

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL
FACULDADE DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

KARINA DE OLIVEIRA ALVES

**DESENVOLVIMENTO DE UM CLINOSTATO TRIDIMENSIONAL COM TRÊS
EIXOS DE ROTAÇÃO QUE PERMITE A TROCA DE SUPORTES DE AMOSTRAS**

Porto Alegre
2013

KARINA DE OLIVEIRA ALVES

**DESENVOLVIMENTO DE UM CLINOSTATO TRIDIMENSIONAL COM TRÊS
EIXOS DE ROTAÇÃO QUE PERMITE A TROCA DE SUPORTES DE AMOSTRAS**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Sinais, Sistemas e Tecnologia da Informação.

Linha de pesquisa: Engenharia Biomédica.

Orientadora: Prof^a. Dra. Marlise Araújo dos Santos

Porto Alegre
2013



Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul

FACULDADE DE ENGENHARIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**DESENVOLVIMENTO DE UM CLINOSTATO
TRIDIMENSIONAL COM TRÊS EIXOS DE ROTAÇÃO QUE
PERMITE A TROCA DE SUPORTES DE AMOSTRAS**

CANDIDATA: KARINA DE OLIVEIRA ALVES

Esta Dissertação de Mestrado foi julgada para obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul.

DRA. MARLISE ARAÚJO DOS SANTOS - ORIENTADORA

BANCA EXAMINADORA

DRA. ANA MARIA MARQUES DA SILVA - DO PPGE/FENG - PUCRS

DR. ISAAC NEWTON LIMA DA SILVA - DO PGETEMA/FENG - PUCRS

PUCRS

Campus Central

Av. Ipiranga, 6681 - Prédio 30 - Sala 103 - CEP: 90619-900

Telefone: (51) 3320.3540 - Fax: (51) 3320.3625

E-mail: engenharia.pg.eletrica@pucls.br

www.pucrs.br/feng

Dedico esta tese aos meus pais e ao meu
noivo, que tanto apoiaram e
incentivaram.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer as todas as pessoas que contribuíram de uma forma ou outra na elaboração e término deste trabalho. Entretanto gostaria de agradecer em especial a certas pessoas que foram fundamentais para que obtivesse sucesso neste desafio.

Todo meu percurso de vida até o final da pós-graduação, eu agradeço aos meus pais, Ana Marisa de Oliveira Alves e Antonio da Silva Alves, que sempre apoiaram meu estudo, me mostraram o caminho que devia seguir, em momentos de cansaço, me motivavam e tentavam me ajudar.

Agradeço ao meu noivo, Felipe Bittencourt de Moura, que sem dúvida me apoiou em todos os momentos, entendeu toda a pressão que sentia com a pós-graduação e um trainee em uma empresa internacional.

Gostaria de agradecer em especial a minha orientadora Marlise Araújo dos Santos, que sempre acreditou em mim e continuamente me incentivou para terminar este projeto.

Agradeço a contribuição e auxílio das professoras Thais Russomano e Ana Maria Marques da Silva e a equipe do Centro de Microgravidade na Faculdade de Engenharia da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul.

RESUMO

Nas últimas décadas, estudos realizados com astronautas e animais têm demonstrado que, durante ou após os voos espaciais, a função de muitos órgãos e sistemas sofrem alterações fisiológicas, incluindo mudanças no líquido cefálico, perda de fluidos e de eletrólitos, perda de massa muscular e redução da resposta imune. Há também experimentos que demonstraram que o campo gravitacional influencia a formação da estrutura cristalina de substâncias, assim como a virulência de microrganismos. Os experimentos em voos espaciais são de alto custo e de acesso limitado. Neste contexto, surgiu a necessidade de desenvolver um instrumento para viabilizar, em terra, estudos das alterações que ocorrem em microrganismos e cristais em microgravidade simulada, como um clinostato tridimensional. A presente dissertação tem como objetivos o desenvolvimento do projeto de um clinostato 3D com três eixos de rotação de sentido horário e ajuste da velocidade de rotação através da modelagem, simulação no *software PRO Engineer*, que permite a troca de suportes para aplicação em diferentes tipos de amostras e ajuste, permitindo o cálculo de microgravidade e centrifugação para cada suporte. Em comparação aos três projetos anteriores do Centro de Microgravidade (FENG/PUCRS), as principais inovações são a possibilidade de revolução em mais um eixo, a diversificação dos suportes de amostras e o fator de microgravidade associado a cada tipo de amostra. O desenvolvimento no *software* de simulação proporcionou uma melhoria do projeto, adaptação do protótipo, a redução de custos anteriormente à construção e ajustes necessários para obter as características esperadas. Obteve-se resultados adequados para a utilização do clinostato com velocidade inferior a 8 rpm nas amostras para garantir a condição de microgravidade de fator inferior a $1,0 \cdot 10^{-3}$, no caso de amostras com massa específica aproximadamente igual a da água. As forças centrífugas calculadas nas amostras foram mínimas, atendendo aos requisitos para a simulação de microgravidade. Os cálculos contidos neste trabalho serão fundamentais para pesquisas futuras, sendo possível especificar e analisar os efeitos da microgravidade e centrifugação sobre cada amostra. A simulação de deslocamento e estresse das estruturas críticas do clinostato demonstrou resultados que garantem a resistência necessária para o seu funcionamento. O projeto desenvolvido nesta dissertação já possibilitou a construção estrutural do protótipo do clinostato tridimensional, o qual atende as características desejadas da estrutura, mobilidade, resistência e flexibilidade de amostras.

Palavras-chave: Microgravidade. Desenvolvimento. Clinostato 3D. Três eixos.

ABSTRACT

In recent decades, studies with astronauts and animals have shown that during and after space flights, the function of many organs and systems has undergone physiological changes, including changes in the liquid head, loss of fluids and electrolytes, muscle loss, and reduced immune response. There are also some experiments showing that the gravity can influence the formation of the crystal structure of substances and the virulence of the microorganisms. The experiments in space flights have high cost and limited access. In this context, it became necessary to develop a tool to be able to study some changes that can occur in microorganisms and crystals in microgravity simulation on earth, such as a three-dimensional clinostat. The present dissertation aims to develop a three-dimensional clinostat with three axes of rotation clockwise adjusting the speed of rotation with the possibility to change the supports for application in different types of samples which was modeled and simulated using the software PRO Engineer, allowing calculating the microgravity and centrifugation for each bracket. In comparison to the three previous projects built in the Microgravity Center (FENG / PUCRS), the innovations of this device are an additional axis of revolution, the diversification of the sample support and microgravity factor calculation for each type of sample. The development in the simulation software provided an improvement of the project, adjusts of the previous prototype, cost reduction in construction and adjustments necessary to obtain the expected characteristics. The results showed that the clinostat speed must be below at 8 rpm to ensure that the samples microgravity factor is less than $1,0 \cdot 10^{-3}$, in the case of samples with a density approximately equal to that of water. The centrifugal forces calculated in the samples were minimal, according to requirements for microgravity simulation. The calculations contained in this dissertation will be the key to future research, where it will be possible to specify and analyze the effects of microgravity and centrifugation of each sample type. The results of simulation displacement and stress of the critical structures of clinostat demonstrated that project has the resistance needed for its operation. The project developed has enabled the construction of the prototype structural of three-dimensional clinostat, given the characteristics of the structure desire, mobility, strength and flexibility of samples.

Keywords: Microgravity. Development. 3D clinostat. Three axis.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - O caminho de uma partícula dentro de uma amostra, durante a rotação clinostato 2D, percorrendo pequenos caminhos circulares.	18
Figura 2 – Células neurais NB100 em microgravidade cresceram 3.3 vezes para as mesmas células neurais em estado estático [<i>microgravity simulating bioreactor</i> (MSB): $2.76 \pm 0.35 \times 10^4$ cells/cm ³ ; <i>static cultures</i> (SCS): $0.83 \pm 0.09 \times 10^4$ cells/cm ³ (P < 0.001; n = 6)].	19
Figura 3 - Células neurais U251MG em microgravidade cresceram 4.1 vezes para as mesmas células neurais em estado estático [MSB: $3.21 \pm 0.09 \times 10^4$ cells/cm ³ ; SCS: $0.78 \pm 0.27 \times 10^4$ cells/cm ³ (P < .001; n = 6)].	20
Figura 4 - Gráfico do fator de equivalência g' da microgravidade.	25
Figura 5 - Referência e identificação dos eixos do clinostato tridimensional de três eixos.	27
Figura 6 - Primeiro protótipo de clinostato do Centro de Microgravidade de 2004.	30
Figura 7 - Segundo protótipo de clinostato do Centro de Microgravidade de 2004.	30
Figura 8 - Terceiro protótipo desenhado em <i>CAD design software SolidWorks</i> do Centro de Microgravidade.	31
Figura 9 - Terceiro protótipo de clinostato do Centro de Microgravidade de 2007.	31
Figura 10 - RPM (clinostato 3D) do <i>Dutch Space an EADS Astrium company</i> , Holanda.	32
Figura 11 - RPM (clinostato 3D) do <i>Space Garden Project</i> , Alemanha.	32
Figura 12 - Clinostato 2D e RPM (clinostato 3D) do <i>Laboratory of Space Medicine and Space Pharmacology</i> , Universidade de Aarhus, Dinamarca.	33
Figura 13 - Dimensões, <i>inputs</i> e <i>outputs</i> do <i>drive</i>	35
Figura 14 - Esquema elétrico das ligações do <i>drive</i>	35
Figura 15 - Diagrama de Blocos do componente, fornecido pelo fabricante do <i>transceiver</i>	36
Figura 16 - Vistas do <i>transceiver</i> TRW24G.	36
Figura 17 - Diagrama de blocos do componente MSP430f149.	37
Figura 18 - Diagrama dos pinos do componente MSP430f149.	37
Figura 19 - Estufa incubadora, marca Fanem, modelo 347 CD.	39
Figura 20 – Primeiro esboço de <i>layout</i> para o novo clinostato.	40
Figura 21 - <i>Layout</i> apresentado em congresso.	40
Figura 22 - Evolução do <i>layout</i> do novo clinostato.	41
Figura 23 - <i>Layout</i> final do novo clinostato.	41
Figura 24 - Análise da força centrífuga máxima em quatro posições básicas de um frasco no clinostato tridimensional.	44

Figura 25 - Tubos de falcon de 50 mL.....	45
Figura 26 - Placas de Petri.....	45
Figura 27 – <i>SlideFlask</i>	46
Figura 28 - Tela de definição das propriedades do acrílico no <i>software Pro Engineer</i>	53
Figura 29 - Detalhamento da aplicação da força e ponto de constrição (pontos de fixação) do quadrado externo.....	54
Figura 30 - Análise de deslocamento do quadrado externo.	55
Figura 31 - Análise de estresse do quadrado externo.....	55
Figura 32 - Detalhamento da aplicação da força e ponto de constrição (pontos de fixação) do quadrado interno.	56
Figura 33 - Análise de deslocamento do quadrado interno.....	56
Figura 34 - Análise de estresse do quadrado interno.	57
Figura 35 - Detalhamento da aplicação da força e ponto de constrição (pontos de fixação) da barra de fixação dos suportes.....	58
Figura 36 - Análise de deslocamento da barra de fixação dos suportes.	58
Figura 37 - Análise de estresse da barra de fixação dos suportes.....	59
Figura 38 - Posição de maior esforço dos suportes de amostras (posição analisada).....	60
Figura 39 - Detalhamento da aplicação da força e ponto de constrição (pontos de fixação) do suporte do suporte de frascos Falcon 50 mL e tudo de Falcon modificado.	61
Figura 40 - Análise de deslocamento do suporte de frascos Falcon 50 mL e tudo de Falcon modificado.....	61
Figura 41 - Análise de estresse do suporte de frascos Falcon 50 mL e tudo de Falcon modificado.....	62
Figura 42 - Análise de deslocamento do suporte para Falcon de 13 mL.....	62
Figura 43 - Análise de estresse do suporte para Falcon de 13 mL.	63
Figura 44 - Análise de deslocamento do suporte para Falcon de 5 mL.	63
Figura 45 - Análise de estresse do suporte para Falcon de 5 mL.	64
Figura 46 - Análise de deslocamento do suporte para Eppendorf de 1,5 a 2 mL.....	64
Figura 47 - Análise de estresse do suporte para Eppendorf de 1,5 a 2 mL.....	65
Figura 48 - Análise de deslocamento do suporte para placas de Petri.....	65
Figura 49 - Análise de estresse do suporte para placas de Petri.....	66
Figura 50 - Análise de deslocamento do suporte para <i>SlideFlask</i>	66
Figura 51 - Análise de estresse do suporte para <i>SlideFlask</i>	67

Figura 52 - Clinostato 3D com as interações dos eixos e motor para simulação do mecanismo de rotação..... 68

Figura 53 - Imagem do protótipo do clinostato tridimensional de três eixos em construção. . 69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Sinopse dos principais aparelhos usados para simular microgravidade em Terra.	28
Tabela 2 – Comparativo dos clinostatos do Centro de Microgravidade.	29
Tabela 3 - Dimensão e aplicação dos frascos utilizados.	46
Tabela 4 - Cálculo de microgravidade e força centrífuga máxima para frascos em vidro de 35 mL em 4 velocidades, utilizando a massa específica da água.	48
Tabela 5 - Cálculo de microgravidade e força centrífuga máxima para frascos Falcon em 4 velocidades, utilizando a massa específica da água.	48
Tabela 6 - Cálculo de microgravidade e força centrífuga máxima para placas de Petri em 4 velocidades, utilizando a massa específica da água.	49
Tabela 7 - Cálculo da massa específica máxima para placas de Petri em 4 velocidades, considerando uma micro força centrífuga.	49
Tabela 8 - Cálculo de microgravidade e força centrífuga máxima para frasco Eppendorf em 4 velocidades, utilizando a massa específica da água.	50
Tabela 9 - Cálculo de microgravidade e força centrífuga máxima para frasco <i>SlideFlask</i> em 4 velocidades, utilizando a massa específica da água.	50
Tabela 10 – Suportes especificados para cada tipo de frasco com a capacidade de armazenagem e peso aproximado.	52
Tabela 11 - Resultado da análise de deslocamento dos suportes dos frascos.	60

LISTA DE SIGLAS

CAD – Computer Assisted Design

FENG – Faculdade de Engenharia / PUCRS

MicroG – Centro de Microgravidade / PUCRS

MSB - *microgravity simulating bioreactor*

NASA - *National Aeronautics and Space Administration*

PUCRS – Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul

LISTA DE SÍMBOLOS

kg - quilograma

kg/m³ - quilograma por metro cúbico

km - quilometro

km/h – quilômetros por hora

m – metro

m/s – metros por segundo

m/s² – metros por segundo ao quadrado

m³ - metro cúbico

mL – mililitro

mm - milímetros

rad/s – radianos por segundo

rpm – rotações por minuto

V – volt

3D - tridimensional

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	JUSTIFICATIVA	19
1.2	OBJETIVOS	21
2	FUNDAMENTOS TEÓRICOS	22
2.1	GRAVITAÇÃO E GRAVIDADE	22
2.2	FORÇA RESULTANTE	22
2.3	MASSA INERCIAL	23
2.4	FORÇA GRAVITACIONAL.....	23
2.5	MICROGRAVIDADE.....	23
2.6	HIPOGRAVIDADE	25
2.7	FORÇA CENTRÍFUGA	25
2.8	CLINOSTATO.....	26
3	MATERIAIS E MÉTODOS	34
3.1	MATERIAIS	34
3.2	COMUNICAÇÃO	35
3.3	CONTROLADOR.....	37
3.4	ALIMENTAÇÃO.....	38
3.5	MÉTODO DE SIMULAÇÃO	38
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	39
4.1	FASE I – PROJETO E MODELAGEM	39
4.2	FASE II – SUPORTE PARA OS FRASCOS.....	43
4.3	FASE III – SIMULAÇÃO MECÂNICA	53
4.4	FASE IV – SIMULAÇÃO DO MECANISMO.....	68
4.5	PROTÓTIPO.....	69
5	CONCLUSÃO	70
5.1	PROJETAR UM NOVO PROTÓTIPO.....	70
5.2	SIMULAR A ESTRUTURA E O SISTEMA MECÂNICO DO CLINOSTATO 3D.....	70
5.3	DESENVOLVER DIFERENTES TIPOS DE SUPORTES	71
	REFERÊNCIAS	72
	APÊNDICE A – CUSTO APROXIMADO DO CLINOSTATO 3D.....	77

1 INTRODUÇÃO

Mais de 50 anos após o início da Era Espacial, inaugurada com o lançamento do Sputnik I da então União Soviética, em 4 de outubro de 1957, as atividades espaciais se tornaram essenciais à vida cotidiana de todas as nações da Terra. A indústria espacial oferece cada vez mais e melhores soluções em produtos e serviços. Um dos maiores desafios do Brasil, hoje, é desenvolver sua indústria espacial, apresentando também inovações e soluções em produtos e serviços (PNAE, 2012).

O grande apelo à inventividade e ao empreendedorismo no Brasil é atender às crescentes necessidades e demandas espaciais do país, ou seja, torná-lo capaz de usufruir, soberanamente e em grande escala dos benefícios das tecnologias, da inovação, da indústria e das aplicações do setor em prol da sociedade brasileira (PNAE, 2012).

A gravidade é uma força que governa o movimento em todo o universo. Ela nos mantém no chão, mantém a Lua em órbita em torno da Terra e a Terra em órbita ao redor do Sol. Muitas pessoas erroneamente pensam que a gravidade não existe no espaço. No entanto, altitudes orbitais típicas para voos espaciais tripulados variam entre 192-576 quilômetros acima da superfície da Terra. O campo gravitacional ainda é bastante forte nessas regiões. O campo gravitacional da Terra, a cerca de 250 km acima da superfície é de 88,8 % de seu valor à superfície. A nave espacial em órbita, o ônibus espacial ou estação espacial, são mantidos em órbita em torno da Terra pela gravidade (NASA, 2009).

A condição de microgravidade ocorre quando um objeto está em queda livre. Uma nave espacial em órbita se move na velocidade adequada para que a curva de sua queda coincida com a curva da Terra. Para a estação espacial, por exemplo, a velocidade é 28.000 quilômetros por hora. A nave continua caindo em direção ao chão, mas nunca o atinge. Em vez disso, ela gira ao redor do planeta (NASA, 2010).

Algumas pessoas pensam que há um ambiente de gravidade zero dentro de um veículo orbital, porém pequenos valores de gravidade estão em toda a parte. Cada objeto dentro de uma nave tem acelerações diferentes. Somente se o objeto estiver localizado exatamente no centro de massa da nave, terá a mesma órbita desta (AGÊNCIA ESPACIAL BRASILEIRA, 2004). Microgravidade, também referida como “ausência de peso”, é uma condição onde há uma força da gravidade da ordem de 10^{-4} à 10^{-5} da força gravitacional da Terra (KLAUS, 2001).

As pesquisas para compreender as alterações em processos químicos, físicos e biológicos ocorridos em microgravidade podem auxiliar o entendimento dos efeitos da gravidade sobre a vida na Terra, através da análise dos efeitos da gravidade sobre a amostra em comparação com a mesma em microgravidade. Também é possível analisar as diversas alterações nos sistemas imunológicos dos astronautas no espaço. Sua aplicação vem sendo demonstrada pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) e por pesquisadores internacionais ao longo das últimas décadas, as quais podem ser citadas em *Labflight* (2009):

- A avaliação do crescimento e a virulência de microrganismos no intuito de auxiliar no isolamento de genes relevantes para o desenvolvimento de vacinas.

- O cultivo de tecidos de diferentes espécies, já que em microgravidade eles se desenvolvem de forma tridimensional, melhorando assim a fidelidade do efeito dos fármacos testados.

- A produção de cristais em microgravidade, caracterização da estrutura da molécula e a avaliações do desenvolvimento da molécula.

A diferença de densidade no fluxo de fluídos e na sedimentação no crescimento de cristais são fortemente reduzidas quando estes fenômenos são avaliados ou ocorrem em um ambiente de gravidade reduzida. O crescimento de um cristal em microgravidade foi tentado pela primeira vez em 20 de abril de 1981, utilizando *Germany's Technologische Experimente* dentro do foguete *Schwereelosigkeit (TEXUS 3)*. Uma câmera com sistema ótico *Schieren* monitorou o processo de crescimento do cristal de proteína *β -galactosidase*. Foi observado um processo de difusão laminar em contraste com a convecção turbulenta ocorrida em experiências na Terra (LITTKKE, 1984). A remoção desta convecção, o potencial científico e comercial originou um estudo geral da utilização de microgravidade como ferramenta na cristalização macromolecular.

