VL-203	2,26
VL-204	2,14
VL-205	2,02
VL-206	2,07
VT-201	2,03
VU-101	1,81
VU-102	2,03
VU-103	2,29
VU-104	2,51
P-1	2,56
P-2	2,35
P-3	2,73
P-4	2,99
P-5	3,07
P-6	2,69

Tabela 10.5: Fator de Amplificação Dinâmica (DAF) – Apenas britador BR-1231EE-02.

<b>Elemento</b>	<b>DAF</b>
LJ-301/302	2,97
VL-301	2,47
VL-302	3,01
VL-303	2,96
VL-304	2,54
VT-301	3,04
LJ-201	2,69
VL-201	2,71
VL-202	2,72
VL-203	2,67
VL-204	2,67
VL-205	2,11
VL-206	2,08
VT-201	2,68
VU-101	2,37
VU-102	2,65
VU-103	1,78
VU-104	2,20

P-1	2,97
P-2	2,45
P-3	2,95
P-4	2,46
P-5	2,97
P-6	3,10

Observou-se que a condição mais severa para a estrutura é a operação simultânea em fase dos britadores, para a qual se obteve o maior valor do DAF, sendo o mesmo igual a 3,22 (ver Tabela 10.2). Os valores de velocidade, aceleração e deslocamento calculados para vários pontos de interesse ao longo da base e radier são listados na sequência, bem como a indicação desses pontos no modelo.

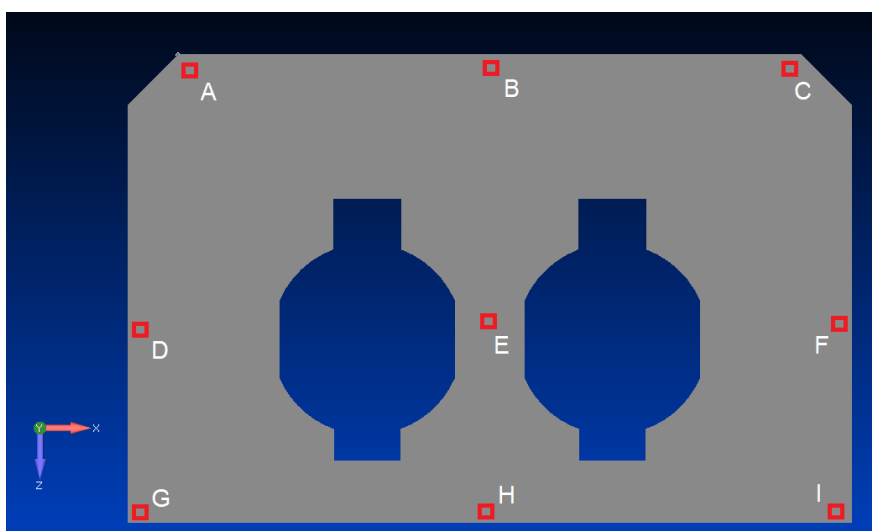


Figura 10.2: Pontos de cálculo de velocidade e aceleração – EL 765,710.

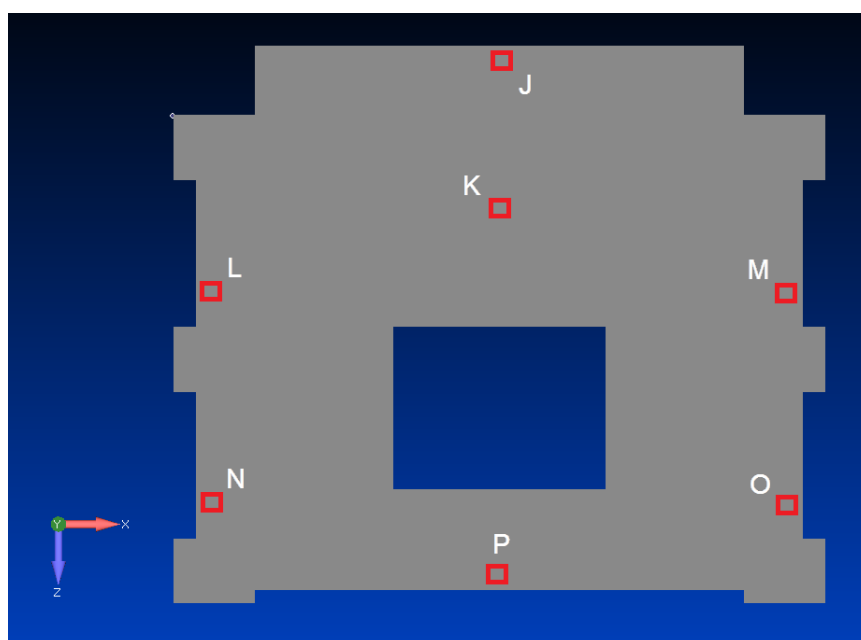


Figura 10.3: Pontos de cálculo de velocidade e aceleração – EL 762,648.

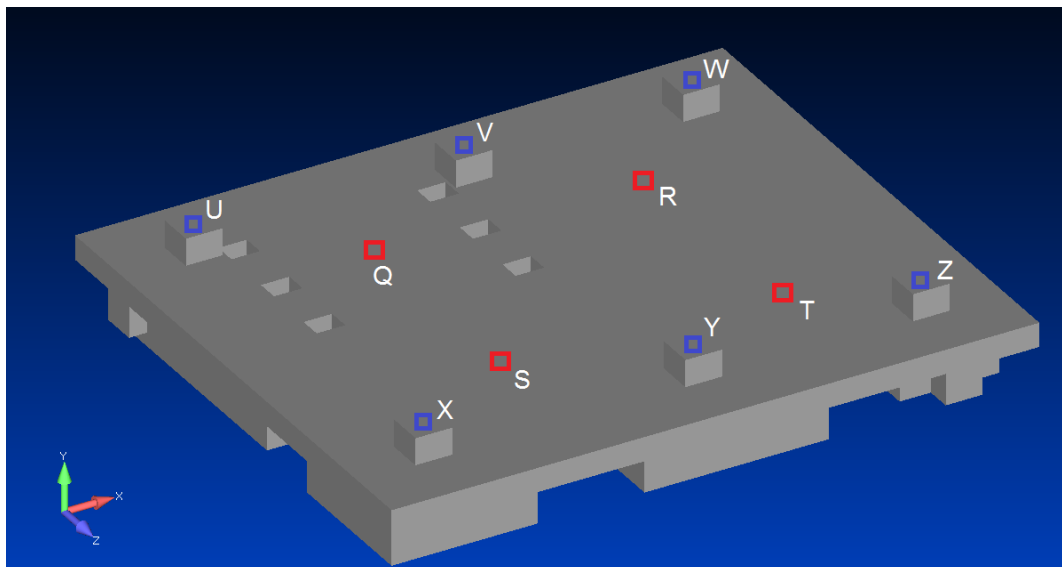


Figura 10.4: Pontos de cálculo de velocidade e aceleração – EL 757,310 e 758,310.

Tabela 10.6: Vibração em regime permanente – britadores em fase (condição crítica).

Elevação	Ponto	Velocidade de Pico [mm/s]	Aceleração de Pico [mm/s <sup>2</sup> ]	Desloc. de Pico Resultante [mm]
765,710	A	9,52	259,59	0,35
	B	9,51	259,38	0,35
	C	9,46	257,82	0,35
	D	9,79	266,90	0,36
	E	9,72	270,77	0,37
	F	9,74	265,41	0,36
	G	9,85	271,85	0,37
	H	9,88	273,00	0,37
	I	9,86	270,91	0,37
762,648	J	6,41	174,70	0,24
	K	6,48	176,62	0,24
	L	6,60	179,83	0,24
	M	6,48	176,75	0,24
	N	6,70	182,69	0,25
	O	6,58	179,28	0,24
	P	6,66	181,47	0,24
757,310 / 758,310	Q	1,00	27,16	0,04
	R	0,96	26,19	0,04
	S	0,82	22,12	0,03
	T	0,88	24,09	0,03
	U	1,46	39,96	0,05
	V	1,10	30,03	0,04
	W	1,14	31,11	0,04
	X	0,94	25,54	0,03
	Y	0,92	24,82	0,03
	Z	1,03	28,26	0,04

O maior valor de velocidade de pico observado para os pontos considerados foi de 9,88 mm/s (ver Tabela 10.6), abaixo do limite de 10 mm/s (regime permanente) recomendado pela norma DIN-4140 *Structural Vibration* [3]. Conduzindo assim, à aprovação da estrutura nesta análise.

