

UTILIZAÇÃO DA MALHA ENTRECruzADA DA FIBRA DE BANANEIRA
COMO REFORÇO NA LAMINAÇÃO DE ROCHAS ORNAMENTAIS
ARTIFICIAIS E NATURAIS

FERNANDA SOUZA SILVA

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE – UENF
CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ

JANEIRO-2020

UTILIZAÇÃO DA MALHA ENTRECruzADA DA FIBRA DE BANANEIRA
COMO REFORÇO NA LAMINAÇÃO DE ROCHAS ORNAMENTAIS
ARTIFICIAIS E NATURAIS

FERNANDA SOUZA SILVA

Tese apresentada ao Centro de Ciência e Tecnologia, da Universidade Estadual do Norte Fluminense, como parte das exigências para obtenção de título de Doutor em Engenharia e Ciência dos Materiais

Orientador: Prof. Rubén J. Sánchez Rodríguez.

CAMPOS DOS GOTACAZES – RJ
JANEIRO-2020

UTILIZAÇÃO DA MALHA ENTRECruzADA DA FIBRA DE BANANEIRA
COMO REFORÇO NA LAMINAÇÃO DE ROCHAS ORNAMENTAIS
ARTIFICIAIS E NATURAIS

FERNANDA SOUZA SILVA

Tese apresentada ao Centro de Ciência e Tecnologia, da Universidade Estadual do Norte Fluminense, como parte das exigências para obtenção de título de Doutor em Engenharia e Ciência dos Materiais.

Comissão Examinadora:

Prof. Mariana Valinhos Barcelos (D.Sc., Eng. Materiais) – IFES

Prof. Carlos Maurício Fontes Vieira (Ph.D., Eng. Mecânica) – UENF

Prof. Raúl Ernesto López Palácio (D.Sc., Polímeros) – UENF

Prof. Rubén J. Sánchez Rodriguez (D.Sc., Polímeros) – UENF (Orientador)

“O conhecimento nos faz responsáveis”.
Che Guevara

Dedico ao meu Deus e a minha família.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus pela força e capacidade, a minha mãe pelo incentivo, ao meu irmão, e In Memoriam de meu pai, ao meu noivo Renan pela compreensão nos meus momentos de ausência e de apoio. Agradeço a todos os meus amigos e a minha família que entenderam meus momentos de ausência ao longo do processo de doutoramento.

Agradeço a todos os amigos do Lamav, do Ifes e da Multivix.

Agradeço aos técnicos do LAMAV por toda ajuda.

Agradeço ao professor Carlos Eduardo pelos testes realizados.

Agradeço ao professor Rubén pela confiança, oportunidade e incentivo no trabalho.

Agradeço ao professor Carlos Maurício, Raúl e Mariana pela presença na banca.

Agradeço ao Vitor da UFSCAR pela realização dos testes químicos.

Agradeço à Universidade Estadual Norte Fluminense, ao Instituto Federal do Espírito Santo, ao Centro de Tecnologia Mineral do Espírito Santo, a Universidade Federal de São Carlos, ao Instituto Militar de Engenharia e a Faculdade Multivix, que me auxiliaram com os equipamentos para a realização de testes ao longo da pesquisa.

SUMÁRIO

SUMÁRIO.....	i
LISTA DE FIGURAS	iv
LISTA DE TABELAS	xiii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	xiv
CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO.....	01
1.1 Objetivos Gerais.....	03
1.2 Objetivos Específicos	03
1.3 Justificativa.....	04
1.4 Ineditismo.....	04
CAPÍTULO 2: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	06
2.1 Rocha Artificial	06
2.2 Rochas Ornamentais Naturais	10
2.3 Resina Epoxídica DGEBA/TEPA	12
2.4 Laminação de Mármore.....	18
2.5 Fibra de Vidro.....	20
2.6 Fibras Naturais	23
2.6.1 Fibra do pseudocaule da bananeira.....	26
2.6.2 Interface fibra/matriz	32
2.7 Resíduos	34
2.7.1 Resíduos de rochas ornamentais	35
2.7.2 Resíduos do cultivo da bananeira.....	36
CAPÍTULO 3: MATERIAIS E MÉTODOS.....	38
3.1 Materiais	38
3.2 Extração da fibra de bananeira	39
3.3 Caracterização das Matérias-Primas	46
3.3.1 Determinação do diâmetro médio das fibras.....	47
3.3.2 Densidade e absorção de água da fibra de bananeira	48
3.3.3 Composição química da fibra do pseudocaule de bananeira.....	49
3.3.4 Análise de infravermelho na fibra do pseudocaule de bananeira (FTIR)	52

3.3.5	Análise termogravimétrica (TG)	52
3.3.6	Resistência à tração da fibra de bananeira e da fibra de vidro	53
3.3.7	Ensaio Pullout em fibras de bananeira	55
3.3.8	Ângulo de contato das fibras de bananeira e da resina epoxídica DGEBA/TEPA	56
3.3.9	Resistência à flexão em rochas não laminadas	57
3.3.10	Ensaio de resistência ao impacto de corpo duro em rochas não laminadas	58
3.3.11	Análise dinâmico-mecânico (DMA)	59
3.3.12	Microestrutura da fibra do pseudocaule da bananeira e da fibra de vidro	60
3.4	Produção da Malha de Fibra de Bananeira	61
3.4.1	Determinação da gramatura da malha entrecruzada da fibra de bananeira	69
3.4.2	MEV na malha entrecruzada da fibra de bananeira e na de fibra de vidro	70
3.5	Processo de Laminação	70
3.6	Caracterização das Placas de Mármore Artificial e Natural Laminadas	72
3.6.1	Determinação da direção de utilização da malha entrecruzada da fibra de bananeira para utilização como reforço mecânico	73
3.6.2	Resistência à flexão	73
3.6.3	Impacto de corpo duro	74
3.6.4	Análise termogravimétrica (TG)	75
3.6.5	Microestrutura	75
3.7	Produção da Rocha Artificial	75
CAPÍTULO 4: RESULTADOS E DISCUSSÃO		78
4.1	Caracterização das Matérias-Primas	78
4.1.1	Distribuição diametral	78
4.1.2	Densidade e absorção de água da fibra de bananeira	79
4.1.3	Composição química da fibra do pseudocaule da bananeira	81
4.1.4	Análise de infravermelho na fibra do pseudocaule de bananeira (FTIR)	83
4.1.5	Análise termogravimétrica (TG)	85

4.1.6 Resistência à tração das fibras de bananeira	88
4.1.7 Resistência à tração da fibra de vidro	91
4.1.8 Ensaio Pullout em fibras de bananeira	98
4.1.9 Ângulo de contato das fibras de bananeira e da resina epoxídica DGEBA/TEPA	100
4.1.10 Microestrutura	101
4.1.11 Resistência à flexão em rochas não laminadas	106
4.1.12 Análise dinâmico-mecânico (DMA)	111
4.2 Caracterização da Malha da Fibra de Bananeira	113
4.2.1 Determinação da gramatura da malha entrecruzada da fibra de bananeira.....	113
4.2.2 Microscopia da malha entrecruzada da fibra de bananeira e da malha da fibra de vidro	114
4.3 Caracterização das Placas de Mármore Artificial e Natural Laminadas.....	119
4.3.1 Determinação da direção de utilização da malha entrecruzada da fibra de bananeira para utilização como reforço mecânico	119
4.3.2 Resistência à flexão	126
4.3.3 Impacto de corpo duro	136
4.3.4 Análise termogravimétrica (TG)	137
4.3.5 Microscopia da região de fratura das rochas laminadas	139
CAPÍTULO 5: CONCLUSÃO	145
CAPÍTULO 6: SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	147
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	148

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Importações brasileiras acumuladas de materiais rochosos artificiais no período 2015 – 2017 (ABIROCHAS, 2018).....	10
Figura 2. Estrutura molecular da resina epóxi	13
Figura 3. Estrutura química da resina diglicidil éter de bisfenol A (DGEBA) (SILVA, 2009).....	13
Figura 4. Cadeia estrutural da TEPA (Pittiman <i>et al.</i> , 1997).....	15
Figura 5. Rede entrecruzada da DGEBA com amina TEPA (AMARAL, 2009)	16
Figura 6. Rocha em preparação para laminação (A) Mármore laminado com fibra de vidro(B) Rocha com fibra de vidro para ser laminada (C) (CONSTRUPOR, 2016).	18
Figura 7. Fibra de vidro entrelaçada para uso em laminação de rochas (YUYAO, 2016)	20
Figura 8. Fibra de vidro entrelaçada para uso em construção civil (TEGAPE, 2016)	22
Figura 9. Estrutura do mero da celulose (SILVA, 2011)	25
Figura 10. Pseudocaule da bananeira (A) (SILVA, 2011); Bainhas que formam o pseudocaule da bananeira (B) (DEMARCHI, 2010); (C) Detalhe da camada do pseudocaule onde se encontram as fibras (SILVA, 2008)	28
Figura 11. Bananeira (SILVA, 2011)	29
Figura 12. Máquina desfibradora (Adaptado de MUKHOPADHYAY <i>et al.</i> ,2016)	30
Figura 13. Processo manual (A) e mecânico (B) (RAY <i>et al.</i> , 2013)	31
Figura 14. Corte transversal (A) e longitudinal (B) do pseudocaule: 1. Bainhas foliares; 2. Talo Floral (OLIVEIRA, 2007)	32
Figura 15. Interface entre a fibra e a matriz (CHAWLA, 1987). (A) interface ideal; (B) Interface real	33
Figura 16. Desdobramento com fio longo (DEMARCHI, 2010)	40
Figura 17. Bainha aberta com o interior à mostra e células aparentes (A) Bainha dividida em duas partes: imagem superior (bainha interna) e inferior (bainha externa) (B) Divisão das bainhas do pseudocaule (C) e corte longitudinal na bainha para a separação da parte com maior concentração de fibra (D) (DEMARCHI, 2010)	41

Figura 18. (A) e (B) Plantação de bananeira	42
Figura 19. (A) Pseudocaule da bananeira; (B) Preparação do pseudocaule da bananeira para retirada das fibras	42
Figura 20. (A) e (B) Pseudocaule cortado	43
Figura 21. (A) e (B) Pseudocaule da bananeira para entrar em processo de imersão em água por 7 dias	43
Figura 22. (A) Pseudocaule após o período de 7 dias em imersão na água; (B) Bainha externa	44
Figura 23. Fibras extraídas.....	45
Figura 24. Fibras do pseudocaule da bananeira	45
Figura 25. Fluxograma de caracterização das matérias-primas.....	46
Figura 26. Projetor de Perfil PJ-A3000.....	48
Figura 27. Deslocamento do líquido na proveta	48
Figura 28. Equipamento TGA-Q5000 TA Instruments.....	53
Figura 29. (A) Teste de tração na fibra de bananeira; (B) Corpo de prova da bananeira	54
Figura 30. (A) Fibra fina de menor espessura da malha de vidro; (B) fibra retangular de maior espessura da malha de fibra de vidro	54
Figura 31. Esquema do ensaio de pullout proposto por Kelly e Tyson (KELLY e TYSON, 1965).....	55
Figura 32. Fibra de bananeira inserida na matriz epoxídica DGEBA/TEPA.....	56
Figura 33. Goniômetro utilizado para a realização das medidas do ângulo de contato	56
Figura 34. Teste de impacto de corpo duro.....	59
Figura 35. DMA Q800 TA Instruments- (a) garra de flexão “dual cantilever” (b) garra de tração	60
Figura 36. Microscopia confocal LEXT OLS4000-Olympus	61
Figura 37. Malha de vidro demonstrando o padrão a ser seguido na produção da malha da fibra de bananeira.....	62
Figura 38. (A) e (B) Corte da vista superior do molde (à esquerda) e molde em perspectiva (à direita)	62
Figura 39. Fibras do pseudocaule da bananeira na primeira fase de preparação para a rede entrecruzada	63
Figura 40. (A) e (B) Preparação da rede entrecruzada da fibra de bananeira	64

Figura 41. (A, B, C, D) - Rede entrecruzada da bananeira no molde	65
Figura 42. (A, B, C, D) - Rede entrecruzada da bananeira no molde sem a parte superior de fixação	66
Figura 43. Rede entrecruzada de bananeira	66
Figura 44. (A) e (B) Rede entrecruzada da malha de bananeira.....	67
Figura 45. (A) e (B) Rede entrecruzada de fibra de vidro (à esquerda) e fibra entrecruzada de bananeira (à direita)	68
Figura 46. (A) e (B) Rede entrecruzada de fibra de bananeira pronta para a laminação de rochas ornamentais.....	69
Figura 47. Teste de gramatura na rede entrecruzada da bananeira.	70
Figura 48. Fluxograma do processo de laminação.....	71
Figura 49. (A) Rocha calcítica laminada com malha de fibra de bananeira; (B) Rocha calcítica laminada com fibra de vidro	71
Figura 50. (A) Rocha natural calcítica laminada com malha de bananeira; (B) Rocha calcítica com laminação de fibra de vidro (esquerda) e rocha calcítica laminada com fibra de bananeira (direita)	74
Figura 51. Rocha calcítica natural laminada com fibra de bananeira (imagem superior) e com fibra de vidro (imagem inferior)	74
Figura 52. Misturador a vácuo com temperatura regulável para rochas artificiais.....	76
Figura 53. Rocha artificial produzida com malha de fibra de bananeira prensada na produção (à esquerda); Rocha artificial produzida laminada com malha de fibra de bananeira (à direita)	77
Figura 54. Rocha artificial produzida com malha de fibra de vidro prensada na produção (à esquerda); Rocha artificial produzida laminada com malha de fibra de vidro (à direita)	77
Figura 55. Ampliação de medição do diâmetro de fibra de bananeira.....	78
Figura 56. (A) Histograma do diâmetro médio da fibra de bananeira; (B) Índice de performance do diâmetro da fibra de bananeira.....	79
Figura 57. (A) Fibra bruta; (B) fibra branqueada; e (C) ligninca extraída da fibra	82
Figura 58. Teste de infravermelho da fibra do pseudocaule de bananeira.....	84
Figura 59. Análise termogravimétrica na fibra de bananeira <i>in natura</i>	86
Figura 60. Derivada de massa da fibra de bananeira <i>in natura</i> e da fibra de bananeira laminada com resina epoxídica	87

Figura 61. Análise termogravimétrica da fibra de bananeira e da fibra de vidro (ambas in naturas e impregnadas com resina epoxídica)	88
Figura 62. (A) Histograma de resistência à tração das fibras de bananeira; (B) Índice de performance (distribuição) da resistência à tração das fibras de bananeira	89
Figura 63. Fibra de bananeira: Resistência à tração x Diâmetro.....	90
Figura 64. (A) Fibra de bananeira: Módulo elástico x Diâmetro	91
Figura 65. Projeção de perfil da fibra de vidro fina e circular	92
Figura 66. (A) Histograma de resistência à tração da fibra de vidro fina; (B) Índice de performance da resistência à tração da fibra de vidro fina (Distribuição)	93
Figura 67. (A) Fibra de vidro: Resistência à tração x módulo elástico; (B) Fibra de bananeira: Resistência à tração x módulo elástico	93
Figura 68. (A):Fibra de vidro: Resistência à tração x deformação; (B) Histograma: Deformação (fibra de vidro fina).....	94
Figura 69. (A)Histograma de módulo elástico da fibra de vidro fina no teste de resistência à tração; (B) Índice de performance do módulo elástico da fibra de vidro fina no teste de resistência à tração (Distribuição)	95
Figura 70. Projeção de perfil da fibra de vidro retangular.....	95
Figura 71. (A) Histograma da resistência à tração da fibra de vidro retangular no teste de resistência à tração; (B) Índice de performance da resistência à tração da fibra de vidro retangular no teste de resistência à tração (Distribuição)	96
Figura 72. Fibra de vidro retangular: Resistência à tração x módulo elástico	97
Figura 73. (A)Fibra de vidro retangular: Resistência à tração x deformação; (B) Histograma: Deformação (fibra de vidro retangular)	97
Figura 74. (A)Histograma de módulo elástico da fibra de vidro retangular no teste de resistência à tração; (B) Índice de performance do módulo elástico da fibra de vidro retangular no teste de resistência à tração (Distribuição)	98
Figura 75. Gráfico de força de rompimento x comprimento de embutimento da fibra de bananeira	99
Figura 76. Tensão Pullout x comprimento embutido das fibras de bananeira na resina epoxídica DGEBA/TEPA	99
Figura 77. (A) Teste de ângulo de contato na fibra de bananeira; (B) Teste de ângulo de contato na resina epoxídica DGEBA/TEPA	100

Figura 78. (A) Imagem da fibra de bananeira no confocal com aumento de 216x; (B) fibra de bananeira no confocal com polpa residual com aumento de 216x	101
Figura 79. Imagem da fibra de vidro “grossa” com aumento de 216x; (B) fibra de vidro “fina” circular com aumento de 216x.....	102
Figura 80. (A, B, C, D)- Micrografia eletrônica de varredura da fibra do pseudocaule da bananeira produzida com aumentos de 35x(A), 35x(B), 120x(C) e 270x(D).....	103
Figura 81. (A, B, C, D)- Micrografia eletrônica de varredura da superfície de corte da fibra do pseudocaule de bananeira produzida com aumentos de 300x(A), 1500x(B), 300x(C) e 1500x(D).....	104
Figura 82. (A, B, C, D)- Micrografia eletrônica de varredura da fibra de vidro fina circular produzida com aumentos de 35x(A), 100x(B), 100x(C) e 270x(D)	105
Figura 83. (A, B, C, D)- Micrografia eletrônica de varredura da fibra de vidro retangular produzida com aumentos de 30x(A), 120x(B), 150x(C) e 270x(D).....	106
Figura 84. Resistência à flexão de rochas calcíneas naturais sem laminação	107
Figura 85. Distribuição dos valores de resistência à flexão dos mármore calcíneos naturais.....	107
Figura 86. Resistência à flexão do mármore artificial comercial sem laminação	108
Figura 87. Distribuição dos valores de resistência à flexão dos mármore artificiais comerciais sem laminação	109
Figura 88. Rocha artificial produzida com conceitos de Silva (2016)	110
Figura 89. Gráfico de resistência flexural da rocha artificial produzida com resíduo calcínico e resina epoxídica	110
Figura 90. Análise dinâmico mecânica da fibra de bananeira <i>in natura</i> e da fibra de bananeira laminada com resina epoxídica	111
Figura 91. Análise dinâmico mecânica da fibra de bananeira <i>in natura</i> no primeiro e no segundo aquecimento	112
Figura 92. Análise dinâmico mecânico da fibra de vidro pura e da fibra de vidro impregnada com resina epoxídica.....	112
Figura 93. Gramatura da malha de fibra de bananeira.....	113
Figura 94. (A) Histograma da gramatura da rede entrelaçada da fibra de bananeira; (B) Índice de performance da gramatura (Distribuição).....	114

Figura 95. (A) Ponto de entrecruzamento da fibra de bananeira com aumento de 108x; (B) Ponto de entrecruzamento da fibra de vidro com aumento de 108x.....	115
Figura 96. (A) e (B) Ponto de entrecruzamento da fibra de bananeira laminada na rocha com aumento de 108x.....	116
Figura 97. Ponto de entrecruzamento da fibra de vidro laminada na rocha com aumento de 108x.....	117
Figura 98. (A, B, C, D)- Micrografia eletrônica de varredura da rede entrelaçada da fibra de bananeira produzida com aumentos de 30x(A), 33x(B), 70x(C) e 200x(D)	118
Figura 99. (A, B, C, D)- Micrografia eletrônica de varredura da rede entrelaçada da fibra de vidro produzida com aumentos de 17x(A), 35x(B), 35x(C), 60x(D)	119
Figura 100. Resistência à flexão do mármore calcítico natural laminado com fibra de vidro dupla paralela a fratura.....	120
Figura 101. Resistência à flexão do mármore calcítico natural laminado com fibra de vidro dupla perpendicular a fratura.....	121
Figura 102. Comparação de resistência flexural para determinação do sentido de direção de laminação da fibra de vidro no mármore calcítico natural.....	122
Figura 103. Resistência flexural do mármore calcítico natural laminado com fibra de bananeira dupla perpendicular a fratura.....	123
Figura 104. Resistência à flexão do mármore calcítico natural laminado com fibra de bananeira dupla paralela a fratura (Lote 1)	124
Figura 105. Comparação de resistência flexural para determinação do sentido de direção de laminação da fibra de bananeira no mármore calcítico natural.....	125
Figura 106. Resistência flexural do mármore calcítico natural laminado com fibra de bananeira dupla perpendicular a fratura (Lote 2)	126
Figura 107. Intervalo de confiança da resistência flexural da rocha calcítica, rocha calcítica laminada com fibra de vidro e rocha calcítica laminada com fibra de bananeira	127
Figura 108. Resistência à flexão do mármore artificial comercial laminado com malha de bananeira.....	128
Figura 109. Resistência à flexão do mármore artificial comercial laminado com fibra de vidro.....	129

Figura 110. Intervalo de confiança da resistência flexural das rochas artificiais comerciais isentas de laminação, laminadas com fibra de bananeira e com fibra de vidro	130
Figura 111. Rocha artificial produzida e laminada com fibra de vidro	130
Figura 112. Gráfico de resistência flexural da rocha artificial produzida e laminada com fibra de vidro	131
Figura 113. Rocha artificial produzida com fibra de vidro reforçando o interior da matriz epoxídica	131
Figura 114. Gráfico de resistência flexural da rocha artificial produzida com fibra de vidro reforçando o interior da matriz	132
Figura 115. Rocha artificial produzida e laminada com malha de fibra de bananeira	132
Figura 116. Gráfico de resistência flexural da rocha artificial produzida e laminada com fibra de bananeira	133
Figura 117. Rocha artificial produzida com malha de fibra de bananeira reforçando o interior da matriz epoxídica	133
Figura 118. Gráfico de resistência flexural da rocha artificial produzida com fibra de vidro reforçando o interior da matriz	134
Figura 119. Intervalo de confiança da resistência flexural do mármore artificial produzido sem laminação, laminado com malha de fibra de vidro e laminado com malha de fibra de bananeira	135
Figura 120. Intervalo de confiança da resistência flexural do mármore artificial produzido sem laminação, reforçado com fibra de vidro no interior da matriz e reforçado com malha de bananeira no interior da matriz	136
Figura 121. (A) Valores de ruptura no teste do impacto de corpo duro para a rocha calcítica natural; (B) Valores de trinca para o ensaio de impacto de corpo duro para a rocha calcítica natural	136
Figura 122. Análise termogravimétrica da rocha natural isenta de laminação, rocha natural laminada com fibra de bananeira e rocha natural laminada com fibra de vidro.....	138
Figura 123. Análise termogravimétrica da rocha artificial comercial isenta de laminação, rocha artificial laminada com fibra de bananeira e rocha artificial laminada com fibra de vidro	138

Figura 124. (A) Região de fratura da rocha natural com laminação da malha da fibra de bananeira com aumento de 108x; (B) Região de fratura da rocha artificial comercial com laminação da malha da fibra de bananeira com aumento de 108x	139
Figura 125. Região de fratura da rocha calcítica natural laminada com fibra de vidro com aumento de 108x; (B) Região de fratura da rocha artificial comercial laminada com fibra de vidro cum aumento de 108x	140
Figura 126. (A, B)- Micrografia eletrônica de varredura da região de fratura do mármore calcítico natural laminado com fibra de bananeira produzida com aumentos de 400x(A) e 450x(B).....	141
Figura 127. (A, B)- Micrografia eletrônica de varredura da região de fratura do mármore calcítico natural laminado com fibra de vidro produzida com aumentos de 100x(A) e 450x(B)	142
Figura 128. (A, B, C)- Micrografia eletrônica de varredura da região de fratura do mármore artificial comercial laminado com fibra de bananeira produzida com aumentos de 70x(A), 80x(B) e 240x(C).....	143
Figura 129. Micrografia eletrônica de varredura da região de fratura do mármore artificial comercial laminado com fibra de vidro produzida com aumentos de 150x(A) e 350x(B).....	144

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Pesquisa de ineditismo na base de conhecimentos sobre artigos científicos	05
Tabela 2 Propriedades da resina DGEBA (SILVA, 2009)	14
Tabela 3. Propriedades comparativas do teste de tração da fibra de banana versus a fibra de vidro (MUKHOPADHYAY <i>et al.</i> , 2009).....	19
Tabela 4. Propriedades comparativas de fibra de vidro e da bananeira em relação a materiais com características mecânicas consideráveis (MUKHOPADHYAY <i>et al.</i> , 2009; CONSTRUPOR, 2016).....	21
Tabela 5. Característica da fibra de vidro M50 para impermeabilização do fabricante Leroy Merlin (MERLIN, 2017)	22
Tabela 6. Propriedades das fibras vegetais (Adaptado de CHANDRAMOHAN e MARIMUTHU, 2011)	26
Tabela 7. Propriedades físicas e mecânicas da fibra de bananeira	27
Tabela 8. Características químicas da fibra de bananeira (MUKHOPADHYAY <i>et al.</i> , 2009)	28
Tabela 9. Valores de absorção de água e densidade para a fibra de bananeira	80
Tabela 10. Composição química da fibra do pseudocaule da bananeira	81
Tabela 11. Atribuição das ondas dos espectros do pseudocaule da bananeira.....	85
Tabela 12. Força de rompimento do ensaio Pullout das fibras de bananeira.....	98
Tabela 13. Valores de resistência flexural para mármore calcítico natural com resistências mecânicas dependentes da direção da dupla torção da fibra de vidro em relação a fratura	122
Tabela 14. Valores de resistência flexural para mármore calcítico natural com resistências mecânicas dependentes da direção da dupla torção da fibra de bananeira em relação a fratura	125

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABIROCHAS - Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT)

ASTM - American Society for Testing and Materials

EDA – Etilenodiamina

DETA - Dietilenotriamina

DGEBA - Diglicidil éter de bisfenol A

DMA - Análise Dinâmico Mecânica

EN – Norma Européia

FTIR- Espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier

IFES – Instituto Federal do Espírito Santo

LAMAV - Laboratório de Materiais Avançados

MEV - Microscopia Eletrônica de Varredura

NBR - Norma Brasileira

TGA - Análise Termogravimétrica

TEPA - Tetraetilenopentamina

TETA - Trietilenotetramina

UENF - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro

UNE-E - Norma Técnica Espanhola

Resumo da tese apresentada ao CCT-UENF como parte dos requisitos para obtenção do grau de Doutora em Engenharia e Ciência dos Materiais.

UTILIZAÇÃO DA MALHA ENTRECruzADA DA FIBRA DE BANANEIRA COMO REFORÇO NA LAMINAÇÃO DE ROCHAS ORNAMENTAIS ARTIFICIAIS E NATURAIS

Fernanda Souza Silva

10 de janeiro de 2020

Orientador: Prof. Rubén J. Sánchez Rodríguez

A utilização da fibra do pseudocaule de bananeira como reforço na laminação de rochas ornamentais em alternativa as usuais fibras de vidro, pode representar uma metodologia técnico-econômico e ecologicamente viável, reduzindo o quantitativo de resíduo a ser descartado no ambiente, além de agregar valor econômico e otimizar as características mecânicas das rochas. Este trabalho teve como objetivo avaliar as propriedades mecânicas das rochas após a laminação das rochas pelas fibras vegetais. Inicialmente foi realizada a caracterização física, química e mecânica da fibra de bananeira, verificando a viabilidade do uso da mesma como reforço. Além disso, foi avaliada a utilização da fibra de bananeira na laminação de rochas artificiais comerciais e rochas artificiais produzidas. Foi verificada também a utilização das fibras no interior da matriz das rochas artificiais visando verificar se tais fibras tornariam as rochas mais resistentes mecanicamente. A extração das fibras ocorreu de modo manual, assim como a produção da rede entrecruzada com dupla torção da fibra de bananeira. A laminação das rochas ocorreu com a utilização da resina epoxídica DGEBA/TEPA. A fibra de bananeira foi submetida ao teste de densidade, análise diametral, ângulo de contato, tração, Pullout, análise química, FTIR, termogravimetria, análise dinâmico mecânica e microscopia eletrônica. Já as rochas laminadas foram submetidas ao teste de flexão em três pontos, impacto de corpo duro, teste termogravimétrico e análise microscópica. As rochas calcárias naturais laminadas com fibra de bananeira apresentaram uma melhoria mecânica nos testes de flexão em três pontos de aproximadamente 50%, e no teste de impacto de corpo duro foi registrado uma superioridade de 70% na altura de fissura, caso as mesmas fossem comparadas com as mesmas rochas isentas de laminação.

Palavras-chave: Fibra, Bananeira, Resistência mecânica.

Abstract of Thesis presented to CCT-UENF as part of the requirements for obtaining the
Doctor's Degree in Materials Engineering and Science.

USE OF BANANEIRA FIBER INTEGRATED AS A STRENGTH IN LAMINATION OF ARTIFICIAL AND NATURAL ORNAMENTAL STONES

Fernanda Souza Silva

January 10, 2020

Advisor: Prof. Rubén J. Sánchez Rodríguez

The use of banana pseudostem fiber as a reinforcement in the lamination of ornamental rocks as an alternative to the usual glass fibers may represent a technical-economical and ecologically viable methodology, reducing the amount of waste to be discarded in the environment, besides adding economic value. and optimize the mechanical characteristics of the rocks. This work aimed to evaluate the mechanical properties of rocks after lamination of rocks by plant fibers. Initially, the physical, chemical and mechanical characterization of banana fiber was performed, verifying the viability of its use as reinforcement. In addition, the use of banana fiber in the lamination of commercial artificial rocks and produced artificial rocks was evaluated. It was also verified the use of fibers inside the matrix of artificial rocks aiming to verify if such fibers would make the rocks more mechanically resistant. The extraction of the fibers occurred manually, as well as the production of double twisted mesh of banana fiber. The lamination of the rocks occurred with the use of the DGEBA / TEPA epoxy resin. Banana fiber was subjected to density test, diametric analysis, contact angle, tensile, pullout, chemical analysis, FTIR, thermogravimetry, mechanical dynamic analysis and electron microscopy. The laminated stones were submitted to the three-point flexion test, hard body impact, thermogravimetric test and microscopic analysis. Banana fiber-laminated natural calcitic rocks showed a mechanical improvement in the three-point bending tests of approximately 50%, and in the hard body impact test a 70% superiority in the crack height was recorded if they were compared. with the same rocks free of lamination.

Keywords: Fiber, Banana, Mechanical resistance.

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO

Grande parte das atividades industriais gera resíduos, os quais, em diversas situações, são considerados poluentes ou podem causar algum prejuízo ambiental. Assim, pesquisas que reutilizem os resíduos e agreguem valor econômico a um compósito produzido é de grande valia na atualidade.

No setor de mármore, durante o processo de extração e desdobramento de blocos de rochas para a produção de chapas, um volume expressivo de resíduo é gerado, exigindo maiores espaços para depósito a cada dia (SOUZA *et al.*, 2009). Perdas provenientes de sobras e quebras de peças, popularmente conhecidas como retalhos de rocha, chegam a atingir uma perda de 10 a 20%. Tais retalhos muitas vezes são depositados no pátio da empresa ou em algum outro lugar, gerando custos e impactos visuais (FERREIRA e NUNES, 2009).

No setor de mármore e granitos, as chapas das rochas ornamentais obtidas a partir do bloco de rochas são cortadas em diferentes dimensões e espessuras. Em virtude da pouca resistência à flexão, estes materiais são extremamente frágeis quando a chapa de rochas possui significativas dimensões em sua altura e largura, quando comparadas à espessura da rocha. Em função disso, é normal a utilização de uma tela de fibra de vidro na parte inferior das rochas (parte bruta e sem acabamento), a fim de tal processo proporcionar maior resistência mecânica a solicitação por flexão (SILVEIRA, 2015).

Já na atividade agrícola do cultivo da banana, a geração de resíduos também ocorre. E do pseudocaule da bananeira, um resíduo, é possível extrair a fibra natural. A utilização desta fibra na laminação de rochas ornamentais tanto naturais quanto artificiais em alternativa às fibras sintéticas de vidro (que já são usualmente utilizadas) destaca-se como tema de pesquisa desta pesquisa.

Nos últimos anos, a extração de rochas ornamentais como o mármore e o granito registrou um aumento significativo. Tal aumento ocorreu, principalmente, em virtude da utilização desses materiais em obras na construção civil e também para a exportação. A produção brasileira destes materiais durante o ano de 2013, de acordo com dados do Abirochas, obteve um máximo histórico de 10,5 milhões de toneladas (MONTANI, 2014). Já em 2014, a produção manteve-se na ordem de 10,2 milhões de toneladas brutas. O Brasil destaca-se por ser o país líder americano,

possuindo potencial para abastecer todo o continente, e principalmente, o hemisfério norte (ABIROCHAS, 2015). De acordo com o Abirochas (2017), o Brasil em relação ao ano de 2016, teve uma participação de 5,82% do mercado mundial, fixando uma participação considerável no mercado internacional. O Brasil aparece como quarto produtor e sexto exportador mundial de rochas, sendo um importador pouco expressivo. Estima-se que no ano de 2020, a produção mundial de rochas ornamentais seja de 1,8 bilhão m² (ABIROCHAS, 2017).

Utiliza-se com frequência as fibras de vidro para reforço na laminação de mármore em função do baixo custo se for comparada com as fibras de poliaramida e carbono, além das mesmas apresentarem propriedades mecânicas consideravelmente boas. No entanto, tais fibras apresentam inconvenientes se forem comparadas com as fibras naturais, principalmente nos aspectos ambientais. Há uma atração para as fibras naturais em função da produção de dióxido de carbono ser nulo em tais materiais (WANBUA *et al.*, 2003).

Em 2016 o Brasil teve uma produção anual de sete milhões de toneladas de banana, sendo a quarta do mundo em produção (GOMES, 2017). De acordo com dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), a área de produção no País atingiu 478 mil hectares em 2018, recuo de 1,8% em relação ao ano de 2017 (DCI, 2018).

No cultivo da banana, uma quantidade considerável de resíduos é gerada diariamente, podendo ser divididos em diversas partes. De acordo com Moreira (1987), se um bananal for conduzido de forma convencional, a produção pode gerar até 200 t ha/ano de restos de cultura. Souza (2008) informou em suas pesquisas que posteriormente a colheita da banana, a atividade agropecuária pode causar, em matéria seca, aproximadamente 8 t/ha de pseudocaule, 4,7 t/há de folha, 0,7 t/há de engaço e 0,3 t/há de botão floral ou coração. Portanto, este material classificado como orgânico, abundante em nutrientes, possibilita a proliferação de fungos após o apodrecimento, fato que pode ser prejudicial à plantação. A utilização da fibra do pseudocaule transforma este material que neste momento seria um resíduo, para a classificação de matéria prima (VIEIRA, 2015).