Estudos realizados por Borgstahl e colegas (2001) demonstraram que o crescimento de cristais de insulina em ambiente de microgravidade se encontra extremamente organizado e que seu tamanho é em média 34 vezes maior, além de apresentar um pico de reflexão de 54 vezes maior. Considerando que a forma cristalina de um fármaco influencia diretamente na sua biodisponibilidade, este conhecimento está mudando a ciências biológicas e químicas, pois surge como uma nova alternativa para cristalização de fármacos (PERUTZ, 1992).

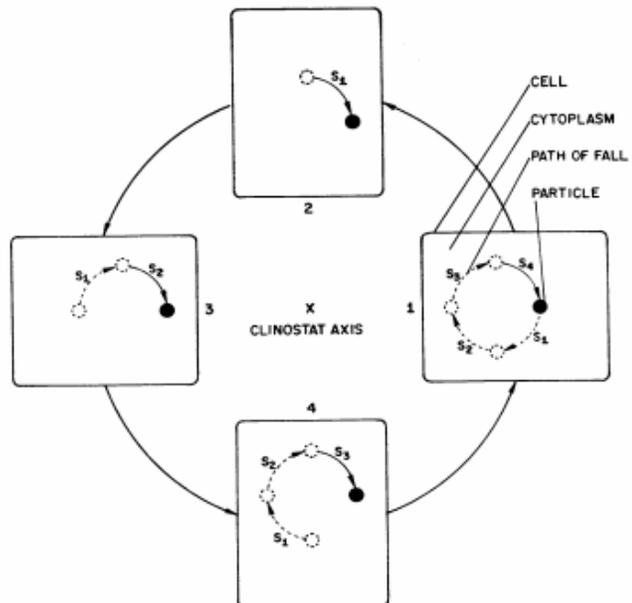
No espaço, os astronautas experimentam diferentes tipos de estresses, incluindo mudanças na força gravitacional, isolamento, confinamento, conflito psicossocial, ansiedade e de privação do sono (KAUR, 2005). Nessas missões, o estresse acaba afetando diversos aspectos da fisiologia humana, incluindo o sistema imune (MEHTA, 2001). Estudos prévios mostraram que mudanças dos fluidos corporais e atrofia muscular e óssea ocorrem em seres humanos expostos à falta de gravidade. Embora estas alterações fisiológicas visíveis sugiram que outros sistemas fisiológicos e metabólicos no corpo humano possam também ser afetados pela microgravidade, elas não predizem necessariamente como irá se processar a reação a uma infecção durante uma situação de redução ou ausência da força gravitacional terrestre (LU, 2002).

A microgravidade age em certos microrganismos aumentando a sua virulência, como, por exemplo, a *Salmonella enterica* ou aumentando a produção de toxinas, como foi comprovada que ocorre na *Escherichia coli*, em estudos de Chopra (2006). Além disso, segundo Ciferri (1986), e Klaus (1997), a *Escherichia coli* apresentou semelhante aumento do crescimento durante o vôo em vários experimentos. Esses estudos são essenciais para o melhor entendimento da interação entre bactérias e hospedeiro, particularmente no contexto tanto de voos espaciais, quanto de colônias espaciais (CHOPRA, 2006).

O desenvolvimento do equipamento que simula os efeitos da microgravidade, denominado clinostato teve origem em 1882. O clinostato é um dispositivo que permite a simulação dos efeitos comparativos aos efeitos da microgravidade sobre células, plantas e pequenos animais. A contínua mudança aleatória de posicionamento angular da amostra alterna a orientação do vetor de gravidade sobre esta (KLAUS, 2001, AUDUS, 1962).

Para culturas de células suspensas, um estado denominado de microgravidade funcional pode ser alcançado, rodando-se um frasco cheio com líquido numa velocidade constante em um clinostato. Após um curto período inicial, a velocidade de rotação da parede do frasco é transferida radialmente e internamente até que não exista mais movimento do fluido. Ele então passa a rodar como um corpo rígido com suas partículas suspensas aleatoriamente, enquanto percorrem pequenos caminhos circulares (DEDOLPH e DIPERT, 1971).

Figura 1 - O caminho de uma partícula dentro de uma amostra, durante a rotação clinostato 2D, percorrendo pequenos caminhos circulares.



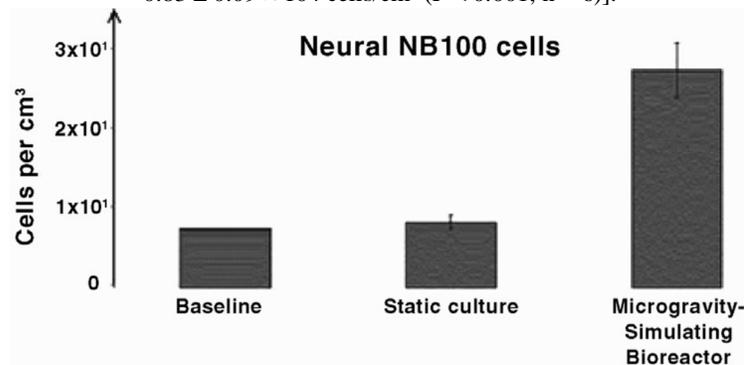
Fonte: DEDOLPH e DIPERT, 1971, volume 47, página 756.

1.1 JUSTIFICATIVA

No decorrer da história, é possível enumerar diversas descobertas científicas obtidas por experimentos, onde foi realizada a observação, explicação e predição de fenômenos reais do mundo. A análise dos efeitos da microgravidade em diversas células pode ser alcançada pelo método de clinorrotação.

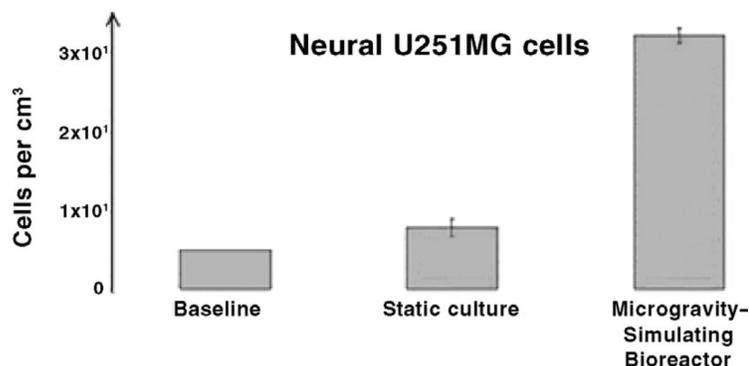
O primeiro clinostato 3D concebido, projetado e desenvolvido inteiramente no Brasil foi construído pelo engenheiro Felipe Prehn Falcão, do Centro de Microgravidade e foi validado pelo *Stem Cell Group of Kingston University London*, que utilizou quatro tipos diferentes de células cancerígenas humanas e células estaminais do cordão umbilical (CBSCs). Neste experimento, após a rotação durante 19 h, a 37 ° C, 5% de atmosfera úmida de CO₂, e velocidade constante de 1,6 rpm, o clinostato 3D melhorou significativamente o potencial de proliferação de todas as populações de células testadas quando comparadas a culturas estáticas, como mostra as Figuras 2 e 3 abaixo (RUSSOMANO, 2008).

Figura 2 – Células neurais NB100 em microgravidade cresceram 3.3 vezes para as mesmas células neurais em estado estático [*microgravity simulating bioreactor* (MSB): $2.76 \pm 0.35 \times 10^4$ cells/cm³; *static cultures* (SCS): $0.83 \pm 0.09 \times 10^4$ cells/cm³ (P < 0.001; n = 6)].



Fonte: Russomano, 2008, página 52.

Figura 3 - Células neurais U251MG em microgravidade cresceram 4.1 vezes para as mesmas células neurais em estado estático [MSB: $3.21 \pm 0.09 \times \text{cells}/\text{cm}^3$; SCS: $0.78 \pm 0.27 \times 10^4 \text{ cells}/\text{cm}^3$ ($P < .001$; $n = 6$)].



Fonte: Russomano, 2008, página 53.

O Laboratório de Fármácia Aeroespacial *Joan Vernikos*, localizado no Centro de Microgravidade - FENG/PUCRS, vem desenvolvendo pesquisas na área de simulação de microgravidade, seja com voluntários ou em cultura de células (www.pucrs.br/feng/microg). Para viabilizar o desenvolvimento destas diferentes áreas de pesquisa, torna-se necessário a construção de um clinostato, o qual apresente características específicas como: controle de velocidade de rotação de acordo com a necessidade do processo que está sendo realizado, e a utilização de frascos diferentes segundo as especificação experimentais, ampliando assim, não só o desenvolvimento da pesquisa interdisciplinar e com instituições estrangeiras, mas a geração de patentes também.

O segundo interesse no projeto de um novo clinostato está na avaliação do efeito que o terceiro eixo em uma mesma amostra possa gerar em comparação com outra amostra no clinostato da versão anterior, mantendo as mesmas condições de velocidade, temperatura e humidade. Esse desenvolvimento justifica-se por se tratar de um trabalho de caráter inovador no Brasil, visto que as alterações realizadas no projeto do Clinostato Tridimensional do Centro de Microgravidade/PUCRS (MicroG), Brasil, como a adição de mais um eixo de rotação e o controle de velocidade podem proporcionar novas linhas de pesquisa na área de saúde.

1.2 OBJETIVOS

Objetivo geral:

Desenvolver um clinostato 3D com três eixos de mesma velocidade de rotação que permita a troca de suportes de amostras utilizadas no Laboratório de Farmácia Aeroespacial *Joan Vernikos*.

Objetivos específicos:

- Projetar um novo protótipo que permita o ajuste de velocidade, acomode a maior capacidade de amostras possível, que possua um controle de posicionamento das amostras para facilitar a retirada das mesmas ao final de cada experimento e que possa ser construído com materiais leves.
- Simular a estrutura e o sistema mecânico do clinostato 3D contendo três eixos no *software PRO Engine Wildfire 3.0*.
- Desenvolver diferentes tipos de suportes para aplicação em diferentes tipos de amostras, utilizando o menor número de componentes na construção mecânica e garantindo a condição de microgravidade nas amostras, sem centrifugá-las.

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Os fundamentos teóricos esclarecidos a seguir procuram promover um conhecimento científico necessário para a compreensão do projeto. Os termos utilizados, a exemplificação do funcionamento de um clinostato e a definição de microgravidade utilizada no meio aeroespacial dentro dos fundamentos da física são alguns destes conhecimentos.

2.1 GRAVITAÇÃO E GRAVIDADE

Os termos gravidade e gravitação são muitas vezes utilizados para explicar a mesma coisa, mas existe uma diferença entre os dois (RUSSOMANO, 2008). A gravitação ou força gravitacional é a força de atração que existe entre dois objetos que possuem massa. A gravidade está relacionada ao campo criado por uma distribuição de massa no espaço-tempo. A diferença é que a gravidade (campo) existe no caso de não haver uma massa, enquanto a força gravitacional está presente apenas se houver uma massa de teste no ponto. É a força gravitacional, que ocorre entre a Terra e os corpos em suas proximidades; a força que age para atrair objetos em direção à Terra.

A gravidade na superfície da Terra pode ser expressa como 1G (maiúscula G , ao contrário da aceleração da gravidade g). Corpos com massa menor que a Terra terão gravidade com valores inferiores a 1G (por exemplo, a Lua possui uma gravidade 1/6G em sua superfície) e corpos com massa maior do que a Terra terão os valores mais elevados do que 1G (planeta Júpiter tem 3.5G).

2.2 FORÇA RESULTANTE

Uma força resultante sobre uma massa produz uma aceleração no corpo, cuja direção é a mesma desta força. A relação entre as forças e a aceleração dos corpos foi formulada pelo físico e matemático inglês Isaac Newton (1642 – 1727). A primeira Lei de Newton expressa que na ausência de uma força resultante, um corpo em repouso permanece em repouso e um corpo em movimento permanece em movimento com velocidade constante. Tais sistemas são chamados sistemas de referência inerciais. A segunda Lei de Newton define que a força resultante (\vec{F}_{res}) sobre um corpo é igual ao produto da massa do corpo (m) pela sua aceleração (\vec{a}) (HALLIDAY, 2006).

$$\vec{F}_{res} = m \cdot \vec{a} \tag{1}$$

2.3 MASSA INERCIAL

Massa representa a quantidade de matéria de um corpo, geralmente utilizada para medir a capacidade de um corpo em resistir às mudanças de movimento, conhecida como inércia. A massa também independe das vizinhanças do corpo e do método adotado para medi-la (SERWAY, 1996).

2.4 FORÇA GRAVITACIONAL

Uma força gravitacional sobre um corpo é a força atrativa exercida entre dois corpos, como a Terra ou algum outro corpo. Para a Terra, a força é dirigida para baixo em direção ao solo, ou seja, para o centro do planeta. O módulo da força gravitacional (F_g) é igual ao produto da massa (m) pelo módulo da aceleração gravitacional (g) (HALLIDAY, 2006).

$$F_g = m \cdot g \quad (2)$$

2.5 MICROGRAVIDADE

A expressão microgravidade pode ser interpretada de diferentes formas, dependendo do contexto. O prefixo micro (μ) é derivado de *mikros* de origem grega, que significa "pequeno". Segundo esta definição, um ambiente de microgravidade é aquele que confere a um objeto uma aceleração pequena em comparação com aquela produzida na sua superfície da Terra. Na prática, essas acelerações irão assumir valores da ordem de 0,001% a 0,00001% da aceleração gravitacional da Terra (RUSSOMANO, 2008).

A microgravidade pode ser observada quando um corpo qualquer se encontra em um ponto hipotético do espaço cósmico, tão longe de qualquer corpo celeste que os efeitos das forças gravitacionais entre o corpo e os outros astros são desprezíveis (HALLIDAY, 1993), ou quando um corpo qualquer está exatamente em um ponto de equilíbrio entre forças gravitacionais de dois corpos celestes (BARCELOS NETO, 2004), ou quando um corpo qualquer está em queda livre (KNIGHT, 2009). A queda livre ocorre quando um corpo está unicamente sobre a influência da força gravitacional (HALLIDAY, 1993).

A chamada “ausência de peso” vivenciada pelos astronautas não é devido à falta de gravidade, mas ao fato do ônibus espacial e tudo que está contido em seu interior estarem em constante queda livre. A atmosfera residual existente na altitude da órbita irá exercer um efeito de freamento na nave e, como um objeto no seu interior não está sujeito a esta

desaceleração, haverá uma aceleração aparente mínima do objeto em relação à nave (AGÊNCIA ESPACIAL BRASILEIRA, 2004).

Na Terra, existem alguns métodos para simular a microgravidade em humanos, como a cama de simulação de microgravidade. Esta cama utiliza a técnica de inversão postural, *Head Down Tilt* (HDT). Existem ainda a imersão na água, criando um sistema de flutuabilidade neutra, a suspensão corporal total ou parcial, e o clinostato para pequenos organismos (RUSSOMANO, 2008).

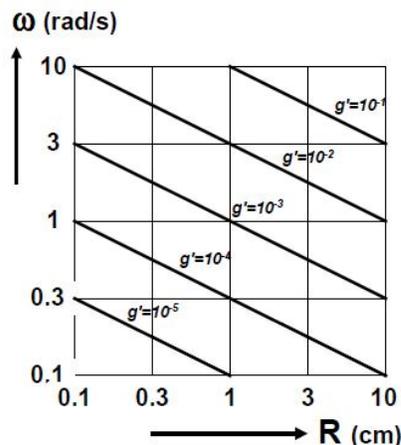
Assim, o termo microgravidade é preferível à ausência de gravidade. Como dito anteriormente, mesmo no espaço, condições de gravidade de zero não existem em um voo espacial e os astronautas são normalmente expostos a uma microgravidade de 0,0001% a 0,00001% de aceleração gravitacional da Terra, o que aumenta para 0,001% durante manobras de naves espaciais (RUSSOMANO, 2008).

O cálculo para encontrar o fator de microgravidade resultante nas amostras ao redor do centro de rotação do clinostato é dada pela equação:

$$g' = \frac{a_{cp}}{g_o} = \frac{\omega^2 \cdot R}{g_o} \quad (3)$$

$$a_{cp} = \omega^2 \cdot R \quad (4)$$

Onde, g_o é a aceleração gravitacional da Terra ($9,81 \text{ m/s}^2$), R é o raio da trajetória da amostra, a_{cp} é a aceleração centrípeta (m/s^2) e ω é a velocidade angular da amostra (rad/s). Por exemplo, se a velocidade angular for de $\omega = 1 \text{ rad/s}$ e para uma simulação de microgravidade de $g' = 10^{-3}$, o diâmetro externo que a amostra deve ser afastada do centro de rotação é 10 mm (HUIJSER, 2000). A Figura 4 mostra o fator de microgravidade g' para diferentes velocidades angulares.

Figura 4 - Gráfico do fator de equivalência g' da microgravidade.

Fonte: Huijser, 2000.

2.6 HIPOGRAVIDADE

O termo hipogravidade é utilizado para relacionar a força gravitacional de outros corpos celestes, quando comparados com a Terra, que possuem massas menores que esta, e conseqüentemente aceleração gravitacional menor. Um ambiente de hipogravidade ocorre quando a força da gravidade é menor ou está abaixo da existente na superfície da Terra. Os valores são expressos entre 0 e 1 G.

A aceleração devido à gravidade na superfície de um planeta varia diretamente com a massa e inversamente proporcional ao quadrado de seu raio. Por exemplo, a Lua está a 384.403 km de distância da Terra e o seu diâmetro é de 3476 km. A aceleração da gravidade é $1,62 \text{ m/s}^2$, porque a Lua tem menor massa e raio do que a Terra, ou seja, é cerca de um sexto da aceleração da gravidade na Terra, que é de $9,81 \text{ m/s}^2$. Marte e a Terra têm diâmetros de 6.775 e 12.775 km, respectivamente. A massa de Marte é 0,107 vezes do que a da Terra. Isso faz com que a aceleração gravitacional na superfície de Marte (g_m) seja $3,73 \text{ m/s}^2$ (RUSSOMANO, 2008).

2.7 FORÇA CENTRÍFUGA

Se um corpo se desloca ao longo de uma circunferência ou arco circular com raio e velocidade escalar constante, ele está em movimento circular uniforme. Para realizar este movimento, deve haver uma força com direção voltada para o centro do círculo ou arco. Esta força gera uma aceleração chamada aceleração centrípeta. A força centrípeta é igual à massa

do corpo multiplicada pela aceleração centrípeta (HALLIDAY, 2006). No caso de um clinostato, a força centrípeta age sobre o frasco da amostra.

A amostra dentro do clinostato é empurrada para fora da órbita circular, estando em um sistema de referência não-inercial. A força que parece empurrar um objeto para fora de uma trajetória circular é chamada de força centrífuga (KNIGHT, 2009). Contudo, esta não é uma força real, é uma força fictícia que ocorre em sistemas de referência não inerciais. (SERWAY, 2004). Assim, a força centrífuga seria a força que poderia expressar o movimento interno da amostra.

Neste sistema de referência não-inercial, a força centrífuga (F_{cf}) possui módulo igual à força centrípeta, mas em direções opostas, se o deslocamento ocorrer em movimento circular uniforme. Essa hipótese pode ser considerada, pois a força de Coriolis não é considerada para avaliar o comportamento das amostras. Isso se deve ao fato dos frascos de amostra líquidas estarem totalmente preenchidos, impossibilitando deslocamento radial.

Assim, pode-se determinar a força centrífuga à qual a amostra está submetida através da equação (5):

$$F_{cf} = m \cdot a_{cf} = m \cdot \omega^2 \cdot R = \mu \cdot V \cdot \left(\frac{2\pi \cdot N}{60}\right)^2 \cdot R \quad (5)$$

A massa pode ser expressa em relação à sua massa específica e volume:

$$m = \mu \cdot V \quad (6)$$

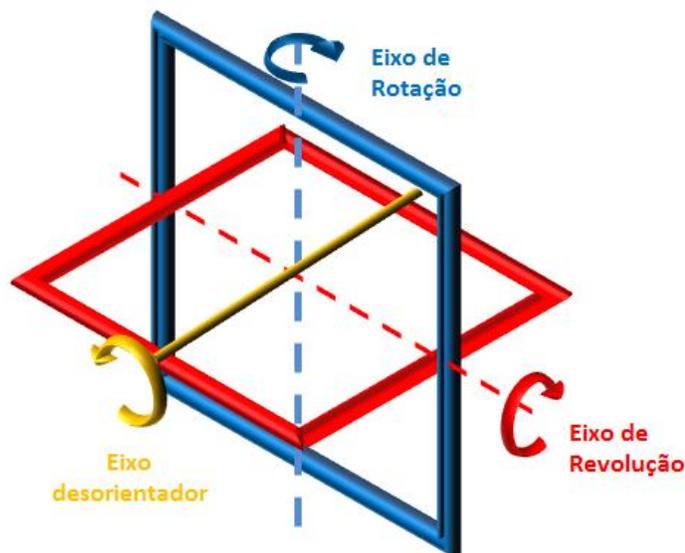
Onde, m é a massa da amostra (kg), a_{cf} é a aceleração centrífuga da amostra (m/s^2), R é o raio da trajetória da amostra, ω é a velocidade angular da amostra (rad/s), μ é a massa específica da amostra (kg/m^3), V é o volume da amostra (m^3) e N é o número de rotações por minuto da amostra (rpm).

