



ESTUDO MECÂNICO DO BIOMATERIAL PDMS

Luiz Felipe Ribeiro Mendes^[0000-0003-3413-9361], Cefet/RJ, luiz.mendes@aluno.cefet-rj.br

Alexandre Luiz Pereira^[0000-0002-0610-4826], Cefet/RJ, alexandre.pereira@cefet-rj.br

Felipe de Almeida Rosa^[0000-0002-8937-1638], Cefet/RJ, felipe.almeida@aluno.cefet-rj.br

Resumo. O uso desses materiais que apresentam a hiperelasticidade tem aumentado em diversas áreas industriais e da biomedicina, por fornecerem uma alta capacidade de deformação e contribuir como alternativa no desenvolvimento de equipamentos biomecânicos. O Polidimetilsiloxano (PDMS), é um biomaterial, possui biocompatibilidade e já tem aplicações biomédicas. A relevância da pesquisa está em compreender melhor o comportamento mecânico não linear, possibilitando estender a gama de aplicações. A metodologia experimental adotada foi o teste de tração de sete corpos de prova de elastômero PDMS. Para a escolha do modelo matemático e da avaliação do efeito de diferentes espessuras (0,6 e 1,0mm) do PDMS na resistência de juntas de sobreposição simples feito em uma simulação computacional, utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF) com o auxílio do software comercial Ansys na versão estudantil, numa análise estrutural estática. O melhor modelo matemático constitutivo foi o de Mooney-Rivlin de 3ª ordem. Na simulação computacional da junta simples em comparação direta, percebeu-se um aumento nos resultados de tensão e deformação conforme a espessura do PDMS aumentou.

Palavras chave: Elastômero. PDMS. Biocompatibilidade. Não linearidade. Junta de sobreposição simples

1. INTRODUÇÃO

O foco deste trabalho são os materiais com propriedades hiperelásticas. Materiais hiperelásticos são modelados por leis constitutivas como Yeoh, Mooney Rivlin, Neo Hookean, etc., onde a escolha do modelo depende do material em questão e seu comportamento mecânico. Para este trabalho, o modelo utilizado para caracterizar o PDMS nas simulações foi o modelo Mooney Rivlin de 3ª ordem, escolhido de acordo com sua curva tensão x deformação. Dentre os diversos materiais com hiperelasticidade, alguns exemplos são as borrachas (elastômeros ou silicões) e certos tecidos biológicos, pois apresentam comportamento de grande deformação quando submetidos a pequenos deslocamentos ou forças (Moreira, 2013). A utilização desses materiais tem aumentado em diversas áreas industriais e biomédicas, pois proporcionam essa alta deformabilidade e contribuem como alternativa para o desenvolvimento de dispositivos biomecânicos (Pereira, 2013).

Um elastômero de grande interesse em pesquisas é o Polidimetilsiloxano (PDMS), um biomaterial biocompatível e que já possui aplicações biomédicas como por exemplo fiação de marcapasso (Completo e Fonseca, 2019). O módulo de elasticidade e a ductilidade dos polímeros são medidos da mesma forma que os metais, mas os polímeros diferem mecanicamente dos metais de muitas maneiras. O PDMS é um adesivo não estrutural e sua simulação permite entender seu comportamento mecânico ao corte variando sua espessura (Guimaraes, 2018).

Materiais poliméricos altamente elásticos podem ter módulos elásticos tão baixos quanto 7 MPa ou tão altos quanto 4 GPa. Metais atingem valores variando 48 – 410 GPa, entretanto os metais raramente excedam 100% de alongamento plástico, alguns polímeros muito elásticos podem apresentar até 1000% de alongamento (Marque, 2018). Alguns estudos com aplicações em diversas áreas estão sendo realizados a partir dos conceitos de cisalhamento simples e função densidade de energia de deformação, como exemplo em aplicações biológicas de tecidos musculares e elemento finito (Miranda, 2022). Existem trabalhos onde o cisalhamento simples é estudado com combinação e outros esforços, por exemplo, o cisalhamento simples combinado com a compressão. M. Destrade et al. estudaram os efeitos do cisalhamento simples em tecidos musculares, mostrando a importância e aplicabilidade do conceito de cisalhamento simples e de função de densidade energia de deformação na biomecânica (Pereira, 2013).