Já em relação a custos, a fibra de vidro pode ser comprada em diversos distribuidores, com gramaturas diferentes, isto é, aberturas da malha em diversos tamanhos. Os preços para compra variam para cada tipo de fornecedor e também de acordo com a gramatura desejada. A Fibra de vidro é vendida em rolos de no

mínimo 50 metros e com o valor de metro variando desde R\$ 7,50 até R\$ 13,36 (FIBERTEX, 2017; TEXIGLASS, 2017). O desenvolvimento da rede entrecruzada da fibra de bananeira, um resíduo, pode diminuir este custo além de dar outra função a tal material fibroso, já que a malha produzida a partir desta matéria prima natural pode ser utilizada como reforço na parte inferior de rochas ornamentais, proporcionando melhores propriedades mecânicas e assim até aumentar a vida útil de utilização destas rochas.

1.1 Objetivos Gerais

Este trabalho tem como objetivo avaliar o uso alternativo de uma malha entrecruzada de fibra de bananeira e resina epoxídica DGEBA/TEPA na laminação de rochas ornamentais naturais e artificiais com a intenção de diminuir a fragilidade destas rochas.

1.2 Objetivos Específicos

- Caracterização física, química e mecânica da fibra de bananeira extraída e desenvolver uma malha entrecruzada para utilizar na laminação das rochas ornamentais.
- Determinar o sentido adequado de laminação em relação a malha de fibra de bananeira (dupla torção paralela ou perpendicular à fratura) através do ensaio de flexão em três pontos com o objetivo de reduzir a fragilidade das rochas.
- Avaliar as propriedades mecânicas de resistência à flexão, resistência ao impacto de corpo duro e térmicas das rochas artificiais e naturais laminadas com as malhas de fibra de bananeira e fibra de vidro.
- Avaliar a resistência à flexão da rocha artificial produzida através do processo de vibro compressão a vácuo com resíduos de mármore calcítico e resina DGEBA/TEPA utilizando tanto a malha entrecruzada de bananeira assim como a malha entrecruzada de fibra de vidro no interior da rocha.

1.3 Justificativa

A utilização de resíduos na formação de compósitos poliméricos representa uma tendência mundial que está ampliando continuamente e também contempla a minimização dos custos, acarretando melhorias ambientais e econômicas (SOUZA *et al.*, 2009).

No cultivo da banana, uma grande quantidade de resíduos é gerada, assim como na produção de mármore. Nos últimos anos houve um aumento crescente da utilização de polímeros em inúmeros produtos, seja na utilização como reforço ou matriz. Aliado a descoberta de novos materiais compatíveis com os polímeros, surgem as fibras retiradas do pseudocaule da bananeira (parte aparente, composta por bainhas superpostas das folhas) e que normalmente representam um problema de descarte para os produtores em virtude da proliferação de fungos e bactérias na decomposição.

Apesar do baixo custo econômico registrado para a fibra de bananeira reaproveitada de um resíduo, busca-se saber se a mesma é viável tecnicamente para ser utilizada como uma rede entrelaçada na parte posterior das rochas naturais e artificiais, proporcionando reforço e melhores propriedades mecânicas a estes materiais, proporcionando uma nova função a essa fibra.

A utilização destas fibras ocorrerá em alternativa as fibras sintéticas de vidro existentes, ocorrendo assim a laminação das rochas para proporcionar melhores propriedades mecânicas às rochas, além de oferecer a população uma alternativa econômica e ecológica dos resíduos gerados tanto na indústria de mármore quanto na produção de bananeiras.

1.4 Ineditismo

Não há nenhuma informação na base de conhecimento Science Direct (inúmeras revistas e jornais de alto valor científico possuem artigos publicados) sobre a utilização da fibra de bananeira em forma de rede entrelaçada para ser utilizada no processo de laminação do mármore artificial a base de resina epoxídica

DGEBA/TEPA e resíduos de mármore calcítico.

A fim de uma busca mais detalhada e criteriosa, a base de conhecimentos Scopus também foi pesquisada na data citada. Uma outra pesquisa em periódicos específicos em compósitos também foi realizada, os periódicos pesquisados foram: Composites Part A: Applied Scienc and Manufacturing, Composites Part B: Engineering, Composites e Composites Scienc and Technology. Portanto, essa pesquisa de doutoramento vem suprir essa lacuna na literatura. Conforme pode ser verificado na Tabela 1, as pesquisas realizadas sobre tal assunto obtiveram resultados nulos, fato que garante o ineditismo necessário para o trabalho de doutoramento.

Tabela 1- Pesquisa de ineditismo na base de conhecimento sobre artigos científicos

Expressão da Pesquisa	Resultados encontrados
"lamine artificial marble with banana fiber" e "lamine artificial marble" e "lamine banana fiber"	0
"banana fiber with artificial marble" e "artificial marble reinforced for banana fiber"	0
"banana fiber lamination" e "artificial marble lamination"	0
"fiberglass artificial marble" e "lamine artificial marble fiberglass"	0

CAPÍTULO 2: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Rocha Artificial

Normalmente nomeada como rocha industrializada, é formada por 95% de agregados naturais, ou seja, é praticamente um material natural. Os agregados que formam a rocha artificial podem ser compostos por pedaços de mármore, granito triturado, areia de quartzo e também, cristais de vidro, que são agregados com agentes aglutinantes, como a resina epóxi (PEDRA ARTIFICIAL, 2016; EN 14.618, 2011). Tais rochas artificiais representam uma excelente alternativa para incluir partículas rochosas residuais provenientes dos resíduos.

A Norma Europeia EN 14.618 (2011) classifica as rochas artificiais como sendo um produto industrial, confeccionado a partir de uma mistura de agregados de inúmeros tamanhos e naturezas (normalmente a partir de rochas naturais), às vezes, misturada com outros materiais compatíveis, aditivos e aglutinantes. Vale destacar que segundo a norma, os aglomerantes utilizados podem ser cimentos hidráulicos, resinas poliméricas ou até mesmo a mistura destes componentes, considerando que o processo de consolidação do material seja irreversível, ou seja, um termofixo.

Observando o cenário socioeconômico, é possível perceber que as indústrias do setor mineral buscam atender as legislações ambientais, e entre os desenvolvimentos neste sentido aprimorou-se a confecção de novos materiais, formando os produtos conhecidos por granito ou mármore artificiais (CAESARSTONE, 2014).

As primeiras peças produzidas com este material eclodiram no mercado há cerca de duas décadas. Este novo compósito demonstrava características superiores à do mármore natural (FIBERCENTER, 2014). Em virtude de não porosas e apresentarem baixa absorção de água, as chapas de mármore artificial apresentam propriedades superiores às de rochas naturais (LEE *et al.*, 2002).

Além disso, o granito artificial, segundo as empresas renomadas, possui uma boa aceitação no mercado em função das qualidades desenvolvidas, que dentre elas destaca-se o fato de ser um material maciço, impermeável, não permite a formação de manchas já que não permite a entrada de líquidos, mantendo-os somente sobre a superfície. Isso porque a resina utilizada em processos de

fabricação realiza tanto a aderência entre as partículas da rocha quanto realiza a penetração entre os seus interstícios, eliminando a porosidade natural da rocha (MOLINARI, 2007). O mármore artificial também possui diversos benefícios como excelentes resistências ao intemperismo e ao lascamento. Há ainda que destacar que tal material apresenta facilidade de colar, polir e reparar (RESINA COMO LIGANTE, 2014).

Vale relembrar que dentre os tipos de rochas artificiais produzidas, há destaque para as três linhas de produção: a produzida através de partículas de mármore e resina de poliéster, comumente chamada de “mármore composto”; a de produção baseada em cristais de vidro, denominada como “superfície cristalizada de vidro”; e a formada através de agregados de quartzo e granito triturado, popularmente denominado como “superfície de quartzo” (PEDRA ARTIFICIAL, 2016). A natureza da carga e tamanho da granulometria é determinante para determinar a aparência e propriedades físico-mecânicas do mármore artificial a ser produzido (BRETON COMPANY, 2014).

As chapas de mármore artificiais obtidas através da vibro compressão a vácuo podem ser submetidas às etapas tradicionais de processamento das rochas como retificação, corte e polimento (RIBEIRO, 2011). O fabricante Alicante (2015) utiliza este processo de fabricação, obtendo sua finalização em chapas de 124cm x 303cm e 126cm x 306cm. Tal empresa aproveita as partículas de mármore dispensadas na natureza e utiliza a resina poliéster, sendo referência no conceito de sustentabilidade, promovendo a utilização consciente dos recursos naturais.

Através do processo de vibro compressão a vácuo, a mistura das partículas de mármore com os materiais aglutinantes, é direcionada para uma forma, transformando-se em blocos homogêneos, e então são submetidos ao processo de cura, onde posteriormente são serrados e polidos, tendo como resultado as chapas de 2 cm de espessura (MÁRMORE COMPOSTO, 2016). Já a norma EN 14618 (2011) relata que no processo produtivo de mármore artificiais, a etapa de moldagem do produto envolve a compactação da mistura formada por carga e aglomerante em um molde sob a ação de pressão mecânica e/ou vibração, sendo facultativa a etapa de moldagem ocorrer mediante vácuo ou em molde aberto. Não foram citados teores de resina ou agregados como uma recomendação na norma, somente é estabelecida que o produto final se enquadre dentro dos grupos dos termofixos e que o volume de aglomerante deve ser menor que o dos agregados.

Conforme a Patente do inventor Sakai (2000), a fabricação de rochas artificiais tem como metodologia o método convencional, no qual é baseado na quebra e/ou moagem de pequenas partículas de rochas e posteriormente agregadas com carbonato de cálcio e resina. O inventor Sakai (2000) referencia a Patente Japonesa Nº S61-101,443, que descobriu a técnica de obter uma pedra artificial, no qual é formada pela mistura de pequenas partículas de rocha e resina colocadas no molde sob a ação do vácuo. Tal autor utiliza os métodos de compressão e injeção da mistura para formar os compósitos. Os materiais naturais que formam as rochas naturais são classificados em: primeiramente em partículas finas inorgânicas, com tamanho entre 10 a 70 mesh; já o segundo componente trata-se da micropartícula com tamanho abaixo de 100 mesh; e com terceiro componente utiliza-se a resina polimérica.

Na patente Nº S61-101,443 ainda é dito que as finas partículas exercem influência na aparência e nas propriedades físicas das pedras artificiais. Tais partículas junto com outros componentes são responsáveis pelo padrão da cor do produto. Já as micropartículas são importantes para preencher os espaços vazios. O alto volume de micropartículas proporciona baixo brilho da superfície do produto, no entanto alta dureza.

Já na patente US 4,698,010 do inventor Marcello Toncelli (1987), o mesmo publica a produção de blocos por ação de vibração, compressão e vácuo. Os blocos são produzidos com partículas de dimensões de até 200 mm isentos de porosidade devido a mistura da massa com a resina ser realizada em atmosfera de baixa pressão. Outras patentes são citadas nesta, como a Italiana nº 82540/A/75 que apresenta um processo semelhante, mas limita-se ao tamanho da partícula em até 4 mm, delimitando a aparência do material produzido. Em outra patente citada, a nº 85558/A/81, são utilizados materiais com dimensões maiores, no entanto realiza-se a mudança da mistura para o molde na presença de ar, refletindo em um material com porosidade considerável.

Já em 2010 foi divulgada a patente US 2010/0063193 de Juan Cruz (2010) que relata formulações para a produção de placas de mármore artificial. Tal autor diz que a porcentagem da granulometria depende do efeito visual desejado. São sugeridos teores entre 6 e 20% de resina.

As rochas artificiais têm demonstrado um alto valor de mercado e também uma demanda cada vez maior nos últimos tempos. Durante o ano de 2014, houve

uma importação deste tipo de material em aproximadamente 60 mil toneladas, o equivalente a aproximadamente 55 milhões de dólares, ainda com variação positiva em relação ao ano de 2013 (ABIROCHAS, 2015).

Já no ano de 2016, o Abirochas (2017) informa que no período de janeiro a setembro de 2016, as importações brasileiras de materiais rochosos naturais somaram US\$ 23,4 milhões e 43.127,2 t, com variação negativa, respectivamente, de 33,0 % e 27,9% frente ao mesmo período de 2015. Já para os materiais rochosos artificiais foram registrados US\$ 23,1 milhões e 33.531,4 t, com variação também negativa de, respectivamente de 31,7% e 17,7%.

Já em relação a valores econômicos, o preço médio dos materiais naturais importados teve variação negativa de 7%, passando de US\$ 583,1 t em 2015 para US\$ 542 t em 2016. Para materiais artificiais, o preço médio dos materiais artificiais importados, geralmente mais elevados do que os dos materiais naturais, recuou aproximadamente 17%, passando de US\$ 832,1 t para US\$ 689,9 t em 2016, conforme Figura 1.

Já em 2017, as importações de materiais artificiais somaram US\$39,1 milhões e 57,1 mil t no ano de 2017, com variação positiva de respectivamente 28,2% e 27,35% frente 2016. Registrou-se uma variação positiva nos valores econômicos e em números de importação se comparar 2017 com 2016. Em 2017, o preço médio de materiais naturais importados, foi de US\$ 569/t, representando 5% de valorização em relação a 2016. Já para materiais artificiais, o preço médio foi de US\$ 686/t.

Portanto, diante do alto consumo de rochas ornamentais naturais e artificiais, é de grande importância o desenvolvimento constante de tecnologias no Brasil para desenvolver a utilização da fibra de bananeira como reforço na laminação das rochas.

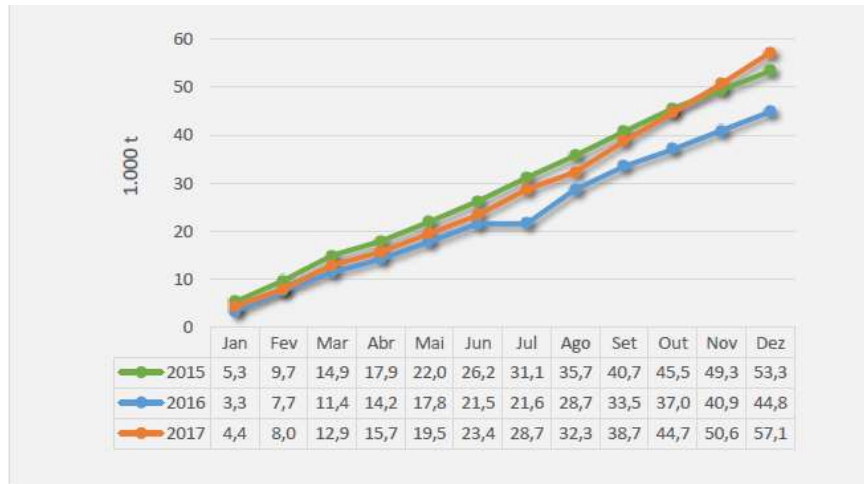


Figura 1- Importações brasileiras acumuladas de materiais rochosos artificiais no período 2015 – 2017 (ABIROCHAS, 2018)

Assim, a nacionalização dos mármorees artificiais pode ser de grande importância, por além de apresentarem as vantagens citadas anteriormente, representar também a vantagem econômica já que se trata do aproveitamento de resíduos da indústria de rochas como matéria-prima, além dos benefícios ecológicos. Associado a isto, está a inclusão do aproveitamento da fibra de bananeira na laminação, visando dar uma nova utilidade a fibra de bananeira que usualmente é descartada, e somente é aproveitada em alguns casos de artesanato ou como reforço em compósitos. A inovação está em utilizar a fibra natural em alternativa a uma fibra sintética de vidro existente na atualidade.

2.2 Rochas Ornamentais Naturais

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) define rochas ornamentais como rochas naturais, que sejam extraídos de pedreiras sob a forma de blocos e/ou em placas, cortados de forma variada e que sejam beneficiados com esquadreamento, polimento, lustro, apicoamento ou flameamento (FRASCÁ, 2001). Pode-se também definir rocha como um corpo sólido natural, proveniente de um processo geológico, além disso, é formado por agregados de um ou mais minerais, distribuídos segundo as condições de temperatura e pressão existentes no momento da formação. Outra opção de materiais presentes na rocha seria os elementos

minerais não cristalinos, como o vidro vulcânico e materiais sólidos orgânicos, como o carvão (ISAIA, 2007).

Quanto a origem, as rochas podem ser classificadas em ígneas, sedimentares e metamórficas. As ígneas ou magmáticas são provenientes da cristalização do magma em diferentes profundidades da crosta terrestre, já quando são consolidadas na superfície, são denominadas de vulcânicas ou extrusivas. As rochas sedimentares são provenientes da precipitação química ou deposição dendrítica de produtos oriundos da desagregação, erosão e transporte de rochas já existentes e que são transportadas com a sedimentação. Já as rochas metamórficas são originadas de litologias transformadas pela ação de agentes de transformação, metamorfismo regional e também de contatos de rochas já existentes e que estejam situadas em diferentes níveis da crosta para sofrer transformação metamórfica (SARDOU FILHO, 2013).

Já em termos comerciais, as rochas são diferenciadas em granitos e mármore. Os granitos geralmente agrupados em rochas silicáticas (ígneas e metamórficas) e os mármore já englobam as rochas carbonáticas (sedimentares ou metamórficas). Como utilização das rochas naturais, as mesmas são utilizadas em revestimentos verticais (paredes e fachadas) e horizontais (pisos), tanto pisos internos quanto externos (FRAZÃO, 2002).

A calcita utilizada neste trabalho de doutoramento encaixa-se na classificação de rocha calcária, mármore, formado predominantemente por calcita. Como impureza pode apresentar alguns argilominerais, quartzo, micas, anfibólios, matéria orgânica e sulfetos. Em virtude das impurezas, mostram uma ampla variedade de cores e conseqüentemente, em virtude das condições geológicas, é possível obter diferentes texturas e desenhos. O mármore Calcita em sua composição apresenta lentes de mármore ricos em calcita cujo tamanho varia de 0,3 a 1 cm. Em função das impurezas contidas em sua rede cristalina, surgem algumas colorações que variam do verde ao azul e do cinza ao amarelo (SARDOU FILHO, 2013).

O material possui o comportamento mecânico e físico dependente de suas propriedades, composição mineralógica, textura e estrutura (FRAZÃO, 2002). As características físicas e mecânicas das rochas são afetadas por fatores de cunho geológico, tectônico e até mesmo, fisiográficos, atuantes em cada região. Portanto tais fatores afetam diretamente na formação e modo de ocorrência das rochas, na tipologia, aspecto cromático, estruturação da rocha, formato e dimensões (MENDES,

2002). Por isso, as rochas naturais possuem diferentes propriedades e fragilidades próprias de cada jazida. Para a utilização das rochas, muitas vezes faz-se necessário a laminação com a usual fibra de vidro, de modo a dificultar o rompimento e quebra dos grãos das rochas durante a utilização das mesmas. Assim, as mesmas adquirem maior resistência mecânica a fraturas e propagação de trincas.

Mesmo diante da crise econômica que atingiu a economia mundial nos últimos anos, o Brasil ainda se destaca na exportação de rochas ornamentais naturais. Dados da Associação Brasileira de Rochas Ornamentais (Abirochas) relatam que o Brasil ocupa o 4º lugar na posição de países que mais produzem pedras naturais, responsabilizando-se por 7% da produção mundial de rochas. As exportações brasileiras no ano de 2018 renderam um valor de US\$992,5 milhões em exportações.

No Brasil, os principais estados produtores de rochas ornamentais são: Espírito Santo, Minas Gerais, Ceará, Bahia e Rio Grande do Norte. Vale destacar que o Espírito Santo participa com cerca de 75% do mercado nacional de rochas ornamentais, com aproximadamente 6,9 milhões de toneladas por ano (ABIROCHAS, 2017). Em relação à produção de mármore e granitos, o Espírito Santo é responsável por 70% da produção nacional de mármore e 30% da produção de granitos.

Vale destacar ainda que o estado do Espírito Santo continuou na liderança de principal estado exportador brasileiro, respondendo por US\$791,3 milhões das exportações, o que equivale a 79,37% do total do faturamento do país (SINDIROCHAS, 2019). Portanto, o desenvolvimento de uma rede entrelaçada de fibra de bananeira em alternativa à usual fibra de vidro utilizada na laminação de rochas ornamentais, destaca-se na atualidade como um tema de grande interesse e valia no ramo econômico e ambiental.

2.3 Resina Epoxídica DGEBA/TEPA

O termo epóxi vem do grego “Ep” (sobre ou entre) e do inglês “Oxi” (oxigênio). Ou seja, o termo refere-se a um grupo químico constituído por um átomo de oxigênio ligado a dois átomos de carbono (RATNA, 2009). A Figura 2 representa a estrutura

molecular das resinas epoxídicas.

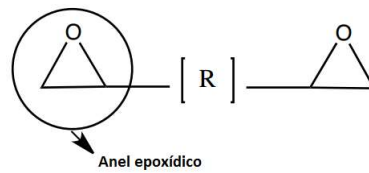


Figura 2- Estrutura molecular da resina epóxi

O composto 2,2-bis (4-(2,3-epoxipropil) fenil propano, conhecido como éter diglicidil de bisfenol A, DGEBA, é o produto da reação de um mol de 2,2-bis (4-hidroxifenil) propano (bisfenol A, BPA) com dois mols de epícloridrina (1-cloro-2,3-epóxiopropano) (Un-Jun *et al.*, 2007). As resinas epóxi à base de bisfenol A são derivadas da reação de epícloridrina e bisfenol A. Estas também são as mais comumente utilizadas em função da versatilidade e ao menor custo (Alves, 2006; Ratna, 2009). A epícloridrina condensada, o DGEBA, é um líquido incolor e insolúvel em água (0,5 mg/l a 200°C) (DOW, 2006).

O DGEBA e seus oligômeros são os produtos presentes em maior quantidade nas resinas epóxis. Em resinas líquidas, representam 80% de sua composição (UN-JUN *et al.*, 2007).

Na estrutura química (Figura 3) da resina DGEBA, os grupos epóxi (carbono-oxigênio-carbono) das extremidades são os responsáveis pela denominação da resina. A letra n indica o número de repetições da sequência entre parênteses, que em geral varia de 0 a 25.

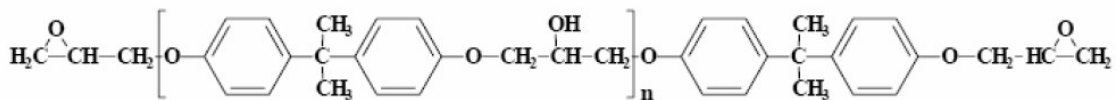


Figura 3- Estrutura química da resina diglicidil éter de bisfenol A (DGEBA)
(Silva, 2009)

O peso equivalente das resinas epoxídicas (EEW) é utilizado para o cálculo estequiométrico da relação resina e endurecedor, ou seja, o EEW é o peso molar da resina dividido pelo número de anéis de epóxi. Também pode ser definido como o peso da resina em gramas que contém um equivalente grama de epóxi. Utiliza-se este parâmetro para o cálculo da proporção do agente de cura (SILVA, 2009).

A resina DGEBA (Tabela 2) líquida é amplamente utilizada para várias

finalidades devido a sua versatilidade e baixo custo.

Tabela 2- Propriedades da resina DGEBA (SILVA, 2009).

Propriedades da resina DGEBA	
Peso equivalente em epóxi (EEW)	182-192 g.eq
Viscosidade à 25°C (cPs)	11000-14000
Conteúdo de água (ppm) Máx.	700
Densidade g/ml	1,05-1,15

As resinas epóxi necessitam passar pelo processo de cura para possuir características de um sistema termorrígido (GONZÁLEZ *et al.*, 2007). Os parâmetros da formulação podem ser alterados de acordo com a necessidade de utilização do material. Geralmente na definição dos parâmetros incluem-se a seleção do agente de cura, a utilização da proporção de resina/agente de cura e o processo de cura a ser definido (GARCIA *et al.*, 2007).

A resina epóxi representa um tipo especial de poliéster inicialmente sintetizado como oligômero. A capacidade de o anel epóxi formar ligações cruzadas com uma variada gama de substratos acarreta a formação de uma rede tridimensional, compondo um material insolúvel e infusível, ou seja, um material termorrígido (WESTRUPP, 2008).

Há um grande interesse no uso das resinas epoxídicas em função da variedade de reações químicas de cura que podem ser utilizadas e devido as diferentes propriedades que podem ser obtidas. Além disso, o conhecimento químico presente no processo possibilita a cura da resina em uma grande variedade de temperaturas e o controle do grau de entrelaçamento ou reticulação.

Dependendo da estrutura química do agente de cura e das condições de cura, é possível conseguir estruturas epoxídicas com boa resistência química, propriedades mecânicas variadas, grande força adesiva, ótima resistência ao calor e alto isolamento elétrico (UN-JUN *et al.*, 2007).

Dentre os agentes de cura, as aminas alifáticas destacam-se por apresentar baixo custo, boa resistência química e rápida cura à temperatura ambiente. Como exemplo de aminas, há a etilenodiamina (EDA), o dietilenotriamina (DETA), o trietilenotetramina (TETA) e o tetraetilenopentamina (TEPA) (ALVES, 2006).

A TEPA (amina alifática) é altamente reativa e uma vez curada possui rede

tridimensional com excelentes propriedades termomecânicas (MAY E TANAKA, 1987). Vale lembrar que a TEPA apresenta alta funcionalidade (grau 7). A estrutura da molécula é baseada numa cadeia linear com grupos funcionais ativos espaçados a uma distância curta na cadeia principal, o que confere alta funcionalidade (Amaral, 2009).

A Figura 4 mostra a estrutura química da amina TEPA que será utilizada nesta pesquisa.

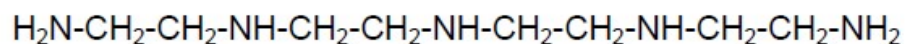


Figura 4- Cadeia estrutural da TEPA (PITTIMAN *et al.*, 1997)

O uso da amina no sistema epoxídico pode melhorar as características relativas a desempenho do material, uma vez que a amina TEPA atua como um agente de cura e age como um comonômero junto a resina epóxi formando uma rede tridimensional com excelentes propriedades termomecânicas (PITTIMAN *et al.*, 1997).

A reação de cura do sistema DGEBA/ aminas alifáticas ocorre através da reação entre os hidrogênios amínicos ativos do endurecedor e o grupo epóxi da resina. Cada grupo amina primária (-NH₂) pode reagir com dois grupos epóxi, já que apresenta dois átomos de hidrogênios ativos ligados ao nitrogênio. A reatividade dos átomos de hidrogênio, na forma de amina primária (-NH₂) e amina secundária (-NH) tendem a ser diferentes, átomos de hidrogênio dos grupos amina participam sucessivamente da reação entre o grupo epóxi e o grupo amina (ADURIZ *et al.*, 2007). A Figura 5 ilustra como seria a rede entrecruzada da amina DGEBA com a amina TEPA.

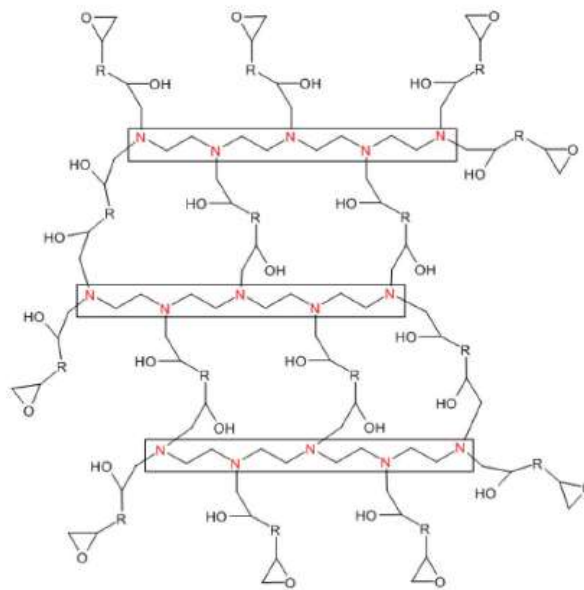


Figura 5- Rede entrecruzada da DGEBA com amina TEPA (AMARAL, 2014)

De um modo mais amplo, o processo de reação entre o grupo epóxi e o agrupamento amina acontece pela abertura do anel epóxi, que possui uma tensão de anel muito forte, tornando o muito reativo. Em virtude de o oxigênio ser mais eletronegativo que o carbono, o mesmo atrai o par de elétrons da ligação. Assim, o carbono fica como uma carga parcial positiva. Já o nitrogênio por ter um par de elétrons livres, ataca o carbocátion do anel epóxi, ocasionando o rompimento da ligação N-H, e a transferência do hidrogênio da amina para o oxigênio provocando a abertura do anel epóxi (SILVA, 2009).

A resina epoxídica permite a formação de ligações cruzadas formadas durante a cura, transformando a resina epoxídica em um sistema tridimensional. O estado físico do material se altera, mudando de um líquido viscoso para um gel elástico e posteriormente transformar-se em um sólido vitrificado (Amaral, 2014).

A resina epoxídica DGEBA/TEPA foi escolhida para a formulação destes materiais alternativos, em função das excelentes propriedades mecânicas que podem ser obtidas mediante as reações químicas pela adição de endurecedores do tipo amina, como dureza, resistência química, baixa contração e excelente adesão a carga.

Ainda vale destacar que as resinas epoxídicas são altamente recomendadas para a formulação de compósitos em função de excelentes características como resistência térmica e química (PIRES *et al.*, 2005). Além disso, o sistema formado a base de DGEBA e amina apresentam uma estrutura reticulada (RIEGEL *et al.*,

1999), tenaz e resistente, podendo proporcionar excelentes características aos materiais.

Amaral (2014), pesquisadora da resina epóxi, encontrou valores de tensão máxima de ruptura do sistema epoxídico DGEBA/TEPA de $100,79 \pm 0,10$ MPa e módulo de elasticidade (E) $2,26 \pm 0,13$ GPa durante testes mecânicos. Verificam-se melhores propriedades no sistema epoxídico TEPA se comparado com a resina poliéster, em virtude de sua menor densidade de entrecruzamento e maior massa molar dos segmentos entre os pontos de entrecruzamento (AMARAL, 2014).

Como vantagem da resina epóxi, há destaque para a baixa contração pós-cura, que tem uma média na ordem de apenas 2%. Em relação à estabilidade química, o epóxi é um dos termorrígidos mais inertes, com boa estabilidade dimensional em serviço (PEREIRA *et al.*, 2005).

Vale destacar que em estudos de González *et al.* (2007), os mesmos encontraram maior rigidez para o sistema DGEBA/TEPA quando comparado com o sistema DGEBA/TETA. Para ensaios de flexão para o sistema DGEBA/TEPA, o autor encontrou como módulo de elasticidade o valor de $2,48 \pm 0,11$ GPa e para o valor de tensão de ruptura o valor de $100 \pm 2,7$ MPa, demonstrando as excelentes características mecânicas deste sistema epoxídico para ser misturado com as cargas calcílicas.

As resinas epóxis quando atuam juntamente com cargas apresentam diversas vantagens, como (JESUS, 2005):

- Natureza polar proporcionando uma boa adesão a uma variável gama de cargas;
- Baixa contração durante a cura, facilitando a precisão dimensional do material a ser fabricado e evitando posteriores tensões residuais;
- Ausência de bolhas na formação do material em função da inexistência de produtos voláteis provenientes das reações de cura;
- Formação de estrutura reticulada fornecendo boa resistência em ambientes quimicamente agressivos.

A característica de alta adesão é devida a polaridade dos grupos éteres e hidroxilas alifáticas que, normalmente, formam a cadeia da resina e a rede do sistema curado (RIEGEL *et al.*, 1999). A polaridade influencia na criação de forças de interação entre a molécula epóxi e a superfície adjacente ao meio, melhorando a adesividade. A existência dos grupos polares diminui problemas relacionados à

interface resina/reforço (RUSHING *et al.*, 1994).

Além disso, outras características facilitam a moldagem da resina, como alto módulo de elasticidade e baixa viscosidade. O processo de cura da resina epóxi ocorre em etapas, no qual os agentes de cura reagem com os anéis epoxídicos. Como exemplo de agentes de cura, pode-se citar: as aminas alifáticas, poliamidas, aminas ciclo alifáticas e anidridos. A escolha do agente influenciará nas propriedades finais da peça (GILLIO, 1997).

2.4 Laminação de Mármore

A laminação de rochas ornamentais (Figura 6) consiste na fixação de uma malha de fibra de vidro com resina na parte inferior das placas de rochas (PAZETO e PARAGUASSÚ, 2012). Muitos mármore apresentam trincas ou certa fragilidade que ocorre naturalmente, assim o reparo ou reforço pode ocorrer mediante a laminação. Portanto, a laminação ou “telagem” visa eliminar trincas, funcionando como um reforço e aumentando o limite de resistência a flexão das placas de rochas, além de evitar que ocorra quebras ou trincas durante o acabamento e o transporte, possibilitando a própria comercialização (SILVA & RIBEIRO, 2014).

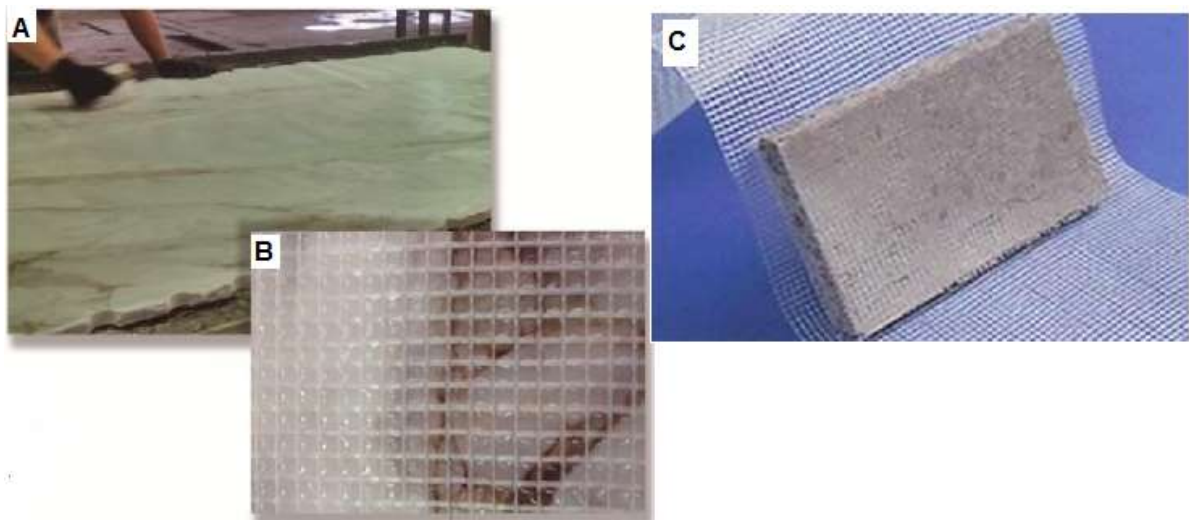


Figura 6- Rocha em preparação para laminação (A) Mármore laminado com fibra de vidro (B) Rocha com fibra de vidro para ser laminada (C) (CONSTRUPOR, 2016)

Pazeto & Paraguassú (2012) relatam que a laminação se destaca como uma

prática industrial que ocorre após a serragem das placas e anterior a etapa do polimento das rochas. Tais autores ainda afirmam que a principal finalidade deste processo é atenuar as descontinuidades físicas de algumas rochas, aumentando a resistência mecânica, principalmente, em relação aos esforços fletores. E, além disso, a técnica da laminação tem permitido a comercialização dos materiais denominados exóticos, que são relativamente frágeis, e, no entanto, possuem grande potencial estético, fato que permite a sua comercialização com alto valor agregado em virtude da sua beleza.