#### Avaliação dos níveis de vibração para os equipamentos apoiados

Conforme a norma ISO-10816 (ref. [5]), os níveis de vibração admissíveis, a serem tomados como referência na estrutura de base, variam em função da classe do equipamento, definida pela potência, tipo e porte do mesmo, bem como pela flexibilidade da base em que o mesmo é instalado.

Os britadores em questão se enquadram na classe IV (ver Figura 11.2.). O maior nível de vibração RMS calculado para a estrutura foi 6,99 mm/s. Logo, os acionamentos dos britadores se enquadram na Zona B (Figura 11.4), na qual o nível de vibração calculado é considerado normal para condição de operação contínua.

Portanto, a estrutura está aprovada nesta análise.

#### Avaliação dos níveis de vibração para conforto humano

De acordo com a CEB [7], para a frequência de oscilação utilizada, 4,33 Hz, com aceleração de 273 mm/s<sup>2</sup> (máxima de pico calculada para estrutura), a vibração se enquadra como “desagradável”, porém abaixo da faixa que a tornaria intolerável (ver Tabela 11.4).

Por sua vez, a ISO 2631 [4] discorre sobre quatro fatores primordiais para determinar a resposta humana à vibração: intensidade; frequência de excitação; direção e tempo de exposição. Assim, para a frequência de 4,33 Hz e a aceleração de 193 mm/s<sup>2</sup> (RMS), o tempo de exposição máximo permissível é de aproximadamente 16 horas (ver Figura 11.1).

## 10.2 VERIFICAÇÕES COMPLEMENTARES

### 10.2.1 VERIFICAÇÃO DO DIMENSIONAMENTO DOS ELEMENTOS EM CONCRETO ARMADO

Esta seção apresenta os resultados das análises pseudo-estáticas realizadas para os elementos em concreto armado da Base dos britadores. Ressalta-se que durante as verificações, as cargas dinâmicas dos britadores foram amplificadas pelo DAF calculado no item anterior (10.1.2).

As tabelas abaixo mostram os índices de utilização máximos encontrados para as armaduras longitudinais e transversais das vigas.

Tabela 10.7: Análise das armaduras longitudinais das vigas

Elevação	Elemento	Tipo	As, exist (cm <sup>2</sup> )	As, min (cm <sup>2</sup> )	As, nec (cm <sup>2</sup> )	IU
760,180	VU-101	Long. Sup.	18,85	0,00	1,87	0,10

		Long. Inf.	18,85	4,50	0,88	0,24
	VU-102	Long. Sup.	18,85	0,00	1,37	0,07
		Long. Inf.	18,85	4,50	0,61	0,24
	VU-103	Long. Sup.	18,85	0,00	1,72	0,09
		Long. Inf.	18,85	4,50	0,75	0,24
	VU-104	Long. Sup.	18,85	0,00	1,30	0,07
		Long. Inf.	18,85	4,50	0,57	0,24
762,648	VL-201	Long. Sup.	16,52	0,00	10,21	0,62
		Long. Inf.	32,28	18,23	16,72	0,56
	VL-202	Long. Sup.	6,18	0,00	4,95	0,80
		Long. Inf.	18,10	9,23	9,74	0,54
	VL-203	Long. Sup.	6,14	0,00	1,81	0,29
		Long. Inf.	20,55	10,13	0,84	0,49
	VL-204	Long. Sup.	6,14	0,00	0,82	0,13
		Long. Inf.	20,55	10,13	1,89	0,49
	VL-205	Long. Sup.	6,14	0,00	1,73	0,28
		Long. Inf.	20,55	10,13	0,84	0,49
	VL-206	Long. Sup.	6,14	0,00	0,82	0,13
		Long. Inf.	20,55	10,13	3,77	0,49
	VT-201	Long. Sup.	9,65	0,00	6,96	0,72
		Long. Inf.	22,39	10,62	8,20	0,47
765,710	VL-301	Long. Sup.	16,25	0,00	9,48	0,58
		Long. Inf.	58,90	10,80	11,34	0,19
	VL-302	Long. Sup.	19,39	0,00	14,35	0,74

		Long. Inf.	58,90	10,80	17,43	0,30
VL-303		Long. Sup.	11,62	0,00	8,03	0,69
		Long. Inf.	40,01	22,42	4,92	0,56
VL-304		Long. Sup.	11,62	0,00	9,16	0,79
		Long. Inf.	40,01	22,42	4,37	0,56
VT-301		Long. Sup.	10,81	0,00	8,42	0,78
		Long. Inf.	62,83	15,53	11,79	0,25

Tabela 10.8: Análise das armaduras transversais das vigas.

Elevação	Elemento	Aws, exist (cm <sup>2</sup> /m)	Aws, min (cm <sup>2</sup> /m)	Aws, nec (cm <sup>2</sup> /m)	IU
760,180	VU-101	11,60	5,79	0,06	0,50
	VU-102	11,60	5,79	0,05	0,50
	VU-103	11,60	5,79	0,07	0,50
	VU-104	11,60	5,79	0,02	0,50
762,648	VL-201	42,07	23,46	0,10	0,56
	VL-202	18,65	11,88	0,07	0,64
	VL-203	16,05	13,03	0,34	0,81
	VL-204	16,05	13,03	1,02	0,81
	VL-205	16,05	13,03	0,31	0,81
	VL-206	16,05	13,03	1,08	0,81
	VT-201	26,83	12,21	0,03	0,46
765,710	VL-301	44,62	9,27	0,08	0,21
	VL-302	48,33	9,27	0,22	0,19
	VL-303	38,65	19,24	0,86	0,50
	VL-304	38,65	19,24	1,02	0,50
	VT-301	38,90	13,32	0,01	0,34

A Tabela 10.9 exibe os resultados de índices de utilização máximos para as armaduras das lajes da Base.

Tabela 10.9: Análise das armaduras das lajes.

Elevação	Elemento	Direção	As, exist (cm <sup>2</sup> /m)	As, min (cm <sup>2</sup> /m)	As, nec (cm <sup>2</sup> /m)	IUaço
762.648	LJ-201	Sup-X	8,18	0,00	6,95	0,85
		Inf-X	9,20	9,00	8,61	0,98
		Sup-Z	8,18	0,00	7,14	0,87
		Inf-Z	9,20	9,00	8,22	0,98
765.710	LJ-301	Sup-X	8,18	0,00	7,72	0,94

LJ-302	Inf-X	13,40	7,50	9,59	0,72
	Sup-Z	13,40	0,00	5,91	0,44
	Inf-Z	13,40	7,50	7,63	0,57
	Sup-X	8,18	0,00	7,62	0,93
	Inf-X	13,40	7,50	10,43	0,78
	Sup-Z	13,40	0,00	7,40	0,55
	Inf-Z	13,40	7,50	7,96	0,59

Adicionalmente, foi realizada análise de interações de esforços para os pilares. Os resultados são apresentados nas figuras a seguir, para cada seção transversal, através de envoltórias de resistência.

As envoltórias de resistência definem o lugar geométrico dos estados de tensões no E.L.U. da seção transversal, mediante os esforços solicitantes. A situação onde a resistência do componente estrutural supera as solicitações externas é indicada pelo par ordenado de momentos fletores nos eixos principais de inércia, para a força normal atuante, internos à envoltória.

