PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO PARANÁ
ESCOLA POLITÉCNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

DIOGO ROSSOT

DOMOS GEODÉSICOS – ABORDAGEM NUMÉRICA E EXPERIMENTAL EM UM MODELO DE LABORATÓRIO.

CURITIBA
2014

DIOGO ROSSOT

DOMOS GEODÉSICOS – ABORDAGEM NUMÉRICA E EXPERIMENTAL EM UM MODELO DE LABORATÓRIO.

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Pontifícia Universidade Católica do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de mestre.

Orientador: Prof. Roberto Dalledone Machado

CURITIBA

2014

DIOGO ROSSOT

DOMOS GEODÉSICOS – ABORDAGEM NUMÉRICA E EXPERIMENTAL EM UM MODELO DE LABORATÓRIO.

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Pontifícia Universidade Católica do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de mestre.

COMISSÃO EXAMINADORA

_____

Prof. Key Fonseca de Lima

Pontifícia Universidade Católica do Paraná

_____

Prof. Luiz Alkimin de Lacerda

Universidade Federal do Paraná.

_____

Prof. Nilson Barbieri

Pontifícia Universidade Católica do Paraná

_____

Prof. Roberto Dalledone Machado

Pontifícia Universidade Católica do Paraná

Curitiba, 16 de dezembro de 2014.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a I9 Engenharia e seu proprietário, Juliano, pela concessão de horários para que eu pudesse cursar as disciplinas do Mestrado em Engenharia Mecânica. Também por disponibilizar recursos financeiros que possibilitaram a construção do modelo físico.

Também agradeço ao CAPES por ter me agraciado com uma bolsa de estudo e a comissão que escolheu os bolsistas, pela confiança depositada em mim.

Ao Prof. Roberto Dalledone Machado que me orientou na dissertação sendo sempre muito profissional, paciente e preciso nas tomadas de decisões.

Ao Prof. Nilson Barbieri pelo espaço cedido no laboratório e pela ajuda durante a execução dos ensaios.

Ao aluno de doutorado, Jeferson, pelo auxilio e por ceder equipamentos que tornaram possíveis os ensaios.

Em especial a minha esposa Caroline que foi incentivadora e sempre me apoiou durante a execução do Mestrado.

RESUMO

Domos geodésicos são estruturas usadas para cobrir grandes vãos sem a necessidade de colunas intermediárias. Os domos geodésicos são formados por triângulos e projetados a partir de sólidos Platônicos. Domos geodésicos são usados para cobrir estádios, ginásios, em geral, grandes construções. Uma das mais recentes aplicações de estruturas geodésicas é na cobertura de tanques cilíndricos para armazenamento de líquidos. A grande vantagem dos domos geodésicos é o peso, pois são estruturas leves, quando comparadas com outras estruturas. Neste trabalho avalia-se o desempenho de um modelo de domo geodésico projetado e construído a partir de uma estrutura geodésica real. O modelo do domo geodésico terá 2 metros de diâmetro e 800mm de altura. Levou-se em conta conceitos da análise dimensional no projeto do modelo físico, mas não foi possível obter uma semelhança completa com a estrutura original. Também se analisa numericamente o modelo, em um software comercial, através do método dos elementos finitos. São comparados os valores medidos experimentalmente e calculados numericamente de deslocamentos e frequências naturais de vibração. Os resultados obtidos são apresentados visando um melhor entendimento do comportamento das estruturas geodésicas quando submetidas a cargas pontuais.

Palavras-chave: Domos geodésicos. Coberturas geodésicas. Método dos elementos finitos.

ABSTRACT

Geodesic domes are structures used to cover large spans without intermediate columns. Geodesic domes are formed by triangles and based on Platonic solids. Geodesic domes are used to cover stadiums, gymnasiums, in general, large buildings. One of the most recent applications of geodesic structures is in the coverage of cylindrical tanks for liquid storage. The great advantage of geodesic domes is the weight, they are lightweight structures, compared to other structures. This paper evaluates the performance of a model geodesic dome designed and built from a real geodesic structure with two meters in diameter and 800mm in height, taking into account the scale factors. Also numerically analyze the model in a commercial software, by the finite element method. The experimentally measured and numerically calculated displacement and natural frequencies of vibration values are compared. The results are presented in the best understanding and improvement of the geodesic structures.

Keywords: Geodesic dome. Geodesic structures. Finite element method.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Domo de Nagoya – Vista interna.....16
Figura 2 – Domo de Nagoya – Vista externa.....17
Figura 3 – Domo no acampamento hippie, Drop City, nos arredores de Trinidad, no Colorado.....17
Figura 4 – Panteão Romano – Vista externa.....18
Figura 5 – Panteão Romano – Vista interna.....19
Figura 6 – Comparação de vários tipos de domo de estruturas metálicas.....19
Figura 7 – Vista externa do domo de Tacoma.....20
Figura 8 – Vista por dentro do domo de Tacoma. 21
Figura 9 – Esfera geodésica do Epcot Center, na Disneylândia. 22
Figura 10 – Construção da esfera geodésica do Epcot center.....22
Figura 11 – Domo do museu da biosfera vista externa. 23
Figura 12 – Domo do museu da biosfera vista interna. 23
Figura 13 – Treliça do teto de um tanque com 61m de diâmetro. 24
Figura 14 – Instalação de domo geodésico em tanque de armazenamento. 25
Figura 15 – Selo flutuante dentro do tanque. 26
Figura 16 – Comparação teto com estrutura e domo geodésico.....26
Figura 17 – Domo geodésico utilizado para cobrir tanque de 24m de diâmetro.....27
Figura 18 – Foto aproximada do domo geodésico do tanque de 24m de diâmetro...28
Figura 19 – Tanque de 24m de diâmetro com domo geodésico visto por dentro.....28
Figura 20 – Radiolárias, apresentam estruturas geodésicas. 31
Figura 21 – Domo ensaio na Universidade Federal de Minas Gerais. 32
Figura 22 – Sólidos Platônicos.....34
Figura 23 – Comparação de domo geodésico gerado a partir de icosaedro e tetraedro. 35
Figura 24 – Icosaedro inscrito. 36
Figura 25 – Lado do icosaedro selecionado.....36
Figura 26 – Divisão da aresta do LPSP dimensões em [mm]. 37
Figura 27 – Lado do icosaedro dividido.....38
Figura 28 – Pontos de referência para gerar coordenadas. 38
Figura 29 – Linhas ligando o ponto central ao ponto de intersecção. 39
Figura 30 – Prolongamento das linhas até encontrarem a superfície da esfera. 39

Figura 31 – Primeiro setor do domo geodésico traçado. 40
Figura 32 – Vista superior LPSP dividido. 41
Figura 33 – Padrão de repetição aplicado. 41
Figura 34 – Frequências para domo geodésico. 42
Figura 35 – Lado do icosaedro dividido conforme classe 1. 44
Figura 36 – Lado do icosaedro dividido conforme classe 2. 44
Figura 37 – Raio de abaulamento estrutura original. 47
Figura 38 – Tanque de 24 m de diâmetro com domo geodésico. 48
Figura 39 – Tanque de 24 m de diâmetro com domo geodésico. 48
Figura 40 – Domo geodésico do tanque com 24m de diâmetro – visto por dentro. .. 49
Figura 41 – Montagem do anel de compressão do domo geodésico. 49
Figura 42 – Domo geodésico durante montagem em tanque de 24m de diâmetro... 50
Figura 43 – Estrutura do domo geodésico para um tanque de 24m montada. 50
Figura 44 – Cobertura do domo geodésico de 24m. 51
Figura 45 – Instalação da sapata que prende o domo geodésico no costado. 51
Figura 46 – Secção transversal da barra do projeto original. 52
Figura 47 – Nó do projeto original do domo geodésico. 53
Figura 48 – Início do projeto do modelo físico. 54
Figura 49 – Vista superior do modelo do domo geodésico – Identificação dos nós. . 56
Figura 50 – Localização dos nós X tipo de nó. 58
Figura 51 – Localização das barras X tipo de barra. 59
Figura 52 – Nó do modelo computacional. 61
Figura 53 – Modelo computacional do modelo físico. 62
Figura 54 – A montagem dos nós no modelo computacional. 63
Figura 55 – Fixação do modelo na peça que simula o costado do tanque. 63
Figura 56 – Nó e peça usada para fixação do modelo físico do domo geodésico. 65
Figura 57 – Parafuso usado na montagem do modelo físico. 65
Figura 58 – Barras fabricadas para o modelo físico do domo geodésico. 66
Figura 59 – Montagem da peça que simula o costado do tanque. 66
Figura 60 – Anel de compressão montado. 67
Figura 61 – Primeiro dia de montagem. 68
Figura 62 – Segundo dia de montagem. 68
Figura 63 – Terceiro dia de montagem, modelo físico finalizado. 69
Figura 64 – Modelo físico finalizado visto por dentro. 69

Figura 65 – Modelo finalizado visto por dentro. 70
Figura 66 – Detalhe do nó do modelo físico. 70
Figura 67 – Caso de Carga 1. 72
Figura 68 – Passarela para acesso aos bocais instalada em domo geodésico. 72
Figura 69 – Caso de carga 2. 73
Figura 70 – Caso de carga 3. 73
Figura 71 – Flambagem – Caso de Carga 1. 75
Figura 72 - Flambagem – Caso de Carga 2. 76
Figura 73 – Flambagem – Caso de Carga 3. 76
Figura 74 – Suporte das cargas usado no ensaio estático. 77
Figura 75 – Identificação dos nós com carga e avaliados no primeiro caso de carga. 78
Figura 76 – Identificação dos nós com carga e avaliados no segundo e terceiro caso de carga. 79
Figura 77 – Identificação dos nós para interpretação dos resultados dos ensaios dinâmicos. 83
Figura 78 – Primeiro modo de vibrar do MCS. 83
Figura 79 – Segundo modo de vibrar do MCS. 84
Figura 80 – Trigésimo primeiro modo de vibrar do MCS. 84
Figura 81 – Trigésimo segundo modo de vibrar do MCS. 85
Figura 82 – 1º modo de vibrar pelo MEF – MCC. 87
Figura 83 – 2º modo de vibrar pelo MEF – MCC. 87
Figura 84 - 3º modo de vibrar pelo MEF – MCC. 88
Figura 85 – Relógio comparador usado nas medições. 89
Figura 86 – Relógios comparadores posicionados para o primeiro ensaio. 90
Figura 87 – Domo geodésico com a primeira carga do primeiro caso de carga. 91
Figura 88 – Relógios comparadores para o segundo e terceiro caso de carga. 92
Figura 89 – Identificação dos nós em que foram colocados os acelerômetros. 95
Figura 90 – Modelo físico instrumentado para ensaio dinâmico. 95
Figura 91 – Martelo de excitação. 96

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1– Tensão x deformação do material da estrutura original. 53
Gráfico 2 – Tensão x deformação do material do modelo. 64
Gráfico 3 – Deslocamentos pelo MEF – Caso de carga 1. 79
Gráfico 4–Deslocamentos pelo MEF – Caso de carga 2. 80
Gráfico 5 –Deslocamentos pelo MEF – Caso de carga 3. 81
Gráfico 6 – Deslocamentos modelo físico – Caso de carga 1. 91
Gráfico 7 – Deslocamentos modelo físico – Caso de carga 2. 93
Gráfico 8 – Deslocamentos modelo físico – Caso de carga 3. 93
Gráfico 9 – Ensaio dinâmico modelo físico - excitação no nó 40. 98
Gráfico 10 - Ensaio dinâmico modelo físico - excitação no nó 29. 99
Gráfico 11 - Ensaio dinâmico modelo físico - excitação no nó 30. 100
Gráfico 12 - Ensaio dinâmico modelo físico - excitação no nó 31. 101
Gráfico 13 - Ensaio dinâmico modelo físico - excitação no nó 27. 102
Gráfico 14 - Ensaio dinâmico modelo físico - excitação no nó 27 – Somente acelerômetro C1. 103
Gráfico 15 - Ensaio dinâmico modelo físico - excitação no nó 29 – Somente acelerômetro C1. 104
Gráfico 16 - Ensaio dinâmico modelo físico - excitação no nó 30 – Somente acelerômetro C1. 105
Gráfico 17 - Ensaio dinâmico modelo físico - excitação no nó 31 – Somente acelerômetro C1 106
Gráfico 18 - Ensaio dinâmico modelo físico - excitação no nó 40 – Somente acelerômetro C1 107
Gráfico 19 – Cálculo da rigidez – Caso de carga 2 - Ensaio experimental. 109
Gráfico 20 – Rigidez para o caso de carga 2 – Ensaio computacional. 109
Gráfico 21 - Cálculo da rigidez – Caso de carga 3 - Ensaio experimental. 111

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tabela de emissões Estrutura normal X Domo geodésico. 27
Tabela 2 – Dados do projeto original do domo geodésico. 47
Tabela 3 – Comparação entre vários modelos de domo geodésico com a estrutura original. 55
Tabela 4 – Coordenadas dos nós do modelo físico. 56
Tabela 5 – Tipos de barras para o modelo físico. 57
Tabela 6 – Tipos de nós para o modelo físico. 57
Tabela 7 – Cantoneiras comerciais de alumínio. 60
Tabela 8 – Valores da carga crítica de flambagem local para cada barra do domo geodésico. 74
Tabela 9 – Cargas críticas de flambagem global. 75
Tabela 10 – Carga máximas para os ensaios. 78
Tabela 11 – Resultados análise computacional para o primeiro caso de carga 78
Tabela 12 – Resultados análise computacional para o segundo caso de carga. 80
Tabela 13 – Resultados análise computacional para o terceiro caso de carga. 80
Tabela 14 – 52 primeiras frequências de ressonância para o MCS. 82
Tabela 15 -150 primeiras frequências de ressonância para o MCC. 86
Tabela 16 – Resultados análise física para o primeiro caso de carga. 91
Tabela 17 – Resultados análise física para o segundo caso de carga. 92
Tabela 18 – Resultados análise física para o terceiro caso de carga. 93
Tabela 19 – Modelos de acelerômetros usados no ensaio dinâmico. 94
Tabela 20 – Local de excitação da estrutura X Gráficos de Amplitude. 94
Tabela 21 - Resultados no acelerômetro C1. 97
Tabela 22 – Comparação da rigidez ensaio computacional e ensaio experimental – Caso de carga 2. 110
Tabela 23 – Deslocamentos após ajuste no modelo computacional - Caso de carga 2. 110
Tabela 24 – Comparação da rigidez após o ajuste do módulo de elasticidade do modelo computacional – Caso de Carga 2. 111
Tabela 25 - Comparação da rigidez ensaio computacional e ensaio experimental – Caso de carga 3. 112

Tabela 26 – Deslocamentos após ajuste no modelo computacional - Caso de carga 3. 112
Tabela 27 – Comparação da rigidez após o ajuste do módulo de elasticidade do modelo computacional – Caso de Carga 3. 113
Tabela 28 – Valores de deslocamento para força na estrutura real. 121

LISTA DE SÍMBOLOS

LPSP – Lado Principal do Sólido Platônico

v – Frequência do domo geodésico

S_L – Escala geométrica

Se – Escala do material

P_p – Carga na estrutura real

P_m – Carga no modelo físico

δ_p – Deslocamento na estrutura real

$\boldsymbol{\delta_m}$ – Deslocamento no modelo físico

MEF – Método dos elementos finitos

MCS – Modelo computacional simplificado para ensaio dinâmico

MCC – Modelo computacional completo para ensaio dinâmico

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 16
1.1 HISTÓRICO DOS DOMOS 18
1.2 EXEMPLOS DE DOMOS GEODÉSICOS 20
1.2.1 Domo do Estádio de Tacoma – Washigton – Estados Unidos 20
1.2.2 Esfera Geodésica no Epcot- Disneylândia – Orlando – EUA 21
1.2.3 Museu da biosfera – Montreal – Canadá 22
1.2.4 Utilização de domos geodésicos para cobertura de tanques de armazenamento de combustíveis 23
1.3 OBJETIVOS 29
1.3.1 OBJETIVO GERAL 29
1.3.2 OBJETIVO ESPECÍFICO 29
1.4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 30
2 GERAÇÃO DE DOMOS GEODÉSICOS 33
2.1 GERAÇÃO DAS COORDENADAS DOS NÓS PARA UM DOMO GEODÉSICO CLASSE 1 E FREQUÊNCIA 3V A PARTIR DE UM ICOSAEDRO 33
2.2 FREQUÊNCIA DOS DOMOS GEODÉSICOS 42
2.3 CLASSIFICAÇÃO DOS DOMOS GEODÉSICOS 42
3 CONCEPÇÃO, PROJETO, FABRICAÇÃO E MONTAGEM DO MODELO FÍSICO EM ESCALA REDUZIDA DO DOMO GEODÉSICO 45
3.1 APRESENTAÇÃO DA ESTRUTURA ORIGINAL 45
3.2 PROJETO DO MODELO FISICO 54
4 ANÁLISE DO MODELO COMPUTACIONAL 71
4.1 ENSAIOS ESTÁTICOS - MODELO COMPUTACIONAL 71
4.2 ENSAIOS DINÂMICOS - MODELO COMPUTACIONAL 81
5 ENSAIO DO MODELO FÍSICO 89
5.1 ENSAIOS ESTÁTICOS NO MODELO FISICO 89
5.2 ENSAIOS DINÂMICOS NO MODELO FISICO 94
6 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS E COMPUTACIONAIS 108
6.1 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS ESTATICOS 108
6.2 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DINÂMICOS 113

7 CONCLUSÃO.....114
REFERÊNCIAS.....117
APENDICE A – ANÁLISE DIMENSIONAL.....120
APÊNDICE B – PROJETOS DE FABRICAÇÃO.....122

1 INTRODUÇÃO

Engenheiros e arquitetos sempre mostraram interesse especial por estruturas que fossem capazes de vencer grandes vãos sem a necessidade de colunas intermediárias. Neste contexto, aparece uma estrutura conhecida como domo geodésico. Seguindo o formato abaulado de um domo mas, construído a partir de barras, o domo geodésico é uma estrutura leve se comparado com outros tipos estruturas. Projetado com base em um sólido platônico, o domo geodésico é formado por vários triângulos.

Os domos geodésicos são estruturas com uma relação resistência/peso muito maior do que outros tipos de estrutura, Ramaswamy (2002). Atualmente o uso de domos geodésicos está associado a cobertura de grandes construções. Segundo Bysiec (2013) os domos geodésicos podem ser montados para superar vãos de 300m sem a necessidade de colunas intermediárias. Um bom exemplo disso é ilustrado na Figura 1, onde pode-se ver a parte interna de um domo geodésico construído em Nagoya no Japão, cobrindo um estádio de baseball sem nenhuma coluna intermediária para sua sustentação. Na Figura 2 apresenta-se este mesmo domo geodésico pelo lado de fora.

Figura 1 – Domo de Nagoya – Vista interna.
Fonte: http://www.nagoya-dome.co.jp.

Pelo fato da relação resistência/peso ser maior do que em outras estruturas, os domos geodésicos utilizam menos matéria prima para sua construção e por isso, tendem a ser mais baratos que as estruturas mais comuns. É interessante comentar que na década de 60, o movimento hippie

utilizava estruturas do tipo domo geodésico para alguns de seus acampamentos, ocasião durante a qual o domo geodésico ganha o status de ecologicamente correto. A Figura 3 ilustra um domo geodésico utilizado nos acampamentos hippies.

Figura 2 – Domo de Nagoya – Vista externa.
Fonte : http://www.nagoya-dome.co.jp.

Figura 3 – Domo no acampamento hippie, Drop City, nos arredores de Trinidad, no Colorado
Fonte: http://en.wikipedia.org/wiki/Drop_City,

Segundo Shirley (1984) mesmo com um grande número de domos geodésicos construídos atualmente, esse tipo de estrutura ainda é uma novidade para muitos. Shirley (1984) atribuiu esse fato às dificuldades do projeto do domo geodésico, o qual Shirley (1984) classificou como sendo “matematicamente complicado e tedioso”.

1.1 HISTÓRICO DOS DOMOS

Os primeiros domos da história não eram domos geodésicos. Foram construídos na Índia e na região do mediterrâneo, geralmente para cobrir pequenas estruturas. Segundo Shirley (1984), os domos se tornaram mais significantes durante a era romana, com o desenvolvimento de novos materiais, e com o reconhecimento do efeito de arco na construção. Os domos nesse período eram construídos como uma série de arcos com o mesmo centro. A Figura 4 ilustra a parte externa do Panteão Romano construído em 27 a.C. e a Figura 5 a parte interna.

Figura 4 – Panteão Romano – Vista externa.
Fonte: O Autor.

Com a evolução das técnicas de engenharia, os domos passaram a ser fabricados e construídos de vários outros materiais, como aço, madeira, concreto, entre outros. Ramaswamy (2002), em seu livro voltado para treliças tridimensionais, dedica vários capítulos aos domos. Segundo, Ramaswamy (2002), os domos podem ser classificados como, Domo *Schwedler, Domo Lattice, Domo Lamella e o Domo Geodésico*. Na Figura 6 apresenta-se os quatro tipos de domos classificados por Ramaswamy (2002), incluindo uma indicação de resistência e rigidez para cada alternativa.

Figura 5 – Panteão Romano – Vista interna.
Fonte: O Autor.

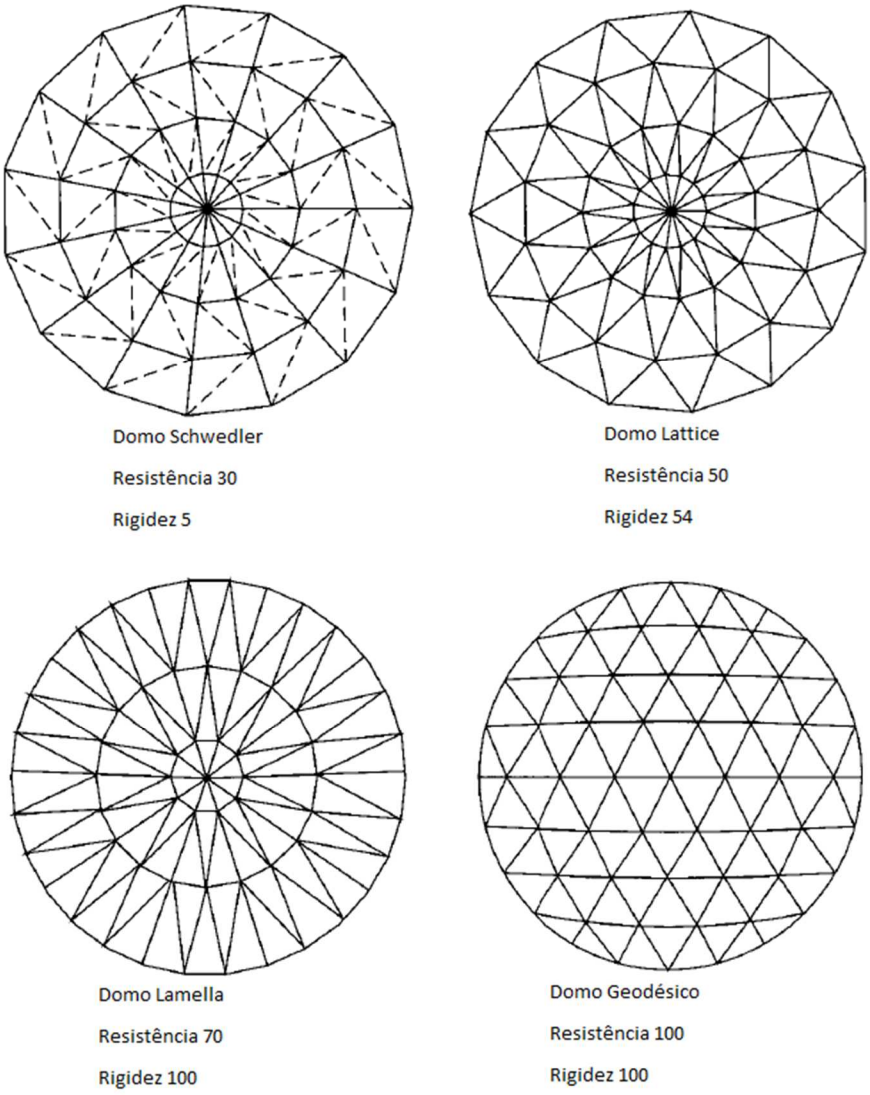


Figura 6 – Comparação de vários tipos de domo de estruturas metálicas
Fonte: Ramaswamy, 2002.

1.2 EXEMPLOS DE DOMOS GEODÉSICOS

Nas páginas a seguir são apresentados três domos geodésicos famosos, que conseguem impressionar pelo seu tamanho.

1.2.1 Domo do Estádio de Tacoma – Washigton – Estados Unidos

As informações sobre o domo de Tacoma foram retiradas do site http://www.tacomadome.org. O domo do estádio de Tacoma é um dos maiores domos de madeira construídos no mundo. Sua construção levou cerca de 2 anos.

O domo geodésico de Tacoma pesa aproximadamente 654 toneladas e foram utilizados aproximadamente 700m³ de concreto na construção de sua fundação. O domo tem 161,5 metros de diâmetro e 46,3 metros de altura. Na Figura 7 pode-se ver o Domo de Tacoma pelo lado de fora e na Figura 8 o domo é visto pelo lado de dentro.

Figura 7 – Vista externa do domo de Tacoma.
Fonte: Tacoma Dome, 2014.

Figura 8 – Vista por dentro do domo de Tacoma.
Fonte: Tacoma Dome, 2014.

1.2.2 Esfera Geodésica no Epcot- Disneylândia – Orlando – EUA

No parque da Disneylândia chamado Epcot, existe uma estrutura geodésica, uma atração conhecida como *Spaceship Earth*. Esta é uma das estruturas geodésicos mais famosas do mundo.

Esta estrutura se torna especial por representar uma esfera geodésica completa apoiada em três vigas. Sua construção durou 26 meses, sua inauguração foi em 1 de outubro de 1982, com o diâmetro de 50 metros e massa total de 7,040,000 kg. Na Figura 9 apresenta-se a esfera geodésica atual e na Figura 10 a esfera geodésica durante a construção.

Figura 9 – Esfera geodésica do Epcot Center, na Disneylândia.
Fonte: http://en.wikipedia.org/wiki/Spaceship_Earth_(Epcot).

Figura 10 – Construção da esfera geodésica do Epcot center.
Fonte: http://en.wikipedia.org/wiki/Spaceship_Earth_(Epcot).

1.2.3 Museu da biosfera – Montreal – Canadá

O museu da biosfera em Montreal no Canadá foi construído para a Exposição Universal de 1967 (Expo 67). O arquiteto responsável pela construção da esfera geodésica de Montreal foi Buckminster Fuller.

A estrutura do museu da biosfera, tem 76 metros de diâmetro e 62 metros de altura. Na Figura 11, apresenta-se a vista externa do Museu da Biosfera e na Figura 12 a vista interna.

Figura 11 – Domo do museu da biosfera vista externa.
Fonte: http://en.wikipedia.org/wiki/Montreal_Biosph%C3%A8re.

Figura 12 – Domo do museu da biosfera vista interna.
Fonte: http://en.wikipedia.org/wiki/Montreal_Biosph%C3%A8re.

1.2.4 Utilização de domos geodésicos para cobertura de tanques de armazenamento de combustíveis

Dentre as várias aplicações que os domos geodésicos podem desempenhar, uma delas é a cobertura de tanques para armazenamento de líquidos. Os tetos dos tanques de armazenamento comumente são feitos de aço carbono com uma estrutura tipo treliça. Na Figura 13 apresenta-se o projeto de uma estrutura para um tanque de 61 metros de diâmetro, que, neste caso está

apoiada em um conjunto de 19 colunas intermediárias. Caso fosse um domo geodésico, todas essas colunas seriam eliminadas de dentro do tanque.

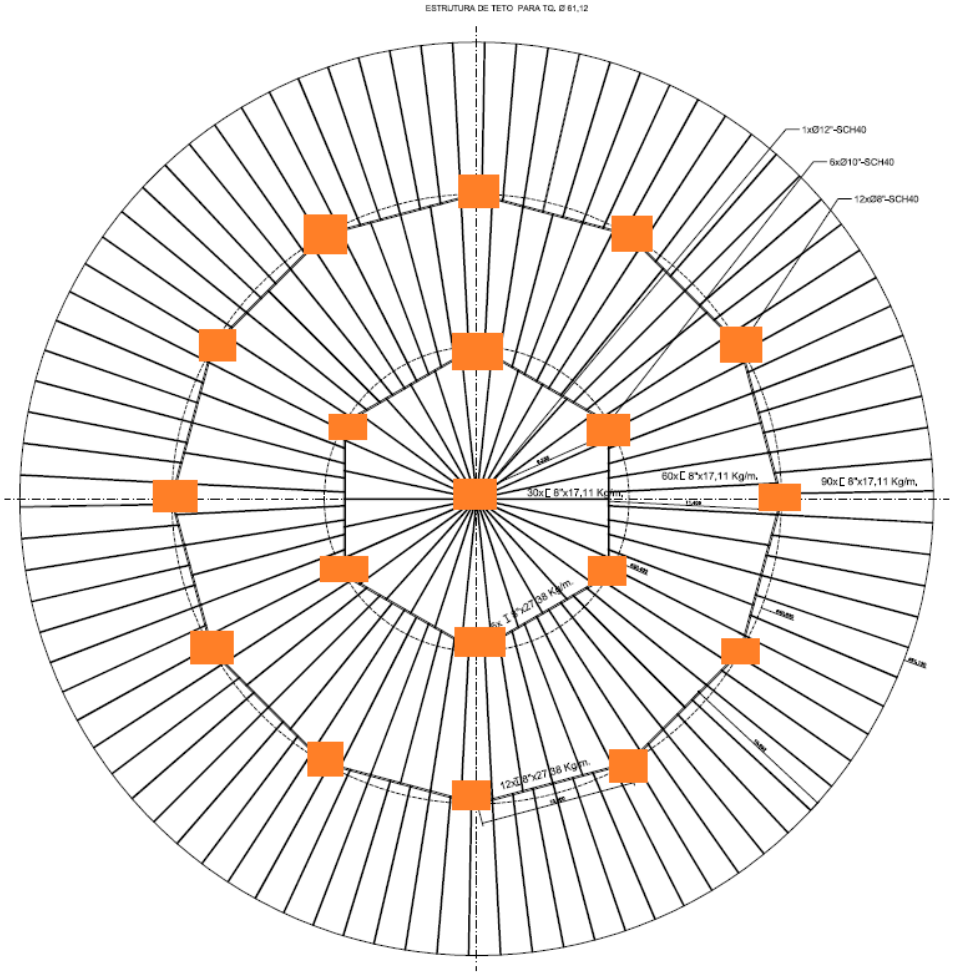


Figura 13 – Treliça do teto de um tanque com 61m de diâmetro.
Fonte: o autor, 2014.

Os tanques de armazenamento de líquidos podem variar seus diâmetros, desde pequenos tanques até tanques enormes, com diâmetros maiores de 100 metros. Na Figura 14 a instalação de um domo geodésico em um tanque de armazenamento. Segundo catálogo da BTE (2014) a aplicação de domos geodésicos em tanques de armazenamento tem muitas vantagens, se comparados com tetos com estrutura, dentre essas, pode-se citar:

a) 1/3 do peso, se comparado com, o teto cônico com chapas de aço carbono e estrutura tipo treliça;
b) Por não ter colunas possibilita um maior volume de armazenamento;
c) Economicamente viável para novos tanques;

d) É mais eficiente que os outros tipos de teto para evitar a contaminação do produto armazenado pela água e;
e) Pelo fato de ser mais leve, possibilita economia na fundação do tanque.

Figura 14 – Instalação de domo geodésico em tanque de armazenamento.
Fonte: o autor, 2014.

Mas a principal vantagem que o domo geodésico proporciona quando aplicado em tanques é que, com a retirada das colunas intermediárias, aumenta a eficiência do selo mecânico (teto flutuante interno). Na Figura 15 é apresentado um selo flutuante dentro de um tanque de armazenamento. O selo flutuante tem a função de diminuir a evaporação e a contaminação pela água do liquido armazenado. Os principais componentes do selo flutuante são, uma chapa de alumínio muito fina e as boias que fazem com que o selo flutue. Dessa forma a película fica sempre flutuando próximo ao liquido e não permite que os vapores do produto armazenado escapem para a atmosfera. Isto faz com que o selo mecânico desempenhe uma função ecológica e econômica muito importante. A função ecológica do selo flutuante é tão importante, que existe o projeto de lei número 070/12, protocolo 1088/12-DAP na assembleia legislativa do Paraná, exigindo a obrigatoriedade do selo flutuante nos tanques construídos em território Paranaense. Em Paulínia, no maior polo petroquímico da América Latina, esta exigência já está em vigor desde 1999. Para o melhor entendimento de como o domo geodésico melhora a eficiência do selo, a Figura 16 compara graficamente um tanque com estrutura e colunas intermediárias e um tanque com domo geodésico. Na Tabela 1, a coluna da esquerda mostra o valor de

emissões de vapor de gasolina para um tanque de 36 metros de diâmetro, com selo flutuante, teto de chapa de aço carbono e estrutura com colunas. Na coluna da direita a única diferença é que ao invés do tanque ter um teto de chapa de aço e estrutura com colunas o tanque tem um teto do tipo domo geodésico. Comparando as duas colunas é possível notar o aumento da eficiência do selo flutuante quando utilizado junto com o domo geodésico. Em Houston, nos Estados Unidos, por exemplo, o tanque com selo e colunas emite 5.879 kg/ano de vapor de gasolina para a atmosfera, esse mesmo tanque com domo geodésico, emite 820 kg/ano.

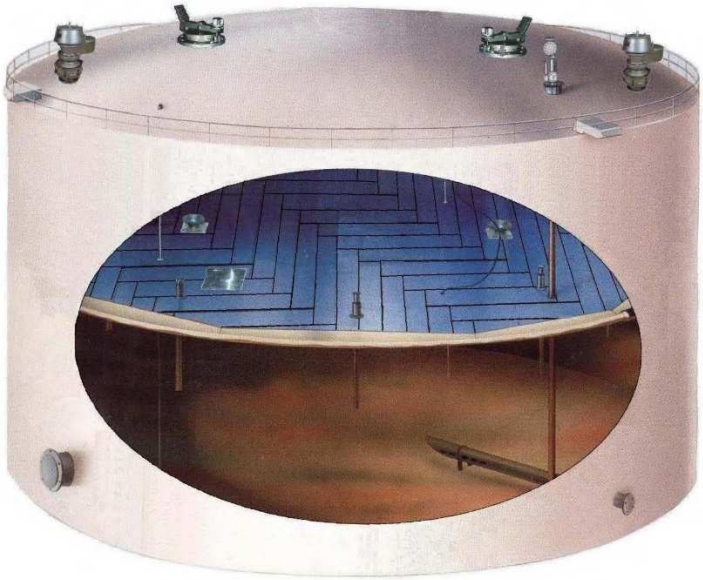


Figura 15 – Selo flutuante dentro do tanque.
Fonte: www.prorexoil.ee.mikare.net.

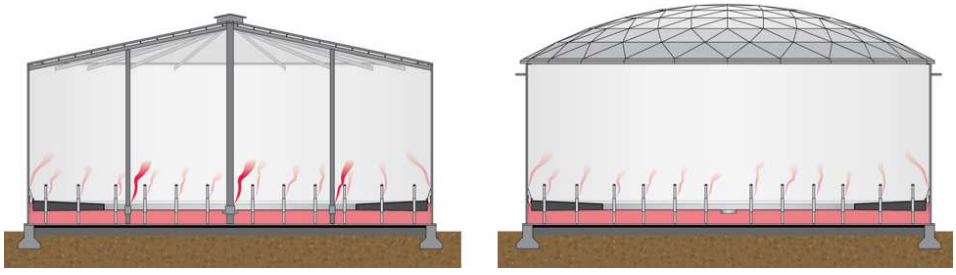


Figura 16 – Comparação teto com estrutura e domo geodésico.
Fonte: Catalogo HMT, 2014.

Comparações de emissões (kg/ano)		
Localização	**Tanque estruturado com colunas e selo flutuante**	**Tanque com domo geodésico e selo flutuante**
Houston	5.879	820
Los Angeles	5.259	739
Chicago	3.822	552
Moscou	9.039	447
Lagos, Nigéria	8.514	1.163
Singapura	7.732	1.061
Arábia Saudita	8.389	1.146

Tabela 1 – Tabela de emissões Estrutura normal X Domo geodésico.
Fonte: Catalogo HMT, 2014.

A Figura 17 apresenta um domo geodésico usado para cobrir um tanque de 24m de diâmetro. Na Figura 18 uma vista aproximada desse mesmo domo geodésico e a Figura 19 ilustra a parte interna desse domo geodésico, montado no terminal de combustível em Araucária no Paraná.

Figura 17 – Domo geodésico utilizado para cobrir tanque de 24m de diâmetro.
Fonte: o autor, 2014.

Figura 18 – Foto aproximada do domo geodésico do tanque de 24m de diâmetro.
Fonte: o autor, 2014.

Figura 19 – Tanque de 24m de diâmetro com domo geodésico visto por dentro.
Fonte: o autor, 2014.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho é projetar, usando conceitos da análise dimensional, fabricar, montar e ensaiar um modelo físico em escala reduzida, de um domo geodésico usado na cobertura de um tanque de armazenamento de líquidos. Será feito um modelo computacional igual ao modelo físico. O modelo computacional será ensaiado, da mesma forma que o modelo físico, com análise numérica, em elementos finitos. Isso possibilitará a comparação os resultados obtidos.

1.3.2 OBJETIVO ESPECÍFICO

Como objetivos específicos, podemos citar:

1) Determinar a carga estática de colapso por flambagem local;
2) Determinar a carga estática de colapso por flambagem global (numericamente);
3) Avaliação das frequências de ressonância e dos modos de vibrar do modelo computacional;
4) Avaliação das frequências de ressonância para o modelo físico;
5) Verificação da rigidez da estrutura para o modelo físico;
6) Verificação da rigidez da estrutura para o modelo computacional e;
7) Comparação entre a rigidez do modelo físico com o modelo computacional. Levando em conta que o modelo físico representa o comportamento real da estrutura geodésica serão feitos ajustes no modulo de elasticidade do modelo computacional, fazendo com que o comportamento do modelo computacional se aproxime do comportamento do modelo físico, isso vale tanto para os ensaios estáticos quanto dinâmico.

1.4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Shirley (1984) e Diniz (2006) relatam em seus trabalhos a pouca literatura sobre os domos geodésicos. Realmente a bibliografia específica sobre domos geodésicos é restrita.

Segundo Makowski (1979) o primeiro domo geodésico, na história, foi construído em 1922 na cidade de Jena, na Alemanha por *Walter Bauersfeld*. Trata-se de um Planetário para a indústria ótica Zeiss. Mas ao pesquisar sobre estruturas geodésicas, o nome de *Robert Buckminster Fuller* é o mais citado. Segundo Kubic (2009), *Buckminster Fuller* foi o grande patrocinador destas estruturas durante a década de 1950.

Fuller (1975), classifica os domos geodésicos dentro de um grupo maior de estruturas, designado por *tensegrity structures*. *Tensegrity* é a contração do termo em inglês *tensional integrity*. Fuller (1975), afirma que as estruturas *Tensegrity* tem como característica principal o comportamento estrutural contínuo, isto é, quando a estrutura é submetida a carregamentos, todos os seus membros atuam em conjunto. Diferente de outras estruturas em que esse sistema é descontinuo, ou seja, cada elemento age de forma independente.

Fuller (1975) descreve as estruturas geodésicas como um fenômeno matemático, ressaltando o fato de haver encontrado estruturas geodésicas na natureza. É o caso de estruturas microbiológicas, como nas radiolárias, onde se observam estruturas geodésicas baseadas em octaedros. Fuller (1975) afirma ainda que sua pesquisa desenvolveu-se primeiro no campo matemático para depois observar essas estruturas na natureza.

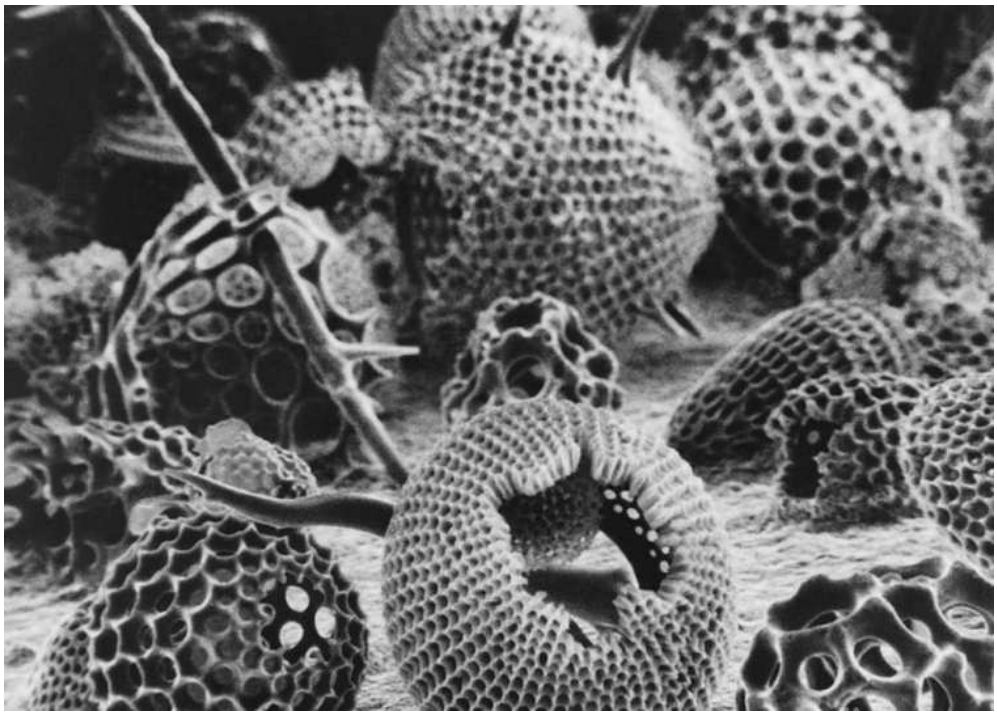


Figura 20 – Radiolárias, apresentam estruturas geodésicas.
Fonte http://fineartamerica.com/featured/radiolarians-sem-omikron.html.

Kenner (1976) demonstra como gerar vários tipos de cúpulas geodésicas usando trigonometria esférica e traz alguns conceitos interessantes como, a classificação dos domos geodésicos em classes, frequência das cúpulas geodésicas e sólidos Platônicos, assuntos que serão melhor explicados nos próximos capítulos deste trabalho.

Clinton (1965), demonstra várias formas diferentes de como gerar uma cúpula geodésica a partir de um icosaedro. Usando geometria analítica ao invés de trigonometria esférica para gerar uma cúpula geodésica. *Joe Clinton* trabalhou com *Fuller* em um projeto da *NASA* chamado *"Strutural Design Concepts for Future Space Missions"*.

Shirley (1984) compara os resultados obtidos por métodos numéricos e experimentais, em ensaios estáticos, realizados em dois domos feitos de madeira. Um domo com 39 pés (aproximadamente 11,88 m) de diâmetro e um segundo domo com 45 pés (aproximadamente 13,716 m) de diâmetro. Para a análise numérica Shirley (1984), utilizou o método dos elementos finitos e comparou dois tipos de elementos, de treliça e de casca. O autor escreve que a escolha do elemento depende da frequência do domo a ser analisado. Shirley (1984), encontrou diferenças nos deslocamentos, entre o modelo numérico e o

experimental na ordem de 69,4% a 82,3%, sendo os melhores resultados obtidos com elemento de treliça.

Kubik (2009) faz análises com elementos finitos utilizando elementos de treliça em um modelo computacional de domo geodésico, destinado a moradias populares na Índia. No seu trabalho Kubik (2009), calcula as cargas de vento, o próprio peso do domo, carga de neve, terremotos e faz várias simulações. A ideia de utilizar o domo geodésico como moradias populares advém do fato de o domo geodésico utilizar menos matéria prima se comparado com outras estruturas.

Outro trabalho voltado para análise de domos geodésicos é o trabalho de Krüger e Rodrigues (2006). Neste artigo é estudado o comportamento de um domo *tensegrity*, conforme Figura 21.

Bysiec (2013), faz uma análise numérica de um domo geodésico, *double-layer*, isto é um domo dentro do outro interligado por barras.

Os trabalhos mais recentes visam otimização dos domos geodésicos. Nesta linha existem algumas publicações, como o trabalho de Hasançebi et al. (2009) e Kaveh e Talahari (2011).

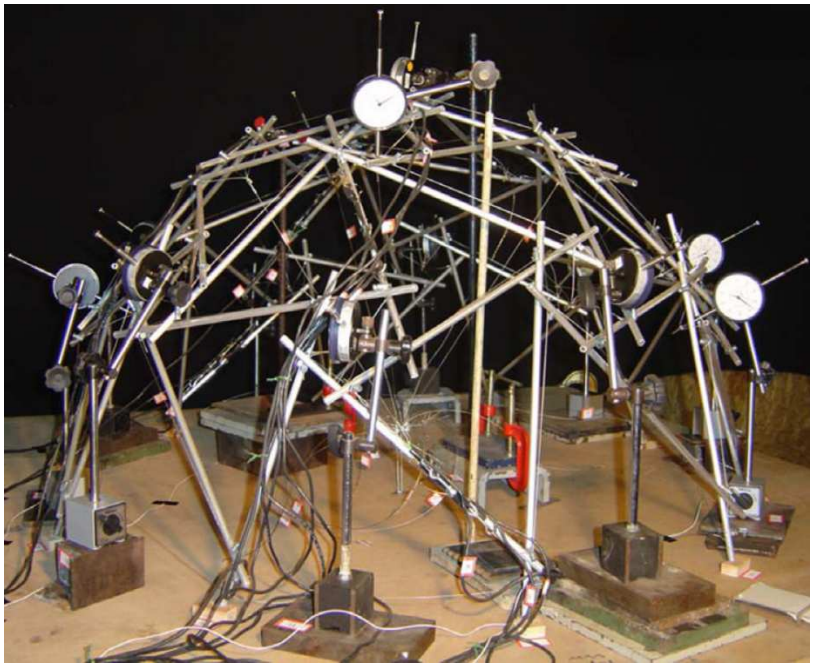


Figura 21 – Domo ensaio na Universidade Federal de Minas Gerais.
Fonte: Krüger e Rodrigues, 2006.

2 GERAÇÃO DE DOMOS GEODÉSICOS

Na primeira secção deste capítulo, será detalhado como gerar as coordenadas dos nós para uma esfera geodésica. Na sequência do capítulo será explanado o que é a frequência nas estruturas geodésicas. Finalizando o capítulo será explicada a diferença, no momento de gerar as coordenadas dos nós, entre uma esfera geodésica classe 1 e classe 2.

2.1 GERAÇÃO DAS COORDENADAS DOS NÓS PARA UM DOMO GEODÉSICO CLASSE 1 E FREQUÊNCIA 3V A PARTIR DE UM ICOSAEDRO

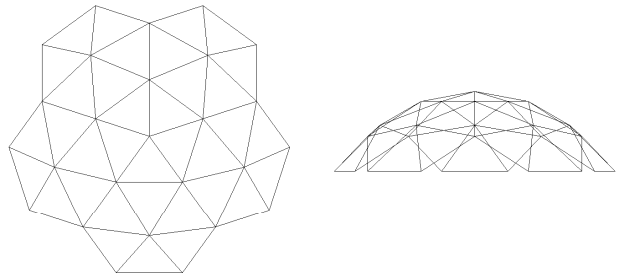
Clinton (1965) descreve uma forma de encontrar as coordenadas dos nós da esfera geodésica baseada em geometria analítica. É esta forma de encontrar as coordenadas dos nós que será abordada neste trabalho. Kenner (1976) usa a trigonometria esférica para encontrar as coordenadas dos nós do domo geodésico, os dois resultados são iguais.

Shirley (1984) descreve em seu trabalho que a base para gerar uma cúpula geodésica é um sólido Platônico, a cúpula geodésica sempre estará circunscrita em dos sólidos Platônicos. Eves (2004) descreve as particularidades dos sólidos Platônicos. São poliedros em que todas as faces são iguais e todos os vértices tem o mesmo número de arestas. Na natureza encontram-se somente 5 sólidos Platônicos: tetraedro, cubo, octaedro, dodecaedro e icosaedro, conforme a Figura 22.

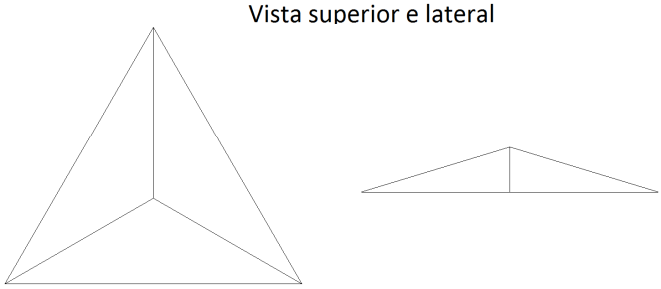
Nome	Imagens	Faces	Arestas	Vértices
tetraedro		4	6	4
cubo (hexaedro)		6	12	8
octaedro		8	12	6
dodecaedro		12	30	20
icosaedro		20	30	12

Figura 22 – Sólidos Platônicos.
Fonte: SÓLIDO Platônico, 2014.

Shirley (1984) recomenda que o primeiro passo para o projeto do domo geodésico é a escolha do sólido Platônico. Clinton (1965), mostra como fazer essa escolha. Quanto maior o número de lados do sólido Platônico escolhido, mais próximo ao formato de uma esfera, terá o domo geodésico. Isto significa que o domo será mais arredondado. A forma mais arredonda do domo geodésico ocorre devido ao fato das barras serem menores, em maior número e em maior variedade. Os domos geodésicos apresentados na Figura 23 foram gerados a partir de sólidos Platônicos distintos, as demais características como, tamanho, classe e frequência, são as mesmas. É possível identificar que o domo geodésico gerado a partir do icosaedro, sólido Platônico com 20 lados, é mais arredondado, do que o domo gerado a partir do tetraedro, sólido Platônico com 4 lados. Segundo Clinton (1965), quanto mais arredondado for um domo geodésico, maior será sua capacidade de suportar cargas.



Domo geodésico gerado a partir do icosaedro
Vista superior e lateral



Domo geodésico gerado a partir do tetraedro
Vista superior e lateral

Figura 23 – Comparação de domo geodésico gerado a partir de icosaedro e tetraedro.
Fonte: o autor, 2014.

Na sequência será demonstrado como gerar um domo geodésico a partir de um icosaedro, conforme Clinton (1965). Na Figura 24 apresenta-se o icosaedro circunscrito pela esfera que será dividida para gerar o domo geodésico.