Na etapa da laminação, ocorre o processo de retirada da umidade das chapas no forno, no qual posteriormente ocorre a aplicação da resina, que geralmente é a fenólica ou epoxídica, como agente colante para a fixação (SILVEIRA, *et.al.* 2014).

A laminação usual utiliza a Fibra de vidro sintética, que possui características mecânicas consideráveis. No entanto, há um custo extra para a produção da mesma, enquanto há fibras naturais, como a fibra de bananeira que muitas vezes são descartadas e poderiam ter uma utilização alternativa na laminação de mármore em alternativa as sintéticas fibras de vidro. Como vantagens desse processo, há destaque para o menor custo de aquisição das fibras, já que as da bananeira são descartadas e o único gasto seria para a mão de obra utilizada para a extração do pseudocaule e formação da malha.

Quando há a comparação de propriedades mecânicas da Fibra de Vidro versus a Fibra de Bananeira, é possível obter valores mais elevados com a de vidro, conforme Tabela 3. No entanto, apesar dos menores valores, isso não seria impedimento para o uso da mesma na laminação, pois a mesma reduziria a fragilidade da rocha e aumentaria a resistência da mesma.

Tabela 3- Propriedades comparativas do teste de tração da fibra de banana versus a fibra de vidro (MUKHOPADHYAY *et al.*, 2009)

Fibra	Resistência à tração (GPa)	Módulo inicial (GPa)	Alongamento na ruptura (%)
Bananeira	0,5	12	7
Vidro	3	65	3

A laminação na indústria ocorre após a serragem das chapas e anterior à etapa do polimento. Após a aplicação da tela na laminação, é necessário esperar o tempo de cura da resina, e posteriormente a chapa está pronta para prosseguir para

as outras etapas do beneficiamento (SILVEIRA, *et.al.* 2014).

2.5 Fibra de vidro

A fibra de vidro caracteriza-se por ser um álcali resistente, além de possuir um valor superior a 18% de zircônio (ZrO_2) em sua composição. Tais características são primordiais para a mesma resistir ao ataque do meio alcalino das matrizes de cimento quando as mesmas atuam como reforço na construção civil. A Figura 7 mostra a fibra de vidro pronta para uso (CONSTRUPOR, 2016).



Figura 7- Fibra de vidro entrelaçada para uso em laminação de rochas (YUYAO, 2016)

Como vantagens da fibra de vidro, destacam-se (CONSTRUPOR, 2016):

- Alto teor de óxido de zircônio (ZrO_2), proporcionando resistência e alcalinidade;
- Não deforma e não sofre degradação;
- Elevado módulo de elasticidade, proporcionando excelentes propriedades mecânicas;
- Não enferruja e não exige uma cobertura mínima para sua eficiência como as armaduras dos aços;
- Possui resistência à tração três vezes superior ao aço;
- Possui módulo de elasticidade superior a três vezes a argamassa;

- É de fácil manuseio, não sendo necessário o uso de Equipamento de Proteção Individual (EPI), além de a rede entrelaçada poder ser cortada com estilete ou com tesoura escolar;

- A utilização da fibra com laminação minimiza o aparecimento de trincas e fissuras, aumentando a capacidade de carga na tração, flexão e também a resistência ao impacto. Melhorias também são identificadas na estabilidade dimensional e no desempenho de superfícies (argamassas, reboco, estuques, mármore e granitos).

A Tabela 4 apresenta dados comparativos da fibra de vidro em relação ao aço, polipropileno, concreto, argamassa e fibra de bananeira (material em estudo para alternar o uso no local da fibra de vidro na laminação de rochas).

Tabela 4- Propriedades comparativas de fibra de vidro e da bananeira em relação a materiais com características mecânicas consideráveis (MUKHOPADHYAY *et al.*, 2009; CONSTRUPOR, 2016)

Fibra	Vidro AR (Construpor)	Aço	Polipropileno	Concreto	Argamassa	Fibra de Bananeira
Densidade (g/cm³)	2,7	7,8	0,9	2,2	2,0	0,95-0,75
Módulo de elasticidade E (GPa)	70-84	210	3-7	30-40	25-35	23
Resistência à tração (MPa)	1700	500	275-350	1-4	2-4	180-430

A fibra de vidro possui diversas aplicações, sendo a maioria com a fibra atuando como reforço. Algumas de suas aplicações são (CONSTRUPOR, 2016):

- Podem atuar juntamente com a argamassa (Figura 8) na recuperação e prevenção de trincas e rachaduras que podem existir na superfície;
- Também podem ser colocadas entre diferentes materiais, como entre paredes de vedação e estruturas;
- Em vãos de portas e esquadrias como reforço do reboco;
- Em sistemas de recuperação de fachadas;
- Em laminação de rochas ornamentais para reforço;
- Em peças de mosaico para reforçar;
- Em estruturação em pastilhas de madeira, cerâmica ou resina.



Figura 8- Fibra de vidro entrelaçada para uso em construção civil (TEGAPE, 2016)

Dados de um fabricante de fibra de vidro repassaram os seguintes dados técnicos da fibra de vidro (Tabela 5):

Tabela 5- Características da fibra de vidro M50 para impermeabilização do fabricante Leroy Merlin (MERLIN, 2017).

Características da Fibra de Vidro	
Medidas	1X50
Peso por m²	65 g
Cor	Branco
Comprimento	50 m
Largura	1 m
Espessura	0,2- 0,3 mm
Modo de aplicação	Aplicar uma demão, colocar a rede e proceder a segunda camada
Indicado para	Interior e exterior
Limpeza	Água fria
Descrição	Para revestimento de paredes, impermeabilização de ligantes sintéticos e revestimento de acabamento e decorativos.
Vantagens	Imputrescível, fácil de aplicar, não necessita de aplicações mecânicas, resistente ao fogo, à fissuração e à tração, boa flexibilidade e melhora a resistência ao choque e ao atrito.

Já em relação a saúde humana, foi declarado pela Agência Internacional

(International Agency for Research on Cancer- IARC) para a investigação do Câncer na data de junho de 1987 que o filamento contínuo de fibra de vidro não é classificável em relação ao efeito cancerígeno nos humanos (grupo 3) (OWENS CORNING, 2003; ECYCLE, 2019). As provas realizadas tanto com humanos quanto nos animais foram diagnosticadas pelo IARC como insuficientes para classificar o filamento contínuo de fibra de vidro como um material causador de câncer possível, provável ou confirmado.

As fibras de vidro de filamento contínuo são classificadas como “não respiráveis”. No entanto estes produtos quando cortados, esmagados ou sujeitos a severos processos mecânicos durante a produção ou o uso contém pequenas quantidades de filamentos que podem ser respirados, por isso deve-se tomar cuidado ao manusear, pois em quantidades excessivas, pode sim ser um material cancerígeno. Além disso, a fibra quando tratada, pode receber metais pesados, como o cromo, elemento tóxico (ECYCLE, 2019).

O destino final das fibras após o uso, geralmente, é o aterro sanitário. Já os restos limpos de fibra de vidro são não inertes (Classe III), e recomenda-se enviar para tratamentos autorizados ou para aterros sanitários ou industriais regularizados perante as autoridades competentes. No entanto, os resíduos de fibra de vidro que estejam misturados ou contaminados com produtos químicos, resinas, solventes ou outros, o tratamento deve ser adequado para cada elemento químico. A queima de qualquer um destes materiais a céu aberto é atualmente, proibido por lei no Brasil (OWENS CORNING, 2003).

2.6 Fibras Naturais

De uma forma geral, as fibras vegetais naturais possuem algumas características em comum que até são consideradas desvantagens, como: a incompatibilidade com matrizes poliméricas hidrofóbicas e também a tendência natural a desenvolver agregados nos processos, reduzindo o potencial uso das fibras como reforço; a limitação na temperatura de processamento que ficam limitadas a cerca de 200°C; a ausência de uniformidade de características que

dependem da origem das fibras, local de plantio e alta absorção de água (NABI SAHEB e JOG, 1999; SILVA, 2003).

A utilização de fibras naturais em alternativa para as fibras sintéticas como reforço para os mais diversos tipos de compósitos, especialmente os compósitos poliméricos, vem registrando taxas crescentes de aumento (WAMBUA *et al.* 2003). Isto ocorre em função das características únicas das fibras naturais, como: abundância, biodegradabilidade, baixa densidade, natureza não tóxica, menos abrasividade, propriedades mecânicas úteis e baixo custo (MONTEIRO, *et al.* 2009).

As fibras podem ser classificadas em função da sua origem, como:

- Fibras de semente (algodão);
- Fibras de caule (bananeira, juta, linho, cânhamo);
- Fibras de folhas (sisal, piaçava);
- Fibras de fruto (coco);
- Fibras de raiz (zacatão).

Quanto à composição química e estrutura celular das fibras vegetais, as mesmas são compostas por diversas fibras elementares unidas entre si, geralmente, por lignina. Assim, pode-se dizer que a lignina atua como matriz, unindo as microfibrilas rígidas de celulose, ao mesmo tempo em que a hemicelulose atua como interface entre a lignina e as microfibrilas de celulose (NABI SAHEB e JOG, 1999; SILVA, 2003). A lignina proporciona resistência à compressão ao tecido celular e às fibras, fortalecendo a parede celular. Vale destacar que fibras com alto teor de lignina são de qualidades consideráveis e flexíveis, já que o teor quantitativo nas fibras influencia a estrutura, as propriedades, a morfologia, a flexibilidade e a taxa de hidrólise (PASSOS, 2005).

Nas fibras, a celulose representa o principal componente das fibras vegetais, além de ser também a responsável pela resistência mecânica e a estabilidade da fibra. Estruturalmente, é um polissacarídeo linear de elevada massa molar formada por uma cadeia molecular constituída da união de unidades de anidro-D-glicose, ou somente glicose-D. A Figura 9 representa a estrutura da glicose- D, já que há três grupos hidroxila (-OH) em cada unidade. Tais hidroxilas possibilitam ligações de hidrogênio dentro da molécula (intramolecular) e também entre moléculas de celulose (intermolecular). Vale destacar que a cristalinidade da celulose é formada principalmente pelas ligações de hidrogênio intermoleculares (LIMA JUNIOR, 2007; SILVA, 2003).

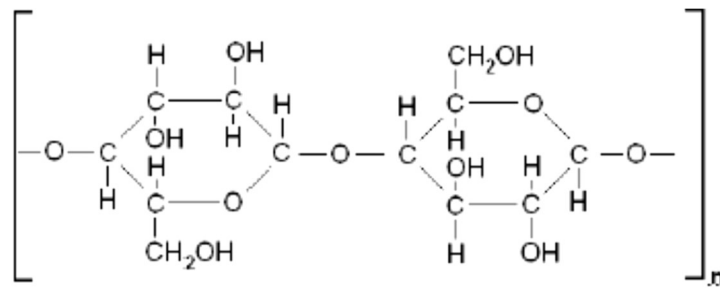


Figura 9- Estrutura do mero da celulose (SILVA, 2011)

São as ligações de hidrogênio que provocam a natureza hidrofílica às fibras vegetais que normalmente é incompatível com a natureza hidrofóbica, típica dos polímeros. Como a natureza hidrofílica influencia tanto nas propriedades da fibra quanto nas propriedades do compósito, esta característica representa o maior problema de compatibilidade entre fibras e polímeros (SILVA, 2003).

Normalmente as propriedades mecânicas das fibras naturais alteram-se em virtude do tipo de fibra, devido à alteração da composição e também da orientação das fibrilas de celulose. Dentre as fibras naturais, há registros que a extraída do coco possui a menor resistência, já que apresenta baixo teor de celulose e, além disso, alto ângulo espiral das fibrilas. A resistência mecânica aumenta em virtude de maior alinhamento das microfibrilas ao longo do eixo da fibra.

Inúmeros polímeros são utilizados como matrizes na formação de compósitos em que as fibras atuam como reforço, os polímeros termorrígidos mais comuns são o poliéster, o epóxi e o fenólico. A fim de evitar a deterioração da fibra, recomenda-se que a reação de polimerização destes polímeros ocorra em baixa temperatura. Inúmeras vezes, em função do antagonismo entre as fibras hidrofílicas e os polímeros hidrofóbicos, faz-se necessário o uso de aditivos para aumentar a adesão química entre as fases (JOSEPH *et al.*, 1996).

A Tabela 6 representa algumas propriedades mecânicas e densidade (índice físico) para algumas fibras vegetais naturais.

Tabela 6- Propriedades das fibras vegetais (Adaptado de CHANDRAMOHAN e MARIMUTHU, 2011)

Tipo de fibra	Densidade (g/cm³)	Módulo de elasticidade ou Young (GPa)	Resistência à tração (MPa)
Sisal	0,8-0,7	15	268
Roselle	0,8-0,75	17	170-350
Banana	0,95-0,75	23	180-430
Tamareira	0,46	70	125-200
Coco	0,14-0,38	19-26	120-200
Cana de açúcar	0,49	37	70-140
Algodão	1,5-1,6	5,5-12,6	287-597
Juta	1,3	26,5	393-773
Linho	1,5	27,6	345-1035
Cânhamo	--	--	690
Rami	1,5	61,4-128	400-938
Bambu	1,1	4,6-28,8	70-575
Arbesto	2,6-3,4	190	3000

2.6.1 Fibra do pseudocaule da bananeira

Historicamente, a banana tem origem do Sudeste Asiático e foi distribuída na América Latina por volta de 1516, tendo características de um fruto tropical e produzida o ano todo. Com a produção do fruto, após a colheita, há o descarte do pseudocaule da bananeira. Mundialmente, os principais países produtores são a Índia, Equador, Brasil, China e Filipinas. Tais nações são responsáveis por cerca de 60% da produção mundial (CORDIOLI, 2008).

As fibras de bananeira podem ser extraídas tanto do pseudocaule quanto das folhas da planta. Um fato interessante é que após a colheita do cacho de banana, o pseudocaule é descartado, já que não tem utilidade para produzir novos cachos.

Guimarães (2012) afirma que a bananeira produz uma fibra longa, que apresenta elevado módulo de elasticidade e resistência elevada à tração e rigidez, destacando seu uso em compósitos. Por isso, há um interesse contínuo e em maior escala a respeito da utilização da fibra do pseudocaule da bananeira

(VENKATESHWARAN e ELAYAPERUMAL, 2010). As fibras do pseudocaule da bananeira também são utilizadas comercialmente como fibras têxteis (MEDINA, 1959; HIROCE, 1972; JARMAN *et al.*, 1977; SOFFNER *et al.*, 1998).

A Tabela 7 mostra as propriedades mecânicas e físicas obtidas por pesquisadores ao longo dos anos. A utilização da fibra de bananeira em materiais, normalmente é utilizada como reforço em materiais, proporcionando propriedades mecânicas superiores e proporcionando um destino economicamente sustentável a um resíduo que, normalmente, seria descartado.

Tabela 7 - Propriedades físicas e mecânicas da fibra de bananeira

Ref.	Diâmetro da fibra (µm)	Densidade (g/cm³)	Resistência à tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Alongamento na ruptura (%)
Kulkarni <i>et al.</i> (1983)	50-250	-	468-1055	27-32	-
Chand <i>et al.</i>, (1988)	80-250	1,35	529-754	7,7-20	1-3
Beaudoin (1990)	-	-	1100-1300	-	-
Zhu <i>et al.</i> (1994)	3,0	1,50	700-800	-	-
Pothan e Thomas, 2003; Pothan <i>et al.</i>, 2004	50-250		766-779	29-32	2-3
Idicula, 2005	120	1,35	550	20	5-6
Idicula <i>et al.</i>, 2009	120	1,35	550	22	3-4
Silva, 2011	131	1,35	863	32	--
Venkateshwaran e Elayaperumal, 2011	80-250	1,35	540-900	34	-
Carvalho, 2015	181	0,18	281,39	13,64	-

A fibra de bananeira classifica-se como uma fibra celulósica retirada do pseudocaule da planta, possuindo propriedades mecânicas relativamente atrativas para uso associado a polímeros. A retirada da fibra só acontece para uma utilização específica, não é uma prática comum do cultivo da banana (MUKHOPADHYAY *et al.*, 2009). A Tabela 8 representa as características químicas da fibra de bananeira.

Tabela 8- Características químicas da fibra de bananeira (MUKHOPADHYAY *et al.*, 2009)

A fibra de bananeira	
Celulose	63-64%
Hemicelulose	19%
Lignina	5%
Umidade	10-11%

Com a produção e corte da banana, o pseudocaule (Figura 10) pode ter utilidade como fonte de matéria-prima na produção de fios em indústria têxtil, também pode ser utilizada como reforço em compósitos, ou como adubo orgânico, ou como substrato na produção de cogumelos comestíveis, na alimentação animal através da silagem, ou ainda na confecção de produtos artesanais (HIROCE, 1972).



Figura 10- Pseudocaule da bananeira (A) (SILVA, 2011); Bainhas que formam o pseudocaule da bananeira (B) (DEMARCHI, 2010); (C) Detalhe da camada do pseudocaule onde se encontram as fibras (SILVA, 2008)

Em relação à estrutura vegetal da bananeira, o talo (tronco) verdadeiro possui pequeno tamanho e fica embaixo da terra, sem destacar-se na terra até a época da floração. Em virtude de sua posição, normalmente o mesmo é denominado rizoma ou bulbo. As ramificações laterais que se chamam rebentos são emitidas por este talo que brotam do solo (COELHO *et al.*, 2001; SOFFNER *et al.*, 2001).

As fibras da bananeira (Figura 11) são extraídas do pseudocaule que é um estipe, constituído por bainhas das folhas superpostas. No meristema terminal do talo quando ainda novos são desenvolvidas folhas que contém uma parte basal consideravelmente desenvolvida. Posteriormente, surgem as folhas arrumadas em forma helicoidal e em conjunto, constituindo o que, normalmente, ganha o nome de tronco da bananeira, só que ao contrário do que é culturalmente denominado, trata-se do falso tronco ou pseudocaule, que é formado pelas superposições de folhas que crescem enroladas e aos poucos se abrem. Por cada pseudocaule é gerado somente uma inflorescência e, por consequência, somente um cacho. Após a colheita do cacho, o pseudocaule é cortado e descartado (JARMAN *et al.*, 1977).

A produção dos frutos da bananeira é assegurada por meio vegetativo em que o rizoma vira portador de outros brotos. Fisicamente o pseudocaule pode atingir de 6 a 8 metros de altura e apresenta forma cilíndrica, reta e rígida, já o diâmetro pode variar de 10 a 50 cm, medidos a partir de 30 cm do solo, na parte superior o diâmetro chega a atingir 80% das dimensões da base (COELHO *et al.*, 2001). Comercialmente, quando se diz o diâmetro de uma bananeira, normalmente estas medidas são tomadas a 100 cm do solo.

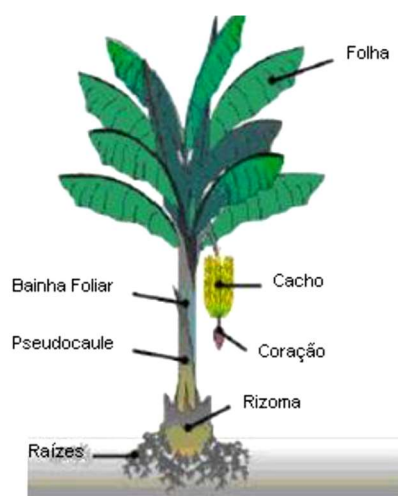


Figura 11- Bananeira (SILVA, 2011)

As fibras do pseudocaule da bananeira podem ser extraídas por processo manual ou mecânico. Manualmente, após o corte do pseudocaule, as bainhas foliares são retiradas e passadas numa calandra manual (tipo cilindro para massas) com a função de retirada da água, em seguida são colocadas sobre uma mesa e assim são “penteadas” com garfo ou escova fina de aço a fim de soltar a porção não fibrosa que fica retida entre as fibras. Tal procedimento é repetido e posteriormente as fibras são lavadas e penduradas no varal, no qual são separadas com as mãos e são secas (MUKHOPADHYAY *et al.*, 2009).

Na extração por maceração, as bainhas são imersas em água em um tanque por alguns dias, até haver a separação das fibras do tecido. Em alguns casos, pode existir perda do material por apodrecimento. É recomendada sempre para uma melhor qualidade da fibra, que a água utilizada seja trocada para se manter limpa, a temperatura deve ser a ambiente e sempre deve ocorrer a limpeza do tanque (GUIMARÃES, 2012).

Já para a extração mecânica, uma máquina desfibradora é necessária (Figura 12). Em termos de comparação, o rendimento em fibras longas secas relacionadas ao peso verde do pseudocaule gira em torno de 1 a 1,5% através deste processo de extração.

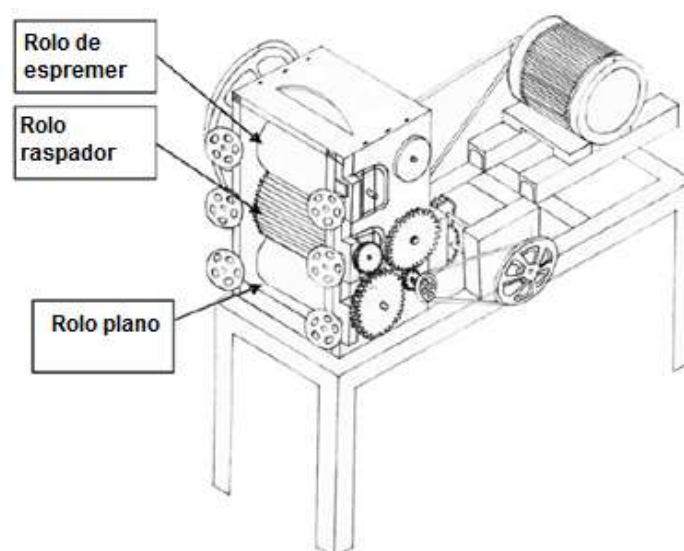


Figura 12- Máquina desfibradora (Adaptado de MUKHOPADHYAY *et al.*, 2016)

Independentemente de o processo ser manual ou mecânico (Figura 13), recomenda-se lavar a fibra em água para eliminar a mucilagem residual, aperfeiçoando a limpeza e melhorando o brilho. Posteriormente, a secagem ao sol é

recomendada, que atua como um alvejante natural (por degradar a clorofila) (MUKHOPADHYAY *et al.*, 2009).



Figura 13- Processo manual (A) e mecânico (B) (RAY *et al.*, 2013).

Em suas pesquisas Mukhopadhyay *et al.* (2009) estudou o efeito que algumas variáveis causavam na resistência mecânica de fibras (Figura 14), tais variáveis foram: efeito do diâmetro da fibra, comprimento livre entre as garras e também a velocidade de deformação da fibra no ensaio de tração. Foi percebido pelo autor que as fibras com menores diâmetros registram maiores valores de tenacidade e comportamento mais regular quando utilizadas para aplicações em compósitos. Já para as outras variáveis, identificou-se que a resistência apresenta menores valores com o aumento do comprimento da garra, em virtude da maior possibilidade de existir defeitos nas fibras, acarretando a concentração de tensões, e consequentemente, diminuindo a resistência da fibra. A velocidade do ensaio (taxa de deformação) também pode alterar a resistência da fibra, aumentando sua tenacidade.

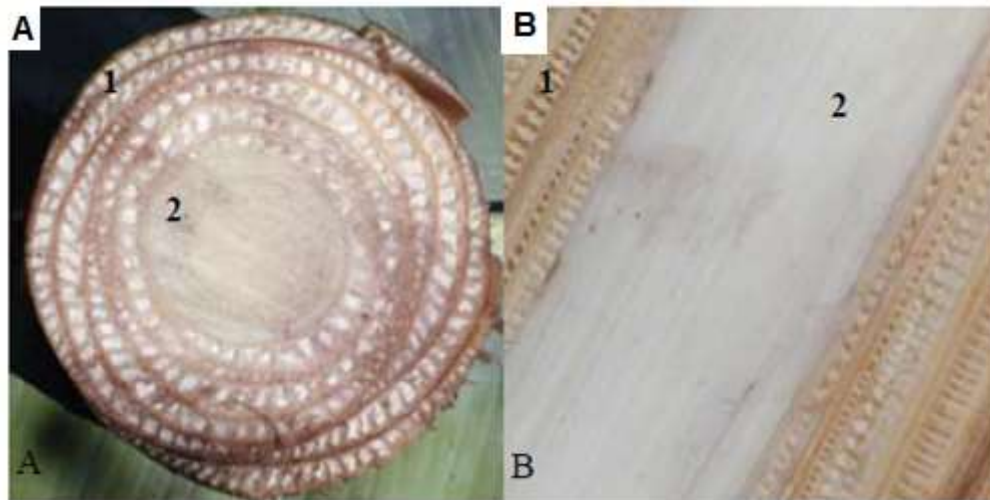


Figura 14- Corte transversal (A) e longitudinal (B) do pseudocaulis: 1. Bainhas foliares; 2. Talo Floral (OLIVEIRA, 2007)

2.6.2 Interface fibra/matriz

Para um desempenho satisfatório de materiais que contenham fibras como reforço, é importante que alguns fatores sejam analisados, como:

- Características dos materiais componentes, fibra e matriz;
- Geometria das fibras, seção transversal e comprimento da fibra;
- Forma de arranjo das fibras;
- Proporção entre os materiais formadores;
- Características da interface de todos os materiais envolvidos.

Na união de fibras e matrizes, interface destaca-se como a região na qual são transferidas as tensões e deformações de um componente ao outro, na qual ambos os materiais contribuem para a resistência do material final. Em caso de falhas nesta interação, poderão ocorrer falhas, como propagação de trincas (AL- QURESHI, 1988).

Pode ser descrever a adesão entre a fibra e a matriz através de fenômenos físico-químicos que ocorrem entre os materiais envolvidos. As interfaces entre os materiais devem ser analisadas através de três fatores (YOSOMIYA *et al.*, 1989):

- 1- Ligações mecânicas, até mesmo os efeitos de ancoragem;
- 2- Ligações através de interações físicas entre as moléculas dos diferentes materiais;
- 3- As ligações provenientes de interações químicas, como as ligações covalentes.

Ainda é acrescentado por Hull (1995), a interdifusão dos materiais que também forma uma região de interfase, a qual ocorre a mistura em função da mobilidade molecular. A adesão que envolve maior energia para rupturas é a por ligações químicas.

Vale destacar que a adesão de um material a outro depende do estabelecimento de interações que normalmente são dos tipos: eletrostáticas, ligações de hidrogênio, ligações covalentes ou forças de Van der Waals. A interação dependerá da afinidade química entre a matriz e a fibra. A Figura 15 ilustra a interface entre a fibra e a matriz.

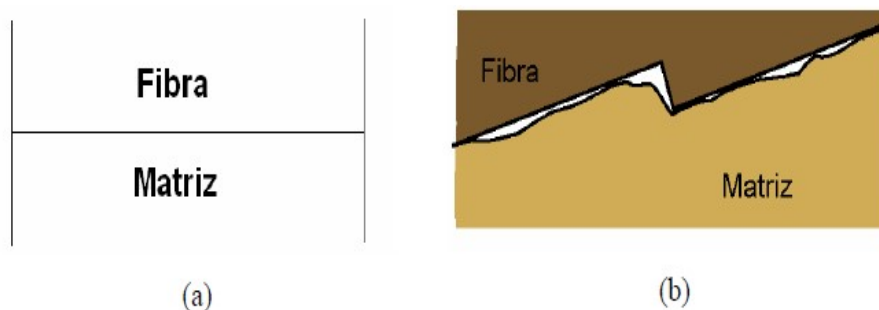


Figura 15- Interface entre a fibra e a matriz (CHAWLA, 1987): (A) interface ideal. (B) interface real

Entre os materiais constituintes podem ocorrer os seguintes mecanismos de adesão (ASHBEE, 1993):

- Interdifusão: neste caso é necessário que a solubilidade dos dois componentes formadores seja semelhante, já que haverá a formação de entrelaçamento e ligações secundárias entre as moléculas interfaciais de ambas as superfícies adjacentes em completa molhabilidade que é proveniente da difusão de segmentos de cadeias terminais das superfícies. Sendo assim, uma adesão satisfatória em sistemas que envolvam polímeros vai depender da semelhança da polaridade, peso molecular, ramificações e também da temperatura.

- Atração eletrostática: esta situação já se aplica a sistemas com constituintes polares, já que o mecanismo de adesão na interface ocorre inicialmente por forças de atração eletrostática. O tempo sob ação da temperatura que determinará a difusão das fases.

- Ligação química: retrata o modo mais eficiente de adesão em compósitos. Tal modo ocorre normalmente através da aplicação de agentes de acoplamento na superfície da carga, que atuarão como ponte entre o polímero e a fibra. Tais

materiais devem conter uma parte da estrutura que interage com a superfície da fibra e já a outra parte da estrutura deverá conter grupos orgânicos parecidos com as cadeias da matriz polimérica. Vale destacar que a resistência mecânica da interface dependerá do número e tipo de ligações químicas existentes.

- Adesão mecânica: trata-se do modo de adesão mais comum, já que não há ligações químicas entre o substrato e aderente. A junção neste processo ocorre através da penetração do adesivo em forma líquida nos poros, rugosidades e fissuras do substrato. Somente após a evaporação do solvente ou reação química é que a resina se solidificará, promovendo assim, uma maior adesão naqueles pontos nos quais a ancoragem foi mais acentuada.

- Adsorção e molhamento: um molhamento eficiente da fibra pela matriz proporciona a remoção do ar e recobrimento da superfície da fibra com material polimérico. Tal mecanismo dependerá das tensões superficiais dos componentes envolvidos. No momento que uma gota de água é colocada sobre uma superfície sólida, dois fenômenos ocorrem: ou o líquido espalha-se inteiramente sobre a superfície, ou o mesmo continua na forma de gota formando um ângulo de contato entre o líquido e o sólido.

2.7 Resíduos

Em períodos anteriores, nas chamadas sociedades primitivas, os impactos ambientais não eram considerados, já que a produção de resíduos era em escala reduzida e a possibilidade de assimilação ambiental era grande. No entanto, atualmente, os resíduos sólidos representam uma preocupação constante. A sociedade consumista destrói os recursos naturais e os bens sem se importar com a pequena vida útil destes, transformando-os em resíduos e causando impactos diretos na qualidade de vida e na saúde humana (MOLINARI, 2007).

Como os processos produtivos geram uma grande quantidade de resíduos sólidos, os mesmos necessitam ser classificados para ter uma destinação final. De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) em sua norma NBR 10004 de 2004, utiliza-se o termo resíduo sólido para representar os resíduos no estado sólido e semissólido provenientes de atividades diversas, como a industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição, por

exemplo.

A NBR 10004/2004 ainda considera na classificação determinados líquidos cujas particularidades inviabilizem seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água. Os resíduos são classificados em função de suas propriedades físicas, químicas ou infectocontagiosas que podem ser nocivos à saúde pública e também ao meio ambiente.

De acordo com a NBR 10004/2004 a classificação se dá em duas classes e há subdivisões internas a uma das classes:

- Resíduos classe I-perigosos;
- Resíduos classe II- não perigosos;
 - Classe II A- não inertes;
 - Classe II B- inertes.

Para os resíduos serem classificados, primeiramente há a identificação do processo ou atividade que os originou e também uma análise de seus constituintes e uma comparação destes com possíveis substâncias que proporcionem impacto à saúde e ao meio ambiente (NBR 10004, 2004).

2.7.1 Resíduos de rochas ornamentais

Braga *et al.* (2010) divulgaram um estudo de caracterização ambiental de resíduos de rochas. Foram avaliados pelos pesquisadores os resíduos oriundos de casqueiros moídos, lamas de desdobramento de rochas e de polimentos. Foi verificado que todos os resíduos analisados foram enquadrados na Classe II da NBR 10004/2004, isto é, não perigosos. Inseridos na Classe II, os casqueiros de mármore e o de granito cinza se enquadravam como inertes (II-B), no entanto os granitos amarelo, preto e verde possuíam teores de Al ou Fe acima do permitido e foram classificados como não inertes (II-A).

O mármore calcítico enquadra-se dentro da Classe II B- inertes, esta classificação torna o mármore calcítico uma excelente matéria-prima para a produção de mármore artificiais. Como a resina epoxídica DGEBA/TEPA apresenta boa resistência química e será associada ao mármore inerte, o mármore artificial não trará prejuízos ambientais. A fibra de bananeira também como é um resíduo natural, não apresenta riscos ao ser associada com estes materiais.

Indefinidamente, as empresas produtoras dos resíduos são responsáveis pelo mesmo em qualquer lugar aonde possa ser depositado, ou mesmo que eles sejam alterados a sua forma (SANTOS, 2007). Em virtude disso, as empresas estão sendo forçadas a adequar os resíduos desde a classificação, tratamento, coleta e também a destinação final a fim de atender as normas dos órgãos ambientais.

Observando o cenário de resíduos de rochas ornamentais, infere-se que a indústrias deste tipo demonstram preocupações voltadas com as legislações do meio ambiente, assim como para o desenvolvimento de novos materiais atrelados a reciclagem, visando seguir as leis vigentes sobre o descarte destes materiais (MOLINARI, 2007).

No Brasil, o mármore ou granito artificial são importados a valores elevados. Economicamente, a tecnologia da reciclagem de rochas não representa grande complexidade, considerando o fato da matéria-prima, o resíduo, ser constantemente desperdiçado sendo que o mesmo pode ser reaproveitado para a fabricação destes materiais artificiais (MACHADO *et al.*, 2002).

2.7.2 Resíduos do cultivo da bananeira

Grande parte das atividades industriais ou agrícolas geram resíduos no Brasil. O material denominado resíduo só deixa de ser classificado como tal através da sua valorização como matéria-prima, tendo sua utilização no desenvolvimento de novos produtos.

Como a geração de resíduos da atividade agrícola da produção da banana também é inevitável, a extração da fibra de bananeira e a sua utilização em alternativa a fibra de vidro sintética pode ser vantajoso tanto nas características técnicas, assim como para reduzir o quantitativo de resíduo a ser descartado no meio ambiente. Além disso, tal aproveitamento destes materiais também agrega valor ao resíduo e possibilita a geração de novos empregos.

Nos últimos anos, houve um aumento na demanda mundial de alimentos, gerando cada vez mais resíduos das atividades agrícolas. Muitas vezes, os resíduos não passam por uma utilização adequada e tornam-se um problema ambiental já que a produção dos mesmos ocorre em grande escala e ainda ocorrem dificuldades na decomposição do material (PAULESKI *et al.*, 2007). A fibra extraída do

pseudocaule da bananeira destaca-se por ser retirada de uma parte da planta que não possui aproveitamento após a colheita. O Brasil destaca-se como produtor deste fruto por possuir condições favoráveis de plantio, como temperatura, umidade relativa, precipitação e insolação. Tal fato garante a produção durante todo o ano, atendendo regularmente às necessidades de consumo.