Por sua vez, a condição de falha é expressa pela localização do par de esforços em regiões adjacentes à envoltória, indicando que o arranjo da seção transversal é insuficiente para resistir de forma segura às ações solicitantes.

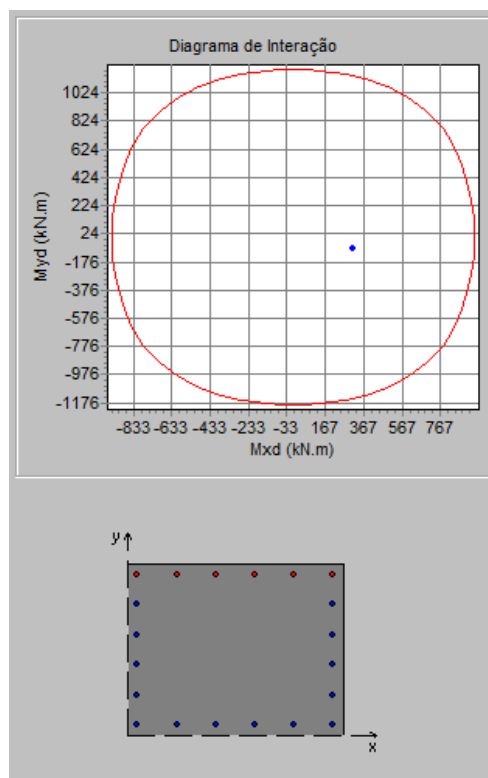


Figura 10.5: Diagrama de interação – P-1.

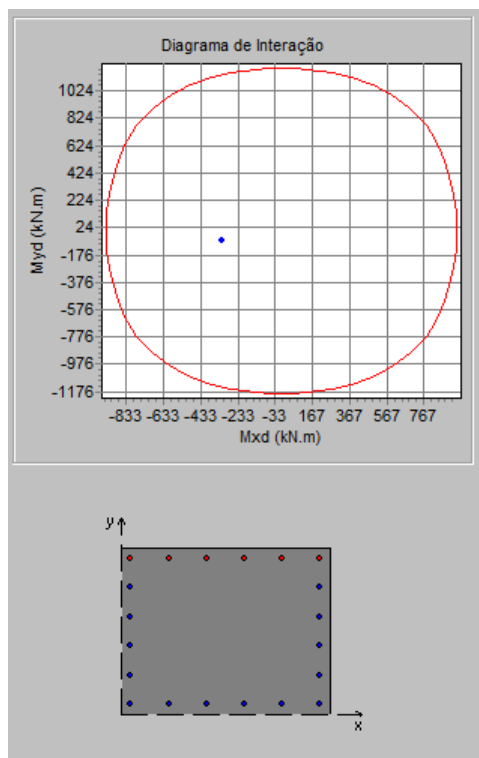


Figura 10.6: Diagrama de interação – P-2.

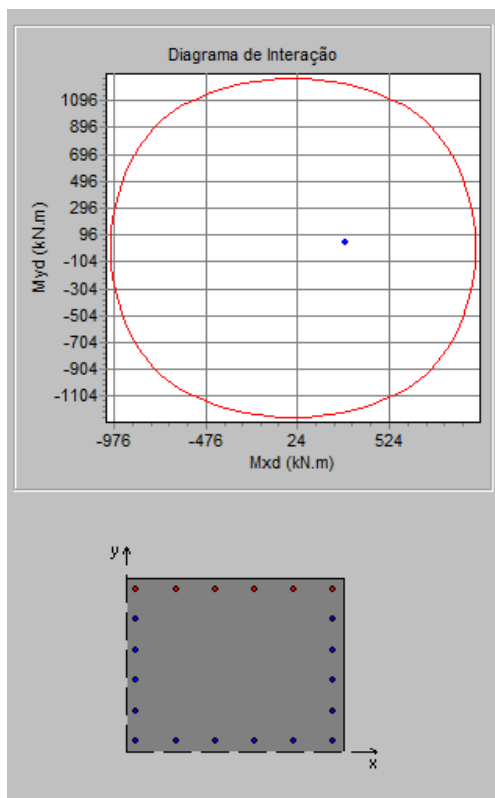


Figura 10.7: Diagrama de interação – P-3.



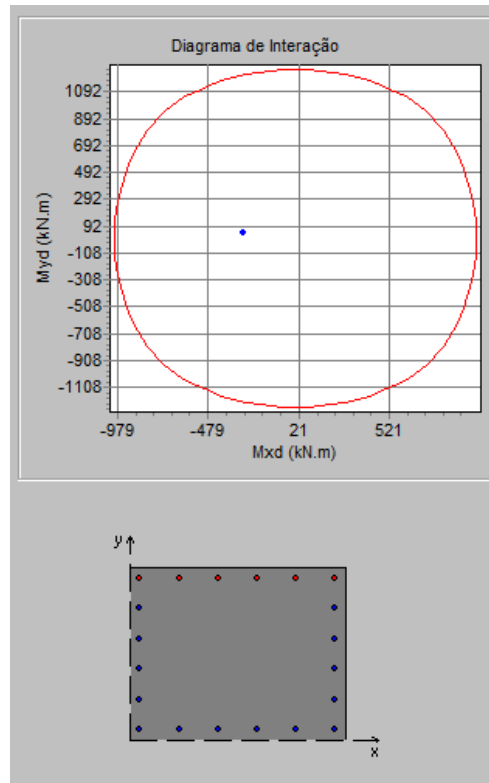


Figura 10.8: Diagrama de interação – P-4.

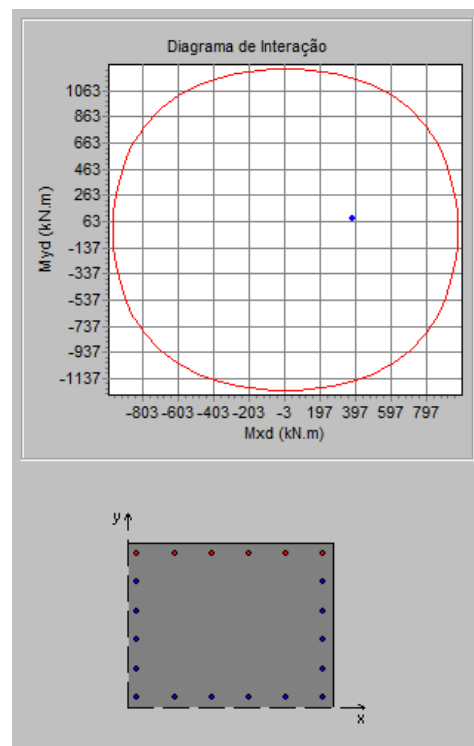


Figura 10.9: Diagrama de interação – P-5.

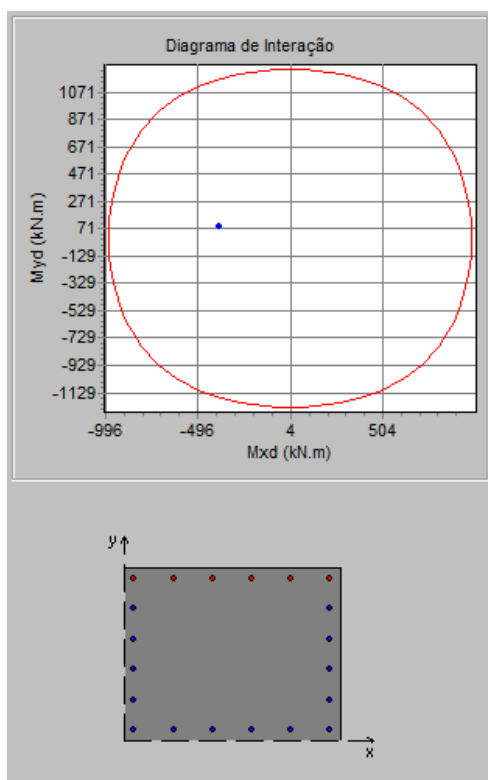


Figura 10.10: Diagrama de interação – P-6.