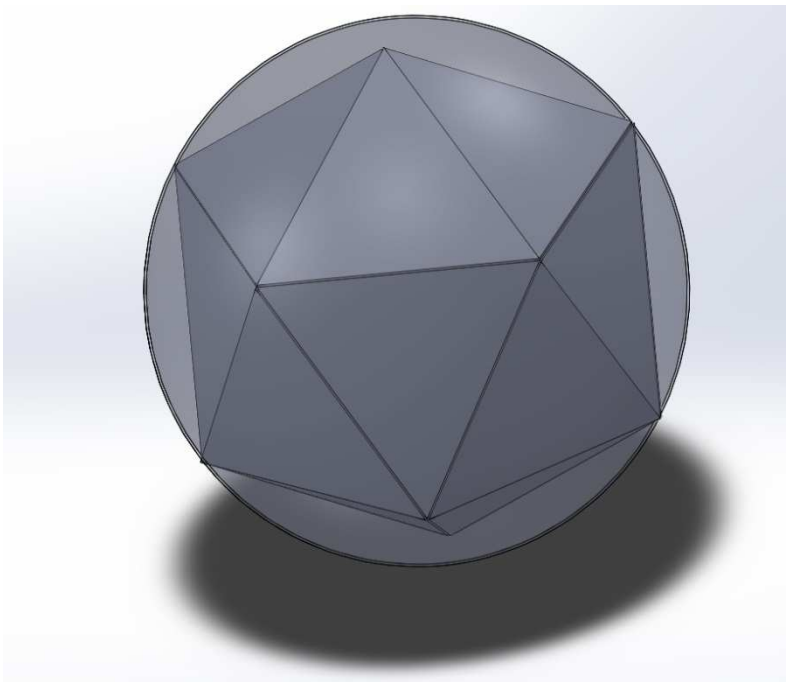


Figura 24 – Icosaedro inscrito.
Fonte: o autor, 2014.

Com o icosaedro inscrito em uma esfera, no qual a origem do sólido Platônico e da esfera coincidem, será escolhido um lado do icosaedro. O lado escolhido do icosaedro será identificado neste trabalho como Lado Principal do Sólido Platônico (LPSP). Na Figura 25, o lado destacado do icosaedro, representa o lado escolhido ou o LPSP.

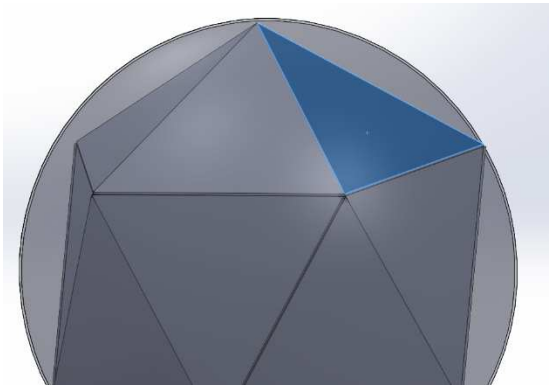


Figura 25 – Lado do icosaedro selecionado.
Fonte: o autor, 2014.

O próximo passo é a divisão das arestas do LPSP. As arestas devem ser sempre divididas em comprimentos iguais. No exemplo a seguir as arestas são divididas em três segmentos de retas. A ilustração da Figura 26 mostra uma das arestas divididas em três partes iguais, essa divisão ocorrerá nas outras duas

arestas do LPSP da mesma forma. Os pontos originários das divisões das arestas do LPSP são ligados por meio de retas que serão paralelas a aresta contrária, ilustrado na Figura 27.

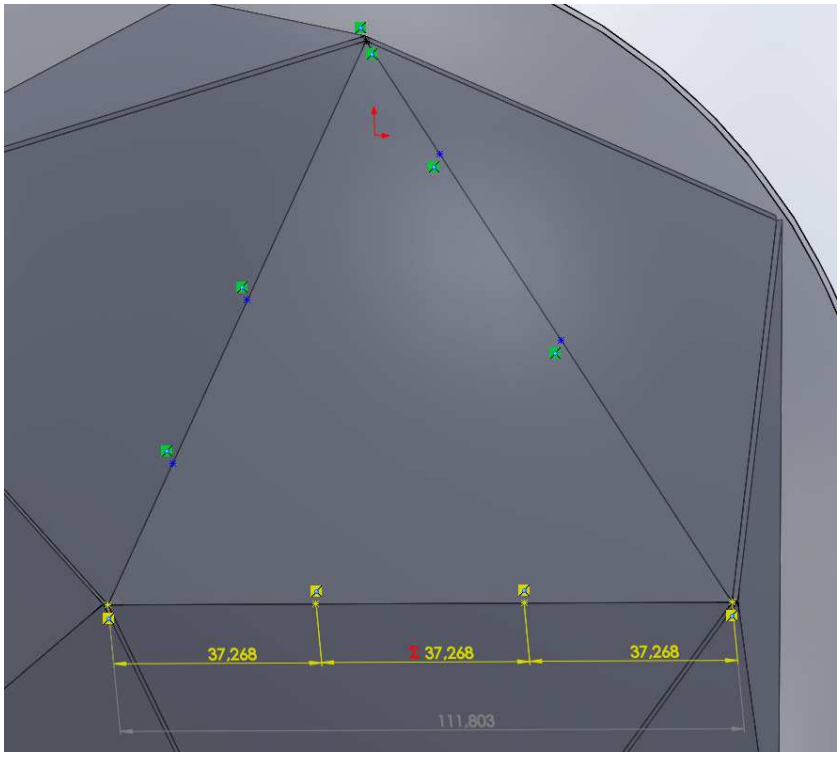


Figura 26 – Divisão da aresta do LPSP dimensões em [mm].
Fonte: o autor, 2014.

Os pontos gerados a partir da intersecção das linhas apresentadas na Figura 27, estão identificados na Figura 28. Esses pontos devem ser ligados através de uma reta ao centro do sólido. Na Figura 29 estão em evidência as linhas, ligando os pontos identificados na Figura 28 ao centro do sólido Platônico. Se as linhas mostradas na Figura 29 forem prolongadas sentido contrário ao centro da esfera, em algum momento essas linhas se encontrão com a superfície da esfera, conforme Figura 30.

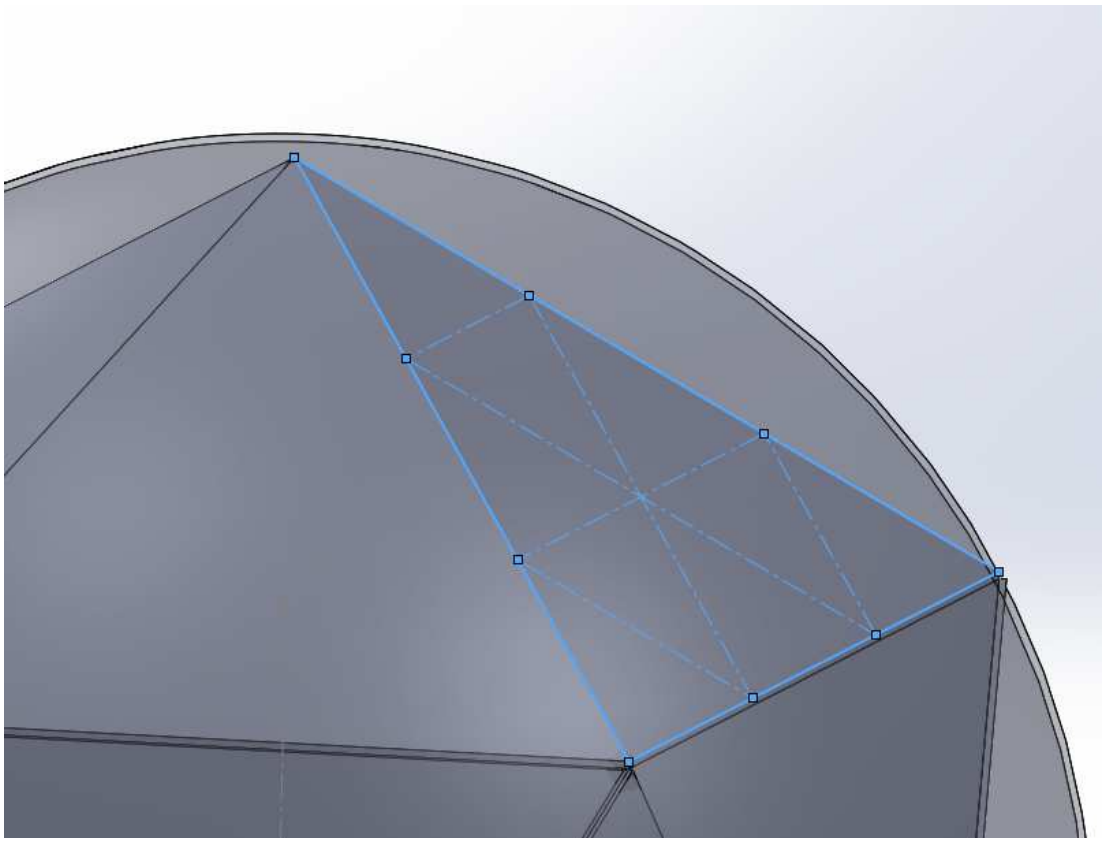


Figura 27 – Lado do icosaedro dividido.
Fonte: o autor, 2014.

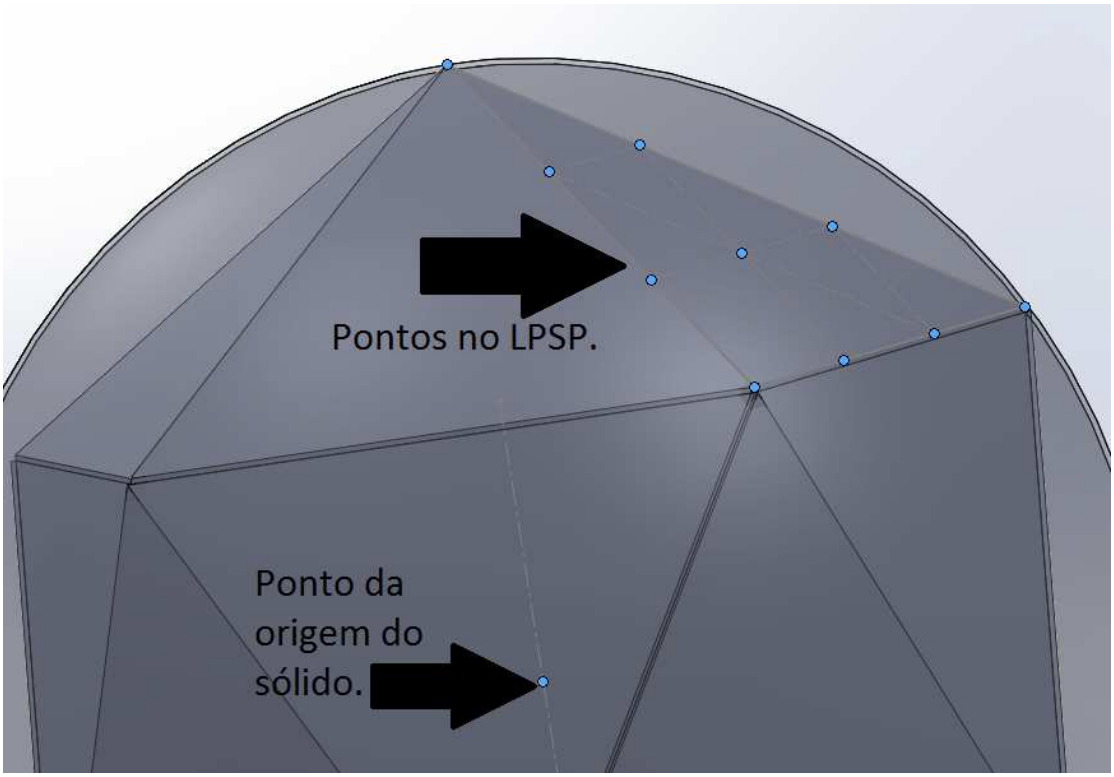


Figura 28 – Pontos de referência para gerar coordenadas.
Fonte: o autor, 2014.

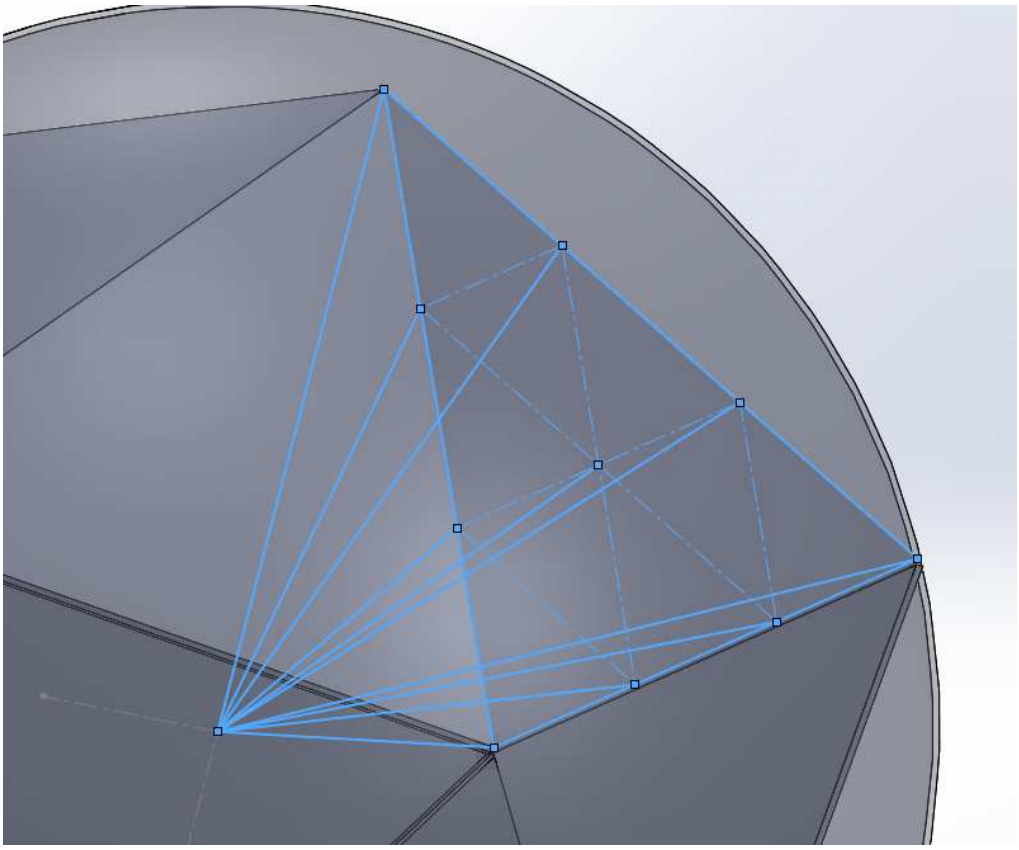


Figura 29 – Linhas ligando o ponto central ao ponto de intersecção.
Fonte: o autor, 2014.

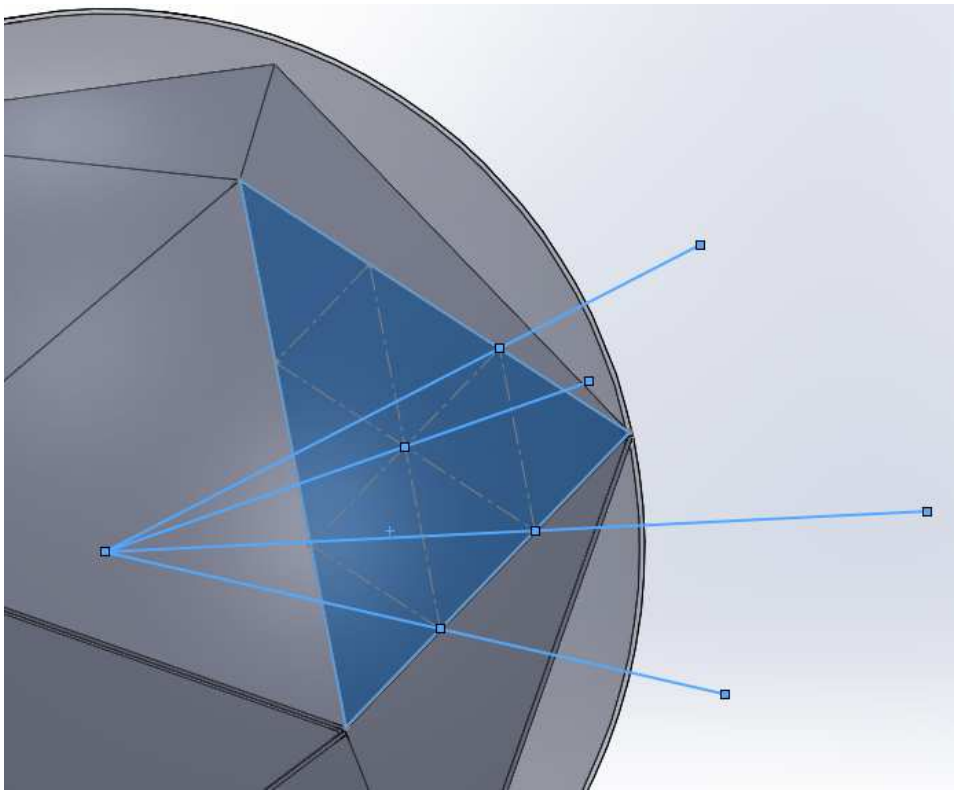


Figura 30 – Prolongamento das linhas até encontrarem a superfície da esfera.
Fonte: o autor, 2014.

Os pontos onde o prolongamento das linhas e a superfície da esfera se encontram, são as coordenadas dos nós do domo geodésico. Ligando esses pontos com linhas similares as linhas que foram usadas para dividir o LPSP, são encontrados os comprimentos das barras. Fazendo isto somente com o lado escolhido, encontra-se o que Clinton (1965), designou por setor da esfera geodésica. Na Figura 31 tem-se uma ilustração do setor da esfera geodésica.

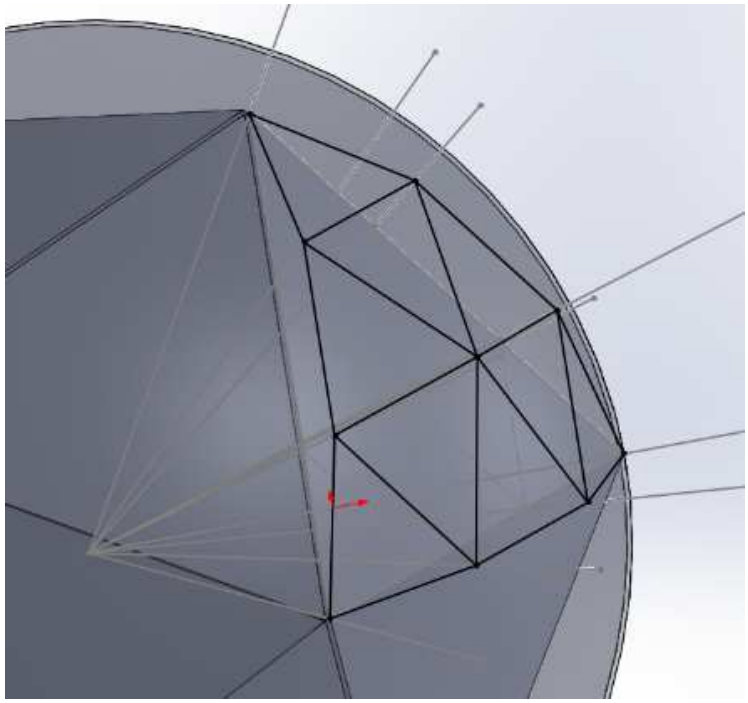


Figura 31 – Primeiro setor do domo geodésico traçado.
Fonte: o autor, 2014.

Na Figura 32 na vista superior, pode-se observar que, o setor não é nada mais que um padrão de repetição e que se o setor for repetido para cada lado do sólido Platônico, será gerada uma esfera geodésica.

A Figura 33 ilustra o padrão de repetição aplicado somente em 5 lados do icosaedro, formando a parte superior da esfera.

Para gerar o domo geodésico a partir da esfera, deve-se definir a altura do domo e traçar um plano de corte. Na altura que o plano de corte indicar deverá ser feito um corte na esfera geodésica, gerando assim um domo geodésico que, nada mais é do que uma parte da esfera.

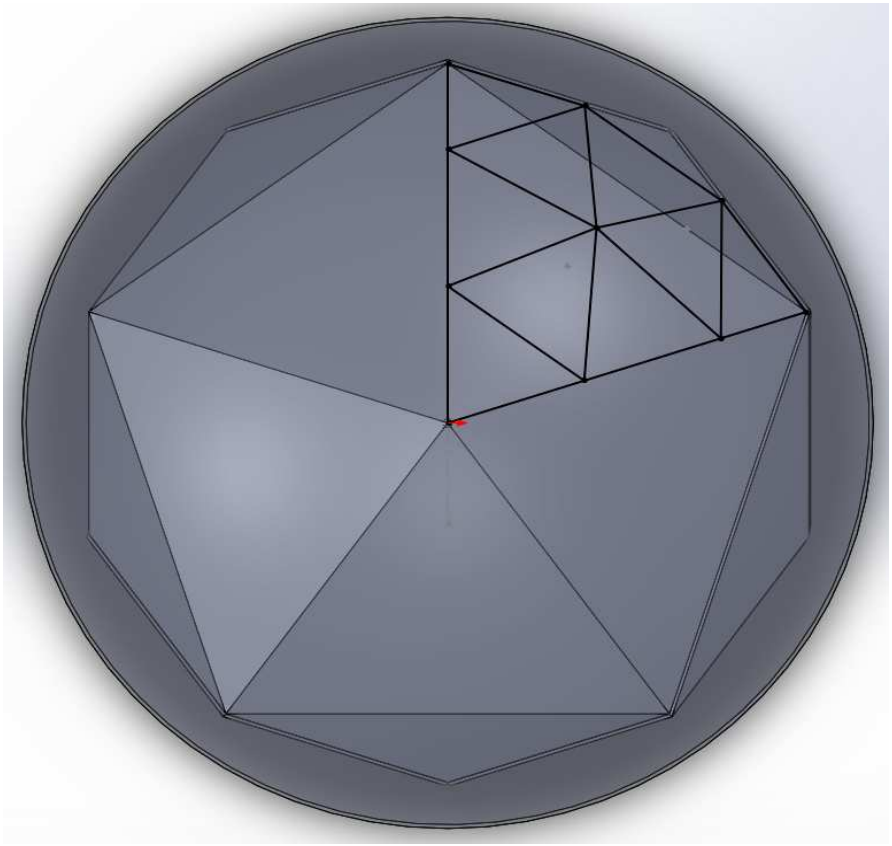


Figura 32 – Vista superior LPSP dividido.
Fonte: o autor, 2014.

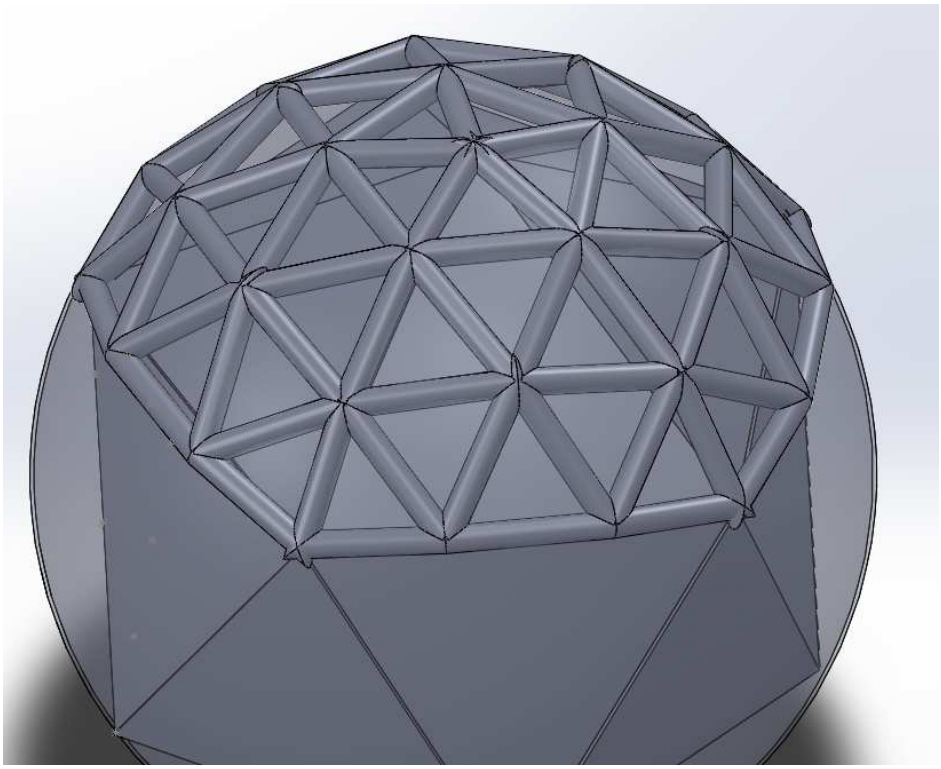


Figura 33 – Padrão de repetição aplicado.
Fonte: o autor, 2014.

2.2 FREQUÊNCIA DOS DOMOS GEODÉSICOS

Neste item serão detalhadas as várias formas de dividir o LPSP, gerando domos com diferentes configurações. O primeiro conceito que será explorado é o conceito de frequência. Frequência (v) é o número de divisões em que o LPSP é dividido para gerar o domo geodésico. Na Figura 34 são apresentadas as frequências 2v, 3v e 4v para o mesmo lado de um icosaedro. As linhas mais espessas representam as arestas do lado do icosaedro, as arestas são divididas em 2 segmentos iguais para formar a frequência 2v, em 3 segmentos iguais para frequência 3v e em 4 segmentos iguais para frequência 4v, e assim por diante. Quanto maior for a frequência, mais próximo de uma esfera será o formato do domo geodésico gerado. Segundo Clinton (1965), quanto maior for a frequência, maior será a capacidade do domo geodésico de suportar cargas externas, mas isto representa um domo geodésico com mais barras e, consequentemente, mais pesado.

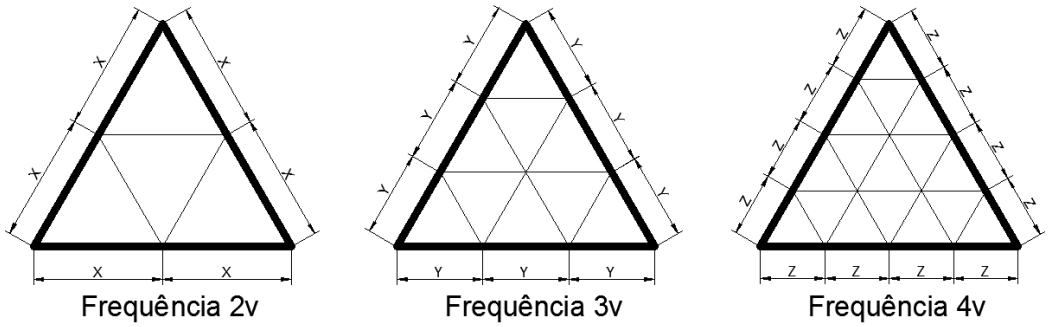


Figura 34 – Frequências para domo geodésico.
Fonte: o autor, 2014.

2.3 CLASSIFICAÇÃO DOS DOMOS GEODÉSICOS

A classificação dos domos geodésicos de acordo com a forma com que o LPSP é dividido é abordado no trabalho de Clinton (1965). Clinton (1965), divide os domos geodésicos, conforme abaixo.

a) Classe 1
   - Método 1
   - Método 2

- Método 3

b) Classe 2
   - Método 1
   - Método 2
   - Método 3

Para todas as classes e métodos é possível encontrar as coordenadas através de geometria analítica ou trigonometria esférica. A seguir será abordada a forma de gerar esferas geodésicas para a Classe 1 e Classe 2, pelo método 1.

As classes do domo geodésico se referem a uma condição geométrica, na Classe 1 é uma condição de paralelismo e na Classe 2 é uma condição de perpendicularidade.

Na Classe 1, as linhas que dividem o lado do icosaedro são paralelas as arestas do icosaedro. Na Figura 35, as arestas do icosaedro estão representadas com linhas mais espessas, pode-se observar o paralelismo ocorrendo da seguinte forma, no lado esquerdo da Figura 35, frequência 2v, o segmento de reta AB é paralelo a aresta 12, o segmento de reta CB é paralelo a aresta 32 e o segmento de reta AC é paralelo ao segmento de reta 13. Isto é valido para qualquer frequência, no lado direito da Figura 35, observa-se o paralelismo para a frequência 3v, ocorrendo da seguinte forma, segmentos de reta ED e FC são paralelos a aresta 23, segmentos de reta BC e AD paralelos a aresta 12 e segmentos de reta EB e FA paralelos a aresta 13.

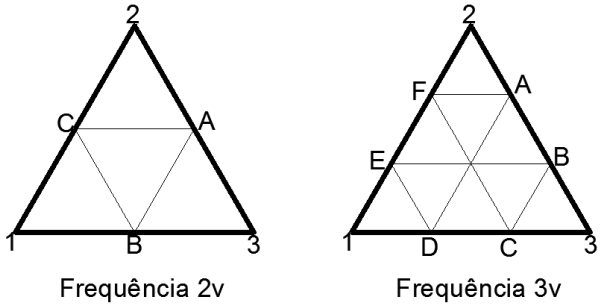


Figura 35 – Lado do icosaedro dividido conforme classe 1.
Fonte: o autor, 2014.

A perpendicularidade existente da divisão do LPSP, para gerar um domo geodésico classe 2, é ilustrada na Figura 36. A perpendicularidade ocorre da seguinte forma, na frequência 2v lado direito da Figura 36 o segmento de reta 2B e perpendicular à aresta 13, o seguimento de reta 1C é perpendicular à aresta 23 e o seguimento de reta 3A é perpendicular à aresta 12. Isto também pode ser observado para a frequência 4v no lado esquerdo da Figura 36. Segundo Clinton (1965), para os domos geodésicos Classe 2 apenas frequências pares são possíveis.

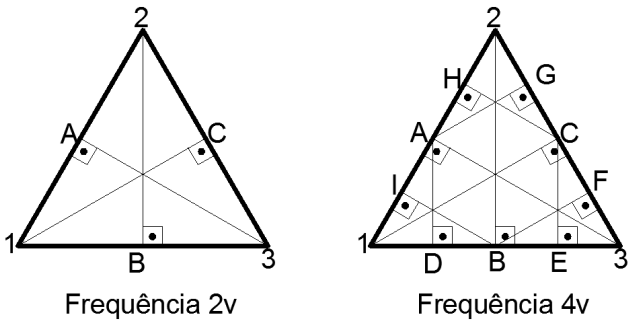


Figura 36 – Lado do icosaedro dividido conforme classe 2.
Fonte: o autor, 2014.

3 CONCEPÇÃO, PROJETO, FABRICAÇÃO E MONTAGEM DO MODELO FÍSICO EM ESCALA REDUZIDA DO DOMO GEODÉSICO

Neste capítulo serão mostrados a concepção, o projeto, a fabricação e a montagem do modelo físico do domo geodésico. O primeiro item abordado neste capítulo será a apresentação da estrutura original do domo geodésico, aplicada para cobrir um tanque com 24 m de diâmetro. Em seguida será mostrada a montagem de um modelo computacional do modelo físico. Para a montagem do modelo computacional, foram usados os conceitos de análise dimensional e avaliadas as interferências que provavelmente, ocorreriam na montagem. Por fim será explanada como foi a fabricação e a montagem do modelo físico.

3.1 APRESENTAÇÃO DA ESTRUTURA ORIGINAL

É com base na estrutura geodésica apresentada a seguir, que foi elaborado o projeto do modelo físico, levando em consideração os fatores de escalas descritos por Lobo Carneiro (1993).

O projeto da estrutura original deve seguir algumas premissas, pois existem normas que regulamentam a construção de tanques de armazenamento. As normas utilizadas no Brasil para construção de tanques são, a *NBR-7821 – Tanques soldados para armazenamento de petróleo e derivados, 1983* e a norma *N-270, Projeto de Tanques Atmosféricos, 2003,* da Petrobrás. Devido a última revisão da *NBR*-7821 ser de 1983, muita antiga, e a N-270 ser uma norma que remete em vários itens a norma americana, *API-650 - Welded Steel Tanks for Oil Storage, 2007*, o mercado brasileiro usualmente se baseia na API-650 (2007). A API-650 (2007), normatiza a construção de domos geodésicos de alumínio para tanques de armazenamento no Apêndice G.

No apêndice G existem várias orientações para o projeto de domo geodésico. Algumas destas orientações são citadas a seguir, a título de exemplo:

a) O projeto estrutural do domo geodésico deverá ser elaborado tratando o domo geodésico como uma treliça tridimensional ou como uma treliça bidimensional com uma membrana (os painéis que cobrem o

tanque), misturando elementos de treliça bidimensional e elementos de casca;

b) A flambagem local e global devem levar em consideração um fator de segurança de 1,65;

c) A forma de abordar, a força de vento, carga sísmica, carga de neve, carga viva e pressão interna.

Considera-se, neste trabalho, que o projeto original do domo geodésico, foi elaborado de acordo com o Apêndice G da API-650 (2007), não será feita uma validação do projeto.

O projeto que servirá como base para a construção do modelo físico é o projeto de um domo geodésico instalado em um tanque de 24 metros de diâmetro. No Apêndice G da API-650 (2007), o raio de abaulamento permitido para o domo geodésico, é um coeficiente, que deve estar entre 1,2 a 0,7 vezes o diâmetro do tanque. Neste caso como o tanque tem 24 m de diâmetro e o raio de abaulamento, que consta no projeto do domo, é de 25,94 m, o coeficiente do raio de abaulamento do domo geodésico original é 1,08. Na Figura 37 é ilustrado o raio de abaulamento do domo geodésico montado no tanque de 24 m de diâmetro.

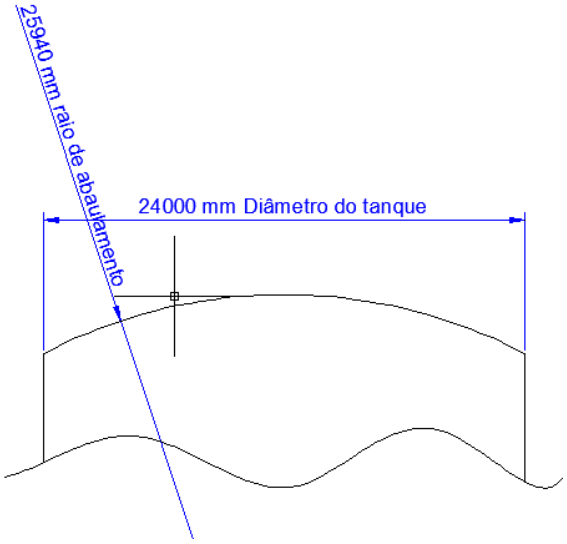


Figura 37 – Raio de abaulamento estrutura original.
Fonte: o autor, 2014.

Nas Figuras 38 e 39 mostra-se a parte externa do domo geodésico montado sobre o tanque e na Figura 40 a vista interna. Na Figura 41 a montagem do anel de compressão que é o início da montagem da estrutura geodésica no tanque. Na Figura 42 uma boa parte da estrutura do domo já está montada, pode-se identificar que primeiro é feita a montagem das barras, para depois ser feita a montagem dos painéis. Figura 43 todas as barras estão montadas. Na Figura 44 ilustra-se a montagem dos painéis que fazem a cobertura e protegem o líquido armazenado de chuvas, por exemplo. Os painéis são fabricados em alumínio com espessura de 0,2 mm. Depois de finalizado o domo geodésico é içado até a parte superior do costado e preso por sapatas. A Figura 45 ilustra a fixação das sapatas do domo geodésico no costado do tanque. Na Tabela 2 estão detalhadas algumas características do projeto original do domo geodésico.

Descrição	Unidade	Domo original
Sapata de fixação	Peças	18
Quantidade de nós	Peças	54
Quantidade de barras	Peças	145

Tabela 2 – Dados do projeto original do domo geodésico.
Fonte: o autor, 2014.

Figura 38 – Tanque de 24 m de diâmetro com domo geodésico.
Fonte: o autor, 2014.

Figura 39 – Tanque de 24 m de diâmetro com domo geodésico.
Fonte: o autor, 2014.

Figura 40 – Domo geodésico do tanque com 24m de diâmetro – visto por dentro.
Fonte: o autor, 2014.

Figura 41 – Montagem do anel de compressão do domo geodésico.
Fonte: o autor, 2014.

Figura 42 – Domo geodésico durante montagem em tanque de 24m de diâmetro.
Fonte: o autor, 2014.

Figura 43 – Estrutura do domo geodésico para um tanque de 24m montada.
Fonte: o autor, 2014.

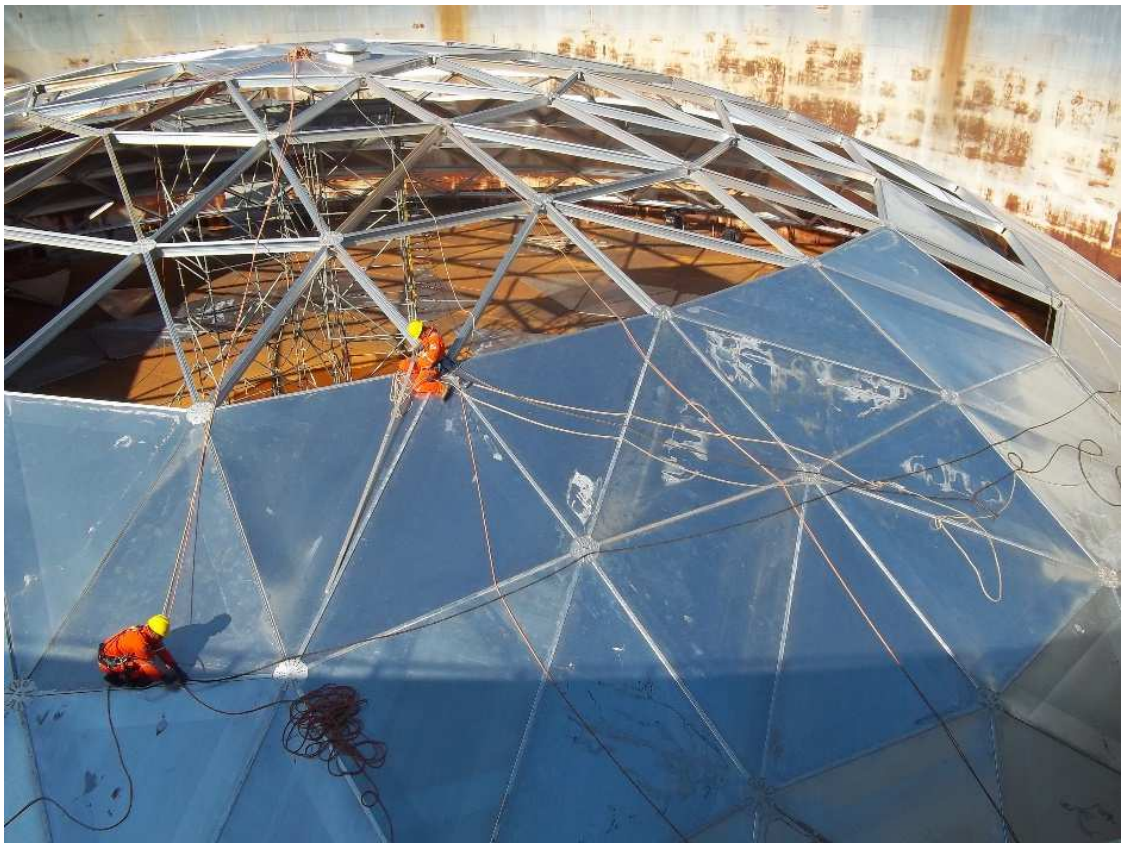


Figura 44 – Cobertura do domo geodésico de 24m.
Fonte: o autor, 2014.

Figura 45 – Instalação da sapata que prende o domo geodésico no costado.
Fonte: o autor, 2014.

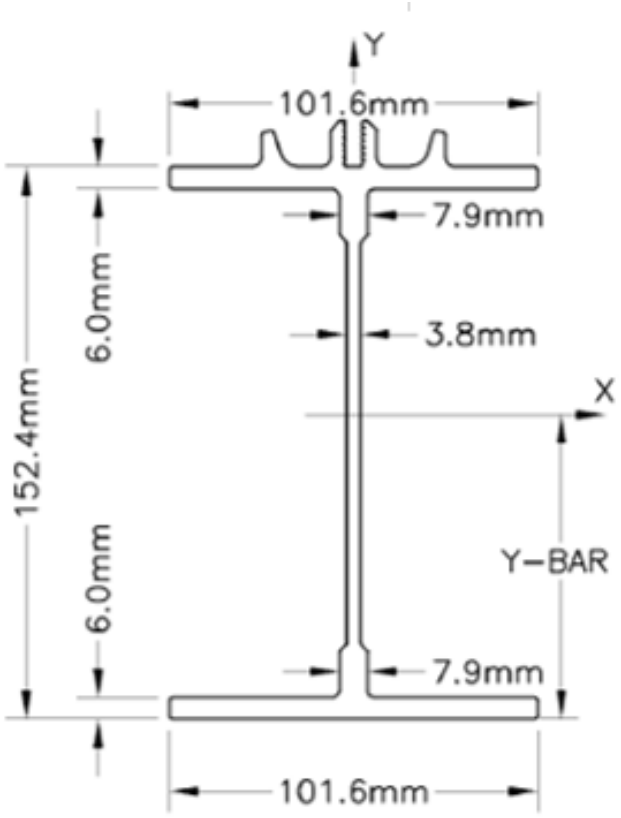


Figura 46 – Secção transversal da barra do projeto original.
Fonte: Catalogo Emco, 2014

Na Figura 46 está ilustrada a secção transversal das barras usadas no projeto original do domo geodésico. Pode-se observar que na parte de cima da barra existe um encaixe especial que é usado para a fixação dos painéis, que servem para cobertura do tanque. Próximo as mesas, superior e inferior, há um aumento da espessura da alma para enrijecer o perfil.

Na Figura 47 apresenta-se o nó que é usado na estrutura original do domo geodésico. Os discos dos nós são rebitados e as chapas em forma de disco tem uma espessura de 19 mm (3/4”) e o diâmetro de 406 mm (16”).

A norma API-650 (2007), cita que os membros estruturais do domo geodésico devem ser fabricados com a liga a de alumínio 6061-T6. No Gráfico 1 é possível verificar as propriedades do material 6061-T6, tensão de escoamento de 266 MPa e tensão de ruptura de 334 MPa. O módulo de elasticidade do material 6061-T6, que não aparece no Gráfico 1, é de 68,9 GPa e a estrutura original é projetada com esta liga de alumínio.

Figura 47 – Nó do projeto original do domo geodésico.
Fonte: o autor, 2014.

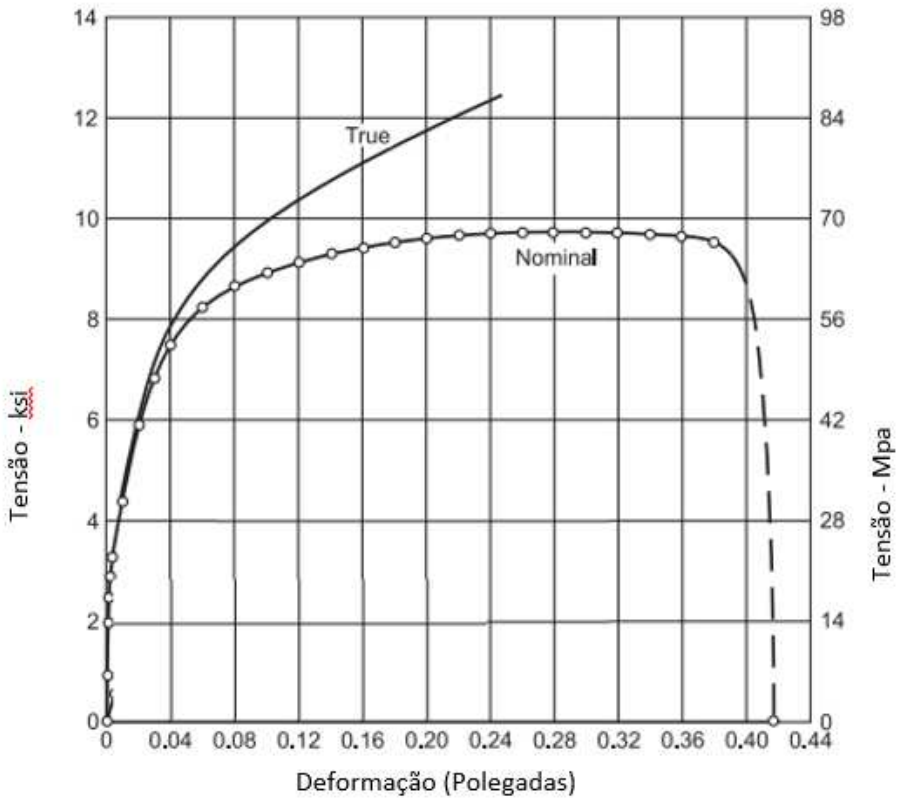


Gráfico 1– Tensão x deformação do material da estrutura original.
Fonte: Alcoa, 1954.

3.2 PROJETO DO MODELO FISICO

Para o projeto do modelo físico foi considerado que a estrutura original está de acordo com o apêndice G da norma API-650 (2007). O projeto do modelo físico, deve respeitar a escala original, utilizando as ferramentas da análise dimensional descritas por Lobo Carneiro (1993). Mais detalhes da análise dimensional estão apresentados no apêndice A. Para que o modelo represente fisicamente o que ocorre na estrutura real durante os ensaios estáticos, a escala geométrica (S_L) deve estar entre 1:30 e 1:10 conforme, Carneiro, 1993. Como o modelo físico deverá ser montado em um laboratório e o espaço ocupado não poderá ser maior que 2m, a escala geométrica escolhida foi de 1:12, respeitado assim o limite estabelecido. Dessa forma, a peça que simulará o costado do tanque, onde será fixado o modelo físico do domo geodésico, terá 2 m de diâmetro.

Aplica-se a S_L no modelo físico, o raio de abaulamento calculado é de 2,1617 m. Com o raio de abaulamento do modelo físico calculado, pode-se definir a altura do domo geodésico, e desta forma aplicar um plano de corte na esfera geodésica formando o domo geodésico ilustrado na Figura 48.

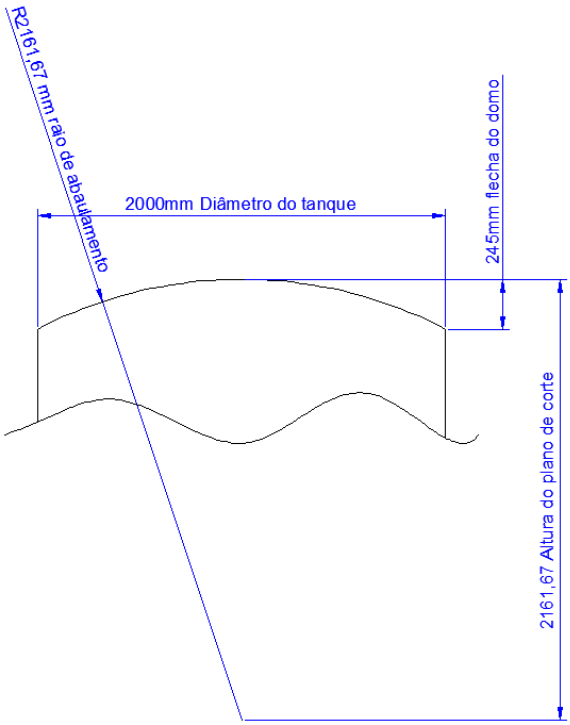


Figura 48 – Início do projeto do modelo físico.
Fonte: o autor, 2014.

O projeto do domo geodésico original é somente uma orientação para a montagem pois, não informa as coordenadas dos nós, o tamanho das barras, ou qualquer outro detalhe de fabricação. Por isso para gerar o modelo do domo geodésico foi necessário o auxílio de um software, Cadre Geo 6.

O software Cadre Geo 6, é um gerador de coordenadas dos nós de domos geodésicos e esferas geodésicas. Os dados de entrada são, diâmetro, frequência, classe, método e plano de corte e o software gera as coordenadas dos nós. Foi utilizado o Cadre Geo 6 para gerar vários domos geodésicos combinando classes diferentes com frequências diferentes. Isto foi feito para determinar qual configuração se assemelha mais com o domo original e utilizá-la no modelo físico. As configurações que mais se aproximaram do projeto original estão apresentadas na Tabela 3. O domo que melhor representou o projeto original, foi um domo Classe 1 e frequência 9.

Descrição	Unidade	Domo original	Classe 1 8v	Classe 1 9v	Classe 1 10v
Sapata de fixação	Peças	18	20	20	25
Quantidade de nós	Peças	54	45	51	60
Quantidade de barras	Peças	145	115	130	155

Tabela 3 – Comparação entre vários modelos de domo geodésico com a estrutura original.
Fonte: o autor, 2014.

Definiu-se então que o modelo físico correspondente será um domo Classe 1 e 9v, com 51 nós e 130 barras. O próximo passo é, com o auxílio do software Cadre Geo 6, gerar as coordenadas dos nós. Na Tabela 4 as coordenadas tridimensionais de todos os nós do modelo físico e na Figura 49 a representação gráfica da localização dos nós. Devido ao padrão de repetição apresentado no capítulo 2.1, existirão barras e nós iguais. Na Tabela 5 é possível identificar os tipos de barras e a quantidade de cada tipo barra, na Tabela 6 é possível identificar os tipos de nós e a quantidade de cada tipo de nó.

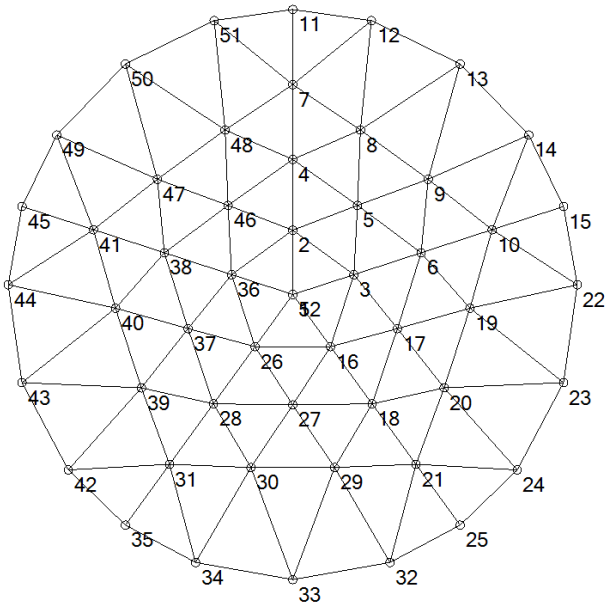


Figura 49 – Vista superior do modelo do domo geodésico – Identificação dos nós.
Fonte: o autor, 2014.