A banana destaca-se como a segunda fruta de maior consumo no planeta, com registros de 11,4 kg/hab/ano. Vale destacar que o continente americano é o maior consumidor no qual a América do Sul consome cerca de 20kg/hab/ano. Já em termos de produção mundial, a banana representa o fruto com maior número de consumo, com 106,5 milhões de toneladas (VIEIRA, 2015).

Para a produção de bananas, uma quantidade considerável de resíduos é gerada, que são: pseudocaule, folhas, engaço e ráquis. Estudos estimam que um bananal convencional pode gerar até 200 t ha/ano de restos de cultura. Souza *et al.* (2010) em suas pesquisas concluiu que de cada 100 kg de frutas colhidas, 46 kg não são aproveitados. No processo de industrialização da banana, outros resíduos também são gerados. Souza (2008) relata que para cada tonelada de fruto produzido, são originadas 10 toneladas de resíduos.

O Brasil possui uma área considerável de área ocupada com plantação de banana, no ano de 2017 foi ocupada uma área de 533 mil hectares, já em 2018 houve uma área ocupada em torno de 521 mil hectares. Houve um pequeno declínio em termos de produção no ano de 2018 em relação ao de 2017, mas mesmo assim a produção continuou elevada, gerando uma quantidade considerável de resíduos. Em relação a taxas de produção, no ano de 2017 e 2018, houve uma produção, respectivamente, de 7,1 e 6,7 milhões de toneladas de banana. Vale destacar ainda que do total das 7 toneladas de banana produzida anualmente, cerca de 2,4 milhões de tonelada da banana produzida é originária da região Sudeste, ou seja, áreas bem próximas que poderiam ser fontes de matéria prima (IBGE, 2019). Um destino sustentável, rentável financeiramente e que agregue uma nova função as fibras do pseudocaule da bananeira que usualmente é descartado, pode ser de grande valia para a Engenharia de Materiais.

CAPÍTULO 3: MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

No doutoramento ocorreu o estudo da utilização da Fibra de Bananeira na laminação de rochas ornamentais artificiais e naturais em alternativa a Fibra de Vidro sintética que, normalmente, é utilizada. Como rocha artificial, foi adotada a desenvolvida nas pesquisas de Silva (2016) em suas pesquisas e também algumas rochas artificiais comerciais para comparação de resultados. Já como rocha natural, foi utilizada o Mármore calcítico a fim de verificar o comportamento das características mecânicas mediante o uso de ambas as fibras (vidro e bananeira) na laminação.

a) Rocha artificial desenvolvida por Silva (2016)

Foi utilizado nesta pesquisa a rocha artificial desenvolvida nas pesquisas do Mestrado em que foram utilizados resíduos de mármore calcítico associados à resina epoxídica DGEBA/TEPA.

b) Mármore artificial comercial

Mármore artificiais comerciais também foram testados para avaliação de melhorias mecânicas com o uso da laminação tanto com fibras de vidro quanto com os da bananeira.

c) Mármore calcítico natural

O mármore natural também passou pelo processo de laminação para identificar o quanto a laminação a base de fibra de bananeira e a base de fibra de vidro otimizou os valores de propriedades mecânicas.

d) Resina epóxi

Como resina, foi utilizado a epóxi do tipo diglicidil éter de bisfenol A (DGEBA), adquirida na Dow Química S/A; nome comercial: DER 331; densidade: 1,16 g/ml e massa molar: 340,41 g/mol. A resina foi utilizada para a laminação da fibra na parte inferior das rochas ornamentais naturais e artificiais.

e) Amina

Como endurecedor do sistema epoxídico, foi feito o uso da amina Tetraetilenopentamina (TEPA), adquirida na Sigma Aldrich; densidade: 0,99 g/ml e massa molar: 189,31.

f) Fibra de bananeira

Para a laminação da parte inferior do mármore artificial foi utilizada a fibra de bananeira da modalidade “prata” em forma de malha com dupla torção. As fibras do pseudocaule da bananeira foram processadas sem tratamento químico, sendo apenas colocadas em molho em água por 7 dias, limpas e colocadas para secagem.

Foi escolhido o processo de molho em água porque segundo Gullichsen e Paulapuro (2000) e Sjostrom e Alén (1998), todos os tratamentos químicos usuais (ácido acético, NaOH, acetona e água) removem significativamente os extrativos, só que em geral, os extrativos são facilmente extraídos em água ou solvente orgânico. Além disso, o tratamento químico não foi utilizado, pois eles podem remover significativamente a lignina e a mesma é responsável pela elasticidade da fibra. E assim, a retirada deste componente poderia dificultar o processo de produção da rede entrecruzada com dupla torção, no qual a elasticidade é necessária.

3.2 Extração da fibra de bananeira

A produção da malha entrecruzada da fibra de bananeira ocorreu em etapas, pois inicialmente foi necessário o corte do pseudocaule da bananeira após a retirada do fruto. Com isso, o pseudocaule foi cortado em pedaços menores e posteriormente houve a retiradas das bainhas. Com as bainhas, as mesmas foram cortadas em tiras e colocadas em processo de molho em água por sete dias, tendo a troca diária da água. Em sequência, houve a retirada manual da polpa através da raspagem; lavagem das fibras para retirada residual de polpa e as mesmas foram secas em temperatura ambiente e depois colocadas na estufa (2 horas à 40°C). Somente após este processo de obtenção das fibras, foi possível a confecção da rede entrecruzada da bananeira no molde próprio.

O pseudocaule (local que se inicia depois do rizoma e se estende até o começo das folhas), da bananeira é retirado após a retirada do cacho de banana. Vale destacar que não é recomendado o armazenamento desta matéria-prima por um período longo. O sol deve ser evitado para não ocorrer o ressecamento do material e os mesmos devem ser empilhados até ocorrer a extração da fibra. Alguns pesquisadores relatam que o material pode durar aproximadamente 60 dias sem ressecar (GUIMARÃES, 2012). O pseudocaule em cortes é mostrado na Figura 16.

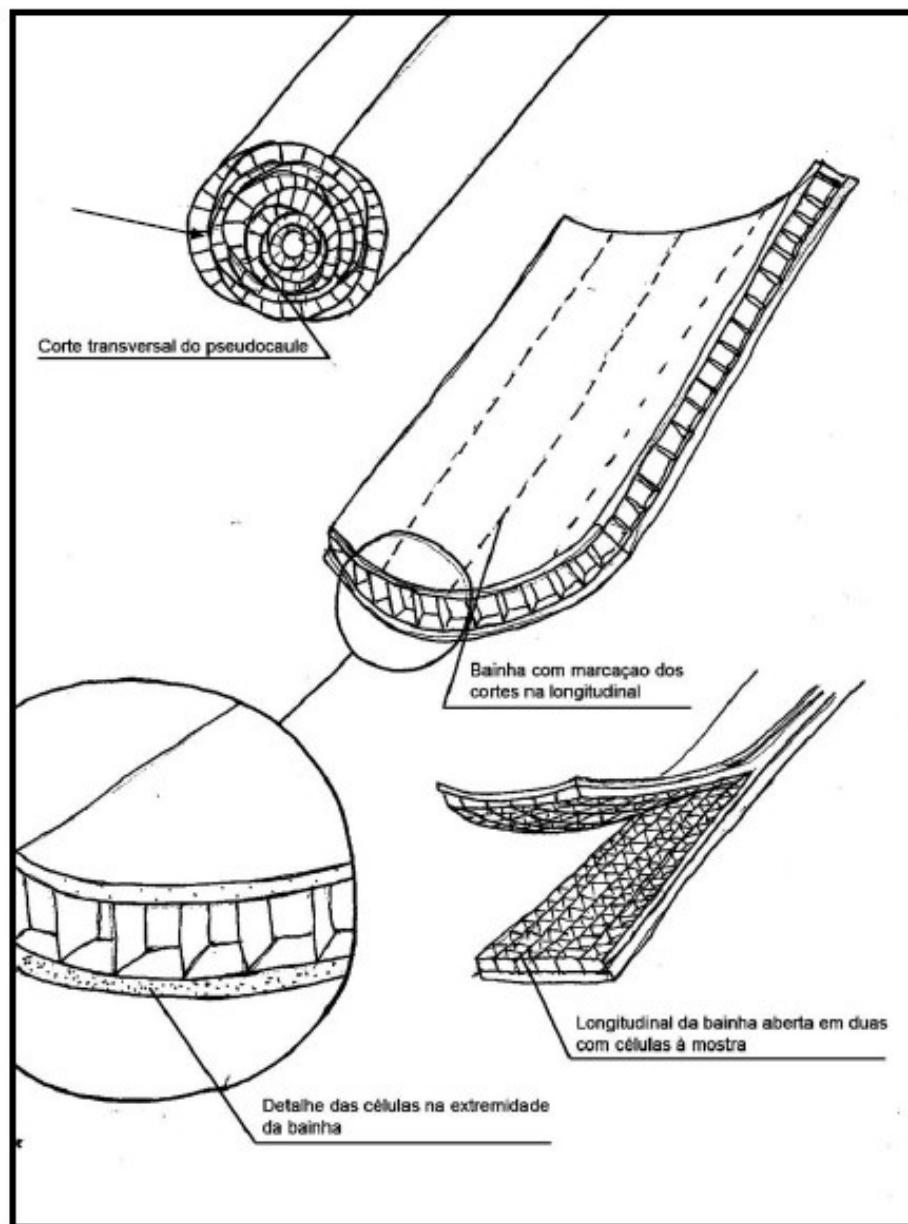


Figura 16– Desdobramento com fio longo (DEMARCHI, 2010)

O pseudocaule é formado por diversas bainhas que necessitam ser desdobradas. Em seguida a este procedimento, as bainhas são cortadas em tiras

para retirada da polpa e extração da fibra, que é retirado pelo modo de extração com fio longo. Neste processo, após o corte e abertura das bainhas, há a separação das partes internas e externa e em seguida o descarte da parte interna.

Com a divisão da bainha, na longitudinal, separando-a em duas tiras compridas e também estreitas é visível na superfície externa da mesma, a presença de fibras juntamente com uma camada de células na superfície.

Com a divisão da bainha repartida em duas partes: a bainha superior ilustra a parte interna da bainha, detentora de pouca fibra e maior conteúdo de polpa; já a imagem inferior representa a parte externa, que possui maior conteúdo de fibra.

No desdobramento parcial do caule há o descarte da camada interna (detentora da menor concentração de fibras) e utiliza-se somente a parte externa para aproveitamento de fibras. Como o pseudocaule segue o formato da circunferência, as bainhas possuem o formato arqueado e comprido. Em função disto, houve a subdivisão da bainha em diversas partes para aproveitar as partes superiores com maior quantitativo de fibra e com menores possibilidades de falhas, conforme Figura 17.

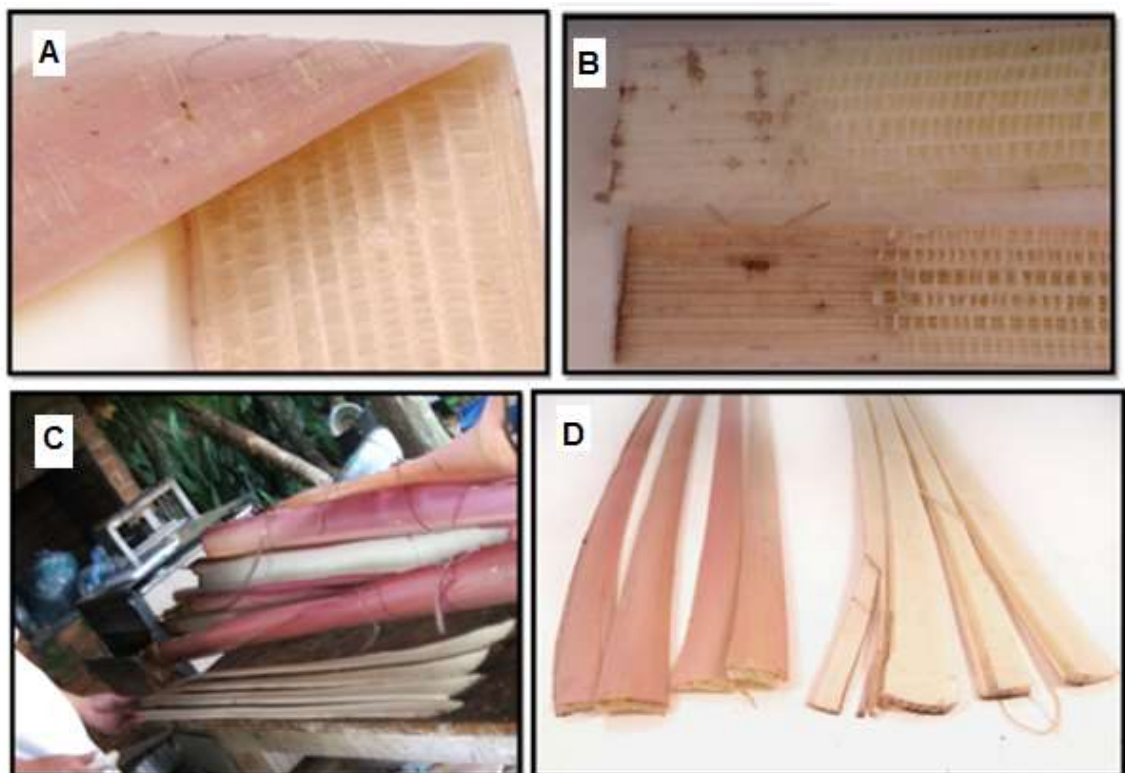


Figura 17- Bainha aberta com o interior à mostra e células aparentes (A) Bainha dividida em duas partes: imagem superior (bainha interna) e inferior (bainha externa) (B) Divisão das bainhas do pseudocaule (C) e corte longitudinal na bainha para a separação da parte com maior concentração de fibra (D) (DEMARCHI, 2010)

O pseudocaule da bananeira é retirado no momento da retirada do fruto. Uma peculiaridade da banana é que a mesma representa um fruto que não existe uma época própria do ano para nascer, sendo assim, o fruto é capaz de ser produzido o ano inteiro, representando uma fonte contínua de matéria prima. A Figura 18 (a) e (b) representa uma plantação típica de banana.



Figura 18- (A) e (B) Plantação de bananeira

A Figura 19 ilustra um pseudocaule de bananeira cortado em partes. O corte do pseudocaule ocorreu em virtude deste tamanho atender a fabricação da rede entrecruzada da bananeira no molde (200 x 200 mm), por isso necessitava a obtenção de uma fibra com pelo menos, 300 mm de comprimento. O comprimento cortado ficou totalmente imerso em água para completa diluição da polpa existente em torno da fibra do pseudocaule. Caso a polpa não fosse retirada completamente, o processo de adesão interfacial da fibra à rocha poderia ser insatisfatório, e assim, a fibra não daria o reforço necessário ao material.

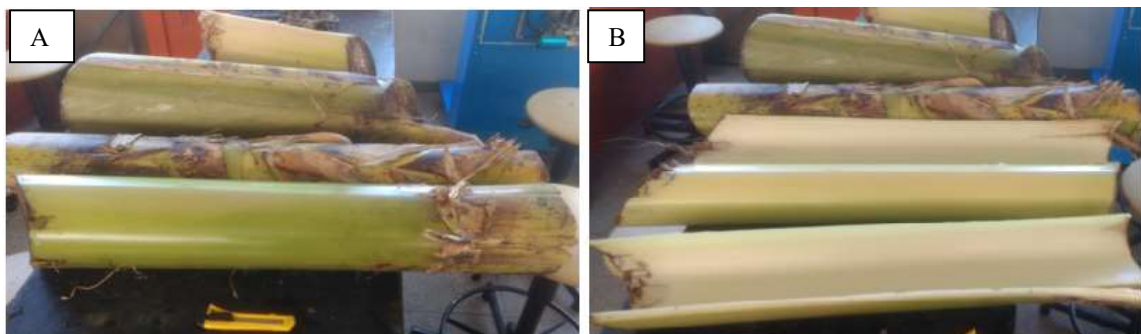


Figura 19- (A) Pseudocaule da bananeira; (B) Preparação do pseudocaule da bananeira para retirada das fibras.

Com a retirada completa das bainhas do pseudocaule da bananeira (Figura 20), as mesmas foram preparadas para o corte em tiras com largura menores de modo a facilitar a retirada manual da polpa em volta das fibras. As tiras tiveram em média, uma largura de 7 centímetros. A largura foi escolhida em virtude da retirada da polpa ter sido manual e nesta dimensão, foi observado que houve uma perda menor de material, já que a ferramenta utilizada para raspagem teve total abrangência da tira.



Figura 20- (A) e (B) Pseudocaule cortado

As bainhas do pseudocaule foram cortadas em tiras (Figura 21 (A) e (B)) e colocadas em um recipiente de forma a possibilitar o processo de molho e retirada da polpa em volta das fibras.

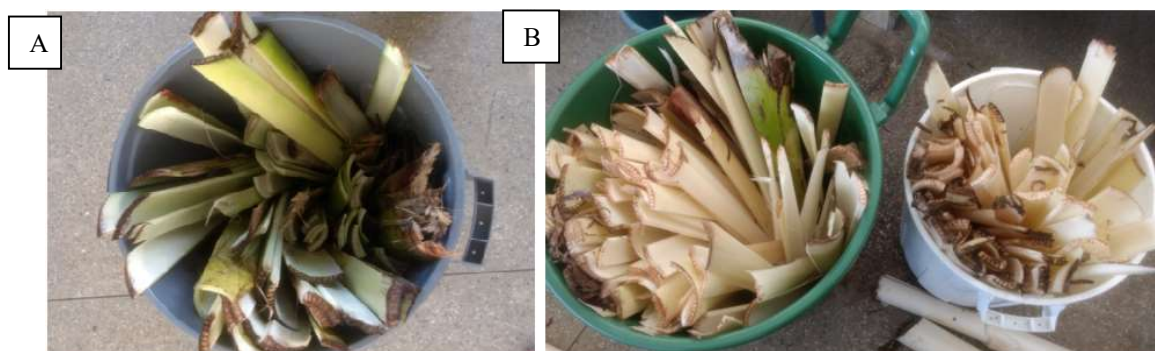


Figura 21- (A) e (B) Pseudocaule da bananeira para entrar em processo de imersão em água por 7 dias

Após o processo de molho, na qual houve a troca da água diariamente, as tiras cortadas (Figura 22) foram retiradas da água e somente a parte externa foi aproveitada para a extração das fibras. As partes internas não foram utilizadas porque a fibra extraída das mesmas não era de resistência considerável para a produção da rede entrecruzada para laminação de rochas sendo, portanto, descartadas. Buscou-se ter a fibra com boa consistência e com uma espessura mais uniforme via análise visual, já que por ser um material natural é normal que as fibras apresentem uma heterogeneidade própria.



Figura 22- (A) Pseudocaule após o período de 7 dias em imersão na água; (B) Bainha externa.

A raspagem da polpa contida da bainha externa (Figura 22-(B)) possibilitou a retirada das fibras que posteriormente foram lavadas para remoção residual da polpa contida no exterior das mesmas. A retirada da polpa visa ter uma fibra mais homogênea e que tenha boa adesão interfacial na laminação que contribui significativamente para resultados mecânicos satisfatórios.

A Figura 23 mostra as fibras extraídas da bainha externa em processo de secagem.



Figura 23- Fibras extraídas

Já a Figura 24 mostra as fibras secas. O processo de extração ocorreu de forma satisfatória, com tamanhos adequados para ser utilizado no molde produzido exclusivamente para esta pesquisa de doutoramento.



Figura 24- Fibras do pseudocaule da bananeira

3.3 Caracterização das Matérias-Primas

A matéria-prima foi avaliada individualmente antes de ocorrer tanto a formação da rede entrecruzada com dupla torção da fibra de bananeira quanto antes da laminação da rocha ornamental, conforme ilustra a Figura 25.

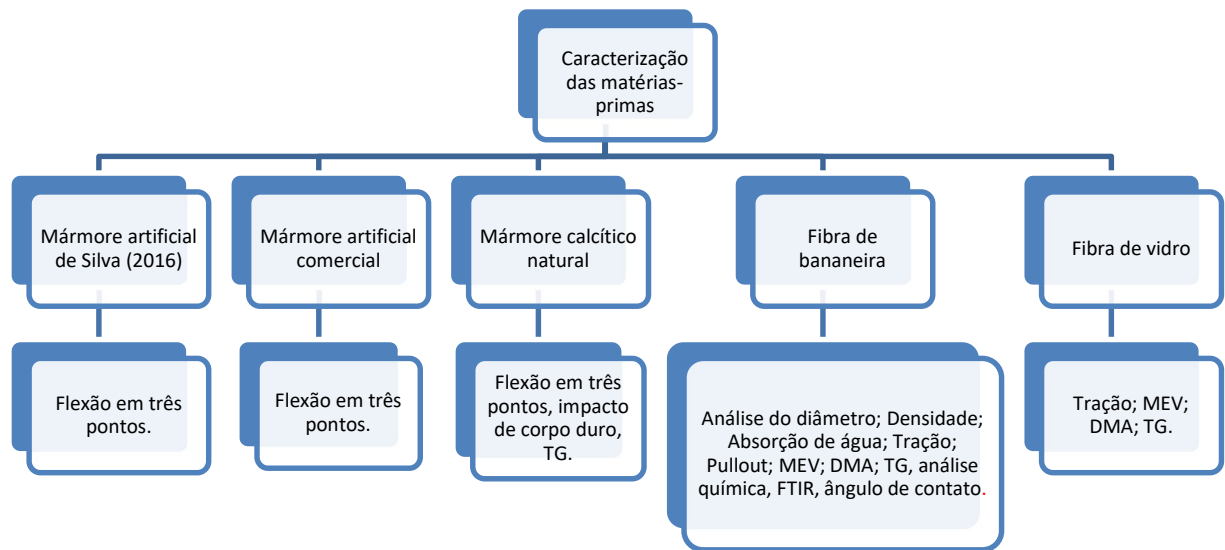


Figura 25- Fluxograma de caracterização das matérias-primas

Para a caracterização do mármore artificial de Silva (2016), foi realizado teste de flexão em três pontos para caracterização mecânica, sendo que o material foi produzido seguindo o mesmo padrão de tal autor.

Para o mármore artificial comercial e para o mármore artificial produzido por Silva natural foram realizados flexão em três pontos pra verificação das propriedades mecânicas. Caso houvesse melhorias mecânicas destes mármore após a laminação com a fibra de bananeira, os demais testes mecânicos e térmicos seriam realizados para comprovação da técnica. No entanto, como a rocha artificial e a rocha artificial produzida já possuem excelentes propriedades mecânicas, o reforço com a laminação de fibra de bananeira e com fibra de vidro não proporcionaram melhorias mecânicas e com isso descartou-se a realização de testes futuros em tais materiais.

Já para o mármore calcítico natural, no modo *in natura* (isento de laminação),

foram realizados testes de flexão em três pontos, impacto de corpo duro, e TGA (Termogravimetria) para análises mecânicas e térmicas do material.

Já para a fibra de bananeira foi realizada análise do diâmetro da bananeira através do projetor de perfil. Fisicamente foram realizados testes físicos de densidade e absorção de água. Para análise química, foram realizados testes de composição química e infravermelho (FTIR); teste de ângulo de contato também foi realizado para analisar o quão hidrofílico é a fibra do pseudocaule da bananeira. Já mecanicamente, foram realizados ensaios de tração para as fibras individualmente em modo *in natura*. Análise microscópica em MEV também foi necessária para avaliar rompimento da fibra, identificar possíveis falhas que ocorrem em fibras naturais e espessura da mesma. Outro teste que foi necessário é o de TGA para analisar a composição da fibra mediante a ação da temperatura, verificando temperaturas máximas em que a mesma pode ser trabalhada, sem ocorrer a degradação no material.

Para a fibra de vidro foram realizados ensaios de tração para caracterização mecânica. Além disso, foi realizado microscopia eletrônica de varredura, DMA e TGA para análise mecânica e termo mecânico.

3.3.1 Determinação do diâmetro médio das fibras

Para a determinação do diâmetro médio das fibras, foi utilizada a metodologia de projeção de luz. O equipamento utilizado foi o Projetor de luz da marca Mitutoyo, modelo PJ-A3000, localizado na Faculdade Multivix em Cachoeiro de Itapemirim. O equipamento citado consta de um projetor de perfil com capacidade de ampliação de até 10 vezes. A Figura 26 representa o aparelho. Foram realizadas 3 medidas ao longo do comprimento de cada exemplar e em seguida, cada exemplar foi girada em 90° para outras 3 medidas para cada tipo de fibra, tendo sido utilizados 50 exemplares. Foi realizada a média aritmética para obtenção do diâmetro médio das fibras.



Figura 26- Projetor de Perfil PJ-A3000

3.3.2 Densidade e absorção de água da fibra de bananeira

Para a determinação das propriedades físicas, cerca de 5 gramas da fibra de bananeira foram depositadas em béquer com água para a saturação, sendo, posteriormente, colocados sobre um papel para a retirada do excesso de água e, em seguida, imersos em uma proveta contendo água destilada (200 ml), conforme mostrado na Figura 27.



Figura 27- Deslocamento do líquido na proveta

O volume deslocado da água corresponderá ao volume do material. Logo após este processo, o material foi retirado da proveta e colocado em placas de Petri, para secagem completa em estufa, a 105 °C, por um período de 24 horas. As amostras foram, então, retiradas da estufa e mantidas em dessecador para resfriamento, anteriormente à determinação das suas massas (massa seca).

A densidade básica do material foi calculada utilizando-se a seguinte equação:

$$D_b = \frac{M_{sec}}{V_{sat}} \quad (1)$$

A absorção de água foi calculada através da seguinte equação:

$$\alpha_a = \frac{(M_{sat} - M_{sec})}{M_{sec}} \times 100 \quad (2)$$

em que: D_b = densidade básica (g/cm³), M_{sec} = massa seca (g), M_{sat} = massa saturada (g), V_{sat} = volume saturado (cm³)

3.3.3 Composição química da fibra do pseudocaule de bananeira

A composição química da fibra do pseudocaule de bananeira foi determinada através de métodos padronizados na Universidade Federal de São Carlos.

As fibras foram secas em estufa, posteriormente pesadas em uma balança analítica e armazenadas no dessecador. A ocorrência das análises ocorreu em triplicata.

O teor de cinzas foi realizado conforme a norma TAPPI T211^{om-93}, no qual um cadinho foi calcinado a 600°C por 3 horas e colocado no dessecador até chegar na temperatura ambiente. Posteriormente, a amostra seca teve sua massa medida na balança, cerca de 1 grama, e direcionada ao forno mufla, pré-aquecido a 600°C, por um tempo de 3 horas. Transcorrido o tempo, foi retirado do forno e colocado no dessecador até a temperatura ambiente ser obtida, e assim ser pesado. O teor de cinzas foi determinado pela seguinte equação:

$$\text{Teor de cinzas} = \frac{m_1}{m_2} \times 100 \quad (3)$$

No qual m_1 = massa inicial (g), m_2 = massa final (g), teor de cinzas= percentual de cinzas (%)

Para a determinação do teor de extrativos, foi aplicada a norma TAPPI T212^{om-98}, no qual 5 gramas da amostra seca tiveram sua massa pesada e inserida a um Béquer junto a 1000 ml de água deionizada. Posteriormente, o material foi agitado em banho maria em 70°C por uma hora. A água utilizada foi retirada e foi adicionado outros 1000 ml de água deionizada para ter outro ciclo de agitação nas mesmas condições de temperatura e tempo. Em seguida as fibras foram filtradas e secas em estufa por 6 horas em 105°C, e colocadas no dessecador. Com as fibras secas, o teor de extrativos foi dado pela seguinte equação:

$$(\%)Teor\ Ext.\ H_2O = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100 \quad (4)$$

No qual: m_1 = massa inicial (g), m_2 = massa final (g), (%) Teor Ext. H₂O= Percentual de extrativos solúveis em água presentes na fibra.

Já o teor de lignina Klason foi determinado pela norma TAPPI T222^{om-02}. A quantidade de 1 grama de fibra foi pesada, adicionada a um almofariz e macerado até ficar homogênea. Logo foram adicionados 15 ml de ácido sulfúrico, e novamente maceradas por 5 minutos para ocorrer a permeabilidade da solução nas fibras. Tal solução teve um repouso de 24 horas. Após o repouso, em uma proveta, houve a completação do volume até 560 ml e a mistura foi submetida ao refluxo por 4 horas. A lignina restante no balão foi coletada, filtrada através de um funil de Buchner com o auxílio de um papel filtro, e mantida na estufa por 6 horas por 80°C e depois colocada no dessecador para atingir a temperatura ambiente e ter sua medida. O teor de lignina foi dado pela equação:

$$\%Lig = \frac{m_1}{m_2} \times 100 \quad (5)$$

No qual: m_1 = massa inicial (g), m_2 = massa final (g), %Lig= percentual de lignina Klason presente nas fibras.

Para a determinação do teor de holocelulose (hemicelulose e α -celulose) presente nas fibras, foram seguidas determinações da norma TAPPI T257^{om-85}. Em um Erlenmeyer, foi adicionado 3 gramas da fibra e 120 ml de água deionizada,

posteriormente 1 ml de ácido acético foi adicionado a mistura e depois, 2,5 g de clorito de sódio. O Erlenmeyer tampado foi submetido a agitação constante por 1 hora e novamente foi adicionado 1 ml de ácido acético e 2,5 g de clorito de sódio, O processo repetiu-se mais uma vez, contabilizando 3 horas das amostras neste ambiente e, posteriormente foi resfriado naturalmente e submetido a filtração com papel filtro em água deionizada para retirada de todo produto adicionado. As fibras foram secas em estufa por 3 horas em 105°C, colocadas no dessecador e a holocelulose foi determinada pela equação:

$$\%holocelulose = \left(\frac{m1}{m2}\right) \times 100 \quad (6)$$

No qual, %holocelulose= percentual de holocelulose presente nas fibras, m1= massa de holocelulose e m2= massa inicial das fibras.

E o teor de α -celulose foi determinada através da norma TAPPI T222^{om-88}, em que as amostras são coletadas após o procedimento da determinação da hocolululose. Foram necessárias duas soluções aquosas, uma de hidróxido de sódio e outra de ácido acético. Cerca de 1 g de fibra foi pesada e colocada em um béquer com 10 ml de solução alcalina, e mantido em repouso por 2 minutos. Após este período, tal amostra foi macerada por 8 minutos. Em seguida, mais 10 ml de solução alcalina foi adicionado e houve o repouso por 20 minutos. Um volume de 40 ml de água deionizada foi adicionado e houve o direcionamento para a filtração à vácuo. Após este processo, a amostra foi lavada com 200 ml de água deionizada, seguido de 20 ml de solução ácida e finalizada com 200 ml de água deionizada novamente. Então, o papel filtro com a amostra foi colocado em estufa por 105°C por 12 horas e depois colocado no dessecador. A amostra foi pesada e o teor de α -celulose foi determinado pela seguinte equação:

$$\%\alpha - celulose = \left(\frac{m1}{m2}\right) \times 100 \quad (7)$$

No qual: α -celulose= percentual de α -celulose, m1= massa inicial (g) de holocelulose e m2= massa das fibras secas.

Já o teor de hemicelulose foi determinado através dos dados obtidos de holocelulose e α -celulose, através da seguinte equação:

$$\%hemicelulose = \%holocelulose - \% \alpha - celulose \quad (8)$$

Em que %hemicelulose= percentual de hemicelulose, % α -celulose= percentual de α -celulose e %holocelulose= percentual de holocelulose.

3.3.4 Análise de infravermelho na fibra do pseudocaule de bananeira (FTIR)

No teste de análise de infravermelho, a absorção de radiação através das moléculas na região do infravermelho acarreta transições rotacionais e vibracionais dos grupos atômicos presentes. Tais vibrações fornecem informações sobre as ligações químicas dos constituintes atômicos, já que cada ligação absorve um comprimento de onda específico que altera seus estados roto-vibracionais. Por meio da radiação absorvida é possível identificar as ligações presentes, grupos funcionais e outras particularidades de cada polímero (CARVALHO, 2015).

Os espectros do FTIR foram analisados na região de 4000 a 400 cm^{-1} , em um equipamento de Infravermelho com Transformada de Fourier (IRPrestige-21/Shimatzu) que se encontra no prédio do Laboratório de Materiais Avançados no Setor de Polímeros (LAMAV/SEPOL). Foram preparadas amostras em pastilhas de KBr (brometo de potássio). O teste de infravermelho foram realizados para complementar a análise química, identificando a composição da fibra do pseudocaule de bananeira.

3.3.5 Análise termogravimétrica (TGA)

Define-se a análise termogravimétrica como uma técnica que mede a variação de massa da amostra em relação à temperatura e/ou tempo enquanto é submetida a uma programação controlada.

O procedimento foi realizado com o equipamento TGA-Q5000 TA Instruments, presente no prédio dos Laboratórios de Materiais Avançados no Setor de Polímeros (LAMAV/SEPOL/UENF), representado na Figura 28.

A análise termogravimétrica foi realizada em uma faixa de temperatura de 30°C a 1000°C com uma taxa de aquecimento de 10°C/min. Utilizou-se um fluxo de ar de 60ml/min durante o teste para análise das rochas não laminadas.

Já para a fibra de bananeira e para a fibra de vidro, ambos de modo natural e com resina, a análise termogravimétrica foi realizada em uma faixa de temperatura de 30°C a 800°C com uma taxa de aquecimento de 10 °C/min. Utilizou-se um fluxo de ar de 60 ml/min durante o teste para análise da fibra de bananeira.



Figura 28- Equipamento TGA-Q5000 TA Instruments

3.3.6 Resistência à tração da fibra de bananeira e da fibra de vidro

Para a determinação das propriedades mecânicas das fibras da bananeira e da fibra de vidro, foram preparados corpos de prova para ensaios de tração baseados nas recomendações da norma ASTM D 3822 (2007), que discute sobre a determinação de propriedades mecânicas sob esforço de tração para fibras têxteis, pois para o ensaio à tração em fibras vegetais ainda não é normalizado, sendo assim, a influência do comprimento da fibra precisa ser levado em consideração. Há de se destacar também que há uma variabilidade considerável de diâmetro ao longo do comprimento da fibra, o que traz variações nos resultados dos testes.

Para o teste de tração, foi necessária a colagem de uma proteção nas extremidades da fibra (~ 10 mm em cada extremidade), para fixação da fibra nas garras da máquina universal de ensaios mecânicos EMIC DL 10000. Uma fixação satisfatória foi obtida com papel cartolina, sendo assim, todos os corpos de prova foram produzidos com este material (Figura 29).