A análise das armaduras das vigas e lajes não indicou índices de utilização acima do permitido (1,00). Os valores máximos encontrados foram 0,81 e 0,98 para as vigas e lajes, respectivamente.

Apesar de terem sido evidenciados índices de utilização elevados, os mesmos são referentes à armadura mínima que é um critério normativo que visa garantir a durabilidade e ductilidade dos elementos. Em relação à armadura efetivamente necessária para resistir aos esforços atuantes, o maior índice de utilização encontrado foi 0,94.

Logo, as vigas e lajes da Base encontram-se com dimensionamento adequado para resistir aos esforços solicitantes considerados e estão em conformidade com os critérios da norma NBR 6118:2014 [1].

Analogamente, para todos os pilares, os esforços solicitantes combinados encontram-se inseridos na envoltória de resistência, o que significa que os elementos são capazes de resistir com segurança às cargas neles atuantes.

## 10.2.2 VERIFICAÇÃO DE FADIGA

A NBR 6118:2014 [1] expõe que para situações de carregamento com ações de natureza cíclica, a possibilidade de fadiga nos componentes estruturais deve ser considerada.

A mesma norma categoriza fadiga como um fenômeno associado a ações dinâmicas repetidas, que provoca modificações progressivas e permanentes na estrutura interna de um material submetido a oscilações de tensão decorrentes dessas ações.

Desta forma, a análise de fadiga da estrutura da base dos britadores cônicos, será realizada conforme as recomendações da NBR 6118:2014. Os critérios básicos são apresentados no item 11.4.2.

Para esta análise, foi utilizada a condição de operação simultânea em fase dos britadores, por ser esta a situação mais severa para estrutura, de acordo com o apresentado no item 10.1.2.

Conforme recomendação da NBR 6118:2014, para obtenção das tensões atuantes nas armaduras, foi utilizado o valor verificado no concreto, porém amplificado em 10 vezes. Esse procedimento leva em consideração a diferença de rigidez entre os materiais ( $E_s/E_c$ ).

Na Tabela 10.10 e Tabela 10.11 são exibidos os resultados da análise de fadiga, com a indicação da variação de tensão solicitante e o índice de utilização para os componentes da estrutura. As variações de tensão admissíveis para o concreto e a armadura são 9,64 MPa e 105,0 MPa, respectivamente. Ambos os valores são correspondentes à vida de referência ( $2 \times 10^6$  ciclos). A nomenclatura segue o indicado na Figura 1.2 à Figura 1.7.

Destaca-se que devida à baixa magnitude das tensões de cisalhamento, os resultados para este estado de tensão não são apresentados.

Tabela 10.10: Análise de fadiga - Concreto.

<b>Componente</b>	<b><math>\Delta\sigma_{\text{Compressão,máx}}</math></b>	<b>I.U.</b>
Lajes		
LJ-201	2,55	0,26
LJ 301 e 302	3,97	0,41
Vigas		
VU-101 a 104	1,15	0,12
VL-201	1,37	0,14
VL-202	1,19	0,12
VL-203 a 206	1,11	0,12
VT-201	1,02	0,11
VL-301	1,30	0,13
VL-302	1,56	0,16
VL-303 e 304	1,80	0,19
VT-301	2,18	0,23
Pilares		

P-1 e 2	1,35	0,14
P-3 e 4	1,26	0,13
P-5 e 6	1,40	0,15

Tabela 10.11: Análise de fadiga - Armadura.

<b>Componente</b>	<b><math>\Delta\sigma</math> Compressão/tracção, máx</b>	<b>I.U.</b>
Lajes		
LJ-201	25,51	0,24
LJ 30 e 302	39,74	0,38
Vigas		
VU-101 a 104	13,50	0,13
VL-201	14,89	0,14
VL-202	15,02	0,14
VL-203 a 206	11,14	0,11
VT-201	10,20	0,10
VL-301	13,27	0,13
VL-302	16,01	0,15
VL-303 e 304	18,03	0,17
VT-301	21,82	0,21
Pilares		
P-1 e 2	13,51	0,13
P-3 e 4	12,64	0,12
P-5 e 6	14,02	0,13

De acordo com os resultados obtidos, observa-se que as variações de tensões verificadas para o concreto e armadura da base dos britadores está abaixo dos valores de referência. Portanto, considera-se de baixa probabilidade a ocorrência de fadiga nesses materiais.

## 11.0 ANEXO I – METODOLOGIA E DESENVOLVIMENTO

Nesta seção é apresentada a metodologia utilizada para as análises estruturais realizadas para a base dos britadores.

## 11.1 MODELAGEM DA ESTRUTURA

Para a análise da base dos britadores, foi elaborado um modelo numérico no software FEMAP, que possibilita simular o comportamento dos elementos estruturais.

### Materiais utilizados

As propriedades do concreto armado, utilizadas na análise dos elementos estruturais, estão apresentadas na Tabela 11.1 a seguir.

Tabela 11.1: Propriedades do concreto armado.

Concreto	
fck [MPa]	30
E <sub>Tangencial</sub> [GPa]	30,67
E <sub>Secante</sub> [GPa]	26,84
Densidade [kg/m <sup>3</sup> ]	2500
Coef. Dilatação [°C <sup>-1</sup> ]	1,0x10 <sup>-5</sup>
Razão de Amortecimento - ζ [-]	0,04
Aço das Armaduras	
f <sub>yk</sub> [MPa]	500
E [GPa]	210
Densidade [kg/m <sup>3</sup> ]	7850
Coef. Dilatação [°C <sup>-1</sup> ]	1,2x10 <sup>-5</sup>

## 11.2 DEFINIÇÃO DOS CARREGAMENTOS

Nesta seção são definidos os carregamentos aplicados no modelo, a partir das recomendações da norma NBR 6118:2014 [1] e NBR 8681:2003 [2].

### 11.2.1 Carregamento 1: Peso Próprio – PP

Corresponde às forças devidas ao peso de todos os componentes fixos ou móveis da estrutura, bem como outras estruturas, e equipamentos que ela suporte.

### 11.2.2 Carregamento 2: Cargas dos Britadores – CD:

Corresponde às forças devidas à operação dos britadores cônicos.

### 11.2.3 Carregamento 3: Cargas devidas à sobrecarga na estrutura – SC:

Neste caso de carregamento, são contempladas as cargas referentes à sobrecarga de utilização.

### 11.2.4 Carregamento 4: Cargas devidas ao entupimento de chute – EC:

Este carregamento considera as cargas atuantes na estrutura devido a um possível entupimento do chute existente. Para tanto, a carga de material é calculada a partir

do volume do chute e do peso específico de material de entupimento, como mostrado na Equação 11.1:

$$Q_{entupimento} = V_{chute} \cdot \gamma_{material}$$

Equação 11.1: Cálculo do entupimento do chute.

Onde:  $Q_{entupimento}$  - Carga de entupimento do chute [kgf];

$V_{chute}$  - Volume do chute [m<sup>3</sup>];

$\rho_{material}$  - Densidade do material [kg/m<sup>3</sup>].

### 11.3 CRITÉRIOS PARA ANÁLISE DINÂMICA

Os efeitos da vibração são avaliados por meio dos seguintes critérios:

- Critério estrutural – analisa a integridade da estrutura;
- Critério fisiológico – analisa a resposta humana à vibração;
- Critério de equipamento – analisa os níveis de vibração para o equipamento.

A aceitação da vibração da estrutura para condição de integridade estrutural é realizada segundo as diretrizes da norma DIN 4150-3 [3], para conforto humano segundo a norma ISO 2631 [4] e o guia prático CEB [7]. Por sua vez, os critérios de análise dos níveis de vibração para os equipamentos são conforme a norma ISO 10816 [5].

Os valores de razão de amortecimento para o concreto conforme a CEB [7] podem ser vistos abaixo. Nas análises dinâmicas realizadas o valor adotado foi 0,04.

Tabela 11.2: Valores de razão de amortecimento viscoso equivalente para concreto armado – CEB.