Número do Nó	Tipo de nó	Coord. X (mm)	Coord. Y (mm)	Coord. Z (mm)	Número do Nó	Tipo de nó	Coord. X (mm)	Coord. Y (mm)	Coord. Z (mm)
1	0	0	0	0	27	N4	0	-389,78	213,88
2	N2	0	227,61	237,29	28	N3	-280,8	-386,48	195,86
3	N2	216,47	70,34	237,29	29	N6	148,09	-611,5	155,72
4	N3	0	477,72	195,86	30	N7	-148,09	-611,5	155,72
5	N4	229,11	315,34	213,88	31	N5	-436,17	-600,34	117,95
6	N3	454,34	147,62	195,86	32	N9	344,11	-947,24	0
7	N5	0	742,06	117,95	33	N10	0	-1007,81	0
8	N6	239,62	581,76	155,72	34	N11	-344,11	-947,24	0
9	N7	479,24	407,67	155,72	35	N8	-592,38	-815,34	0
10	N5	705,74	229,31	117,95	36	N2	-216,47	70,34	237,29
11	N8	0	1007,81	0	37	N4	-370,71	-120,45	213,88
12	N9	278,39	968,6	0	38	N3	-454,34	147,62	195,86
13	N10	592,38	815,34	0	39	N6	-535,81	-329,81	155,72
14	N11	835,16	564,08	0	40	N7	-627,34	-48,12	155,72
15	N8	958,49	311,43	0	41	N5	-705,74	229,31	117,95
16	N2	133,79	-184,14	237,29	42	N9	-794,55	-619,98	0
17	N4	370,71	-120,45	213,88	43	N10	-958,49	-311,43	0
18	N3	280,8	-386,48	195,86	44	N11	-1007,22	34,55	0
19	N6	627,34	-48,12	155,72	45	N8	-958,49	311,43	0
20	N7	535,81	-329,81	155,72	46	N4	-229,11	315,34	213,88
21	N5	436,17	-600,34	117,95	47	N6	-479,24	407,67	155,72
22	N9	1007,22	34,55	0	48	N7	-239,62	581,76	155,72
23	N10	958,49	-311,43	0	49	N9	-835,16	564,08	0
24	N11	794,55	-619,98	0	50	N10	-592,38	815,34	0
25	N8	592,38	-815,34	0	51	N11	-278,39	968,6	0
26	N2	-133,79	-184,14	237,29	52	N1	0	0	249,31

Tabela 4 – Coordenadas dos nós do modelo físico.
Fonte: o autor, 2014.

Tipo de barra	Quantidade
S1	5
S2	10
S3	15
S4	10
S5	10
S6	10
S7	5
S8	5
S9	10
S10	10
S11	10
S12	5
S13	5
S14	10
S15	10

Tabela 5 – Tipos de barras para o modelo físico.
Fonte: o autor, 2014.

Tipo de nó	Quantidade
N1	1
N2	5
N3	5
N4	5
N5	5
N6	5
N7	5
N8	5
N9	5
N10	5
N11	5

Tabela 6 – Tipos de nós para o modelo físico.
Fonte: o autor, 2014.

O software Cadre Geo 6, gera uma visualização da localização dos tipos de barras e nós. Na Figura 50 apresenta-se a representação gráfica da localização dos nós classificados por tipo de nó, e na Figura 51 a representação gráfica da localização das barras por tipo de barra.

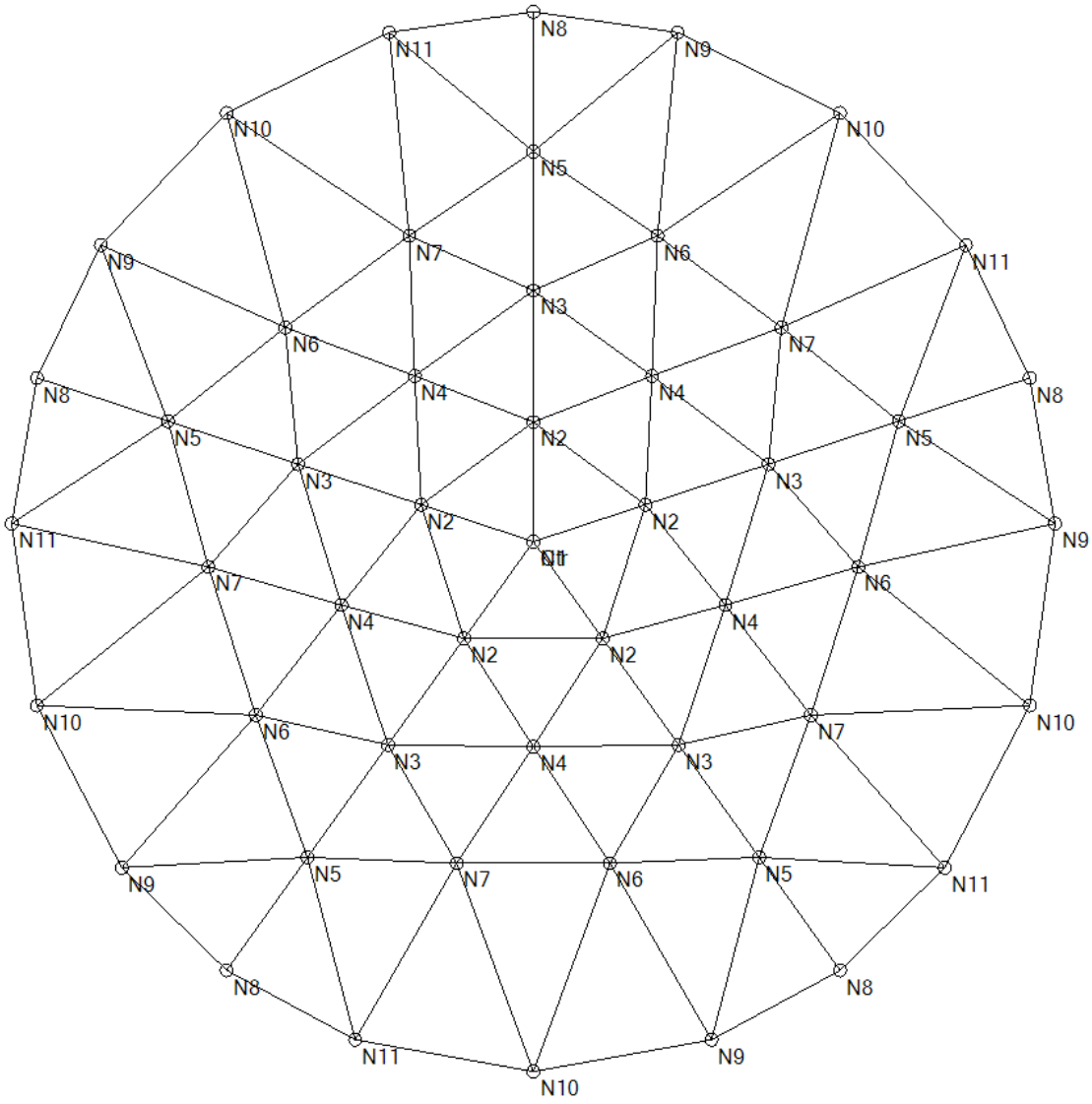


Figura 50 – Localização dos nós X tipo de nó.
Fonte: o autor, 2014.

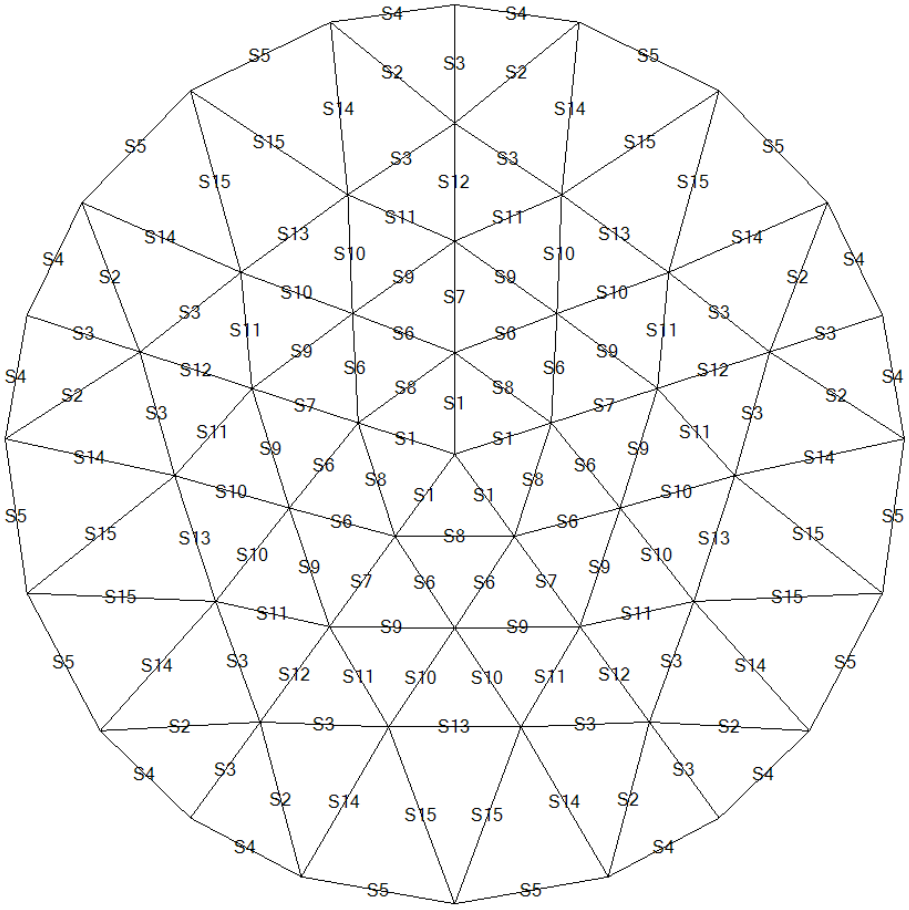


Figura 51 – Localização das barras X tipo de barra.
Fonte: o autor, 2014.

As informações geradas pelo Cadre Geo 6 foram usadas como base para gerar o modelo computacional. Neste modelo computacional foram feitos ajustes e analisadas outras variáveis de forma a viabilizar a montagem do modelo físico. O primeiro ajuste necessário para a montagem do modelo computacional, foi na secção transversal das barras. O projeto original do domo geodésico, usa barras especialmente extrudadas para este propósito. Fazer uma ferramenta para extrusão de um perfil, na escala geométrica de 1:12, respeitando todos os detalhes do projeto da barra original, iria inviabilizar economicamente o projeto do modelo físico. Desta forma procurou-se usar uma viga “I” comum, sem aumento de espessura próximo as abas, mas esse perfil “I” precisaria ser extremamente fino e não são fabricados perfis “I’s” nas medidas necessárias para o modelo físico. Esbarrando, novamente, na inviabilidade econômica da construção de uma ferramenta para extrusão. Outra opção seria a fabricação de perfis “I’s” soldados, entretanto a solda de perfis “I’s” torna-se inviável, uma vez

que a espessura é muito fina e o calor da solda poderá deformar o material, fazendo com que não fossem respeitadas as tolerâncias necessárias para a montagem do modelo físico. Por isso optou-se por construir o modelo físico com cantoneiras de alumínio, tomando o cuidado para que as secções transversais das cantoneiras obedeçam a escala de 1:12. A API-650 determina que o dimensionamento da estrutura geodésica deve ser feito segundo o dimensionamento de treliças e, desta forma, a área da secção transversal é extremamente importante. A área do perfil mostrado na Figura 46 é de 1898,52 mm² na escala 1:12 a área será de 13,184 mm². A cantoneira que tem uma área de secção transversal de 13,184 mm² tem a medida da aba de 1,875 mm e espessura de 1,75 mm. O uso de uma cantoneira com essas medidas torna-se inviável pois, a medida da aba seria muito pequena inviabilizando a fixação das barras nos discos. Na Tabela 7, as cantoneiras que são comercialmente fabricadas. A área da secção transversal da menor cantoneira comercial é de 40,132 mm². Á área de 40,132 mm² é muito maior do que a área de 13,184 mm² necessária para o modelo experimental, mas será com a cantoneira de 12,7 mm de aba por 1,58 mm de espessura que será fabricado o modelo físico.

Aba (mm)	Esp. (mm)	Área (mm²)
12,7	1,58	40,132
12,7	3,17	80,518
15,87	1,58	50,1492
15,87	3,17	100,6158
19,05	1,58	60,198
19,05	3,17	120,777
22,22	3,17	140,8748
25,4	1,58	80,264
25,4	3,17	161,036
25,4	4,76	241,808
31,75	6,35	403,225
38,1	3,17	241,554
38,1	4,76	362,712
38,1	6,35	483,87
50,8	6,35	645,16
50,8	4,76	483,616

Tabela 7 – Cantoneiras comerciais de alumínio.
Fonte: o autor, 2014.

Devido a mudança da viga “I” para cantoneira também foi preciso fazer uma mudança na forma como o nó do domo geodésico é construído. A viga “I” tem mesa inferior e mesa superior, por isso é possível prender uma chapa redonda em cada uma das mesas, formando o nó do projeto original, Figura 47. Na cantoneira isso não é possível e por isso o nó foi montado como demostrando na Figura 52.

A medida da chapa redonda que forma o nó não foi alterada, para o domo original o diâmetro é de 406 mm, e para o modelo é de 33 mm, Figura 56. A espessura do disco também foi reduzida dentro da escala geométrica, no projeto original era de 19 mm, no modelo físico 1,5 mm.

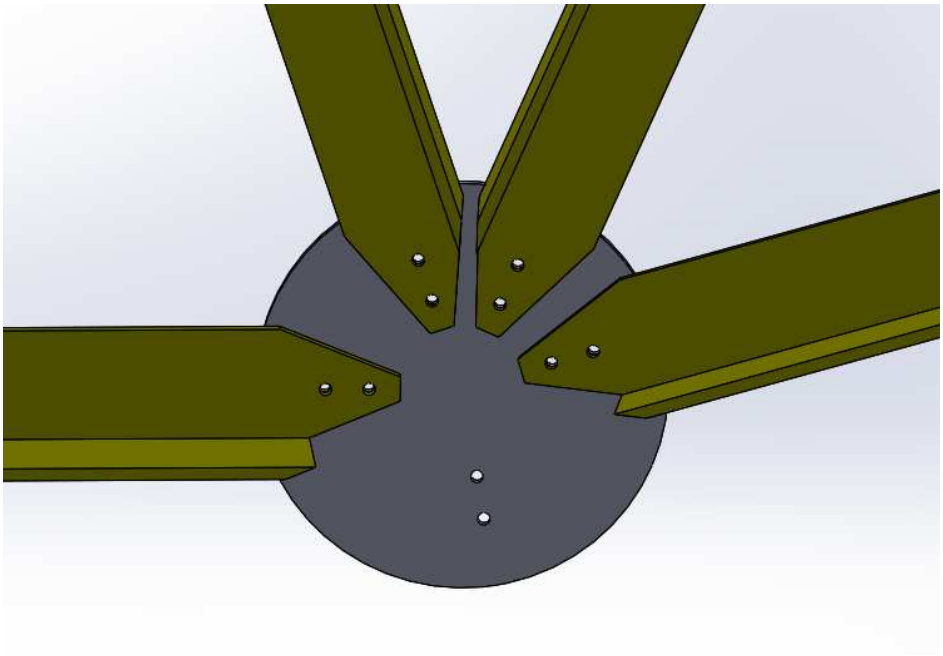


Figura 52 – Nó do modelo computacional.
Fonte: o autor, 2014.

No projeto original do domo geodésico são usados rebites, Figura 47. Os rebites tem diâmetro de 12.7mm e aplicando-se a escala de 1:12, os rebites do modelo físico deveriam ter a bitola de 1,08mm. Para a utilização de rebites nessa medida, seria necessário o investimento em uma rebitadeira, inviabilizando o projeto. Dessa forma optou-se por utilizar parafusos e porcas para a fixação, Figura 57. Os parafusos e as porcas foram comprados em relojoaria, que não fornecem certificado do material, por isso não foi possível identificar a rosca e o material com precisão, somente a bitola, 1,39mm.

Com a compilação de todas as informações foi gerado o modelo computacional (Figura 53), do domo geodésico, avaliando desta forma a montagem.

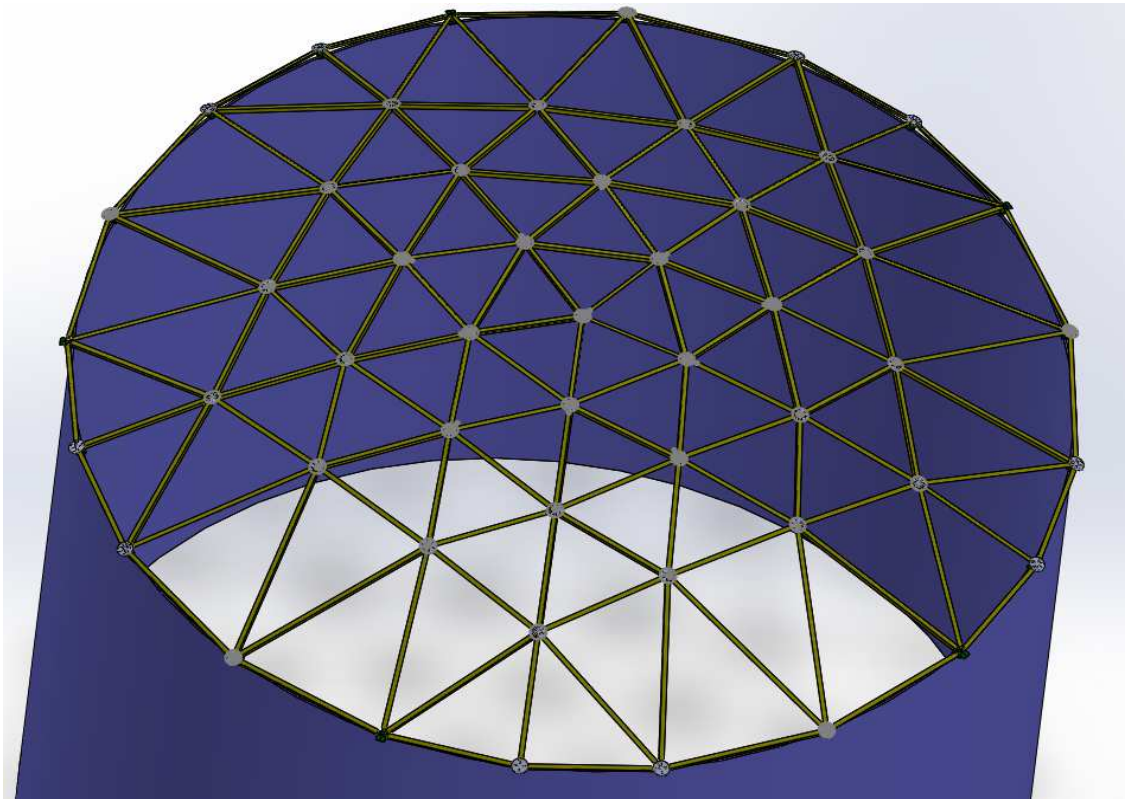


Figura 53 – Modelo computacional do modelo físico.
Fonte: o autor, 2014.

No modelo computacional foi possível identificar como seria a montagem dos parafusos, a montagem das chapas redondas nas cantoneiras e a forma de fixar o domo geodésico da peça que simula o costado do tanque.

A Figura 54 mostra a montagem da chapa redonda sobre as cantoneiras. É possível verificar que não há interferências com os parafusos. A montagem da do modelo computacional também ajudou a definir a posição angular dos furos nos discos, pois cada tipo de disco deve ser furado com a posição angular coincidindo com a posição com que a barra deve ficar posicionada.

O modelo computacional também foi fundamental para definir a forma de fixar o modelo físico na peça que serve como costado do tanque para o modelo físico, Figura 55.

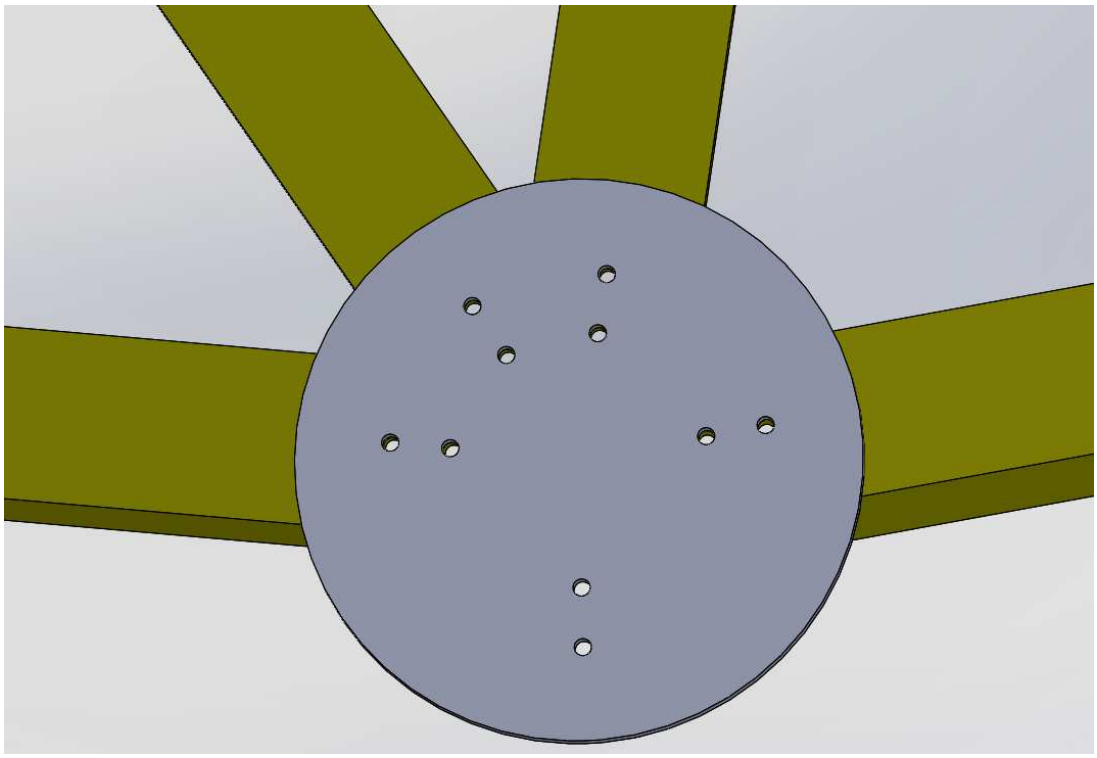


Figura 54 – A montagem dos nós no modelo computacional.
Fonte: o autor, 2014.

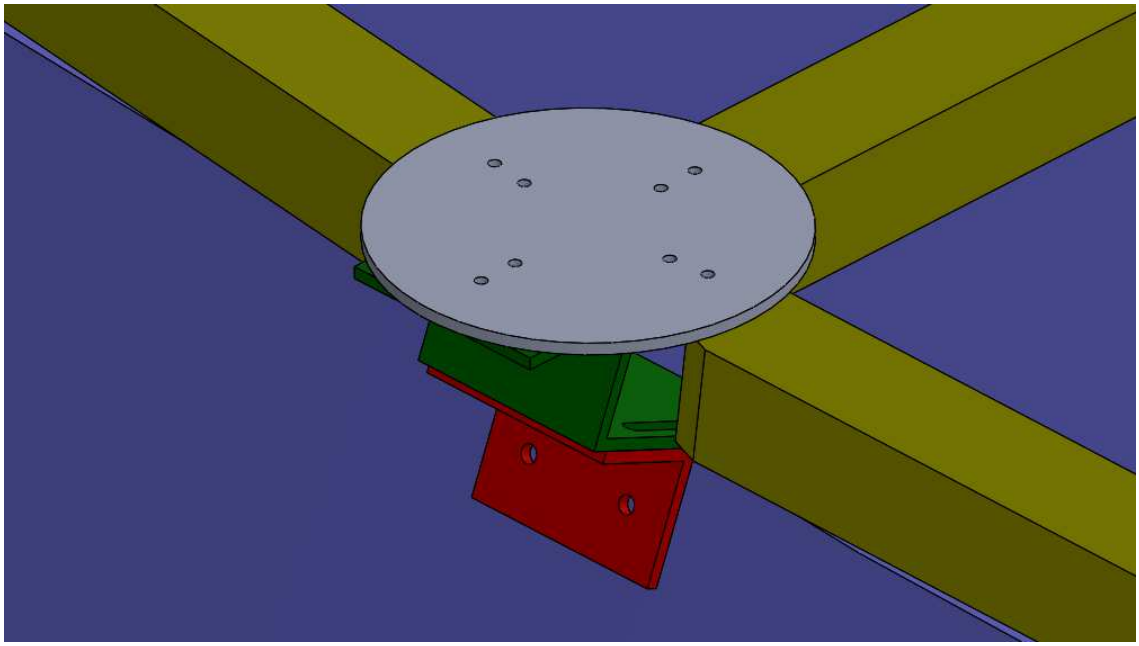


Figura 55 – Fixação do modelo na peça que simula o costado do tanque.
Fonte: o autor, 2014.

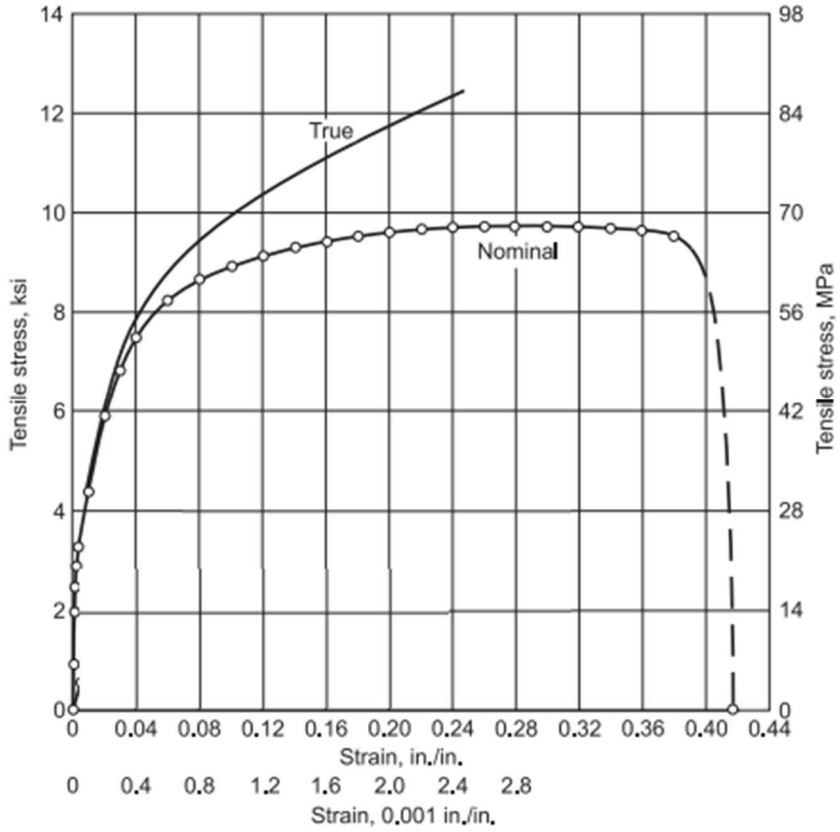


Gráfico 2 – Tensão x deformação do material do modelo.
Fonte: Alcoa, 1954.

Como a liga de alumínio 6061-T6, material da estrutura original, é um material caro e difícil de comprar em pequenas quantidades, o material usado para construir o modelo físico do domo geodésico é apresentado no Gráfico 2. Para liga 1060 que foi usada no modelo, a tensão de ruptura é de 82 MPa e a tensão de escoamento é de 21 MPa. O módulo de elasticidade do material 1060, que não aparece no Gráfico 2, é de 70 GPa. Não foi possível identificar o material dos parafusos, devido a compra ser efetuada em relojoarias, mas pela dureza e brilho do material acredita-se que é liga de aço carbono.

Com o modelo computacional montado foi possível gerar os projetos de fabricação, os quais estão no apêndice B. A fabricação das barras e dos nós, seguindo os desenhos do apêndice B, foi feita em corte a laser, devido a precisão dos furos, garantindo desta forma a montagem. Na Figura 56 é possível observar uma comparação entre o disco que forma o nó a peça que prende o domo no costado do modelo com uma tampa de caneta isso ilustra o tamanho das peças do modelo físico. Na Figura 57 a tampa da caneta é comparada com os

parafusos usados na montagem e na Figura 58 a comparação é entre as barras usadas na montagem do modelo físico e uma caneta esferográfica.

Figura 56 – Nó e peça usada para fixação do modelo físico do domo geodésico.
Fonte: o autor, 2014.

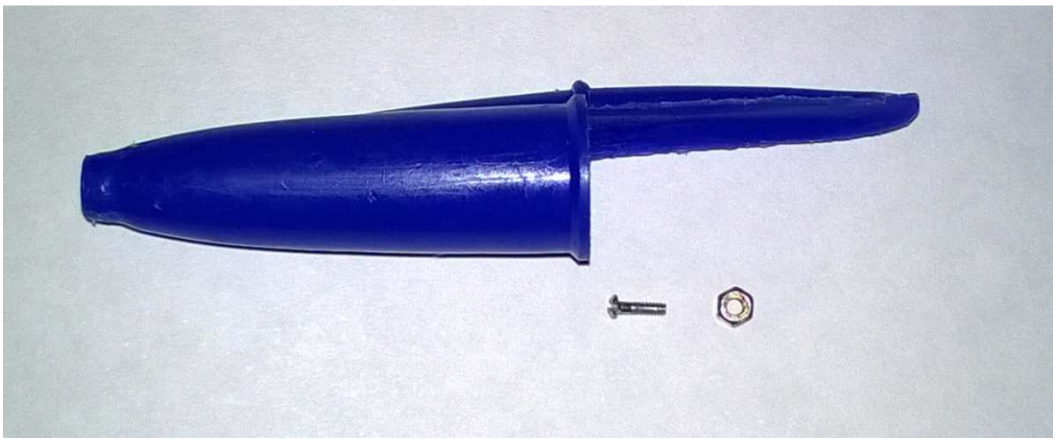


Figura 57 – Parafuso usado na montagem do modelo físico.
Fonte: o autor, 2014.

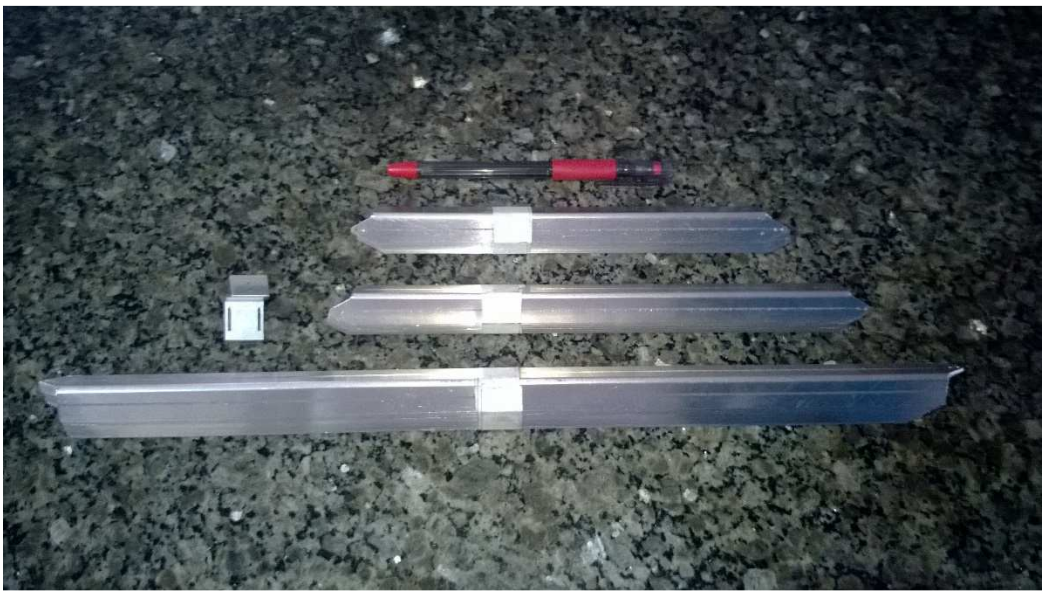


Figura 58 – Barras fabricadas para o modelo físico do domo geodésico.
Fonte: o autor, 2014.

Após a fabricação das peças foi realizada a montagem do modelo físico. A montagem do modelo físico foi realizada no laboratório de dinâmica da PUC-PR e, a seguir, apresenta-se algumas fotos das etapas da montagem. Primeiro foi montada a peça que simula o costado do tanque (Figura 59). Esta peça tem o diâmetro de 2m, a altura de 350mm e a espessura de 2mm, foi fixada uma cantoneira de 2” x 3” no centro para dar um pouco de rigidez devida a baixa espessura da chapa.

Figura 59 – Montagem da peça que simula o costado do tanque.
Fonte: o autor, 2014.

A seguir foi feita a montagem da parte que é conhecida como anel de compressão do domo geodésico, que são as barras que ficam na parte mais baixa do domo (Figura 60).

Figura 60 – Anel de compressão montado.
Fonte: o autor, 2014.

Na Figura 61 é possível ver a evolução durante o primeiro dia de montagem do modelo físico. Na Figura 62 está ilustrada a montagem do modelo no final do segundo dia, quando já é possível identificar o formato do domo geodésico. No terceiro dia foi finalizada a montagem, na Figura 63, apresenta-se a vista externa. Nas Figuras 64 e 65, as imagens internas do modelo físico e na Figura 66 o detalhe dos nós.

Figura 61 – Primeiro dia de montagem.
Fonte: o autor, 2014.

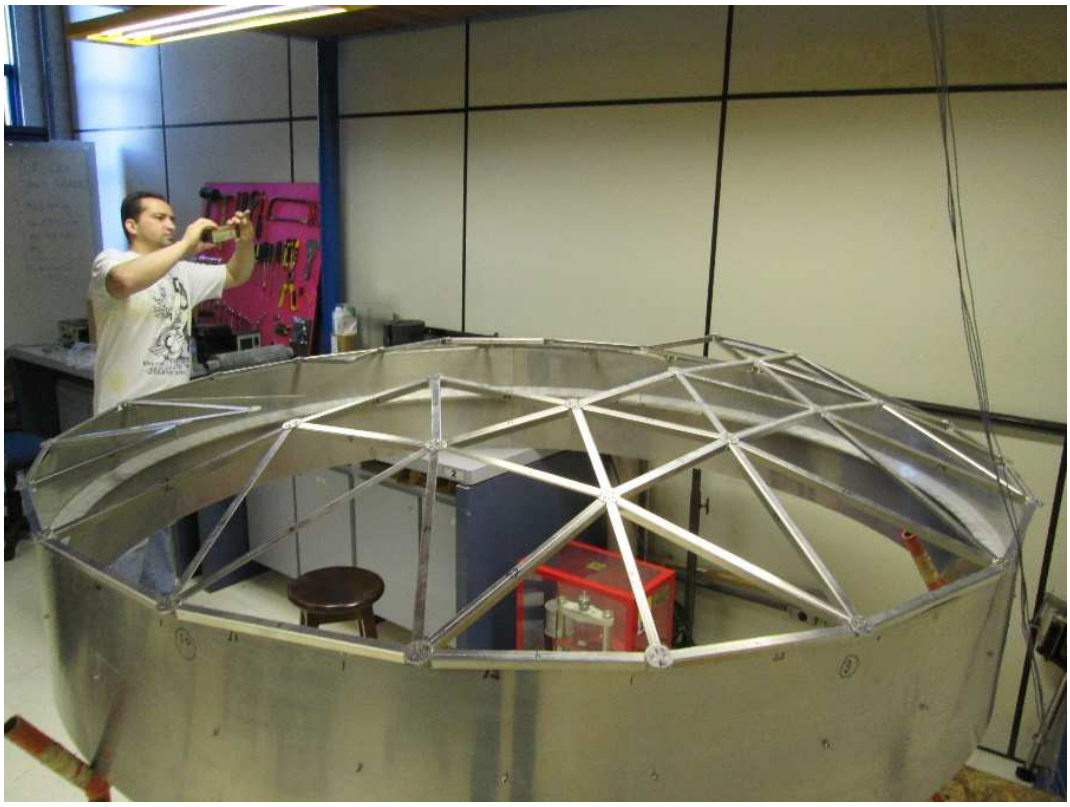


Figura 62 – Segundo dia de montagem.
Fonte: o autor, 2014.

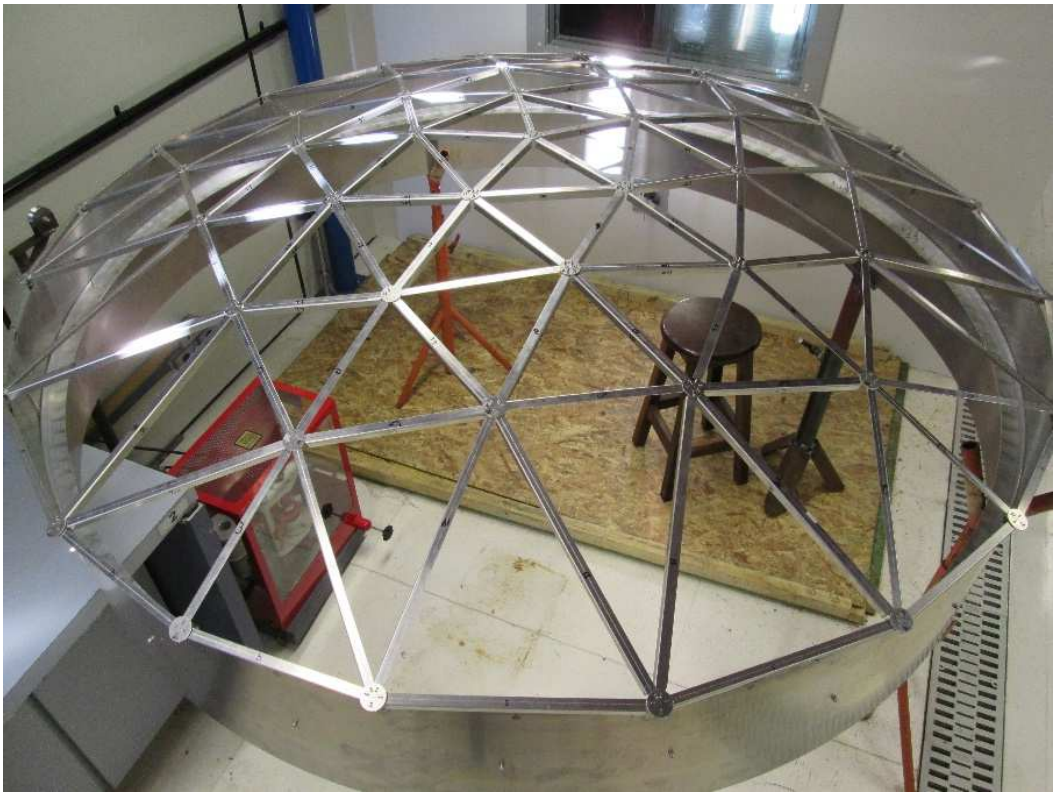


Figura 63 – Terceiro dia de montagem, modelo físico finalizado.
Fonte: o autor, 2014.

Figura 64 – Modelo físico finalizado visto por dentro.
Fonte: o autor, 2014.

Figura 65 – Modelo finalizado visto por dentro.
Fonte: o autor, 2014.

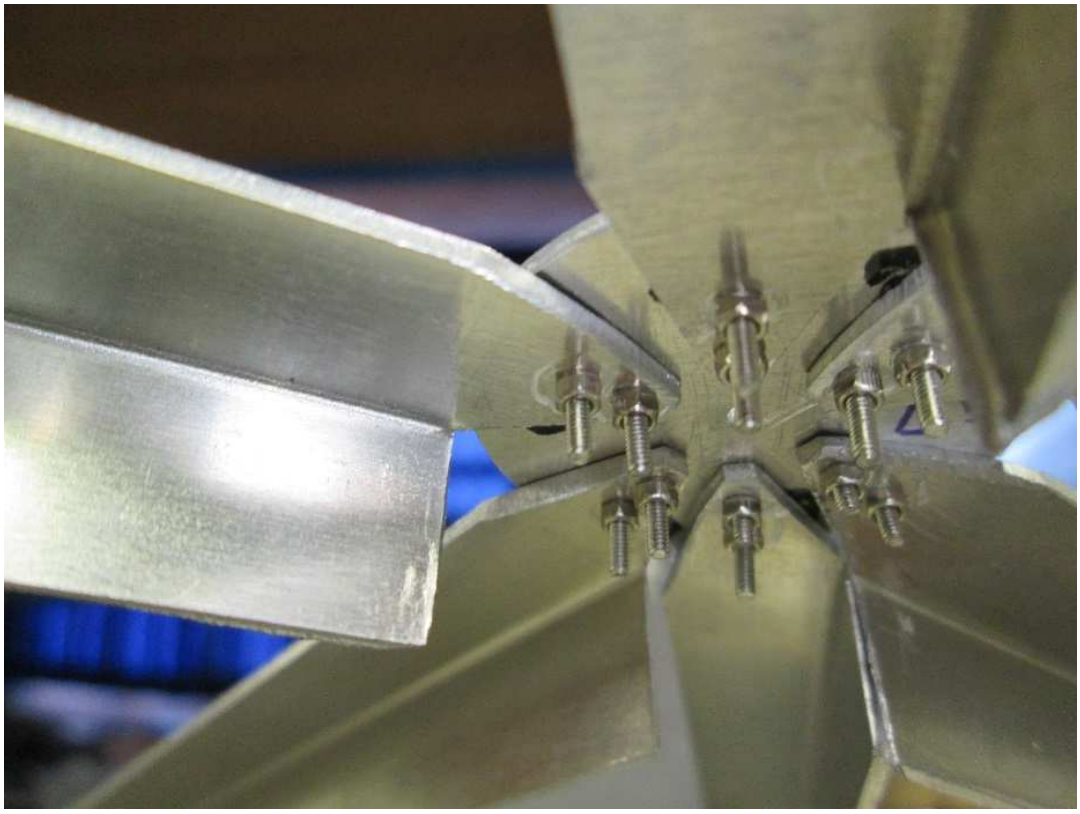


Figura 66 – Detalhe do nó do modelo físico.
Fonte: o autor, 2014.

4 ANÁLISE DO MODELO COMPUTACIONAL

Neste capítulo são demonstrados os ensaios computacionais, estáticos e dinâmicos, realizados no modelo computacional do domo geodésico.

A primeira parte deste capítulo é dedicada aos ensaios estáticos explicando-se, os carregamentos aplicados para cada caso de carga e o motivo da escolha da aplicação dessas cargas. Na sequência é feita a determinação do carregamento máximo que poderá ser aplicado para cada caso de carga e por último são apresentados os resultados das simulações.

Na continuação deste capítulo serão apresentados os ensaios dinâmicos realizados computacionalmente.

4.1 ENSAIOS ESTÁTICOS - MODELO COMPUTACIONAL

A análise por elementos finitos com software comercial foi feita com o software SolidWorks 2013 Premium. Para todos os ensaios estáticos foram usados elementos de treliça e a estrutura foi tratada como uma treliça tridimensional. Foram feitos 3 tipos de carregamentos diferentes para o ensaio estático, que serão chamados de Casos de Carga. Na Figura 67 – Caso de Carga 1, os vetores posicionados acima dos nós, são as cargas externas, o vetor posicionado abaixo do nó, é o efeito da gravidade e os vetores nos nós mais baixos do tanque são as restrições de apoio. O vetor gravidade está posicionado no nó central somente por uma questão de ilustração do software utilizado, mas a gravidade está distribuída em toda a estrutura. O caso de carga 1 simula uma situação muito comum quando os domos geodésicos são aplicados em tanques, que é a instalação dos bocais de operação dos tanques. Os bocais geralmente ficam posicionados somente de um lado, facilitando o trabalho de operação do tanque, que consiste em retirar amostras para análise química da qualidade do produto, medição da temperatura do produto, medição manual do nível, medição automática de nível, sensores de segurança, entre outros. Para cada uma dessas operações são necessários bocais no domo geodésico. A Figura 68 ilustra uma passarela para acesso aos bocais do tanque. Para o caso de carga 2 (Figura 69) e o caso de carga 3 (Figura 70), as cargas são aplicadas no nó

central, mudando-se somente o sentido, compressão no caso de carga 2 e tração no caso de carga 3. Simula-se, dessa forma, a instalação de um agitador em um tanque com domo geodésico. Os tanques quando usados na indústria, química, alimentícia, entre outras, geralmente precisam de um agitador. Para os três casos de carga são avaliados somente os deslocamentos no sentido Y, sentido da altura do domo.

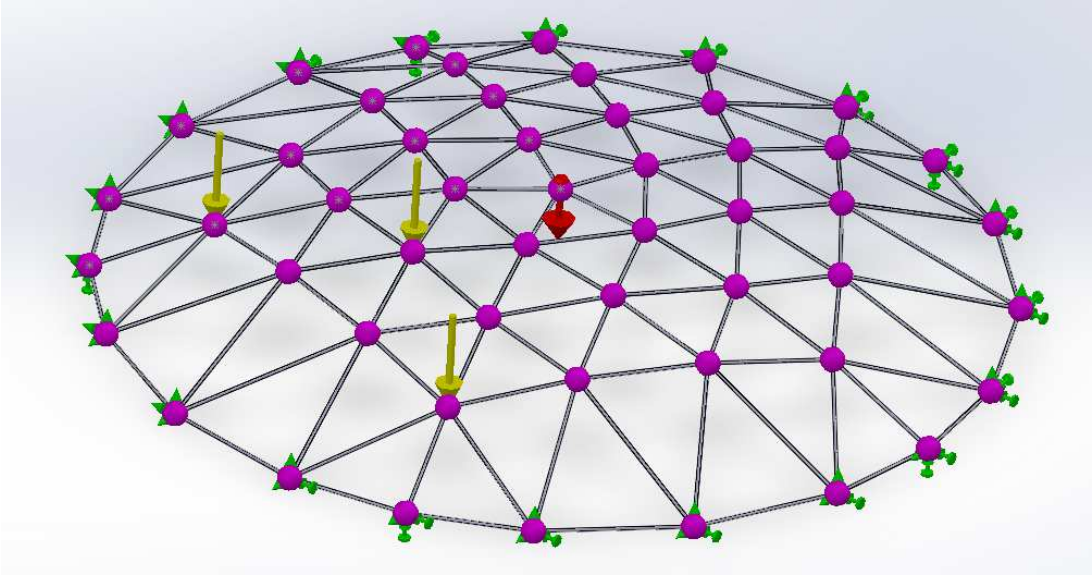


Figura 67 – Caso de Carga 1.
Fonte: o autor, 2014.

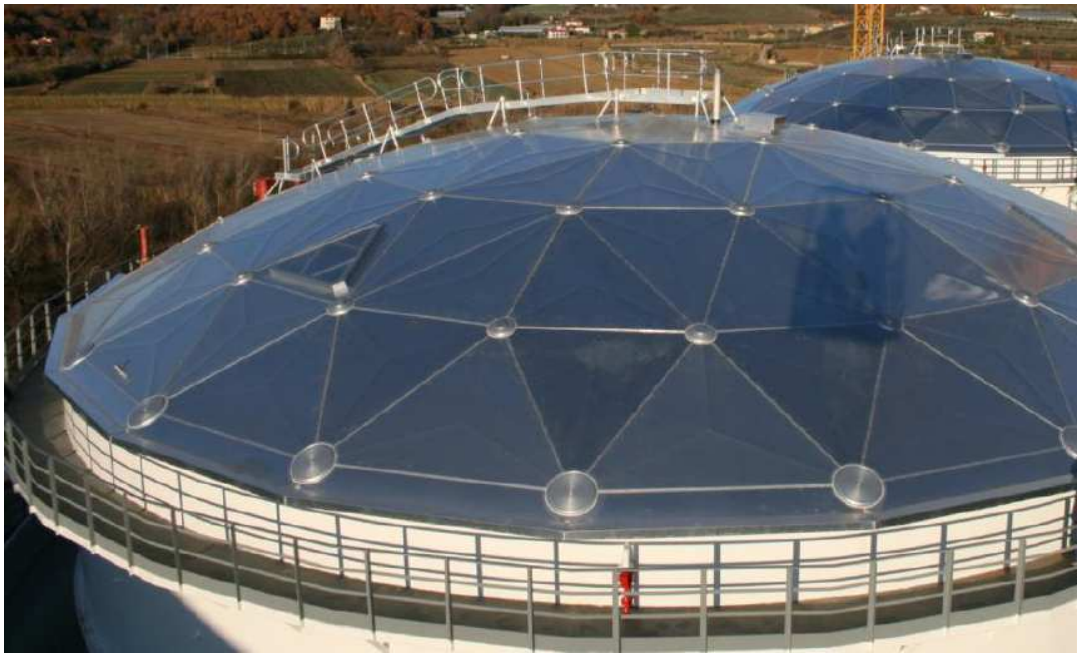


Figura 68 – Passarela para acesso aos bocais instalada em domo geodésico.
Fonte: o autor, 2014.

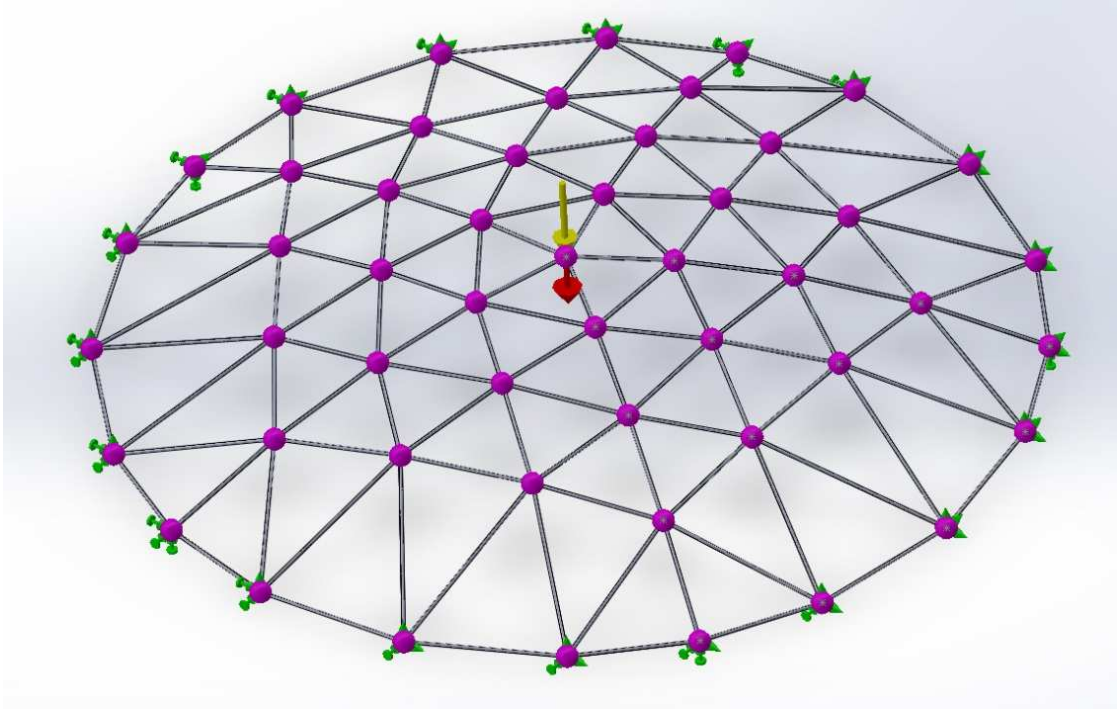


Figura 69 – Caso de carga 2.
Fonte: o autor, 2014.