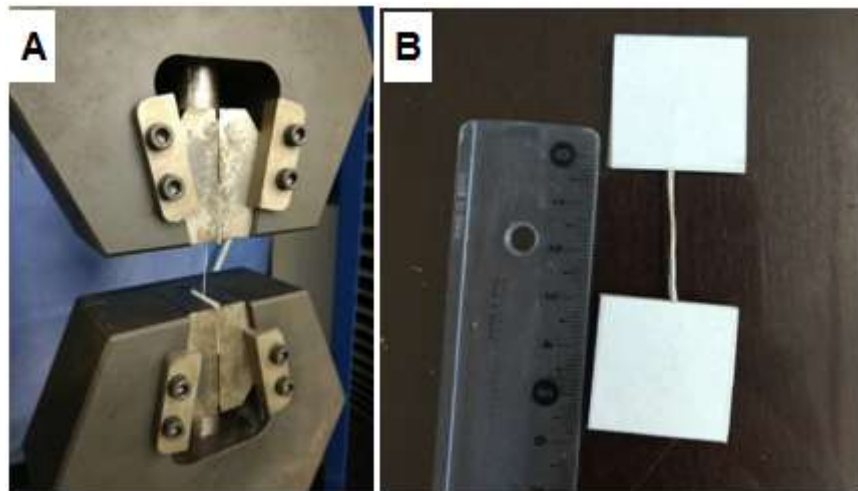


Figura 29- (A) Teste de tração na fibra de bananeira; (B) Corpo de prova da bananeira

Foi empregado um comprimento nominal entre as garras de 30 mm, seguindo recomendações da norma e também baseado em pesquisas localizadas na literatura (MUKHOPADHYAY *et al.*, 2009; KULKARNI *et al.*, 1983).

As fibras de bananeira e de vidro (Figura 30) foram ensaiadas em máquina universal de ensaios EMIC DL 10000, com uma velocidade de ensaio de 3,0 mm/min. Foram produzidos 60 corpos de prova.

A malha da fibra de bananeira possui um fio de maior espessura retangular perpendicular a dois fios finos de menor espessura da fibra de vidro, no qual são entrecruzados. Foram realizados os testes de tração nos dois tipos de fios de fibra de vidro para avaliação das propriedades mecânicas.

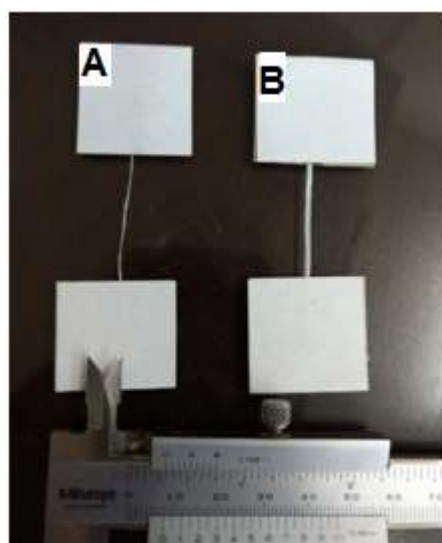


Figura 30- (A) Fibra fina de menor espessura da malha de vidro; (B) fibra retangular de maior espessura da malha de fibra de vidro

3.3.7 Ensaio Pullout em fibras de bananeira

As fibras do pseudocaule da bananeira foram preparadas para serem inseridas na matriz da resina epoxídica DGEBA/TEPA para serem submetidas ao ensaio de pullout.

O ensaio de pullout é utilizado tanto para analisar o tamanho crítico de utilização da fibra na matriz polimérica quanto para analisar qualitativamente a interação na interface fibra-matriz.

As fibras foram inseridas na matriz de resina epoxídica DGEBA/TEPA com um comprimento de inserção variável de 5mm, 10mm, 15mm, 20mm e 25mm, sendo que posteriormente, os corpos de prova foram ensaiados sob tração a fim de gerar um valor de carga para cada comprimento de carga. Foram utilizados 5 corpos de prova para cada comprimento de inserção na matriz epoxídica. O modelo proposto de inserção da fibra é mostrado na Figura 31.

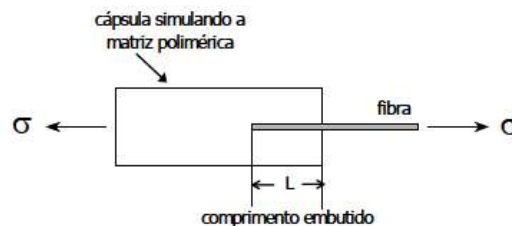


Figura 31- Esquema do ensaio de pullout proposto por Kelly e Tyson (KELLY e TYSON, 1965)

Tanto para os resultados de tensão de tração de ruptura quanto para os valores de tensão de escorregamento, as equações foram dependentes da condição da fibra pós-ensaio:

- Se sofrer rompimento: $\sigma_r = \frac{F}{\frac{\pi d^2}{4}}$ (9)

- Se sofrer escorregamento: $\sigma_e = \frac{F}{\pi d L}$ (10)

Nas Equações, d representa o diâmetro médio para as fibras *in natura*, F é a carga obtida diretamente do equipamento e L é o comprimento embutido na matriz epoxídica. O ensaio de pullout foi realizado em máquina universal de ensaios EMIC

modelo DL10000, mostrado na Figura 32, disponível no IFES- Campus Cachoeiro de Itapemirim, equipado com uma célula de carga de 1 KN e velocidade de ensaio de 2 mm/min.



Figura 32- Fibra de bananeira inserida na matriz epoxídica DGEBA/TEPA

3.3.8 Ângulo de contato das fibras de bananeira e da resina epoxídica DGEBA/TEPA

A molhabilidade das fibras e resina epoxídica foram medidas a partir de medidas de ângulo de contato gerado por uma gota de água destilada na superfície das fibras e da resina. Através do goniômetro, água foi colocada sobre a superfície a ser medida através da agulha, na qual era medido o ângulo de contato da água com a superfície (fibra e/ou resina). Os testes foram realizados em triplicata. O teste foi realizado no Instituto Militar de Engenharia, no Rio de Janeiro, com o goniômetro First Tem Angstroms (modelo FTA 100), no qual a Figura 33 mostra o aparelho utilizado.

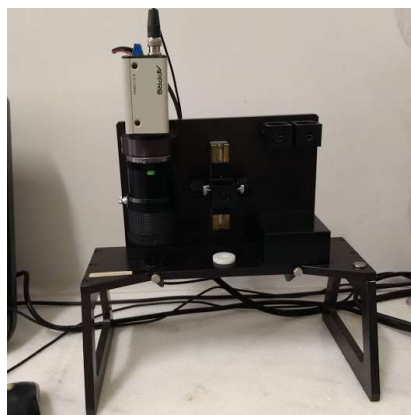


Figura 33- Goniômetro utilizado para a realização de medidas do ângulo de contato

3.3.9 Resistência à flexão em rochas não laminadas

O ensaio de resistência à flexão também é denominado como módulo de ruptura. Como as chapas de rocha em seu uso não são submetidas a esforços de tração, utiliza-se os ensaios de flexão para medir a resistência direta das placas de rochas ornamentais. Tal peculiaridade é de grande importância porque as rochas ornamentais são constantemente solicitadas à tração em seus usos, como em painéis de edifícios sob a ação dos ventos, numa quina de bancada, entre outras situações (SOSSAI, 2006). Além disso, há uma relativa dificuldade em se realizar ensaios de tração em materiais frágeis, em virtude do deslizamento do corpo de prova nas garras da máquina de ensaio e por também representar a condição real de possível fratura.

Foram utilizados 7 corpos de prova neste teste com dimensões de (10 x 25 x 100) mm. Tal teste foi realizado antes da laminação nas rochas ornamentais naturais e artificiais a fim de comparar o quanto a laminação pode melhorar as propriedades mecânicas.

Para determinar a resistência do material à tração é realizado o ensaio de tração na flexão em três pontos com dois pontos de apoio e um cutelo na parte superior, na qual tem uma tendência de ruptura na seção central do momento fletor máximo, mas que não é obrigatório tal fato. Caso a ruptura ocorra fora dessa seção, a mesma deverá ser estimada linearmente em função do momento fletor que ocorre na distância de ruptura considerada a partir do apoio mais próximo.

Durante o ensaio de flexão, há a aplicação de uma força P no centro do corpo de prova, no qual com a aplicação da força, ocorre compressão na região superior e uma tração na parte inferior, que emerge a partir da espessura média, possuindo o maior valor na superfície externa da amostra. Esta região que possui o maior valor de aplicação da força dará início a fratura do corpo de prova. Por isso, visa-se reforçar a parte inferior das rochas ornamentais com a malha entrecruzada da fibra de bananeira, já que em solicitações de esforços cotidianos, seria a região mais propensa a inícios de fraturas.

O ensaio de resistência à flexão em três pontos foi realizado em máquina universal de ensaios EMIC modelo DL10000, presente no Instituto Federal do Espírito Santo, Campus Cachoeiro de Itapemirim, seguindo orientações da norma

espanhola UNE-EN 14617-2: 2008 (também foram observadas orientações da norma brasileira NBR 15845/2010-Anexo F).

A tensão de ruptura em flexão foi calculada utilizando-se a seguinte equação:

$$\sigma_F = \frac{3 F L}{2 b e_{min}^2} \quad (11)$$

Onde:

σ_F = Valor numérico do módulo de ruptura (resistência à flexão por carregamento em três pontos), F = Valor numérico da força de ruptura, L = Distância entre as barras de apoio, b = Largura do corpo de prova e e_{min} = Espessura do corpo de prova.

3.3.10 Ensaio de resistência ao impacto de corpo duro em rochas não laminadas

De grande importância também é este teste de resistência ao impacto de corpo duro para o uso de rochas em construção civil, pois simula a queda de um objeto no piso (SOSSAI, 2006). Este ensaio possibilita a obtenção de informações relativas ao grau de tenacidade de um material rochoso e, além disso, avalia a capacidade do material em suportar ações mecânicas instantâneas (VIDAL *et al.*, 1999). Conforme visualização da Figura 34 é possível verificar que a superfície inferior do corpo de prova também fica submetida a um esforço de tração com a queda da esfera de metal na tentativa de rompimento das rochas, por isso, um reforço nesta região inferior destaca-se como de grande valia, pois poderia proporcionar maior resistência mecânica mediante a queda de algum objeto no uso cotidiano.

O teste de impacto ao corpo duro foi realizado no Centro de Tecnologia Mineral- CETEM em Cachoeiro de Itapemirim (ES). O ensaio seguiu orientações da norma brasileira NBR 15845/2010-Anexo H. Foram utilizados 3 corpos de prova para este ensaio com dimensões de (10 x 200 x 200) mm.



Figura 34 – Teste de impacto de corpo duro

O cálculo de impacto ao corpo duro foi realizado pela equação:

$$w = mgh \quad (12)$$

Onde:

W = Energia de ruptura, M = Massa da esfera, g = Aceleração da gravidade, e h = Altura da ruptura.

3.3.11 Análises dinâmico-mecânico (DMA)

O teste de análise dinâmico-mecânico fornece informações a respeito do comportamento visco elástico do sistema.

A análise dinâmico-mecânica foi realizada com o módulo DMA Q800 TA Instruments (Figura 35), presente no Laboratório de Materiais Avançados, Setor de Polímeros (SEPOL/LAMAV/UENF), aplicando uma frequência de 1 Hz, amplitude de 20 μm , força estática de 0,1 N e taxa de aquecimento de 3 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ com o objetivo de estudar o comportamento térmico mecânico e as relaxações secundárias.

Os fios da fibra de bananeira *in natura* e com resina impregnada sobre a mesma e também os fios da fibra de vidro no formato industrial e com resina, também foram submetidos ao teste de DMA para averiguar propriedades mecânicas destes materiais.

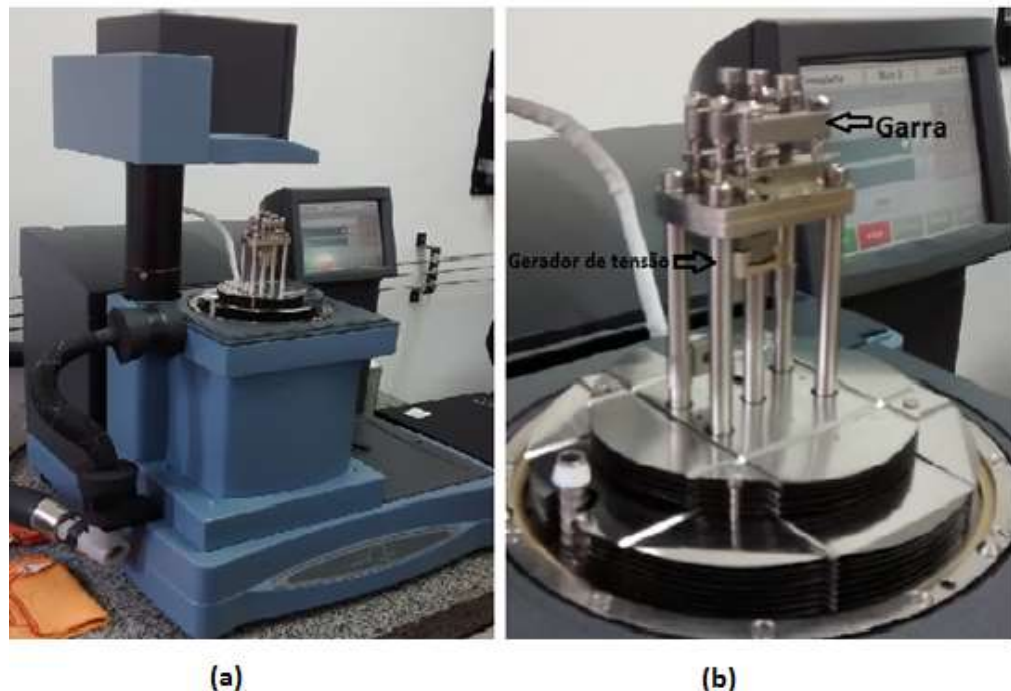


Figura 35- DMA Q800 TA Instruments - (a) garra de flexão “dual cantilever” (b) garra de tração

3.3.12 Microestrutura da fibra do pseudocaule da bananeira e na fibra de vidro

O procedimento foi realizado com o equipamento de microscopia confocal Lext OLS4000- Olympus (Figura 36), presente no prédio dos Laboratórios de Materiais Avançados no Setor de Polímeros (LAMAV/SEPOL/UENF). Buscou-se avaliar microscopicamente a estrutura da fibra de vidro e da fibra de bananeira, além de poder analisar pontos de união da rede entrelaçada com dupla torção de ambas as malhas. Imagens superficiais da malha aderidas a rocha também foram analisadas, além das imagens de fratura dos corpos de prova submetidas ao ensaio de flexão.

O objetivo da microscopia confocal é analisar com maior ampliação os detalhes da estrutura da fibra e analisar a aderência da malha da rede trançada na rocha, já que uma boa adesão permite que a malha seja um reforço na parte inferior da rocha.



Figura 36- Microscópio confocal LEXT OLS4000-Olympus

Também foi utilizado a observação da fibra em MEV (Microscópio Eletrônico de Varredura). Foram realizadas imagens através de microscopia eletrônica de varredura no microscópio Super Scan SSX-550 da SHIMADZU, localizado no Laboratório de Materiais Avançados (SEPOL/LAMAV/UENF).

As amostras foram fixadas a uma base com fita dupla face de carbono e foram metalizadas para melhor visualização e ampliação das mesmas.

3.4 Produção da Malha de Fibra de Bananeira

A fibra de bananeira foi preparada em forma de rede no qual os fios deveriam ter dupla torção, característica que aumenta consideravelmente a resistência à tração e que representa um fator fundamental no reforço de chapas de rochas ornamentais. Tal característica de dupla torção seguiu o mesmo padrão de fabricação das fibras de vidro a fim de ter um melhor aproveitamento mecânico. A Figura 37 demonstra uma fibra de vidro em forma de malha, com fios de fibra de vidro fina de menor espessura e com fios retangulares colocados entrelaçados colocados perpendicularmente. A malha da bananeira seguiu o mesmo padrão de fabricação, no entanto, com fios naturais da bananeira extraídos de forma natural.

A malha formada teve os fios com dupla torção em um sentido e no sentido transversal, foram apenas utilizados em sua forma natural. Depois, foram transpassados e colocados em uma malha que teve o padrão de 5 mm de distância em cada fibra.

Para a sua fabricação, um quadrado de madeira (200 x 200 mm) foi utilizado como molde. Neste caso, o mesmo teve a cada 5 mm, uma perfuração para a passagem da fibra e formação da rede. Com a rede formada, iniciou-se o processo de laminação.

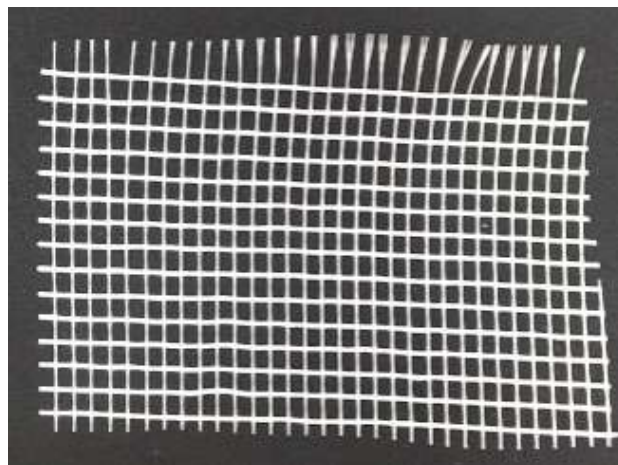


Figura 37- Malha de vidro demonstrando o padrão que foi seguido para a produção da malha da fibra de bananeira

A Figura 38 (A) e (B) ilustra o molde utilizado nas confecções da malha da fibra de bananeira.

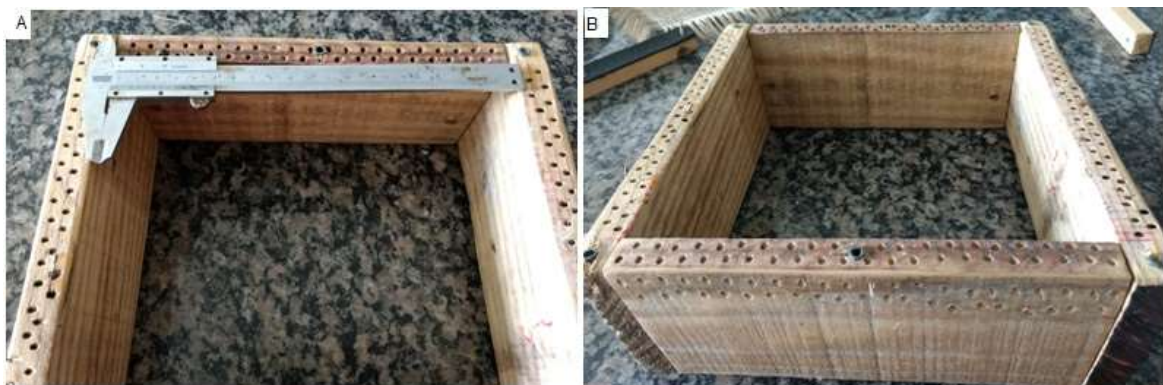


Figura 38 – (A) e (B) Corte da vista superior do molde (à esquerda) e molde em perspectiva (à direita)

A Figura 39 ilustra uma etapa do processo no qual as fibras foram colocadas inicialmente, em um único sentido, para em seguida, ser submetida a passagem das fibras no sentido transversal com dupla torção. Com passagem das fibras em um

único sentido, as mesmas foram “esticadas” e presas por uma base de madeira com uma manta de borracha, na qual visou propiciar melhor ajuste das mesmas. Foi verificado que a o espaçamento entre as fibras e a uniformidade das mantas foi mais satisfatória quando foi utilizado este sistema de fixar as fibras em um sentido para em seguida passar as outras no sentido transversal.

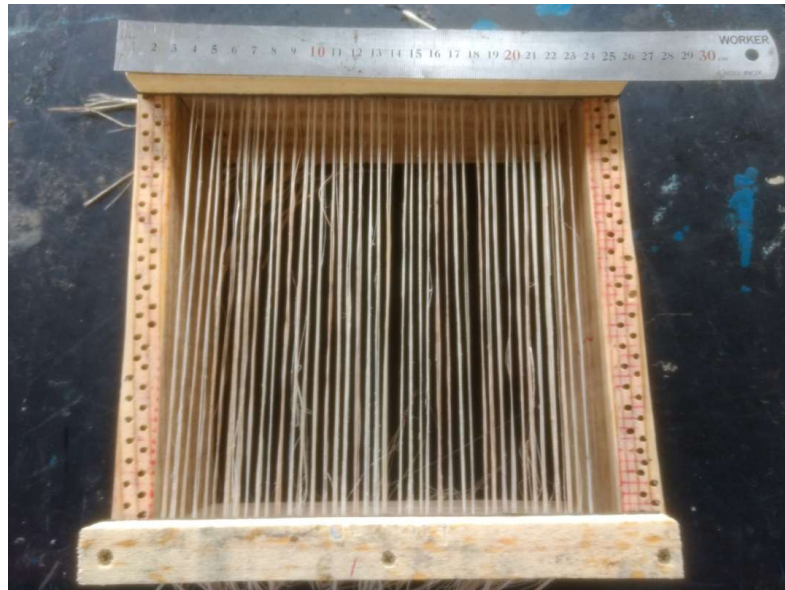


Figura 39- Fibras do pseudocaule da bananeira na primeira fase de preparação para a rede entrecruzada

Já a Figura 40 (A) e (B) ilustra o início da passagem das fibras de modo transversal. As fibras são passadas de modo individual, no qual cada uma foi passada uma de cada vez e ocorre o processo de forma progressiva da confecção da malha entrecruzada. Vale destacar que cada conjunto de fibra apesar de terem sido passadas individualmente, buscou-se seguir o mesmo padrão de confecção de modo a não ocorrer distorções na malha entrecruzada da fibra de bananeira.

O molde utilizado também foi confeccionado manualmente na qual as distâncias dos orifícios para a passagem das fibras foram propostas para seguir o mesmo tamanho de produção da fibra de vidro.

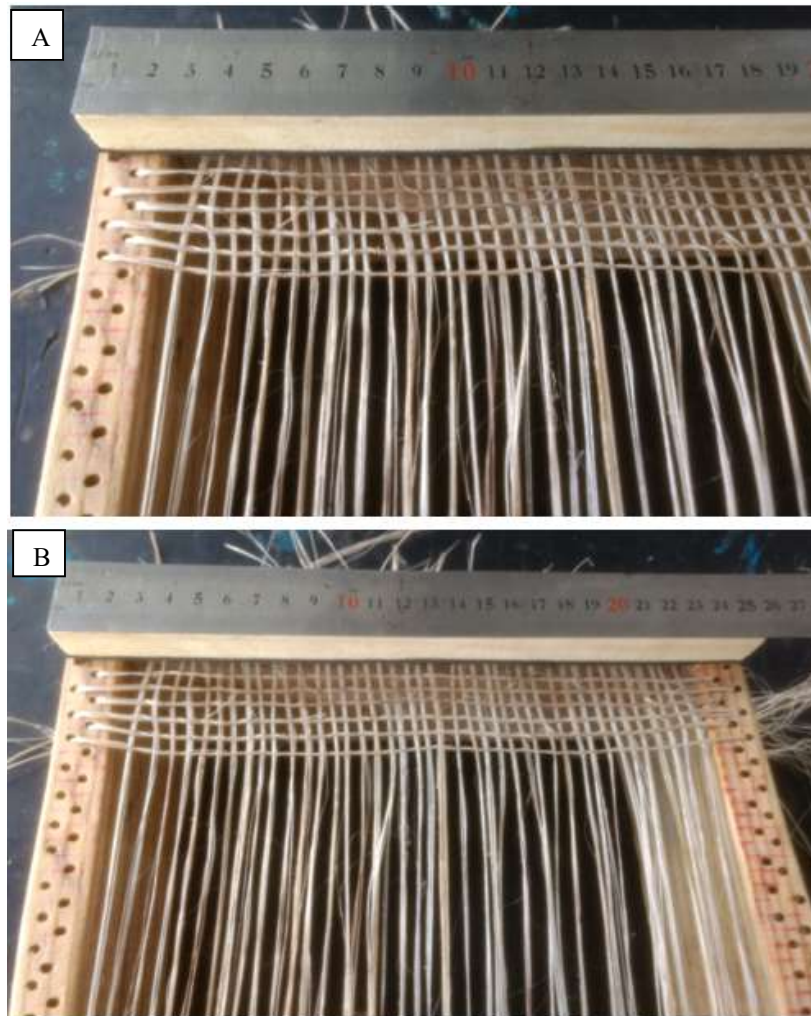


Figura 40- (A) e (B) Preparação da rede entrecruzada da fibra de bananeira

Já Figura 41 (A, B, C, D) ilustra a rede entrecruzada da bananeira no molde. Após o processo de passagem da fibra, a rede entrecruzada pode ser retirada do molde e preparada para passar para o processo de laminação nas rochas. Após o processo de confecção, as redes foram retiradas e a fibra excedente do molde foi cortada.

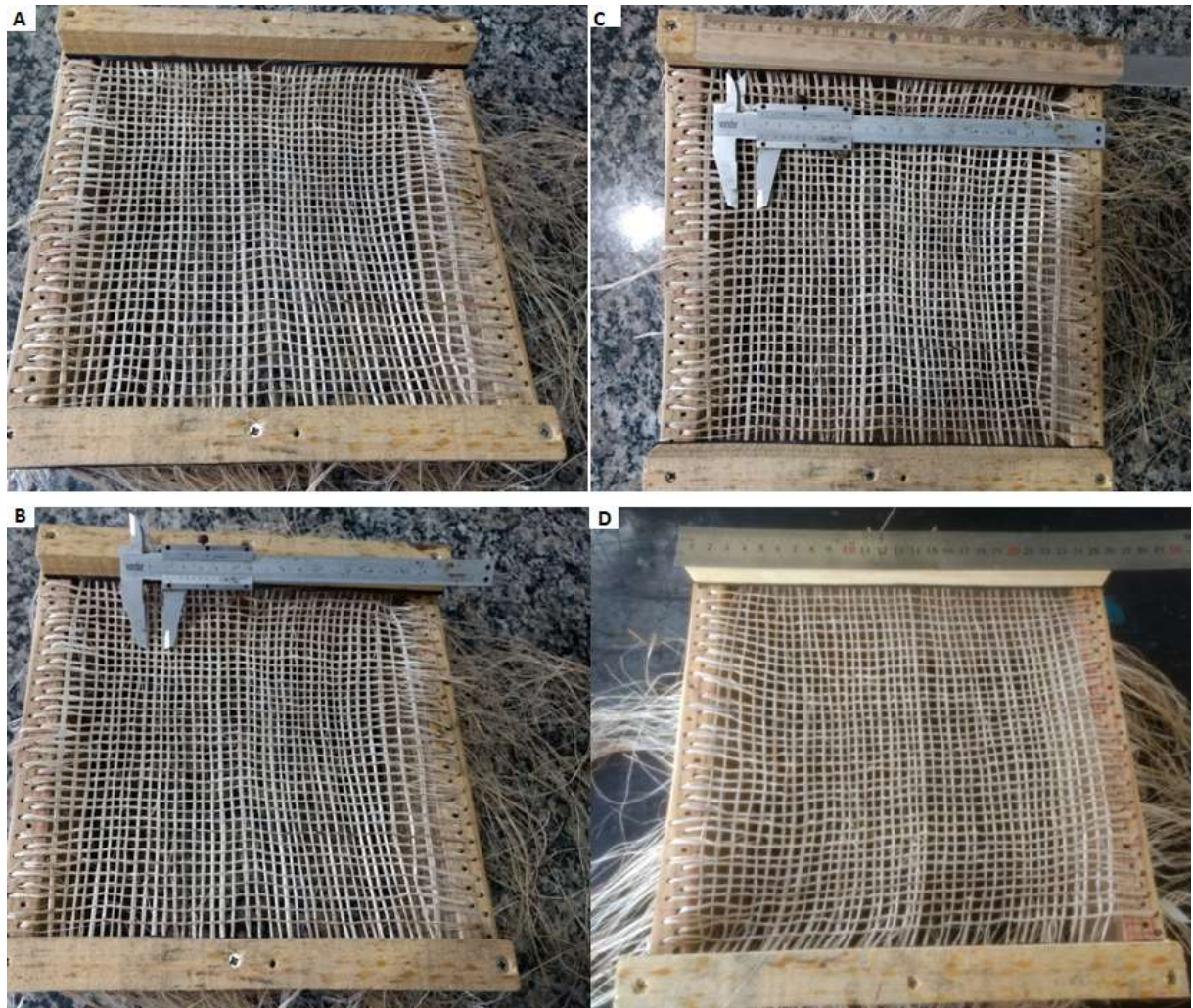


Figura 41- (A, B, C, D) Rede entrecruzada de bananeira no molde

Já a Figura 42 (A, B, C, D) ilustra a rede sendo extraída do molde, na qual é possível visualizar que as madeiras que fixam a rede na parte superior do molde já foram retiradas. Caso não ocorresse essa fixação da parte superior, a rede provavelmente não teria uniformidade nos espaços entre um conjunto de fios e o outro.



Figura 42- (A), (B), (C) e (D): Rede entrecruzada de bananeira no molde sem a parte superior de fixação.

A Figura 43 mostra a rede entrecruzada da bananeira após a retirada do molde, formando uma malha com tamanho de 200 x 200 mm. As rebarbas foram cortadas para ficar no tamanho final proposto.



Figura 43- Rede entrecruzada de bananeira

A Figura 44 (A) e (B) representa a rede entrecruzada da malha da bananeira (A) e (B) no qual é possível perceber com maiores detalhes a fibra entrecruzada.



Figura 44- (A) e (B) Rede entrecruzada da malha de bananeira

Já na Figura 45 (A) e (B) ilustra a rede entrecruzada de vidro (à esquerda) e a rede entrecruzada da bananeira (à direita) mostrando lado a lado, a fibra de vidro

que normalmente é utilizada e a de bananeira que busca a aplicação na laminação de rochas ornamentais.

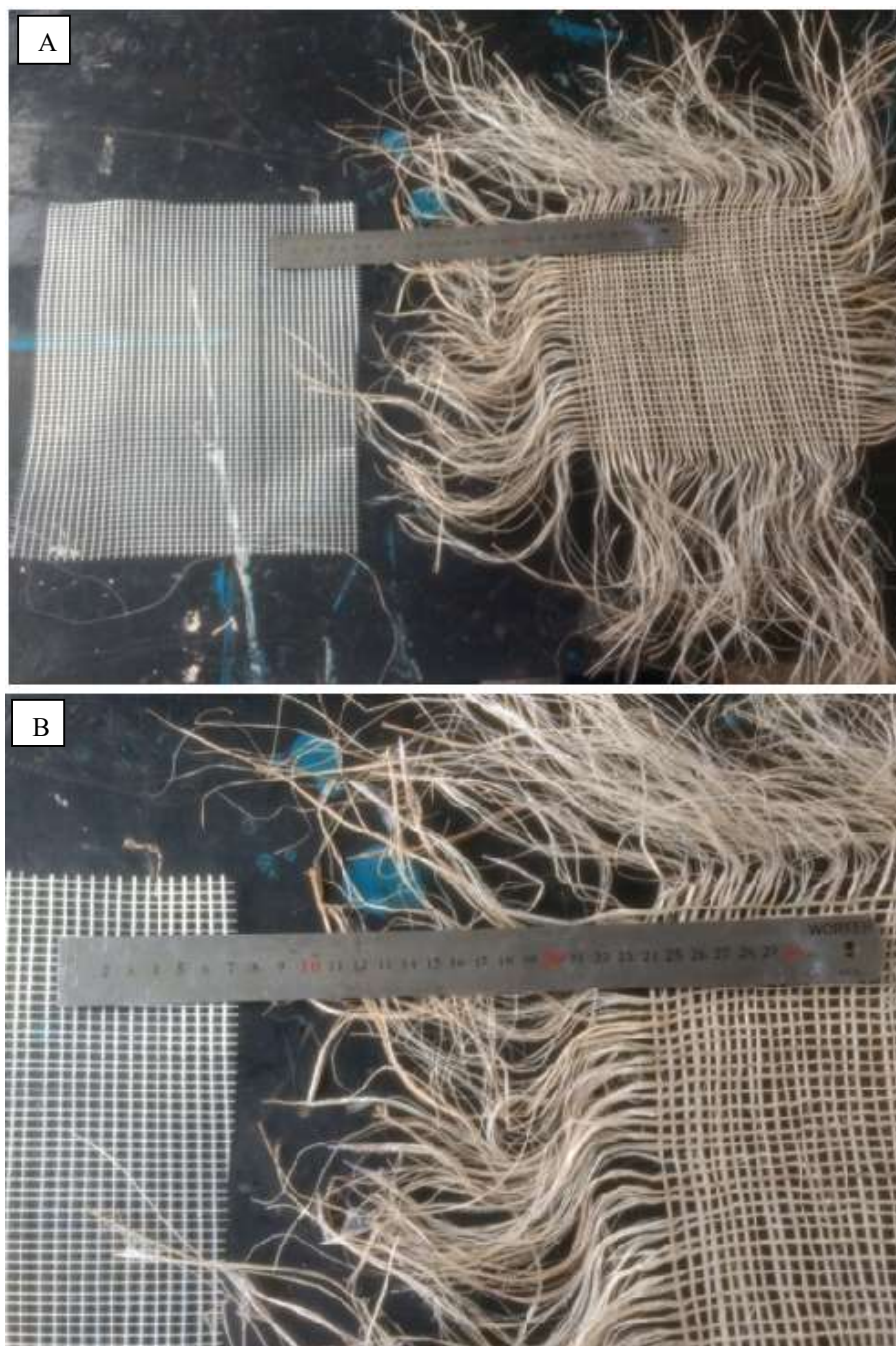


Figura 45 – (A) e (B) Rede entrecruzada de fibra de vidro (à esquerda) e fibra entrecruzada de bananeira (à direita)

Foram confeccionadas 20 (vinte) redes entrecruzadas de fibra de bananeira (Figura 46 (A) e (B)) com dimensões aproximadas de 200 x 200 mm. As mesmas foram submetidas a testes de gramatura e em seguida foram para a laminação de rochas ornamentais.



Figura 46 – (A) e (B) Rede entrecruzada de fibra de bananeira pronta para a laminação de rochas ornamentais.

3.4.1 Determinação da gramatura da malha entrecruzada da fibra de bananeira

Com as malhas entrecruzadas preparadas, buscou-se caracterizar as mesmas através do ensaio de gramatura. Este ensaio consiste em determinar o peso da malha g/m^2 por meio de corpos de prova com dimensões padronizadas. Foram utilizados 20 corpos de prova com dimensões de 200x200 mm. Os corpos de prova foram pesados em uma balança (Figura 47) e foi realizada uma média do

peso dos corpos de prova. Utilizou-se a NBR 12984 (2009) que discute sobre o peso de não tecidos com medidas em corpos de prova por meio de balança.