2.8 CLINOSTATO

Um dispositivo que pode simular a microgravidade na Terra é o clinostato. Os clinostatos normalmente referidos como tridimensionais possuem apenas dois eixos de rotação, um chamado de eixo de rotação e outro de revolução. Nestes dispositivos não há rotação real no terceiro eixo, apenas uma movimentação nas três dimensões resultante das rotações em dois eixos. Através de um clinostato tridimensional com três eixos de rotação separados em 90°

cada um ou perpendiculares entre si, conforme os planos cartesianos, seria possível obter resultados diferentes aos dos clinostatos de dois eixos. O terceiro eixo poderia funcionar como o eixo desorientador, garantindo aleatoriedade completa do vetor de gravidade, assim uma simulação melhor de microgravidade.

Figura 5 - Referência e identificação dos eixos do clinostato tridimensional de três eixos.



Fonte: O autor (2013).

Os clinostatos podem ser construídos de forma a ter um, dois ou mais eixos de rotação e podem ser de rotação lenta ou rápida. Os clinostatos de rotação lenta devem rodar com uma velocidade angular constante, a qual deve ser suficientemente pequena (2-4 rpm) nas quais o objeto em estudo deve estar o mais centralizado possível dos dois eixos de rotação para evitar o efeito de centrifugação (DEDOLPH e DIPERT, 1971).

São diversas as aplicações do clinostato para a realização de estudos em microgravidade simulada, indo desde os mais variados tipos de células e microrganismos (vírus e bactérias), passando por pequenos animais, plantas, alimentos, fármacos, proteínas, enzimas, DNA, até a pesquisa da associação do efeito da radiação cósmica em espécimes biológicas com a microgravidade (DEDOLPH e DIPERT, 1971). A simulação de microgravidade em um clinostato tridimensional depende muito da velocidade de rotação e da distância da amostra do centro de rotação (HUIJSER, 2000). Estas duas características combinadas devem ser avaliadas para não ocorrer a centrifugação das amostras ao invés de uma simulação de microgravidade.

Há outros dispositivos de posicionamento aleatório para simular microgravidade. A Tabela 1 compara, de forma resumida, estes aparelhos em seus princípios para alcançar a microgravidade, suas principais qualidades e defeitos (MANTI, 2006).

Tabela 1 – Sinopse dos principais aparelhos usados para simular microgravidade em Terra.

Aparelho	Princípio de operação	Principais Qualidades	Limitações
<i>Clinostat</i>	Rotação axial	Ambiente fluido	Sem troca gasosa
<i>Random Positioning Machine (Clinostat 3D)</i>	Randomização direcional	Ambiente fluido	Sem troca gasosa
<i>Rotating Wall Vessel</i>	Rotação de corpos sólidos	Baixa deformação de corpos	Aceleração oscilatória
<i>Free Fall Machine</i>	Queda livre por tempo limitado	Condições de queda livre	Estresse mecânico
<i>Centrifuge Free Fall Machine</i>	Queda livre acoplada com centrifugação	Possível gravidade parcial	Tempo reduzido
<i>Chemostat</i>	Neutralização dinâmica da sedimentação	Pequena dependência do tamanho da célula	Criação de bolhas
<i>Neutral Buoyancy</i>	Neutralização estática da sedimentação	Pequena dependência do tamanho da célula	Crescimento celular baixo

Fonte: MANTI, 2006.

A Tabela 2 faz um comparativo entre os três protótipos anteriores desenvolvidos no Centro de Microgravidade da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul. O

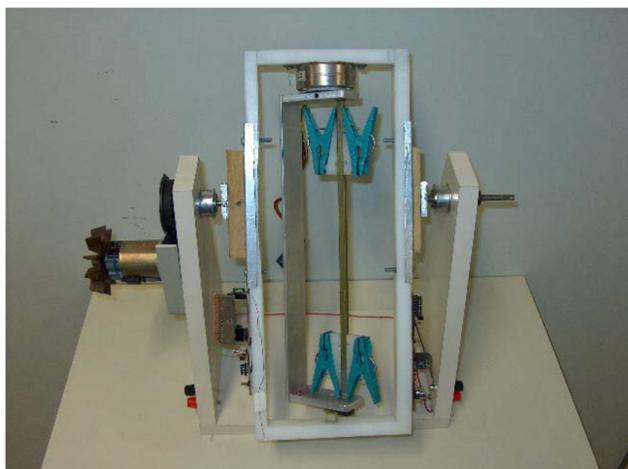
desenvolvimento dos protótipos mostra três tendências de melhorias a cada protótipo, como controle maior de velocidade, capacidades maiores de amostras e fabricação com materiais mais leves, obtendo um peso total inferior a um construído com o mesmo material utilizado em um dos protótipos anteriores. O terceiro protótipo de clinostato 3D tem dois eixos de rotação (100 mm de comprimento, cada um), onde quatro amostras podem ser ligadas a cada um e testadas ao mesmo tempo. A velocidade de ambos os eixos de rotação foi fixada em 1,6 rpm. A construção do terceiro protótipo obteve uma estabilidade maior utilizando uma velocidade constante, porém não foi possível analisar qual o efeito com aumento ou diminuição da velocidade sobre a amostra.

Tabela 2 – Comparativo dos clinostatos do Centro de Microgravidade.

	1º Protótipo	2º Protótipo	3º Protótipo
Velocidade	> 10 rpm	1 a 8 rpm	1,6 rpm
Afastamento do centro de rotação	0	0	10 mm
Dimensões (mm) Alt. x Larg. x Prof.	490 x 270 x 170	300 x 250 x 290	324,5 x 385 x 220
Material	Madeira/Plástico	Aço/Alumínio	PVC expandido
Motor	Passo + DC 12 V	2 DC 10 V	2 DC 12 V
Engrenagens	Não possui	Dois sistemas	Dois sistemas
Correias	Não possui	Não possui	Duas correias
Amostras	4	2	8
Ano de publicação	2004	2004	2007

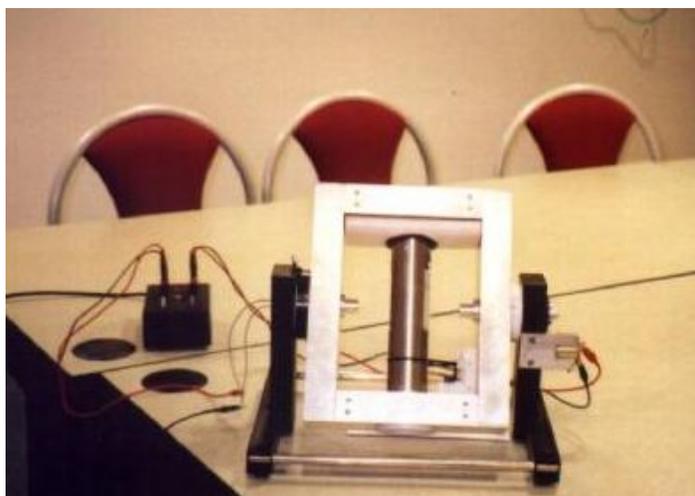
Fonte: MARTINELLI, 2007.

Figura 6 - Primeiro protótipo de clinostato do Centro de Microgravidade de 2004.



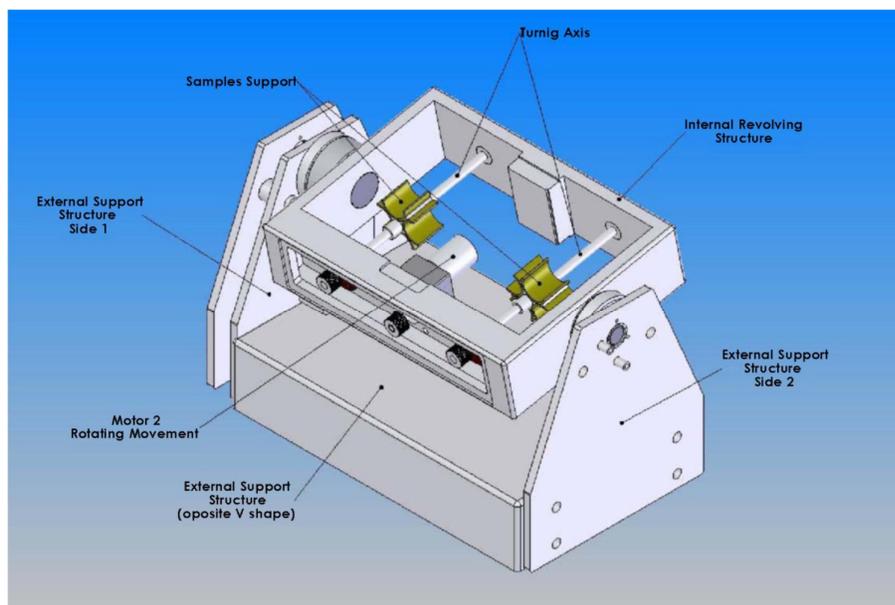
Fonte: MicroG, 2013.

Figura 7 - Segundo protótipo de clinostato do Centro de Microgravidade de 2004.



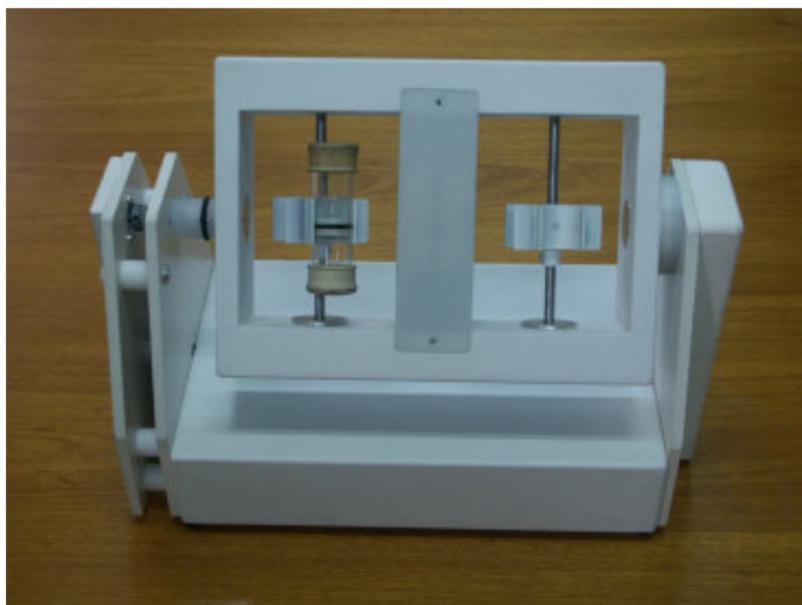
Fonte: MicroG, 2013.

Figura 8 - Terceiro protótipo desenhado em *CAD design software SolidWorks* do Centro de Microgravidade.



Fonte: Russomano 2008, página 55.

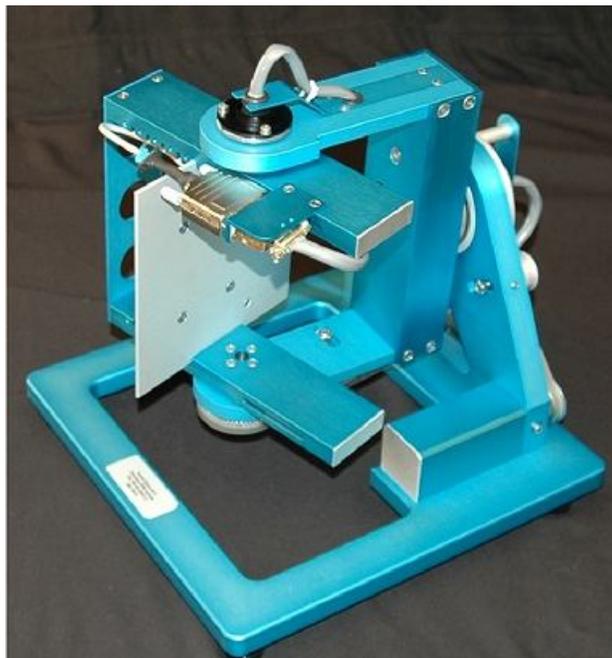
Figura 9 - Terceiro protótipo de clinostato do Centro de Microgravidade de 2007.



Fonte: MicroG, 2013.

Existem diversas pesquisas com clinostatos tridimensionais com três eixos de rotação em outros países como Dinamarca, Alemanha e Holanda. O Brasil ainda não possui qualquer clinostato deste tipo com pesquisas publicadas.

Figura 10 - RPM (clinostato 3D) do *Dutch Space an EADS Astrium company*, Holanda.



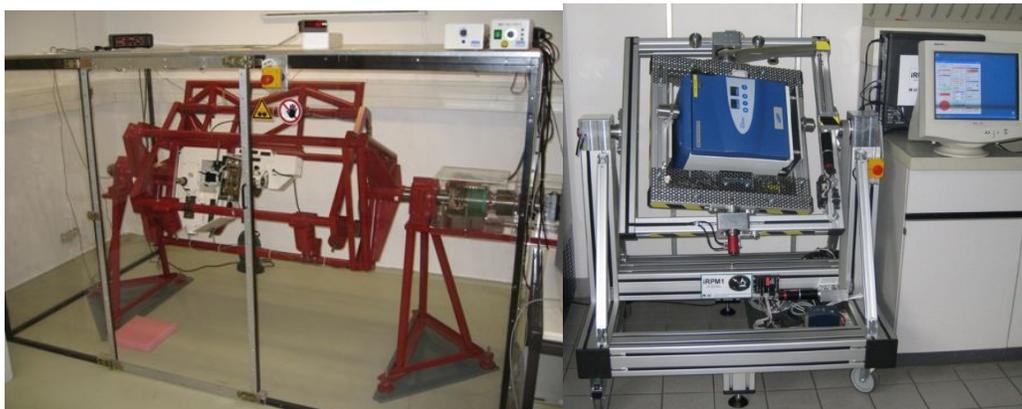
Fonte: Dutch Space, 2013.

Figura 11 - RPM (clinostato 3D) do *Space Garden Project*, Alemanha.



Fonte: Space Garden, 2013.

Figura 12 - Clinostato 2D e RPM (clinostato 3D) do *Laboratory of Space Medicine and Space Pharmacology*, Universidade de Aarhus, Dinamarca.



Fonte: Grimm, 2013.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Em um primeiro momento, o clinostato será modelado virtualmente e feita a simulação dinâmica de seus mecanismos e análise estrutural através do *software PRO Engineer*. A proposta é que este apresente ajuste da velocidade de rotação de 1,0 a 8,0 rpm e esta seja constante nos três eixos, *timer* de funcionamento, referência do posicionamento (obter mesma posição inicial e final), sistema para acoplamento de diferentes suportes para amostras, monitoramento de temperatura, umidade, além de uma interface de controle e aquisição destes dados com um computador com comunicação via rádio frequência. Todas estas características serão especificadas para serem consideradas no projeto do novo protótipo.

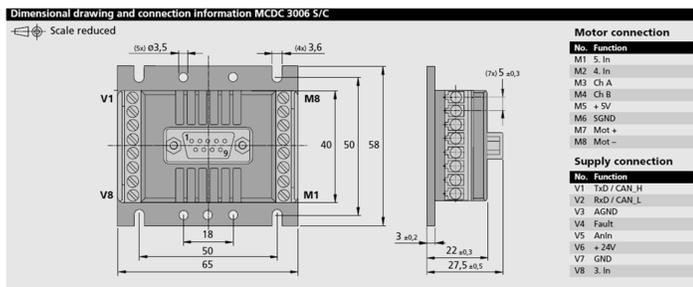
Existem dois tipos de clinostatos tridimensionais, aqueles com dois eixos e os com três eixos, divulgados em diversas pesquisas; entretanto não há estudos comparativos entre eles, nem qual é a influência da adição de mais um eixo de rotação sobre os microrganismos e processos químicos submetidos à simulação de microgravidade.

3.1 MATERIAIS

O clinostato tridimensional será concebido com material acrílico que confira uma boa estabilidade, resistência à corrosão, facilidade de aquisição e flexibilidade de projeto. Para os movimentos, será utilizado um micromotor DC. A transmissão dos movimentos do motor será por sistemas de engrenagens e correias sincronizadas. Serão utilizadas quatro polias com 36 dentes arredondados para correia de 15 mm de largura em Nylon com passo de 3 mm.

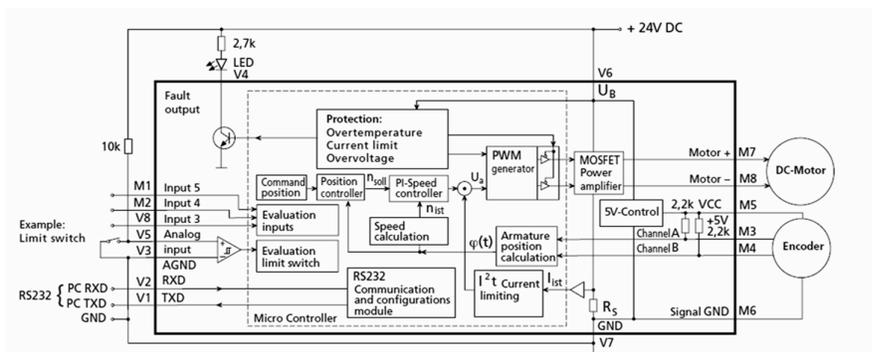
Selecionou-se o micromotor com escovas modelo 1331024SR da Faulhaber, capaz de atingir a velocidade de 10,6 RPM e torque de até 11,2 mN/m (em trabalho intermitente). Acoplado ao micromotor será usado um *encoder* magnético, o que confere ao sistema boa precisão no controle de velocidade e posicionamento. Trata-se do modelo IE2-400, também da fabricante Faulhaber. Para o acionamento do micromotor responsável pelos movimentos de rotação e de revolução se faz necessário a utilização de um *driver* de potência, o qual aceite operar em uma temperatura superior a 37°C, sem comprometer o seu funcionamento. Desta forma pode-se alterar, conforme a demanda, a velocidade e sentido de giro. Foi escolhido um *driver* com controle de velocidade modelo MCDC 3006 S do fabricante Faulhaber (Figura 13), apropriado para o motor e *encoder* escolhidos anteriormente. A Figura 14 apresenta a esquematização da concepção elétrica do driver de potência.

Figura 13 - Dimensões, *inputs* e *outputs* do *drive*.



Fonte: Faulhaber, 2013.

Figura 14 - Esquema elétrico das ligações do *drive*.



Fonte: Faulhaber, 2013.

O clinostato muitas vezes operará dentro de uma estufa climatizada (incubadora), onde a condição de temperatura será de 37°C e a de umidade relativa próxima de 95%. Os sensores serão utilizados para o monitoramento do ambientes climatizados.

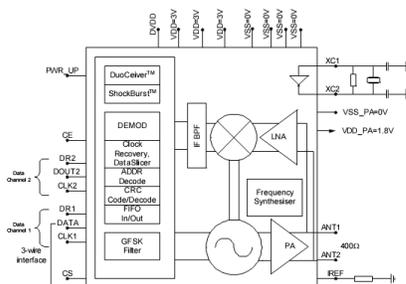
3.2 COMUNICAÇÃO

O sistema de comunicação remota será desenvolvido fazendo-se uso do *transceiver* de rádio frequência da *Wenshing* modelo TRW24G. Este produto apresenta baixo custo, operação simplificada e bom alcance, justificando seu uso neste projeto. O TRW24G baseia-se no circuito integrado da *Nordic* nRF2401, porém, já vem num circuito completo, disponibilizando apenas as entradas e saídas para operação. A *Wenshing* optou por um cristal de 16MHz sendo a única variável não configurável do *transceiver*. Outras características do *transceiver* são:

- Taxas de transmissão de até 1Mbps;
- Operação Multicanal (125 canais);

- Endereços de até 40bits;
- Possibilidade da presença de Cyclic Redundancy Check.CRC;
- Recepção simultânea em dois canais;
- Operação a partir de 2,4GHz;
- Alcance de até 280m.

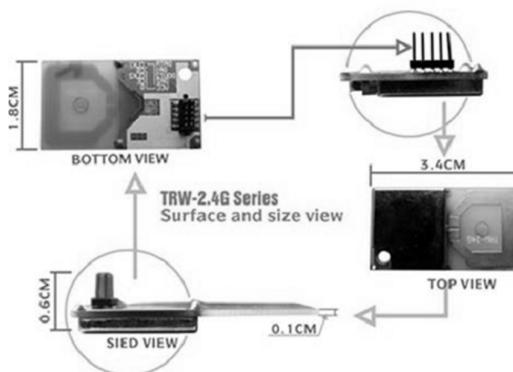
Figura 15 - Diagrama de Blocos do componente, fornecido pelo fabricante do *transceiver*.