Estado de solicitação	$\zeta$
Pouco tensionado (não fissurado)	0,007 – 0,010
Mediamente tensionado (fissurado)	0,008 – 0,040
Altamente tensionado (fissurado), mas sem escoamento da armadura	0,005 – 0,008

#### 11.3.1 Critério estrutural

Tabela 11.3: Velocidades de vibração admissíveis – DIN 4150-3.

Critério	Admissível [mm/s]		Condição
	Regime Permanente	Regime Transiente	
Estrutural	10,0	40,0	Velocidade de Pico

### 11.3.2 Critério fisiológico

A Tabela 11.4 adaptada da CEB [7] indica as faixas de frequências para o critério fisiológico, bem como os valores de aceleração e velocidades correlacionados com uma descrição do nível de resposta à vibração do corpo humano.

Tabela 11.4: Resposta humana para vibração - CEB.

Descrição	Faixa de frequência de 1 – 10 Hz aceleração de pico, (mm/s <sup>2</sup> )	Faixa de frequência de 10 – 100 Hz velocidade de pico, (mm/s)
Apenas perceptível	34	0,5
Claramente perceptível	100	1,3
Perturbador/Desagradável	550	6,8
Intolerável	1800	13,8

Por sua vez, a ISO 2631 [4] correlaciona a intensidade, a frequência de excitação, a direção e o tempo de exposição para condicionar a resposta humana à vibração.

A Figura 11.1 exibe o gráfico adaptado da ISO 2631. Este gráfico apresenta os limites de aceleração em função do tempo de exposição e frequência de excitação.

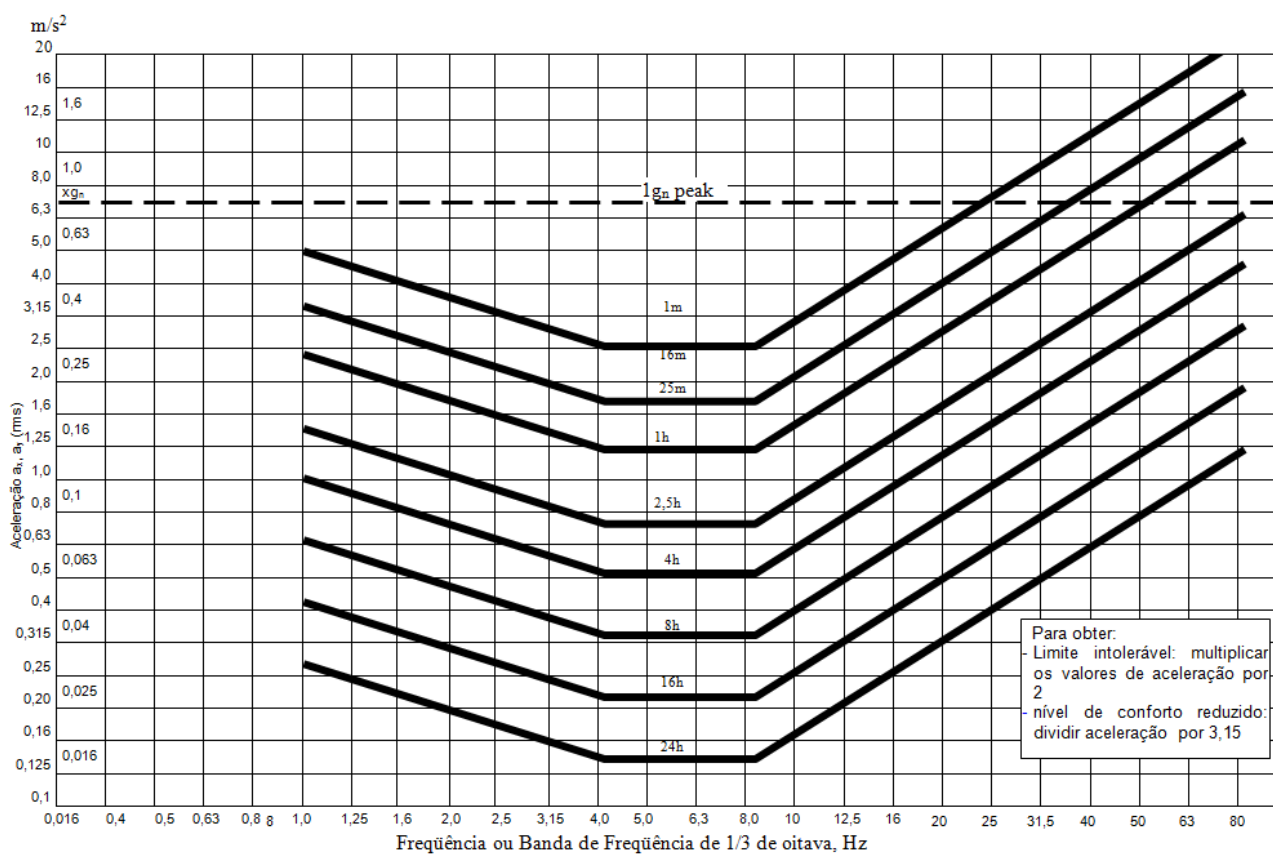


Figura 11.1: Limites de aceleração (RMS) em função da frequência e tempo de exposição para nível reduzido de eficiência (fadiga) – Figura modificada da ISO 2631.

### 11.3.3 Critério de equipamento

Conforme a norma ISO 10816 (ref. [5]), os níveis de vibração admissíveis, a serem tomados como referência na estrutura de base, variam em função da classe do equipamento, definida pela potência, tipo e porte do mesmo, bem como pela flexibilidade da base em que o mesmo é instalado.

A Figura 11.2 apresenta a definição das classes dos equipamentos.

**Class I:** Individual parts of engines and machines, integrally connected to the complete machine in its normal operating condition. (Production electrical motors of up to 15 kW are typical examples of machines in this category.)

**Class II:** Medium-sized machines (typically electrical motors with 15 kW to 75 kW output) without special foundations, rigidly mounted engines or machines (up to 300 kW) on special foundations.

**Class III:** Large prime-movers and other large machines with rotating masses mounted on rigid and heavy foundations which are relatively stiff in the direction of vibration measurements.

**Class IV:** Large prime-movers and other large machines with rotating masses mounted on foundations which are relatively soft in the direction of vibration measurements (for example, turbogenerator sets and gas turbines with outputs greater than 10 MW).

Figura 11.2: Definição das classes dos equipamentos – Figura adaptada da ISO 10816.

Para cada classe, são definidas quatro zonas limites conforme esquematizado na Figura 11.3, e resumido abaixo:

- Zona A: Nível de vibração de equipamentos novos, recentemente comissionados;
- Zona B: Nível de vibração considerado normal para condição de operação contínua;
- Zona C: Nível de vibração considerável insatisfatório para condição de operação contínua. Nesta zona, o equipamento pode operar por um período de tempo limitado até que se tenha a oportunidade de uma ação corretiva;
- Zona D: Nível de vibração suficiente para causar danos nas máquinas.



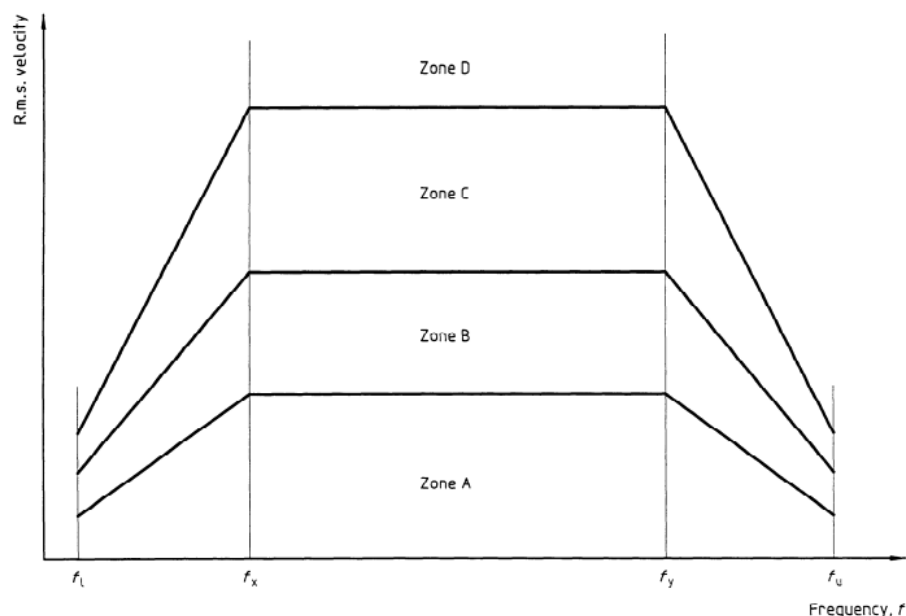


Figura 11.3: Zonas de avaliação – imagem retirada da ISO 10816.