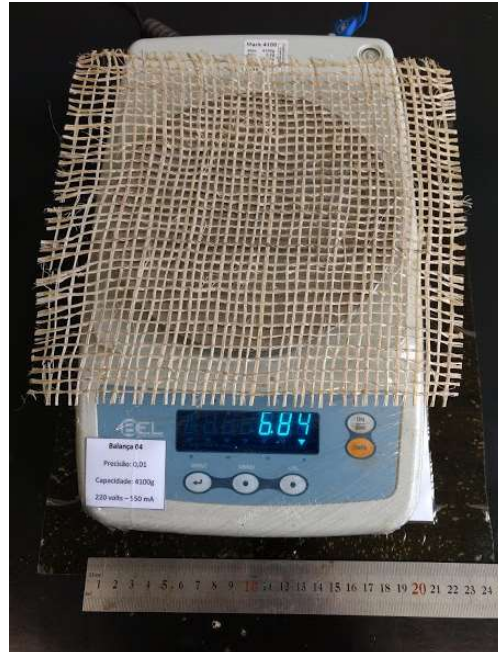


Figura 47 – Teste de gramatura na rede entrecruzada da bananeira

3.4.2 MEV na malha entrecruzada da fibra de bananeira e na de fibra de vidro

Buscando ainda avaliar a malha entrecruzada da fibra de bananeira, foi realizada a avaliação da microestrutura da malha através do uso da técnica de observação da fibra em MEV (Microscópio Eletrônico de Varredura). Foram realizadas imagens através de microscopia eletrônica de varredura no microscópio Super Scan SSX-550 da SHIMADZU, localizado no Laboratório de Materiais Avançados (SEPOL/LAMAV/UENF).

3.5 Processo de Laminação

Posteriormente aos processos de: extração das fibras, caracterização das mesmas, confecção da malha entrecruzada da fibra de bananeira; foi realizado o processo de laminação, unindo a malha da fibra de bananeira às rochas ornamentais. O processo de laminação (Figura 48) ocorreu do seguinte modo:

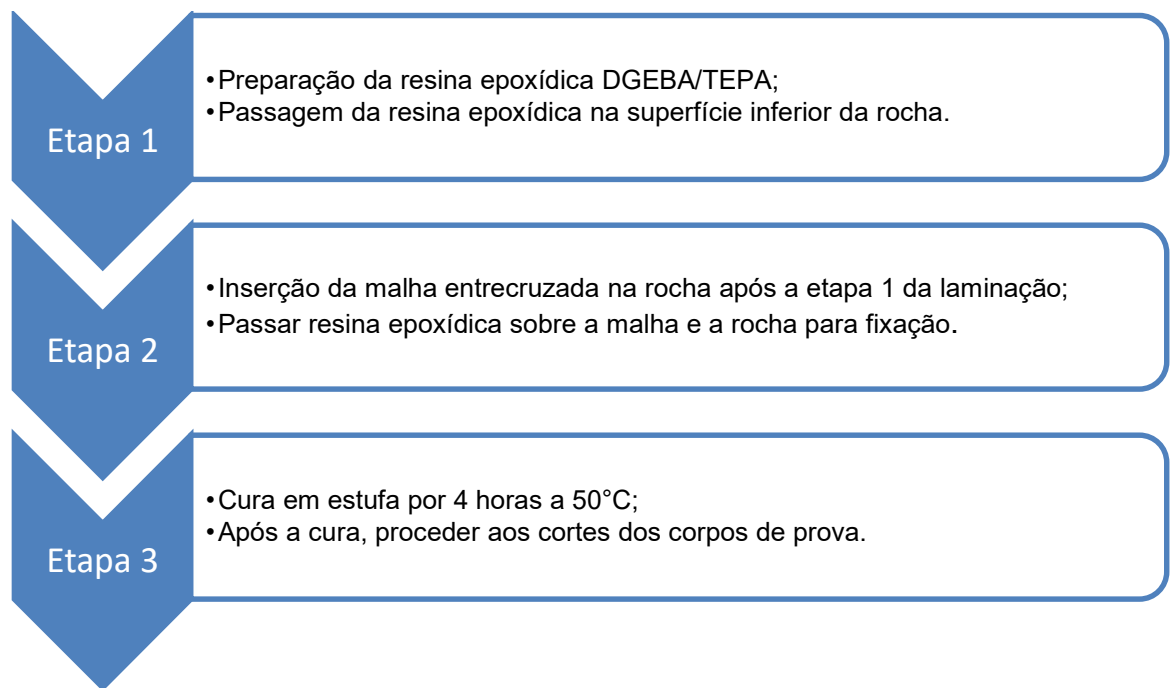


Figura 48- Fluxograma do processo de laminação

O processo de laminação ocorreu em etapas, pois foi necessária uma adesão satisfatória entre a rede entrecruzada da bananeira com a superfície inferior da rocha. Vale destacar que se utilizou uma quantidade apenas para cobrir a superfície com espessura de 2 mm, a fim de formar uma superfície que tenha boa adesão com a malha da bananeira. Foi utilizado um pequeno rolo sobre a superfície para eliminar pequenas bolhas que surgissem durante a laminação. A Figura 49(A; B) ilustra a rocha calcítica natural laminada com a malha de fibra de bananeira e fibra de vidro, respectivamente.

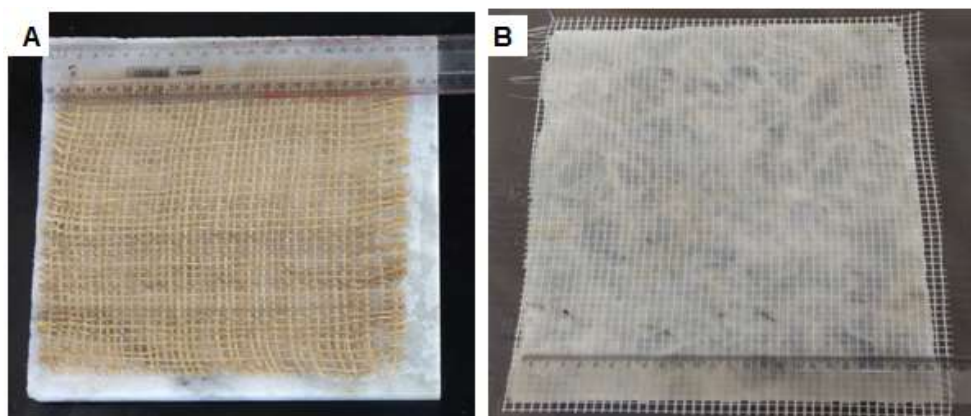


Figura 49 – (A) Rocha calcítica laminada com malha de fibra de bananeira; (B) Rocha calcítica laminada com fibra de vidro

3.6 Caracterização das Placas de Mármore Artificial e Natural Laminadas

Após a laminação das placas de mármore, as mesmas foram cortadas nas dimensões padrões das normas técnicas para cada ensaio. O corte foi feito com cautela e refrigerado em água para não ocorrer alterações no material com a ação da temperatura e também nas fibras da laminação.

Os corpos de prova laminados foram submetidos inicialmente ao teste de flexão em três pontos, buscando identificar se a ideia proposta do trabalho (reforço em rochas) realmente ocorreu. Em caso de resultado insatisfatório, ou seja, caso a laminação não proporcione melhorias mecânicas nas rochas, a ideia inicial é abortada, e em seguida é realizado um MEV para uma avaliação detalhada da laminação. Já em situação de resultado satisfatório, ou seja, caso a laminação proporcionasse melhorias mecânicas, outros testes (impacto de corpo duro, TG e MEV) seriam realizados para comprovação da possível utilização da malha entrecruzada da bananeira na laminação de rochas ornamentais.

Para o mármore calcítico natural laminado com malha de fibra de bananeira e também laminado com malha de fibra de vidro, foram realizados testes de flexão em três pontos, e impacto de corpo duro para verificar as propriedades mecânicas após a laminação. Outros testes, como o de termogravimetria também foram realizados para análise do comportamento do material mediante temperatura. Já a nível microscópico, imagens foram analisadas pelo microscópio eletrônico de varredura com a função de analisar a adesão da fibra no material e analisar o rompimento da mesma.

Para o mármore artificial comercial e o produzido por Silva (2016), esperava-se realizar os mesmos testes realizados no mármore natural laminado. No entanto, como as rochas artificiais laminadas não apresentaram melhorias mecânicas no teste de flexão em três pontos, não foram realizados os demais testes. Isto porque a hipótese inicial de reforço em materiais artificiais não foi concretizada com a laminação em virtude das já avançadas características mecânicas que as rochas artificiais possuem, e assim dispensarem a necessidade de um reforço em sua base inferior.

3.6.1 Determinação da direção de utilização da malha entrecruzada da fibra de bananeira para utilização como reforço mecânico

Tanto a malha de fibra de vidro quanto a da fibra de bananeira possui um entrelace de dois tipos de fibra: fios duplos com torção que atuam perpendicular a um fio de maior espessura para garantir o entrelaçamento e união dos fios que compõem a rede. Como não foi encontrada na literatura uma recomendação de orientação de utilização da fibra, as mesmas foram ensaiadas nas duas direções possíveis: fios com dupla torção paralela a fratura; e fios com dupla torção perpendicular a fratura. Isto foi feito para verificar a posição ideal que proporcione melhor resistência mecânica a rocha ornamental.

A determinação do sentido de uso da rede entrelaçada da fibra de bananeira foi através do ensaio de flexão em três pontos no qual a rede de fibra de vidro e fibra de bananeira foi laminada em ambos os sentidos: com a dupla torção paralela a fratura e com a dupla torção perpendicular a fratura.

O ensaio de resistência à flexão com o sentido de laminação já determinado foi realizado em máquina universal de ensaios EMIC modelo DL10000. Foram ensaiados 7 corpos de prova para cada sentido de direção da laminação.

3.6.2 Resistência à flexão

O ensaio de resistência à flexão foi realizado em máquina universal de ensaios EMIC modelo DL10000.

O procedimento foi o mesmo utilizado para os mármore não laminados, conforme descrito no item 3.3.9.

Para determinar qual seria o sentido que proporcionaria maior resistência a rocha, no teste de resistência à flexão, as rochas laminadas tanto com fibra de bananeira quanto com fibra de vidro (Figura 50) foram ensaiadas.

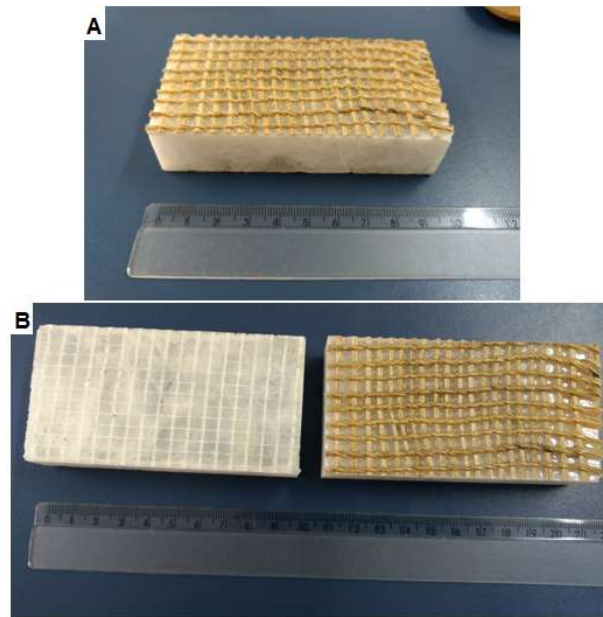


Figura 50- (A) Rocha natural calcária laminada com malha de bananeira; (B) rocha calcária com laminação de fibra de vidro (esquerda) e rocha calcária laminada com fibra de bananeira (direita)

3.6.3 Impacto de corpo duro

O teste de impacto ao corpo duro foi realizado no Centro de Tecnologia Mineral- CETEM em Cachoeiro de Itapemirim (ES). O ensaio seguiu orientações da norma brasileira NBR 15845/2010-Anexo H. Foram utilizados 3 corpos de prova (Figura 51) para cada laminação com dimensões de (10 x 200 x 200) mm.



Figura 51- Rocha calcária natural laminada com fibra de bananeira (imagem superior) e com fibra de vidro (imagem inferior)

3.6.4 Análise Termogravimétrica- TGA

O teste de análise termogravimétrica foi realizado no equipamento TGA-Q5000 TA Instruments.

O procedimento foi o mesmo utilizado para os mármore não laminados, conforme descrito no item 3.3.5.

3.6.5 Microestrutura

O ensaio de Microscopia eletrônica de varredura foi realizado no equipamento Super Scan SSX-550 da SHIMADZU para analisar o rompimento da rocha e fibra nos ensaios mecânicos. Buscou-se avaliar se houve boa aderência da malha na rocha e se a mesma foi eficiente e proporcionou melhoras mecânicas na laminação.

O procedimento foi o mesmo utilizado para a análise da fibra de bananeira, conforme descrito no item 3.3.12.

3.7 Produção da Rocha Artificial

A rocha artificial produzida seguiu os mesmos parâmetros feitos por Silva (2016), no entanto o maquinário utilizado foi modernizado e com isso foi obtida melhorias no equipamento. Vale destacar que o maquinário utilizado foi produzido exclusivamente para fins de pesquisa. Na Figura 52, é representado o maquinário, no qual a seta indicativa com a letra A representa a bomba de vácuo, a letra B representa o misturador a vácuo e a letra C indica o molde com a prensa de até 30 toneladas.

Para a produção da rocha, foi utilizado o mesmo resíduo calcítico obtido da empresa Polita em Cachoeiro de Itapemirim e como ligante, foi utilizado a resina epoxídica DGEBA/TEPA. Foi registrado uma pressão de vácuo de 600mmHg no misturador durante a produção, e em seguida a massa da rocha foi prensada com uma força de 12 ton, no qual ficou submetida a uma temperatura de 90° por 30 minutos.

A placa teve 80% (0,768 kg) em peso de carga do mármore “calcita” e 20% (0,192 kg) em peso do sistema epoxídico DGEBA/TEPA para os corpos de prova produzidos com a metodologia de vibro compressão a vácuo.

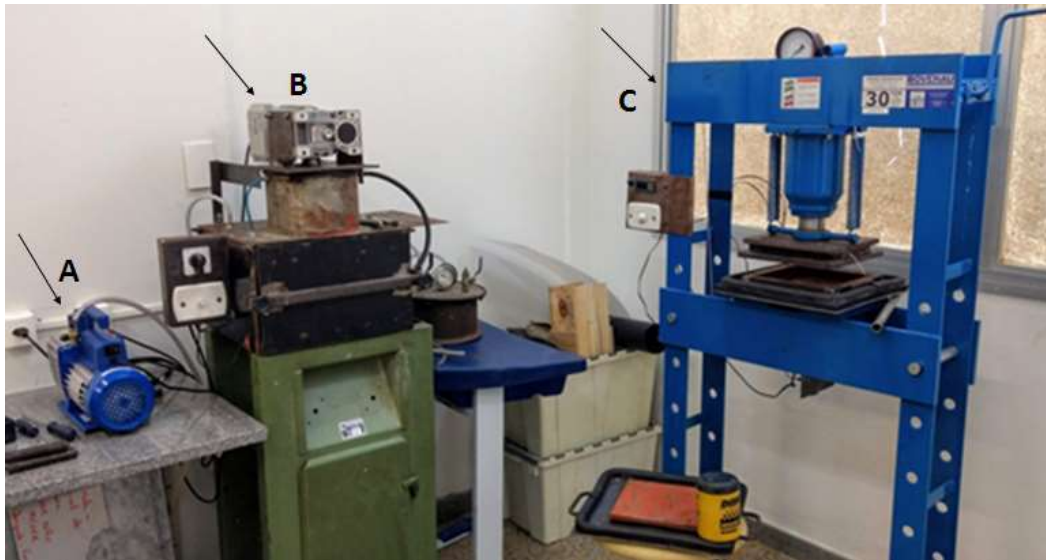


Figura 52- Misturador a vácuo com temperatura regulável para rochas artificiais

As rochas artificiais produzidas foram laminadas com malha de fibra de vidro e com malha entrecruzada da fibra de bananeira. Para comparação, no momento de prensar a rocha artificial, também foi inserido tanto a malha de fibra de bananeira quanto a malha de fibra de vidro, colocando ambas as malhas com uma força de 12 ton e tornando as mesmas como parte integrada da rocha visando analisar se as mesmas reforçaram mecanicamente tais rochas artificiais.

A Figura 53 representa a rocha artificial, no qual a direita da foto tem a rocha com malha entrecruzada da fibra de bananeira prensada no momento da produção da mesma, tendo a cura da rocha já com a mesma inserida na rocha. E a esquerda da rocha, temos a rocha artificial laminada com fibra entrecruzada da malha da bananeira, no qual foi utilizada a resina epoxídica para unir a superfície inferior da rocha à malha da bananeira.

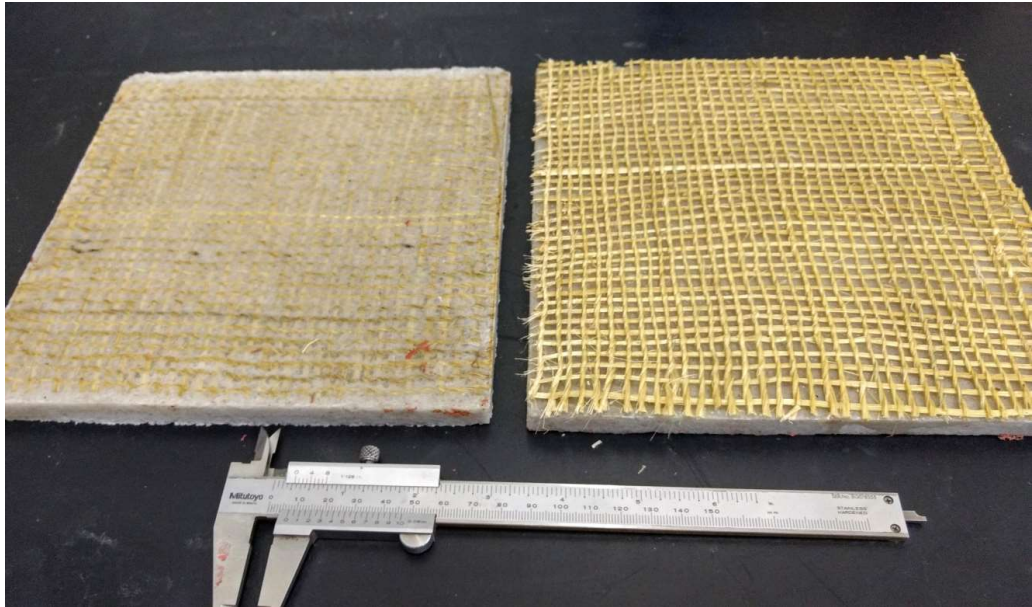


Figura 53- Rocha artificial produzida com malha de fibra bananeira prensada na produção (à esquerda); Rocha artificial produzida laminada com malha de fibra de bananeira (à direita).

A Figura 54 representa a rocha artificial com a fibra de vidro. A direita, temos a fibra de vidro inserida na rocha no momento em que a mesma foi prensada. Já a esquerda, temos a rocha artificial laminada com a malha de fibra de vidro na parte inferior da mesma.

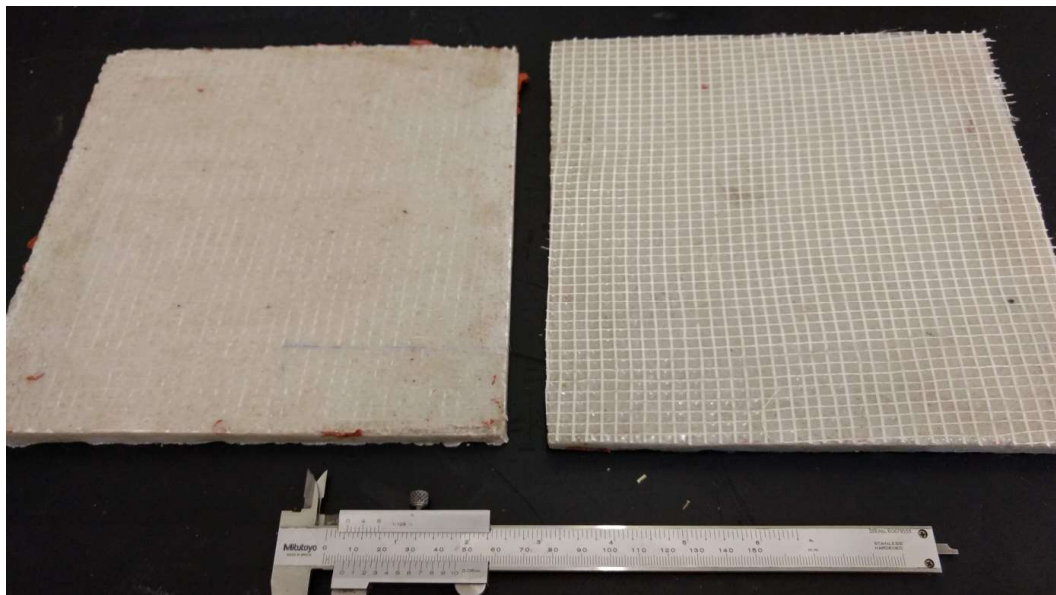


Figura 54- Rocha artificial produzida com malha de fibra de vidro prensada na produção (à esquerda); Rocha artificial produzida laminada com malha de fibra de vidro (à direita).

CAPÍTULO 4: RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização das Matérias-primas

4.1.1 Distribuição diametral

Foram detectadas algumas partes esmagadas nas extremidades das fibras de bananeira que, provavelmente, foram ocasionadas por ação mecânica proveniente do processo de extração manual das fibras de bananeira. Na Figura 55 é possível ver a ampliação de uma medição de diâmetro da fibra de bananeira.

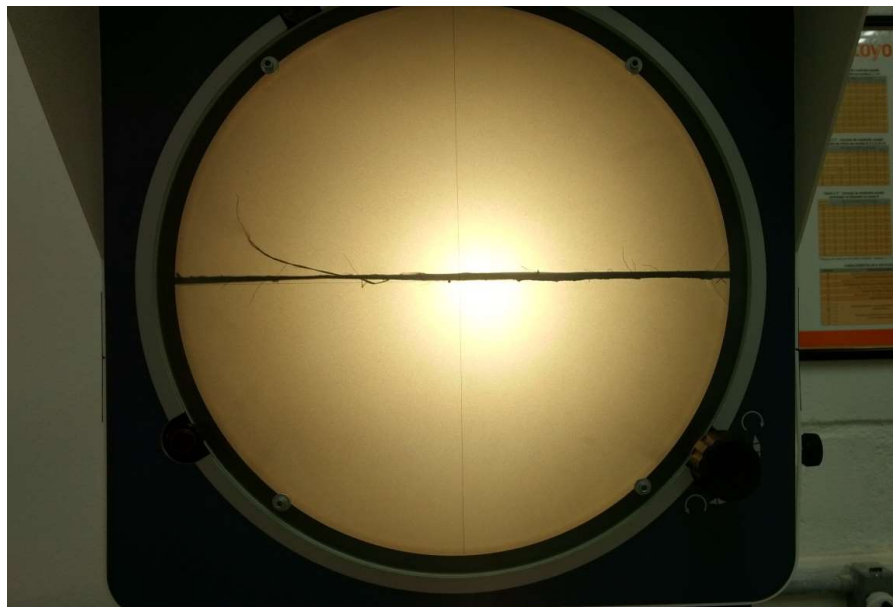


Figura 55- Ampliação de medição do diâmetro de fibra de bananeira

Em seguida, com base nas medidas de diâmetro encontradas da amostra de 50 fibras, uma análise estatística foi realizada com elaboração de histograma de distribuição diametral (Figura 56 (A)).

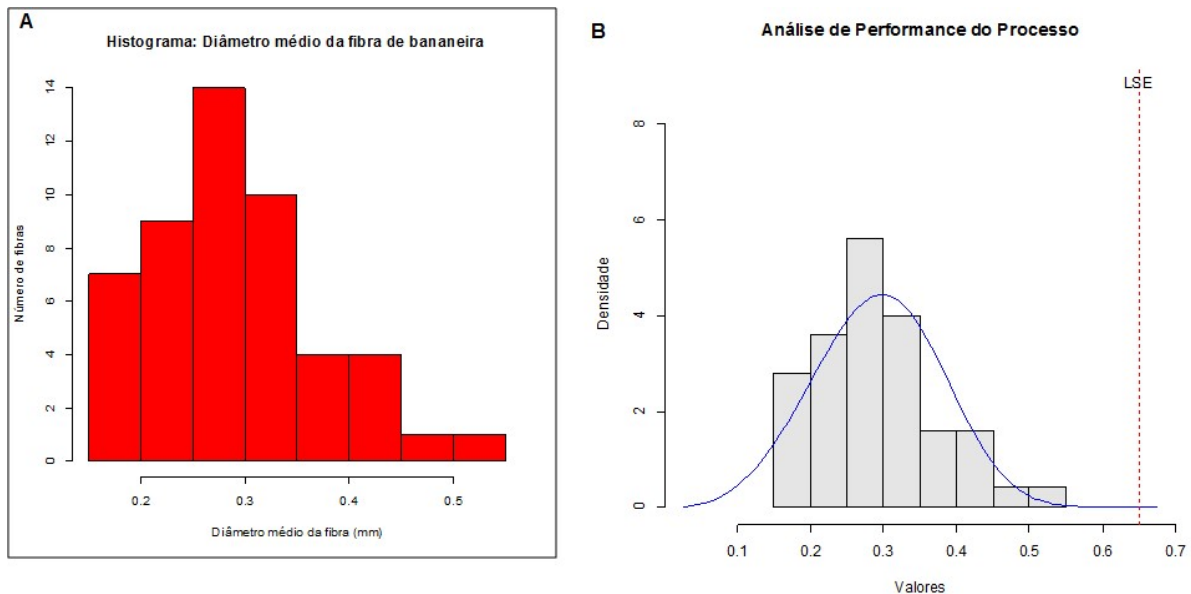


Figura 56- (A) Histograma do diâmetro médio da fibra de bananeira; (B) Índice de performance do diâmetro da fibra de bananeira

Com base no histograma (Figura 56 (A)) foi possível perceber que os valores de diâmetro da fibra de bananeira sofreram algumas excentricidades em função da origem natural e também em virtude do modo manual e mecânica de obtenção da fibra. Em muitas partes foi possível identificar esmagamentos que ocorreram provavelmente na hora de extração da polpa que fica em torno da fibra.

A Figura 56(B) mostra a distribuição estatística, no qual é possível identificar a curva com seu ponto médio de diâmetro do conjunto de amostras. A média registrada do diâmetro para as fibras da bananeira foi de $0,293 \pm 0,091$ mm (293 ± 91 μ m), valor dentro do esperado e de acordo com os valores encontrados na literatura. Outros pesquisadores, como: Kulkarni *et al.*, 1983; Chand *et al.*, 1988; Pothan e Thomas, 2003; Pothan *et al.*, 2004 e Venkateshwaran e Elayaperumal, 2011, encontraram valores de diâmetro entre 50 e 250 μ m.

4.1.2 Densidade e absorção de água da fibra de bananeira

A densidade da fibra de bananeira obtida (Tabela 9) foi de $0,22 \pm 0,01$ g/cm³.

Tabela 9- Valores de absorção de água e densidade para a fibra de bananeira

Corpos de prova	Densidade (g/cm ³)	Absorção de água (%)
1	0,219	384,78
2	0,219	345,65
3	0,225	333,33
4	0,226	344,19
5	0,242	328,26
Média	0,22 ± 0,01	344,18 ± 22,22

Tal valor obtido está dentro do esperado e dentro da faixa de resultados que normalmente é encontrada na literatura, pois Guimarães (2012) apresenta uma densidade básica de 0,100 g/cm³ para a fibra de bananeira *in natura* e de 0,103 g/cm³ para a fibra que ficou de molho em água por 24 horas. Nota-se que Guimarães (2012) identificou que a imersão fibra em água por 24 horas, tornou a fibra mais densa do que a fibra que não foi submetida a nenhum tipo de molho.

Guimarães (2012) apresentou ainda, em sua revisão, uma absorção de água máxima de 407% para uma fibra de bananeira com densidade igual à estudada pelo mesmo autor.

Nesta pesquisa, foi encontrado um valor de absorção de água de 344,18±22,22%. As pesquisas apontam que um dos grandes entraves na produção de compósitos com fibras naturais está na absorção de água das fibras, sendo o molho das fibras em água uma das alternativas para a redução da absorção de água, ou seja, quanto maior o número de dias de molho, mais densa e menos porosa a fibra se torna. Corroborando esta teoria, Ribeiro *et al.*, 2017 em suas pesquisas fez teste com duas amostras de fibras, deixando a primeira com um molho de uma semana e a segunda amostra com o molho por duas semanas. Para a fibra de bananeira que passou pelo molho em água por uma semana, foi encontrado uma densidade de 0,22 g/cm³ e já para a absorção de água, um valor de 334,88%. Já para a fibra que teve o molho em água por duas semanas, foi obtida a densidade de 0,24 g/cm³ e para absorção, o valor de 302,17%. Tal resultado encontrado por Ribeiro *et al.*, 2017 mostra que o processo de molho em água

realmente foi eficaz para aumentar a densidade da fibra e também para reduzir a absorção de água da mesma. Os resultados obtidos neste trabalho estão de acordo com os resultados de densidade encontrados na literatura, tais como os valores mostrados na Tabela 7 para a fibra de bananeira nesta pesquisa (ver Capítulo 2).

4.1.3 Composição química da fibra do pseudocaule de bananeira

As fibras naturais são materiais lignocelulósicos compostos predominantemente por lignina, holocelulose (hemicelulose e celulose), extrativos e cinzas. Sabe-se que a composição pode variar em função das condições climáticas, da região de plantio e de acordo com a modalidade da espécie (JAYAPRABHA *et al.*, 2011). Para a fibra do pseudocaule de bananeira da modalidade prata, extraída da região de Cachoeiro de Itapemirim, foi obtida a composição detalhada na Tabela 10.

Tabela 10- Composição química da fibra do pseudocaule da fibra de bananeira

Caracterização	(%)	Referência
Holocelulose	77,31 ± 3,86	TAPPI T257 ^{om-85}
Hemicelulose	27,80 ± 4,94	Holocelulose- (α- celulose)
α- celulose	49,51 ± 2,25	
Lignina - Klason	27,77 ± 4,31	TAPPI T222 ^{om-02}
Extrativos -H ₂ O	14,29 ± 3,41	TAPPI T212 ^{om-98}
Cinzas	3,88 ± 1,62	TAPPI T211 ^{om-93}

A Figura 57 mostra durante na determinação da composição química, imagens de (A) fibra bruta, (B) fibra branqueada para extração de lignina e a (C) lignina extraída da fibra.



Figura 57. (A) Fibra bruta; (B) fibra branqueada; e (C) lignina extraída da fibra

Os resultados retratam que a maior composição é formada pela holocelulose, que é composta pela hemicelulose e α -celulose, representando a maior parte da composição da fibra. Por meio do processo de deslignificação, que retrata a remoção da lignina, obtem-se a holocelulose (KLOCK *et al.*, 2005). A lignina foi extraída pelo método Klason. Os valores obtidos de composição química estão dentro da variação esperada e dentro da média obtida por outros autores.

A celulose que pode apresentar valores entre 40 e 90% em massa da fibra, representa o elemento responsável pela resistência das fibras em virtude do alto grau de polimerização e também da orientação molecular. Já a lignina (1-35% em massa), destaca-se por ser uma estrutura molecular mais rígida e entrelaçada por apresentar anéis aromáticos em sua composição (ANTAL, 1983; REGIANI, 2000; FOWLER *et al.* 2006). Tais anéis proporcionam à estrutura uma baixa mobilidade

estrutural, além de uma alta estabilidade térmica e consideráveis propriedades mecânicas (TITA *et al.*, 2002).

Vale destacar que a ocorrência de água na estrutura da fibra proporciona uma mobilidade à estrutura, já que a mesma atua como um plastificante na estrutura do polímero natural (CARRIJO *et al.*, 2002; BARROS *et al.*, 2006).

Diversos autores encontraram valores variados em relação a composição da bananeira. Para as fibras *in natura*, Bledzk e Gassan (1999) encontraram valores entre 60-65% de celulose, já para a hemicelulose, foi encontrado valores entre 6-8% e para a lignina, valores entre 5-10%. Os pesquisadores Venkateshwaran e Elayaperumal (2010) obtiveram valores de 43,46% de celulose, 38,54% de hemicelulose e 9% de lignina. Foi registrado por Bilba *et al.* (2007) e Abdul Khalil *et al.* (2006), teores de α -celulose variando de 31,3-63,9%, respectivamente. Com relação a hemicelulose, uma variação grande também foi observada, no qual o menor valor registrado foi de 0,8% (GUIMARÃES *et al.*, 2009) e o maior valor foi o de 33,6% (LI *et al.*, 2010). Seguindo a mesma tendência de grande variação, valores de lignina variados foram observados, obtendo médias de 11,2% (ROMERO-ANAYA *et al.*, 2011) para 18,6% (ABDUL KHALIL *et al.*, 2006) e de cinzas de 1,2% (SATYANARAYANA *et al.*, 2007) para 10,7% (JAYAPRABHA *et al.*, 2011). Já com relação aos extrativos, foram obtidos valores variando de de 3,05% a 10,6% por Li *et al.*, (2010) e Abdul Khalil *et al.* (2006), respectivamente.

4.1.4 Análise de infravermelho na fibra do pseudocaule de bananeira (FTIR)

A Figura 58 demonstra o padrão do espectro de infravermelho obtido da amostra de fibra *in natura* do pseudocaule de bananeira e as designações obtidas são mostradas na Tabela 11, com base em Rosa *et al.* (2010), Guimarães *et al.* (2009), Bilba *et al.* (2007), Gañán *et al.* (2004), Socrates (2004).