Fonte: Nordic, 2013.

Na Figura 16, tem-se a demonstração das vistas do *transceiver* produzido pela *Wenshing*.

Figura 16 - Vistas do *transceiver* TRW24G.



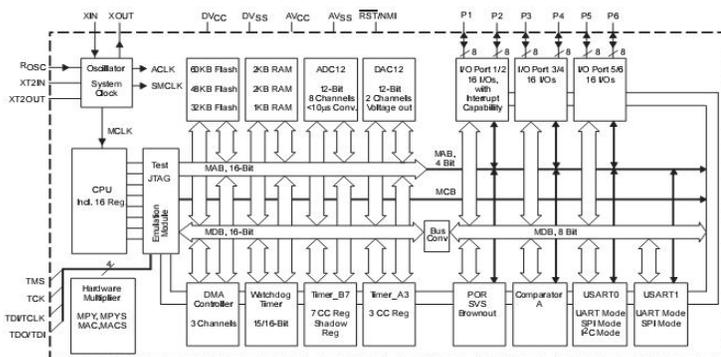
Fonte: Laipac, 2013.

Devido ao fato deste projeto requerer monitoração e acionamento remoto serão criados diferentes programas: o ambiente visual no qual o operador monitorará e alterará os parâmetros de funcionamento; o *firmware* contida no *transceiver* conectado ao computador pessoal; e o *firmware* do controlador que está no clinostato.

3.3 CONTROLADOR

O clinostato necessitará de um controlador das funções digitais. Entre as funções que este desempenha, tem-se: configuração e escrita do *display* de caracteres; comunicação serial e com o *transceiver*; leitura do sensor de temperatura, umidade e sensores óticos. Como controlador das funções digitais deste projeto, será utilizado o micro-controlador da *Texas Instruments* modelo MSP430f149.

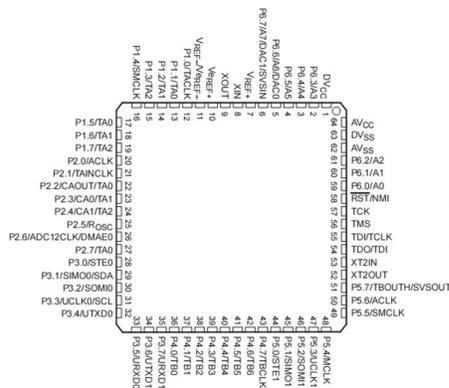
Figura 17 - Diagrama de blocos do componente MSP430f149.



Fonte: Texas, 2013.

A Figura 18 apresenta o diagrama dos pinos fornecido pelo fabricante.

Figura 18 - Diagrama dos pinos do componente MSP430f149.



Fonte: Texas, 2013.

Este projeto requer, para o funcionamento dentro de uma estufa climatizada, duas características importantes: gerar o mínimo de influência no ambiente interno da estufa e confiabilidade de todos os componentes para não ocorram paradas no meio de estudos.

Assim, optou-se por utilizar uma fonte chaveada comercial com saída de 24 Volts, do fabricante XP POWER, modelo CU20-14.

3.4 ALIMENTAÇÃO

As fontes chaveadas utilizam transformadores e circuitos de filtros menores e mais baratos que as fontes lineares, permitindo assim o uso de uma fonte compacta e com potência suficiente para este projeto. Fontes chaveadas também apresentam uma menor variação de temperatura durante o funcionamento.

3.5 MÉTODO DE SIMULAÇÃO

A análise estrutural do projeto do clinostato é uma etapa fundamental no desenvolvimento do protótipo. A utilização do *software PRO Enginner*, permitirá analisar o protótipo virtual, o qual fornecerá diversas vantagens, como analisar a estrutura do prótipo virtual para diminuir ou eliminar as insterferências de montagem e as interferências dos mecanismos. Possibilita também proporcionar e verificar a melhor forma de construção, reduzindo o tempo de definição do projeto final.

A simulação estrutural do clinostato será realizada através de dois módulos do *software PRO Engineer, Mechanica e Mechanism*. O módulo *Mechanica* será utilizado para analisar os componentes criticos do protótipo, ou seja, os componentes que sofrerão maior esforço. Serão analisados os deslocamentos dos componentes e seus pontos de tensão devido às forças do peso das amostras e da aceleração do motor. O módulo *Mechanism* proporcionará a analise da interação dos componentes, se haverá interferências, erros e melhorias no protótipo virtual.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados demonstrados neste capítulo foram separados por fase de desenvolvimento com o objetivo de promover e facilitar a discussão destas. O desenvolvimento deste projeto foi dividido em: projeto e modelagem, suporte para frascos, simulação mecânica, simulação do mecanismo e protótipo.

4.1 FASE I – PROJETO E MODELAGEM

A concepção inicial do novo projeto de clinostato tridimensional foi baseada em todos os itens na proposta montada através dos objetivos; porém para remodelagem ainda havia um limitante espacial. Em determinados experimentos, o clinostato será utilizado dentro de uma incubadora, ambiente climatizado, para o crescimento das amostras. Para isso, foram investigadas as incubadoras disponíveis no departamento de microbiologia da universidade e, foi observado que o mesmo possui três incubadoras disponíveis para a incubação das amostras:

1 - GRANDE: Marca Fanem, modelo 347 CD.

Dimensão: 500 mm de largura x 350 mm de profundidade x 1150 mm de altura.

2 - MÉDIA: Marca De Leo & Cia Ltda.

Dimensão: 400 mm de largura x 400 mm de profundidade x 500 mm de altura.

3 - PEQUENA: Marca Fanem, modelo Orion 502.

Dimensão: 340 mm de largura x 380 mm de profundidade x 400 mm de altura.

Figura 19 - Estufa incubadora, marca Fanem, modelo 347 CD.

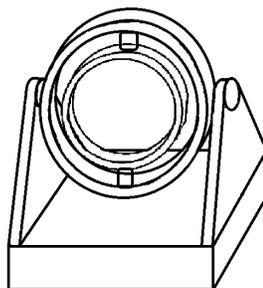


Fonte: Fanem, 2013.

A incubadora pequena foi desconsiderada para uso, visto que possui uma área disponível limitada e já não é utilizada nem com o clinostato anterior. O aumento da capacidade de frascos do clinostato foi limitado também pela área disponível dentro das incubadoras. Assim, as dimensões máximas estabelecidas para o clinostato são 380 mm de largura, 340 mm de profundidade e 500 mm de altura. Estas dimensões garantem seu uso tanto para incubadora média como a grande.

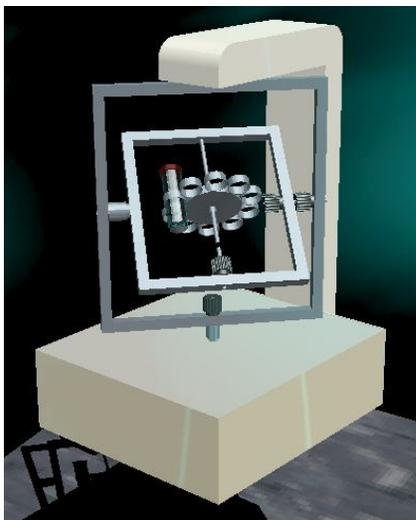
O modelo de clinostato 3D anterior apresenta uma dificuldade na colocação e remoção dos frascos dos suportes. Através de diversas análises para melhorar o sistema fixação das amostras e o acesso ao local, o *layout* do protótipo foi sendo modificado. É possível observar a evolução através das imagens a seguir.

Figura 20 – Primeiro esboço de *layout* para o novo clinostato.



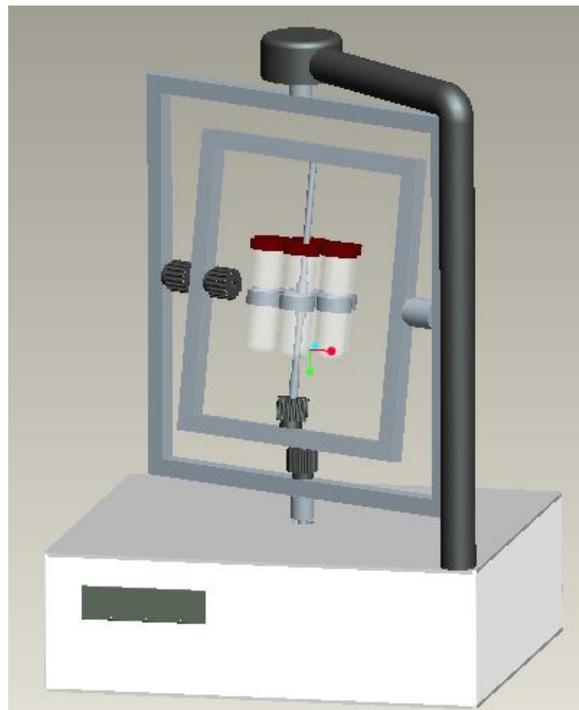
Fonte: O autor (2013).

Figura 21 - *Layout* apresentado em congresso.



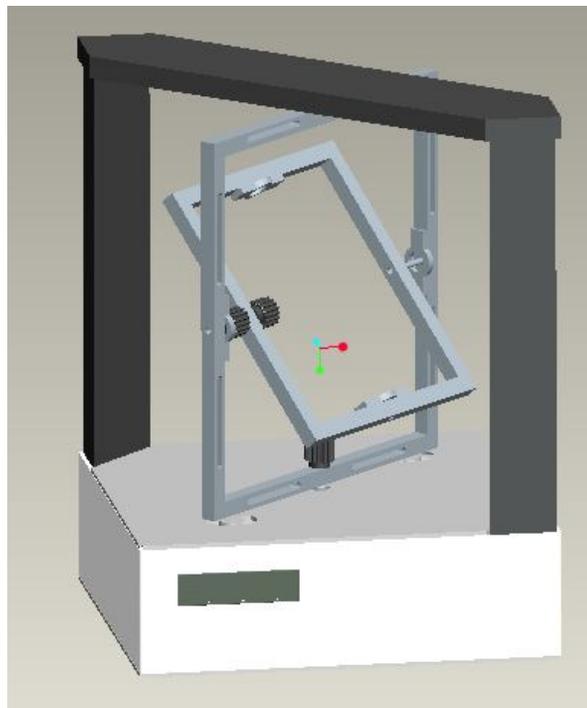
Fonte: Alves, 2012.

Figura 22 - Evolução do *layout* do novo clinostato.



Fonte: O autor (2013).

Figura 23 - *Layout* final do novo clinostato.



Fonte: O autor (2013).

As principais modificações no *layout* têm como objetivo dar mais leveza e sustentação para facilitar o transporte entre a bancada, a incubadora e o local de estocagem. Existem diferentes materiais disponíveis no mercado como o PVC, policarbonato, acrílico, polietileno e polipropileno. O material escolhido para a montagem do clinostato foi o polimetilmetacrilato, mais conhecido como acrílico. O acrílico é um material termoplástico rígido, obtido pela polimerização do metacrilato de metilo. Disponível sob a forma de chapa, tubo, barra, várias possibilidades de cores, espessuras e dimensões. É um material fácil de transformar e com inúmeras aplicações, acessível financeiramente no mercado, leve e muito resistente.

Há diversas empresas que fornecem peças em acrílico conforme a especificação do desenho técnico, aumentando a qualidade do protótipo e reduzindo o custo de fabricação. As peças tridimensionais desenhadas serão transferidas para o formato de desenho técnico através de uma ferramenta disponibilizada no *software PRO Enginee*. Estes desenhos serão utilizados para a cotação e fabricação das peças para o novo clinostato 3D.

4.2 FASE II – SUPORTE PARA OS FRASCOS

Um objetivo específico desde projeto é determinar suportes com o maior número de frascos possíveis mantendo a condição de microgravidade, segundo Huijser (2000), e sem que ocorra a centrifugação das amostras. Uma linha de pesquisa do MicroG é o desenvolvimento de pesquisas interdisciplinares, as quais serão possíveis pela troca de suportes para amostras de pequenos frascos a amostras mais robustas ou mesmo placas de Petri avaliadas em microgravidade simulada. As restrições limitantes dos suportes são o volume interno disponível no centro rotacional, a distância da amostra ao centro rotacional e a velocidade de rotação.

Simplificando o cálculo de microgravidade:

$$g' = \frac{a_{cp}}{g_0} = \frac{\omega^2 \cdot R}{g_0} = \left(\frac{2\pi \cdot N}{60} \right)^2 \cdot \frac{R}{g_0} = 1,1178 \cdot 10^{-3} \cdot N^2 \cdot R \quad (7)$$

Onde, g_0 é a aceleração gravitacional da Terra ($9,81 \text{ m/s}^2$), R é o raio da trajetória da amostra (m), a_{cp} é a aceleração centrípeta (m/s^2), ω é a velocidade angular da amostra (rad/s) e N é o número de rotações por minuto (rpm).

A força centrípeta age sobre o frasco da amostra, resultando internamente uma força centrífuga, a qual age sobre a amostra. Possuem o mesmo módulo, porém direções opostas. O cálculo da força centrífuga:

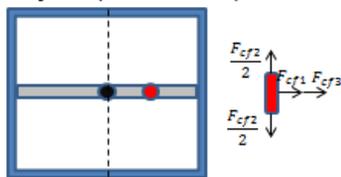
$$F_{cf} = m \cdot a_{cf} = m \cdot \omega^2 \cdot R = \mu \cdot V \cdot \left(\frac{2\pi \cdot N}{60} \right)^2 \cdot R \quad (8)$$

Onde, m é a massa da amostra (kg), a_{cf} é a aceleração centrífuga da amostra (m/s^2), R é o raio da trajetória da amostra, ω é a velocidade angular da amostra (rad/s), μ é a massa específica da amostra (kg/m^3), V é o volume da amostra (m^3) e N é o número de rotações por minuto da amostra (rpm).

A composição de três eixos provoca uma centrifugação maior na amostra e com uma variação no decorrer da clinorrotação. A Figura 24 demonstra esta variação e demonstra que há momentos onde a amostra sofre uma força centrífuga máxima três vezes maior que em uma rotação única.

Figura 24 - Análise da força centrífuga máxima em quatro posições básicas de um frasco no clinostato tridimensional.

Posição 1 (Vista Frontal)



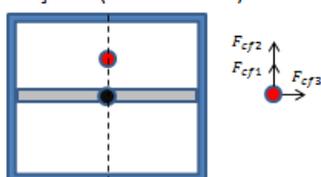
$$F_{cf1} = F_{cf2} = F_{cf3}$$

$$F_{cf} = \sqrt{\left(\frac{F_{cf2}}{2}\right)^2 + (F_{cf1} + F_{cf3})^2}$$

$$F_{cf} = \sqrt{\frac{F_{cf1}^2}{4} + 4 \cdot F_{cf1}^2} = \sqrt{\frac{15 \cdot F_{cf1}^2}{4}} = 1,93 \cdot F_{cf1}$$

$$F_{cf} = 1,93 \cdot \mu \cdot V \cdot \left(\frac{2\pi \cdot N}{60}\right)^2 \cdot R$$

Posição 2 (Vista Frontal)



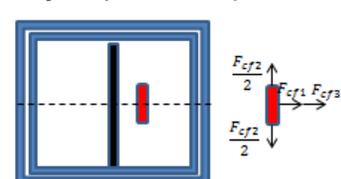
$$F_{cf1} = F_{cf2} = F_{cf3}$$

$$F_{cf} = \sqrt{(F_{cf3})^2 + (F_{cf1} + F_{cf2})^2}$$

$$F_{cf} = \sqrt{5 \cdot F_{cf1}^2} = 2,24 \cdot F_{cf1}$$

$$F_{cf} = 2,24 \cdot \mu \cdot V \cdot \left(\frac{2\pi \cdot N}{60}\right)^2 \cdot R$$

Posição 3 (Vista Direita)



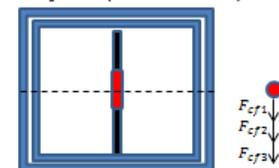
$$F_{cf1} = F_{cf2} = F_{cf3}$$

$$F_{cf} = \sqrt{\left(\frac{F_{cf2}}{2}\right)^2 + (F_{cf1} + F_{cf3})^2}$$

$$F_{cf} = \sqrt{\frac{F_{cf1}^2}{4} + 4 \cdot F_{cf1}^2} = \sqrt{\frac{15 \cdot F_{cf1}^2}{4}} = 1,93 \cdot F_{cf1}$$

$$F_{cf} = 1,93 \cdot \mu \cdot V \cdot \left(\frac{2\pi \cdot N}{60}\right)^2 \cdot R$$

Posição 4 (Vista Direita)



$$F_{cf1} = F_{cf2} = F_{cf3}$$

$$F_{cf} = F_{cf1} + F_{cf2} + F_{cf3}$$

$$F_{cf} = 3 \cdot \mu \cdot V \cdot \left(\frac{2\pi \cdot N}{60}\right)^2 \cdot R$$

Fonte: O autor (2013).

Onde, F_{cf1} é a força centrífuga (N) devido à rotação do eixo de rotação, F_{cf2} é a força centrífuga (N) devido a rotação do eixo de revolução, F_{cf3} é a força centrífuga (N) devido a rotação do eixo desorientador e $\frac{F_{cf2}}{2}$ é a força centrífuga (N) da metade do frasco dividido pela rotação do eixo de revolução.

Dependendo da amostra, há diversos tipos de frascos que podem ser utilizados. Pensando em futuras pesquisas com o clinostato, os seguintes frascos serão necessários: Falcon 5mL, Falcon 13 mL, Falcon 50 mL, placa de Petri, Eppendorf 1,5 a 2 mL, *SlideFlask* e tubo de Falcon modificado.

O frasco *SlideFlask* possibilita observar as células de cultura diretamente sobre a lâmina de microscópio. Cada *SlideFlask* é soldado por ultrassom, garantindo que não ocorra vazamentos e possui fechamento por tampa com rosca.

Tudo modificado de Falcon é um tubo que permite a troca gasosa sem derramar o meio de cultura durante a rotação. Foi concebido e desenvolvido pelo Centro de Microgravidade, porque não havia nenhum tubo com as características necessárias para o experimento. Então, utilizou-se um tubo Falcon de 50 mL modificado. A tampa foi colocada sobre o tubo Falcon, e três furos de 6,5 mm foram inseridos para permitir a troca de gases entre a cultura de células e o meio ambiente. Entre a tampa do tubo e o próprio tubo, uma membrana também foi colocada para evitar que o meio de cultura derrama-se para fora. O conjunto de tampa, membrana, e o tubo são colocados no esterilizador para evitar qualquer tipo de contaminação celular (RUSSOMANO, 2008).

Figura 25 - Tubos de falcon de 50 mL.



Fonte: LFEquipamentos, 2013.

Figura 26 - Placas de Petri.



Fonte: Pró-Análise, 2013.

Figura 27 – *SlideFlask*.

Fonte: Lambda, 2013.

Tabela 3 - Dimensão e aplicação dos frascos utilizados.

Frasco	Capacidade	Dimensão	Tipo de Cultura
Falcon	5 mL	d = 12 mm a = 75 mm	Meio de cultura líquido
Falcon	13 mL	d = 16,3 mm a = 120,45 mm	Meio de cultura líquido
Falcon	50 mL	d = 28,5 mm a = 120,2 mm	Meio de cultura líquido
Eppendorf	1,5 – 2 mL	d _m = 10,7 mm a = 42,5 mm	Meio de cultura líquido
<i>SlideFlask</i>	5 mL	b = 18 mm x 18 mm a = 50 mm	Meio de cultura líquido
Placa de Petri	20 mL	d = 100 mm a = 20 mm	Meio de cultura sólido
Tubo de Falcon modificado	35 mL	d = 28 mm a = 99,3 mm	Meio de cultura líquido

*d = diâmetro, a = altura, b = base.

Fonte: O autor (2013).

A Tabela 3 especifica cada tipo de frasco utilizado para o projeto do clinostato. Cada frasco tem uma capacidade de mililitros e tipo de amostra. Estas informações serão utilizadas para calcular o peso da amostra e especificar o formato do suporte.