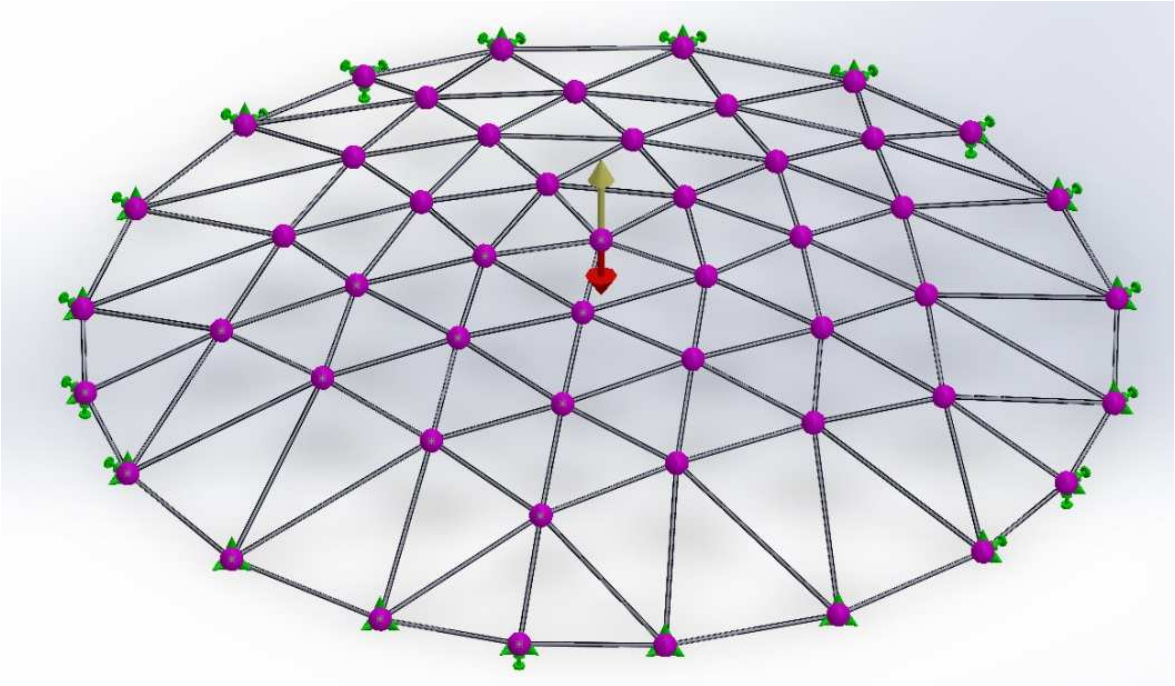


Figura 70 – Caso de carga 3.
Fonte: o autor, 2014.

Para determinar a carga máxima a ser aplicada na estrutura durante o ensaio estático foi realizada uma análise da flambagem local (flambagem de cada barra), na sequência uma análise da flambagem global e por último uma análise de qual carga iria gerar plastificação na estrutura.

Analisando o domo geodésico, inicialmente do ponto de vista da flambagem local, através da equação (1) será calculada a força de compressão, capaz de gerar a instabilidade elástica, conhecida como flambagem local, para cada barra do domo geodésico. Supondo que as mesmas sejam bi-rotuladas. A Tabela 8 demonstra o valor da carga crítica de flambagem local para todas as barras do domo geodésico.

$$F_{cr} = \frac{4\pi^2 EI}{l^2} \qquad (1)$$

Descrição	Valor Calculado Carga Critica (N)
Barra 1	4.211,61
Barra 2	1.478,62
Barra 3	2.537,64
Barra 4	2.720,86
Barra 5	1.736,47
Barra 6	3.577,83
Barra 7	3.373,22
Barra 8	3.014,87
Barra 9	2.715,74
Barra 10	2.894,07
Barra 11	3.093,03
Barra 12	2.835,90
Barra 13	2.442,19
Barra 14	1.196,92
Barra 15	1.029,34

Tabela 8 – Valores da carga crítica de flambagem local para cada barra do domo geodésico.
Fonte: o autor, 2014.

Foram realizados ensaios de flambagem global para cada um dos casos de carga. Na Tabela 9 são apresentadas as cargas críticas de flambagem global para cada caso de carga. Na Figura 71 ilustra-se o ensaio de flambagem global para o primeiro caso de carga. Na Figura 72 ilustra-se o ensaio de flambagem

global para o segundo caso de carga e na Figura 73 demonstra-se o ensaio de flambagem global para o terceiro caso de carga.

Carga Crítica de Flambagem Global	
Descrição	**Carga (N)**
Primeiro caso de carga	561,6
Segundo caso de carga	770
Terceiro caso de carga	770

Tabela 9 – Cargas críticas de flambagem global.
Fonte: o autor, 2014.

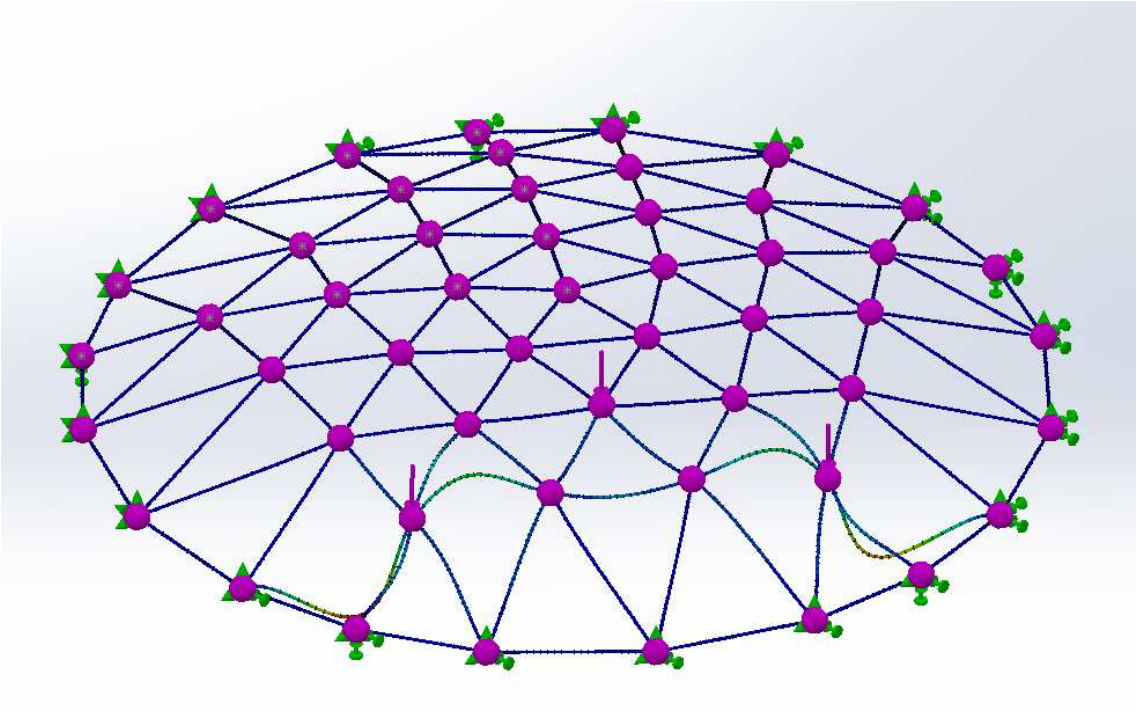


Figura 71 – Flambagem – Caso de Carga 1.
Fonte: o autor, 2014.

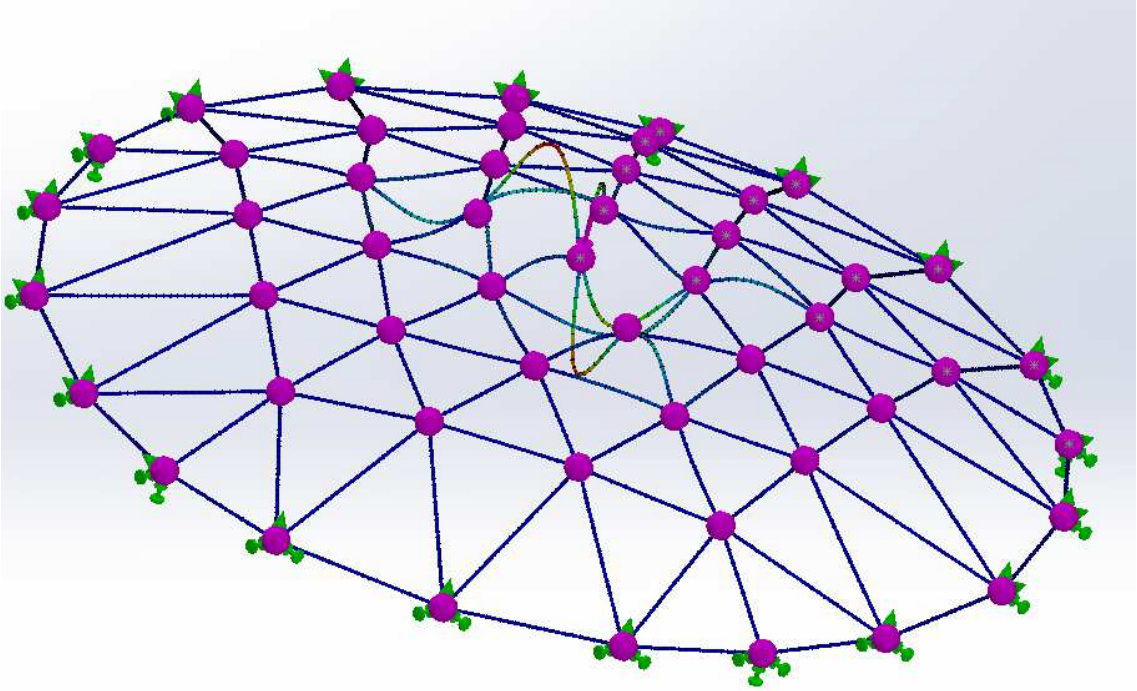


Figura 72 - Flambagem – Caso de Carga 2.
Fonte: o autor, 2014.

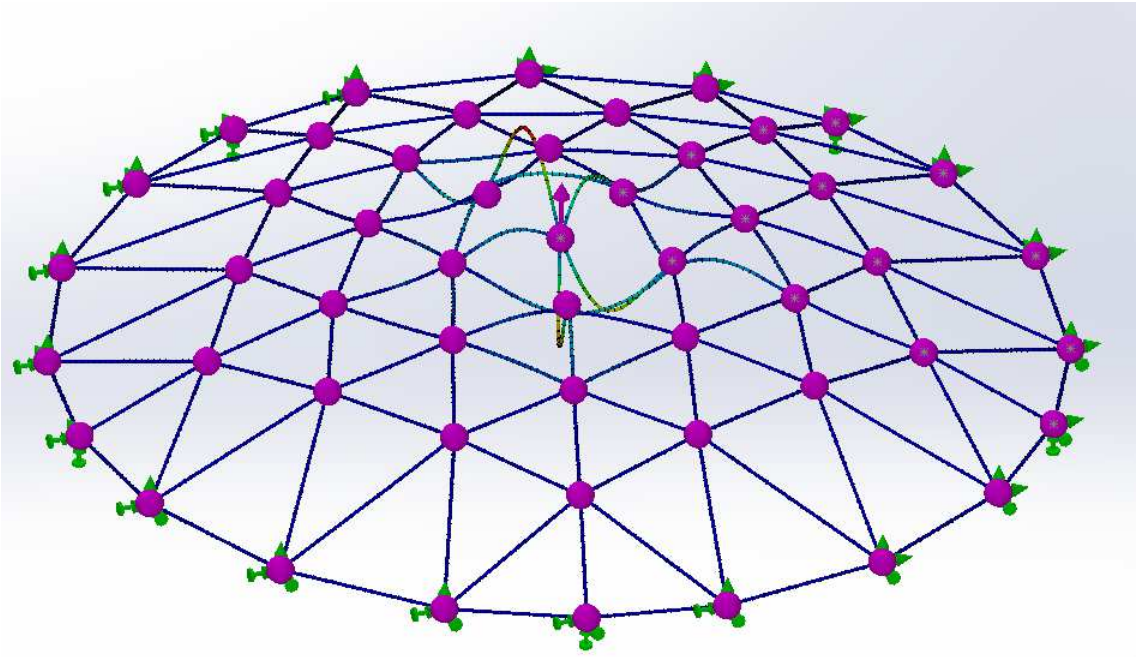


Figura 73 – Flambagem – Caso de Carga 3.
Fonte: o autor, 2014.

Outra análise que deve ser feita é referente a plastificação, pois não é o objetivo deste trabalho que o material da estrutura entre em regime plástico. Na Tabela 10 são apresentados os resultados de um ensaio realizado pelo MEF para cada caso de carga, com uma carga de 52,64 N. Concluiu-se que a tensão máxima nas barras atingiu aproximadamente 50% do valor da tensão de

escoamento do material. Devido as imperfeições na matéria prima e outras variáveis que não são possíveis mensurar no modelo computacional, a carga máxima que será usada durante os ensaios será de 32,64 N, 30 N da carga e 2,64 N do suporte da carga. Suporte ilustrado na Figura 74. Será levado em conta no ensaio computacional o peso do suporte para carga, uma vez que a intenção é comparar os resultados computacionais com os resultados experimentais. A carga máxima não é aplicada de uma única vez, porém de modo gradual. Como a intenção e comparar os resultados computacionais com os experimentais, a manipulação das cargas de forma gradual possibilita um maior controle sobre o ensaio estático experimental, pois caso ocorra algum comportamento inadequado no modelo físico o ensaio é paralisado, evitando-se um colapso da estrutura.

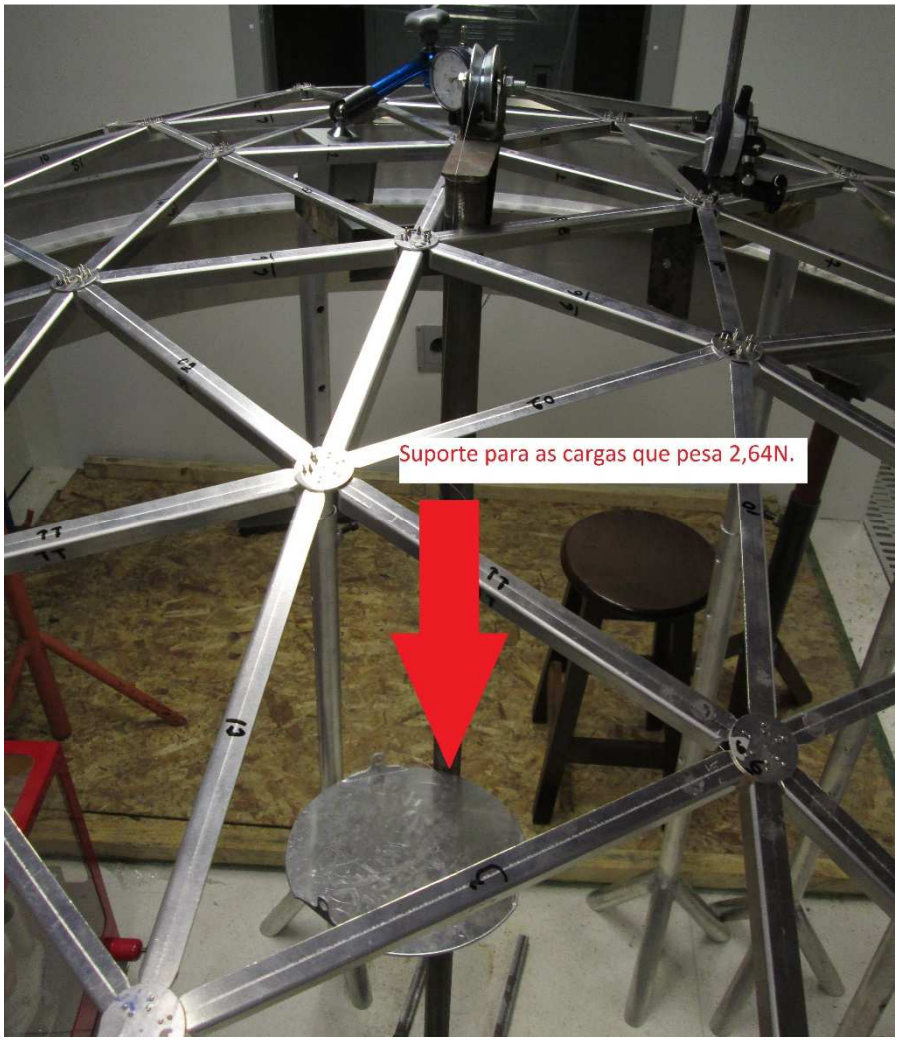


Figura 74 – Suporte das cargas usado no ensaio estático.
Fonte: o autor, 2014.

Para o primeiro caso de carga os deslocamentos em Y serão avaliados nos nós 30, 27 e 16, e os nós com carga serão os nós 31, 27 e 21. Esses nós estão identificados na Figura 75. Para o primeiro caso de carga os resultados estão na Tabela 11 e no Gráfico 3.

Carga Crítica de plastificação			
Descrição	**Carga aplicada (N)**	**Tensão (mpa)**	**Maior valor de Compressão nas barras (N)**
Caso de carga 1	52,64	12,81	243,7
Caso de carga 2	52,64	10,56	261,2
Caso de carga 3	52,64	10,56	261,2

Tabela 10 – Carga máximas para os ensaios.
Fonte: o autor, 2014.

Deslocamentos em Y (mm) (colocando a carga) MEF - Treliça					
Nó 30	0,00056	0,00535	0,009941	0,0193	0,0349
Nó 27	-0,038	-0,1078	-0,1776	-0,31444	-0,4521
Nó 16	-0,00005616	0,0057	0,0114	0,029	0,029
Carga (N)	**2,64**	**5,64**	**12,64**	**22,64**	**32,64**

Tabela 11 – Resultados análise computacional para o primeiro caso de carga
Fonte: o autor, 2014.

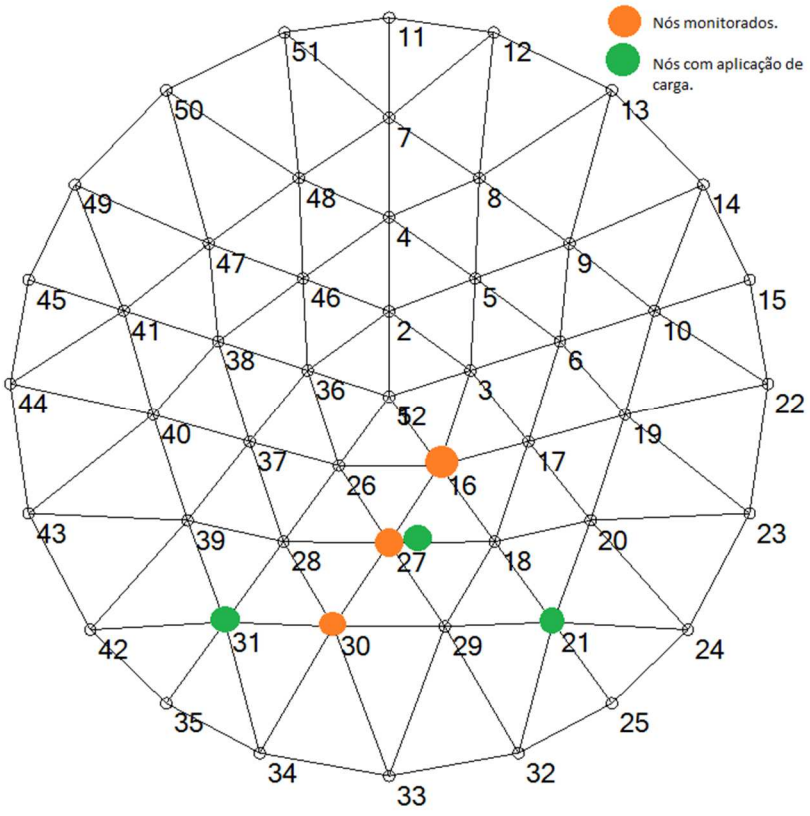


Figura 75 – Identificação dos nós com carga e avaliados no primeiro caso de carga.
Fonte: o autor, 2014.

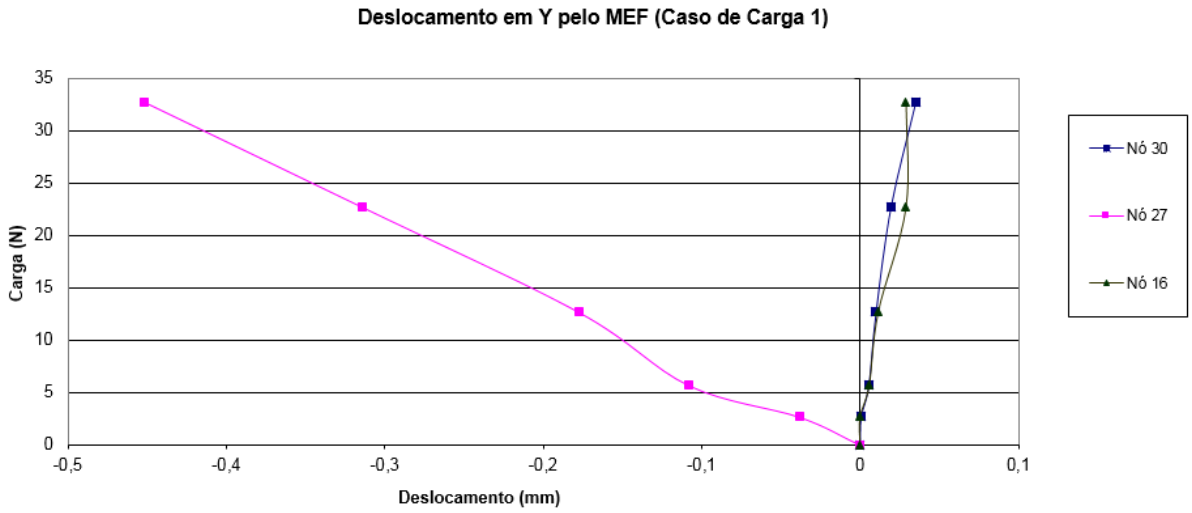


Gráfico 3 – Deslocamentos pelo MEF – Caso de carga 1.
Fonte: o autor, 2014.

Para os casos de carga 2 e 3 os nós monitorados e os nós com carregamento serão os mesmos, foi alterado somente o sentido da carga, para o caso de carga 2 uma carga de compressão e para o caso de carga 3 uma carga de tração. Na Figura 76 é possível identificar os nós que serão monitorados 52, 26 e 28, e o nó 52 será o local de aplicação da carga. Os resultados do caso de carga 2 podem ser vistos, na Tabela 12 e no Gráfico 4. Os resultados do caso de carga 3 estão apresentados, na Tabela 13 e no Gráfico 5.

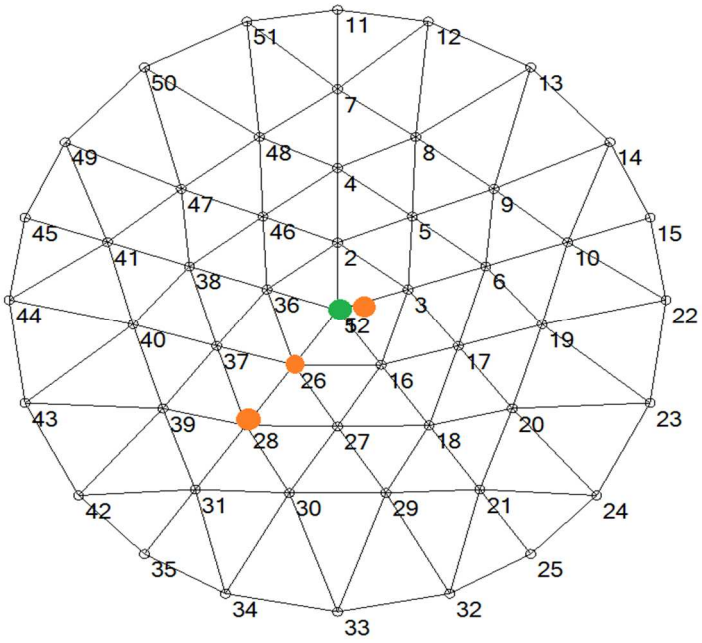


Figura 76 – Identificação dos nós com carga e avaliados no segundo e terceiro caso de carga.
Fonte: o autor, 2014.

Deslocamentos em Y (mm) MEF					
Nó 52	-0,056	-0,156	-0,256	-0,356	-0,4568
Nó 26	-0,002	-0,002	-0,0024	-0,0022	-0,0019
Nó 28	-0,0009	-0,001	-0,0039	0,006	0,008
Carga (N)	**2,64**	**7,64**	**12,64**	**17,64**	**22,64**

Tabela 12 – Resultados análise computacional para o segundo caso de carga.
Fonte: o autor, 2014.

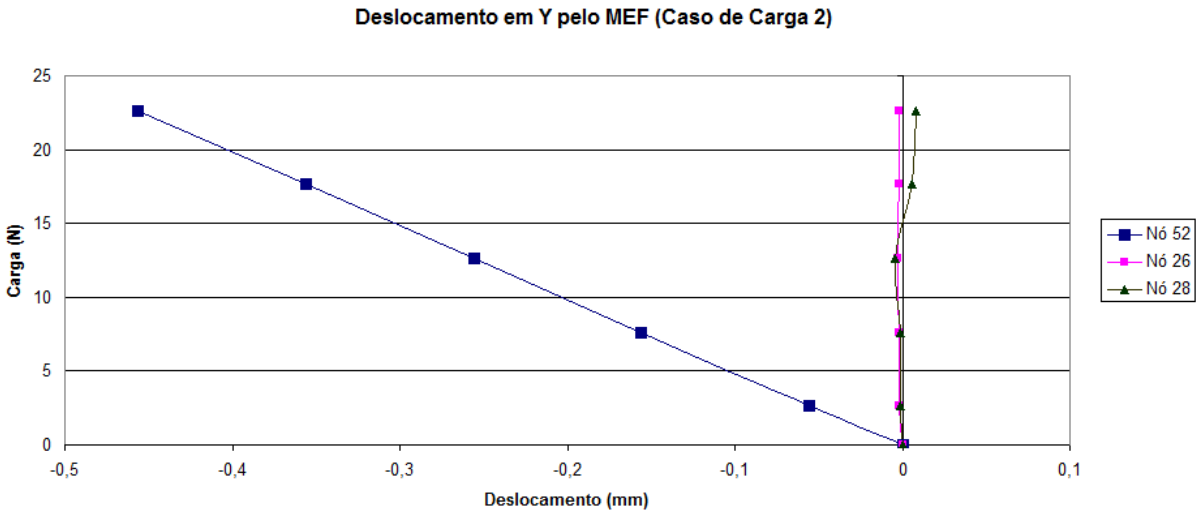


Gráfico 4–Deslocamentos pelo MEF – Caso de carga 2.
Fonte: o autor, 2014.

Deslocamentos em Y (mm) MEF					
Nó 52	0,14	0,24	0,34	0,449	0,542
Nó 26	-0,003	-0,003	-0,004	-0,004	-0,004
Nó 28	-0,005	-0,008	-0,01	-0,01	-0,015
Carga (N)	7,64	12,64	17,64	22,64	27,64

Tabela 13 – Resultados análise computacional para o terceiro caso de carga.
Fonte: o autor, 2014.

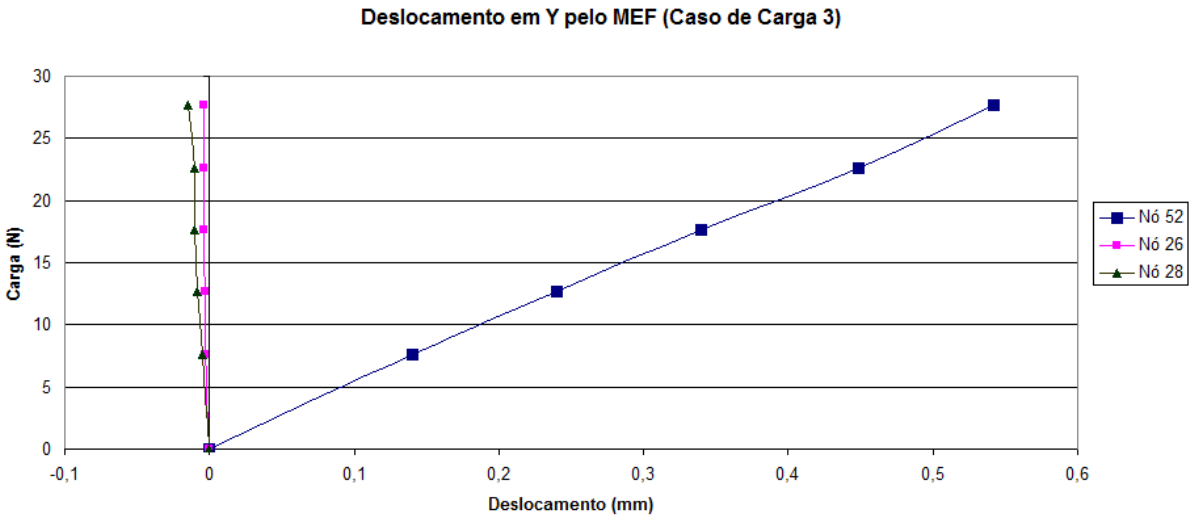


Gráfico 5 –Deslocamentos pelo MEF – Caso de carga 3.
Fonte: o autor, 2014.

4.2 ENSAIOS DINÂMICOS - MODELO COMPUTACIONAL

Foram feitos dois modelos computacionais para a análise dinâmica. Um primeiro modelo computacional, onde não foi levado em conta o anel que simula o costado do tanque e as peças de fixação da estrutura geodésica, que é designado por Modelo Computacional Simplificado (MCS). Um segundo modelo computacional confeccionado, considera o anel e as peças de fixação. Este segundo modelo é designado por Modelo Computacional Completo (MCC). Embora o nome contenha a palavra completo, no MCC não foram modelados os parafusos, porcas e os anteparos que apoiaram todo o modelo físico.

O ensaio dinâmico do MCS foi realizado com elementos de treliça. Foram determinadas as primeiras 52 frequências de ressonância (Tabela 14). Para um melhor entendimento dos modos de vibrar, a Figura 77 identifica os nós, reprodução da Figura 49. O primeiro modo de vibrar referente a frequência de 190,26 Hz está ilustrado na Figura 78, pode-se ver o pico de deslocamento ocorrendo no nó central, nó 52. A frequência de 192,04 Hz produz o segundo modo de vibrar, pode ser visto na Figura 79, o nó com maior deslocamento é o nó 2.

Analisando a Tabela 14, alguns números chamam a atenção. Os valores das frequências dos 30 primeiros modos de vibrar estão bem próximos um do outro, porém existe um salto no valor da frequência entre o 30, 31 e 32 modos

de vibrar, de 222,19 Hz para 332,7 Hz e 835,45 Hz respectivamente. Avaliando o modo de vibrar 31 na Figura 80 e o modo de vibrar 32 na Figura 81, verifica-se que o salto na frequência ocorre porque os primeiros trinta modos de vibrar são modos locais, onde o deslocamento máximo ocorre em um nó. A partir do trigésimo primeiro modo de vibrar, o deslocamento passa a ser global e todos os nós da estrutura se movem.

MCS						
Nº do modo	**Frequência (Hertz)**	**Período (Segundos)**		**Nº do modo**	**Frequência (Hertz)**	**Período (Segundos)**
1	190,26	0,005256		27	217,44	0,0045989
2	192,04	0,0052072		28	219,8	0,0045497
3	192,49	0,005195		29	222,17	0,0045011
4	195,38	0,0051183		30	222,19	0,0045007
5	196,08	0,0050999		31	332,7	0,0030058
6	196,39	0,005092		32	835,45	0,001197
7	200,29	0,0049928		33	895,06	0,0011172
8	200,5	0,0049876		34	895,12	0,0011172
9	200,85	0,004979		35	1271	0,00078678
10	201,2	0,0049701		36	1271,6	0,00078642
11	203,97	0,0049027		37	1429,7	0,00069944
12	204,12	0,004899		38	1430,2	0,00069923
13	204,52	0,0048896		39	1632,6	0,00061252
14	205,02	0,0048775		40	1633,1	0,00061235
15	205,71	0,0048613		41	1798,1	0,00055614
16	209,8	0,0047664		42	1819,5	0,0005496
17	209,99	0,0047621		43	1819,5	0,00054959
18	210,9	0,0047416		44	1822,1	0,00054882
19	212,97	0,0046956		45	1975,4	0,00050622
20	214,94	0,0046525		46	1976,9	0,00050584
21	214,96	0,004652		47	2017	0,00049578
22	215,82	0,0046336		48	2018	0,00049555
23	215,94	0,004631		49	2076,5	0,00048158
24	216,56	0,0046178		50	2203,1	0,0004539
25	216,62	0,0046165		51	2205	0,00045351
26	217,16	0,0046049		52	2323,1	0,00043046

Tabela 14 – 52 primeiras frequências de ressonância para o MCS.
Fonte: o autor, 2014.

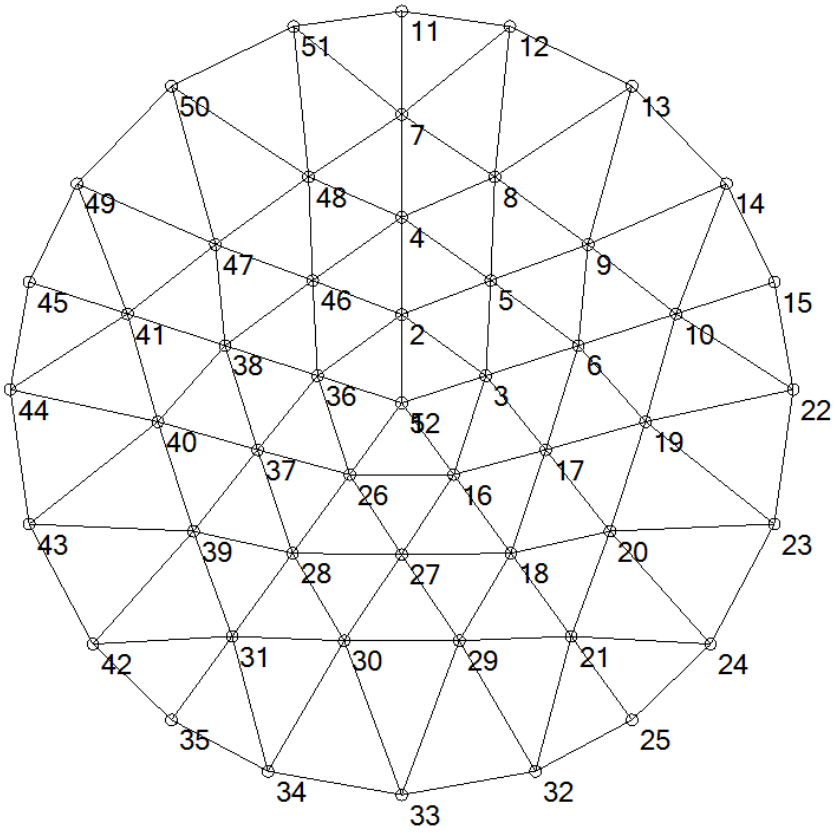


Figura 77 – Identificação dos nós para interpretação dos resultados dos ensaios dinâmicos.
Fonte: o autor, 2014.

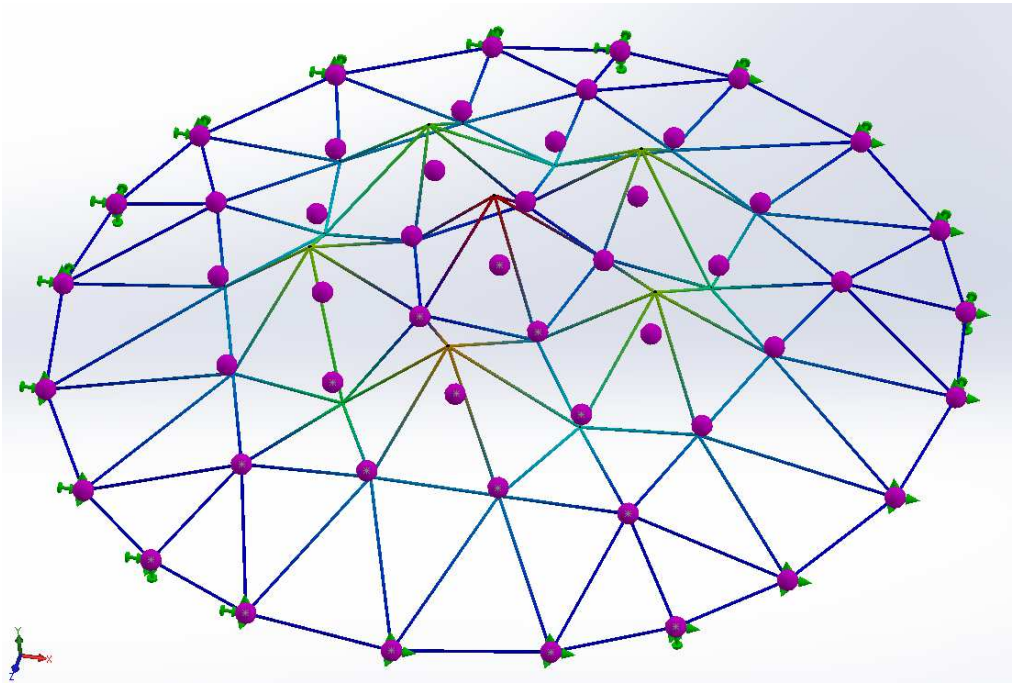


Figura 78 – Primeiro modo de vibrar do MCS.
Fonte: o autor, 2014.

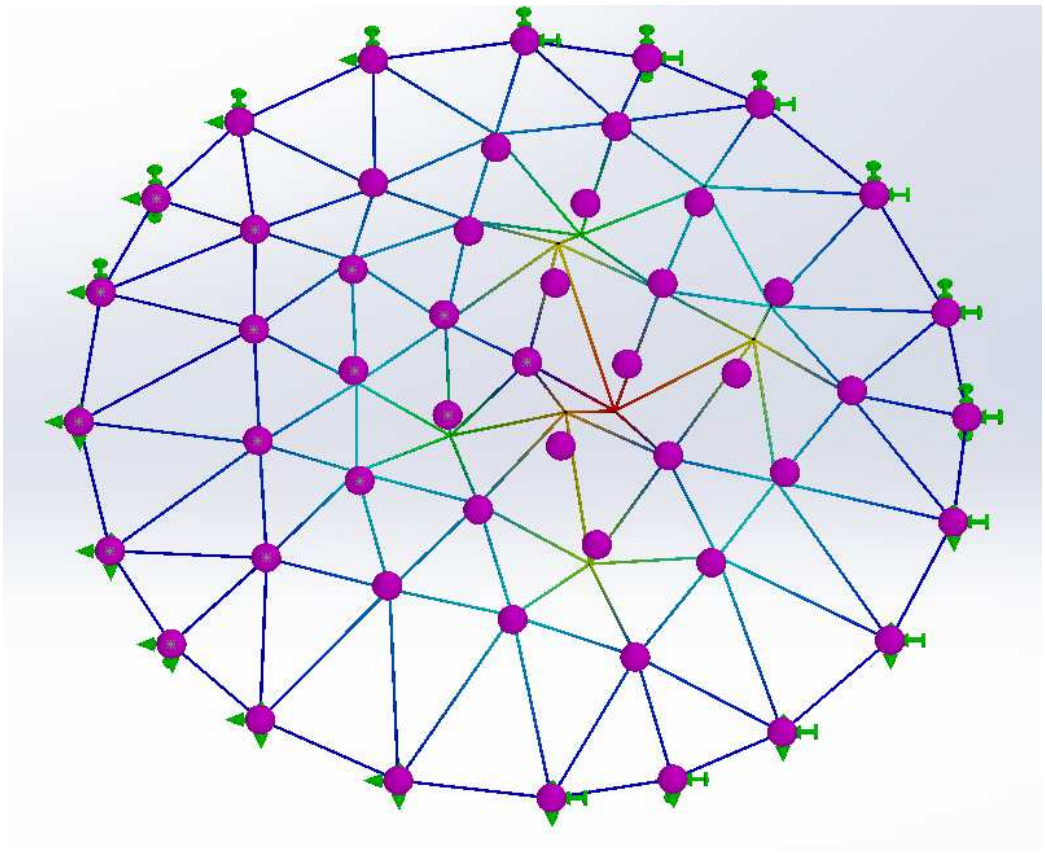


Figura 79 – Segundo modo de vibrar do MCS.
Fonte: o autor, 2014.

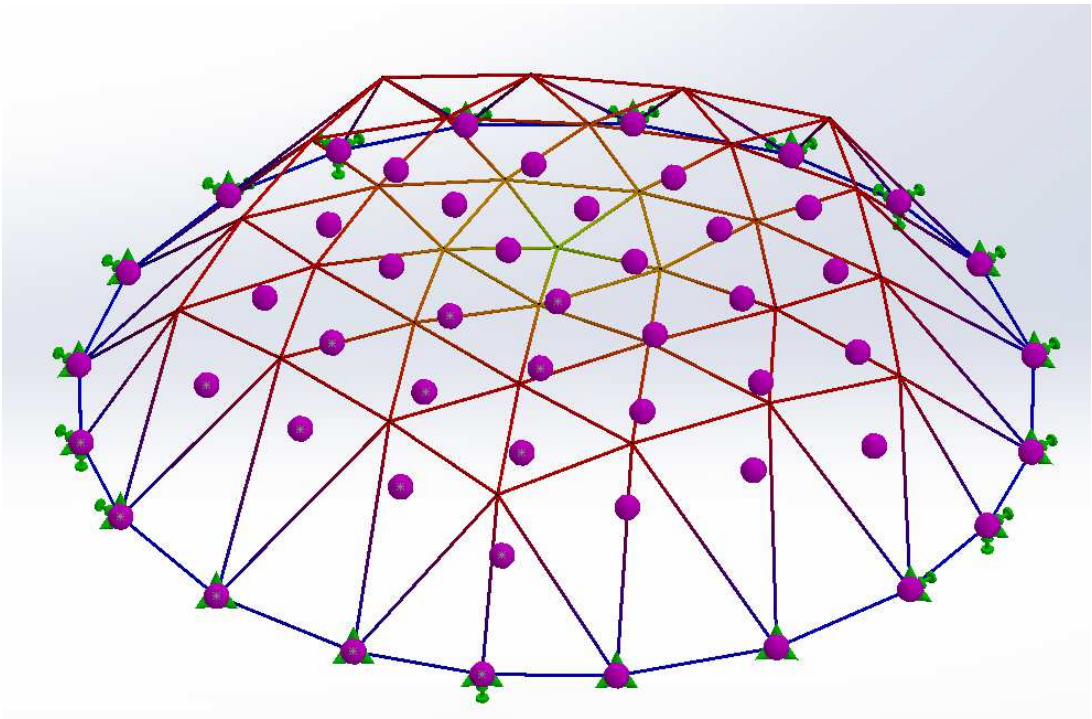


Figura 80 – Trigésimo primeiro modo de vibrar do MCS.
Fonte: o autor, 2014.

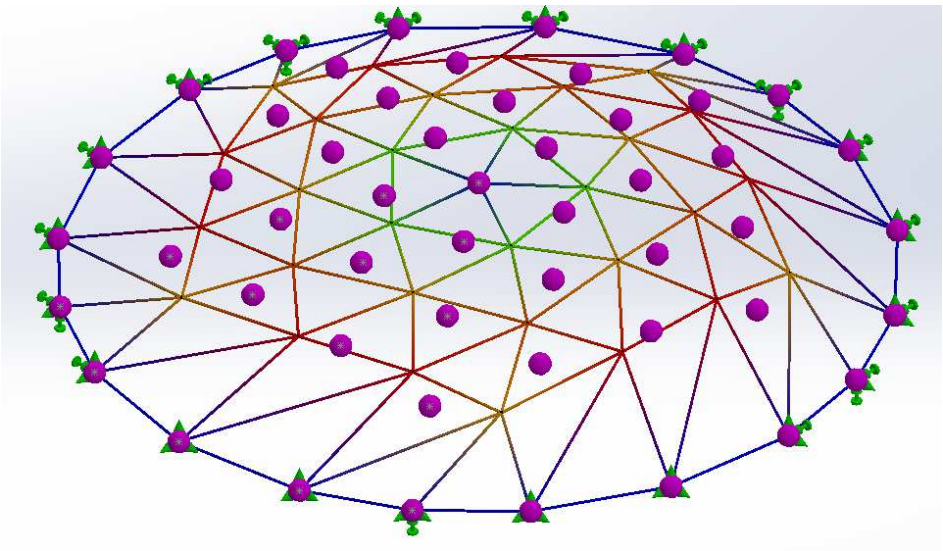


Figura 81 – Trigésimo segundo modo de vibrar do MCS.
Fonte: o autor, 2014.

Na sequência são apresentados os resultados do ensaio computacional para o MCC. O modelo computacional foi elaborado levando-se em conta as peças de fixação do domo geodésico e a peça que simula o costado. O domo foi discretizado por elementos de viga na análise, pois o software Solidworks não permite a interação entre elemento de treliça e elemento de casca. Os elementos de casca foram usados nas peças que fazem a fixação da estrutura geodésica na peça que simula o costado. Devido ao fato se ser usado elemento de viga foram analisados aos primeiros 150 modos de vibrar (Tabela 15). A 1 frequência ressonante encontrada foi de, 118 Hz e o primeiro modo de vibrar é representado na Figura 82. O segundo modo de vibrar referente a frequência de 119,23 Hz está ilustrado na Figura 83. O terceiro como de vibrar de 119,33 Hz pode ser visto na Figura 84.

MCC					
Nº do modo	Frequência (Hertz)	Nº do modo	Frequência (Hertz)	Nº do modo	Frequência (Hertz)
1	118,93	51	189,45	101	251,3
2	119,23	52	192,11	102	251,48
3	119,33	53	192,12	103	252,75
4	119,57	54	192,87	104	253,02
5	119,66	55	193,21	105	254,14
6	142,29	56	196,12	106	254,23
7	142,34	57	196,18	107	255,73
8	142,86	58	196,96	108	259,59
9	142,95	59	198,17	109	259,84
10	143,31	60	198,27	110	263,22
11	143,52	61	199,42	111	263,25
12	151,26	62	199,99	112	268,44
13	151,46	63	200,16	113	268,63
14	152,65	64	200,34	114	275,05
15	152,79	65	203,41	115	276,45
16	153,12	66	203,72	116	277,69
17	156,09	67	204,8	117	279,54
18	156,17	68	204,87	118	280,32
19	156,27	69	213,06	119	281,63
20	156,35	70	213,09	120	281,9
21	157,51	71	216,65	121	282,56
22	164,27	72	216,76	122	282,65
23	164,33	73	217,29	123	285,34
24	165,3	74	217,31	124	285,53
25	165,44	75	218,87	125	286,41
26	167,11	76	219,3	126	286,78
27	170,23	77	219,39	127	288,72
28	170,28	78	219,44	128	289,91
29	170,41	79	219,55	129	293,19
30	170,57	80	220,33	130	294,9
31	170,64	81	220,58	131	300,82
32	172,02	82	220,9	132	301,14
33	172,12	83	222,19	133	305,53
34	174,32	84	222,23	134	306,31
35	174,55	85	223,29	135	307,14
36	176,48	86	224,6	136	307,22
37	179,45	87	225,44	137	311,83
38	179,95	88	226,38	138	312
39	180,81	89	226,66	139	314,6
40	181,12	90	227,02	140	316,68
41	181,76	91	227,54	141	317,58
42	182	92	227,56	142	318,05
43	183,08	93	236,24	143	318,67
44	183,36	94	239,62	144	318,94
45	184,61	95	242,83	145	319,88
46	185,3	96	243,14	146	321,17
47	186,48	97	247,28	147	321,35
48	186,92	98	247,84	148	323,56
49	187,39	99	248,03	149	323,61
50	188,61	100	250,59	150	327,09

Tabela 15 -150 primeiras frequências de ressonância para o MCC.
Fonte: o autor, 2014.

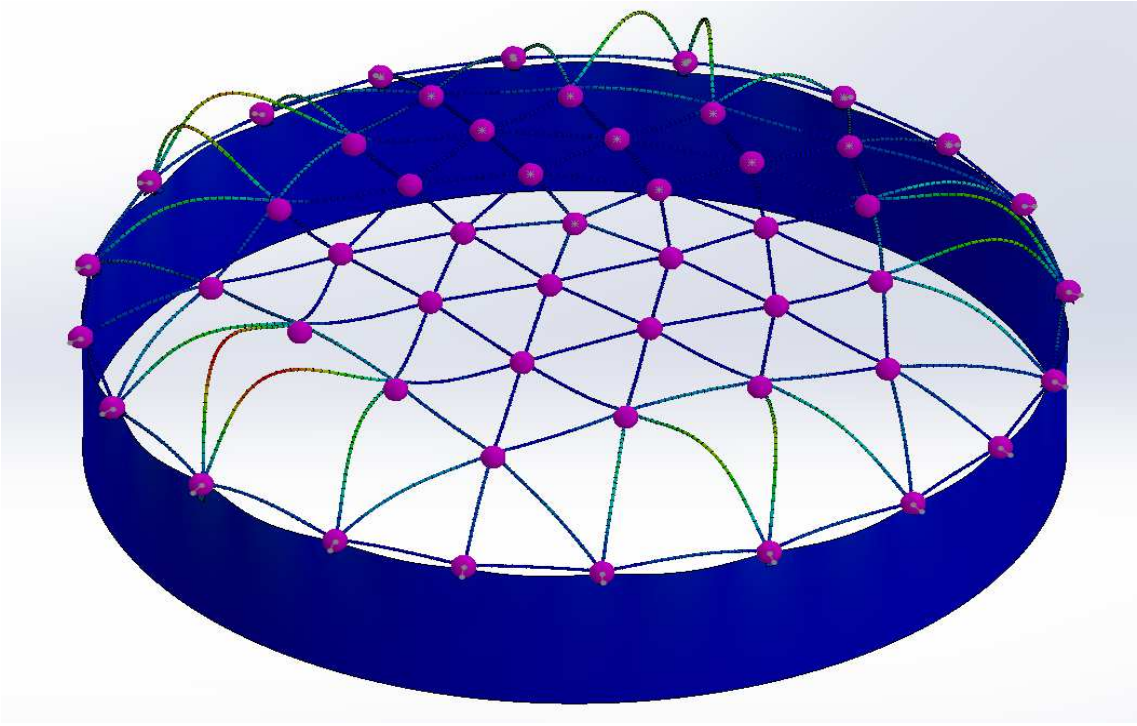


Figura 82 – 1º modo de vibrar pelo MEF – MCC.
Fonte: o autor, 2014.