2. METODOLOGIA

A metodologia experimental adotada foi o teste de tração de pelo menos sete corpos de prova de elastômero PDMS, utilizando um extensômetro para grandes deformações. A norma ABNT NBR ISO 37 foi base para o ensaio de tração e as dimensões dos corpos de prova halter tipo 1. O material PDMS foi o POLIT T 73 comercializado pela empresa Polasil Silicone (Santa Bárbara, São Paulo, Brasil). Os ensaios de tração uniaxial foram feitos em uma máquina de tração Intermetric (linha i/M) (Mogi das Cruzes, São Paulo, Brasil) com uma célula de carga de 5 kN e velocidade de ensaio de 5 mm min⁻¹, localizado no Laboratório de Ensaios Mecânicos do Cefet/RJ Campus Angra dos Reis. A temperatura ambiente foi de 34 °C e a umidade relativa do ar de 55%. Na Figura 1 estão os sete corpos de provas halter tipo 1 e o aparato experimental.



Figura 1. Corpos de prova halter tipo 1 e aparato experimental, Autor (2021).

Para a escolha do modelo matemático e da avaliação do efeito de diferentes espessuras do PDMS na resistência de juntas de sobreposição simples foi adotada a metodologia de simulação computacional, utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF) com o auxílio do software comercial Ansys, na versão estudantil, numa análise estrutural estática. Com os resultados do ensaio de tração foi selecionado o modelo de Mooney Rivlin 3º parâmetro. Foram então realizadas simulações numéricas numa geometria de junta de sobreposição simples, onde o PDMS foi disposto entre duas placas de aço de forma a uni-las como adesivo, variando sua espessura em 0,6 mm e 1mm, respectivamente. Na Figura 2 é demonstrado a diposição das placas de aço com 2mm de espessura e comprimento de 115 mm e entre as placas a amostra simulada do PDMS medindo 25mm de comprimento e variando sua espessura de 0,6 a 1 mm nas simulações. As dimensões da geometria da junta simples para a simulação computacional foram obtidas da norma ASTM D4255.

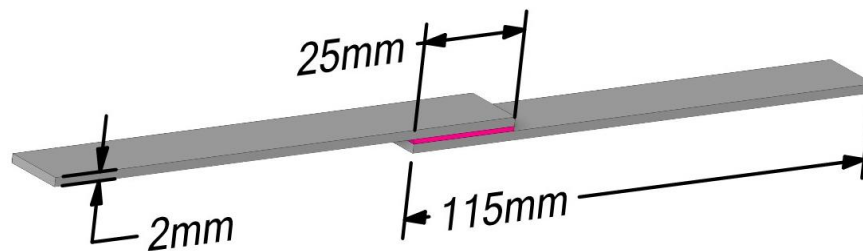


Figura 2. Junta de sobreposição simples usando PDMS como adesivo não estrutural, Autor (2021).

A simulação do ensaio de cisalhamento foi inicialmente desenvolvido em 2D, afim de diminuir o numero de elementos na análise, com condições de contorno fixo em uma extremidade e deslocamento na outra. O indicativo A da Fig. 3 sinaliza a extremidade fixada e B onde foi aplicado o deslocamento horizontal de 2 mm ao longo do eixo x, tendo como junção entre as placas o PDMS modelado pelo método constitutivo, que sofrerá o cisalhamento. Na Figura 3 é demonstrado as placas, bem como as extremidades descritas e o sentido do deslocamento.