As Tabelas 4 a 6, 8 e 9 possuem os resultados do fator de microgravidade e força centrífuga devido ao afastamento do centro de rotação com a variação de velocidade. As distâncias dos frascos ao centro de rotação foram definidas para comportar o máximo de amostras possíveis com facilidade de fixação dentro do espaço disponível no centro clinostato (230 mm x 200 mm). Para todos os cálculos, foi utilizada a massa específica da água de 1000 kg/m³. Analisando os resultados dos cálculos de microgravidade, todas as amostras tiveram ótimos resultados nas velocidades de 1 a 4 rpm, ou seja, apresentaram resultados dentro da faixa de microgravidade; porém é observado um fator de microgravidade de $2 \cdot 10^{-3}$ nas amostras com frasco Falcon, Eppendorf e o tubo modificado, um fator de $4 \cdot 10^{-3}$ no *SlideFlask* e um fator de $7 \cdot 10^{-3}$ nas placas de Petri. A força centrífuga máxima aceitável para a simulação de microgravidade no clinostato foi definida na ordem de 10^{-3} N para que se obtenha uma mínima centrifugação na amostra, não prejudicando a simulação. Analisando as máximas forças centrífugas demonstradas nas tabelas abaixo, pode ser observado que as forças de centrifugação, em todos os frascos analisados, variam de 10^{-3} a 10^{-6} N. A placa de Petri resultou em uma força centrífuga maior que os demais frascos de $4,5 \cdot 10^{-3}$ N para o raio de 107,7 mm e de $4,2 \cdot 10^{-3}$ N para o raio de 100 mm. Nas placas de Petri, são utilizados meios de cultura sólidos, diferente do que ocorre com os demais frascos. Então, para garantir uma simulação de microgravidade adequada, com uma centrifugação máxima de $1,0 \cdot 10^{-3}$ N, a massa específica máxima para as amostras utilizando as placas de Petri foram calculadas e podem ser observadas na Tabela 7. Como exemplo de comparação para os resultados, a massa específica de 220 kg/m³ é a mesma da cortiça e a da parafina é de 900 kg/m³.

Tabela 4 - Cálculo de microgravidade e força centrífuga máxima para frascos em vidro de 35 mL em 4 velocidades, utilizando a massa específica da água.

Nº de Amostras no Suporte	Volume da Amostra Unitária (ml)	Raio (mm)	Velocidade (rpm)	Fator Microgravidade	Massa Específica (kg/m ³)	Força Centrífuga Máxima (N)
6	35	35	1	$3,912.10^{-05}$	1000	$4,030.10^{-05}$
6	35	35	2	$1,565.10^{-04}$	1000	$1,612.10^{-04}$
6	35	35	4	$6,260.10^{-04}$	1000	$6,448.10^{-04}$
6	35	35	8	$2,504.10^{-03}$	1000	$2,579.10^{-03}$

Fonte: O autor (2013).

Tabela 5 - Cálculo de microgravidade e força centrífuga máxima para frascos Falcon em 4 velocidades, utilizando a massa específica da água.

Nº de Amostras no Suporte	Volume da Amostra Unitária (ml)	Raio (mm)	Velocidade (rpm)	Fator Microgravidade	Massa Específica (kg/m ³)	Força Centrífuga Máxima (N)
6	50	35	1	$3,912.10^{-05}$	1000	$5,757.10^{-05}$
6	50	35	2	$1,565.10^{-04}$	1000	$2,303.10^{-04}$
6	50	35	4	$6,260.10^{-04}$	1000	$9,212.10^{-04}$
6	50	35	8	$2,504.10^{-03}$	1000	$3,685.10^{-03}$
10	13	39,8	1	$4,449.10^{-05}$	1000	$1,702.10^{-05}$
10	13	39,8	2	$1,780.10^{-04}$	1000	$6,809.10^{-05}$
10	13	39,8	4	$7,118.10^{-04}$	1000	$2,723.10^{-04}$
10	13	39,8	8	$2,847.10^{-03}$	1000	$1,089.10^{-03}$
16	5	41,50	1	$4,639.10^{-05}$	1000	$6,826.10^{-06}$
16	5	41,50	2	$1,856.10^{-04}$	1000	$2,731.10^{-05}$
16	5	41,50	4	$7,422.10^{-04}$	1000	$1,092.10^{-04}$
16	5	41,50	8	$2,969.10^{-03}$	1000	$4,369.10^{-04}$

Fonte: O autor (2013).

Tabela 6 - Cálculo de microgravidade e força centrífuga máxima para placas de Petri em 4 velocidades, utilizando a massa específica da água.

Nº de Amostras no Suporte	Volume da Amostra Unitária (ml)	Raio (mm)	Velocidade (rpm)	Fator Microgravidade	Massa Específica (kg/m ³)	Força Centrífuga Máxima (N)
2	20	107,70	1	$1,204.10^{-04}$	1000	$7,086.10^{-05}$
2	20	107,70	2	$4,815.10^{-04}$	1000	$2,835.10^{-04}$
2	20	107,70	4	$1,926.10^{-03}$	1000	$1,134.10^{-03}$
2	20	107,70	8	$7,705.10^{-03}$	1000	$4,535.10^{-03}$
2	20	100,00	1	$1,118.10^{-04}$	1000	$6,580.10^{-05}$
2	20	100,00	2	$4,471.10^{-04}$	1000	$2,632.10^{-04}$
2	20	100,00	4	$1,788.10^{-03}$	1000	$1,053.10^{-03}$
2	20	100,00	8	$7,154.10^{-03}$	1000	$4,211.10^{-03}$

Fonte: O autor (2013).

Tabela 7 - Cálculo da massa específica máxima para placas de Petri em 4 velocidades, considerando uma micro força centrífuga.

Nº de Amostras no Suporte	Volume da Amostra Unitária (ml)	Raio (mm)	Velocidade (rpm)	Fator Microgravidade	Massa Específica Máxima (kg/m ³)	Força Centrífuga Máxima (N)
2	20	107,70	1	$1,204.10^{-04}$	14112	$1,00.10^{-03}$
2	20	107,70	2	$4,815.10^{-04}$	3528	$1,00.10^{-03}$
2	20	107,70	4	$1,926.10^{-03}$	882	$1,00.10^{-03}$
2	20	107,70	8	$7,705.10^{-03}$	220	$1,00.10^{-03}$
2	20	100,00	1	$1,118.10^{-04}$	15198	$1,00.10^{-03}$
2	20	100,00	2	$4,471.10^{-04}$	3800	$1,00.10^{-03}$
2	20	100,00	4	$1,788.10^{-03}$	950	$1,00.10^{-03}$
2	20	100,00	8	$7,154.10^{-03}$	237	$1,00.10^{-03}$

Fonte: O autor (2013).

Tabela 8 - Cálculo de microgravidade e força centrífuga máxima para frasco Eppendorf em 4 velocidades, utilizando a massa específica da água.

Nº de Amostras no Suporte	Volume da Amostra Unitária (ml)	Raio (mm)	Velocidade (rpm)	Fator Microgravidade	Massa Específica (kg/m ³)	Força Centrífuga Máxima (N)
36	2	51,61	1	$5,769.10^{-05}$	1000	$3,396.10^{-06}$
36	2	52,10	2	$2,330.10^{-04}$	1000	$1,371.10^{-05}$
36	2	52,10	4	$9,319.10^{-04}$	1000	$5,485.10^{-05}$
36	2	52,10	8	$3,727.10^{-03}$	1000	$2,194.10^{-04}$

Fonte: O autor (2013).

Tabela 9 - Cálculo de microgravidade e força centrífuga máxima para frasco *SlideFlask* em 4 velocidades, utilizando a massa específica da água.

Nº de Amostras no Suporte	Volume da Amostra Unitária (ml)	Raio (mm)	Velocidade (rpm)	Fator Microgravidade	Massa Específica (kg/m ³)	Força Centrífuga Máxima (N)
16	5	50,93	1	$5,693.10^{-05}$	1000	$8,378.10^{-06}$
16	5	50,93	2	$2,277.10^{-04}$	1000	$3,351.10^{-05}$
16	5	50,93	4	$9,109.10^{-04}$	1000	$1,340.10^{-04}$
16	5	50,93	8	$3,644.10^{-03}$	1000	$5,362.10^{-04}$
16	5	61,80	1	$6,908.10^{-05}$	1000	$1,017.10^{-05}$
16	5	61,80	2	$2,763.10^{-04}$	1000	$4,066.10^{-05}$
16	5	61,80	4	$1,105.10^{-03}$	1000	$1,626.10^{-04}$
16	5	61,80	8	$4,421.10^{-03}$	1000	$6,506.10^{-04}$

Fonte: O autor (2013).

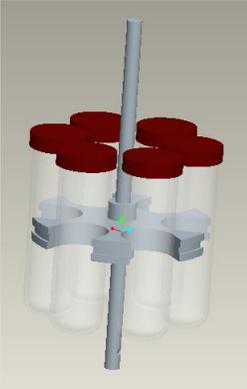
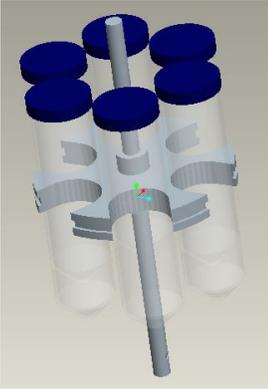
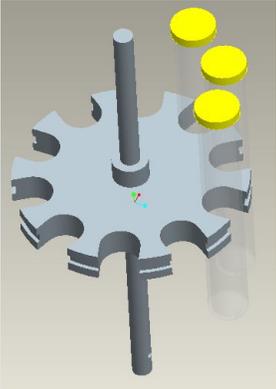
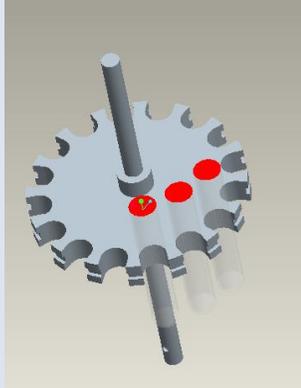
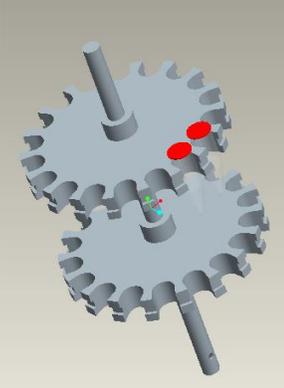
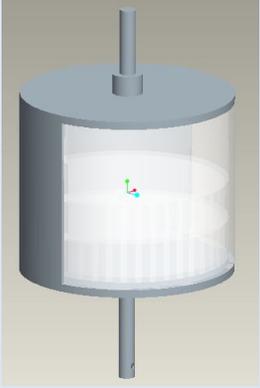
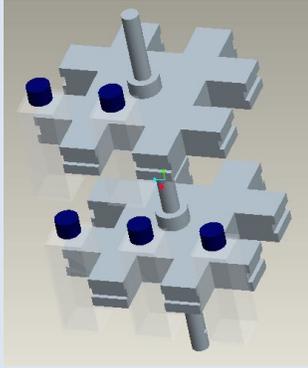
Os frascos de *SlideFlask* possuem um formato quadrado, o qual necessitou de uma fixação diferenciada. A fixação deste suporte diferentemente dos outros suportes é quadrada, onde 8 frascos possuem uma distância do centro de rotação de 50,93 mm e 8 frascos uma distância de 61,80 mm. Considerando que o fator de microgravidade é dependente da distância do centro de rotação, o resultado da clinorrotação destes frascos será diferente para os frascos em diferentes raios.

É importante ressaltar que todas estas tabelas, com os seus respectivos cálculos de microgravidade, força centrífuga e máxima massa específica, estão disponíveis para edição,

permitindo assim, pesquisas com resultados mais precisos de fator de microgravidade simulada, já que é possível alterar o valor da massa específica conforme a amostra de interesse e obter os valores de microgravidade e centrifugação especificamente de cada amostra.

A Tabela 10 apresenta a ilustração de cada suporte com a sua respectiva capacidade de frascos e mililitros totais de amostra disponível. Como o tubo modificado de Falcon de 50 mL apresenta praticamente uma diferença de 0,5 mm ao tubo de Falcon de 50 mL, foi possível especificar o mesmo suporte para ambos os frascos. O mesmo ocorreu com o tubo de Eppendorf de 1,5mL e 2 mL, porque possuem o mesmo diâmetro. Assim, foi possível especificar 6 suportes diferentes para 8 tipos de frascos, reduzindo o custo de dois suportes extras.

Tabela 10 – Suportes especificados para cada tipo de frasco com a capacidade de armazenagem e peso aproximado.

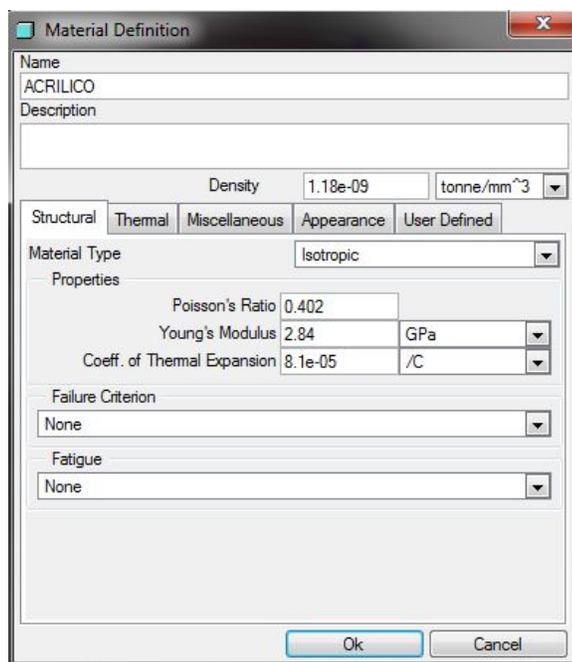
<p><u>Vidro de 35 mL</u></p>  <p>210 mL Capacidade para 6 frascos</p>	<p><u>Falcon de 50 mL</u></p>  <p>300 mL Capacidade para 6 frascos</p>	<p><u>Falcon de 13 mL</u></p>  <p>130 mL Capacidade para 10 frascos</p>
<p><u>Falcon de 5 mL</u></p>  <p>80 mL Capacidade para 16 frascos</p>	<p><u>Eppendorf 1,5-2 mL</u></p>  <p>108 mL Capacidade para 36 frascos</p>	<p><u>Placa de Petri</u></p>  <p>80 mL Capacidade para 4 placas</p>
<p><u>SlideFlask</u></p>  <p>80 mL Capacidade para 16 frascos</p>		

Fonte: O autor (2013).

4.3 FASE III – SIMULAÇÃO MECÂNICA

A análise da estrutura ocorreu nos seguintes componentes considerados críticos devido ao esforço direto de rotação e peso: os quadrados giratórios, a barra de fixação dos suportes e cada suporte de fixação dos frascos. Cada componente foi analisado separadamente para facilitar a modelagem através do módulo *Mechanica* do software *PRO Engineer*. Para a análise é necessário especificar o material, porém este software não disponibiliza a escolha do material acrílico, assim foi necessário especificá-lo.

Figura 28 - Tela de definição das propriedades do acrílico no software *Pro Engineer*.

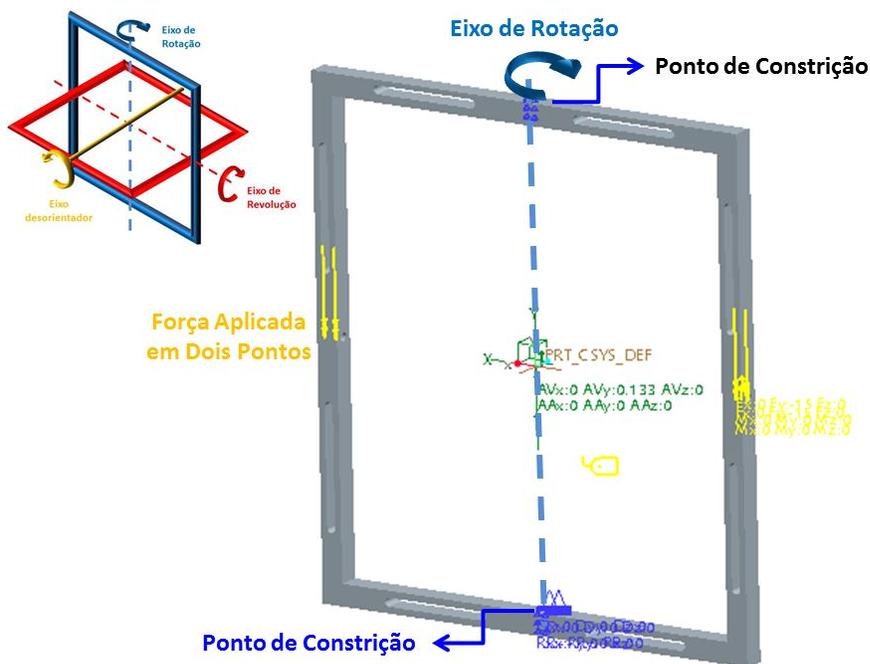


Fonte: O autor (2013).

As Figuras 30 a 33 apresentam as análises de deslocamento e estresse dos quadrados giratórios. O resultado das análises do quadrado externo para a aplicação de uma força de 15 N (1,5 kg) apoiados em dois pontos e uma velocidade de rotação de 8 rpm, conforme o indicado na Figura 29, foram de uma deslocamento máxima de 0,3 milímetros e estresses nos cantos internos, sendo crítico os cantos vivos das furações internas. O resultado das análises do quadrado interno para a aplicação de uma força de 4 N (0,4 kg) em apenas um dos lados do quadrado e uma velocidade de rotação de 8 rpm, conforme indicado na Figura 32, foram de uma deslocamento máxima de 4,5 décimos de milímetro e mínimos estresses. Em ambas as

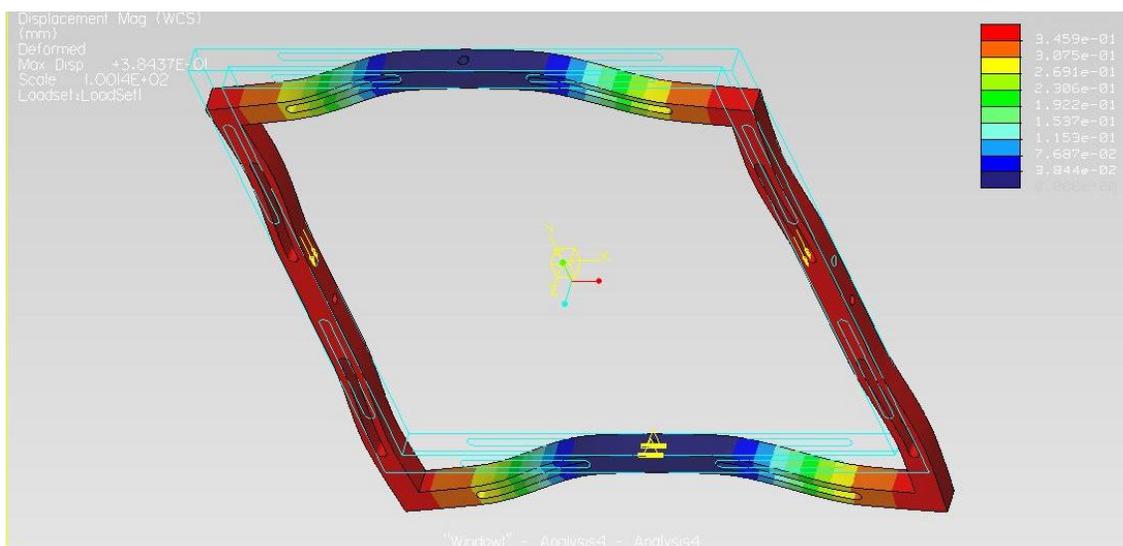
análises, os quadrados estavam em posição estática vertical. As análises dos deslocamentos nas Figuras 30 e 33 apresentam uma escala de cores no canto direito com o resultado do deslocamento em milímetros por cor. Assim, visualizando as figuras, é possível observar as áreas de menor ao maior deslocamento. O mesmo se aplica para a análise de estresses nas Figuras 31 e 34. Como pode ser observado, os deslocamentos e os estresses foram concentrados nos pontos de apoio, mínimos, o que permite a confiabilidade de resistência das peças.

Figura 29 - Detalhamento da aplicação da força e ponto de constrição (pontos de fixação) do quadrado externo.



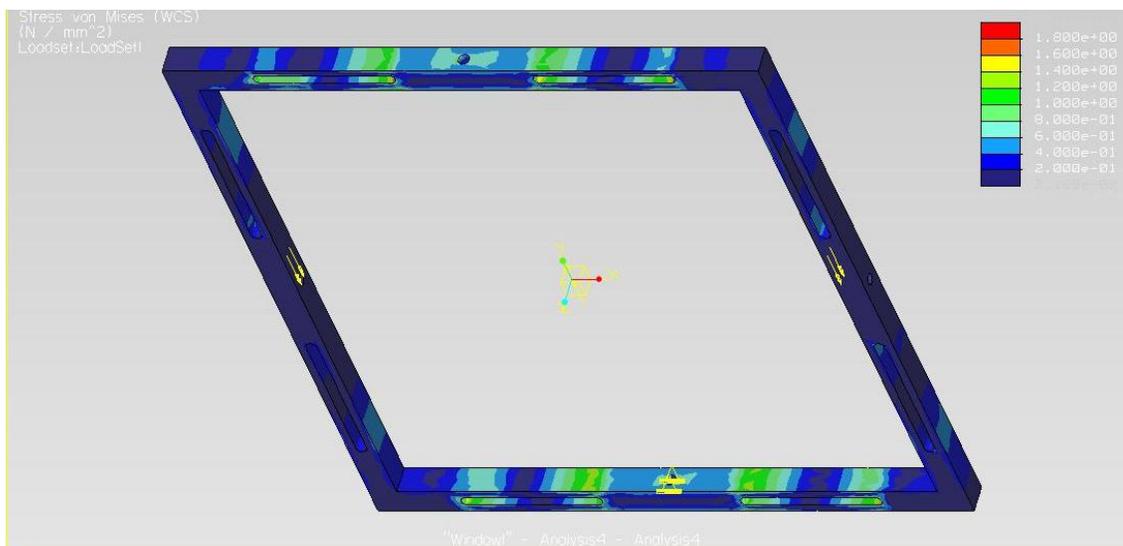
Fonte: O autor (2013).