A Figura 11.4 destaca os valores de velocidade RMS em função da classe e zona de classificação.

**Table B.1 — Typical zone boundary limits**

R.m.s. vibration velocity mm/s	Class I	Class II	Class III	Class IV
0,28	A	A	A	A
0,45				
0,71				
1,12	B	B	B	B
1,8				
2,8	C	C	C	C
4,5				
7,1	D	D	D	D
11,2				
18				
28				
45				

Figura 11.4: Limites de vibração conforme ISO 10816.

## 11.4 ANÁLISES COMPLEMENTARES

### 11.4.1 ANÁLISE DO DIMENSIONAMENTO EM CONCRETO ARMADO

A verificação de resistência dos componentes em concreto armado da estrutura foi realizada em consonância com o proposto pela norma NBR 6118:2014 [1]. Foram avaliados os vários estados limites últimos (ELU) específicos para cada tipo de elemento (viga, pilar e laje), considerando os esforços mais desfavoráveis gerados pelas combinações de carregamentos adotada.

Foram utilizados os esforços estáticos majorados pelo fator de amplificação dinâmico (DAF), para contemplar os efeitos da interação estrutura-equipamento.

Com relação ao critério utilizado para avaliação dos elementos estruturais, as seguintes definições devem ser consideradas:

- **Índice de utilização:** avalia o grau de sollicitação ao qual um elemento estrutural está sendo submetido. É determinado a partir da relação entre o esforço atuante em cada barra e a resistência admissível determinada pela norma de estruturas metálicas.
- **Índice de utilização admissível:** é o valor definido por norma, utilizado como referência para aprovação ou reprovação do grau de sollicitação de um elemento estrutural.

#### 11.4.2 ANÁLISE DE FADIGA

A instauração de fadiga nos elementos da estrutura foi verificada de acordo com as prescrições do item 23.5 NBR 6118:2014 [1]. Foram aplicados os critérios de verificação de fadiga devido à compressão do concreto e devido à tração e compressão da armadura passiva.

A variação de tensões ao longo da estrutura foi obtida a partir da excitação oriunda das cargas dinâmicas devidas à operação, em regime, simultânea e em fase dos britadores cônicos. Esta condição configurou-se como a crítica para a base.

Para ambos os materiais, concreto e aço da armadura, a verificação à fadiga consiste em comparar a variação de tensões obtida da análise estrutural realizada com os valores admissíveis para a vida em fadiga de referência,  $2 \times 10^6$  ciclos. A razão entre essas variações de tensão caracteriza o índice de utilização à fadiga e, portanto, deve ser igual ou inferior a 1,0 para conduzir à condição de aprovação.

Para o delta admissível do concreto à compressão, a norma estabelece uma correlação direta com a resistência à compressão característica em condição estática.

$$\Delta_{\sigma C, compressão} = 0,45 \cdot \left( \frac{fck}{1,4} \right)$$

Equação 11.2: Variação de tensão à compressão admissível do concreto.

Para a armadura, são estabelecidas curvas do tipo S-N, extensivamente utilizadas em fadiga de materiais metálicos. Quando o número de ciclos é igual ao da vida de referência, a tabela adaptada a baixo pode ser utilizada diretamente. Esta estabelece, para armadura passiva em aço CA-50 internos ao concreto, o delta de tensão admissível em função do diâmetro da barra, diâmetro do pino de dobramento, função da barra, além do ambiente de agressividade e presença de solda.

Destaca-se que o valor utilizado nas análises do presente documento foi 105 MPa, correspondente a barras dobradas com diâmetro até 20 mm, valor máximo presente no projeto da base.



## 12.0 ANEXO II – MODOS NATURAIS DE VIBRAÇÃO DAS ESTRUTURAS

As figuras abaixo exibem os principais modos naturais de vibração das estruturas.

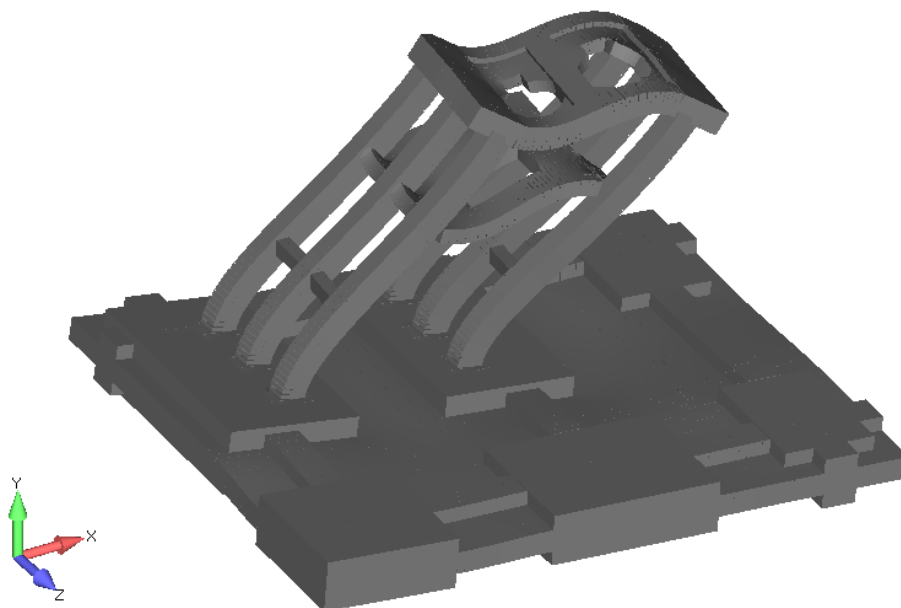


Figura 12.1: Modo 1 – frequência de 5,66 Hz.

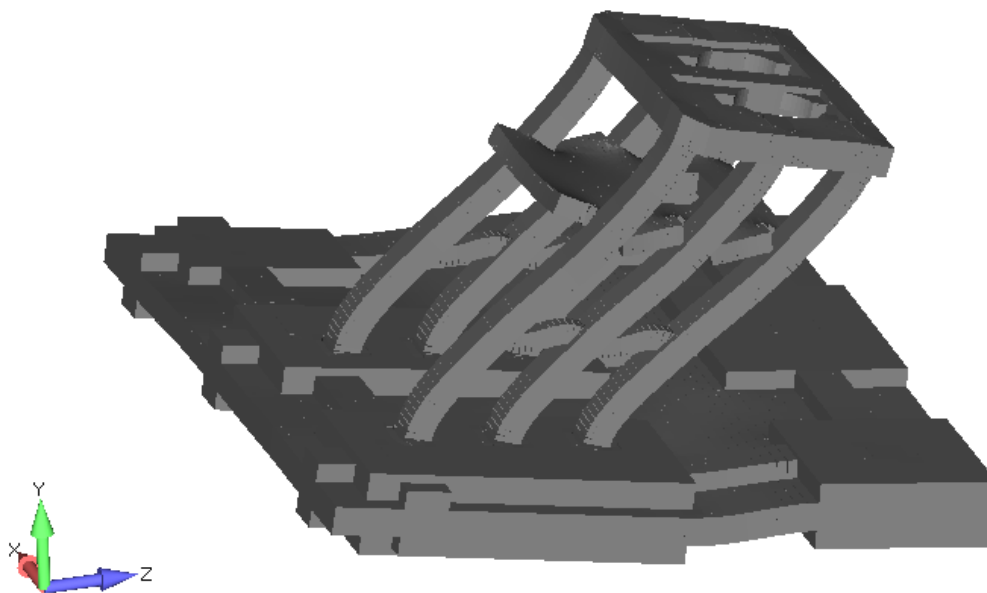


Figura 12.2: Modo 2 – frequência de 5,94 Hz.