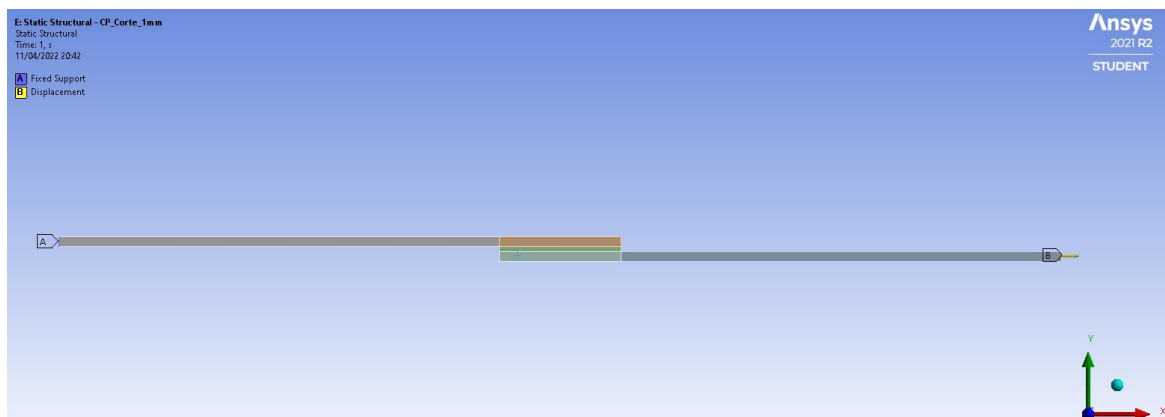


Figura 3. Condições de contorno na junta de sobreposição simples, Autor (2021).

Na Figura 4 é demonstrado o refinio da malha mais acentuada nas extremidades do PDMS, onde irá iniciar o deslocamento e tensão de corte no processo. Portanto, para o modelo em questão foi utilizada uma malha com elementos retangulares de lados menores a medida que se aproximam das extremidades do PDMS, onde existem maiores efeitos das tensões de cisalhamento. Como o foco está no PDMS, ao longo do comprimento das placas os elementos passam a aumentar seu comprimento em relação aos que se encontram na região de contato. Devido a grande deformação apresentada foi adicionado o efeito de não linearidade, assim como os contatos entre a placa e o PDMS foram considerados do tipo colados, por apresentarem também não linearidade. A malha possui 780 nós e 630 elementos quadriláteros.

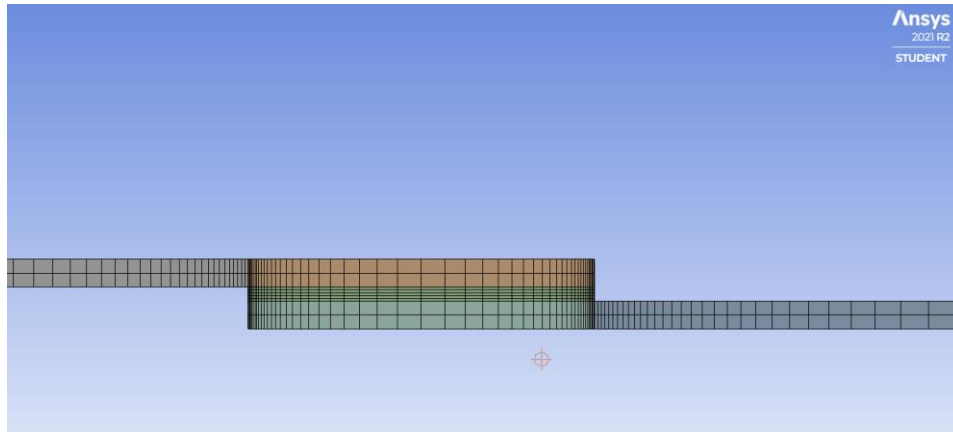


Figura 4. Malha refinada nas extremidades do PDMS, Autor (2021).

3. RESULTADOS

A Figura 5 (a, b, c e d) apresenta o gráfico de barra do ensaio de tração uniaxial com o valor obtido de resistência à tração e os gráficos comparativos entre o resultado experimental e os modelos constitutivos. O valor da média para a resistência a tração foi de 4,49 MPa com um desvio-padrão de 0,019.