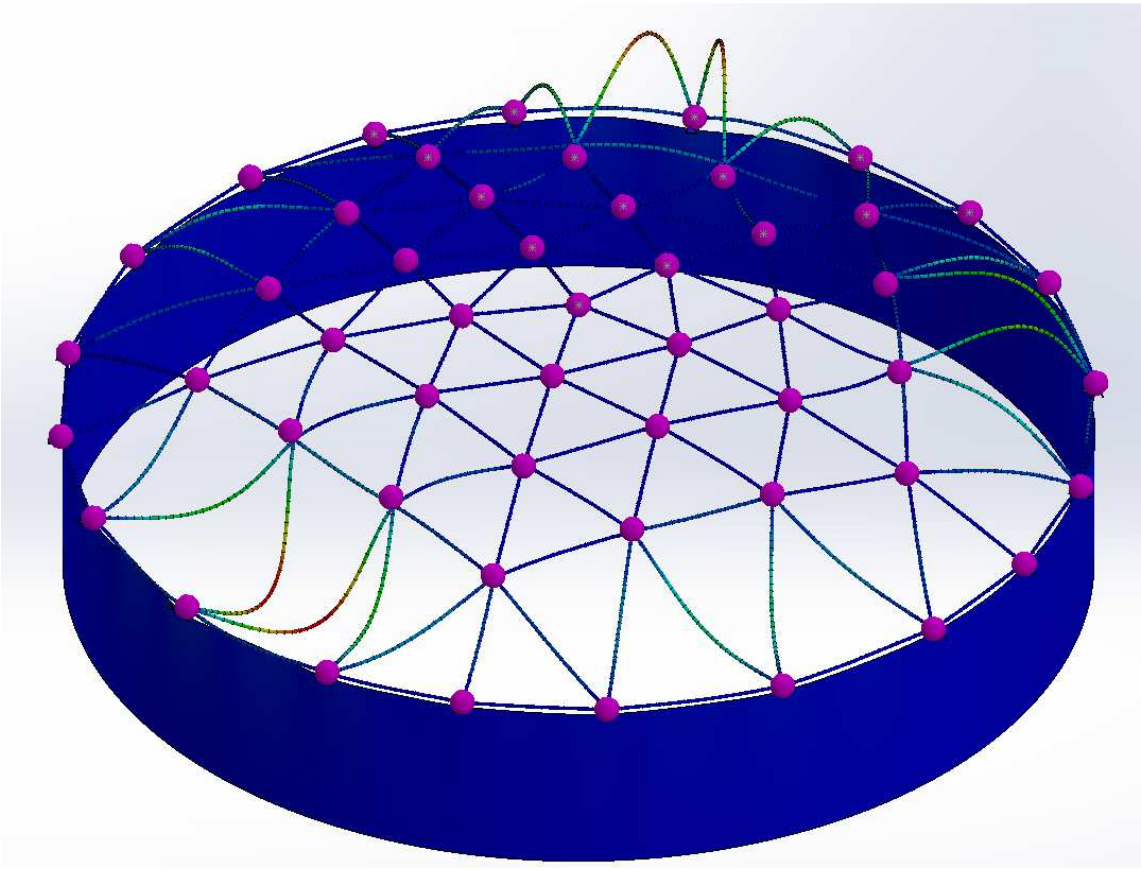


Figura 83 – 2º modo de vibrar pelo MEF – MCC.
Fonte: o autor, 2014.

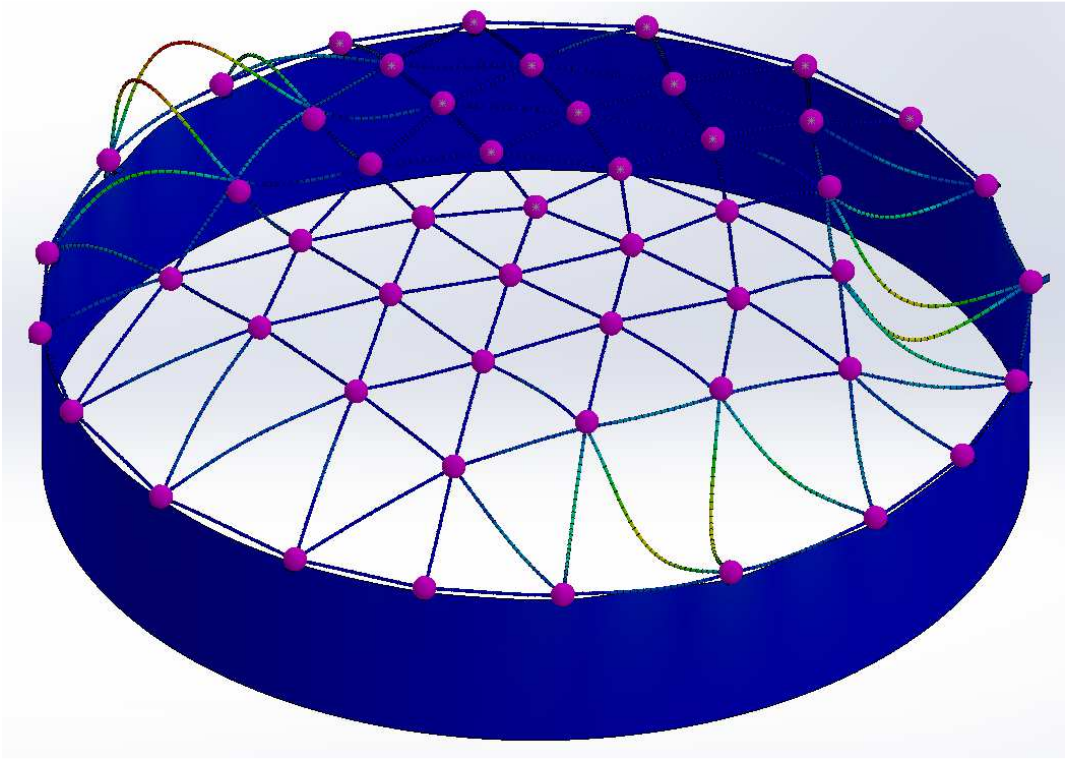


Figura 84 - 3º modo de vibrar pelo MEF – MCC.
Fonte: o autor, 2014.

5 ENSAIO DO MODELO FÍSICO

Neste capítulo são explicados como foram realizados os ensaios no modelo físico, estáticos e dinâmicos. Apresenta-se os equipamentos que foram usados nos ensaios. Para finalizar, são apresentados os resultados obtidos.

5.1 ENSAIOS ESTÁTICOS NO MODELO FISICO

Para os ensaios no modelo físico, foram usados os mesmos critérios dos ensaios do modelo computacional. As medições foram realizadas com 3 relógios comparadores, todos da marca Mitutoyo e com precisão de 0,01mm, conforme Figura 85.

Figura 85 – Relógio comparador usado nas medições.
Fonte: o autor, 2014.

Na Figura 86, os relógios comparadores preparados para o ensaio do primeiro caso de carga.

Figura 86 – Relógios comparadores posicionados para o primeiro ensaio.
Fonte: o autor, 2014.

Figura 87, os suportes com as primeiras cargas, para ensaio experimental do primeiro caso de carga. Os resultados para o primeiro caso de carga podem ser vistos na Tabela 16 e no Gráfico 6.

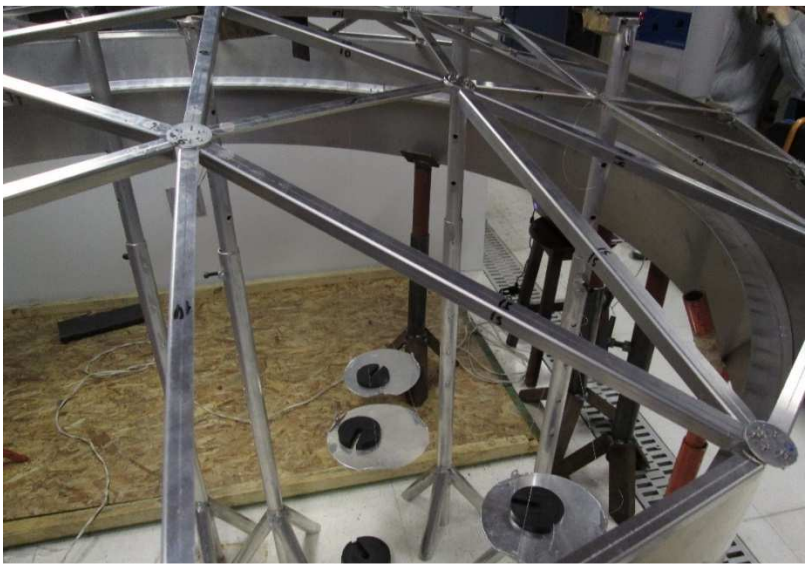


Figura 87 – Domo geodésico com a primeira carga do primeiro caso de carga.
Fonte: o autor, 2014.

Deslocamentos em Y (mm) modelo físico					
Nó 30	-0,019	0,09	0,09	0,55	0,55
Nó 27	-0,18	-0,36	-0,7	-1,15	-1,25
Nó 16	-0,009	0,15	0,2	0,19	0,15
Carga (N)	2,64	5,64	12,64	22,64	32,64

Tabela 16 – Resultados análise física para o primeiro caso de carga.
Fonte: o autor, 2014.

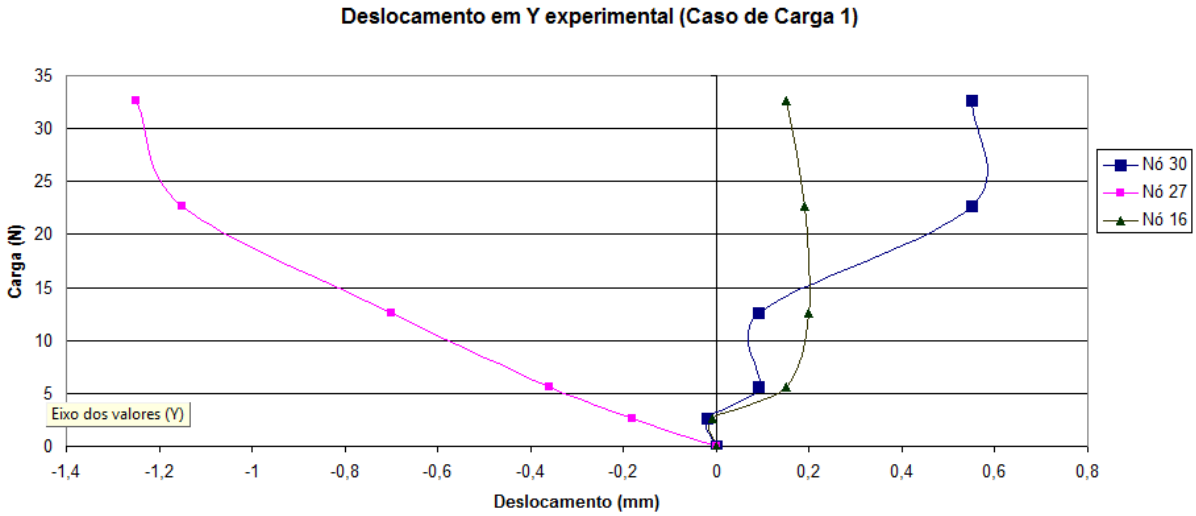


Gráfico 6 – Deslocamentos modelo físico – Caso de carga 1.
Fonte: o autor, 2014.

Na Figura 88 apresenta-se os relógios comparadores posicionados para o segundo e terceiro ensaio de carga. Na Tabela 17 e no Gráfico 7 os resultados para o segundo caso de carga e na Tabela 18 e Gráfico 8 os resultados para o terceiro caso de carga.

Figura 88 – Relógios comparadores para o segundo e terceiro caso de carga.
Fonte: o autor, 2014.

Deslocamentos em Y (mm) Modelo Físico					
Nó 52	-0,05	-0,18	-0,3	-0,75	-2,28
Nó 26	0	0	-0,11	0,05	0,6
Nó 28	0	0	-0,01	0,01	0,01
Carga (N)	2,64	7,64	12,64	17,64	22,64

Tabela 17 – Resultados análise física para o segundo caso de carga.
Fonte: o autor, 2014.

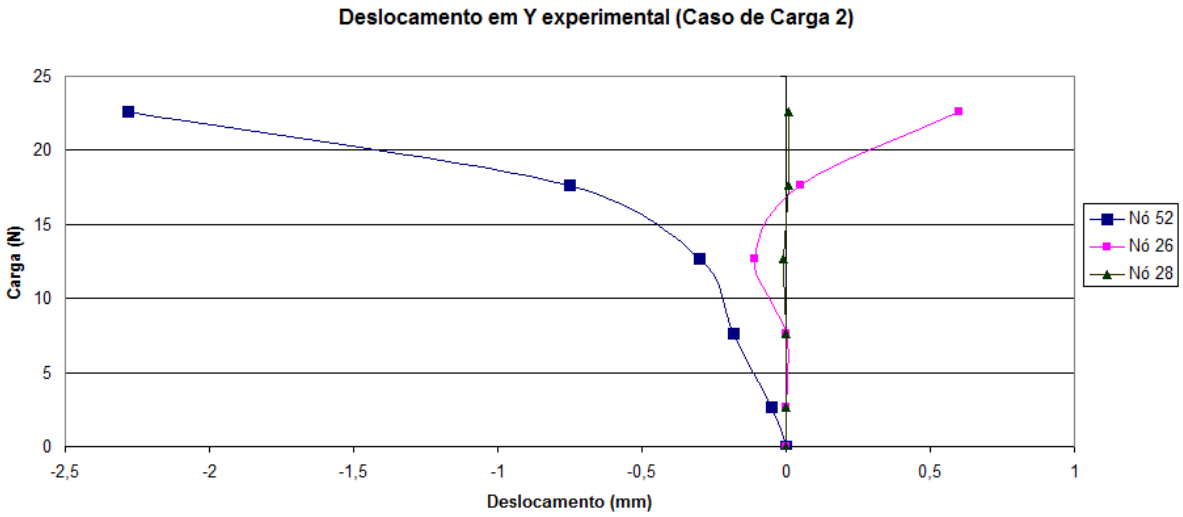


Gráfico 7 – Deslocamentos modelo físico – Caso de carga 2.
Fonte: o autor, 2014.

Deslocamentos em Y (mm) Modelo Físico					
Nó 52	0,18	0,26	0,61	0,98	1,66
Nó 26	0	0,1	0,18	0,28	0,5
Nó 28	0	0,02	-0,05	-0,099	-0,12
Carga (N)	7,64	12,64	17,64	22,64	27,64

Tabela 18 – Resultados análise física para o terceiro caso de carga.
Fonte: o autor, 2014.

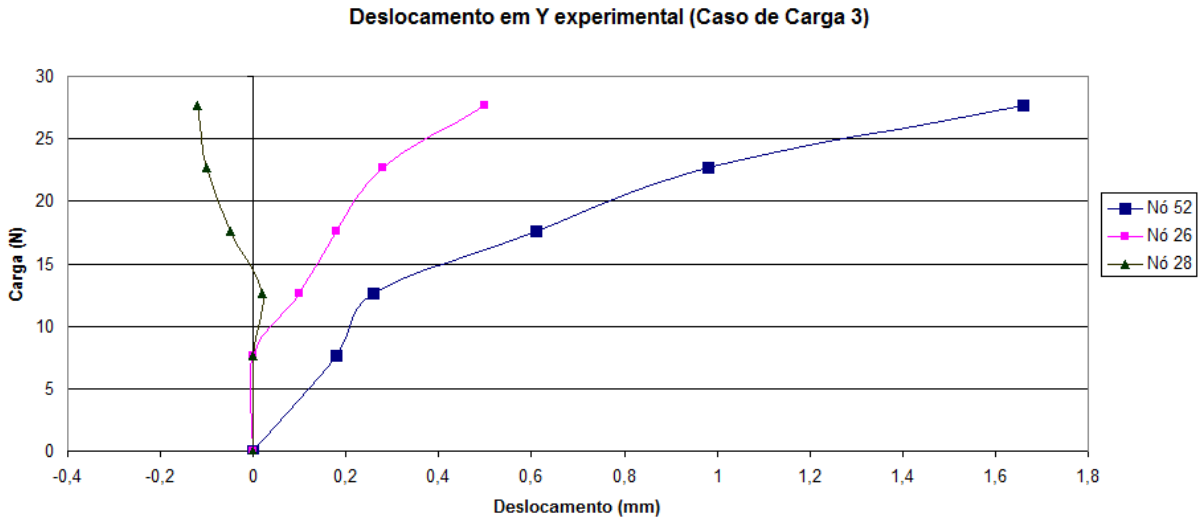


Gráfico 8 – Deslocamentos modelo físico – Caso de carga 3.
Fonte: o autor, 2014.

5.2 ENSAIOS DINÂMICOS NO MODELO FISICO

Para os ensaios dinâmicos foram usados acelerômetros indicados na Tabela 19, o martelo de impacto usado foi para 0-500 libras modelo 086C03, número de série 10643 e sensibilidade de 2,13 mV/N.

Modelo do Acelerômetro	**Número de série**	**Sensibilidade (mV/g)**
333A	2098	84
333B	5265	109,9
333B	5266	94,5
333B	5267	109,2
333B	5268	101,1
333B	5269	107,9
333B	5270	111,8
333B	5271	111,5

Tabela 19 – Modelos de acelerômetros usados no ensaio dinâmico.
Fonte: o autor, 2014.

Os acelerômetros foram posicionados onde haveria, supostamente, os maiores deslocamentos no primeiro modo de vibrar, no nó 52, identificado na Figura 89. Na Figura 90 o modelo físico instrumentado para o ensaio dinâmico, os acelerômetros foram colocados na parte superior do domo geodésico.

Após o posicionamento dos acelerômetros, a excitação feita com o martelo de impacto (Figura 91) ocorreu em vários nós diferentes da estrutura. A Tabela 20 informa os nós que foram excitados durante o ensaio e relaciona com os gráficos resultantes de cada excitação.

Local de excitação da estrutura	Ilustração com todos acelerômetros
Nó 27	Gráfico 13
Nó 29	Gráfico 10
Nó 30	Gráfico 11
Nó 31	Gráfico 12
Nó 40	Gráfico 9

Tabela 20 – Local de excitação da estrutura X Gráficos de Amplitude.
Fonte: o autor, 2014.

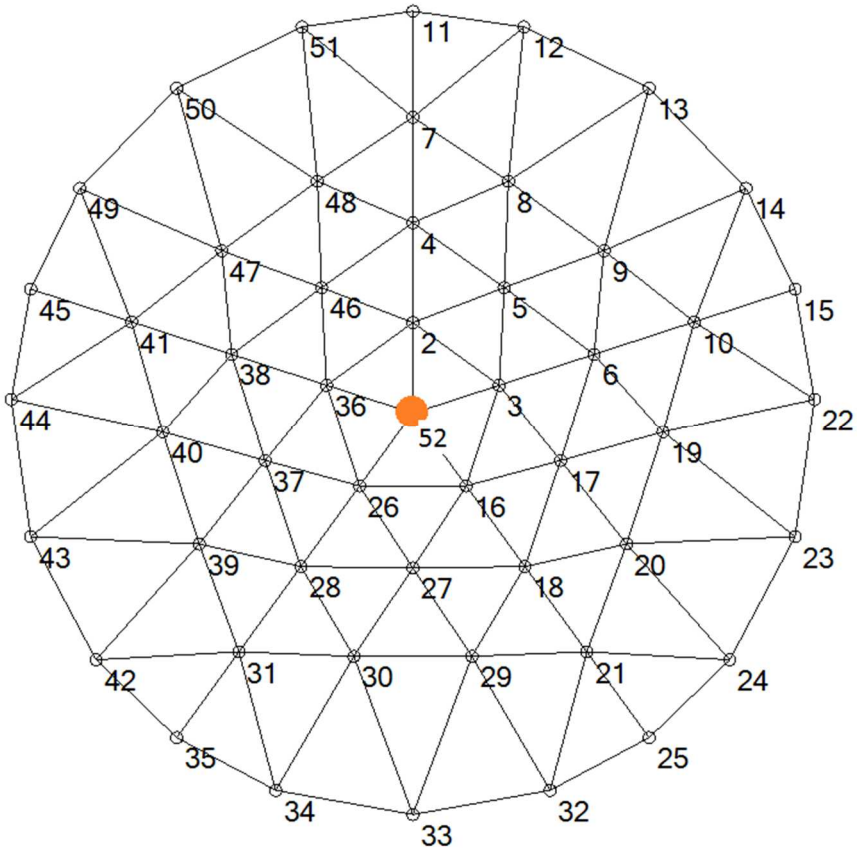


Figura 89 – Identificação dos nós em que foram colocados os acelerômetros.
Fonte: o autor, 2014.

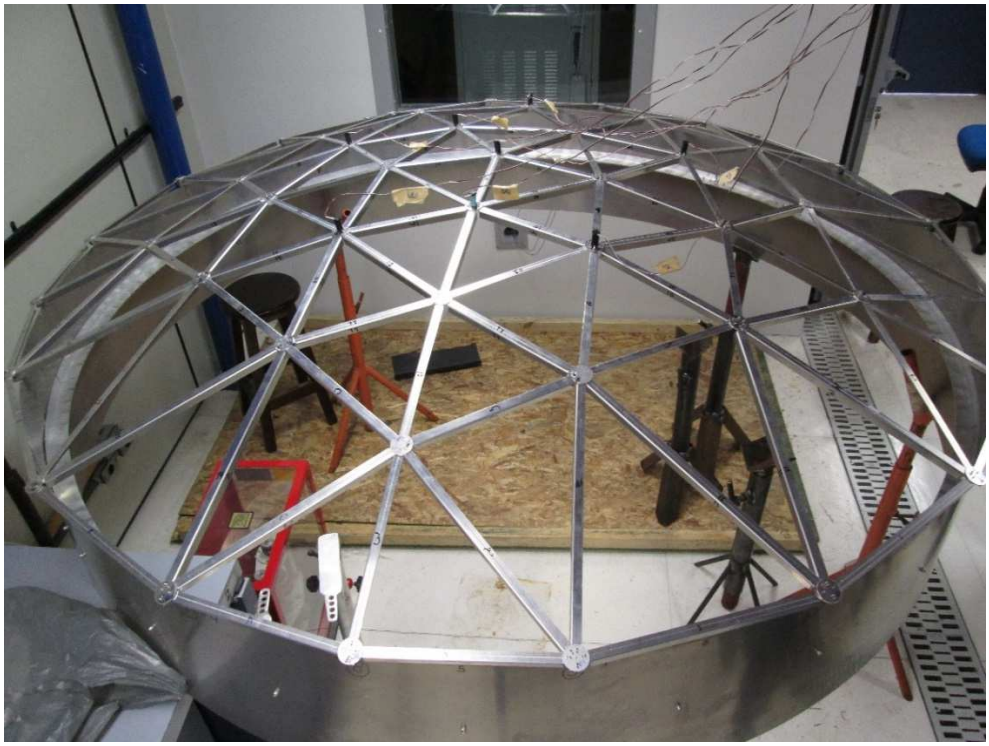


Figura 90 – Modelo físico instrumentado para ensaio dinâmico.
Fonte: o autor, 2014.

Figura 91 – Martelo de excitação.
Fonte: o autor, 2014.

Na coluna “Ilustração com todos acelerômetros” da Tabela 20, estão citados os gráficos onde são apresentados os resultados de todos os acelerômetros usados no ensaio dinâmico. Foram oito acelerômetros usados nos ensaios dinâmicos, apresentados na Tabela 19, esses acelerômetros são representados nas legendas dos gráficos, citados na Tabela 20, pelas designações de C1 a C8. O acelerômetro identificado como C1 é o acelerômetro com número de série 5265, conforme Tabela 19. Analisando todos os gráficos citados na tabela na Tabela 20 é possível observar que, o acelerômetro C1 apresenta um comportamento muito parecido em todos os gráficos, enquanto os outros acelerômetros apresentam algumas pequenas diferenças. Isso pode ter ocorrido devido ao posicionamento do acelerômetro C1 favorecer a captação das frequências de ressonância. Por isso o acelerômetro C1 foi isolado dos outros nos gráficos citados na Tabela 21, onde são apresentados os valores das frequências de ressonância.

Local de excitação da estrutura	Ilustração acelerômetro C1	Primeiro pico (frequência Hz)	Segundo pico (frequência Hz)
Nó 27	Gráfico 14	108,2	143,25
Nó 29	Gráfico 15	108,25	143,25
Nó 30	Gráfico 16	108,25	143,25
Nó 31	Gráfico 17	108,25	143,25
Nó 40	Gráfico 18	108,2	152,5

Tabela 21 - Resultados no acelerômetro C1.
Fonte: o autor, 2014.

Dessa forma o valor da primeira frequência ressonante é de 108,25 Hz e o valor da segunda frequência ressonante é de 143,25 Hz, conforme Tabela 20. Para facilitar a visualização, do acelerômetro que melhor capturou as frequências de ressonância, este acelerômetro foi isolado dos outros e existe uma coluna na Tabela 20, “Ilustração acelerômetro C1”, indicando em qual gráfico é possível analisar o comportamento do acelerômetro C1.

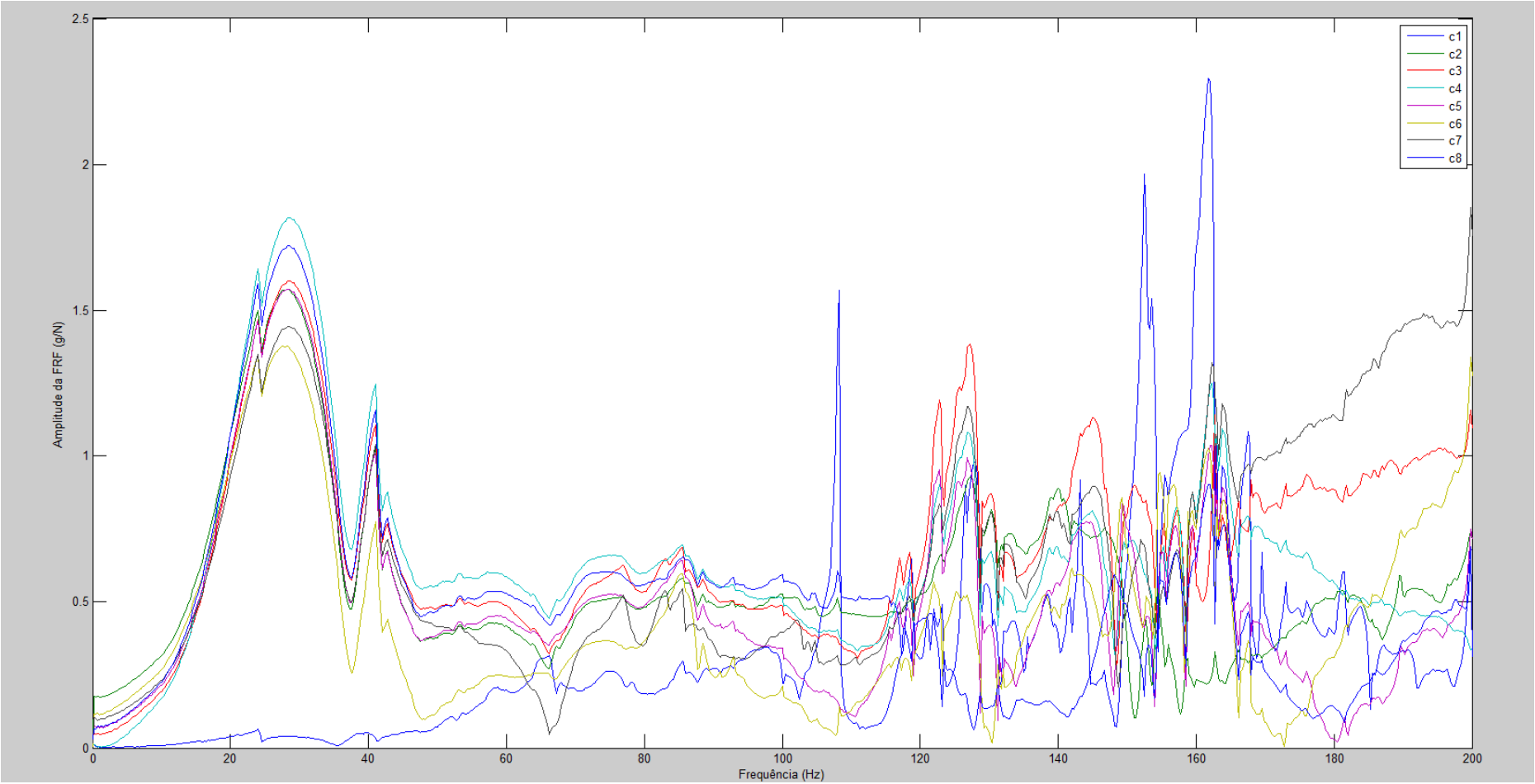


Gráfico 9 – Ensaio dinâmico modelo físico - excitação no nó 40.
Fonte: o autor, 2014.

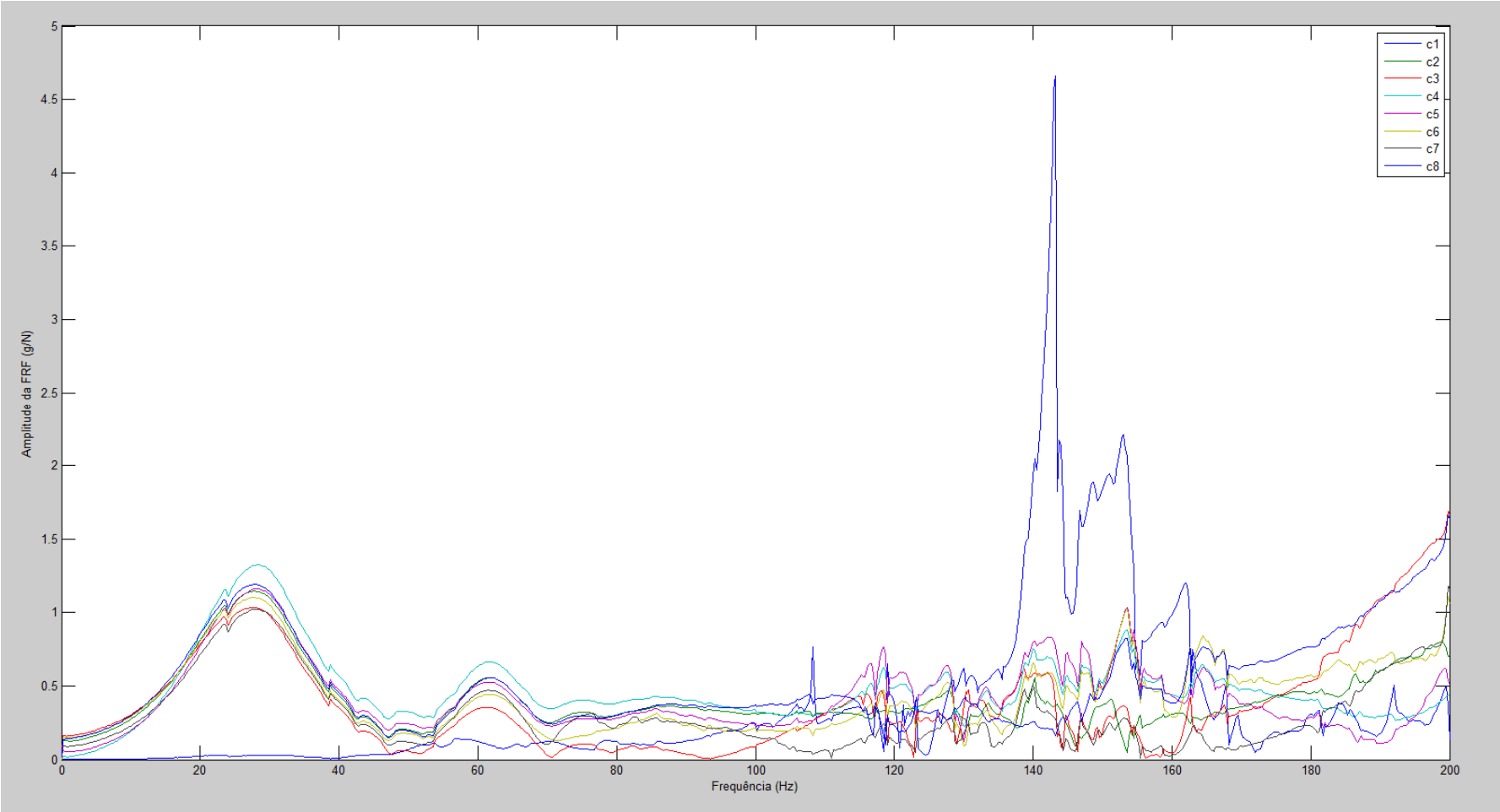


Gráfico 10 - Ensaio dinâmico modelo físico - excitação no nó 29.
Fonte: o autor, 2014.

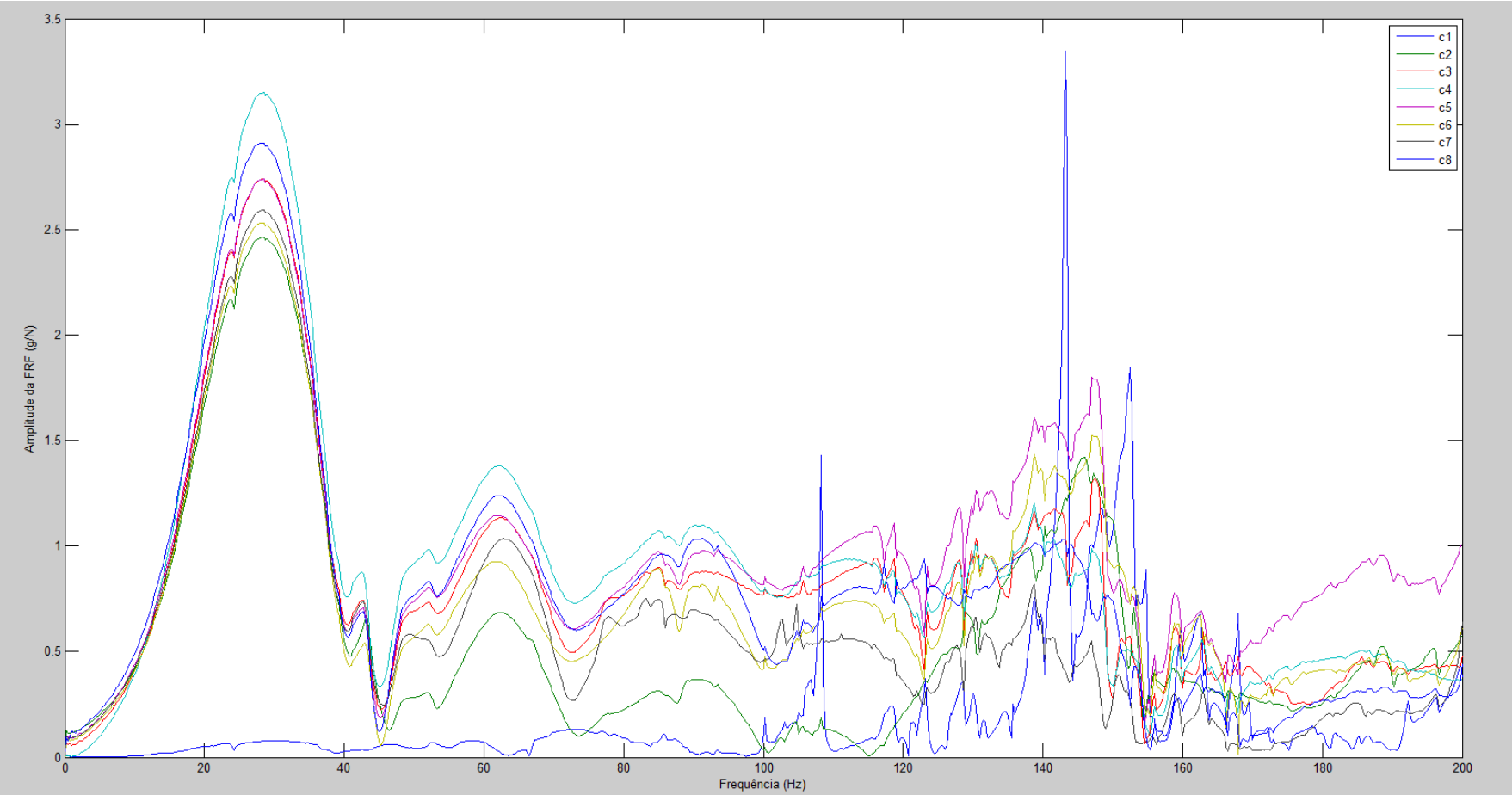


Gráfico 11 - Ensaio dinâmico modelo físico - excitação no nó 30.
Fonte: o autor, 2014.

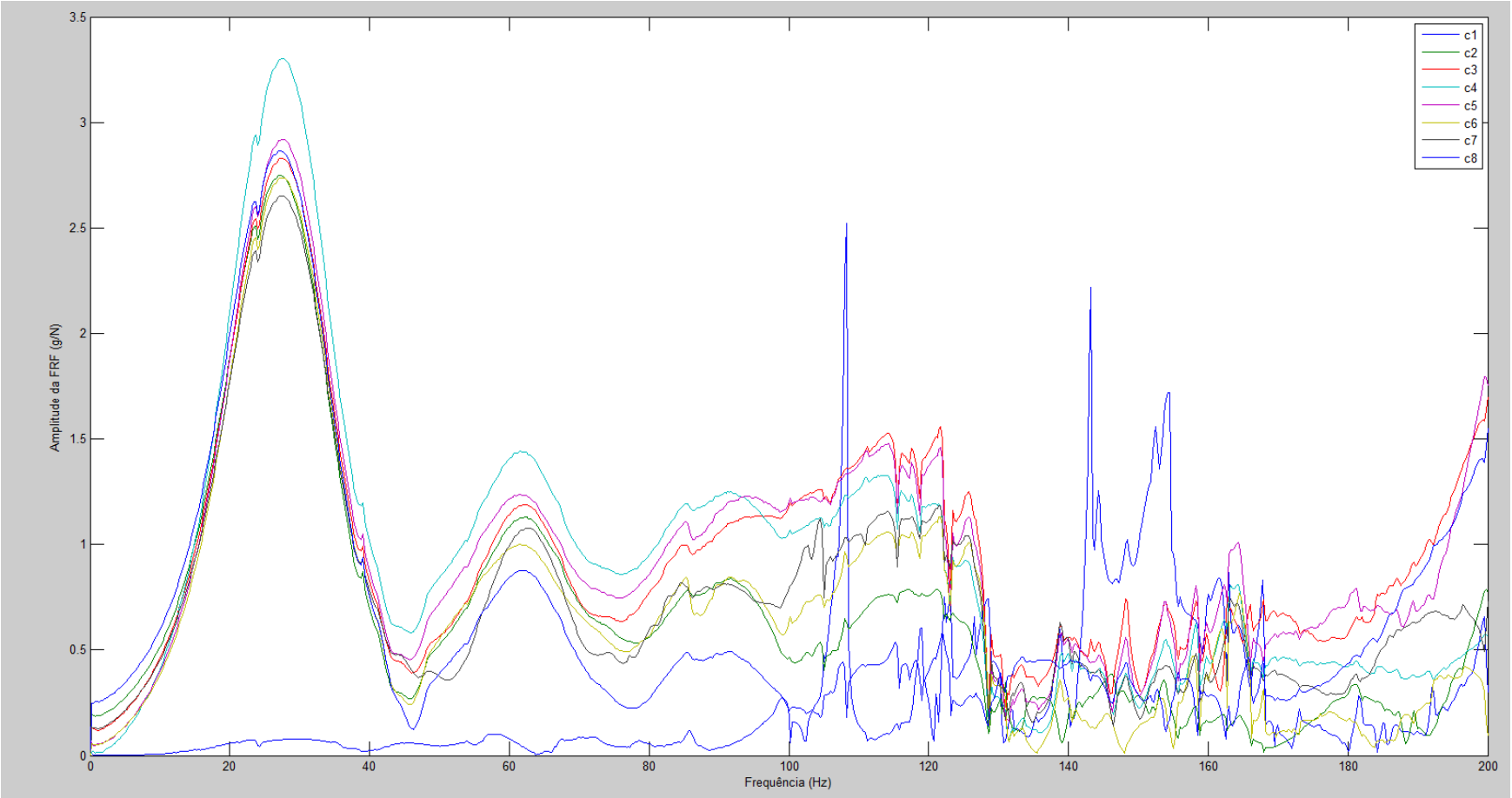


Gráfico 12 - Ensaio dinâmico modelo físico - excitação no nó 31.
Fonte: o autor, 2014.

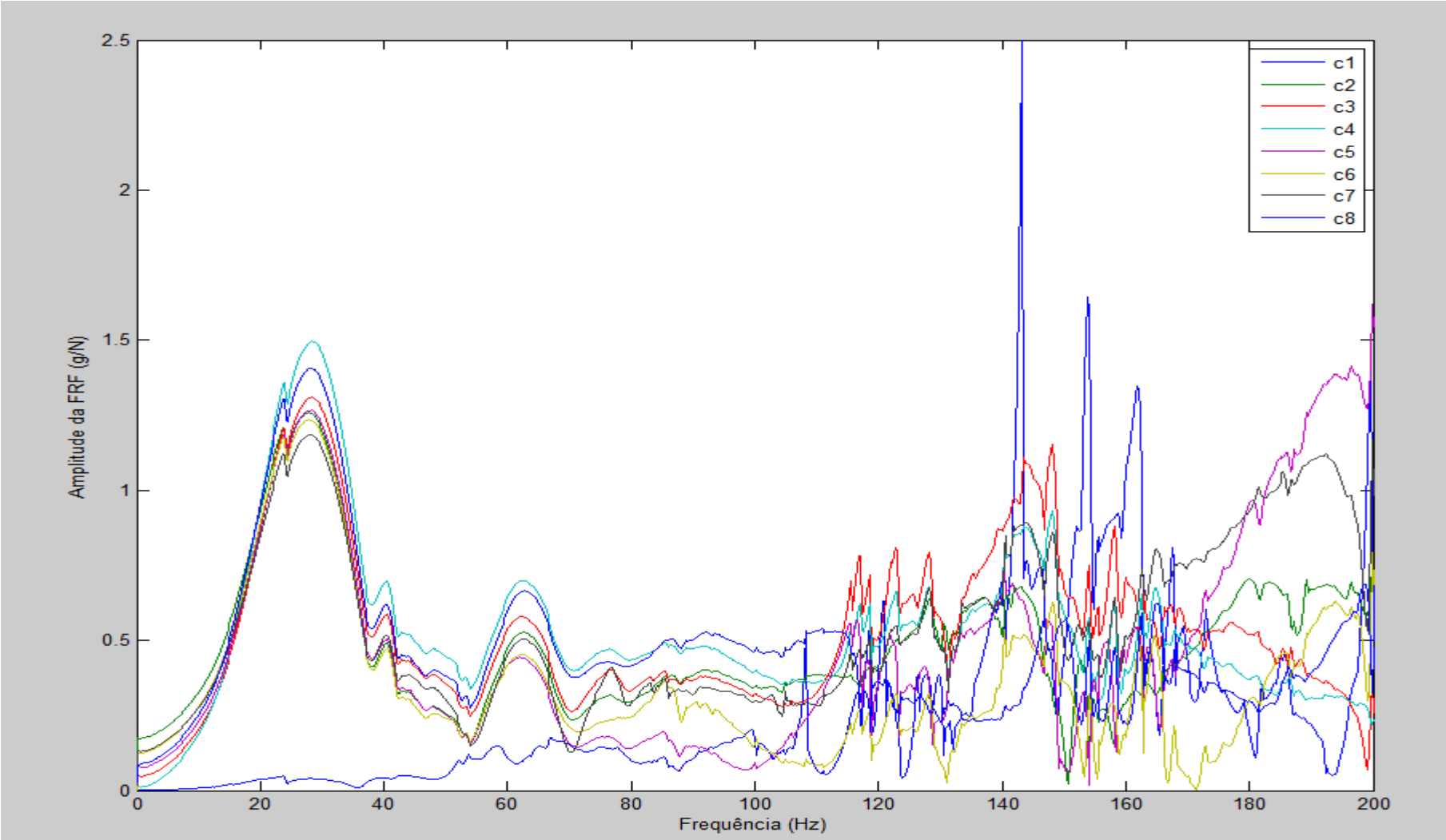


Gráfico 13 - Ensaio dinâmico modelo físico - excitação no nó 27.
Fonte: o autor, 2014.

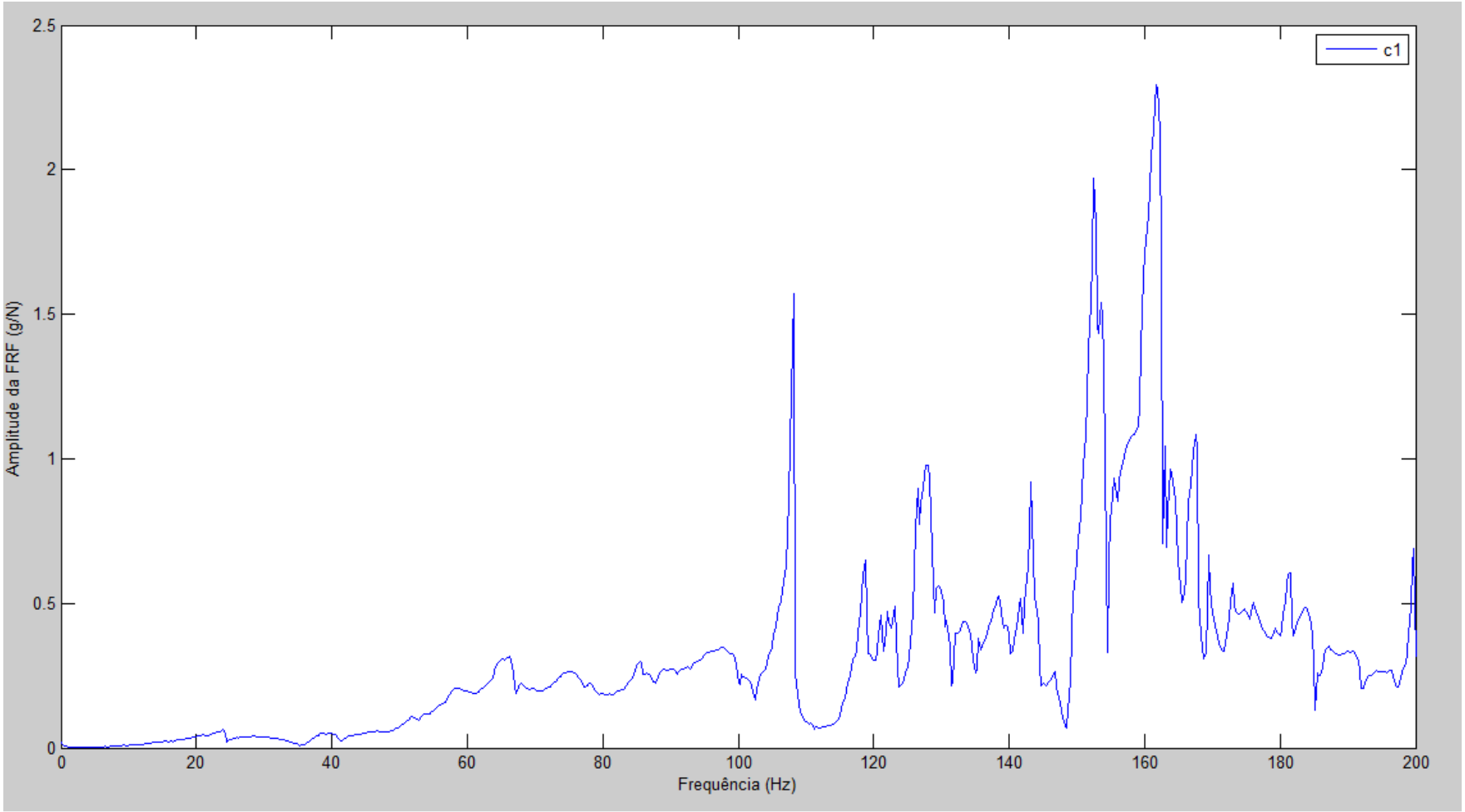


Gráfico 14 - Ensaio dinâmico modelo físico - excitação no nó 27 – Somente acelerômetro C1.
Fonte: o autor, 2014.

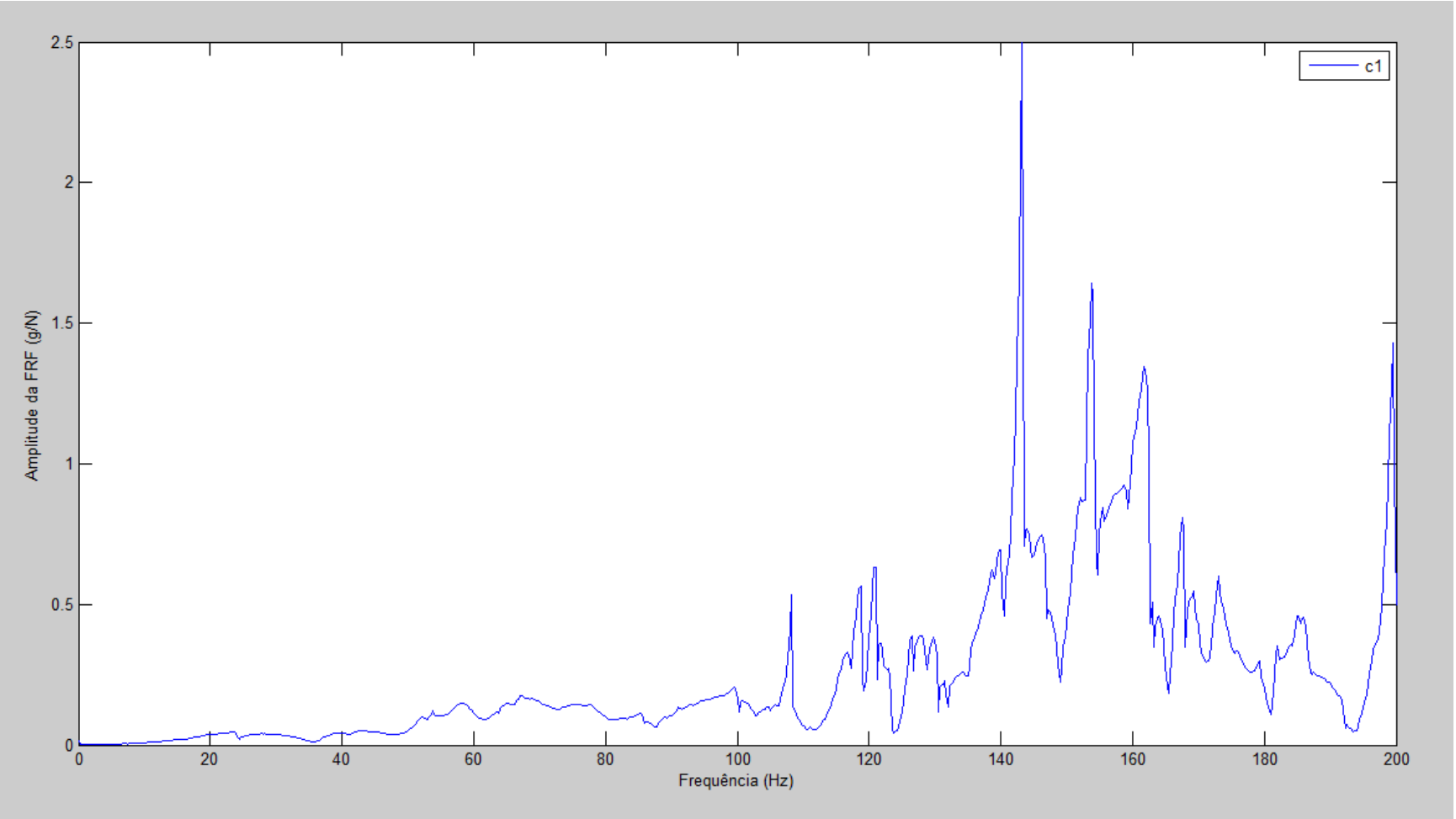


Gráfico 15 - Ensaio dinâmico modelo físico - excitação no nó 29 – Somente acelerômetro C1.
Fonte: o autor, 2014.