Figura 30 - Análise de deslocamento do quadrado externo.



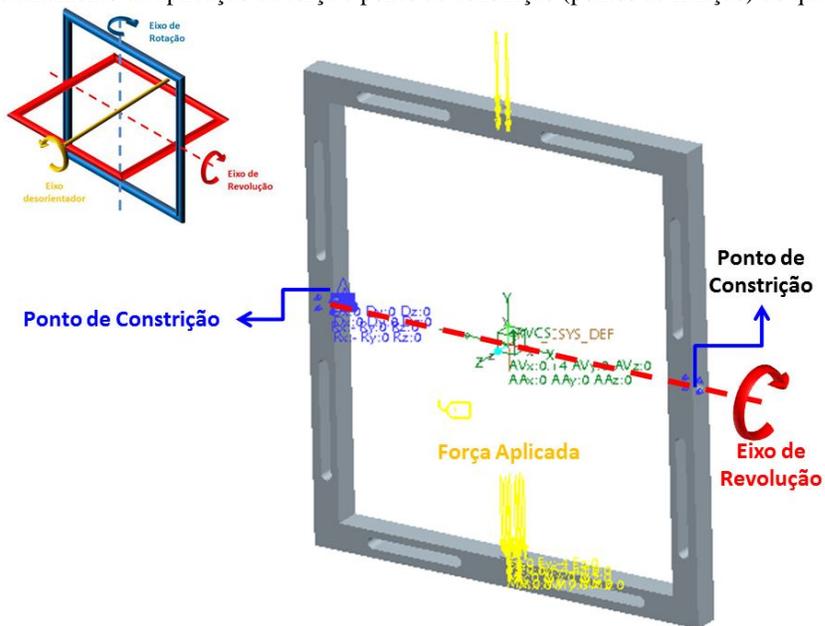
Fonte: O autor (2013).

Figura 31 - Análise de estresse do quadrado externo.



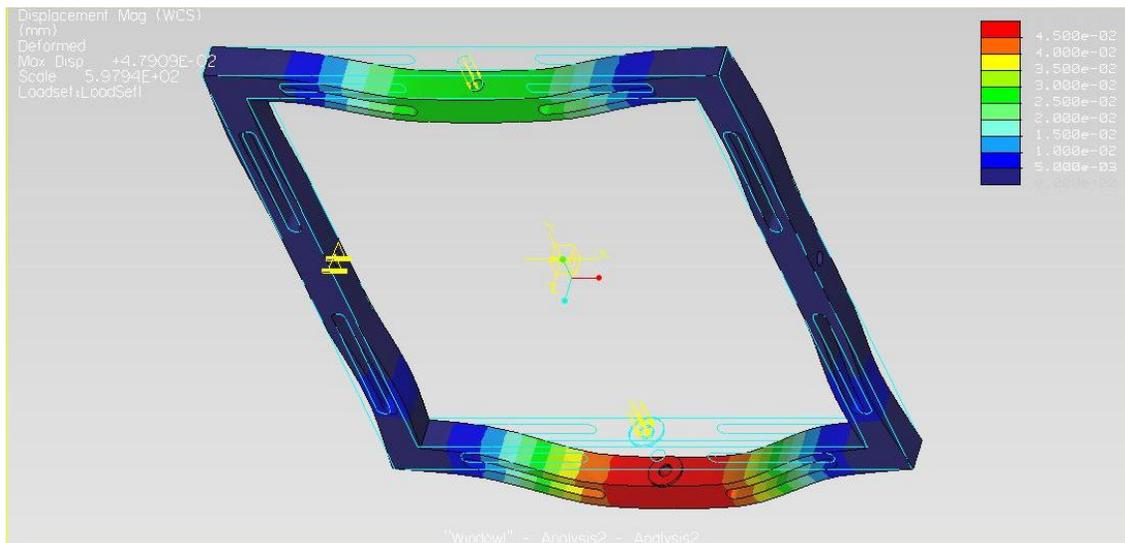
Fonte: O autor (2013).

Figura 32 - Detalhamento da aplicação da força e ponto de constrição (pontos de fixação) do quadrado interno.



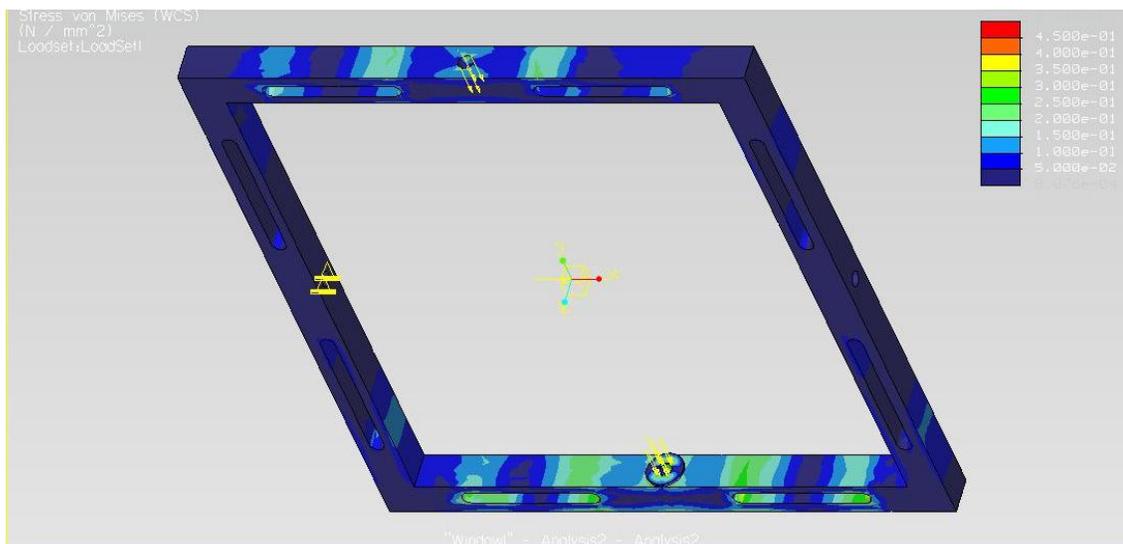
Fonte: O autor (2013).

Figura 33 - Análise de deslocamento do quadrado interno.



Fonte: O autor (2013).

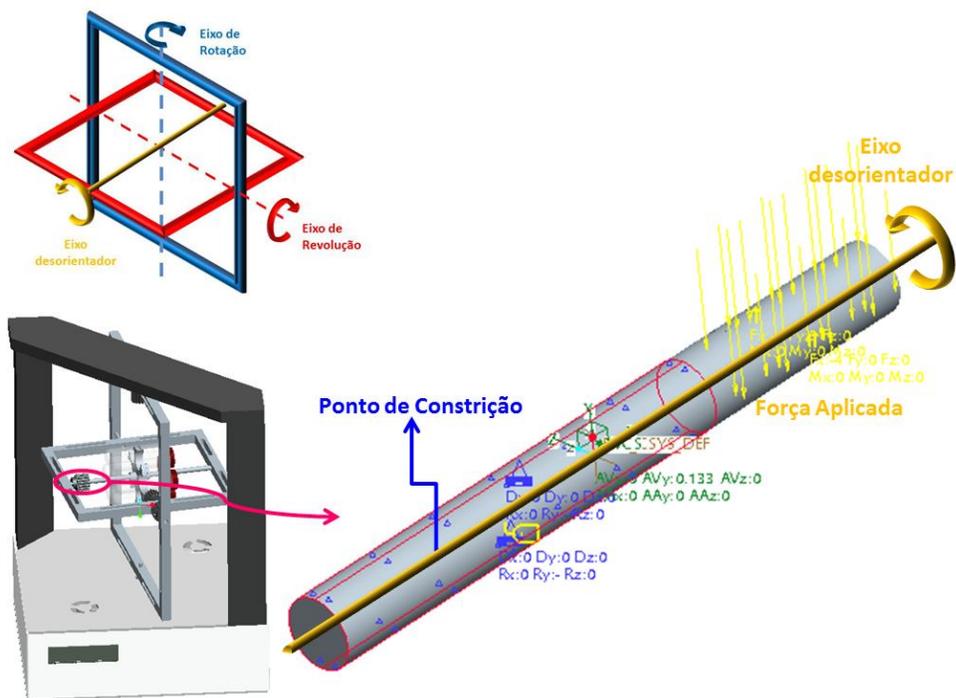
Figura 34 - Análise de estresse do quadrado interno.



Fonte: O autor (2013).

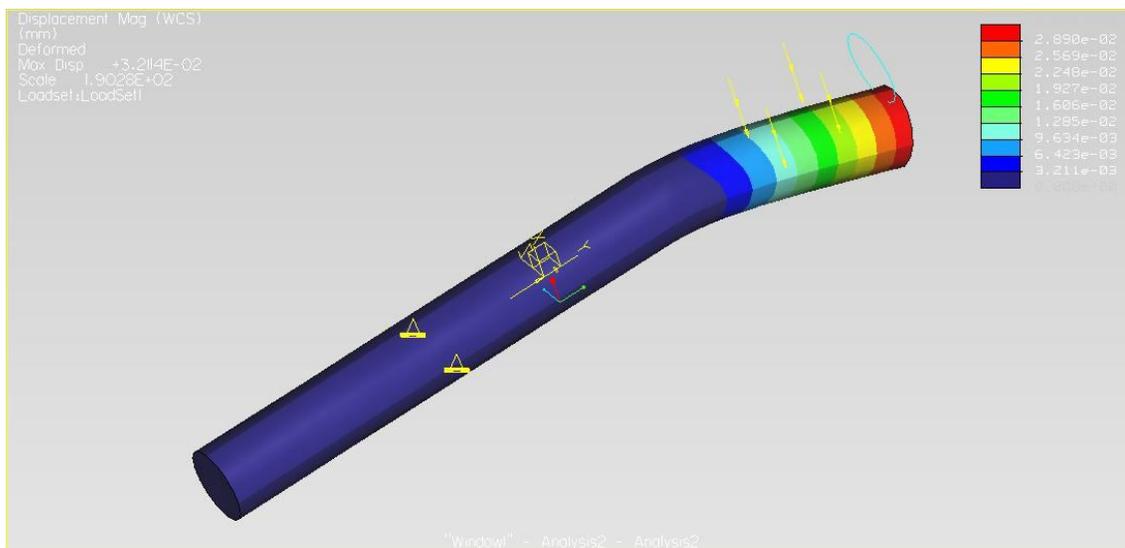
Para as análises da barra de fixação dos suportes, foi considerado uma força de 4 N (0,4 kg), referente ao suporte mais pesado, apoiados na posição onde sofrerá mais esforço perpendicular, e uma velocidade de rotação de 8 rpm, conforme demonstrado na Figura 35. Os resultados demonstraram um deslocamento máximo de 2,9 décimos de milímetro e pequenos pontos de estresses. É importante ressaltar que o ponto de maior deslocamento não é o ponto de maior estresse, e isto pode ser observado pela identificação de cores nas Figuras 36 e 37. Pode-se concluir que a barra de fixação suporta todos os suportes sugeridos, sem deformação representativa e sem ruptura.

Figura 35 - Detalhamento da aplicação da força e ponto de constrição (pontos de fixação) da barra de fixação dos suportes.



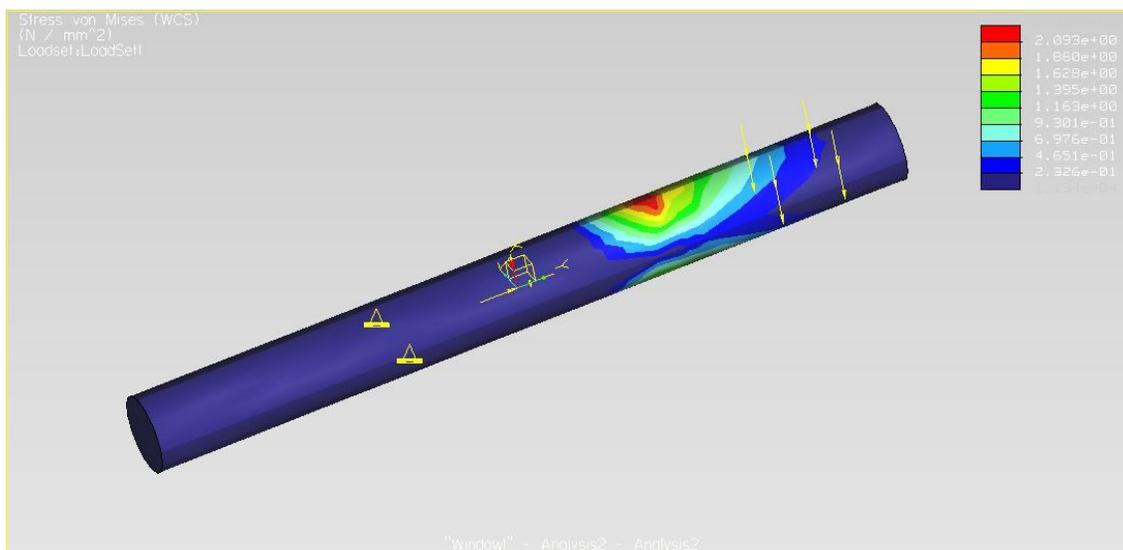
Fonte: O autor (2013).

Figura 36 - Análise de deslocamento da barra de fixação dos suportes.



Fonte: O autor (2013).

Figura 37 - Análise de estresse da barra de fixação dos suportes.



Fonte: O autor (2013).

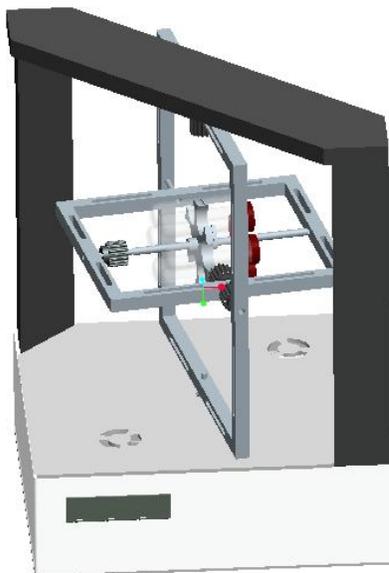
A análise de deslocamento e estresse dos suportes foi realizada com eles posicionados na horizontal e o peso concentrado no centro da barra do suporte, como ilustrado pela Figura 38. Os resultados destas análises dos suportes demonstraram deslocamentos mínimos de 2 décimos de milímetro a 9 décimos de milímetro. Os resultados individuais podem ser observados na Tabela 11 e nas imagens da análise de cada suporte (Figuras 40, 42, 44, 46, 48 e 50). Os resultados da análise de estresses em todos os suportes foram mínimos, desconsiderando que a força peso não atuou constantemente na mesma posição, o que minimiza ainda mais o estresse sofrido por cada suporte. Os pontos de estresse em todos os suportes ocorreram concentrados no eixo central em pontos distribuídos no decorrer do eixo.

Tabela 11 - Resultado da análise de deslocamento dos suportes dos frascos.

Frasco	Força Aplicada (N)	Resultado do Deslocamento (mm)
Falcon 5mL	1	2.10^{-2}
Falcon 13mL	2	6.10^{-2}
Falcon 50mL e Tubo de Falcon modificado 35mL	4	9.10^{-2}
Eppendorf 1,5 – 2 mL	1,5	3.10^{-2}
<i>SlideFlask</i> 5mL	1	2.10^{-2}
Placa de Petri 20 mL	5	3.10^{-2}

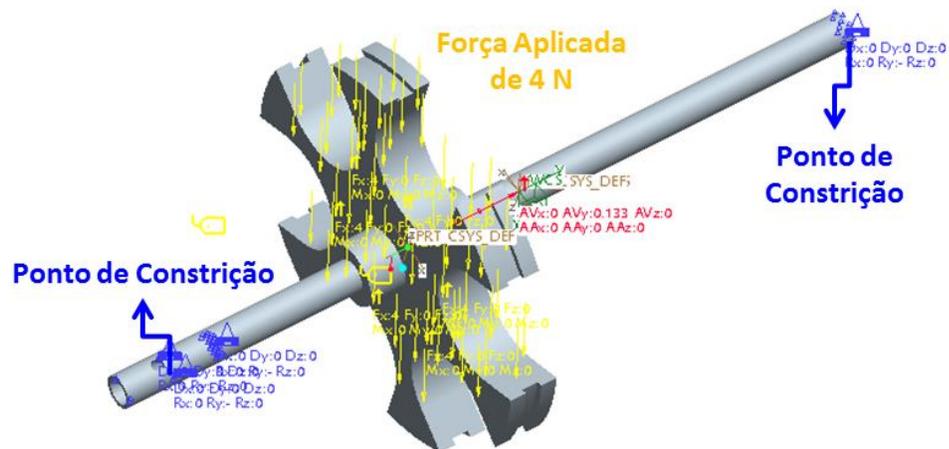
Fonte: O autor (2013).

Figura 38 - Posição de maior esforço dos suportes de amostras (posição analisada).



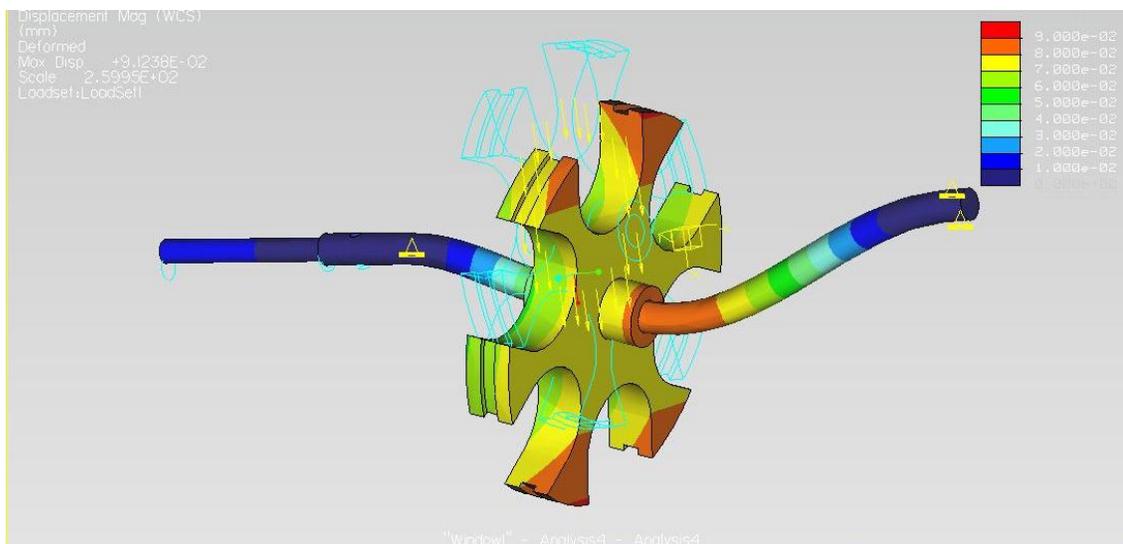
Fonte: O autor (2013).

Figura 39 - Detalhamento da aplicação da força e ponto de restrição (pontos de fixação) do suporte de frascos Falcon 50 mL e tudo de Falcon modificado.