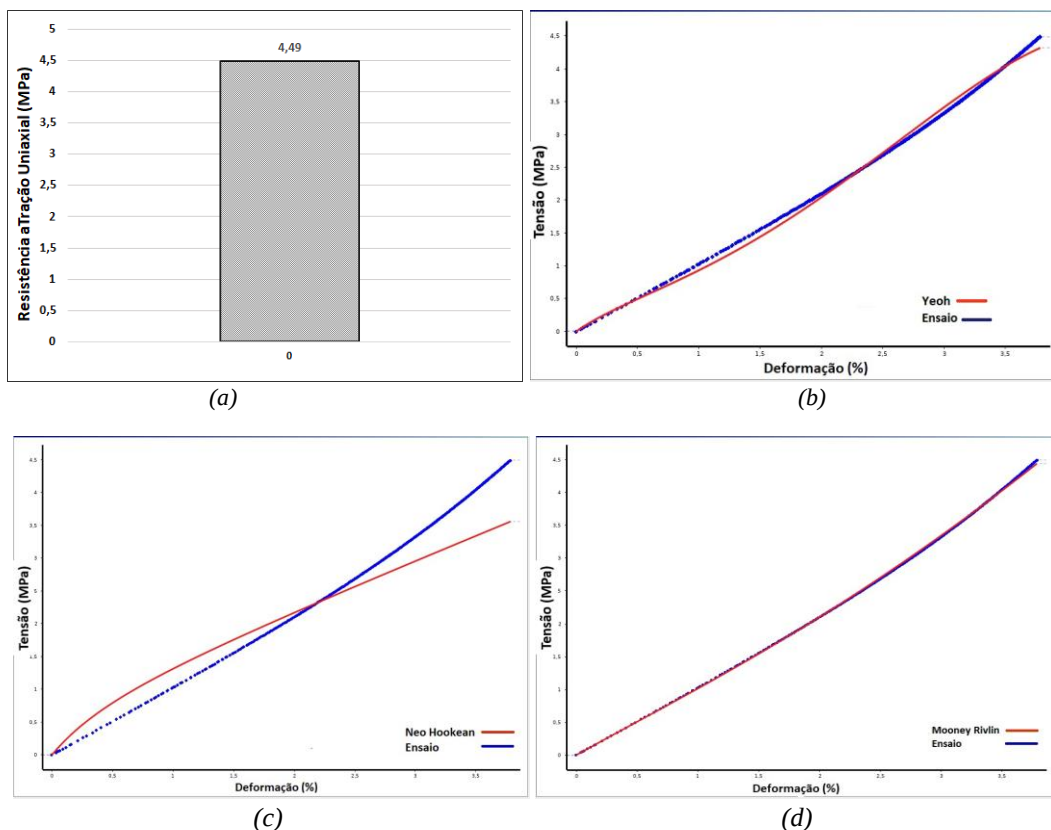


Figura 5. (a) Resistencia a tração do PDMS (b) Yeoh, (c) Neo Hookean e (d) Mooney Rivlin, Autor (2021).

A partir dos dados de laboratório foi escolhido um modelo matemático constitutivo de função densidade energia de deformação que se ajusta aos resultados experimentais. Com os resultados experimentais foram feitos os ajustes de curvas no software Ansys utilizando uma análise estrutural e não-linearidade devido à grande deformação. A Tabela 1 mostra os modelos matemáticos e respectivos erros dos ajustes das curvas entre o resultado experimental e os modelos adotados. Na simulação computacional o melhor modelo matemático constitutivo de função densidade energia de deformação que se ajustou aos dados de laboratório foi o de Mooney-Rivlin de 3ª ordem. Na Tabela 2 é demonstrado as constantes do modelo.

Tabela 1. Constantes do modelo Mooney Rivlin de 3ª ordem em Pascal (Pa), Autor. (2022).

Modelo	Erro de ajuste de curva
Neo-Hookean	28,3323
Yeoh 2nd	2,96358
Mooney Rivlin	0,02619

Tabela 2. Constantes do modelo Mooney Rivlin de 3ª ordem em Pascal (Pa), Autor. (2022).

C10	C01	C11
$3,4056 \times 10^5$	$-1,690 \times 10^5$	14994

Os resultados de tensão das simulações para o deslocamento de 2 mm são observados na Fig. (6) e (7), no valor máximo de 2,52 e 5,05 MPa respectivamente as espessuras 0,6 e 1mm.