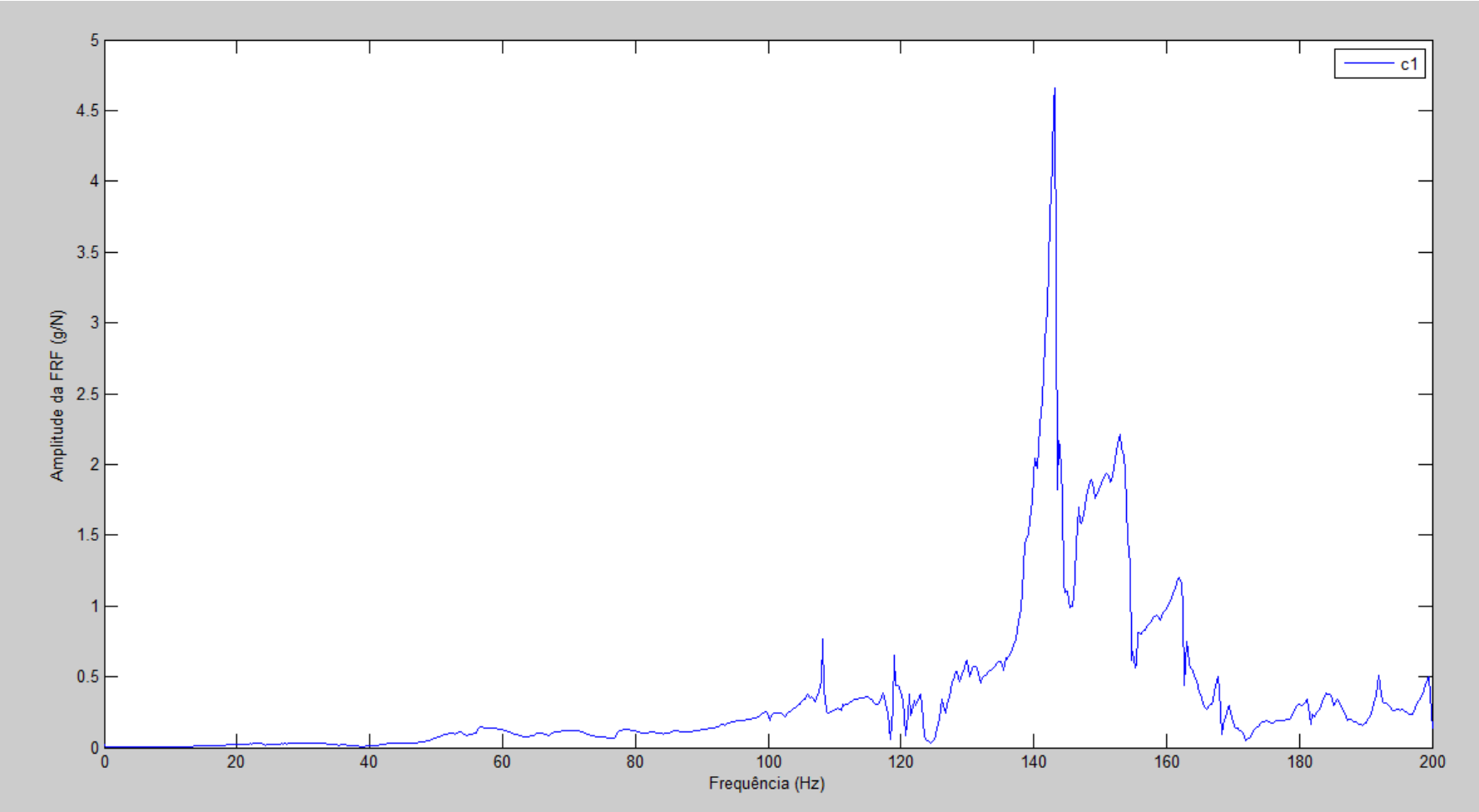


Gráfico 16 - Ensaio dinâmico modelo físico - excitação no nó 30 – Somente acelerômetro C1.
Fonte: o autor, 2014.

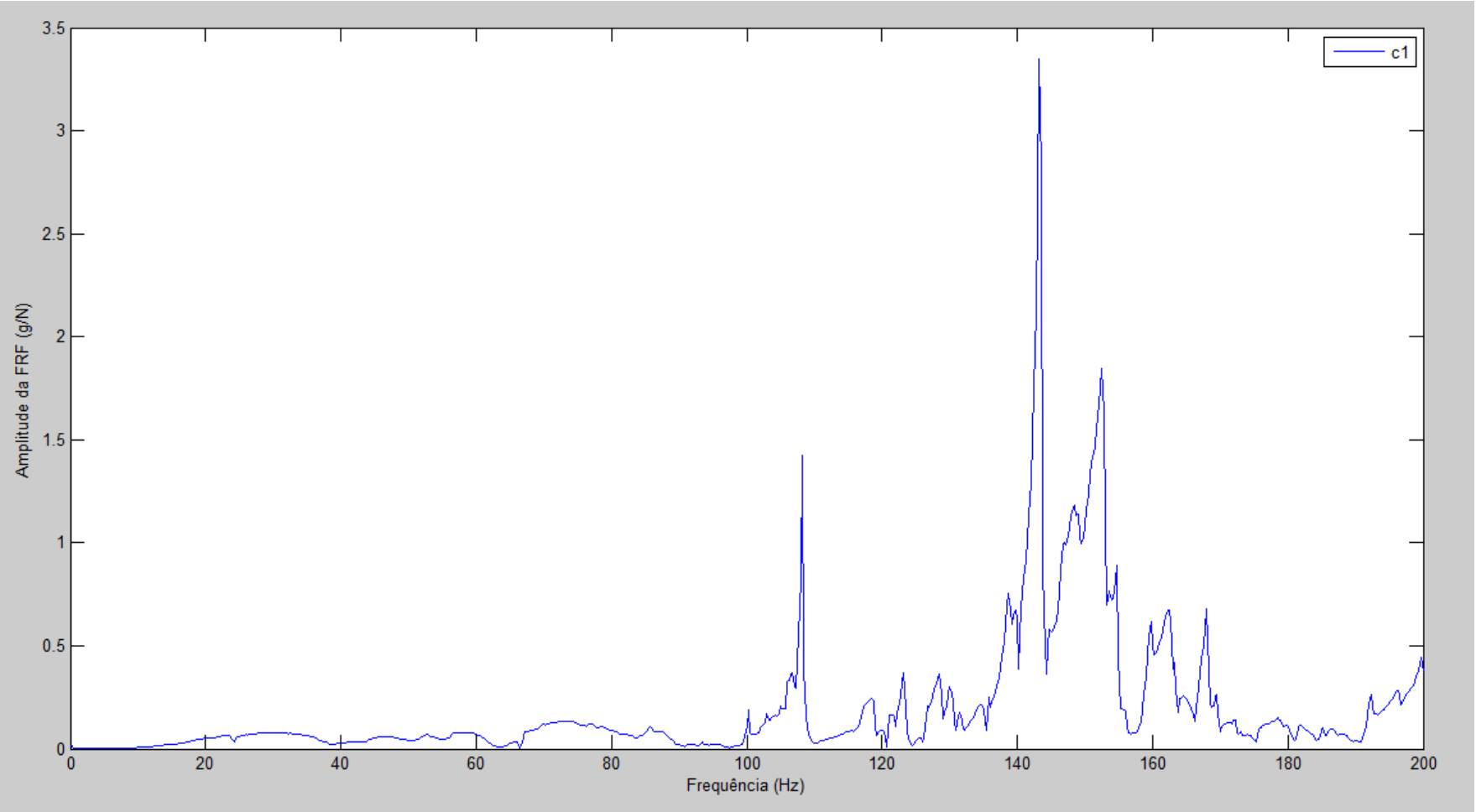


Gráfico 17 - Ensaio dinâmico modelo físico - excitação no nó 31 – Somente acelerômetro C1
Fonte: o autor, 2014

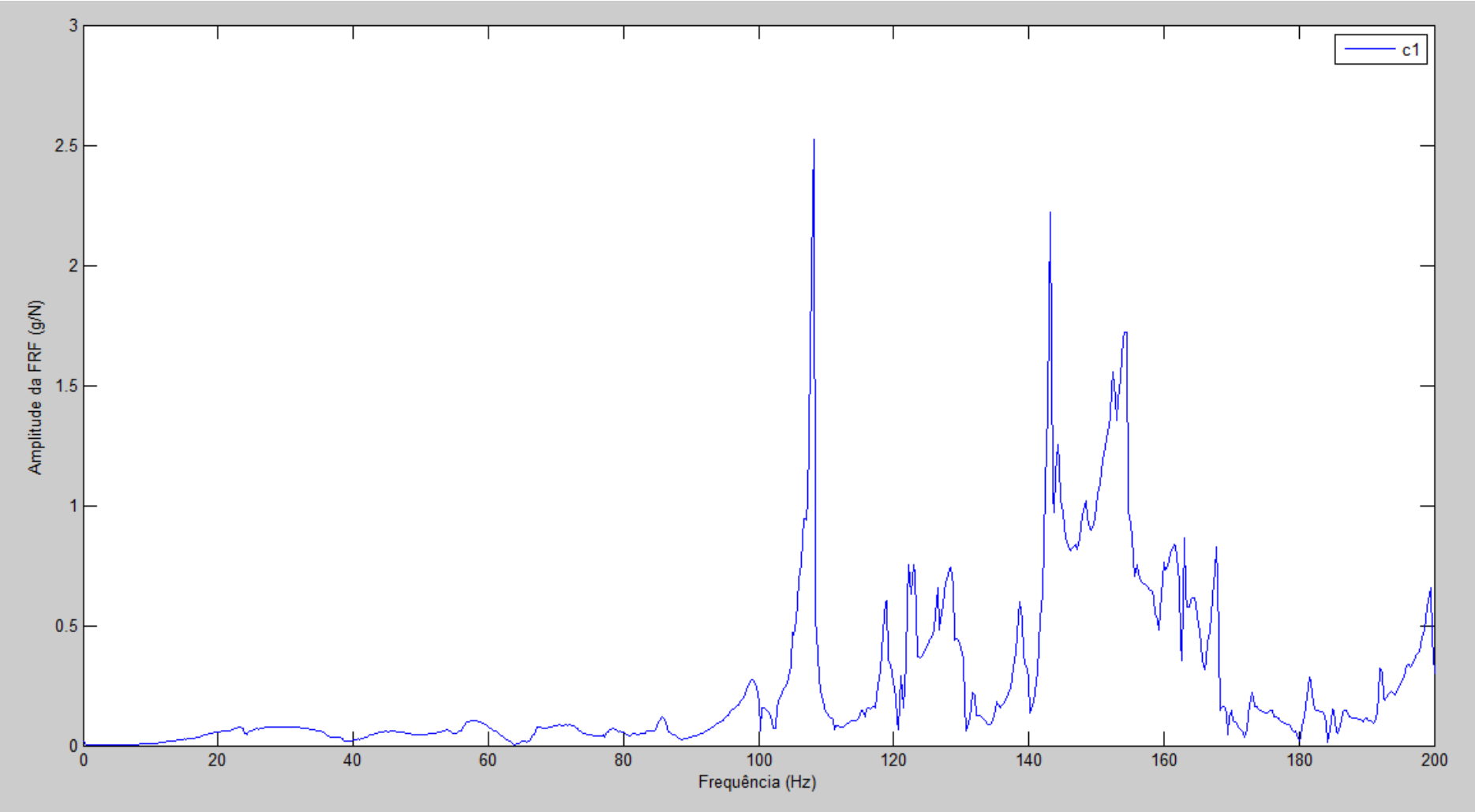


Gráfico 18 - Ensaio dinâmico modelo físico - excitação no nó 40 – Somente acelerômetro C1
Fonte: o autor, 2014

6 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS E COMPUTACIONAIS

Neste capítulo são comparados os resultados experimentais e computacionais. Primeiro, será explorado o conceito de rigidez do modelo e avaliada a rigidez para o ensaio físico e ensaio computacional. A comparação do comportamento, do modelo físico com o modelo computacional, será feita através da rigidez para os ensaios estáticos. Serão feitos ajustes nos modelos computacionais de modo que o resultado se aproxime dos resultados do modelo físico. Esses ajustes serão feitos no módulo de elasticidade, procurando-se um valor que seja compatível com o resultado experimental. Para os ensaios dinâmicos a comparação será feita diretamente através da primeira frequência ressonante e serão realizados ajustes no modelo computacional alterando também o módulo de elasticidade.

6.1 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS ESTATICOS

Partindo-se do conceito de que, a rigidez da estrutura é a tangente do gráfico Carga x Deslocamento, dessa forma é possível calcular e comparar a rigidez dos ensaios computacionais e a rigidez dos ensaios experimentais.

Analisando somente o nó 52, nó central do domo geodésico (nó que está submetido ao carregamento), para o caso de carga 2 do ensaio experimental, pode-se observar que nos três primeiros estágios de carga, o comportamento da estrutura foi diferente dos dois últimos estágios, gerando assim duas linhas com ângulos diferentes em relação ao eixo X, situação ilustrada no Gráfico 19. Essas duas linhas, com ângulos diferentes em relação ao eixo X representam duas rigidezes diferentes para a estrutura. A primeira rigidez é representa no Gráfico 19 pela linha imaginária ligando os pontos A e B, a segunda rigidez é representada pela linha imaginária ligando os pontos B e C. Calculando a rigidez para os 3 primeiros estágios de carregamento o valor obtido é de 42,13 N/mm, para os 2 últimos o valor é de 5,05 N/mm. Considerando uma linha adicional que liga o ponto A ao ponto C a rigidez equivalente seria de 9,93 N/mm.

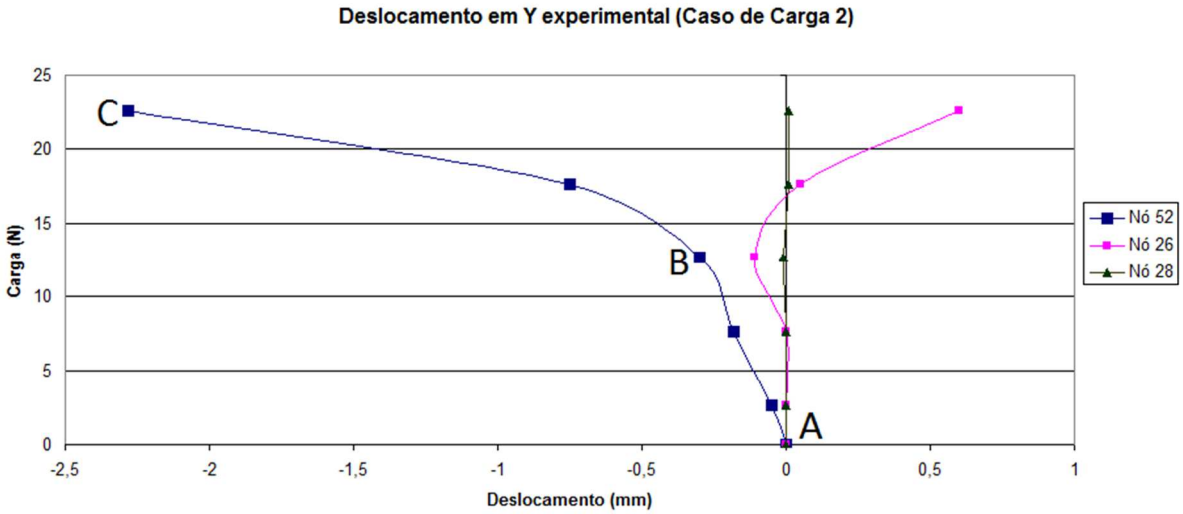


Gráfico 19 – Cálculo da rigidez – Caso de carga 2 - Ensaio experimental.
Fonte: o autor, 2014.

Fazendo essa mesma análise, da rigidez, para o caso de carga 2, nó 52, mas, do ensaio computacional, observa-se que não existe duas rigidezes diferentes. Os pontos A, B e C no Gráfico 20 estão na mesma linha, ou seja, o deslocamento do nó 52 com o aumento de carga ocorre de maneira linear. Na Tabela 22 apresenta-se a comparação entre a rigidez estrutural do ensaio experimental com a rigidez estrutural do ensaio computacional para o caso de carga 2. Pode se ver que, para o carregamento de até 12,64 N a diferença entre as duas rigidezes é pequena. Essa diferença aumenta com o aumento da carga e o valor da rigidez computacional para o carregamento de 22,64 N passa a ser bem diferente do valor experimental.

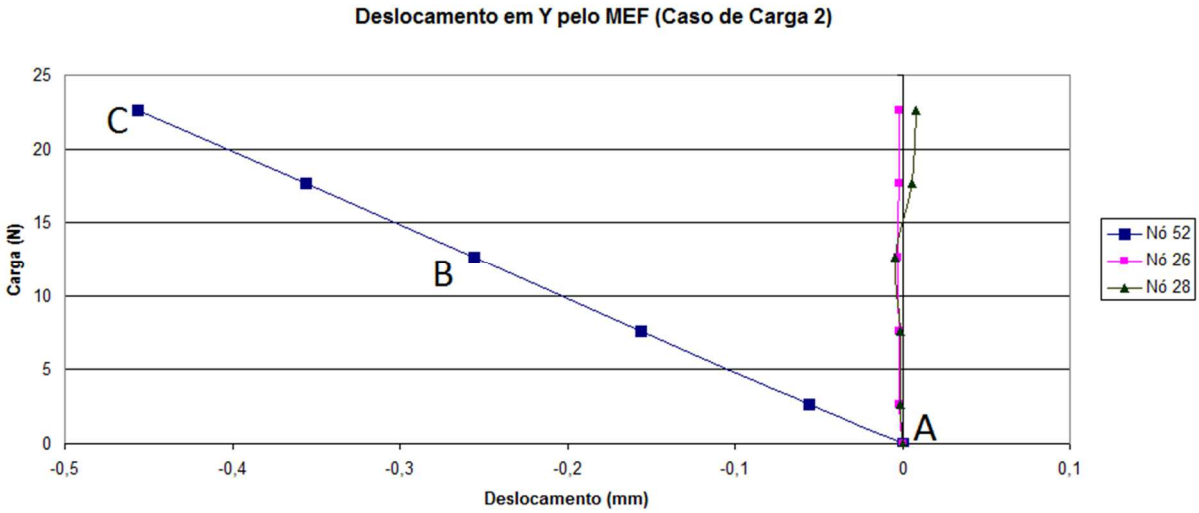


Gráfico 20 – Rigidez para o caso de carga 2 – Ensaio computacional.
Fonte: o autor, 2014.

Rigidez da estrutura - Caso de carga 2 (N/mm)			
	Carga de 0 a 12,64 N	**Carga de 12,64 a 22,64 N**	**Carga de 0 a 22,64 N**
Ensaio experimental	42,13	5,05	9,93
Ensaio computacional	49,38	49,80	49,56

Tabela 22 – Comparação da rigidez ensaio computacional e ensaio experimental – Caso de carga 2.
Fonte: o autor, 2014.

Como o valor da rigidez do modelo experimental e do modelo computacional, para o carregamento de até 12,64 N, ficou próximo um do outro, será feita uma tentativa de aproximar os resultados ainda mais. Dessa forma foi alterado o valor do módulo de elasticidade do material no modelo computacional. Primeiro, o valor do módulo de elasticidade foi diminuído para 56,0 GPa (uma diminuição de 20%) e na sequência foi diminuído para 59,5 GPa (uma redução de 15%). Essas reduções no valor do módulo de elasticidade são justificadas pelo fato de haver imperfeições no modelo físico que o modelo computacional não é capaz de simular. Os valores de deslocamento para cada um dos ensaios computacionais com as reduções no módulo de elasticidade podem ser observados na Tabela 23.

Deslocamentos em Y no nó 52 (mm) - Modelo computacional ajustado. Caso de carga 2 (mm)			
Carga (N)	**2,64**	**7,64**	**12,64**
Nó 52 - Modelo de elasticidade 20% menor	-0,0697	-0,193	-0,3163
Nó 52 - Modelo de elasticidade 15% menor	-0,0656	-0,187	-0,2977
Nó 52 - modelo computacional original	-0,056	-0,156	-0,256
Nó 52 - modelo físico	-0,05	-0,18	-0,3

Tabela 23 – Deslocamentos após ajuste no modelo computacional - Caso de carga 2.
Fonte: o autor, 2014.

Rigidez Estrutural - Caso de carga 2 (N/mm) Modelo computacional			
	Carga de 0 a 12,64 N	**Carga de 12,64 a 22,64 N**	**Carga de 0 a 22,64 N**
Ensaio experimental	42,13	5,05	9,93
Ensaio computacional	49,38	49,80	49,56
Ensaio computacional redução de 15% no módulo de elasticidade	42,46	43,10	42,74
Ensaio computacional redução de 20% no módulo de elasticidade	39,96	41,03	40,43

Tabela 24 – Comparação da rigidez após o ajuste do módulo de elasticidade do modelo computacional – Caso de Carga 2.
Fonte: o autor, 2014.

Na Tabela 24 pode-se observar que a redução de 20% e de 15% do valor do módulo de elasticidade do material no modelo computacional, representou uma aproximação dos resultados computacionais com os resultados do modelo físico, para o carregamento de 12,64 N. Mas o resultado mais próximo do ensaio físico foi com uma redução de 15% no módulo de elasticidade do modelo computacional.

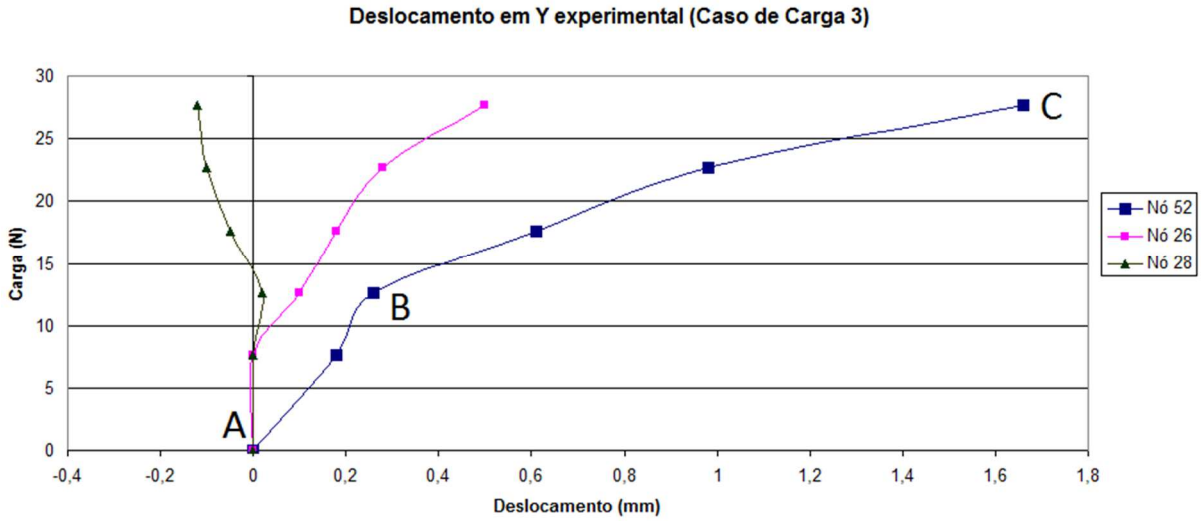


Gráfico 21 - Cálculo da rigidez – Caso de carga 3 - Ensaio experimental.
Fonte: o autor, 2014.

Considerando agora o caso de carga 3, no qual aplica-se a mesma força que no caso de carga 2 somente mudando o sentido, também é possível identificar duas rigidezes diferentes. Uma representada pela reta AB (cargas até 12,64 N) e outra pela

reta BC (cargas superiores a 12,64 N), situação ilustrada no Gráfico 21, as respectivas rigidezes podem ser observadas na Tabela 25.

Rigidez estrutural - Caso de carga 3			
	Carga de 0 a 12,64 N	**Carga de 12,64 a 27,64 N**	**Carga de 0 a 27,64 N**
Ensaio experimental	48,62	10,71	16,65
Ensaio computacional	52,67	49,67	51,00

Tabela 25 - Comparação da rigidez ensaio computacional e ensaio experimental – Caso de carga 3.
Fonte: o autor, 2014.

Analisando as rigidezes na Tabela 25 é possível concluir que, os valores das rigidezes, experimental e computacional, para a carga de até 12,64 N, estão bem próximos. Os valores das rigidezes, computacional e experimental, para as cargas acima de 12,64 N estão bastante divergentes, assim como o valor das rigidezes para todo os estágios de carga.

Dessa forma serão feitos ajustes no módulo de elasticidade do material do modelo computacional, para que ocorra uma convergência entre o valor da rigidez computacional com o valor rigidez experimental. Serão feitas três reduções no módulo de elasticidade, 5%, 15% e 20%. Com os novos valores do módulo de elasticidade, será avaliada novamente a rigidez do modelo computacional. Essa nova análise da rigidez será feita considerando o carregamento até 12,64 N. Na Tabela 26 são apresentados os deslocamentos em milímetros para o nó 52, do modelo físico, do modelo computacional com o módulo de elasticidade original e para os ensaios computacionais com os valores do módulo de elasticidade reduzido.

Deslocamentos em Y (mm) - Caso de carga 3		
Carga (N)	7,64	12,64
Nó 52 - Modelo físico	0,18	0,26
Nó 52 - Modelo computacional original	0,14	0,24
Nó 52 - Modelo de elasticidade 5% menor	0,1547	0,258
Nó 52 - Modelo de elasticidade 15% menor	0,1729	0,2889
Nó 52 - Modelo de elasticidade 20% menor	0,1837	0,306

Tabela 26 – Deslocamentos após ajuste no modelo computacional - Caso de carga 3.
Fonte: o autor, 2014.

Rigidez da estrutura - Caso de carga 3	
	Carga de 0 a 12,64 N
Ensaio experimental	48,62
Ensaio computacional	52,67
Ensaio computacional redução de 5% no módulo de elasticidade	48,99
Ensaio computacional redução de 15% no módulo de elasticidade	43,75
Ensaio computacional redução de 20% no módulo de elasticidade	41,31

Tabela 27 – Comparação da rigidez após o ajuste do módulo de elasticidade do modelo computacional – Caso de Carga 3.
Fonte: o autor, 2014.

Na Tabela 27 são apresentados os valores das rigidezes em N/mm para o ensaio experimental, ensaio computacional com módulo de elasticidade original e o ensaio computacional com os valores de módulo de elasticidade reduzido. Pode-se observar que uma redução de 5% no valor do módulo de elasticidade, redução para 66,5 Gpa, é o suficiente para que o valor da rigidez fique muito próximo ao valor da rigidez do ensaio experimental.

6.2 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DINÂMICOS

O resultado da primeira frequência ressonante para o ensaio dinâmico do modelo físico foi de 108,25 Hz, para o ensaio computacional (MCC) foi de 118,93 Hz. Assim como no ensaio estático, será feita uma redução no módulo de elasticidade do material do modelo computacional em uma tentativa de aproximar os valores do ensaio físico e do ensaio computacional.

Com uma redução de 15% no modulo de elasticidade, o valor da primeira frequência ressonante foi de 110,95 Hz, e com uma redução de 20% o valor da primeira frequência ressonante foi de 107,93 Hz. Valor muito próximo ao encontrado modelo físico.

7 CONCLUSÃO

Para a execução deste trabalho foi construído um modelo físico de um domo geodésico e foram feitos vários ensaios nesta estrutura, estáticos e dinâmicos. A construção do modelo físico ocorreu no laboratório de dinâmica da PUC-PR e se baseou em uma estrutura usada para cobrir um tanque para armazenamento de gasolina construído na cidade de Araucária, no Paraná. O tanque em que o domo geodésico original foi instalado tem 24m de diâmetro. O projeto do modelo físico foi realizado em escala reduzida, observando-se os conceitos da análise dimensional.

O objetivo geral deste trabalho era promover um melhor entendimento das estruturas do tipo domo geodésicas. Para que isso fosse possível, além do modelo físico foi feito um modelo computacional igual ao modelo físico. Neste modelo computacional foram realizados os mesmos ensaios, dinâmicos e estáticos, que no modelo experimental, permitindo, dessa forma, a comparação dos resultados entre o modelo computacional e o modelo físico.

Foram determinadas, numericamente, as cargas críticas para flambagem local e global, para os 3 casos de carga. Esse levantamento foi feito durante a etapa de projeto, auxiliando na determinação da carga máxima que poderia ser aplicada no modelo físico durante os ensaios estáticos.

As frequências de ressonância e os modos de vibrar foram determinados no modelo computacional e auxiliaram no momento da execução do ensaio físico, pois dessa forma foi possível saber em qual faixa de frequência deveria ser trabalhado no ensaio físico. Para saber em quais locais deveriam ser presos os acelerômetros na estrutura física, foram avaliados os modos de vibrar do modelo computacional. Com essas informações foi ensaiado o modelo físico e foram levantadas as frequências de ressonância do modelo experimental.

Foram calculadas as rigidezes para o ensaio estático do modelo físico e para o ensaio computacional para os casos de carga 2 e 3. Através da comparação da rigidez do modelo computacional com a rigidez do modelo físico feitos ajustes no modelo computacional.

Houveram divergências entre os resultados obtidos no modelo físico e no modelo computacional nos ensaios estático e dinâmico. Não era esperado que os ensaios computacionais e físicos apresentassem exatamente os mesmos resultados. Existem algumas variáveis que o ensaio computacional não é capaz de simular como

por exemplo, o aperto dos parafusos, folga nas ligações ou alguma pequena falha que possa existir no material. Assim o esperado era que o resultado computacional apresentasse uma rigidez maior que o ensaio físico, isso foi constato durante o trabalho.

Existem alguns motivos que podem justificar as divergências encontradas, entre o modelo computacional e modelo físico. Um motivo que pode ter gerado essa divergência é furo das chapas redondas, Figura 56, pois, os furos feitos nessas chapas têm o diâmetro de 1,5mm enquanto a bitola do parafuso é 1,39mm. Essa pequena diferença, que não foi representada no modelo computacional, pode ter gerado uma certa acomodação da estrutura que passou a ocorrer com o aumento da carga, causando um desvio na rigidez do modelo físico e consequentemente a divergência dos resultados entre o modelo físico com o modelo computacional. Outra variável que pode colaborar para a divergência entre os resultados computacionais e experimentais, é o torque aplicado nos parafusos. Foi realizado um reaperto em todos os parafusos da estrutura antes dos ensaios, mas torque não foi controlado para que todos os parafusos recebessem o mesmo aperto. Talvez, se a junção fosse feita com rebites houvesse uma diminuição na diferença de aperto.

Como houve uma divergência entre os resultados computacionais e experimentais foram feitos ajustes no modelo computacional para que essa divergência diminuísse. Esse ajuste foi feito através da redução do módulo de elasticidade do material do modelo computacional. A redução foi feita de forma escalonada houve reduções de 5%, 15% e 20%.

Analisando o ensaio estático, caso de carga 2, uma redução de 15% no módulo de elasticidade representou uma aproximação da rigidez do modelo computacional com o modelo físico muito satisfatória. Com a redução de 15% no módulo de elasticidade o valor da rigidez do modelo computacional para os primeiros estágios de carga foi de 42,46 N/mm e para o modelo físico essa rigidez foi de 42,13 N/mm uma diferença muito pequena. Para o caso de carga 3 esse mesmo artifício foi usado para diminuir a divergência entre o resultado computacional e físico. Mas a redução no valor do módulo de elasticidade para que houvesse a convergência foi menor. Com uma redução de 5% no módulo de elasticidade do modelo computacional a rigidez encontrada foi de 48,99 N/mm e para o ensaio experimental essa rigidez foi de 48,62 N/mm. Todas essas comparações ocorrem com a carga até 12,64 N pois a partir desse valor de carga houve uma mudança na rigidez do modelo físico. Talvez essa

mudança de rigidez tenha ocorrido pelos motivos já expostos, uma acomodação da estrutura em função da diferença do aperto dos parafusos e também devido a folga existente entre o parafuso e o furo no disco de alumínio.

Para os ensaios dinâmicos também precisou ser feito um ajuste no módulo de elasticidade do modelo computacional para que fosse observada a convergência dos valores. Com uma redução de 20% do módulo de elasticidade do material no modelo computacional, as primeiras frequências de ressonância, tanto no modelo físico quanto computacional, ficaram bem próximas. No modelo físico o valor da primeira frequência ressonante foi de 108,25 Hz e com a redução de 20% do módulo de elasticidade o resultado encontrado no modelo computacional foi de 107,93 Hz.

Existem vários trabalhos que podem ser feitos explorando o que as estruturas geodésicas ainda têm a oferecer. Esses futuros trabalhos podem ser, o aproveitamento do modelo físico da estrutura geodésica para o estudo do colapso da mesma, a troca de algumas barras por barras com pequenos defeitos avaliando dessa forma a ocorrência de pequenos defeitos na estrutura e a cobertura do modelo físico para ensaio em túnel de vento. Outra sugestão para futuros trabalhos é o uso de tubo redondo ou quadrado ao invés de cantoneira no projeto do modelo físico. O uso de tubo irá permitir que a fixação dos nós tenha mais similaridade com a estrutura real do que o projeto do modelo físico apresentado neste trabalho. Usar tubo nas barras também irá proporcionar uma possibilidade de se trabalhar melhor os fatores de escala, pois a área da secção transversal do tubo pode ser melhor adequada a área da viga “I” da estrutura original. Existe atualmente uma linha muito forte de pesquisa voltada a otimização de estruturas geodésicas, estudando formas diferentes de gerar essas estruturas. Quando procura-se leituras sobre estruturas geodésicas um assunto bastante encontrado são as *tensegrity structures*. As *tensegrity structures* são um grupo de estruturas na qual os domos geodésicos fazem parte e o estudo desse tipo de estruturas e sua otimização estão em evidência.

REFERÊNCIAS

API-650 : 2007. Norma para construção de tanques publicada pela American Petroleum Institute.

ALCOA, Aluminum Research Laboratory, New Kensington, USA, 1954.

ANIL, K. Chopra, **Dynamics of strutctures Theory and Applications to Earthquake Engineering**. Califórnia, University of California at Berkeley, 1995.

BAUDRILLER, Haïmad; MAURIN, Bernard. Form-finding of complex tensegrity strutures: application to cell cytoskeleton modeling. **Comptes Rendus Mécanique**, v. 334, n. 11, p. 662-668, nov. 2006.

BTE, Catalogo, BTE. Disponível em: <http://www.baillietank.com/dome.htm> Acesso em: 22 fev. 2014.

BUCKMINSTER Fuller. 2014. Disponível em: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Buckminster_Fuller>. Acesso em: 22 fev. 2014.

BYSIEC, Dominika. **The Investigation of Stability of Double-Layer Octahedron-Based Geodesic Domes.** Faculty of Civil and Environmental Engineering, Kielce, Poland, 2013.

CARNEIRO, Fernando Luiz Lobo B. **Análise dimensional e teoria da semelhança e dos modelos físicos**. Rio de Janeiro: UFRJ, 1993.

CHILTON, John. **Space grid structures**. Oxford: Architetural Press, 2000.

CLINTON, Joseph. Structural Design Concepts for future Space Missions, Progress Report - NASA, 1965.

DINIZ, João Antonio Valle. Estruturas geodésicas: estudos retrospectivas e proposta para um espaço de educação ambiental. 2006. 00 f (143). Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2006.

DOXEY, M. e TRINIDAD M. Aluminium Geodesic Dome Roofs for Both New Tanks and Tank Retrofit Projects. **Materials Forum Volume 30 2006.** Institute of Materials Enginnering Australasia Ltd. 2006.

DROP City. 2014. Disponível em: <http://en.wikipedia.org/wiki/Drop_City>. Acesso em: 22 fev. 2014.

EVES, Howard. **Introdução à história da matemática**. Campinas: Ed. da Unicamp, 2004.

FULLER, Robert Buckminster. **Synergetics, explorations in the geometry of thinking**. Sebastopol, CA, USA: Macmillan Publishing, 1975.

GEODESIC dome. 2014. Disponível em: <http://en.wikipedia.org/wiki/Geodesic_dome>. Acesso em: 22 fev. 2014.

HASANÇEBI, O.; ERDAL, F.; SAKA, M. P. Optimum design of geodesic steel domes under code previsions using metaheuristic techninques. **International Journal of Engineering and Applied Sciences**, v. 2, n. 2, p. 88-103, nov. 2010.

HMT Inc. Geodesic Dome Roof, Catalogo, 2014. Disponível em: <http://www.hmttank.com/> Acesso em: 22 fev. 2014.

JÚNIOR, HERMAS. Projeto de lei 070/12, Assembleia legislativa do Paraná, 2012. Disponível em: http://www.fiepr.org.br/assuntosLegislativos/uploadAddress/70.2012[32257].pdf Acesso em: 09 out. 2014.

KAVEH, A.; TALAHARI, S. Optimal design of Schwedler and ribbed domes via hybrid Big Bang-Big Crunch algorithm. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 66, n. 3, p. 412-419, mar. 2010.

KEN, Lloyd, **Domebook 2**, Estados Unidos, Pacific Domes a nonprofi educational corporation, 1971.

KENNER, Hugh. **Geodesic Math and how to use it**. California, CA, USA: University of California Press, 1976.

KAHN, Lloyd. **Cobijo**. Barcelona: H. Blume Ediciones, 1979.

KRUGER, Paulo Gustavo von et al. Mechanical behavior of a tensegrity dome. **Mechanics Research Communications**, v. 35, n. 7, p. 460,465, oct, 2008. DOI: 10.1016/j.mechrescom.2008.05.007

KUBIK, Marek. **Strutural Analysis of Geodesic Domes**. 2009. 68 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engineering) – Durham University, Durham, 2009.

MAKOWSKI, Z. S. **Analysis, design and construction of braced domes**. Granada: University Surrey, 1984.

MAKOWSKI, Z.S.; Braced Domes Building Specification Oc.

MELO, Ladislao Toger Ticona. Monitoração de modelos físicos reduzidos para investigação do comportamento de estruturas em escala real. 2011. 261 f. Dissertação (mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

Montreal Biosphere Wikipédia. Disponível em: <http://en.wikipedia.org/wiki/Montreal_Biosph%C3%A8re>. Acesso em: 22 fev. 2014.

Nagoya Dome. Disponível em: <http://www.nagoya-dome.co.jp/>. Acesso em: 06 out. 2014.

NBR – 7821 : 1983, Norma brasileira para construção de tanques, publicada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

N-270 : 2008, Norma da Petrobrás sobre a construção de tanques, publicada pela Petrobras.

RAMASWAMY, G. S. **Analysis, design and construction of steel space frames**. Londres: Thomas Telford, 2002.

SAKA, M. P. Optimum topological design of geometrically nonlinear single layer latticed domes using coupled genetic algorihm. Middle East Technical University, Ancara, Turquia, Computer and Structures, apr. 2007.

SÓLIDO Platônico, 2014. Disponível em:

<http://pt.wikipedia.org/wiki/S%C3%B3lido_plat%C3%B3nico>.Acesso em: 25 fev. 2014.

SHIRLEY, W. F. **Geodesic dome analysis**. 1984.131 f. Dissertação (mestrado) – Universidade do Arizona, Tucson, 1984.

SPACESHIP Earth (Epcot). 2014. Disponível em: <http://en.wikipedia.org/wiki/Spaceship_Earth_(Epcot)>. Acesso em: 25 fev. 2014.

TACOMA DOME. **History**. 2014. Disponível em: <http://www.tacomadome.org/history.aspx>. Acesso em: 25 fev. 2014.

YARNALL, Willian. **Dome builders Handbook Number Two**. Philadelphia: Running Press, 1978.

APENDICE A – ANÁLISE DIMENSIONAL.

Neste apêndice é apresentada a análise dimensional realizada para construção do modelo físico do domo geodésico e para poder projetar comportamento do modelo físico na estrutura real. Os conceitos usados neste apêndice estão em *Carneiro (1993)* e *Melo (2011*).

Para calcular o valor de escala geométrica (S_L), divide-se o tamanho do vão livre da estrutura real (24 m) pelo tamanho do vão livre do modelo físico (2 m). A escala geométrica é 12.

Também deve-se calcular a escala do material (S_E), dividindo o módulo de elasticidade do material usado para a estrutura real (68,9 GPa) pelo o módulo de elasticidade do material usado no modelo físico. (70 Gpa). O resultado é 0,98.

Com os valores, da escala geométrica e escala do material, é possível aplicar a equação (2) e a equação (3), calculando os valores de carga e de deslocamentos na estrutura real. Com a aplicação da equação (2) e da equação (3), é possível formar a Tabela 28.

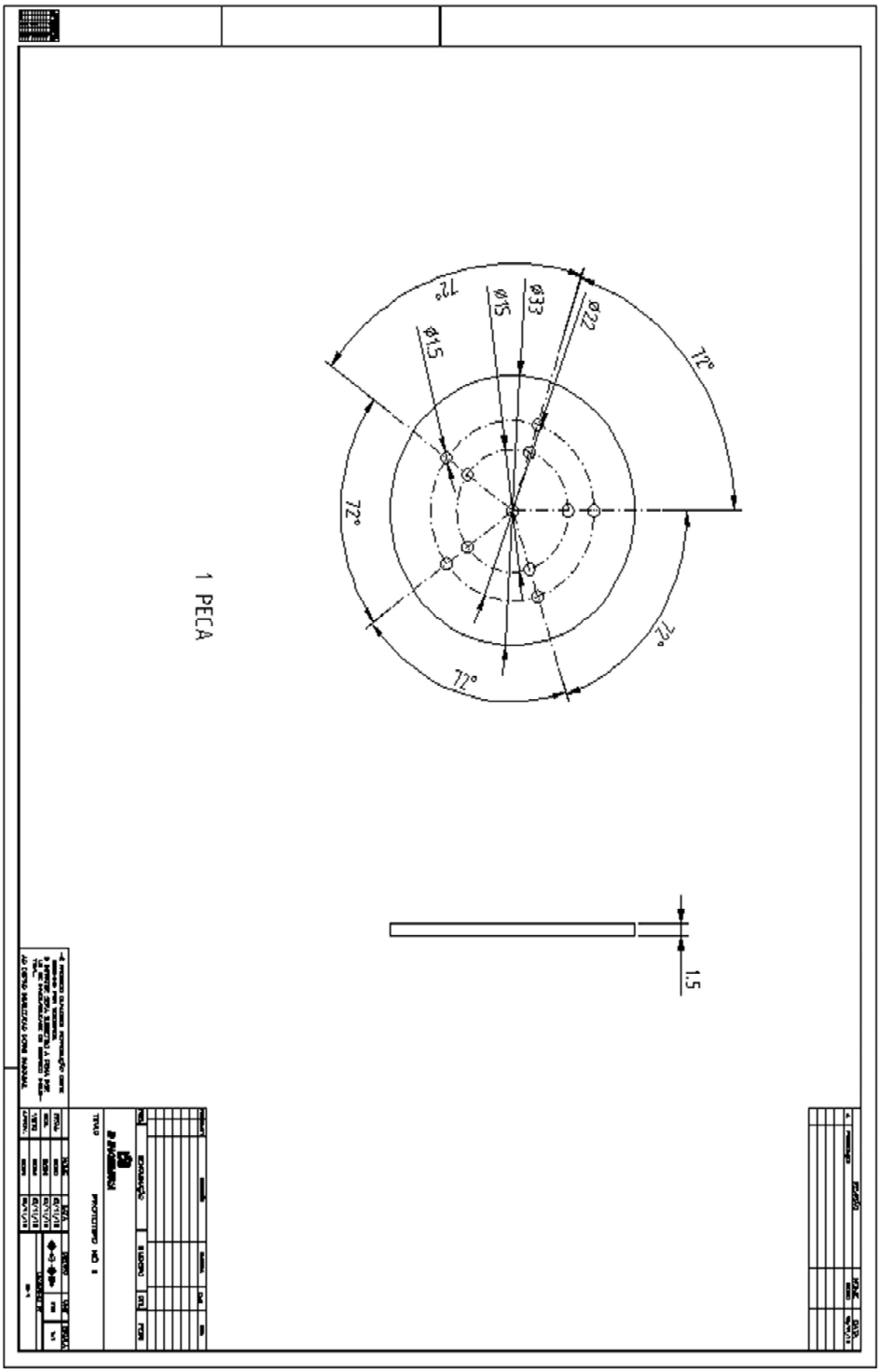
$$P_p = S_E S_L^2 P_m \tag{2}$$

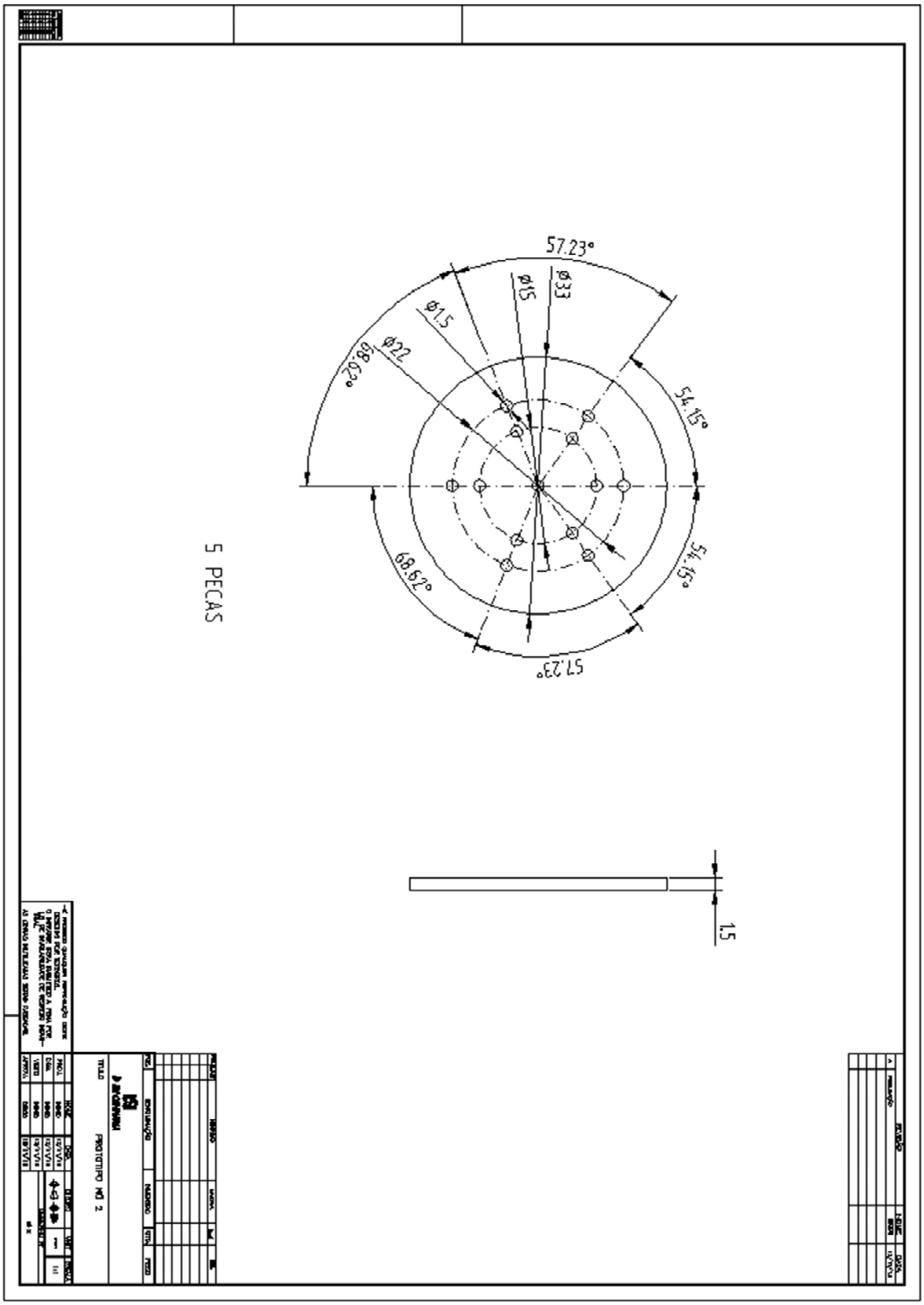
$$\delta_p = \delta_m S_L \tag{3}$$

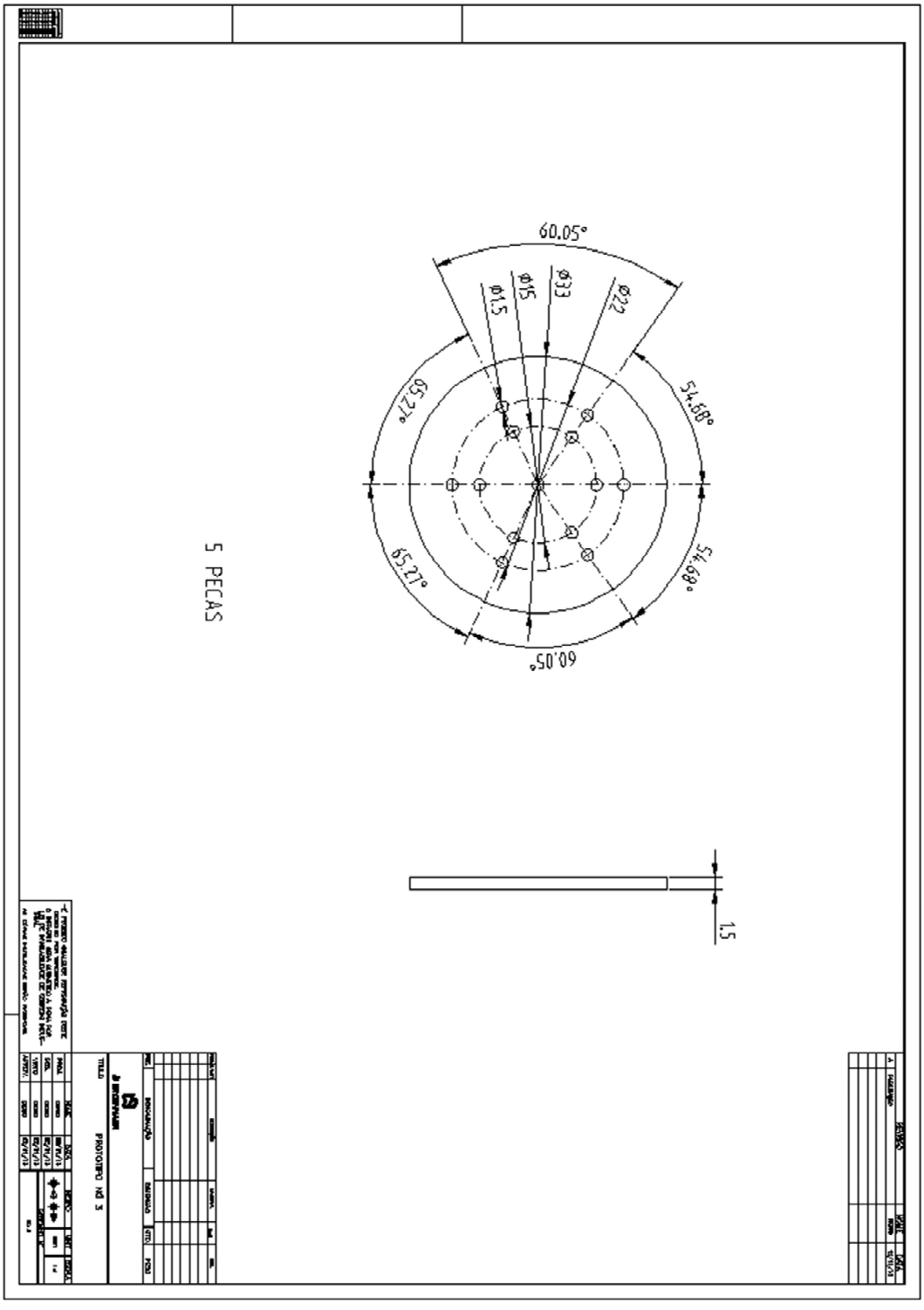
Unidade	Descrição	Estrutura original	Modelo físico	Escala	OBS
m	Comprimento do vão livre	24,00	2,00	12,00	Escala geométrica (Sl)
m	Comprimento da maior barra	5,00	0,44	11,36	Escala geométrica (Sl)
GPa	Módulo de elasticidade	68,90	70,00	0,98	Escala do material (Se)
N	Carga aplicada	708,69	5,00	141,74	Escala da carga (Sq)
N	Carga aplicada	1417,37	10,00	141,74	Escala da carga (Sq)
N	Carga aplicada	2126,06	15,00	141,74	Escala da carga (Sq)
N	Carga aplicada	2834,74	20,00	141,74	Escala da carga (Sq)
N	Carga aplicada	3543,43	25,00	141,74	Escala da carga (Sq)
N	Carga aplicada	4252,11	30,00	141,74	Escala da carga (Sq)
mm	Deslocamento	0,012	0,001	12,00	Escala geométrica (Sl)
mm	Deslocamento	0,6	0,05	12,00	Escala geométrica (Sl)
mm	Deslocamento	0,12	0,01	12,00	Escala geométrica (Sl)
mm	Deslocamento	1,2	0,1	12,00	Escala geométrica (Sl)
mm	Deslocamento	12	1	12,00	Escala geométrica (Sl)
mm	Deslocamento	18	1,5	12,00	Escala geométrica (Sl)