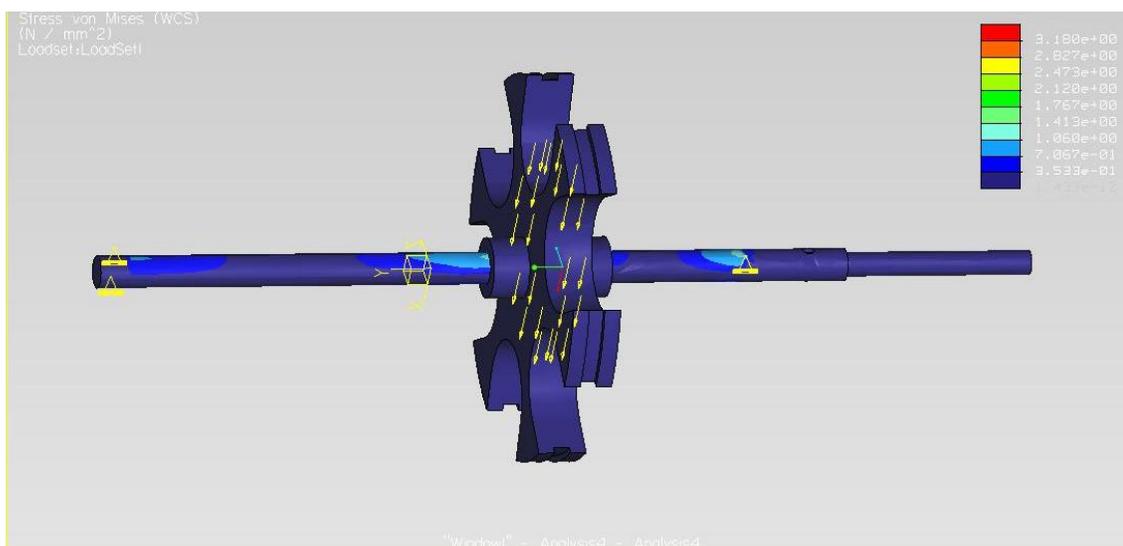
Fonte: O autor (2013).

Figura 40 - Análise de deslocamento do suporte de frascos Falcon 50 mL e tudo de Falcon modificado.



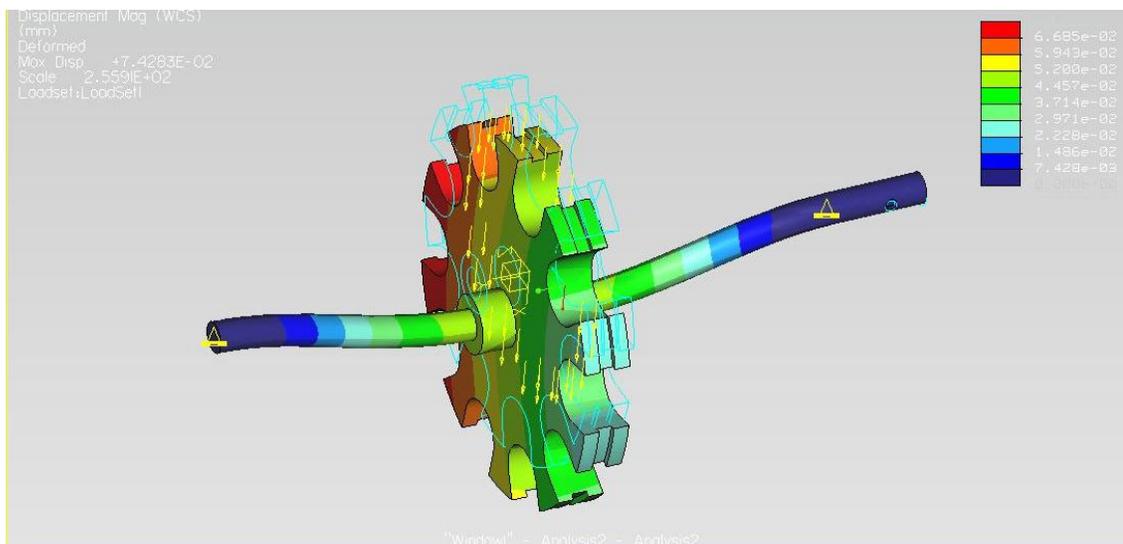
Fonte: O autor (2013).

Figura 41 - Análise de estresse do suporte de frascos Falcon 50 mL e tudo de Falcon modificado.



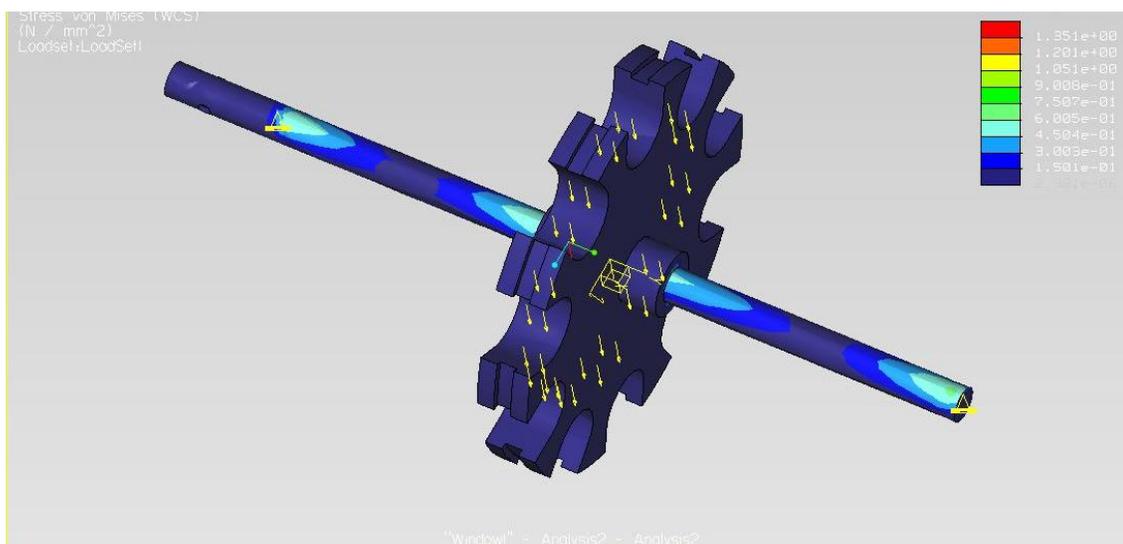
Fonte: O autor (2013).

Figura 42 - Análise de deslocamento do suporte para Falcon de 13 mL.



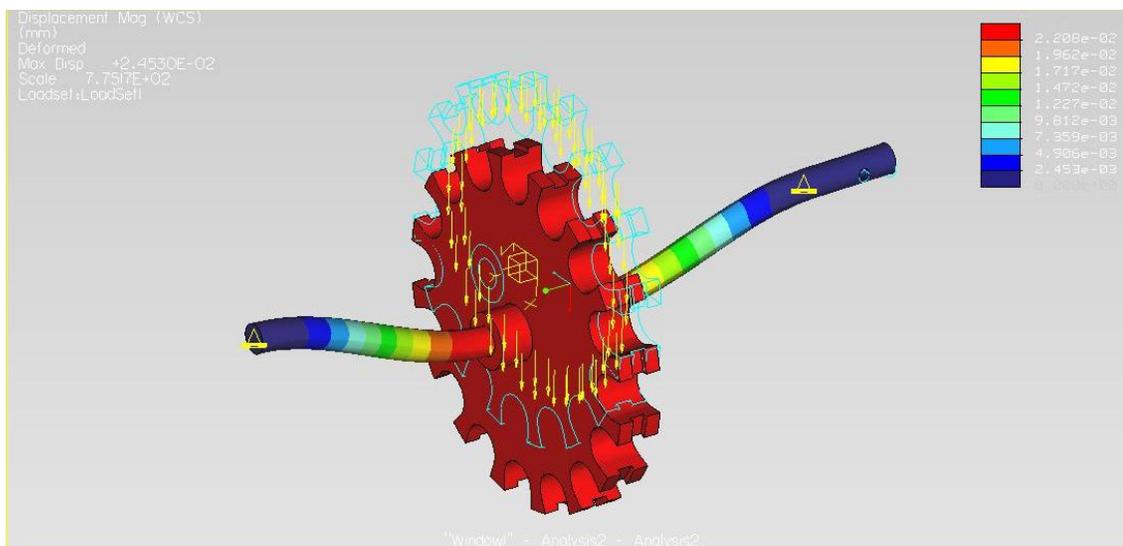
Fonte: O autor (2013).

Figura 43 - Análise de estresse do suporte para Falcon de 13 mL.



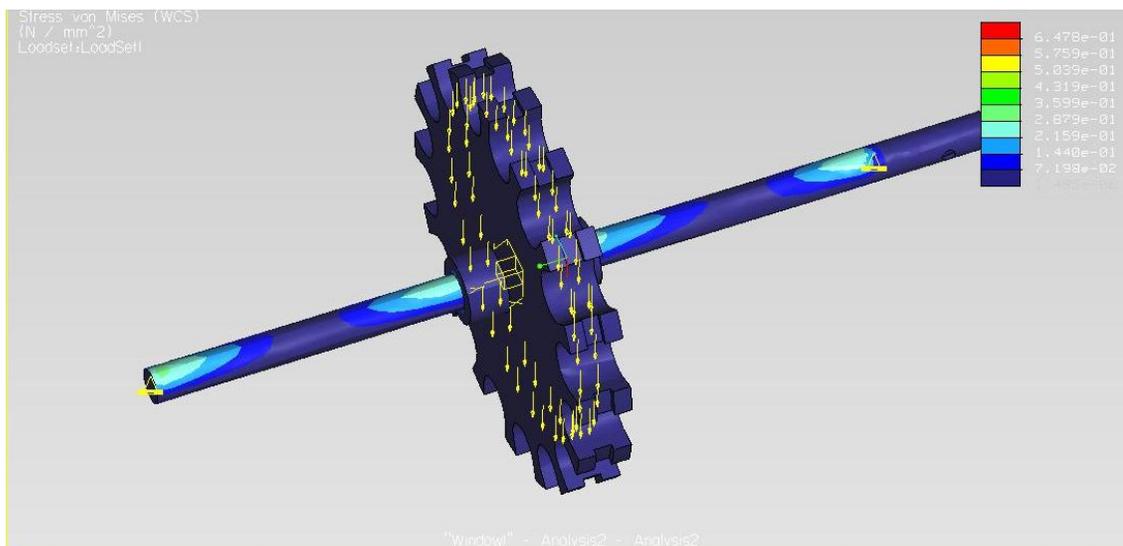
Fonte: O autor (2013).

Figura 44 - Análise de deslocamento do suporte para Falcon de 5 mL.



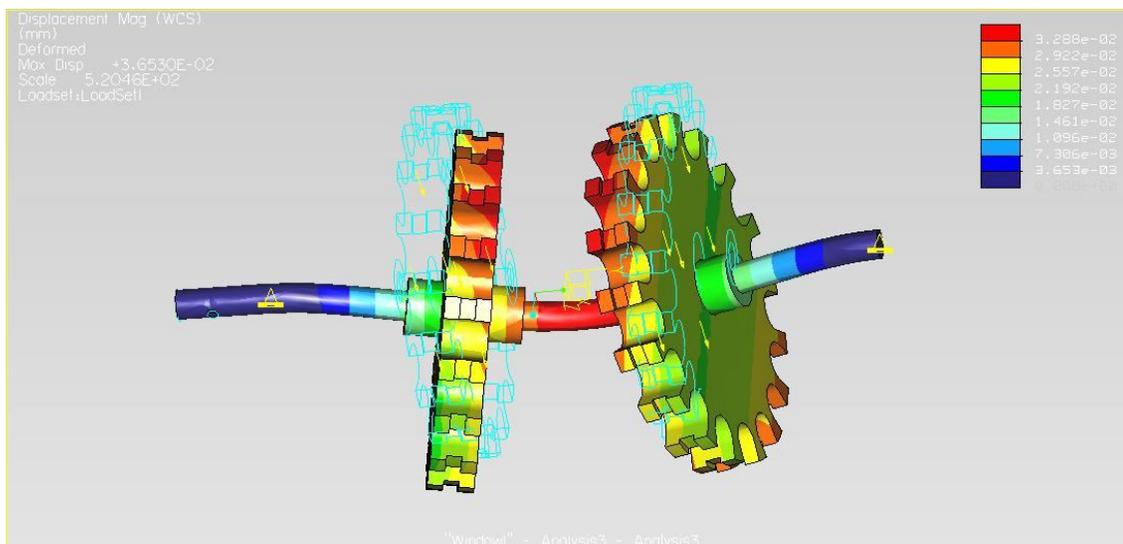
Fonte: O autor (2013).

Figura 45 - Análise de estresse do suporte para Falcon de 5 mL.



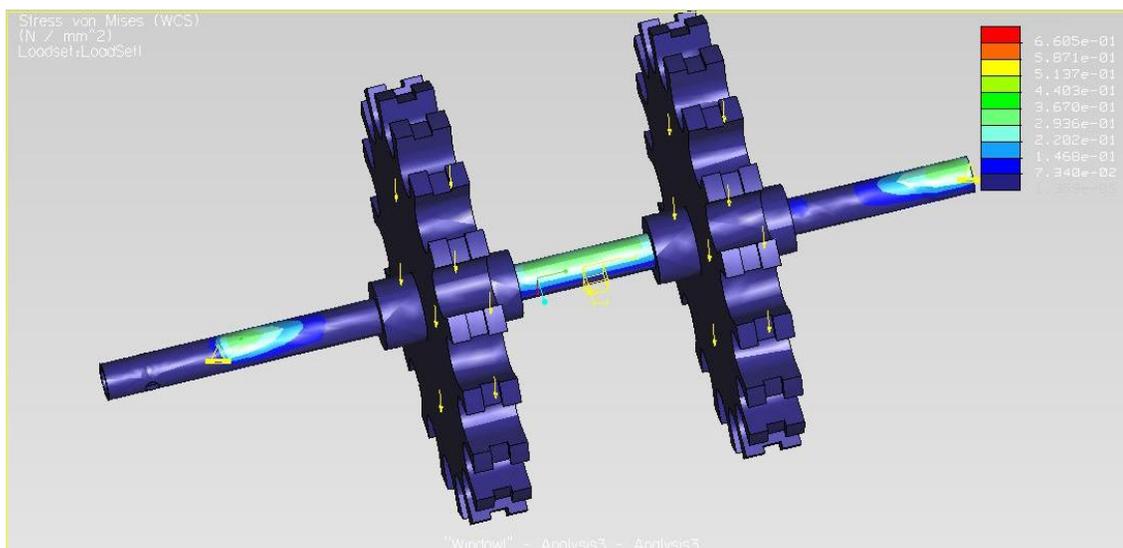
Fonte: O autor (2013).

Figura 46 - Análise de deslocamento do suporte para Eppendorf de 1,5 a 2 mL.



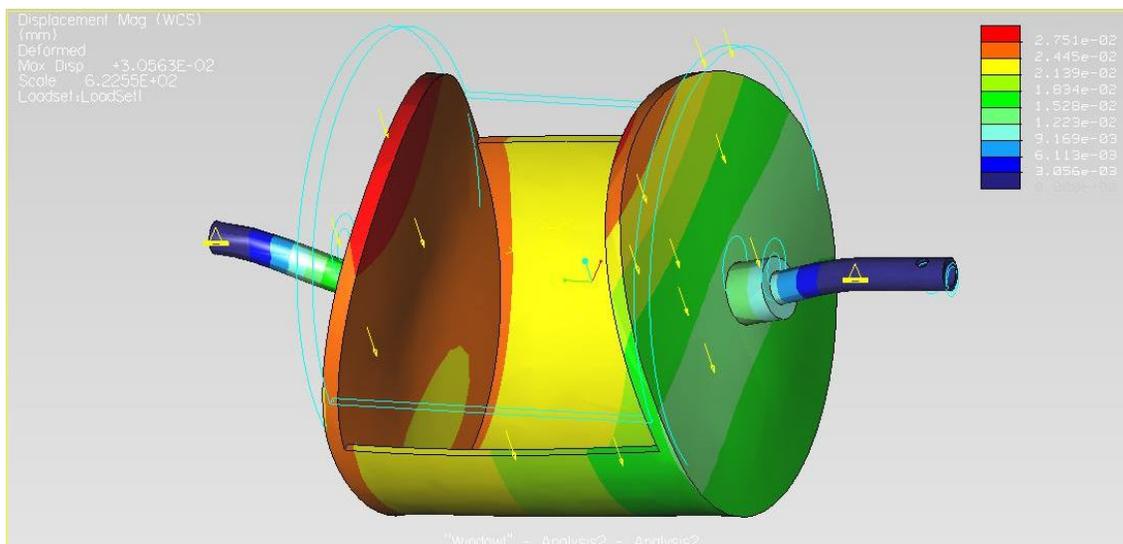
Fonte: O autor (2013).

Figura 47 - Análise de estresse do suporte para Eppendorf de 1,5 a 2 mL.



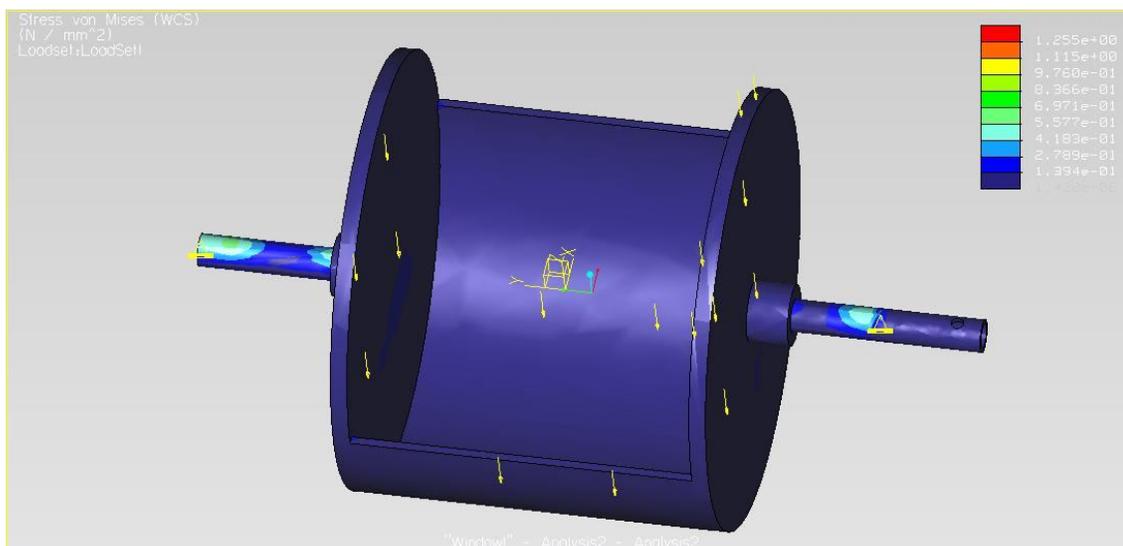
Fonte: O autor (2013).

Figura 48 - Análise de deslocamento do suporte para placas de Petri.



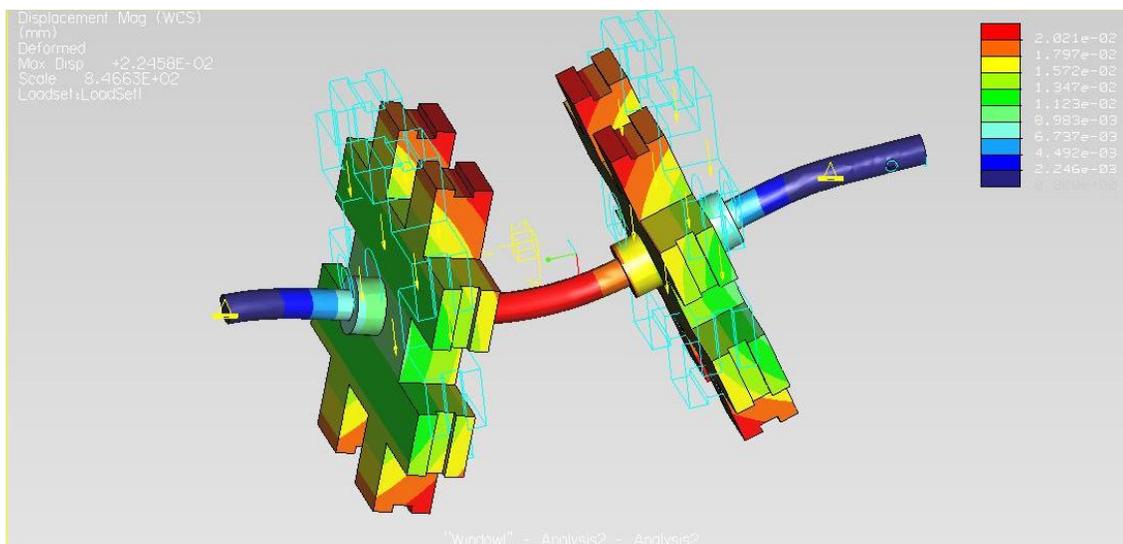
Fonte: O autor (2013).

Figura 49 - Análise de estresse do suporte para placas de Petri.