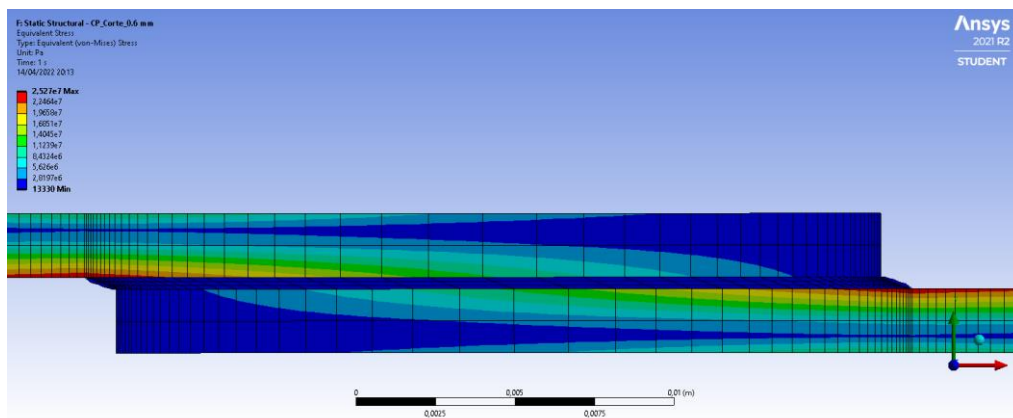


Figura 6. Resultado de tensão para a espessura de 0,6mm, Autor (2021).

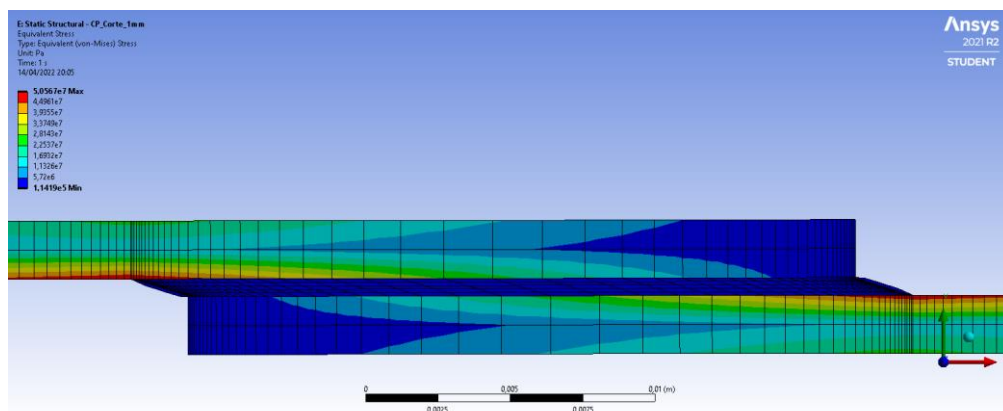


Figura 7. Resultado de tensão para a espessura de 1mm, Autor (2021).

Os resultados de deformação obtidos das simulações para o deslocamento de 2 mm são observados nas Fig. (8) e (9), no valor máximo de 1,23 e 1,36 m/m respectivamente as espessuras 0,6 e 1mm.

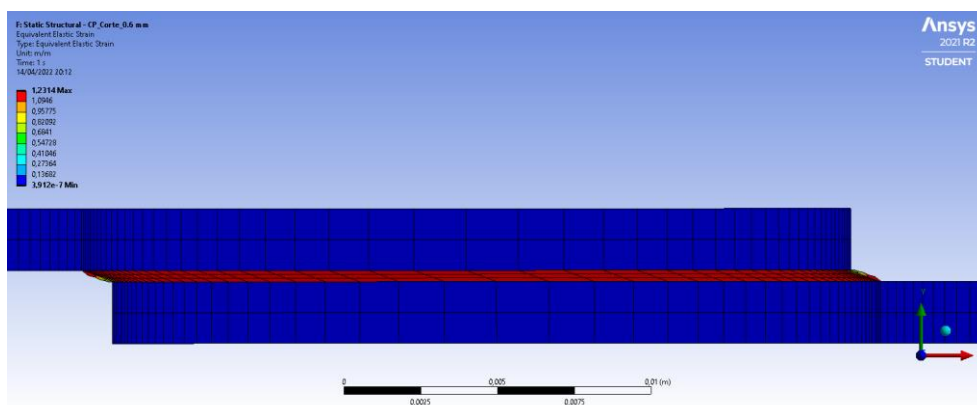


Figura 8. Resultado deformação para a espessura de 0,6mm, Autor (2021).