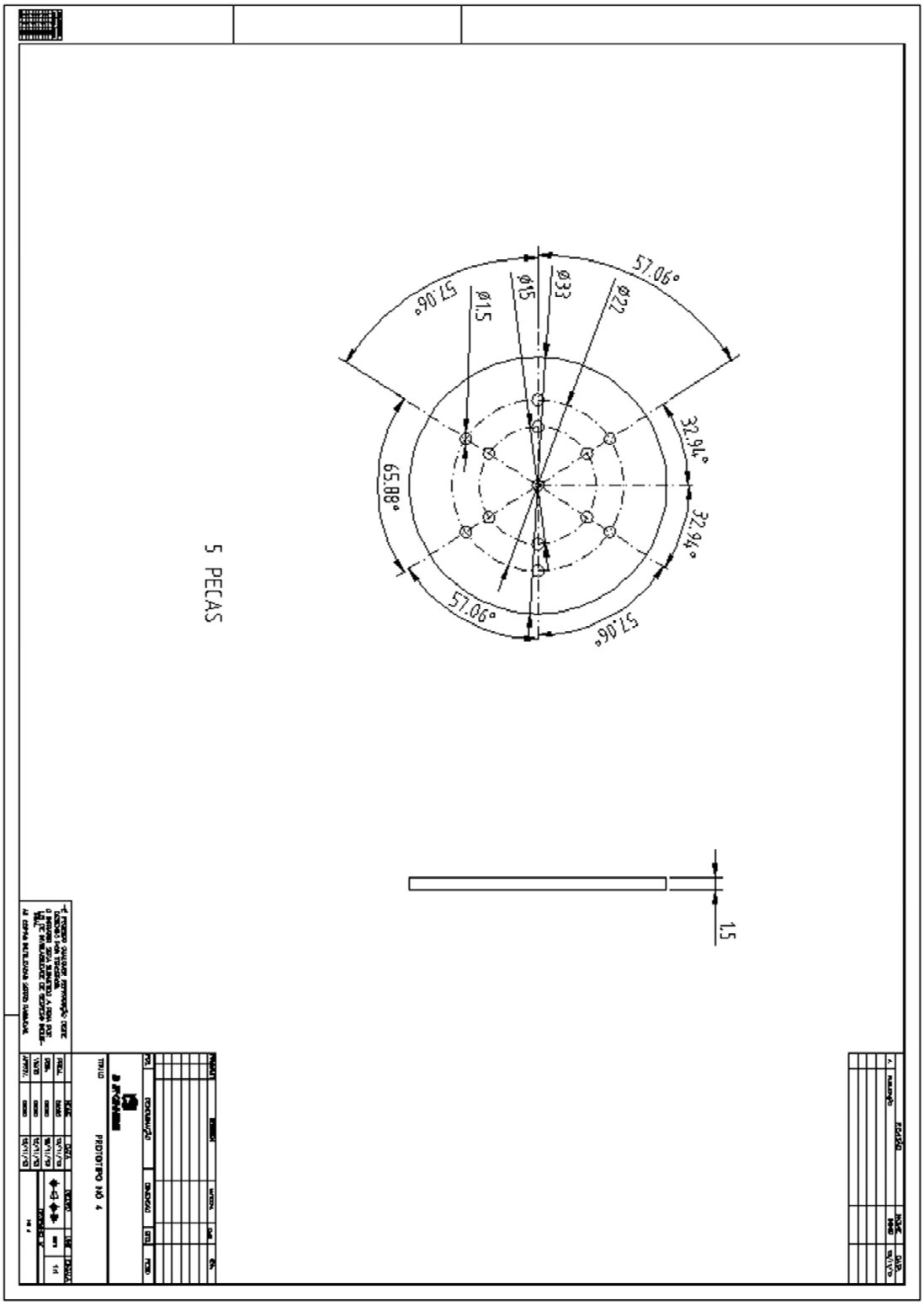
Tabela 28 – Valores de deslocamento para força na estrutura real.
Fonte: o autor, 2014.

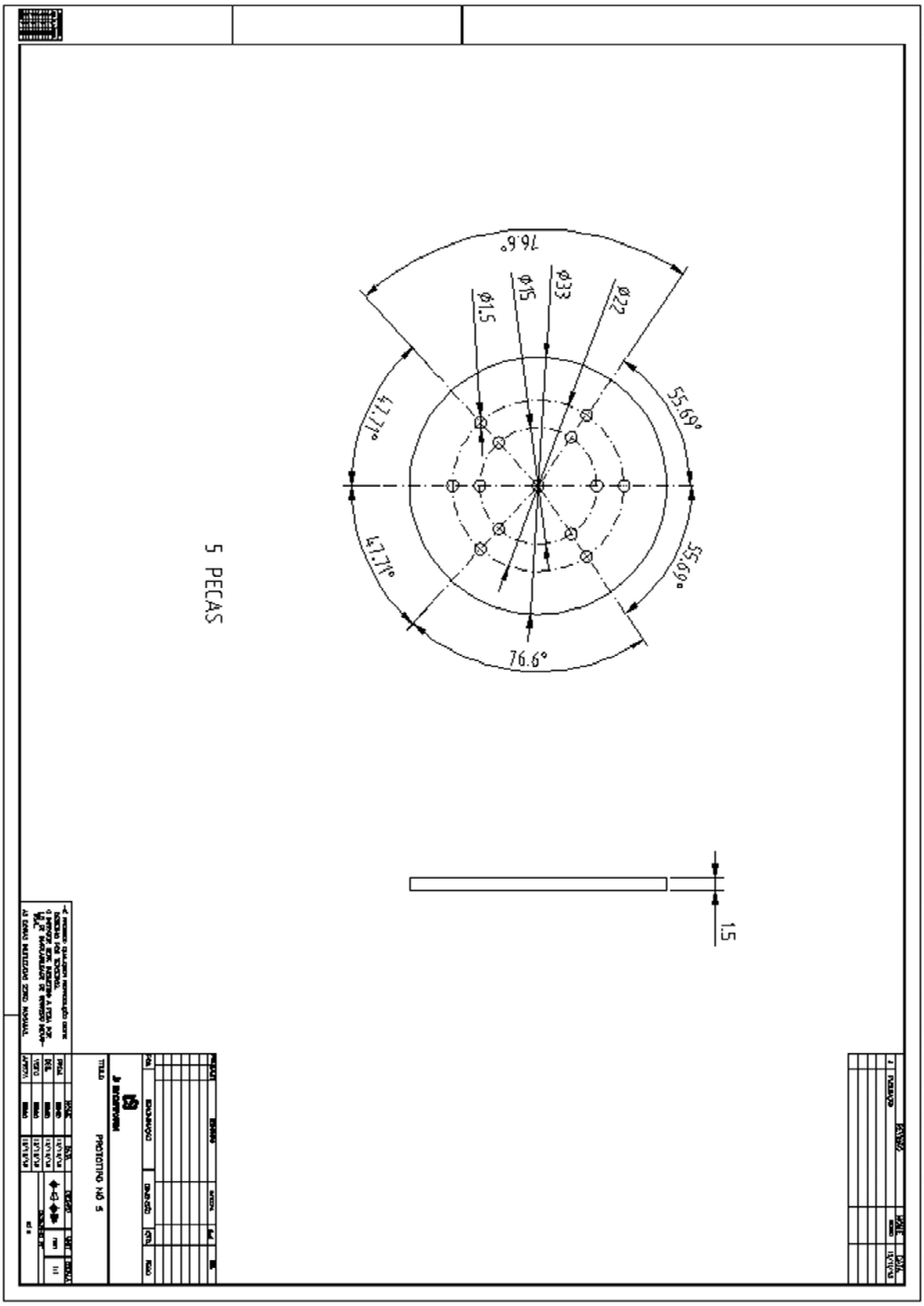
APÊNDICE B – PROJETOS DE FABRICAÇÃO

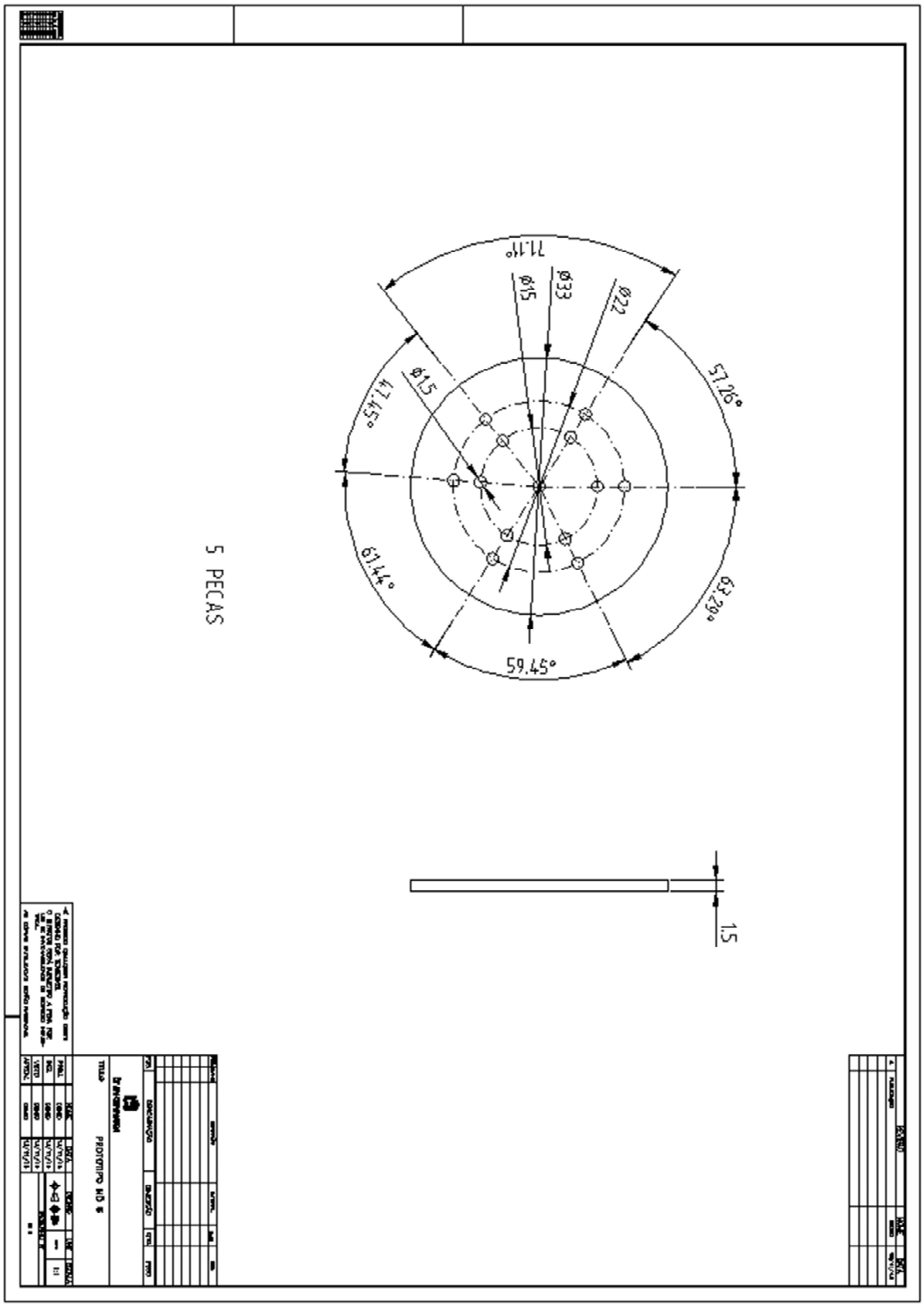


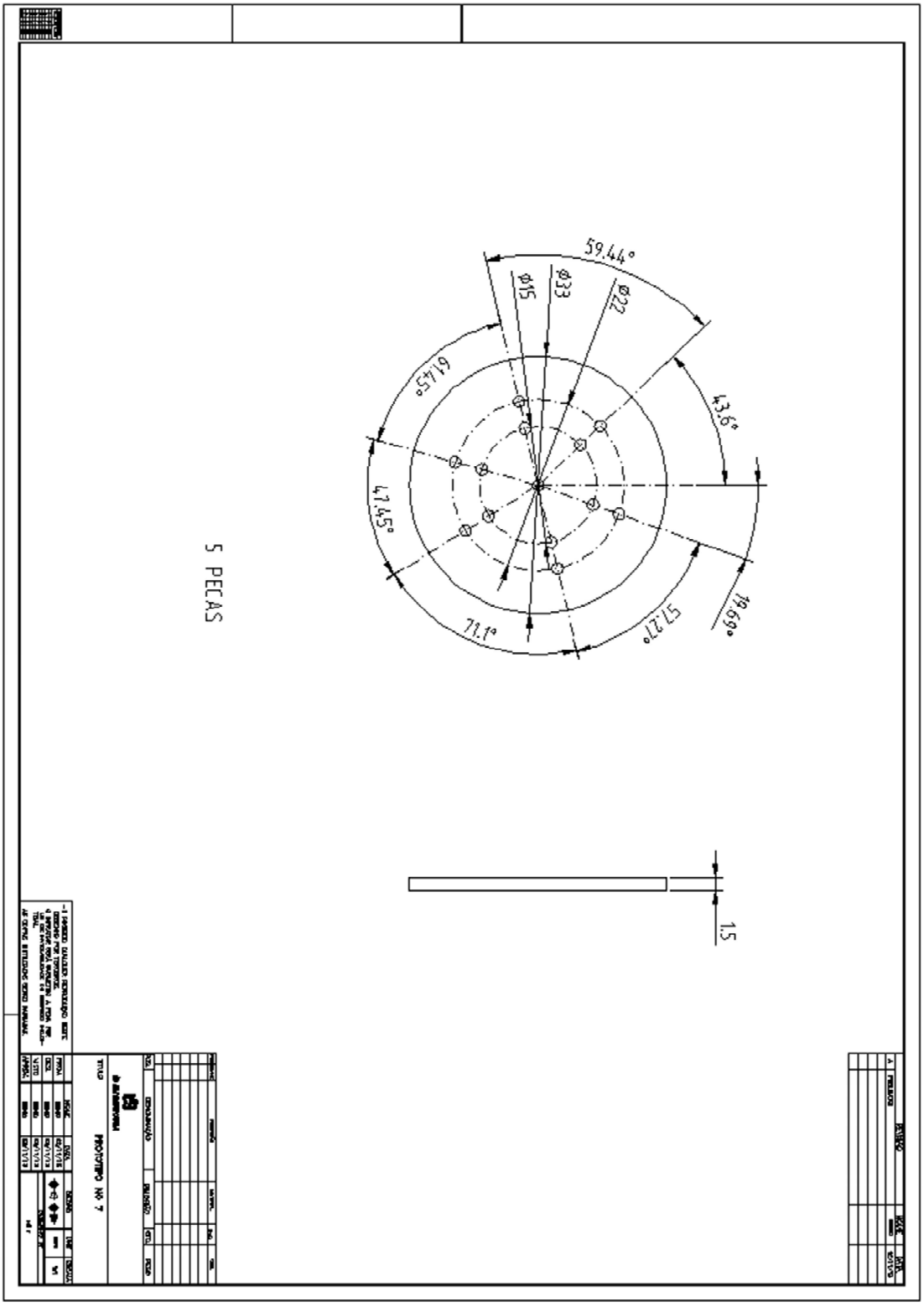

57.23°
Ø33
Ø15
Ø15
Ø22
68.62°
54.15°
54.15°
68.62°
57.23°
5 PECAS
1.5
PROTOTIPO Nº 2

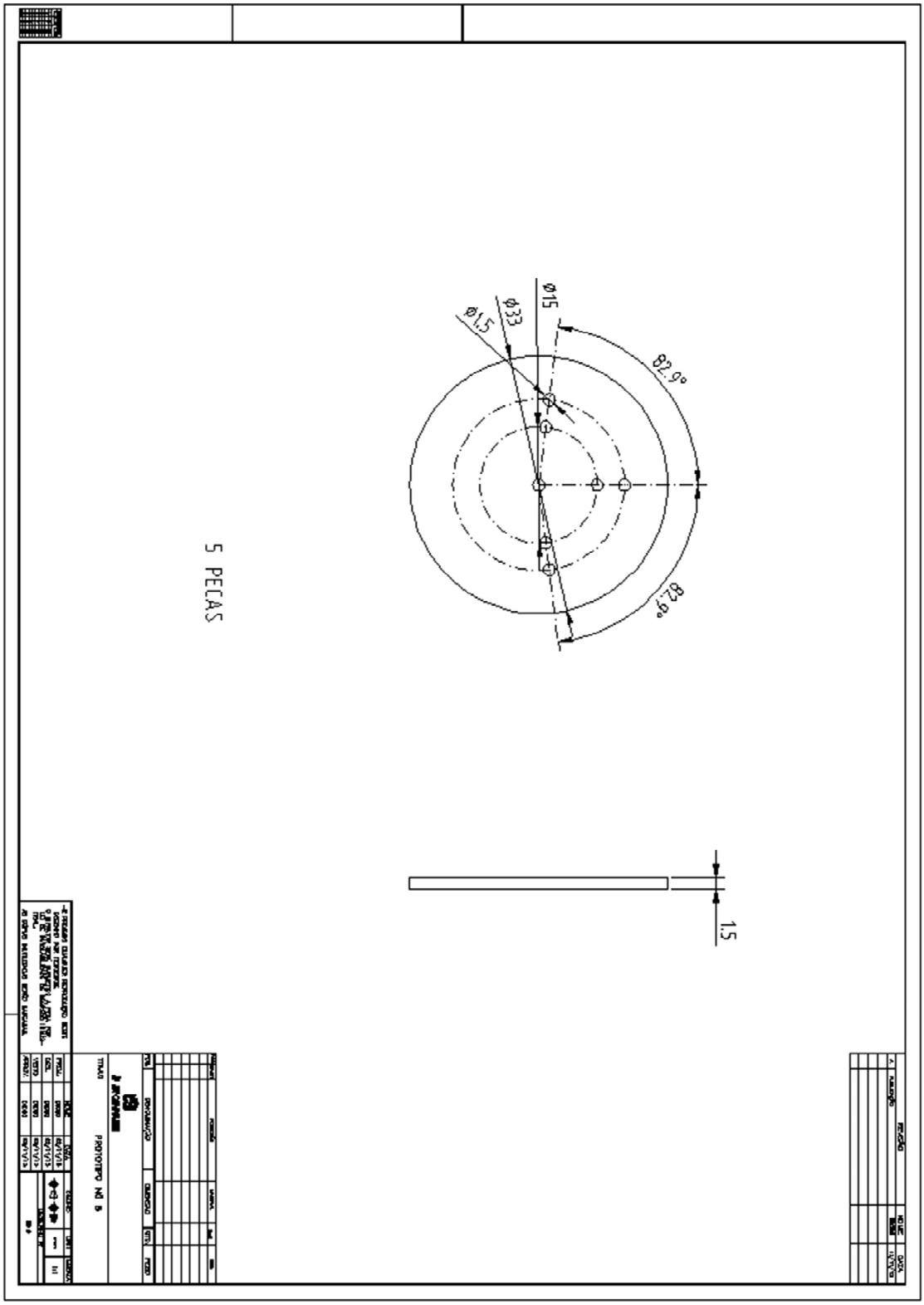

60.05°
Ø33
Ø22
Ø15
Ø1.5
65.27°
54.68°
5 PEÇAS
1.5
PROTOTIPO Nº 3

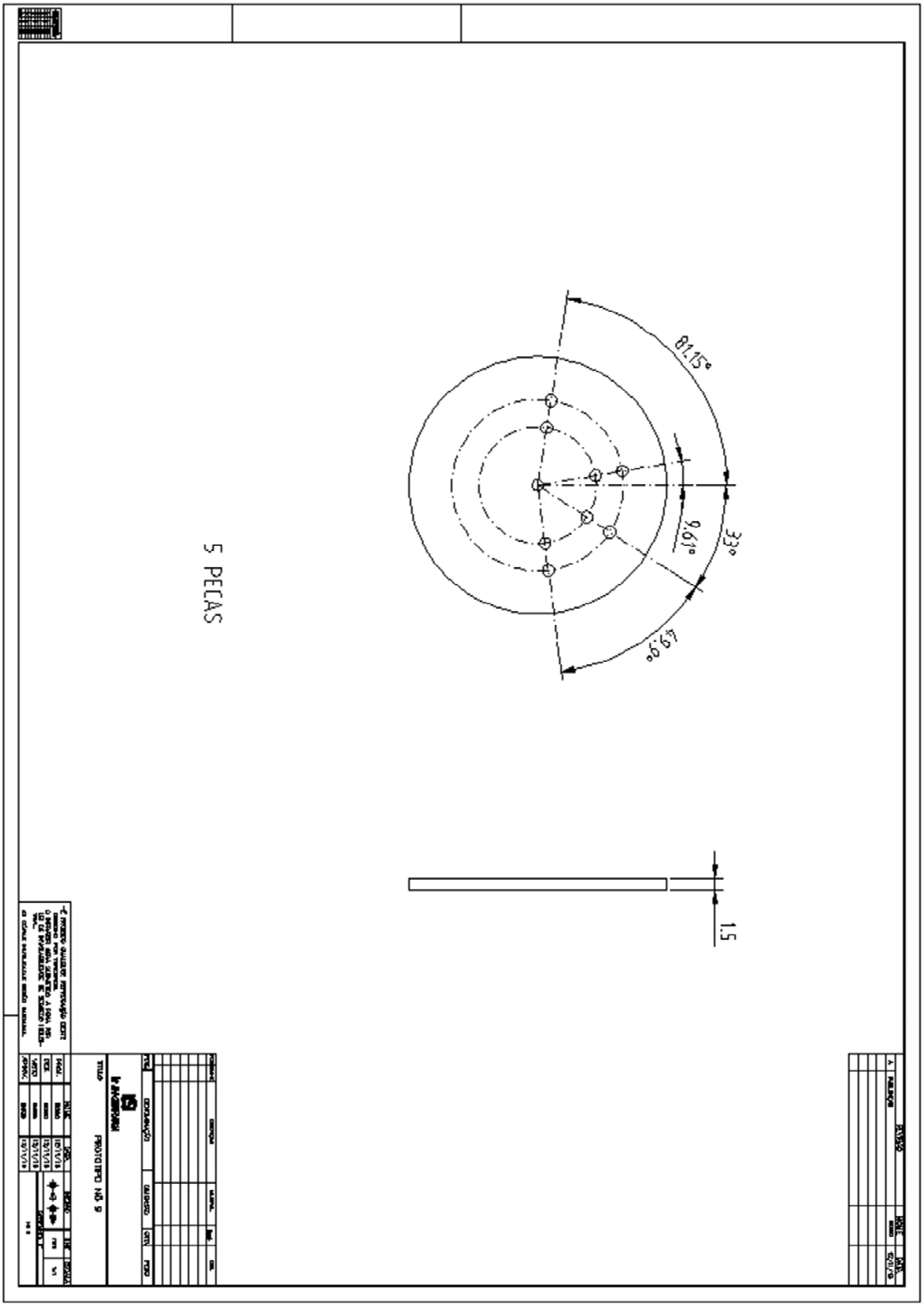

57.06°
Ø33
Ø22
Ø15
Ø1.5
57.06°
32.94°
65.88°
32.94°
57.06°
57.06°
5 PEÇAS
1.5

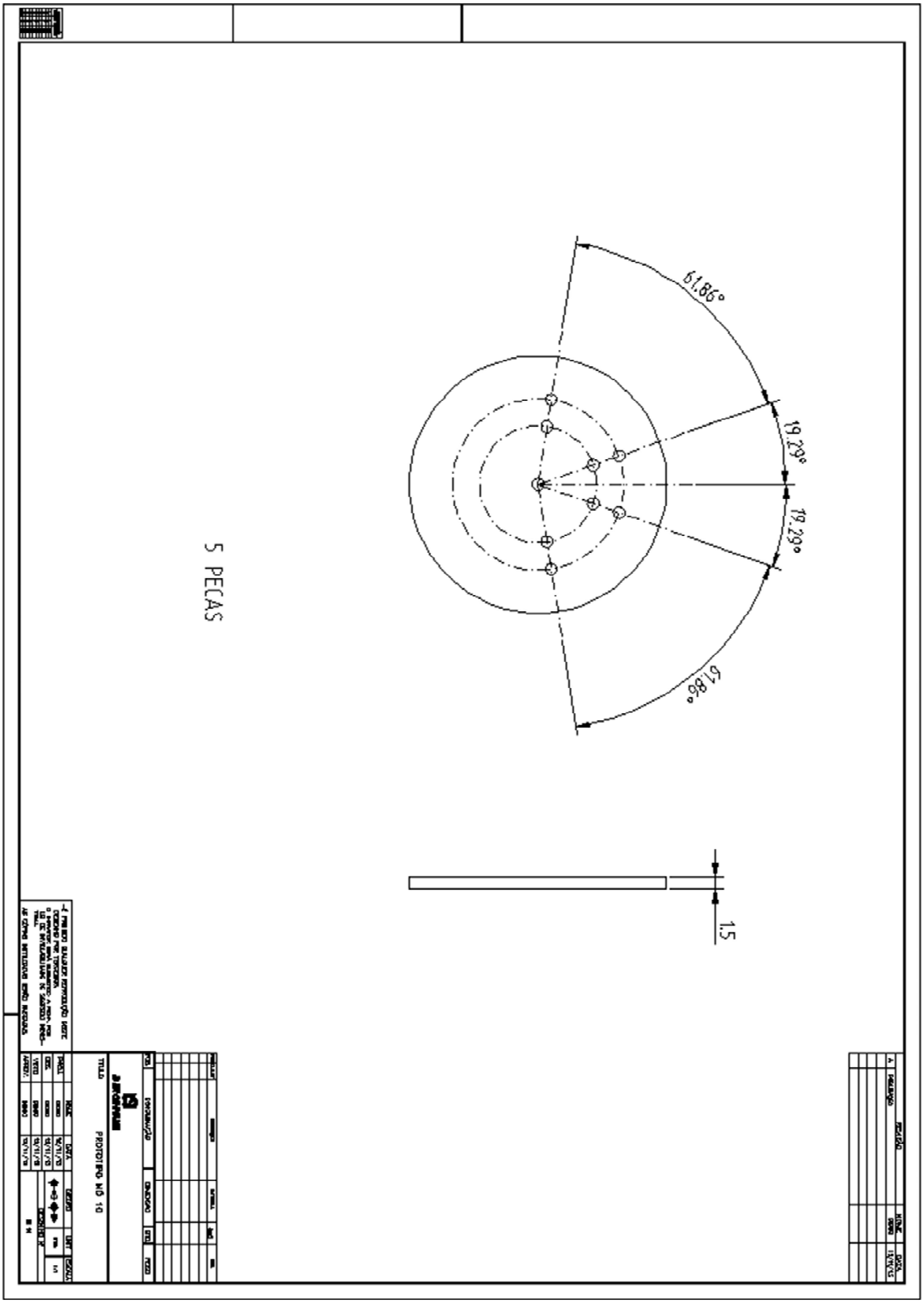

76.6°
Ø33
Ø15
Ø1.5
Ø22
55.69°
41.71°
41.71°
55.69°
76.6°
5 PEÇAS
1.5

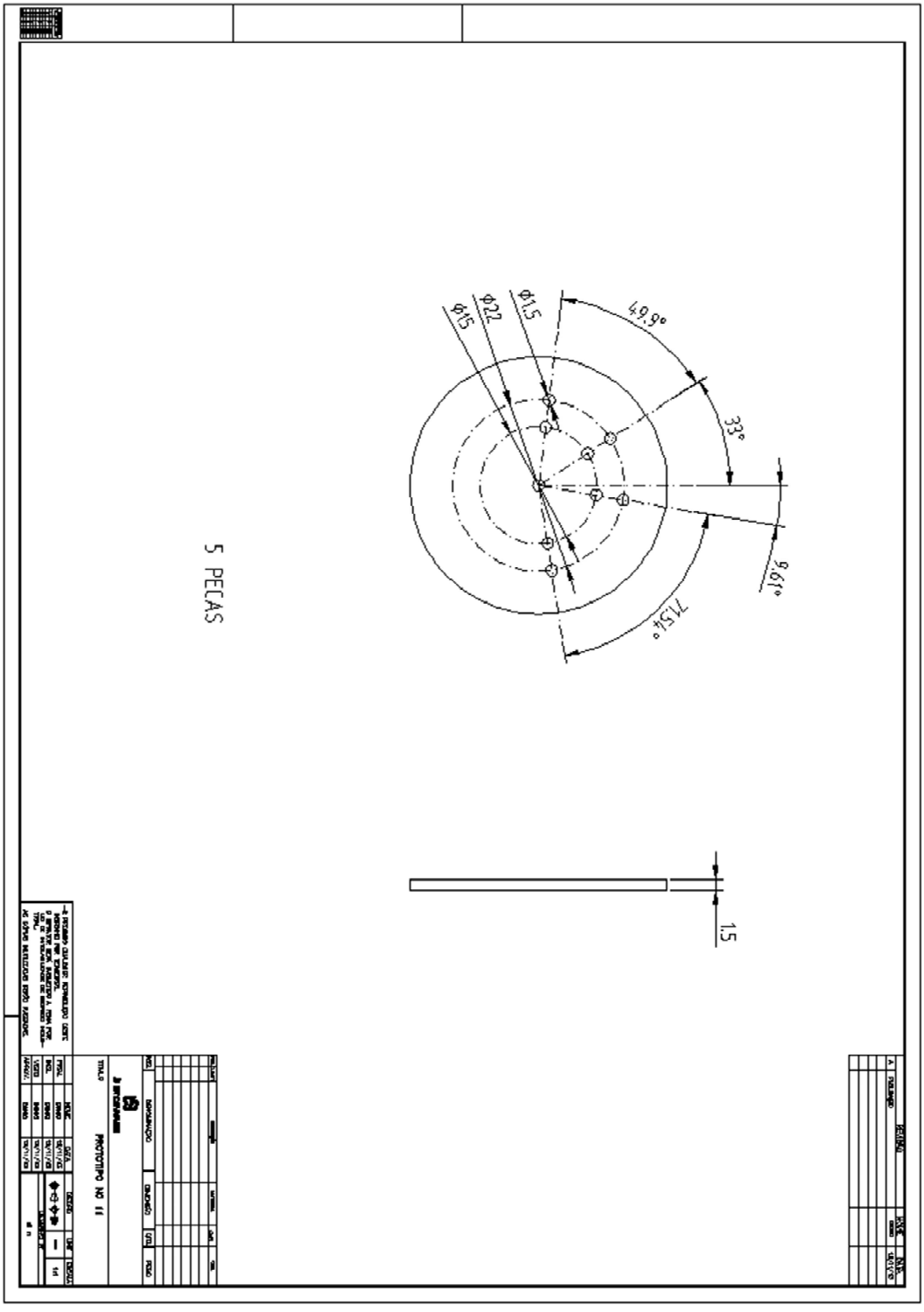

71.11°
Ø15
Ø33
Ø22
57.26°
Ø15
61.45°
61.44°
59.45°
53.29°
5 PEÇAS
1.5

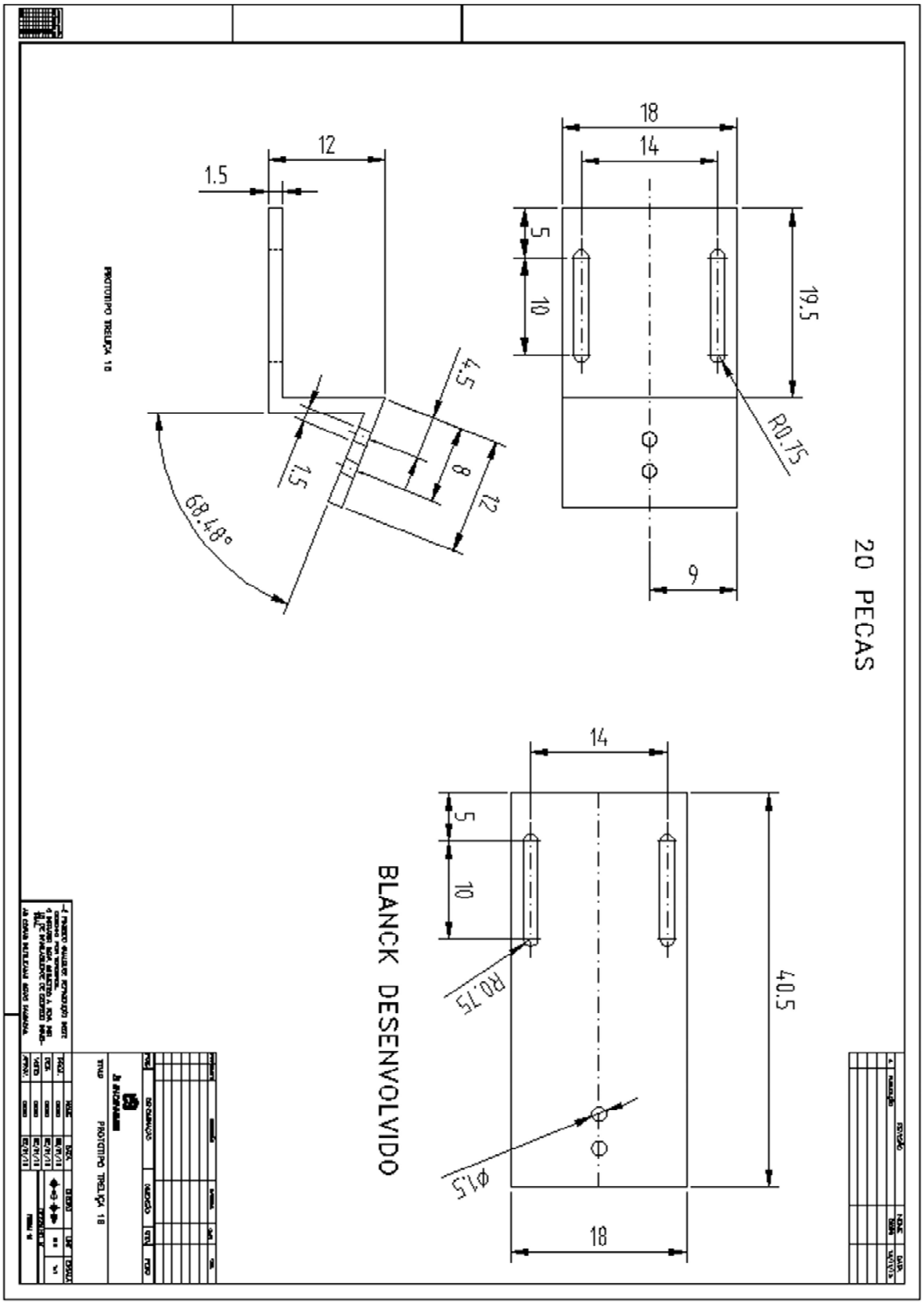

59.44°
Ø15
Ø33
Ø22
61.5°
43.6°
47.45°
71.1°
57.27°
19.69°
5 PEÇAS
1.5

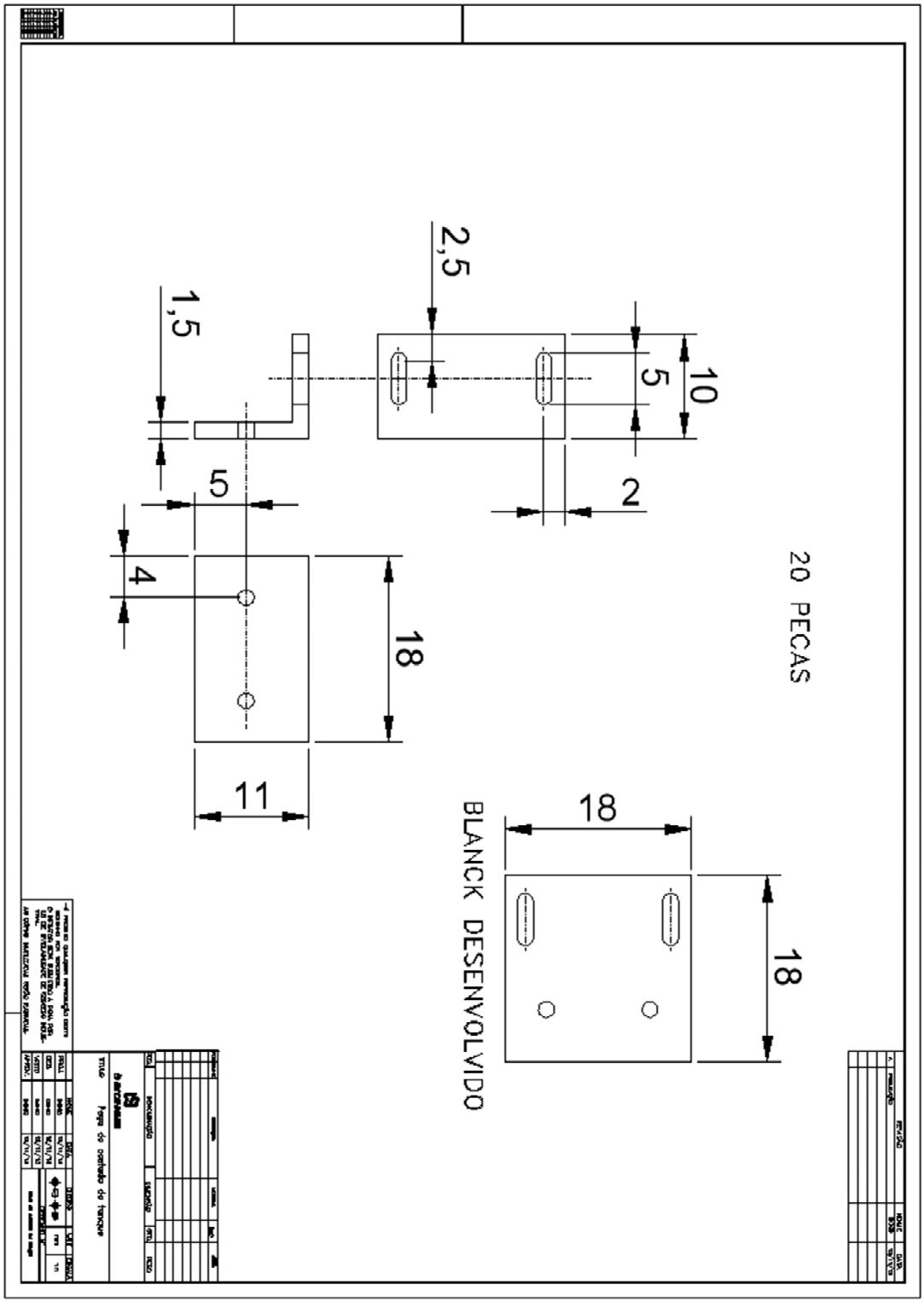

Ø15
Ø33
Ø1,5
82,9°
82,9°
1,5
5 PEÇAS
PROTOTIPO Nº 5

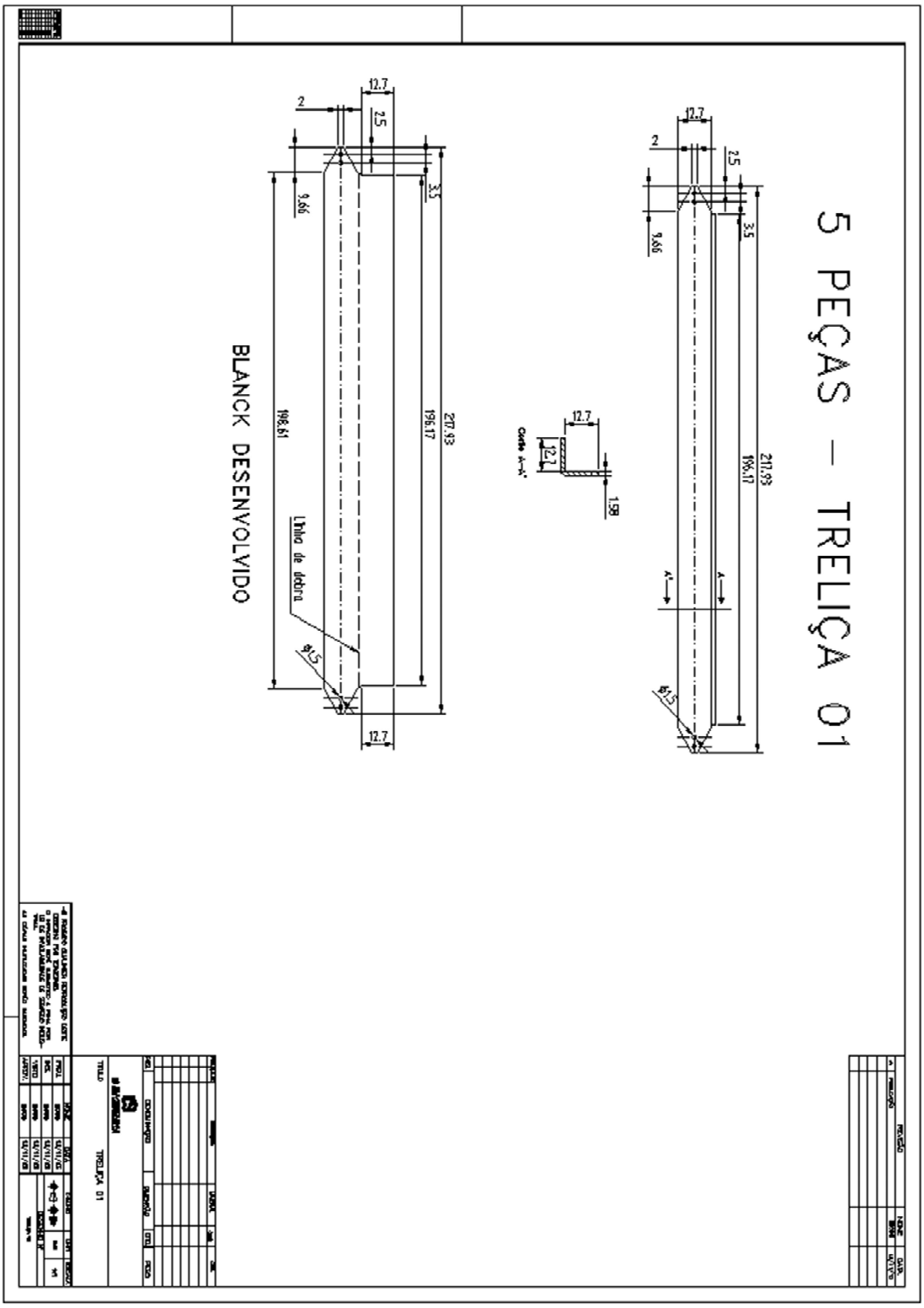

81,15°
9,61°
33°
49,96°
1,5
5 PEÇAS

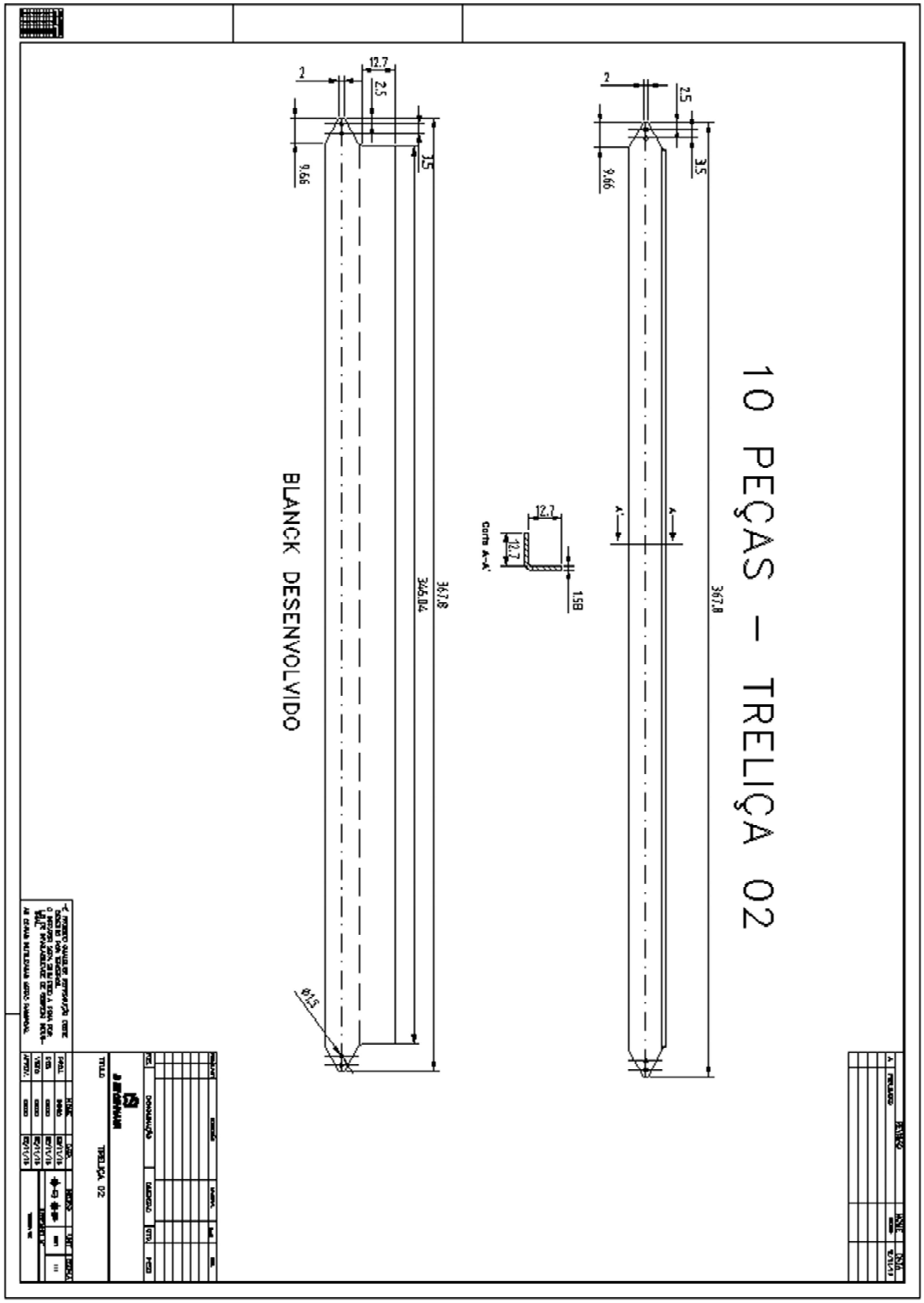

61,86°
19,29°
19,29°
61,86°
1,5
5 PEÇAS

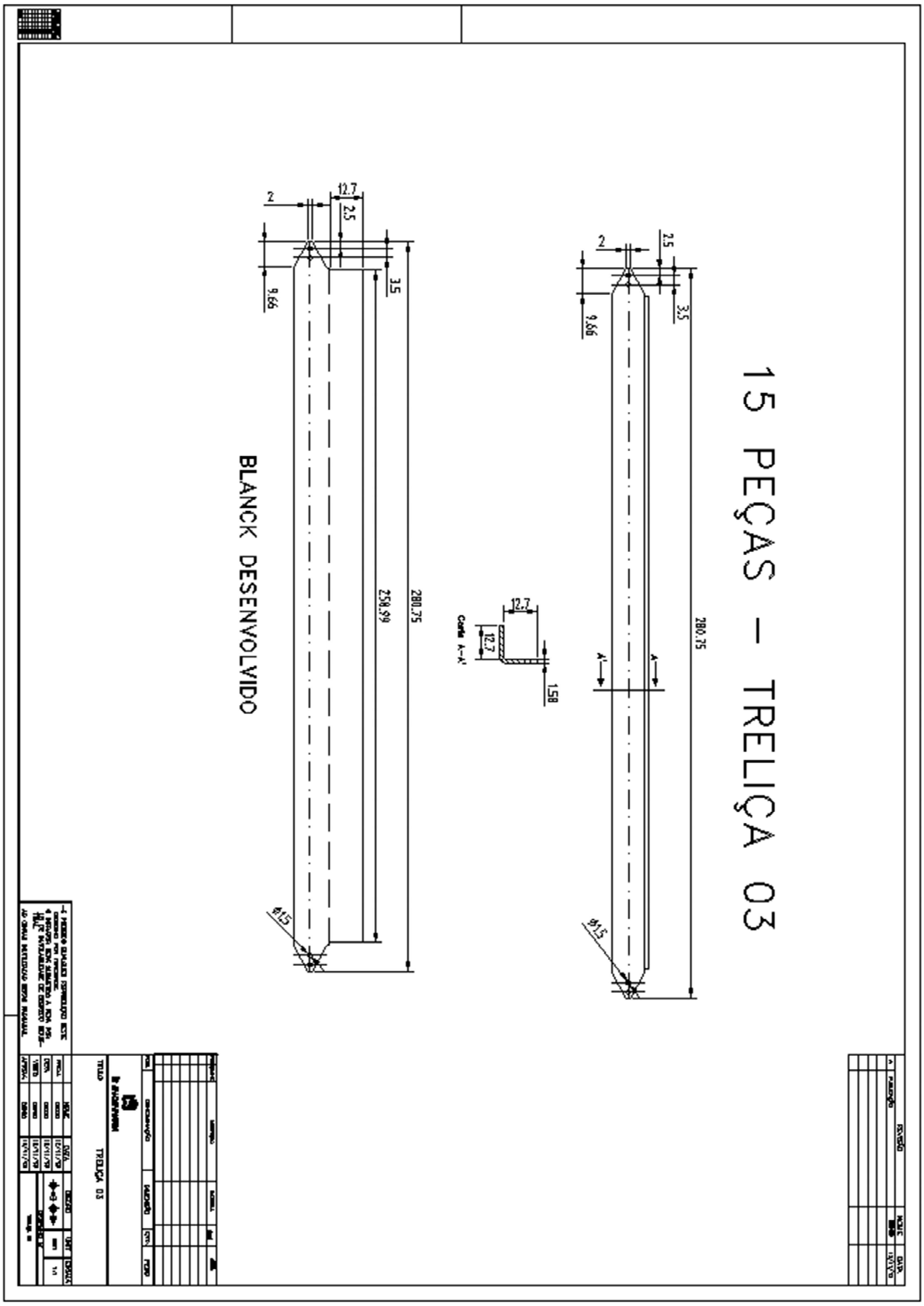

Φ15
Φ22
Φ1.5
49.9°
33°
9.61°
77.54°
5 PEÇAS
1.5

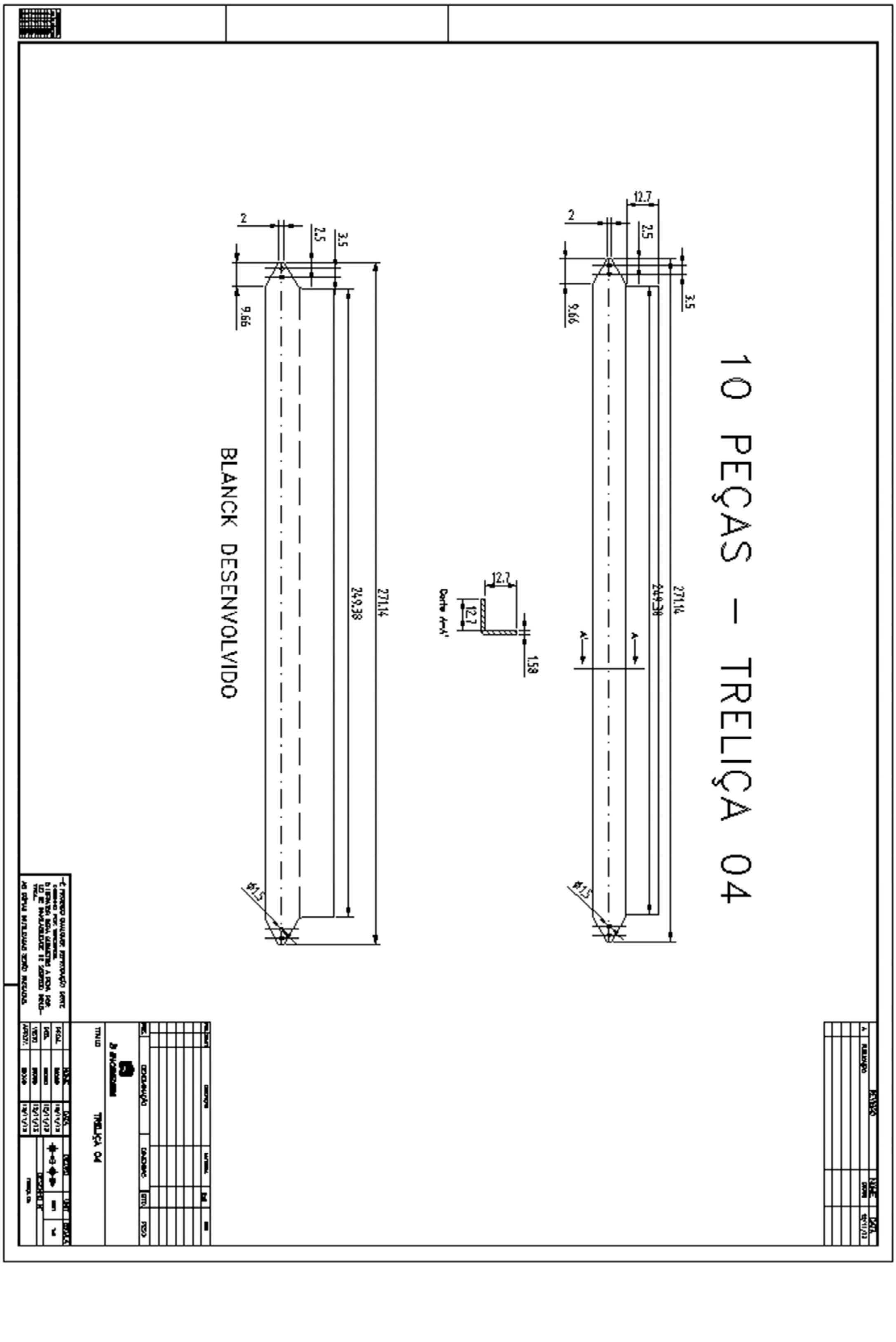

20 PECAS
BLANCK DESENVOLVIDO
PROTOTIPO TRELIÇA 1 0
18
14
5
10
19.5
R0.75
9
12
1.5
4.5
8
1.5
68.48°
14
5
10
R0.75
40.5
ø15
18