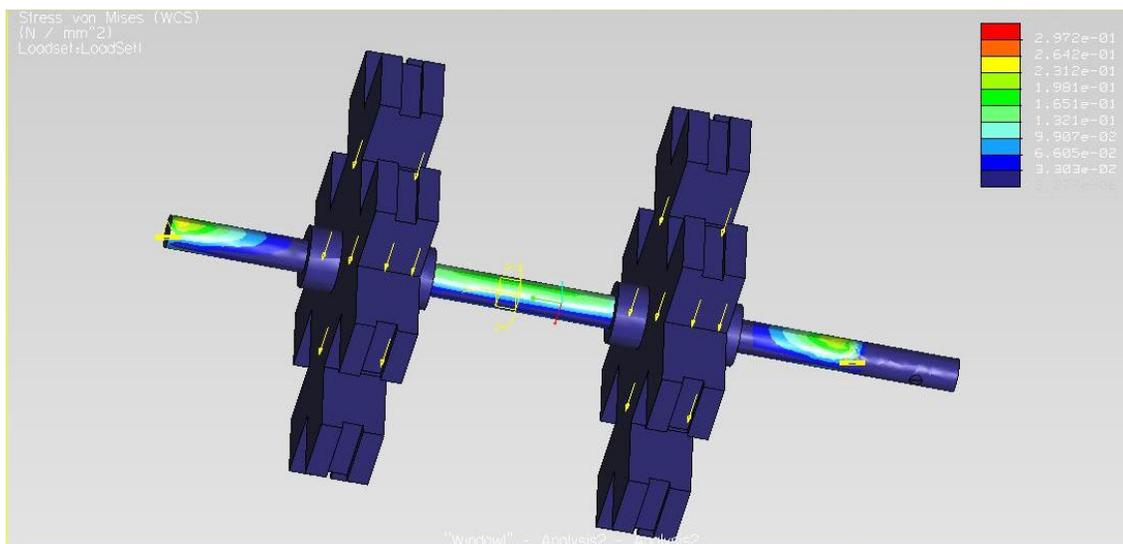


Fonte: O autor (2013).

Figura 50 - Análise de deslocamento do suporte para *SlideFlask*.



Fonte: O autor (2013).

Figura 51 - Análise de estresse do suporte para *SlideFlask*.

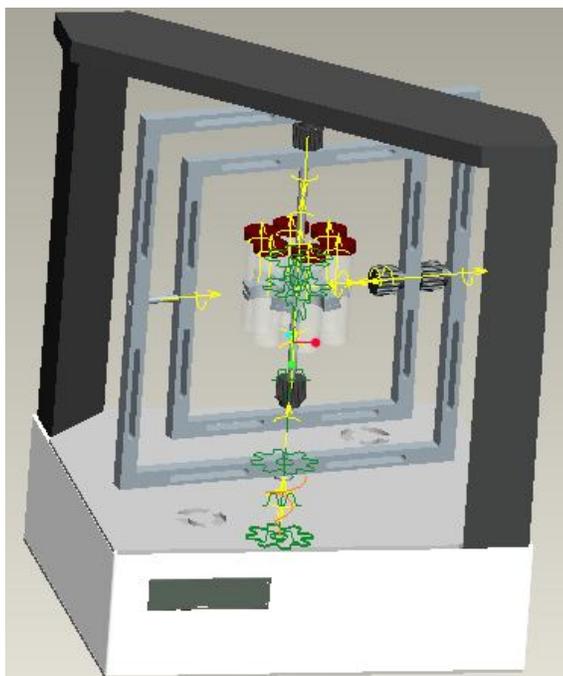
Fonte: O autor (2013).

Os suportes foram todos validados em uma posição fixa, porém esta posição de maior esforço irá se repetir. Nas demais posições, o esforço estará mais concentrado nos quadrados da estrutura que foram analisados anteriormente.

4.4 FASE IV – SIMULAÇÃO DO MECANISMO

A simulação do clinostato foi realizada através do módulo *Mechanism* do *software PRO Engineer*, a fim de demonstrar as interações de rotação dos eixos e de cada amostra. Durante a simulação, foi possível realizar a análise do deslocamento do quadrado externo, definindo o seu tamanho máximo, e o deslocamento do quadrado interno para definir como seria a fixação superior. A especificação da transferência de movimento por polias sincronizadas, polias extensoras e correias foi inspirada no projeto da Alemanha, Figura 11. A simulação do mecanismo proporcionou um detalhamento do funcionamento e de suas especificações. A Figura 52 demonstra as interações detalhadas dos componentes no *software*. Esta etapa foi fundamental para a visualização do funcionamento do clinostato, a qual permitiu a adequação das especificações e melhorias na construção do protótipo. A análise virtual de simulação do mecanismo foi responsável pela validação para a construção do clinostato 3D.

Figura 52 - Clinostato 3D com as interações dos eixos e motor para simulação do mecanismo de rotação.



Fonte: O autor (2013).

4.5 PROTÓTIPO

A montagem do protótipo está sendo realizada e já apresentou ganhos pela facilidade de fabricação e montagem devido aos desenhos técnicos das peças da estrutura. A Figura 53 mostra a montagem parcial do clinostato 3D projetado nesta dissertação.

Figura 53 - Imagem do protótipo do clinostato tridimensional de três eixos em construção.



Fonte: O autor (2013).

5 CONCLUSÃO

Esta dissertação concentrou-se em três focos de trabalho: 1) Projetar um novo protótipo que permita o ajuste de velocidade, acomode a maior capacidade de amostras possível, que possua um controle de posicionamento das amostras para facilitar a retirada das mesmas ao final de cada experimento e que possa ser construído com materiais leves; 2) Simular a estrutura e o sistema mecânico do clinostato 3D contendo três eixos no *software PRO Enginee Wildfire 3.0*; 3) Desenvolver diferentes tipos de suportes para aplicação em diferentes tipos de amostras, utilizando o menor número de componentes na construção mecânica e garantindo a condição de microgravidade nas amostras, sem centrifugá-las.

5.1 PROJETAR UM NOVO PROTÓTIPO

O protótipo do clinostato 3D tem capacidade para admitir todos os componentes especificados para a sua funcionalidade: o ajuste da velocidade de rotação constante nos três eixos, referência do posicionamento (obter mesma posição inicial e final), sistema para acoplamento de diferentes suportes para amostras, sensores temperatura e umidade, além de espaço para a placa de controle, aquisição de dados e *transiver*. Todo o espaço disponível dentro da incubadora foi aproveitado para comportar o maior número de amostras possíveis de cada frasco, obtendo assim, números de amostras adequados para a realização de diversas análises e testes com a mesma condição de simulação de microgravidade.

5.2 SIMULAR A ESTRUTURA E O SISTEMA MECÂNICO DO CLINOSTATO 3D

O desenvolvimento no *software* de simulação proporcionou uma melhoria de projeto, adaptação do protótipo, a redução de custos anterior à construção, para a obtenção das características esperadas. Com base nos dados obtidos das análises de deslocamento e estresse, pode-se afirmar que o Clinostato 3D com três eixos de rotação do Centro de Microgravidade possuirá um ótimo desempenho de resistência com confiabilidade e um *layout* otimizado. Todas as peças possuem desenhos técnicos detalhados para facilitar a sua fabricação. O custo total de fabricação das peças mais os componentes especificados são de aproximadamente R\$ 6.064,60 (APÊNDICE A).

5.3 DESENVOLVER DIFERENTES TIPOS DE SUPORTES

Cada suporte foi especificamente calculado quanto ao grau de microgravidade e centrifugação da amostra. É recomendado que utilize o clinostato com velocidade inferior a 8 rpm nas amostras para garantir a condição de microgravidade de fator inferior a $1,0 \cdot 10^{-3}$ no caso de amostras com massa específica aproximadamente igual a da água. Os dados contidos nesta dissertação serão fundamentais para pesquisas futuras, sendo possível especificar e analisar profundamente os valores e os efeitos da microgravidade e centrifugação sobre cada amostra, análise esta nunca realizada em pesquisas anteriores no Centro de Microgravidade e na comunidade internacional.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA ESPACIAL BRASILEIRA. Microgravidade. Disponível em: <<http://www.aeb.gov.br>>. Acesso em: 15 nov. 2004.

ALVES, K.O.; SANTOS, M.A.; SILVA, A.M.M.. Desenvolvimento de um clinostato tridimensional para amostras biológicas. **XXIII Congresso Brasileiro de Engenharia Biomédica (CBEB)**. 2012.

AUDUS, L.J.. **The mechanism of the perception of gravity by plants**. Biological receptor mechanism, Cambridge, v. 16, p. 197-228, 1962.

BARCELOS NETO, J., **Mecânica newtoniana, lagrangiana e hamiltoniana**. São Paulo, Livro da Física, 2004. 431 p.

BORGSTAHL, G.E.; VAHEDI-FERIDI, A.; LOVELACE, J.; BELLAMY, H.D.; SNELL, H.E.. A test of macromolecular crystallization in microgravity: large well ordered insulin crystals. **Acta Crystallographic Section D: Biological Crystallography**. 2001. Aug 57: 1204-1207.

BAULIN, V.A., Self-assembled aggregation in the gravitational field: growth and nematic order. **Journal of Chemical Physics**, v.119, n.5, p. 2874-2885, 2003.

CASTRO, V. A.; THRASHER, A. N.; HEALY, M.; OTT, C. M.; e PIERSON, D. L.. **Microbial characterization during the early habitation of the International**. Space Station. *Microb. Ecol.* 2004.

CHOPRA, V.; FADL, A.A.; SHA, J.; CHOPRA, S.; GALINDO, C.L.; CHOPRA, A.K.. Alterations in the virulence potential of enteric pathogens and bacterial-host cell interactions under simulated microgravity conditions. **Journal of Toxicology and Environmental Health**, Estados Unidos, v. 69, p. 1345-1370, 2006.

CIFERRI, O.; TIBONI, O.; DI PASQUALE, G.; ORLANDONI, A. M.; e MARCHESI, M. L.. Effects of microgravity on genetic recombination in *Escherichia coli*. **Naturwissenschaften**, p 418-421. 1986.

CLAASSEN, D.; SPOONER, B. Liposome formation in microgravity. **Advance in Space Research**. n.17, p.151-160, 1995.

COGOLI, A.; VALLUCHI-MORF, M.; MUELLER, M.; BRIEGLEG, W.. Effect of hypogravity on human lymphocyte activation. **Aviation, Space, and Environmental Medicine (ASEM)**, n. 51, p. 29-34, 1980.

DAG, O.; AHARI, H.; COOMBS, N. *et al.* Does Microgravity Influence Self-Assembly. **Advanced Materials**, n.9, p. 1133, 1997.

DEDOLPH, R.R.; DIPERT, M.H.. The physical basis of gravity stimulus nullification by clinostat rotation. **Plant Physiology**, Estados Unidos, v. 47, p. 756-764, 1971.

DUTCH SPACE. Random Positioning Machine (RPM). Disponível em:
<http://www.dutchspace.nl/pages/business/content.asp?id=177&P=2_2_5&LangType=1033>
. Acesso em: 26 mai. 2013.

ESA. Disponível em: <http://www.esa.int/esaMI/Space_In_Bytes/SEMZT173R8F_0.html>.
Acesso em: 07 ago. 2011.

FALCÃO, F. P.; e LIMA, J. C. M.. **Clinostato tridimensional remotamente controlado**.
Porto Alegre: PUCRS, 2007. Trabalho da disciplina de integração, Faculdade de Engenharia,
Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, 2007.

FANEM. Câmera Germinadora BOD 347 CD E 347 CDG. Disponível em:
<<http://www.fanem.com.br/produto/9/cAcentmaras-germinadoras-e-bod-347-cd-e-347-cdg>>.
Acesso em: 26 mai. 2013.

FAULHABER. MCDC 3006 S RS. Disponível em:
<http://www.faulhaber.com/manuals/sites/de/steuerungen/mcdc_3006_s_rs.html>. Acesso
em: 26 mai. 2013.

FORRAZ, N.; RUSSOMANO, T.; FALCÃO, F.P.; SANTOS, L.G.F.; MOTTA, J.D.;
MCGCKIN, C.P.. A novel microgravity-simulating bioreactor for tissue engineering. Paper
presented at the **44th American Society for Cell Biology Annual Meeting**, Washington,
DC, Estados Unidos, p. 4-8, 2004.

GAVAZZI, C. Research for the design of a simulated microgravity environment bioreactor.
Disponível em:
<<http://www.angelfire.com/space/andreaguidi/carlogavazzispace/reportbioreator.pdf>>. Acesso
em: 15 fev. 2001.

GRIMM. Overview of the Different Devices and Techniques for Simulated Microgravity,
Professor Dr. med. Daniela Gabriele Grimm. Disponível em: <<http://www.grimm-space-research.com/RPM/RPM.html>>. Acesso em: 26 mai. 2013.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J.. **Fundamentals of Physics**. 4^a ed. New York,
Estados Unidos, v.1, p118, 1993.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J.. **Fundamentos de física**. 7^a ed. Rio de
Janeiro, v. 1, 2006.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J.. **Fundamentos de física**. 4^a ed. Rio de
Janeiro, 1995-1996, v. 2, p. 66 – 68 e p. 77 – 79.

HUIJSER, R.H.. Desktop RPM: New small size microgravity simulator for the bioscience
laboratory. Disponível em: <<http://www.desc.med.vu.nl>>. Acesso em: 10 dez. 2011. 2000.

KAUR, I.; SIMONS, E.R.; CASTRO, V.A.; OTT, C.M.; PIERSON, D.L.. Changes in monocyte functions of astronauts. **Brain Behavior and Immunity Houston**, Estados Unidos, v. 19, p. 547-554, 2005.

KLAUS, D. M.. Clinostats and Bioreactors. BioServe Space Technologies, Aerospace Engineering Sciences Department, University of Colorado, Boulder CO. **Gravitational and Space Biology**, p. 55 – 64, 2001.

KLAUS, D.; SIMSKE, S.; TODD, P.; e STODIEK, L.. Investigation of space flight effects on *Escherichia coli* and a proposed model of underlying physical mechanisms. **Microbiology**, p. 449–455. 1997.

KNIGHT, R. D.. **Física : uma abordagem estratégica**. Porto Alegre, Bookman, 2009.

LABFLIGHT. Microgravity Research Competition Announcement. Disponível em: <http://www.labflight.com/Microgravity_Research_Competition_Announcement.pdf>. Acesso em: 26 mai. 2013. 2009.

LAIPAC. TRF-2.4G Transceiver Data Sheet. Disponível em: <https://www.sparkfun.com/datasheets/RF/RF-24G_datasheet.pdf>. Acesso em: 26 mai. 2013.

LAMBDA. MultiwellSlides & SlideFlask. Disponível em: <http://www.lambda.at/UserFiles/File/MultiwellSlides/075056_MultiwellSlides_en.pdf>. Acesso em: 26 mai. 2013.

LESNYAK, A.; SONNENFELD, G.; AVERY, L.; KONSTANTINOVA, I. ; RYKOVA, M.; MESHKOV, D. ; e ORLOVA, T.. Effect of SLS-2 spaceflight on immunologic parameters of rats. **Journal of Applied Physiology**, v. 81, p. 178–182, 1996.

LFEQUIMENTOS. Tubo Cônico de Falcon 50 mL. Disponível em: <http://www.lfequipamentos.com.br/produtos_detalhes.aspx?ProdutoID=3447&CategoriaID=1>. Acesso em: 26 mai. 2013.

LITTKE, W.; JOHN, C.. **Science**, v. 225, p. 203–204. 1984,

LU, S.K.; BAI, S.; JAVERI, K.; BRUNNER, L.J.. Altered cytochrome P450 and P-Glycoprotein levels in rats during simulate weightlessness. **Aviation, Space, and Environmental Medicine (ASEM)**, Alexandria, Estados Unidos, v. 73, p. 112-118, 2002.

MANTI, L.. Does reduced gravity alter cellular response to ionizing radiation? **Radiation and Environmental Biophysics**, Berlim, v. 45, p. 1-8, 2006.

MARTINELLI, L. K. B.. **Aperfeiçoamento e validação do clinostato 3D e seu uso no estudo de células do sistema imune humano**. Porto Alegre: PUCRS, 2007. *Trabalho de*

conclusão, Faculdade de Engenharia, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, 2007.

MEHTA, S.K.; KAUR, I.; GRIMM, E.A.; SMID, C.; FEEBACK, D.L.; PIERSON, D.L.. Decreased non-MHC- restricted (CD56(+)) killer cell cytotoxicity after spaceflight. **Journal of Applied Physiology**, Estados Unidos, v. 91, p. 1814-1818, 2001.

MICROG. Projetos de Pesquisa - Desenvolvimento de um Clinostato 3D para Estudos de Células na Microgravidade Simulada. Disponível em: <<http://www.pucrs.br/feng/microg/labs/engbio/projetos/clinostato/index.htm>>. Acesso em: 26 mai. 2013.

MORAES, J.M.. **Desenvolvimento e avaliação do processo de obtenção de emulsões múltiplas A/O/A em etapa única empregando óleo de canola e tensoativo não iônico derivado do óleo de ricino**. São Paulo: FCFRP, 2008. *Tese de Doutorado*, Faculdade de Ciências Farmacêuticas de Ribeirão Preto, 2008.

NASA. What is Microgravity? Disponível em: <<http://www.nasa.gov/centers/glenn/shuttlestation/station/microgex.html>>. Acesso em: 26 mai. 2013. 2009.

NASA. What is Microgravity? Disponível em: <<http://www.nasa.gov/audience/forstudents/k-4/stories/what-is-microgravity-k4.html>>. Acesso em: 26 mai. 2013. 2010.

NICOGOSSIAN, A.E.; HUNTOON, C.L.; POOL, S.. **Space Physiology and Medicine**, 2^a ed., Lea and Febiger, Philadelphia, 1989.

NORDIC. Product Specification nRF2401. Disponível em: <https://www.sparkfun.com/datasheets/RF/nRF2401rev1_1.pdf>. Acesso em: 26 mai. 2013.

PERUTZ, M. F.. **Protein Structure: New Approaches to Disease and Therapy**. New York. Freeman. 1992.

PNAE. **Programa Nacional de Atividades Espaciais: PNAE : 2012 - 2021** / Agência Espacial Brasileira. Brasília : Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, Agência Espacial Brasileira, 2012. Disponível em: <<http://www.aeb.gov.br/wp-content/uploads/2013/01/PNAE-Portugues.pdf>>. Acesso em: 26 mai. 2013.

PRÓ-ANÁLISE. Placa de Petri. Disponível em: <<http://www.pro-analise.com.br/webroot/loja/173-placa-de-petri>>. Acesso em: 26 mai. 2013.

RUSSOMANO, T.; CARDOSO, R.B.; FALCÃO, F.P.; DALMARCO, G.; SANTOS, C.R.V.; SANTOS, L.G.F. et al. Development and Validation of a 3D Clinostat for the Study of Cells during Microgravity Simulation. **IEEE**, CD 1-4, 2005.

RUSSOMANO, T.; CARDOSO, R.B.; FALCÃO, F.P.. **The Effects of Hypergravity and Microgravity on Biomedical Experiments**. Morgan & Claypool Publishers series, 2008.

SERWAY, R. A.. **Princípios de física**. São Paulo, v. 1, 2004.

SNELL, E. H.; HELLIWELL, J. R.. Macromolecular crystallization in microgravity. Institute of Physics Publishing, Inglaterra. **Reports on progress physics**, v.68, p. 799-853, 2005.

SPACE GARDEN. The Space Garden Project. Disponível em: <
http://www.oksiuta.de/projects_spacegarden.html>. Acesso em: 26 mai. 2013.

TAYLOR, G.; KONSTANTINOVA, I.; SONNENFELD, G.; e JENNINGS, R.. Changes in the immune system during and after spaceflight. **Advances in Space Biology and Medicine**, v.6, p.1–32, 1997.

TEXAS. Mixed Signal Microcontroller, Texas Instrumenst. Disponível em:
<<http://www.ti.com/lit/ds/slas272f/slas272f.pdf>>. Acesso em: 26 mai. 2013.

APÊNDICE A – Custo Aproximado do Clinostato 3D

Descrição	Quant.	Preço Unitário	Preço Total
Sensor de temperatura e umidade	1	R\$ 74,00	R\$ 74,00
CU20-14 (fonte chaveada 24V 20W)	1	R\$ 232,00	R\$ 232,00
1331024SR (micromotor), IE2-400 (encoder), MCDC 3006 S (drive)	1	-	R\$ 2.031,90
TRW24G (transceiver de rádio frequência)	1	R\$ 50,00	R\$ 50,00
nRF2401 (circuito integrado)	1	R\$ 14,52	R\$ 14,52
MSP430f149 (micro-controlador)	2	R\$ 43,42	R\$ 86,84
LCD MODULE ALPHANUMERIC 16X4	2	R\$ 212,67	R\$ 425,34
Estrutura em acrílico	1	R\$ 545,00	R\$ 545,00
Outros materiais (cabos,fios,botões,plugs)	-	-	R\$ 500,00
Suportes de Amostras	-	R\$ 280,00	R\$ 1.680,00
Polias, correias e conexões rotativas	-	-	R\$ 425,00
		Total	R\$ 6.064,60

Fonte: O autor (2013).