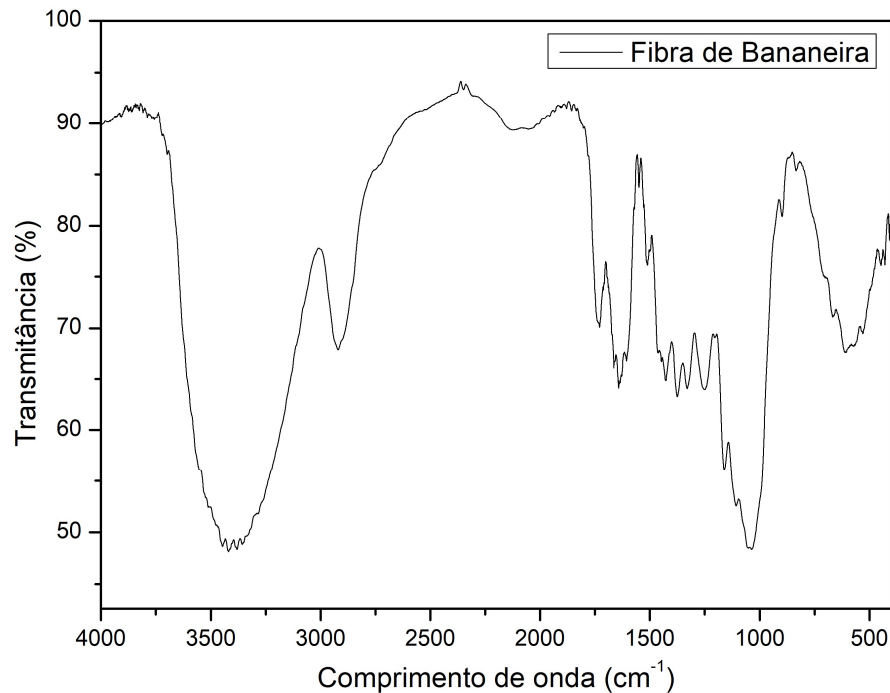


Figura 58- Teste de infravermelho da fibra do pseudocaule de bananeira

O espectro obtido é típico de materiais lignocelulósicos. A banda forte e larga em aproximadamente 3400 cm^{-1} é derivado da vibração do grupo hidroxílico (OH). Já a banda de absorção de 2920 cm^{-1} pode ser derivado do estiramento C-H dos grupos metilo e metileno. E no intervalo de 1726 e 1635 cm^{-1} , as bandas podem ser em virtude da vibração de alongamento de C=O grupos não conjugados, em função da hemicelulose e a conjugado carbonila que destaca-se na lignina. A banda de absorção de 1254 cm^{-1} pode ser atribuída também a ligação C-O do alongamento de grupos acetil da hemicelulose (MERLINI *et al.*, 2011). Na banda de 1515 cm^{-1} é devido a vibração da ligação C=C (vibração do anel aromático) em função da lignina.

Tabela 11- Atribuição das ondas dos espectros do pseudocaule da bananeira

Comprimento de onda (cm ⁻¹)	Atribuição*	Origem
3400 (F)	O-H (estiramento)	Água, Celulose, Hemicelulose, Lignina
2920 (f)	C-H (estiramento)	Celulose, Hemicelulose, Lignina
1726 (p)	C=O (estiramento)	Ácido carboxílico alifático e cetonas
1635 (F)	O-H (dobramento)/ C=C (estiramento) e ArC=O (estiramento)	Água/Lignina
1515 (mf)	C=C (vibração no esqueleto do anel aromático)	Lignina
1424 (mF)	CH ₂ (deformação)	Celulose, Hemicelulose, Lignina
1373 (mF)	CH ₃ (deformação) /OH (deformação)	Ar-OCH ₃ na Lignina/ Celulose, Hemicelulose, Lignina
1324 (mF)	O-H (deformação no plano)	Celulose
1254 (f)	C-O (estiramento) /C=C (estiramento)	Celulose, Hemicelulose/Lignina
1156 (p)	C-O-C (estiramento assimétrico)	Celulose, Hemicelulose, Lignina
1106 (p)	ArC-H (deformação)	Lignina
1056 (F)	estiramento da ligação C-O	Celulose, Hemicelulose, Lignina
1042 (F)	COH e C-O-C (estiramento simétrico)	
894 (mf)	C-H (deformação)/ Vibrações de compostos inorgânicos	Celulose, Hemicelulose/ Compostos inorgânicos
774 (mf)	ArC-H (deformação fora do plano)	Lignina

* Referências: Rosa *et al.* (2010); Guimarães *et al.* (2009); Bilba *et al.* (2007); Gañán *et al.* (2004); Socrates (2004). Intensidade da banda: F = forte; mF = médio forte; f = fraco; mf = muito fraco; p = pontiagudo.

4.1.5 Análise termogravimétrica

Os resultados da degradação térmica da fibra de bananeira *in natura* são ilustrados na Figura 59. Com uma análise do gráfico, podem-se observar os eventos térmicos associados às perdas de massa, que são retratadas pelas inflexões das curvas de TGA.

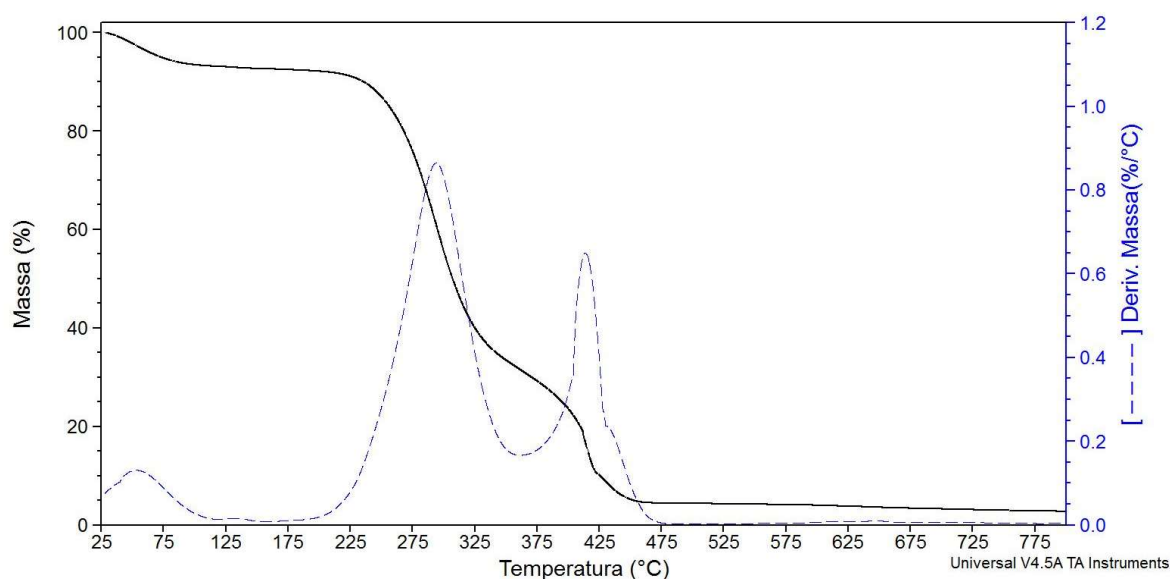


Figura 59- Análise termogravimétrica na fibra de bananeira *in natura*

A primeira perda de massa para a fibra *in natura* ocorreu entre 70 e 100°C e trata-se da perda da umidade (reação de desidratação) e de extrativos das fibras. Neste intervalo houve uma perda de massa de aproximadamente 10%. Embora as fibras tenham sido secas antes das análises, a remoção total da umidade da fibra é dificultada pelo carácter hidrofílico que a mesma apresenta (PAIVA, 2000). Na curva de TGA notam-se três eventos de perda de massa de sua composição celular. A degradação das fibras de bananeira iniciou-se em 240°C, com perda de massa em torno de 50%. Vale destacar que neste intervalo entre 240 a 330°C, ocorre a despolimerização da hemicelulose e também da quebra das ligações glicólicas da celulose. Identificou-se que houve um destaque maior no gráfico da degradação da hemicelulose e celulose em função da característica intrínseca de tal fibra apresentar um alto valor de celulose e hemicelulose em sua composição, conforme Tabela 8 (Capítulo 2). Segundo Yang *et al.* (2007), a hemicelulose caracteriza-se por decompor-se facilmente, registrando perda de massa na faixa de temperatura entre 220- 315°C. Já a pirólise da celulose é identificada em uma faixa maior de temperatura, entre 315-400°C. O terceiro estágio, entre 315 e 420°C é correspondente à decomposição da celulose e também dos subprodutos obtidos no segundo estágio. Em torno de 450°C ocorre a perda de massa quase em sua totalidade, restando aproximadamente 4,7% de massa residual. Entre os três

principais componentes formadores da fibra, a lignina destaca-se como o mais difícil de decompor, no qual degrada-se lentamente até a faixa de 900°C.

Nas fibras cobertas com resina epoxídica DGEBA com endurecedor TEPA, a degradação também foi observada, no entanto, obteve-se uma maior estabilidade térmica já que a curva foi deslocada para direita e os picos de início de degradação iniciaram-se tardiamente se comparada com a fibra *in natura*, ou seja, houve um pequeno deslocamento da curva para temperatura superiores em função da resina ter realizado uma proteção nas fibras naturais. Tal comportamento pode ser verificado e confirmado na curva de derivação da perda da massa, ilustrado na Figura 60.

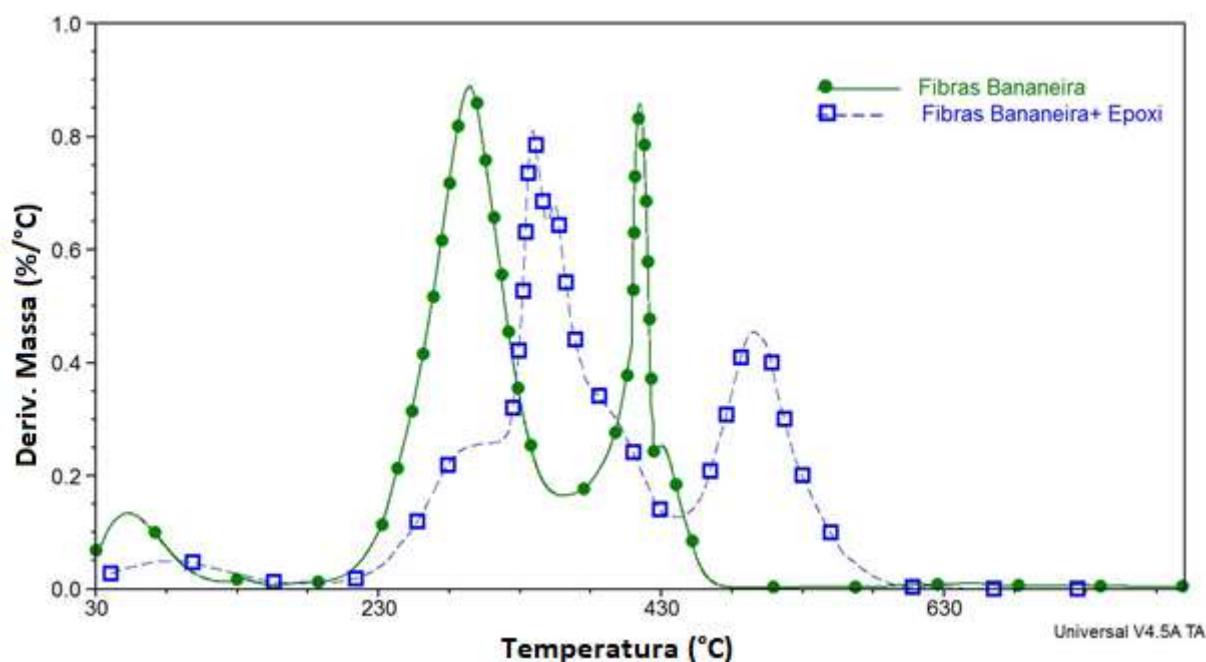


Figura 60- Derivada de massa da fibra de bananeira *in natura* e da fibra de bananeira laminada com resina epoxídica

Observa-se na derivada da fibra de bananeira laminada com resina epoxídica, uma alteração na curva em 250 °C que ocorreu, provavelmente, em função de uma falha no processo de cura da resina epoxídica. E como a resina atuou como uma proteção para as fibras, o processo de degradação das fibras iniciou-se em temperatura próxima a 280°C, conferindo maior estabilidade térmica a fibra de bananeira. A Figura 61 já ilustra a análise termogravimétrica para a fibra de

bananeira *in natura*, fibra de bananeira laminada com resina epoxídica, fibra de vidro e fibra de vidro laminada com resina epoxídica.

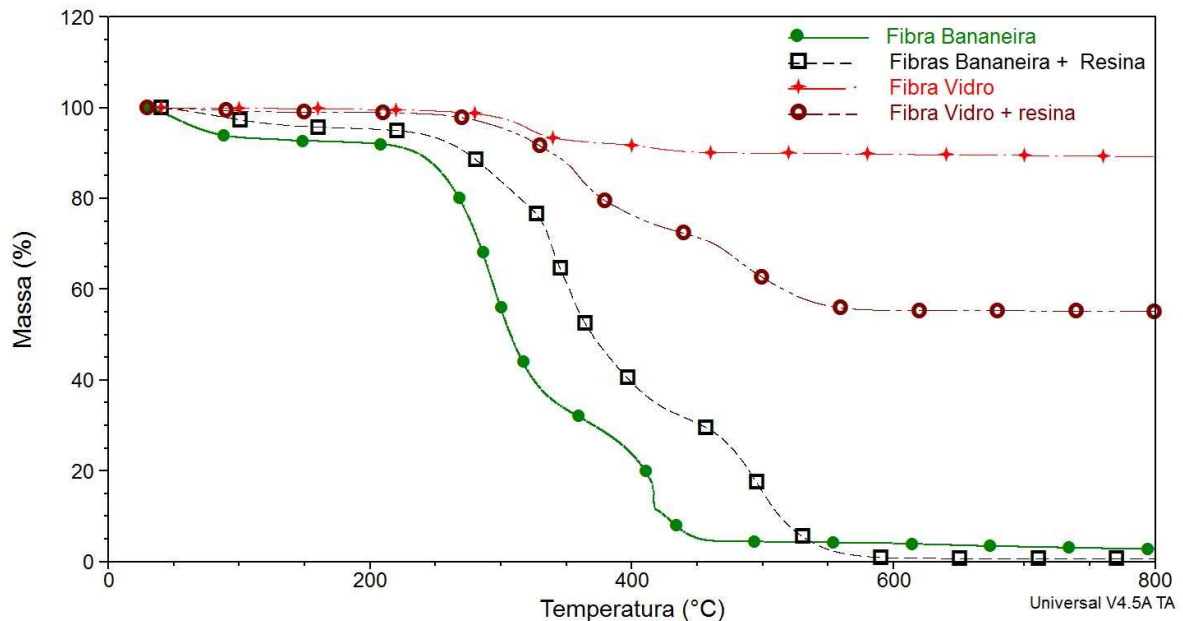


Figura 61- Análise termogravimétrica da fibra de bananeira e da fibra de vidro (ambas *in naturas* e impregnadas com resina epoxídica)

Identifica-se a maior estabilidade térmica que a resina proporciona aos fios de fibra de bananeira, deslocando o início da decomposição para temperaturas superiores. E já na fibra de vidro pura, é registrada uma perda de massa de aproximadamente 10% em torno de 350 °C em função de elementos formadores de ligação (resina industrial) que atuam unindo a rede de fios e a mesma massa permanece até os 800 °C, temperatura final do ensaio, mostrando que não houve decomposição do material. Já a perda de massa registrada para a fibra de vidro impregnada com resina epoxídica (DGEBA/TEPA) deve-se a decomposição da resina epoxídica a partir de 350°C, gerando perdas de aproximadamente 40% do peso total inicial para esta fibra de vidro laminada. A fibra de vidro não sofreu decomposição até a temperatura final do ensaio (800°C).

4.1.6 Resistência à tração das fibras de bananeira

Os ensaios de tração para as fibras de bananeira foram realizados na Máquina EMIC DL 10000 e foi registrado no teste um valor de $583,46 \pm 302,26$ MPa

de resistência à tração. O desvio padrão neste resultado foi significativo, já que foi registrado um coeficiente de variação de 51,80% que se justifica em função das fibras serem naturais e algumas imperfeições podem ocorrer ao longo do comprimento da fibra, além da medida diâmetro ter uma variada dispersão. A literatura registra para os valores de resistência à tração entre 281 e 1300 MPa, mostrando que outros autores também encontram uma variação considerável em seus resultados (KULKARNI *et al.*, 1983; CHAND *et al.*, 1988; BEAUDOIN *et al.*, 1990; ZHU *et al.*, 1994; POTHAN e THOMAS, 2003; POTHAN *et al.*, 2004; IDÍCULA, 2005; IDÍCULA *et al.*, 2009; SILVA, 2011; VENKATESHWARAN e ELAYPERUMAL, 2011; CARVALHO, 2015). O histograma ilustrado na Figura 62(A) é possível ver a grande dispersão dos resultados encontrados.

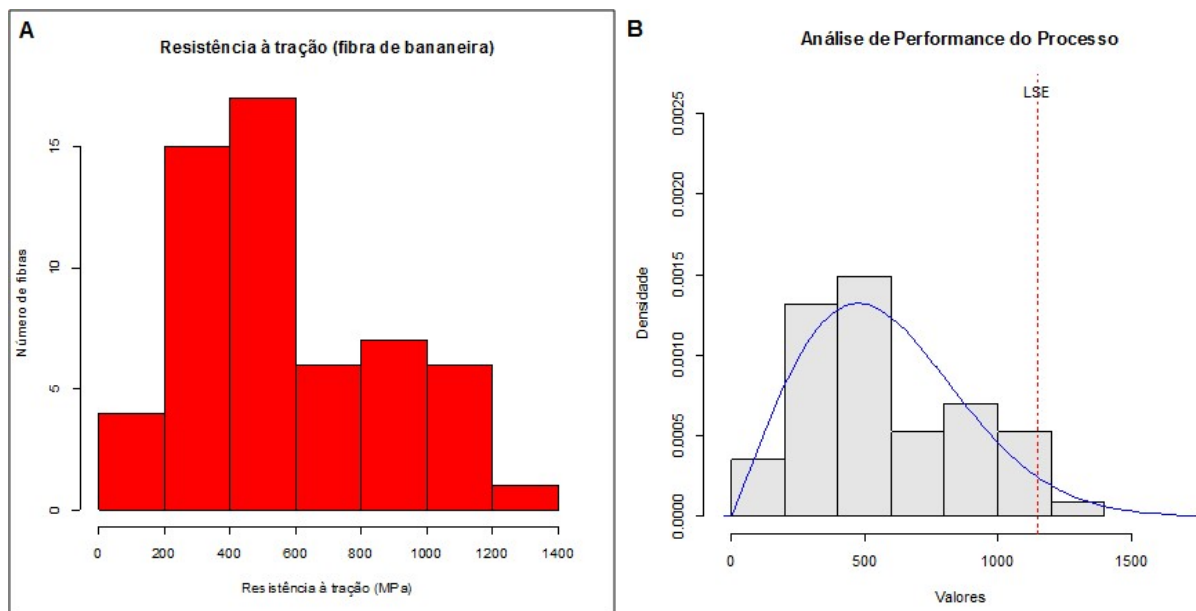


Figura 62- (A) Histograma de resistência à tração das fibras de bananeira; (B) Índice de performance (distribuição) da resistência à tração das fibras de bananeira

Para o módulo elástico, foi registrado um valor de $21,05 \pm 12,43$ GPa, um valor com um coeficiente de variação considerável, de 59,15%. Tal valor também se justifica em virtude das avarias que podem existir ao longo do comprimento da fibra. Esta é uma consequência das características intrínsecas não-uniformes de qualquer fibra lignocelulósica (SATYANARAYANA *et al.*, 2007). O valor obtido está dentro da faixa encontrada na literatura que fica entre 13 e 32 MPa (KULKARNI *et al.*, 1983; CHAND *et al.*, 1988; BEAUDOIN *et al.*, 1990; ZHU *et al.*, 1994; POTHAN e

As fibras com menores espessuras apresentam esta característica de terem maior resistência a tração em função de possuir menor área propensa a falha, isto é, há uma menor probabilidade de ocorrer falhas naturais na fibra, proporcionando melhores valores de resistência à tração. Quanto mais espesso, maior a probabilidade de ocorrer alguma imperfeição na fibra, fato que pode prejudicar seu desempenho mecânico. Monteiro (2009) ressalta que as fibras mais finas são compostas de um número menor de fibrilas, fato que proporciona um comportamento mecânico melhor. A Figura 64 mostra os valores de módulo elástico em função do diâmetro para a fibra de bananeira.

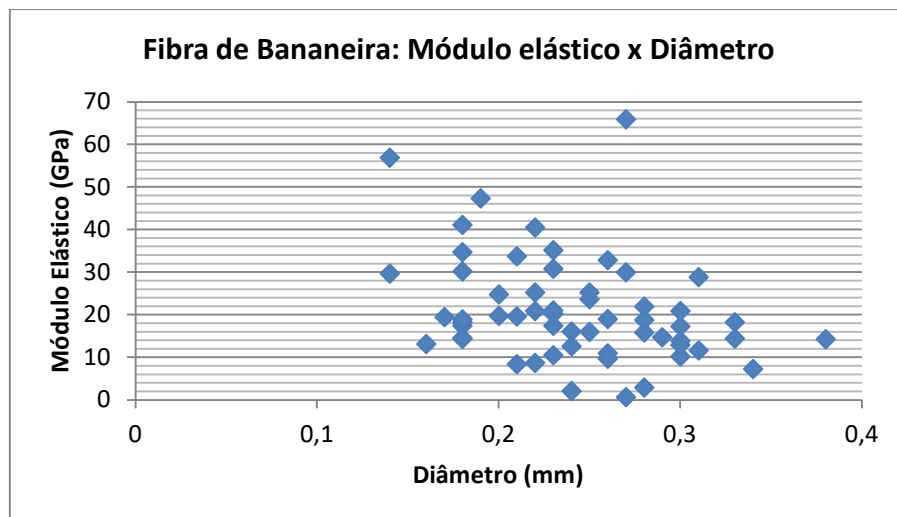


Figura 64- Fibra de bananeira: Módulo elástico x Diâmetro

Nas pesquisas de Mukhopadhyay *et al.* (2009), o mesmo percebeu que as fibras de bananeira com menores diâmetros registram maiores valores de tenacidade e comportamento mais regular quando utilizadas para aplicações em compósitos. Silva (2014) também percebeu comportamento semelhante em fibras de juta, ou seja, quanto maior o diâmetro, menor a resistência mecânica das fibras naturais utilizadas em sua pesquisa.

4.1.7 Resistência à tração da fibra de vidro

A malha de fibra de vidro é constituída de dois tipos de fibra de vidro de diferentes formatos. O fio mais fino apresenta-se em dupla com outro fio idêntico e

com diâmetro de 0,11 mm, já o fio que é transpassado pela dupla torção tem formato retangular e medidas de 1,2 x 0,13 mm. A modo de comparação e classificação, os dois formatos da fibra de vidro foram ensaiados nos testes de resistência à tração. A Figura 65 mostra a imagem de uma fibra de vidro fina projetada no projetor de perfil na qual é possível perceber o formato irregular de torção que há ao longo do comprimento da fibra fina ao transpassar a fibra de vidro retangular.

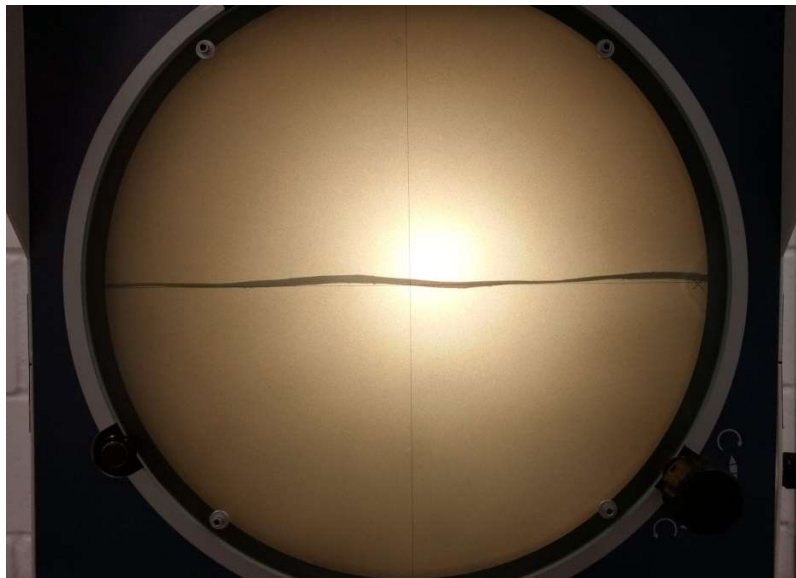


Figura 65- Projeção de perfil da fibra de vidro fina

A Fibra de vidro fina apresentou em seus resultados, a resistência à tração de $2641,21 \pm 308,48$ MPa. A variação dos resultados foi menor se comparado com a fibra de bananeira, já que a fibra de vidro é fabricado industrialmente e não há variações de diâmetro e avarias ao longo do comprimento. O coeficiente de variação foi de 11,68%.

O histograma estatístico da Figura 66 (A) mostra a relação do número de fibras com os valores obtidos de resistência à tração. A Figura 66 (B) ilustra o índice de performance da resistência a tração da fibra de vidro mais fina na distribuição . Em comparação com a fibra de bananeira, percebe-se que os resultados ficaram mais alinhados em relação a curva de distribuição devido a homogeneidade da fibra de vidro. Quanto mais homogênea as amostras, melhor os resultados obtidos em relação a dispersão de valores.

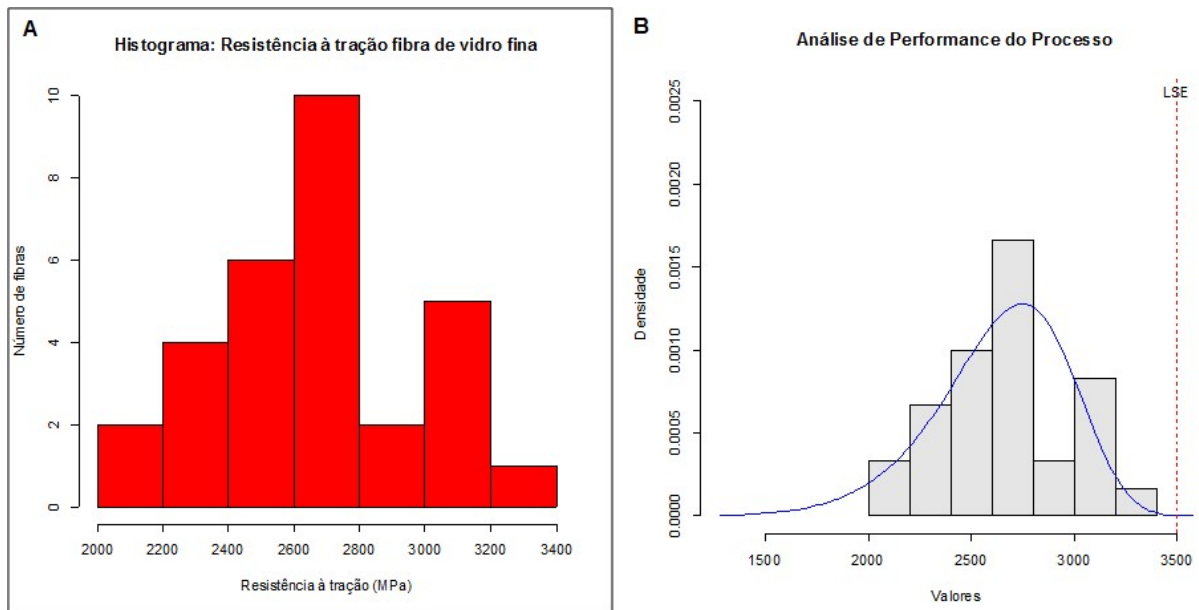


Figura 66- (A) Histograma de resistência à tração da fibra de vidro fina; (B) Índice de performance da resistência à tração da fibra de vidro fina (Distribuição)

O gráfico contido na Figura 67 (A) mostra para os 30 corpos de prova, o valor da resistência à tração versus o valor do módulo elástico. Identifica-se no gráfico que apesar da dispersão dos valores, os mesmos estão concentrados dentro do intervalo esperado para estes valores, já que o processo industrial de fabricação da fibra de vidro a torna mais homogênea em comparação com as fibras de bananeira (Figura 67 (B)) que são naturais e produzidas de modo manual e mecânico.

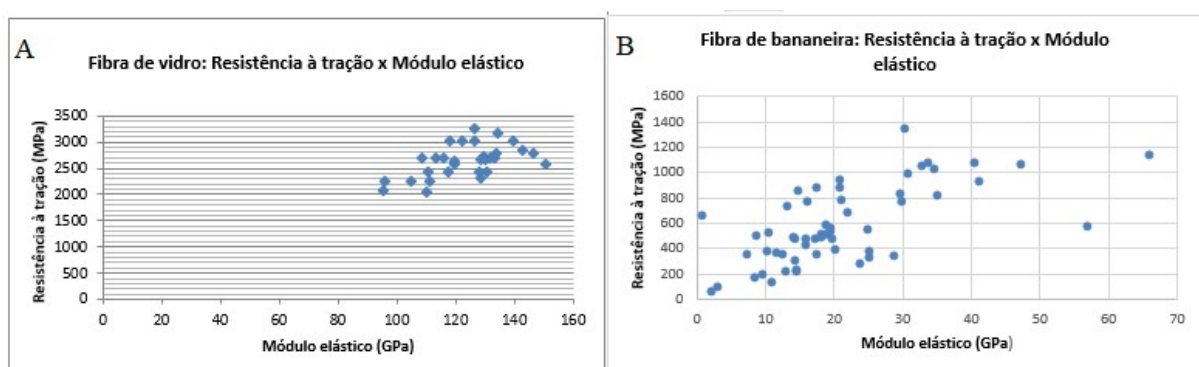


Figura 67- (A) Fibra de vidro: Resistência à tração x módulo elástico; (B) Fibra de bananeira: Resistência à tração x módulo elástico

A Figura 68 mostra um gráfico que comprova a homogeneidade dos resultados mecânicos da fibra de vidro. Houve pouca variação nos resultados de deformação no teste de resistência à tração. Para o conjunto de amostras no ensaio

de tração da fibra de vidro fina, foi obtido o valor de 0,03 mm/mm para a deformação.

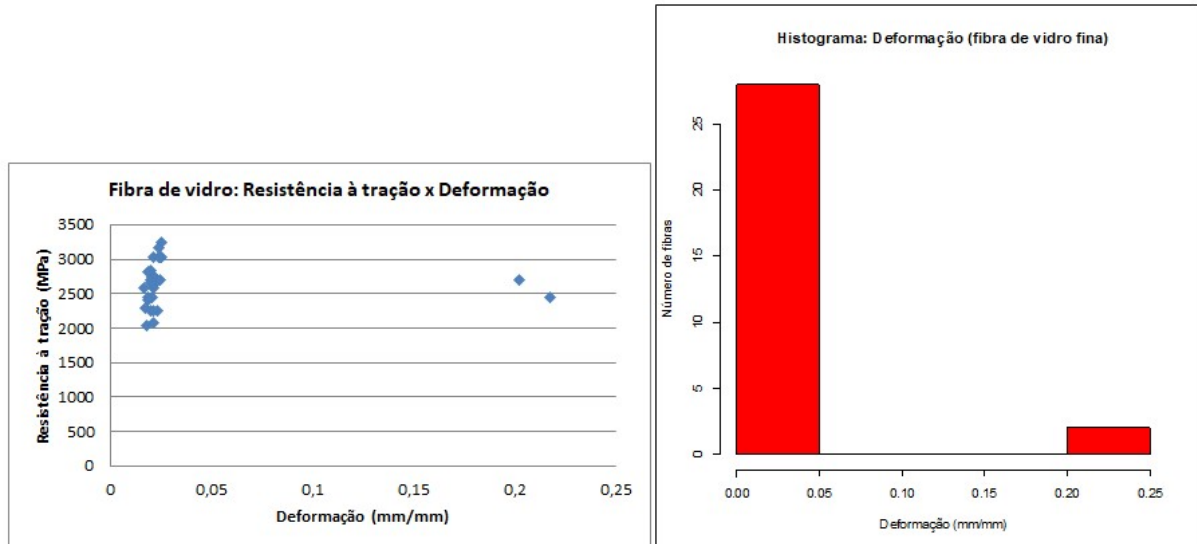


Figura 68- (A):Fibra de vidro: Resisência à tração x deformação; (B) Histograma: Deformação (fibra de vidro fina)

Com relação ao módulo elástico da fibra de vidro, foi encontrado o valor de $123,39 \pm 13,65$ GPa. O histograma contido na Figura 68(A) mostra que houve uma concentração maior dos resultados em torno da média central. O coeficiente de variação para este resutado foi de 11,06%. Na curva da Distribuição (Figura 68(B)) é possível notar que os resultados ficaram alinhados, dentro da média esperada para tais resultados, já que são fibras sintéticas e a padronização no método produtivo acarreta fibras homogêneas e com comportamento mecânico semelhantes. A Figura 69 mostra o histograma do módulo elástico da fibra de vidro fina e a curva de distribuição dos valores do módulo elástico.

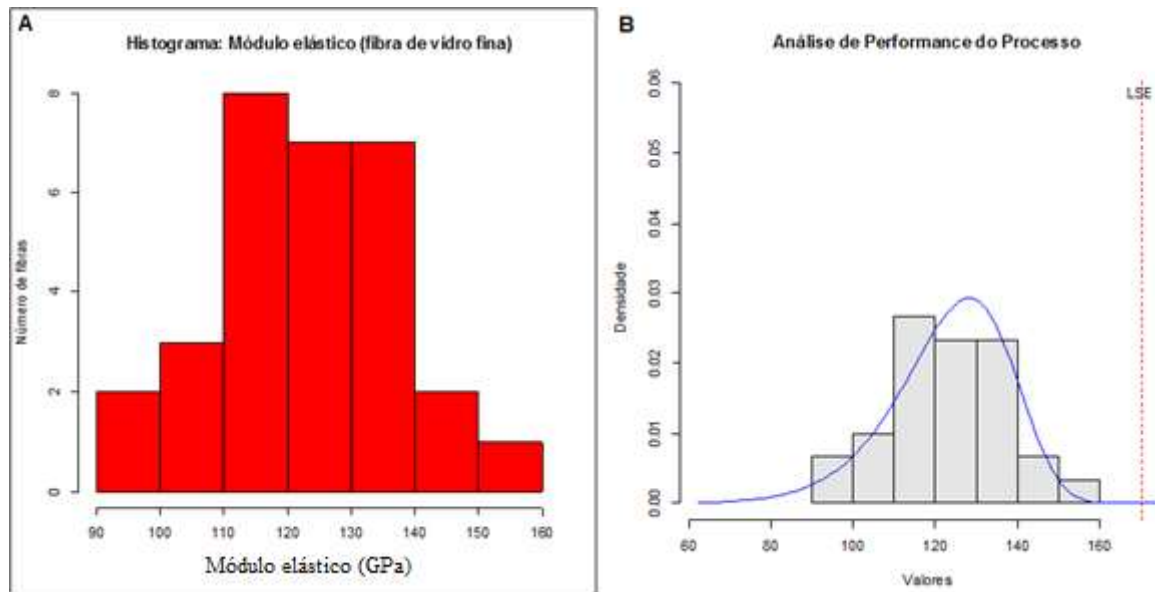


Figura 69- (A) Histograma de módulo elástico da fibra de vidro fina no teste de resistência à tração; (B) Índice de performance do módulo elástico da fibra de vidro fina no teste de resistência à tração

A fibra de vidro retangular que é utilizada perpendicularmente a fibra de vidro fina na malha, também foi analisada no teste de resistência à tração. A Figura 70 mostra a projeção de uma fibra de vidro retangular, nesta imagem é possível perceber que a espessura da fibra retangular é maior que a fibra de vidro fina que é utilizada duplicada e com dupla torção.