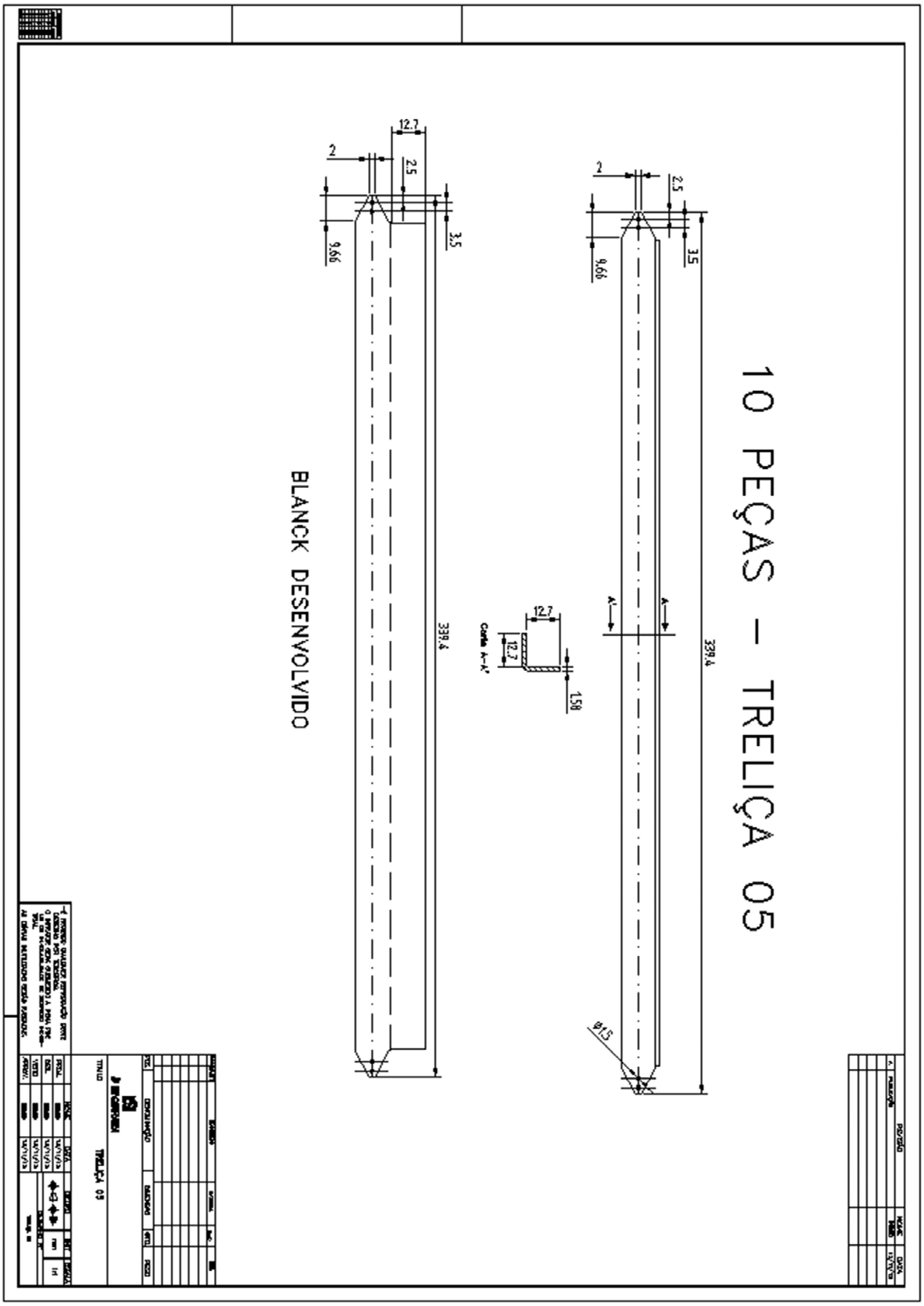

2,5
1,5
10
5
2
5
4
18
11
20 PECAS
18
18
BLANCK DESENVOLVIDO

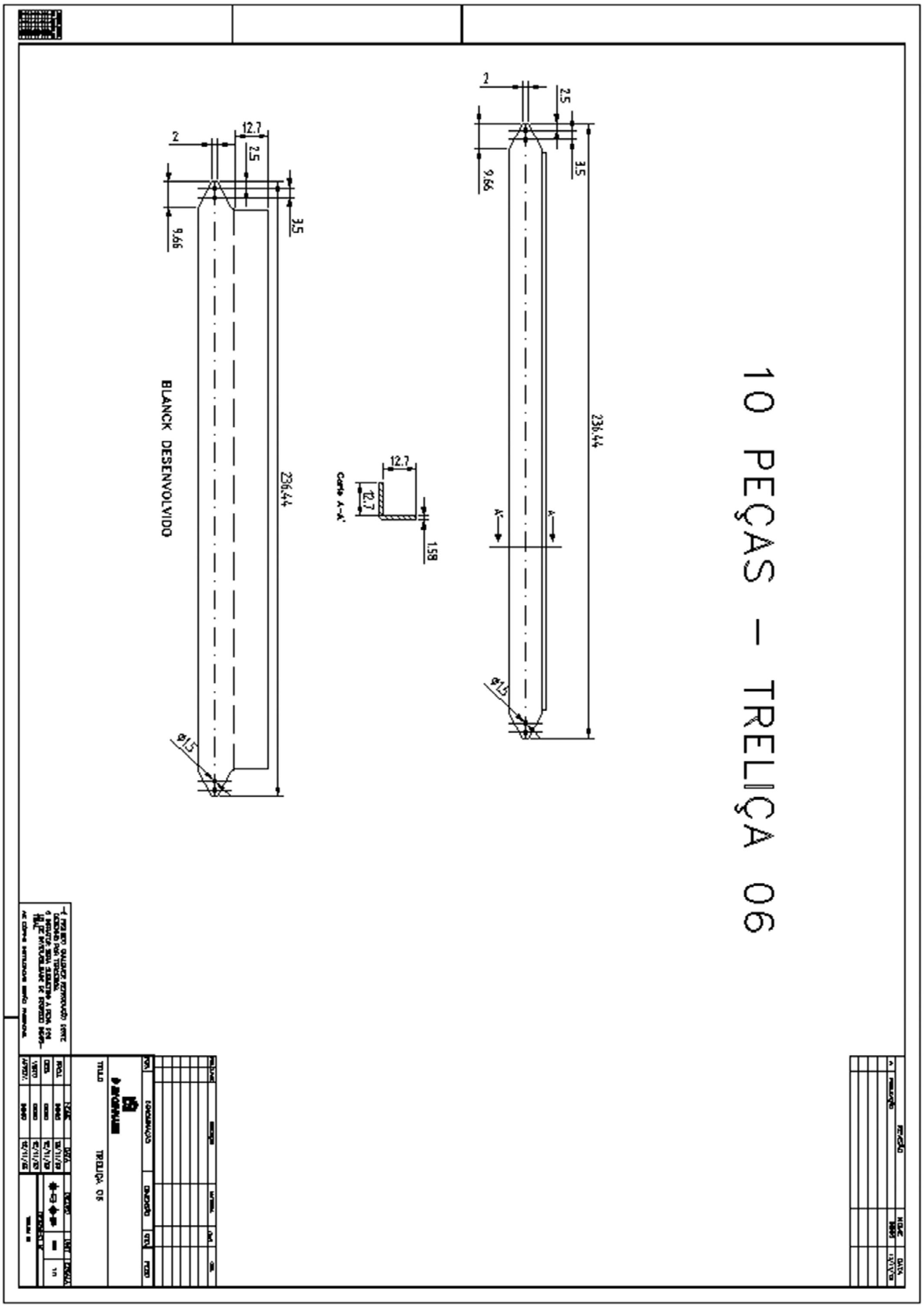

5 PEÇAS – TRELIÇA 01
BLANCK DESENVOLVIDO
12.7
2
2.5
3.5
9.66
217.93
196.17
198.61
Linha de dobra
1.58
TRELIÇA 01

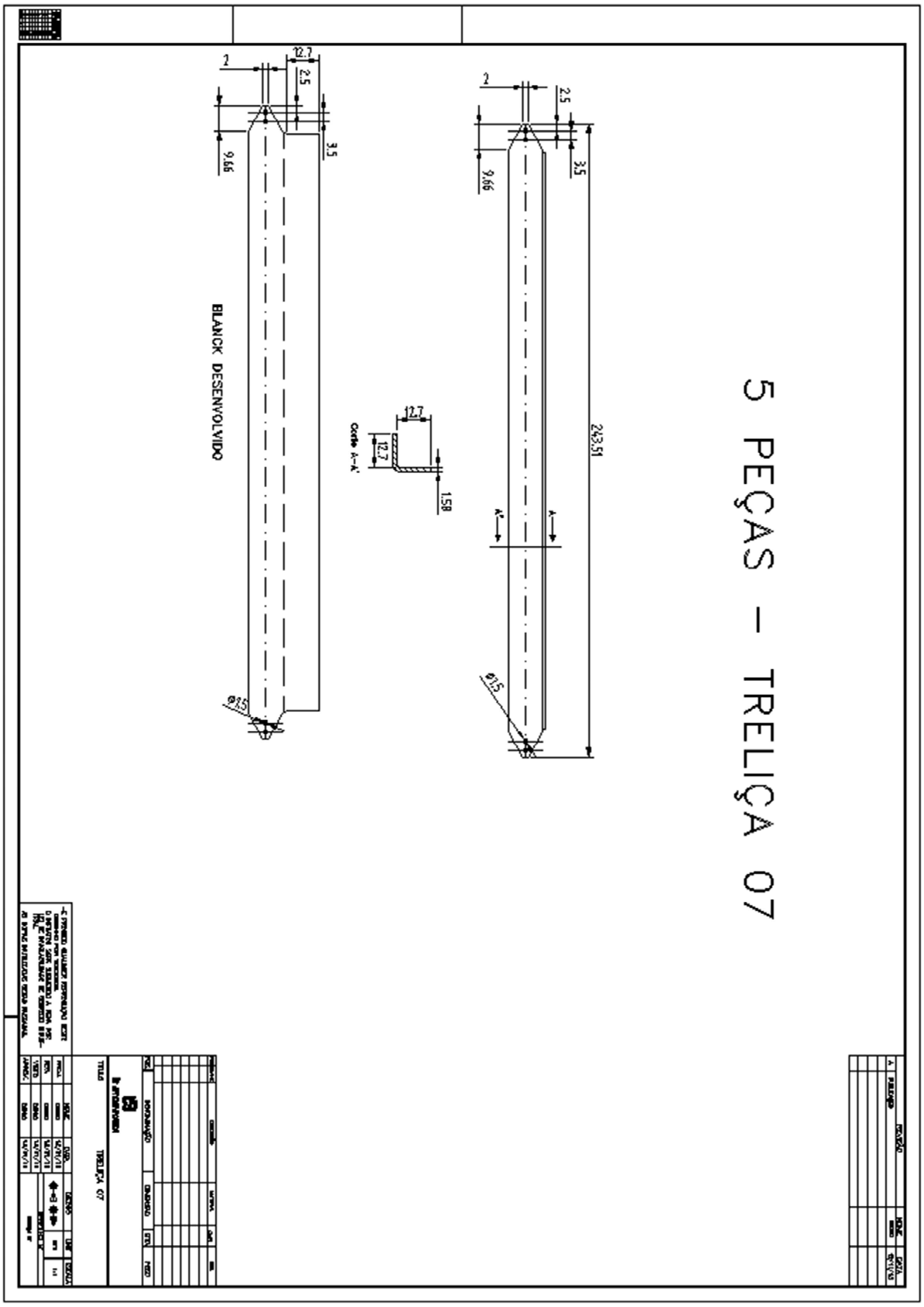

10 PEÇAS – TRELIÇA 02
BLANCK DESENVOLVIDO
TRELIÇA 02

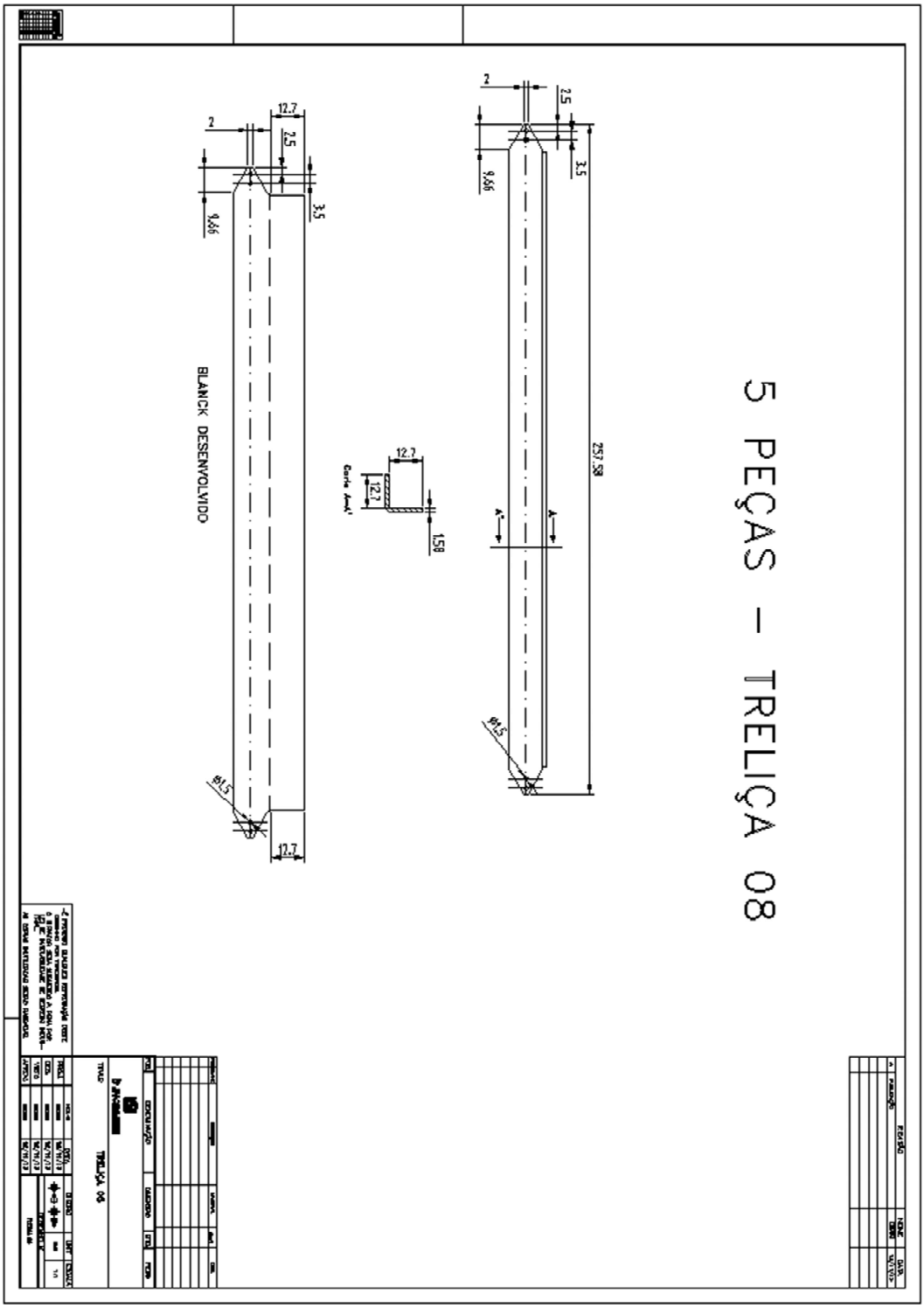

15 PEÇAS – TRELIÇA 03
BLANCK DESENVOLVIDO
12.7
2.5
2
9.66
3.5
280.75
258.99
Corte A-A'
1.58
A'
A
TRELIÇA 03

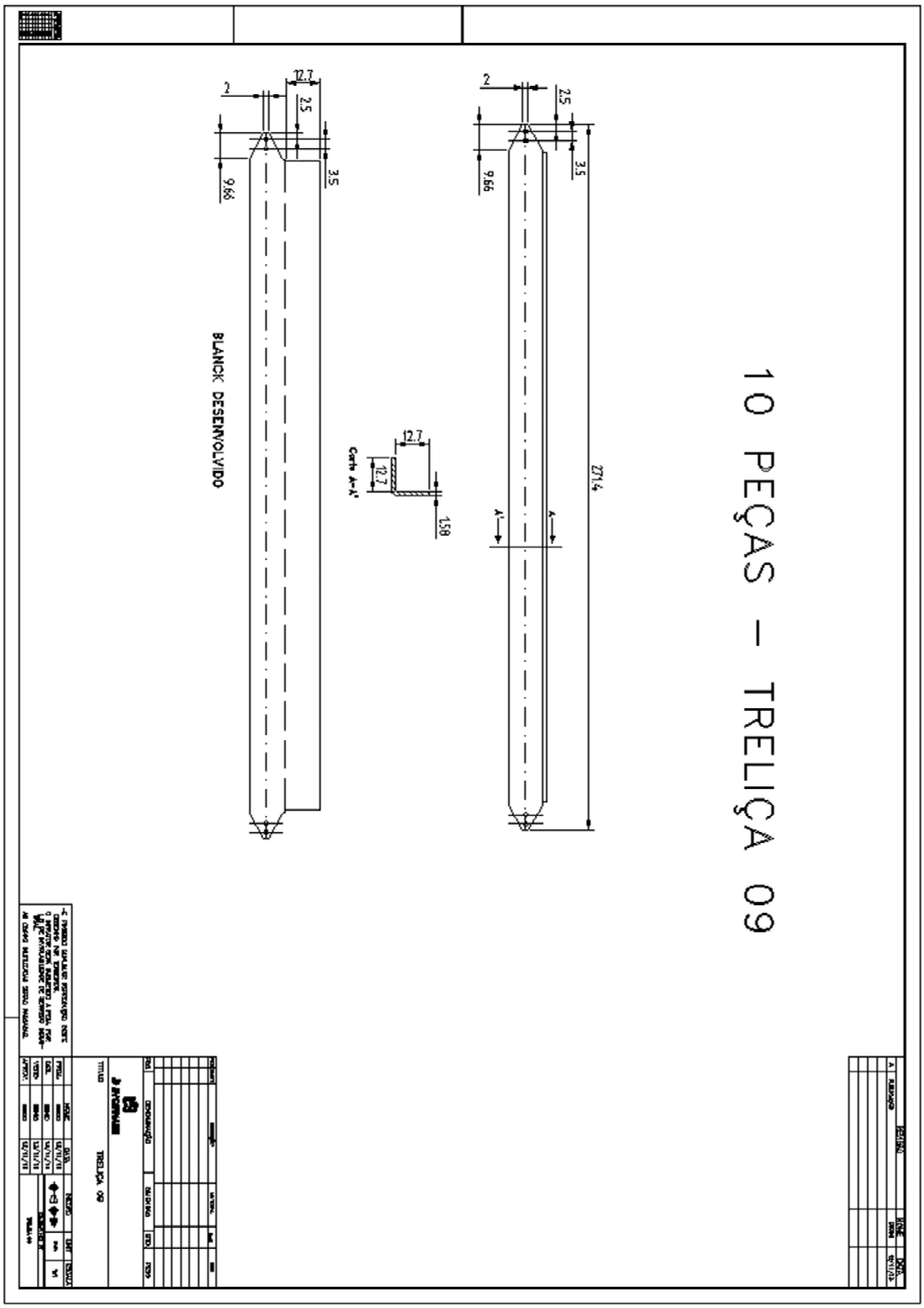

10 PEÇAS – TRELIÇA 04
BLANCK DESENVOLVIDO
Corte A-A'
12.7
2
2.5
3.5
9.66
271.14
249.38
1.58
TRELIÇA 04

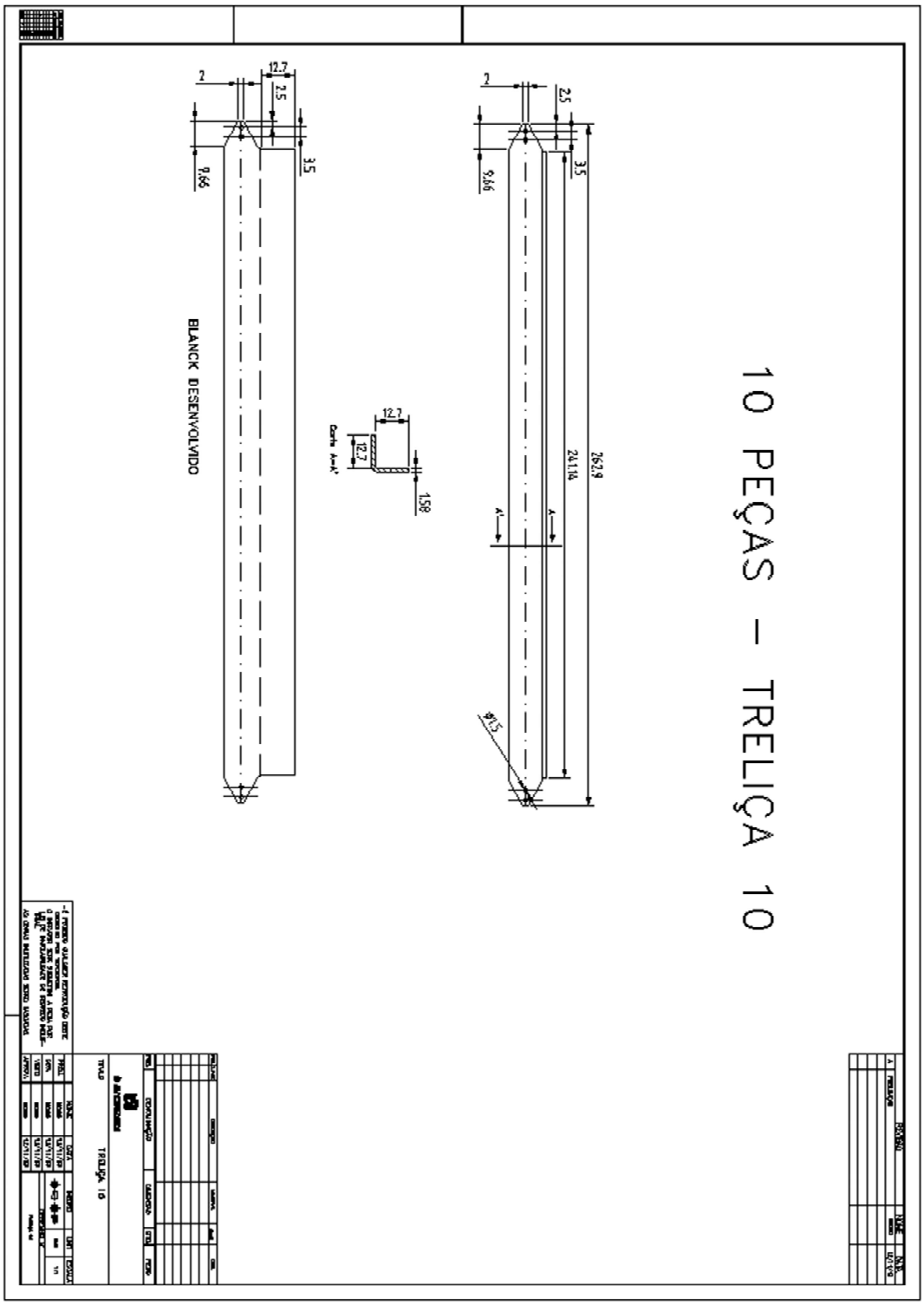

10 PEÇAS - TRELIÇA 05
BLANCK DESENVOLVIDO
Corte A-A'
12.7
2
2.5
3.5
9.66
339.4
1.58
Ø1.5
TRELIÇA 05

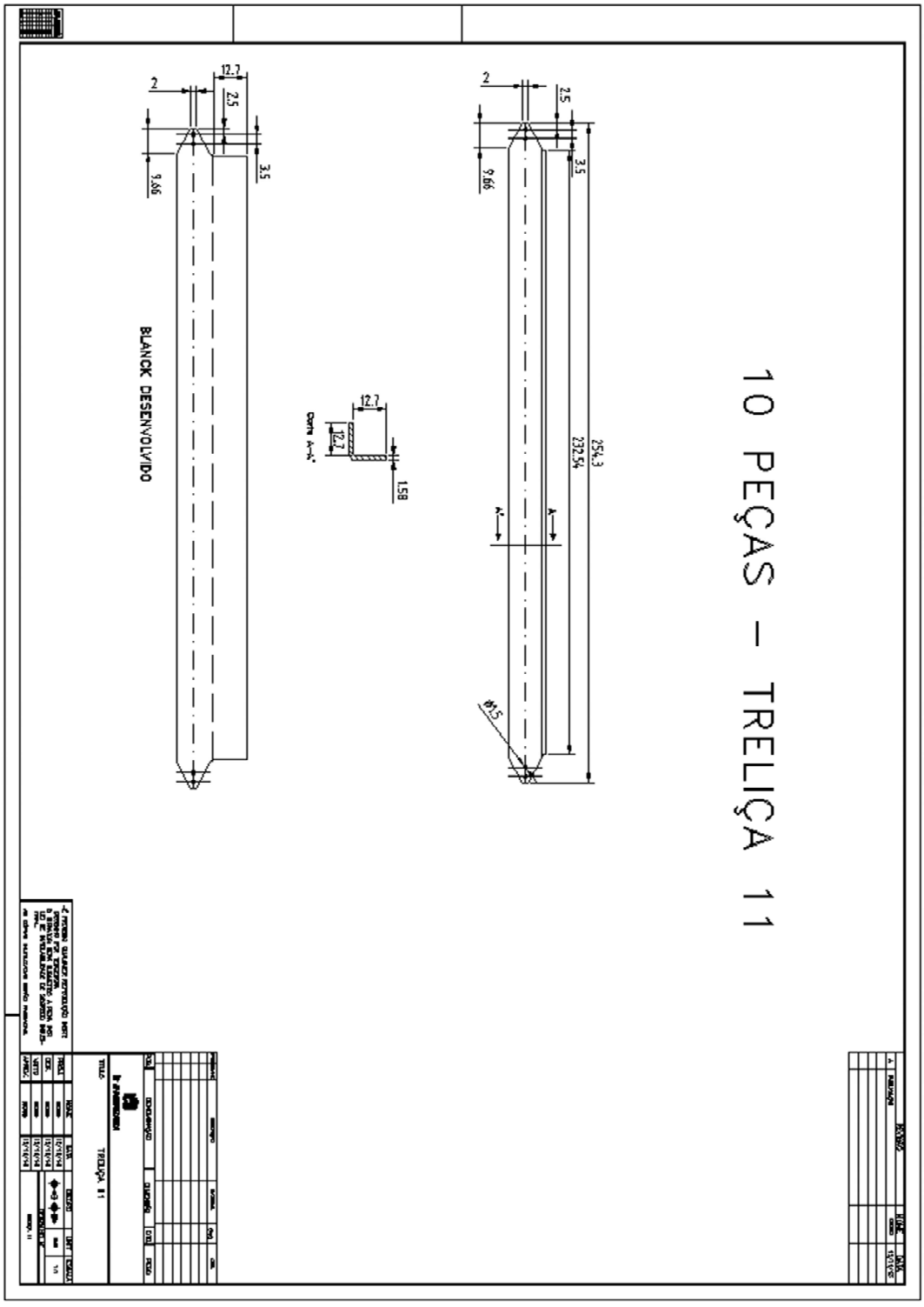

10 PEÇAS – TRELIÇA 06
BLANCK DESENVOLVIDO
Corte A-A'
2
12.7
2.5
9.66
3.5
236.44
Ø1.5
12.7
12.7
1.59
A
A
TRELIÇA 06

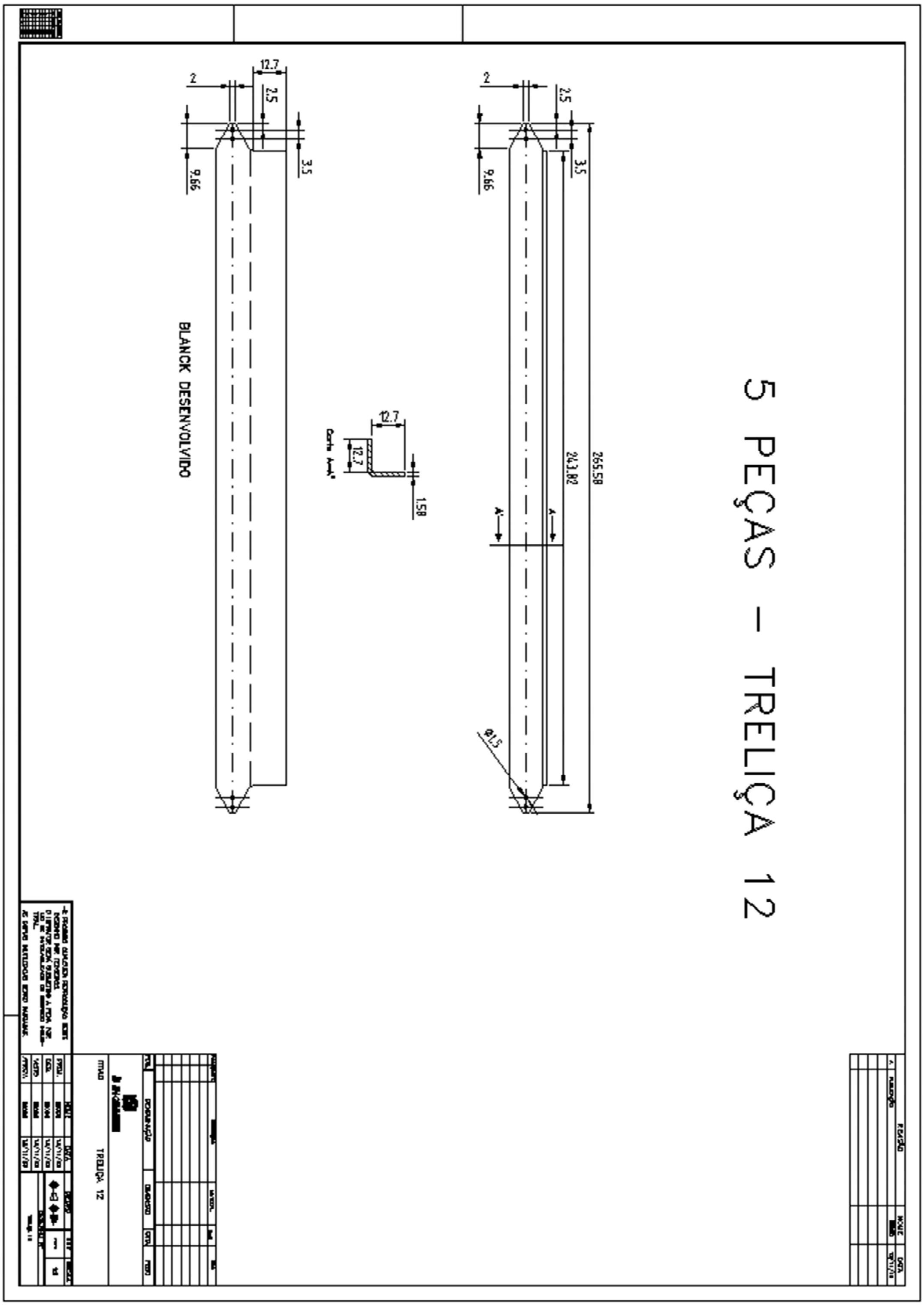

5 PEÇAS - TRELIÇA 07
BLANCK DESENVOLVIDO
Corte A-A'
243,51
12,7
2,5
3,5
9,66
1,58
TRELIÇA 07

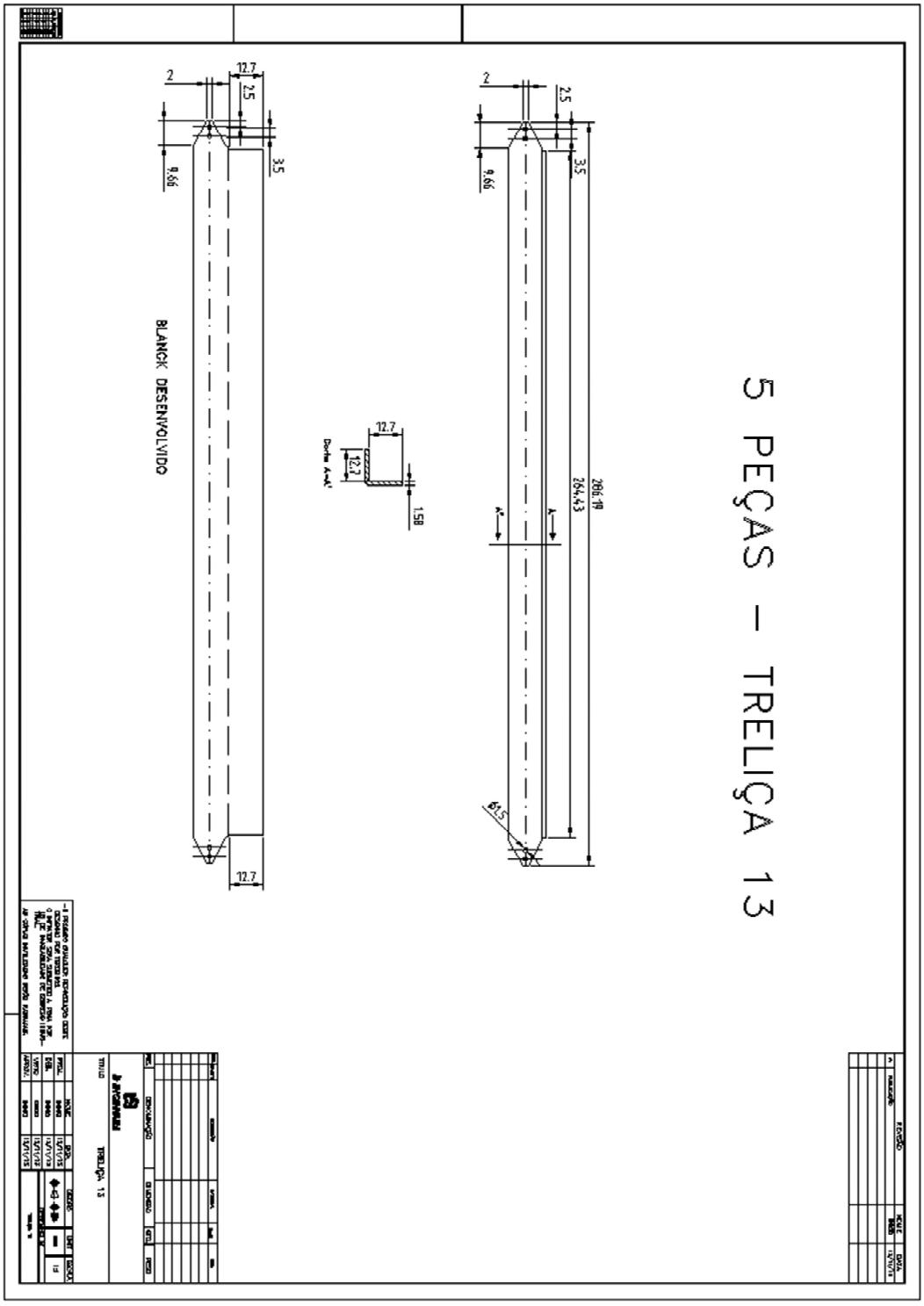

5 PEÇAS – TRELIÇA 08
BLANCK DESENVOLVIDO
257.58
9.66
2
2.5
3.5
12.7
1.58
Ø4.5

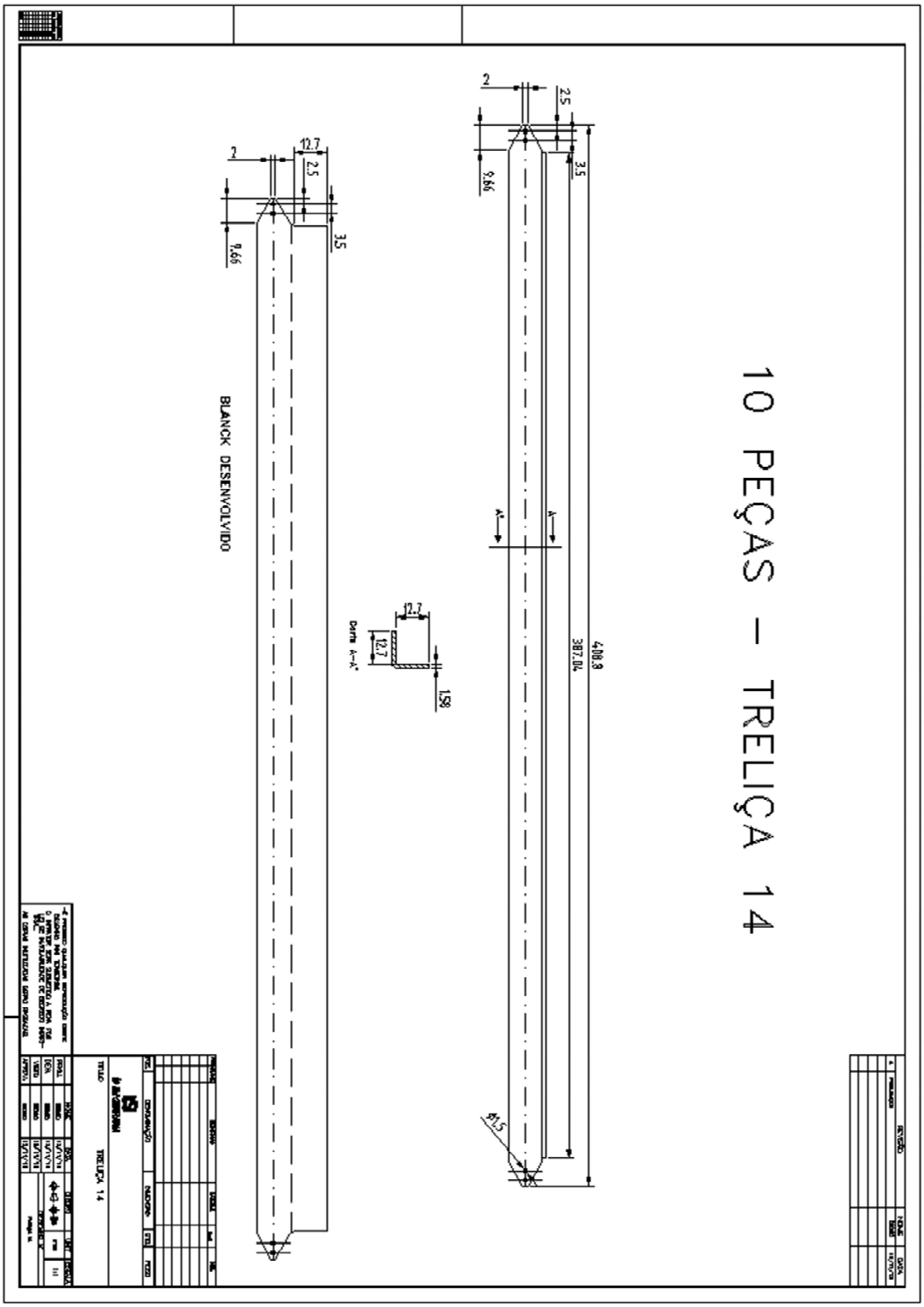

10 PEÇAS – TRELIÇA 09
BLANCK DESENVOLVIDO
TRELIÇA 09

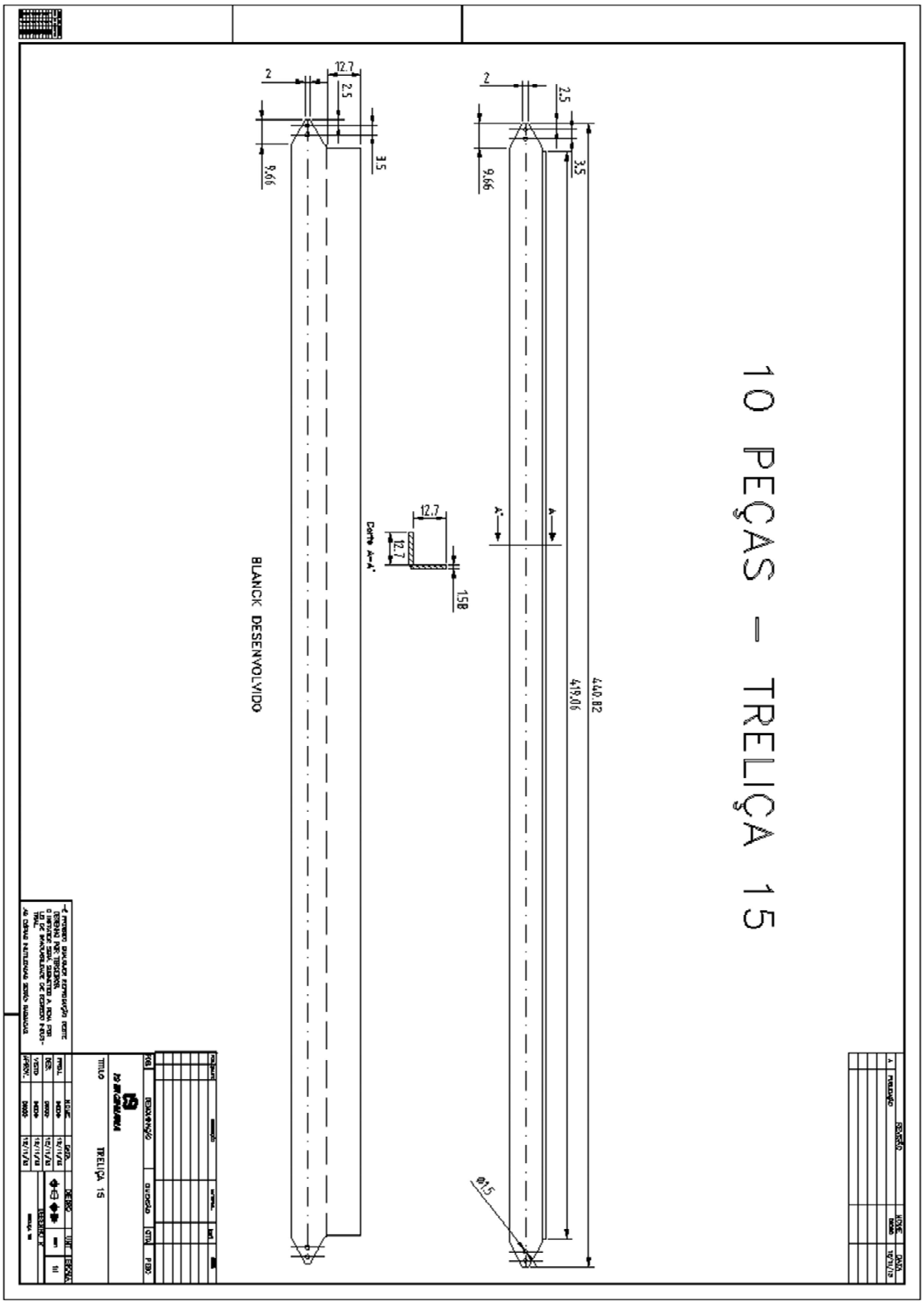

10 PEÇAS – TRELIÇA 10
BLANCK DESENVOLVIDO
TRELIÇA 10


10 PEÇAS – TRELIÇA 11
BLANCK DESENVOLVIDO
TRELIÇA 11


5 PEÇAS – TRELIÇA 12
BLANCK DESENVOLVIDO
12.7
2
2.5
3.5
9.66
265.58
243.82
1.58
Ø1.5
A
TRELIÇA 12


5 PEÇAS – TRELIÇA 13
BLANCK DESENVOLVIDO
TRELIÇA 13


10 PEÇAS – TRELIÇA 14
BLANCK DESENVOLVIDO
TRELIÇA 14


10 PEÇAS – TRELIÇA 15
BLANCK DESENVOLVIDO
Corte A-A'
12.7
2.5
3.5
9.66
2
1.58
419.06
440.82
Ø1.5
TRELIÇA 15