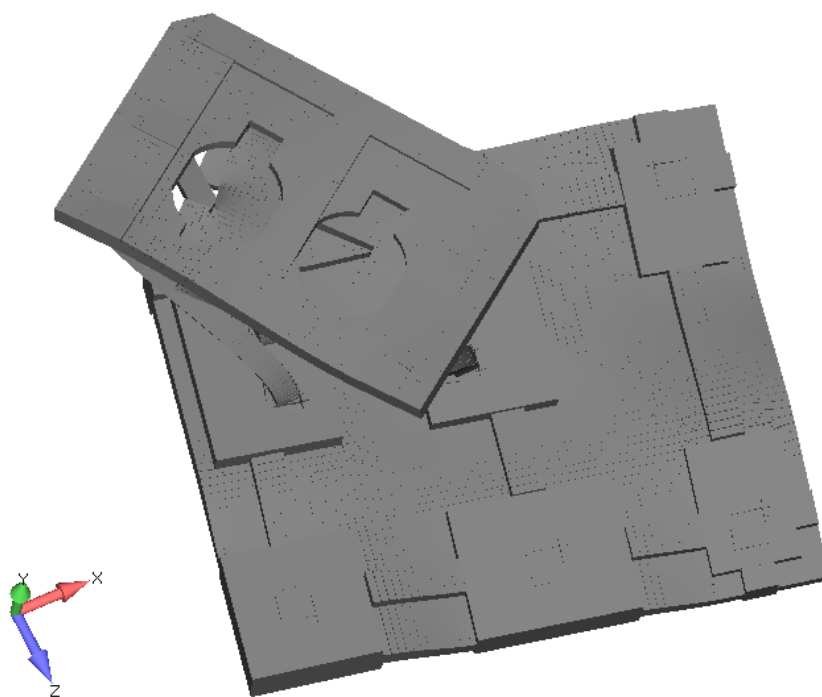


Figura 12.3: Modo 3 – frequência de 8,12 Hz.

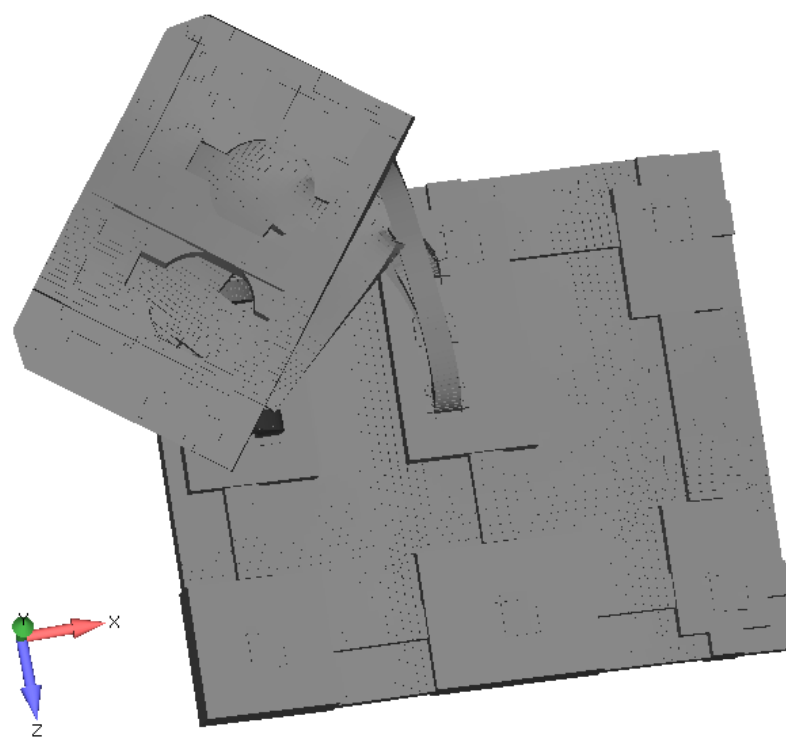


Figura 12.4: Modo 4 – frequência de 9,15 Hz.

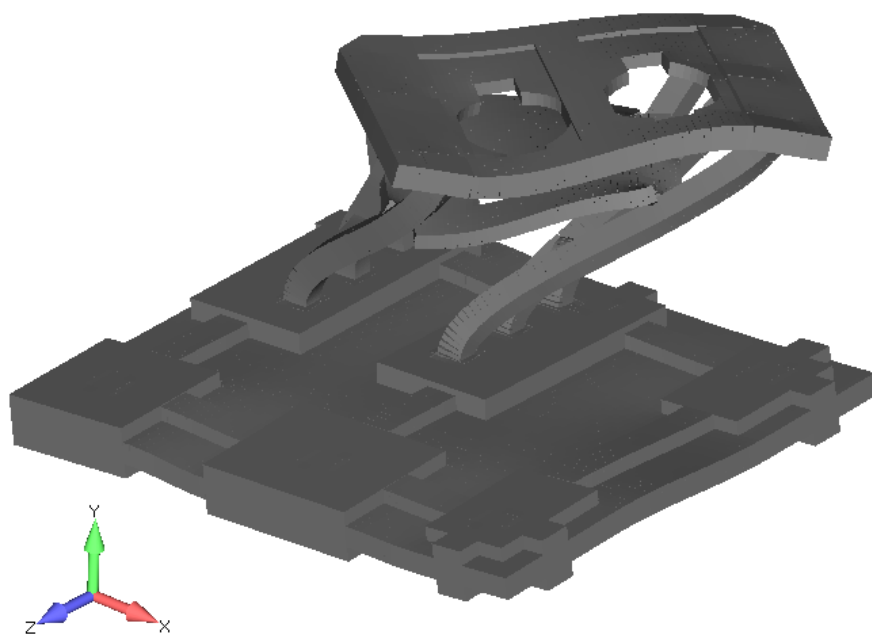


Figura 12.5: Modo 5 – frequência de 9,26 Hz.

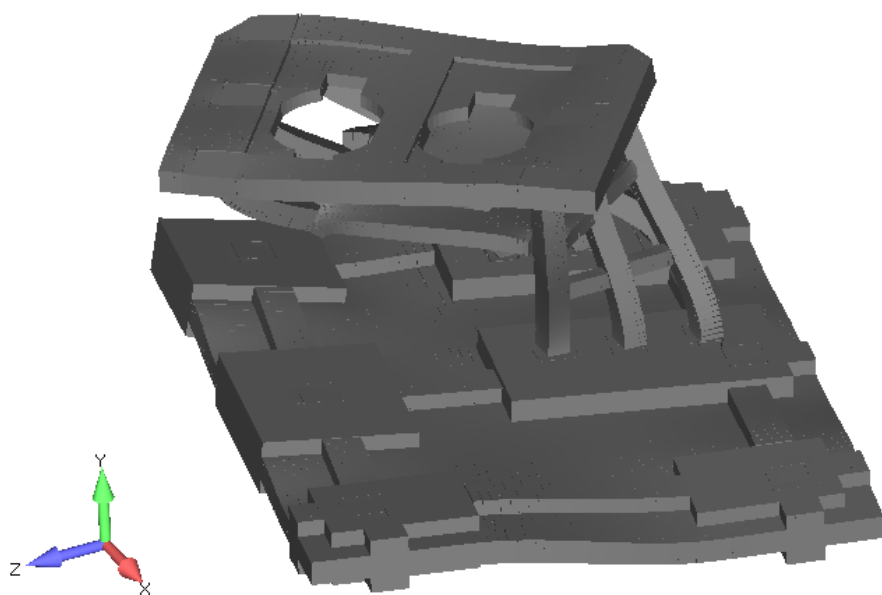


Figura 12.6: Modo 6 – frequência de 10,07 Hz.