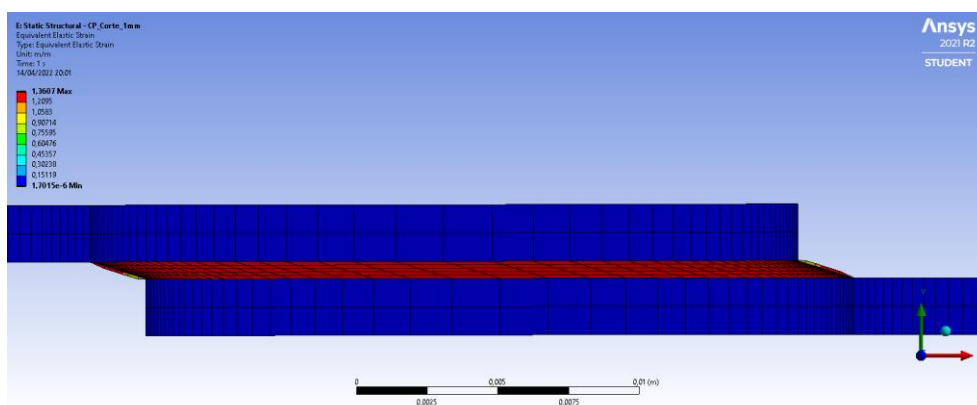


Figura 9. Resultado deformação para a espessura de 1mm, Autor (2021).

4. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou um estudo do comportamento mecânico do elastômero PDMS submetido a grandes deformações em ensaio de tração uniaxial e simulações de cisalhamento simples em espessuras de 0,6 e 1,0 mm de adesivo não estrutural PDMS. A resistência à tração foi de $4,49 \text{ MPa} \pm 0,019$ com uma deformação de 69,0%. Para a simulação computacional o melhor modelo matemático constitutivo de função densidade energia de deformação que se ajustou aos dados de laboratório foi o de Mooney-Rivlin de 3ª ordem, apresetando como resultado em comparação direta das simulações computacional em juntas de sobreposição simples um aumento na tensão e deformação conforme a espessura do PDMS em cada simulação aumenta.

5. REFERÊNCIAS

- ABNT NBR ISO 37. Borrachas vulcanizadas ou termoplásticas. Determinação das propriedades de tensão deformação e tração., 2014.
- COMPLETO, António e Fonseca, Fernando. Fundamentos de Biomecânica Músculo-Esquelética e Ortopédica. 2ª edição. Publindústria, Edições Técnicas, 2019.
- GUIMARÃES, Julliana Alves. Caracterização numérica do campo de deslocamentos e deformações do PDMS sujeito ao corte. Orientadores: João Ribeiro e Alexandre Pereira. 2018. 70 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Mecânica). Escola Superior de Tecnologia e Gestão, Instituto Politécnico de Bragança, Portugal, 2018.
- MARQUES, Eduardo do Carmo. Caracterização numérica do PDMS ao corte relacionado ao estudo biomecânico de aneurismas cerebrais. Orientadores: João Ribeiro e Alexandre Pereira. 2018. 108 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Mecânica). Escola Superior de Tecnologia e Gestão, Instituto Politécnico de Bragança, Portugal, 2018.
- MIRANDA, I.; Souza, A.; Sousa, P.; Ribeiro, J.; Castanheira, E.M.S.; Lima, R.; Minas, G. Properties and Applications of PDMS for Biomedical Engineering: A Review. J. Funct. Biomater. 2022, 13, 2. <https://doi.org/10.3390/jfb13010002>



- MOREIRA, Núria Renata Pinheiro. Estudo de várias propriedades mecânicas do polidimetilsiloxano (PDMS) usado em dispositivos biomédicos. Orientadores: Rui Lima e Lucas da Silva. 2013. 96 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Biomédica). Escola Superior de Tecnologia e Gestão, Instituto Politécnico de Bragança, Portugal, 2013.
- PEREIRA, Alexandre Luiz. Cisalhamento simples em material hiperelástico submetido a grandes deformações. Orientador: Luiz Carlos da Silva Nunes. 2013. 61 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2013.
- TEIXEIRA-DIAS, Filipe & Cruz, A. & Valente, Robertt & Alves de Sousa, Ricardo. Método dos Elementos Finitos - Técnicas de Simulação Numérica em Engenharia, 2018.

6. AGRADECIMENTOS

Ao Cefet/RJ pela Iniciação Científica, suporte no uso do maquinário e as dependências do Campus Angra dos Reis e ao Prof. Dr. Alexandre Luiz Pereira pela sua orientação.