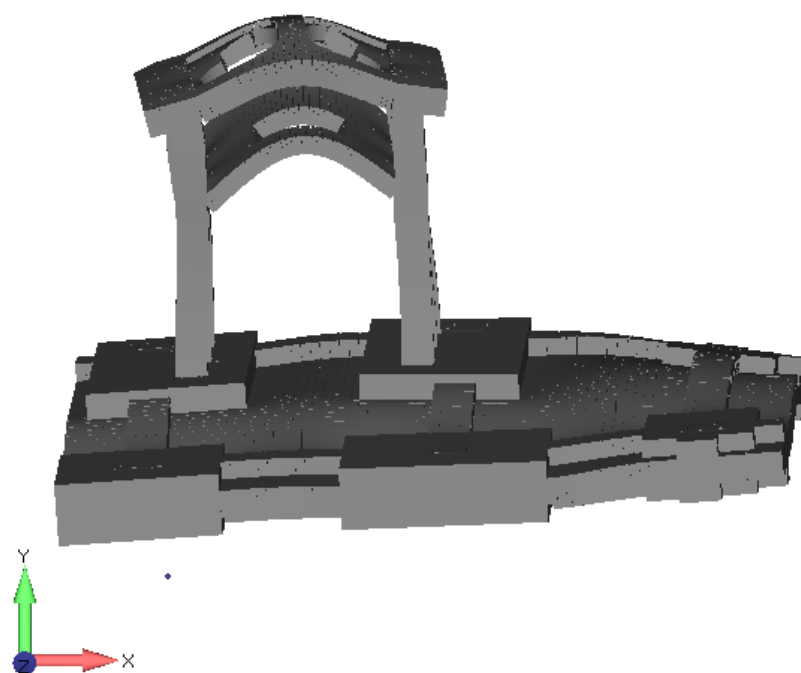


Figura 12.7: Modo 7 – frequência de 13,37 Hz.

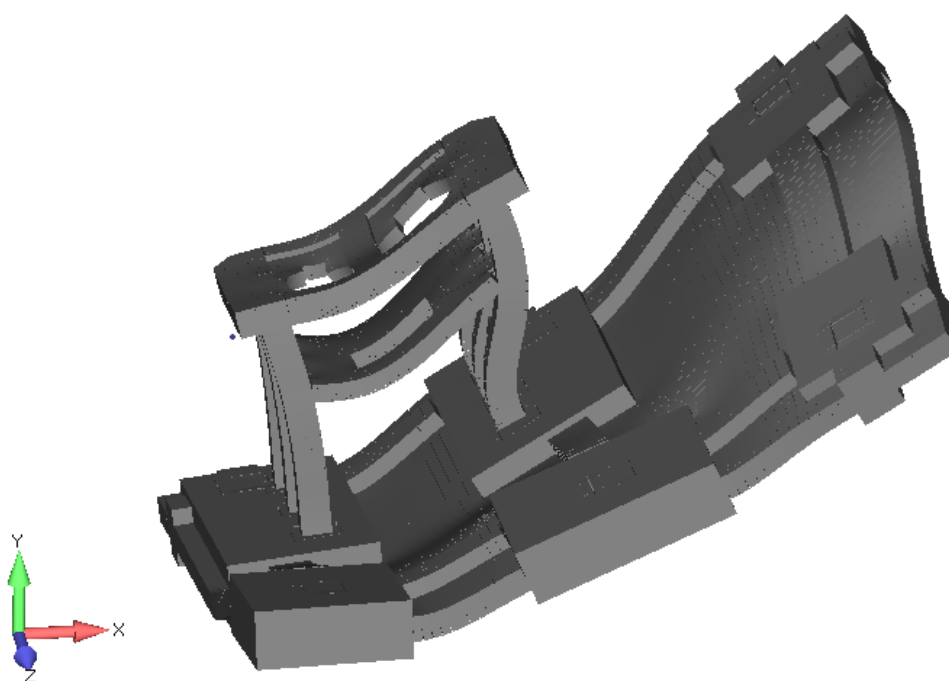


Figura 12.8: Modo 8 – frequência de 16,49 Hz.

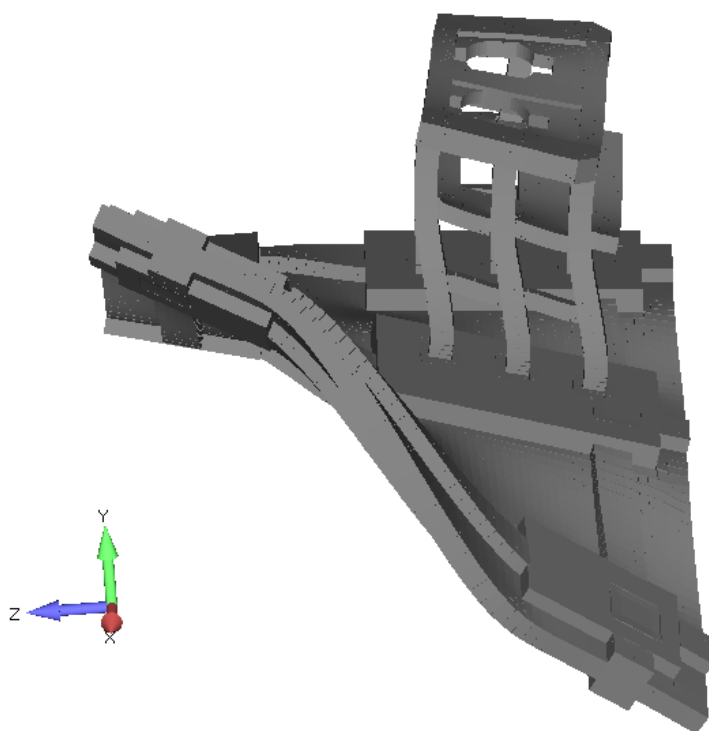


Figura 12.9: Modo 9 – frequência de 18,27 Hz.

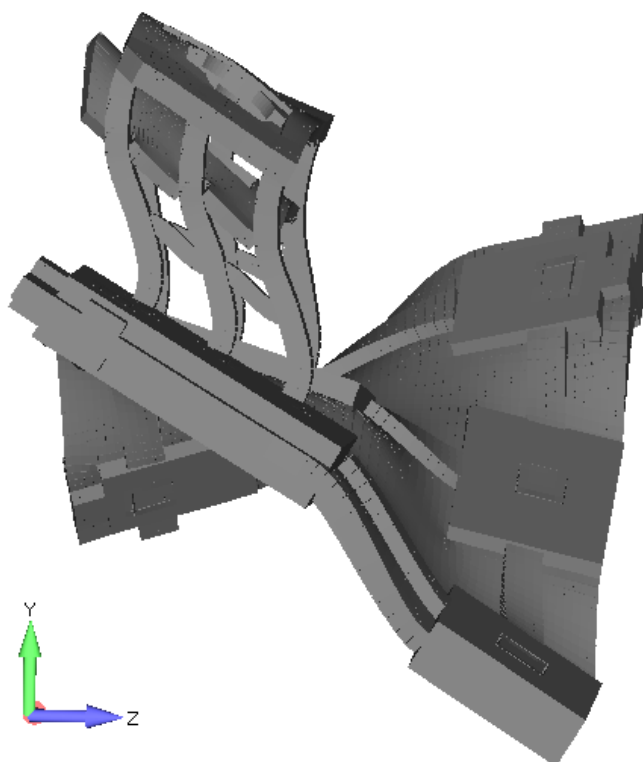


Figura 12.10: Modo 10 – frequência de 21,93.