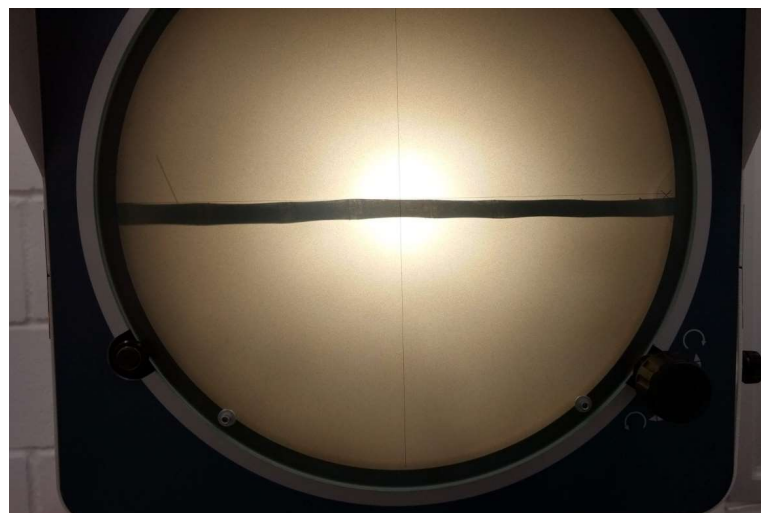


Figura 70- Projeção de perfil da fibra de vidro retangular

Assim, como na fibra natural de bananeira em que as fibras com menores diâmetro apresentaram maiores valores de resistência à tração, o mesmo aconteceu com a fibra de vidro. Apesar da fibra de vidro ter maior espessura, a

mesma demonstra menor resistência mecânica. Nos testes de resistência à tração, foi identificada a média de resistência de $478,23 \pm 37,12$ MPa. Em função da uniformidade da fibra, a mesma segue o mesmo padrão de confecção da fibra fina, ou seja, é industrial, e então o coeficiente de variação da mesma é menor se comparado com fibras naturais. Para o conjunto de amostras ensaiado, o coeficiente de variação foi 13,28%. O histograma da Figura 71(A) ilustra a variação dos valores obtidos de resistência à tração.

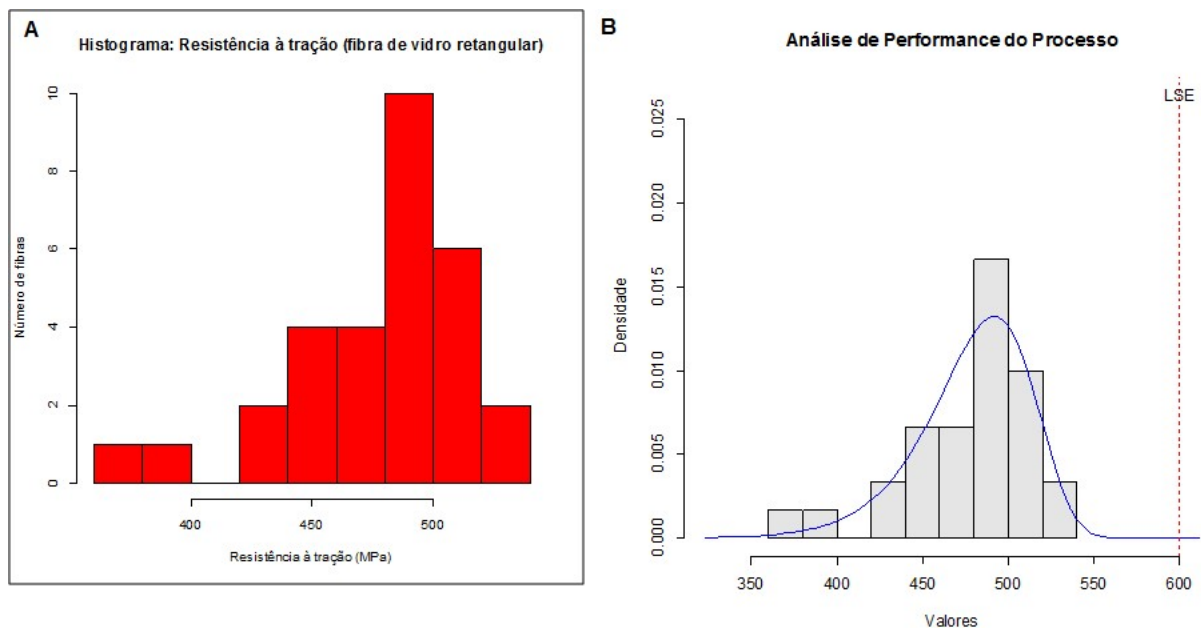


Figura 71- (A) Histograma da resistência à tração da fibra de vidro retangular no teste de resistência à tração; (B) Índice de performance da resistência à tração da fibra de vidro retangular no teste de resistência à tração (Distribuição)

A Distribuição (Figura 71(B)) mostra que os valores de resistência à tração por terem sido mais uniformes, estão dentro da faixa esperada de resultados. Já a Figura 72 representa os valores de resistência à tração em função do módulo elástico final. Esse gráfico é interessante para mostrar como os resultados tiveram semelhanças e permaneceram dentro de um intervalo único do gráfico, com dispersão mínima.

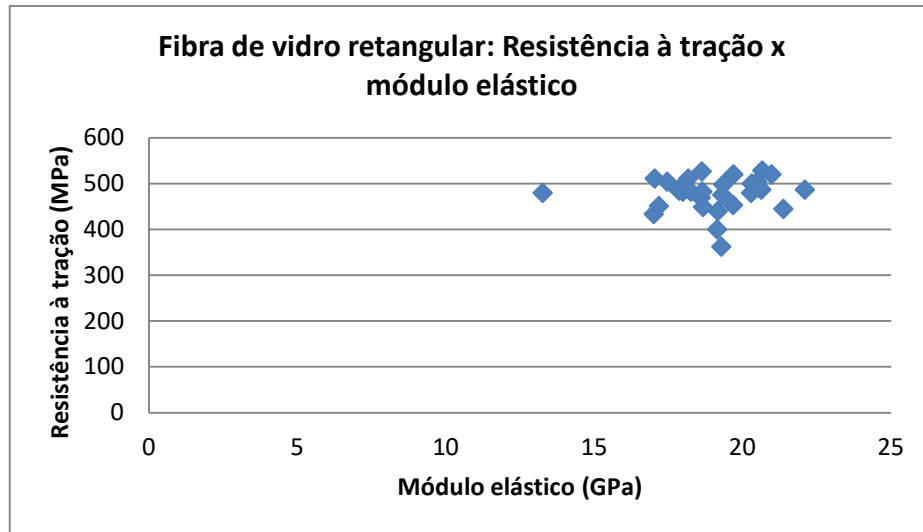


Figura 72- Fibra de vidro retangular: Resistência à tração x módulo elástico

A deformação registrada para a fibra de vidro retangular também foi um valor homogêneo. O valor registrado foi 0,03 mm/mm para a deformação da fibra de vidro retangular. Houve uma maior concentração dos valores na faixa de deformação de 0,00-0,05 (mm/mm), conforme pode ser visto na Figura 73(A e B).

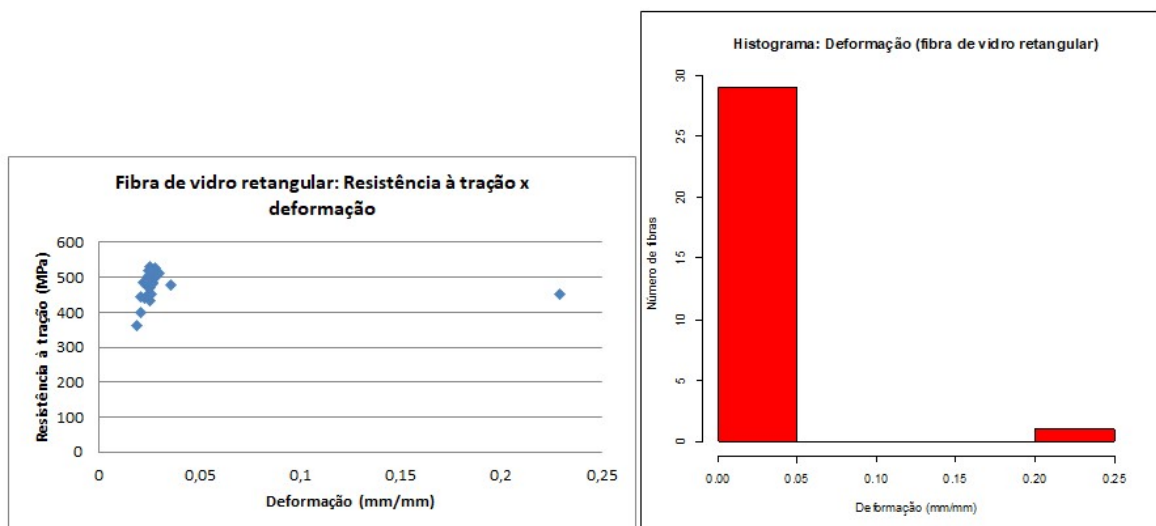


Figura 73- (A):Fibra de vidro retangular: Resistência à tração x deformação; (B) Histograma: Deformação (fibra de vidro retangular)

Para o módulo elástico, foi identificado o valor de $18,99 \pm 1,71$ GPa. O coeficiente de variação para este resultado, foi de 9,02%, mantendo a uniformidade dos resultados. Conforme pode ser verificado na Figura 74(A), os valores concentram-se próximos a média. A curva de Distribuição, Figura 74(B) corrobora os valores encontrados e mostra o intervalo de confiança para a média obtida.

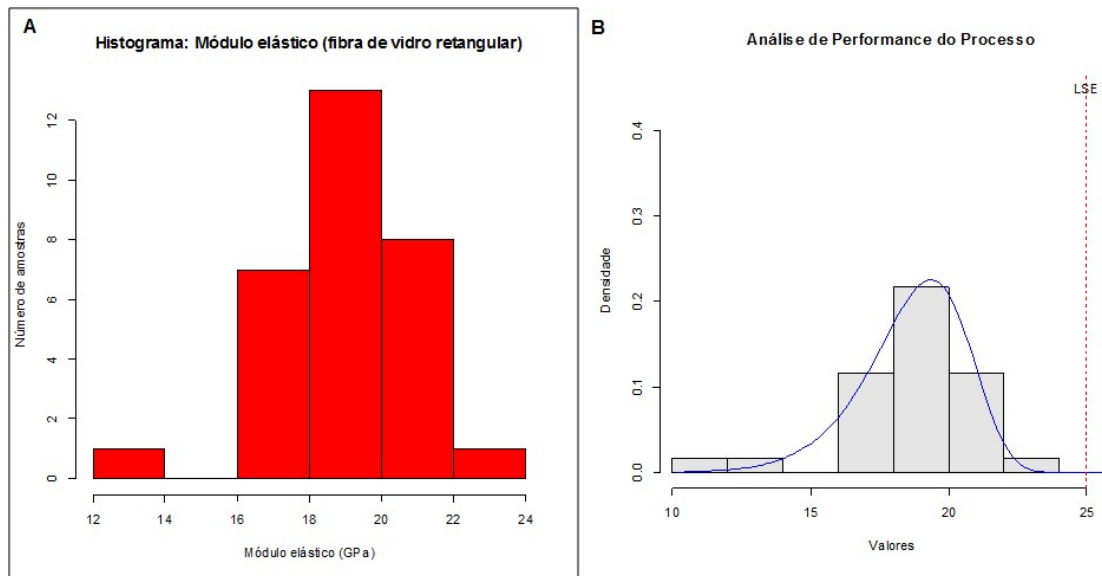


Figura 74- (A)Histograma de módulo elástico da fibra de vidro retangular no teste de resistência à tração; (B) Índice de performance do módulo elástico da fibra de vidro retangular no teste de resistência à tração (Distribuição)

4.1.8 Ensaio Pullout em fibras de bananeira

As fibras de bananeira foram ensaiadas para ter um indicativo do tamanho mínimo crítico de utilização da fibra na matriz polimérica. Foram realizados ensaios para tamanhos de comprimento embutido de 5 mm, 10 mm, 15 mm, 20 mm e 25 mm. As forças médias de rompimento e tensão Pullout estão registradas na Tabela 12.

Tabela 12- Força de rompimento do ensaio Pullout das fibras de bananeira

Comprimento embutido (mm)	Média da Força de rompimento (N)	Média da Tensão Pullout (MPa)
5	7,06 ± 3,37	119,69 ± 47,64
10	8,18 ± 1,41	129,84 ± 11,63
15	10,62 ± 6,01	176,27 ± 68,06
20	17,43 ± 0,28	265,80 ± 65,17
25	16,87 ± 3,83	241,32 ± 42,83

Na Figura 75 é possível perceber como a força de desacoplamento vai aumentando nos comprimentos de 5, 10, 15 e 20 mm. Após este comprimento de

inserção a força de rompimento tende a estabilizar, indicando que o comprimento ideal de inserção na matriz polimérica é aproximadamente, entre 15 e 20 mm.

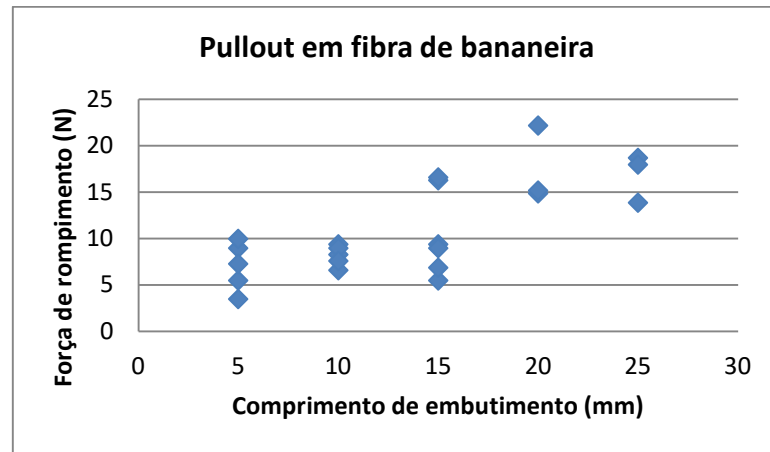


Figura 75- Gráfico de força de rompimento x comprimento de embutimento da fibra de bananeira

Comportamento semelhante ao do gráfico da força de rompimento é identificado no gráfico de Tensão de Pullout das fibras. O comportamento crescente da tensão também concentra-se até atingir o comprimento de inserção de 20 mm.

Na Figura 76 é ilustrado o gráfico de intervalo de confiança das médias de tensão de Pullout, no qual percebe-se que até chegar no comprimento de inserção de 20 mm, há um crescimento da tensão, indicando que o comprimento ideal da fibra encontra-se na faixa entre 15 e 20 mm. Como as fibras de bananeira são utilizadas em comprimento superior a 15 mm, no qual as mesmas formam uma malha de rede entrecruzada de bananeira, as fibras são capazes de receberem a tensão atuante na matriz e com isso, podem proporcionar o reforço aos materiais.

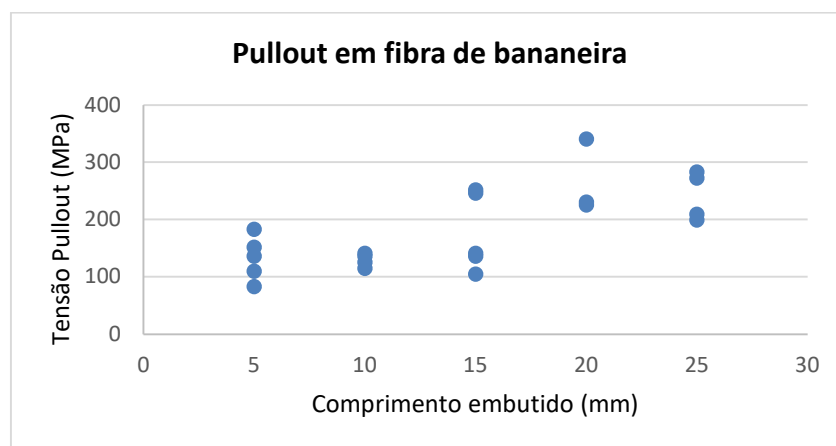


Figura 76- Tensão Pullout x comprimento embutido das fibras de bananeira na resina epoxídica DGEBA/TEPA

Qualitativamente, como as fibras não foram arrancadas durante o teste de tensão Pullout, infere-se que houve uma boa adesão entre a fibra de bananeira e a resina epoxídica, proporcionando resultados mecânicos satisfatórios.

4.1.9 Ângulo de contato das fibras de bananeira e da resina epoxídica DGEBA/TEPA

Em testes de ângulo de contato, ângulos entre 90 e 150 graus, indicam que a superfície analisada é hidrofóbica, maiores que 150 graus indicam super hidrofobia, e quando o ângulo é menor que 90 graus, indica que a superfície é hidrofílica. A Figura 77 mostra o ângulo de contato durante o ensaio da fibra de bananeira e da resina epoxídica.

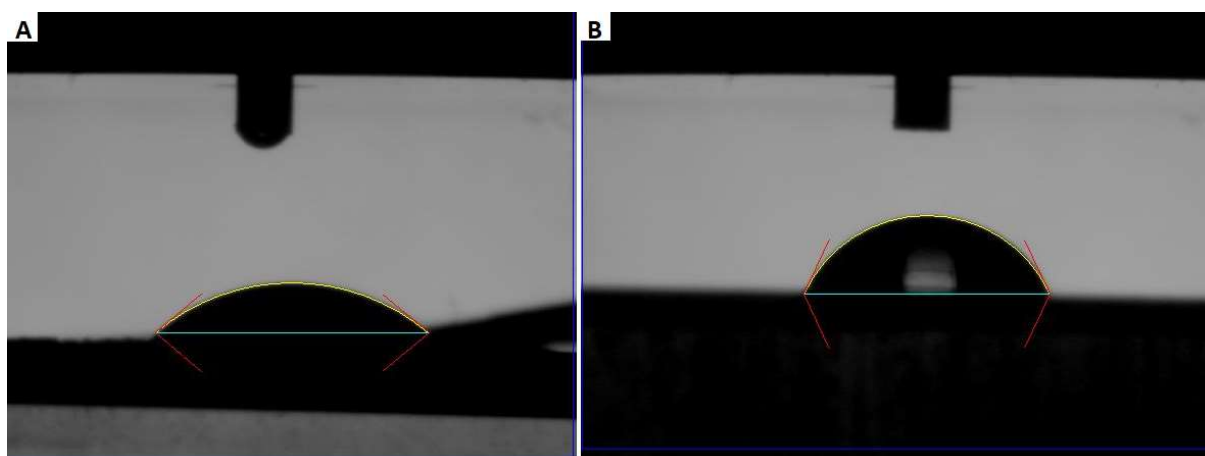


Figura 77. (A) Teste de ângulo de contato na fibra de bananeira; (B) Teste de ângulo de contato na resina epoxídica DGEBA/TEPA

Para a fibra de bananeira, foi encontrada neste trabalho uma média de $37,48 \pm 11,16$ graus, já para a resina epoxídica DGEBA/TEPA, foi encontrado o valor de $61,75 \pm 5,66$ graus. A fibra é bem mais hidrofílica que a resina, por isso a laminação da fibra com a resina tende a deixá-la mais resistente a absorção de água.

Verifica-se que os valores de ângulo de contato estão próximos aos relatados na literatura para outras fibras vegetais. Širvaitiene *et al.* (2013) encontrou valores aproximados de 23 graus para as fibras de algodão e 30 graus para as de linho. Já

para o par sisal/epóxi, Silva e Al-qureshi (199) encontraram um ângulo de contato em torno de 47° para fibras sem tratamento e de 34° para fibras tratadas com hidróxido de sódio (5% por 1h a 100°C).

4.1.10 Microestrutura

A imagem microscópica confocal foi realizada com o intuito de verificar a estrutura da fibra de bananeira. Conforme era esperado, foi encontrada nas imagens da Figura 78(A) uma fibra com algumas variações de diâmetro. Isto ocorreu, provavelmente em função do modo manual de extração das fibras do vegetal. A raspagem mecânica para a retirada da polpa pode ter causado achatamentos em certos pontos da fibra, causando estas distorções.

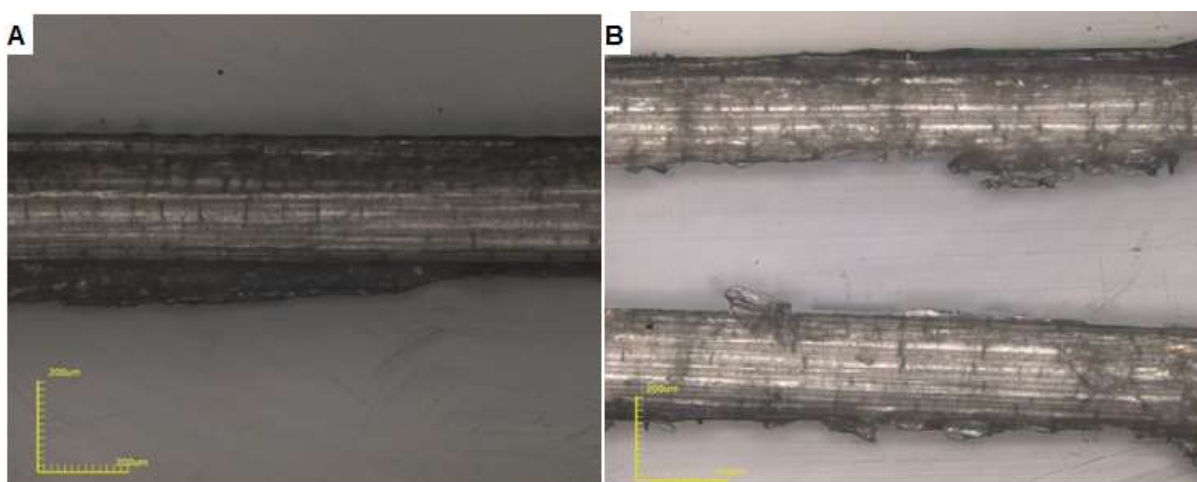


Figura 78- (A) Imagem da fibra de bananeira no confocal com aumento de 216x; (B) fibra de bananeira no confocal com polpa residual com aumento de 216x

Na Figura 78(B) ainda é possível perceber alguma polpa residual que permaneceu após todo o processo de extração da fibra. A automatização do processo de extração da fibra pode melhorar significativamente a qualidade das fibras a serem obtidas.

A imagem microscópica da estrutura da fibra de vidro também foi realizada, conforme Figura 79. Nesta imagem é possível visualizar como a estrutura é mais uniforme e preservada em função da fabricação da mesma ser industrial. Dificilmente são encontrados defeitos ao longo da fibra. Como a malha da fibra de

vidro é composta por dois tipos de fios, a Figura 79 (A) representa o de maior espessura.

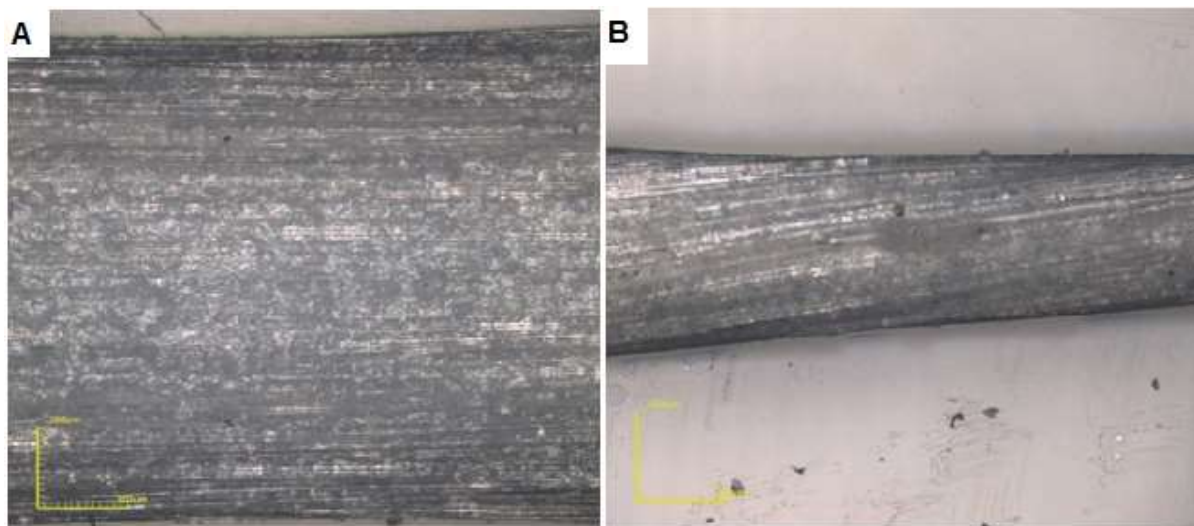


Figura 79- Imagem da fibra de vidro “grossa” com aumento de 216x; (B) fibra de vidro fina com aumento de 216x

Já o da Figura 79(B) representa o fio mais fino que é duplo e tem a dupla torção para transpassar o fio de maior espessura. A dupla torção é visível na ampliação na qual os filamentos da fibra de vidro são contorcidos para aumentar a resistência da malha da fibra de vidro.

Na Figura 80 (A, B, C, D) temos a microscopia eletrônica de varredura da fibra de bananeira com ampliações de 35, 35, 120 e 270 vezes, respectivamente, no qual é possível perceber nas ampliações das imagens (indicado pelas setas) das fibras algumas variações de espessuras das mesmas ao longo do comprimento e também a cera residual na fibra. Na pesquisa foi obtido como média do diâmetro o valor de $293 \pm 91 \mu\text{m}$. Tal variação de espessura ocorre em decorrência da fibra ser natural e também pelo modo de extração ser manual, ou seja, avarias são esperadas ao decorrer do comprimento da mesma.

Na Figura 80 (B) verifica-se uma fibra em que há repetições dos elementos formadores. Assim, pode-se inferir que os elementos constituintes do pseudocaule da bananeira se repetem em várias escalas, em inúmeras vezes e em tamanhos diferenciados.

Com as ampliações é possível verificar que a estrutura das fibras do pseudocaule da bananeira é formada por células e por uma certa quantidade de polpa residual que não foi totalmente removida com o molho em água e com a extração mecânica manual. Vale destacar que quanto mais rugosa a superfície da

fibra, melhor a adesão da fibra na resina.

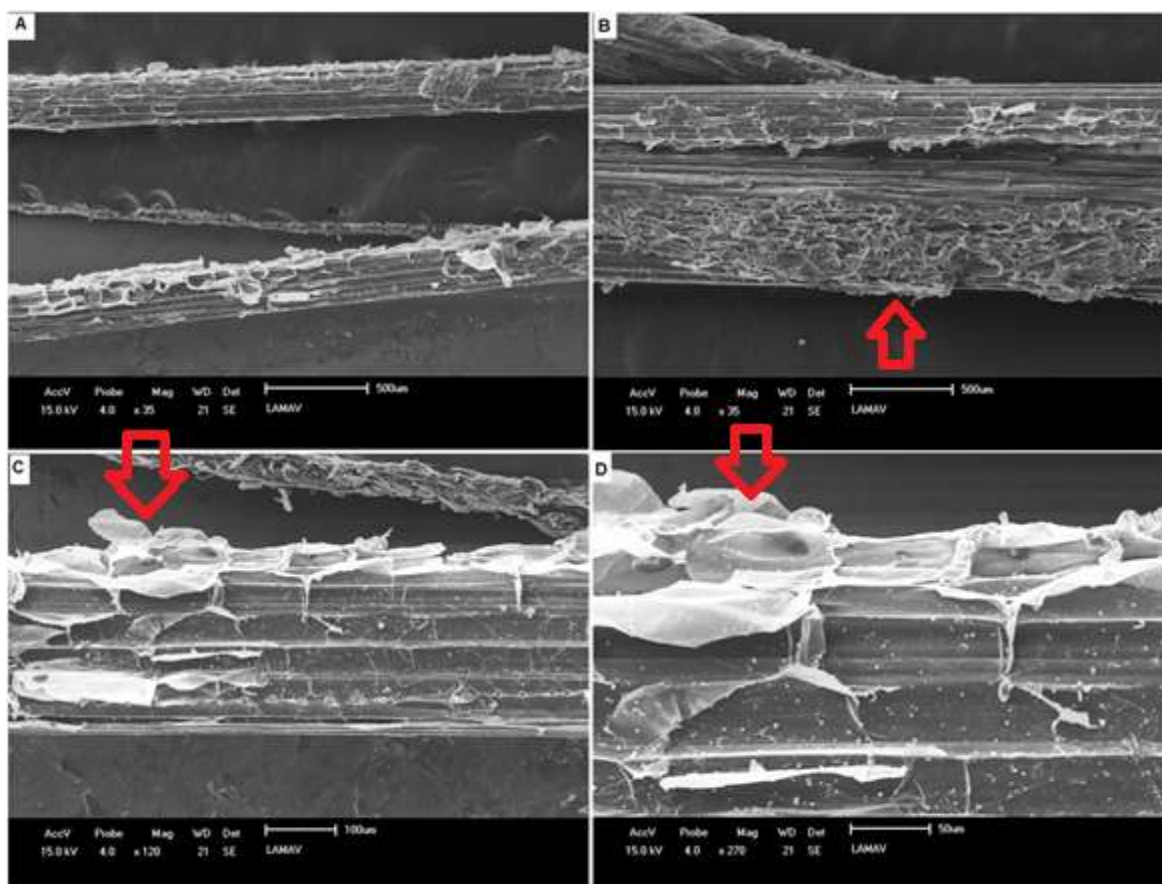


Figura 80 (A, B, C, D)- Micrografia eletrônica de varredura da fibra do pseudocaule da bananeira produzida com aumentos de 35x(A), 35x(B), 120x(C) e 270x(D)

Na ampliação das imagens com aumento de 120 e 270 vezes, verifica-se em maiores detalhes essa cera residual que anteriormente ao tratamento em água, envolvia por completo a fibra de bananeira. De acordo com Paul *et al.* (2010), as ceras são formadas por inúmeros alcoóis e formam uma camada de proteção nas fibras que proporcionam um carácter oleofílico e hidrofóbico na superfície da fibra, fato que dificulta a adesão da fibra ao polímero, por isso destaca-se a importância de tratamento em água ou outro tipo de tratamento químico para retirada desta polpa que envolve a mesma.

A Figura 81 (A, B, C e D) retrata a ampliação da superfície de corte da fibra de bananeira com aumentos de 300x (A), 1500x (B), 300x (C) e 1500 (D), respectivamente, no qual é possível perceber a estrutura interna da fibra, e o quanto a mesma é porosa, fato que justifica os altos índices de absorção de água.

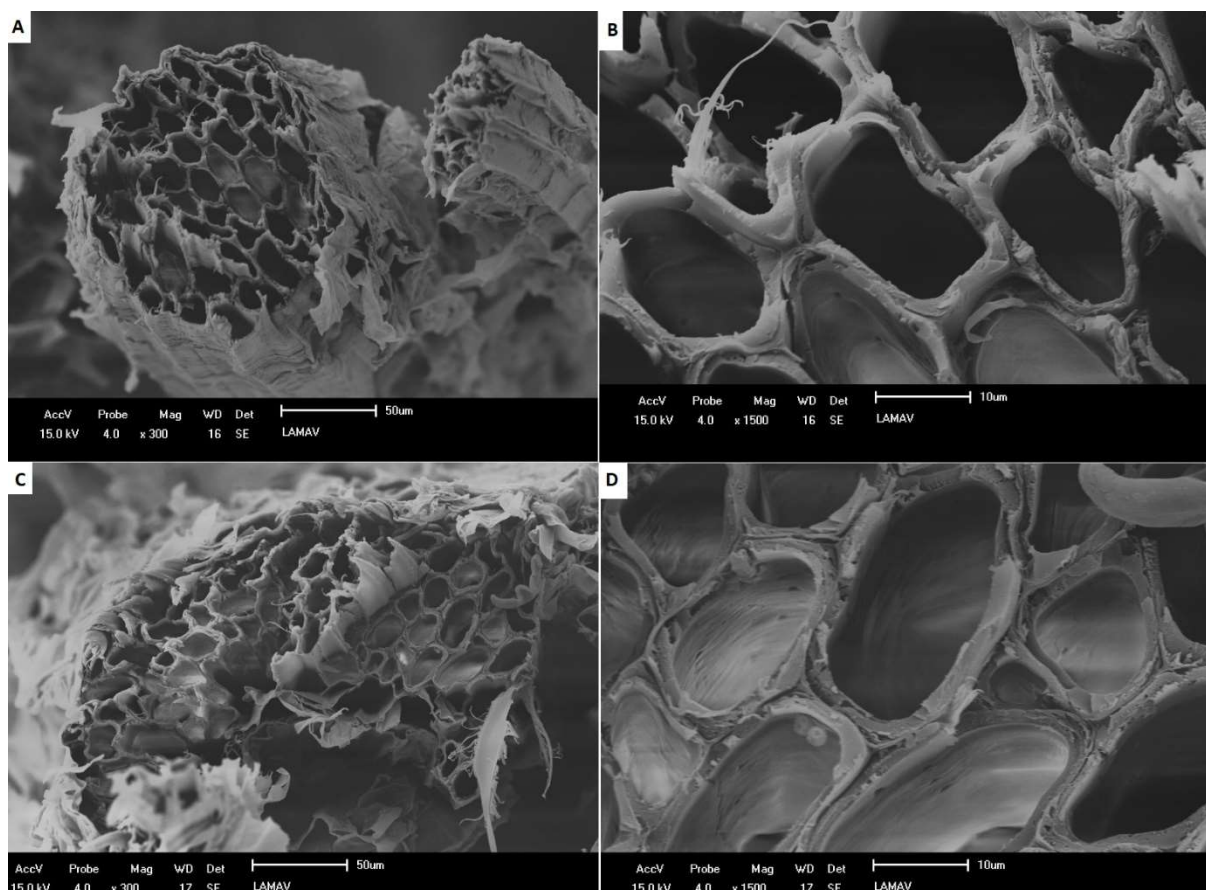


Figura 81 (A, B, C, D)- Micrografia eletrônica de varredura da superfície de corte da fibra do pseudocaule de bananeira produzida com aumentos de 300x(A), 1500x(B), 300x(C) e 1500x(D)

Já a Figura 82 (A, B, C, D) é retratada a fibra de vidro fina com ampliação de 35, 100, 100 e 270 vezes, respectivamente.

Na Figura 82(A) é possível visualizar a fibra de vidro com uma torção, já que essa fibra de vidro fina é utilizada de forma dupla e transpassa a fibra de vidro retangular. É possível perceber na Figura 82 (B) que há uma resina que cobre os filamentos constituintes da fibra de vidro, como forma de união dos componentes. Nos locais em que há o encontro da fibra de vidro fina com a fibra de vidro retangular, é possível perceber áreas sem o recobrimento da resina (indicadas pelas setas). Na Figura 82(D) identifica-se na ampliação que os filamentos da fibra de vidro são alinhados e repetem-se ao longo da espessura da fibra de vidro.

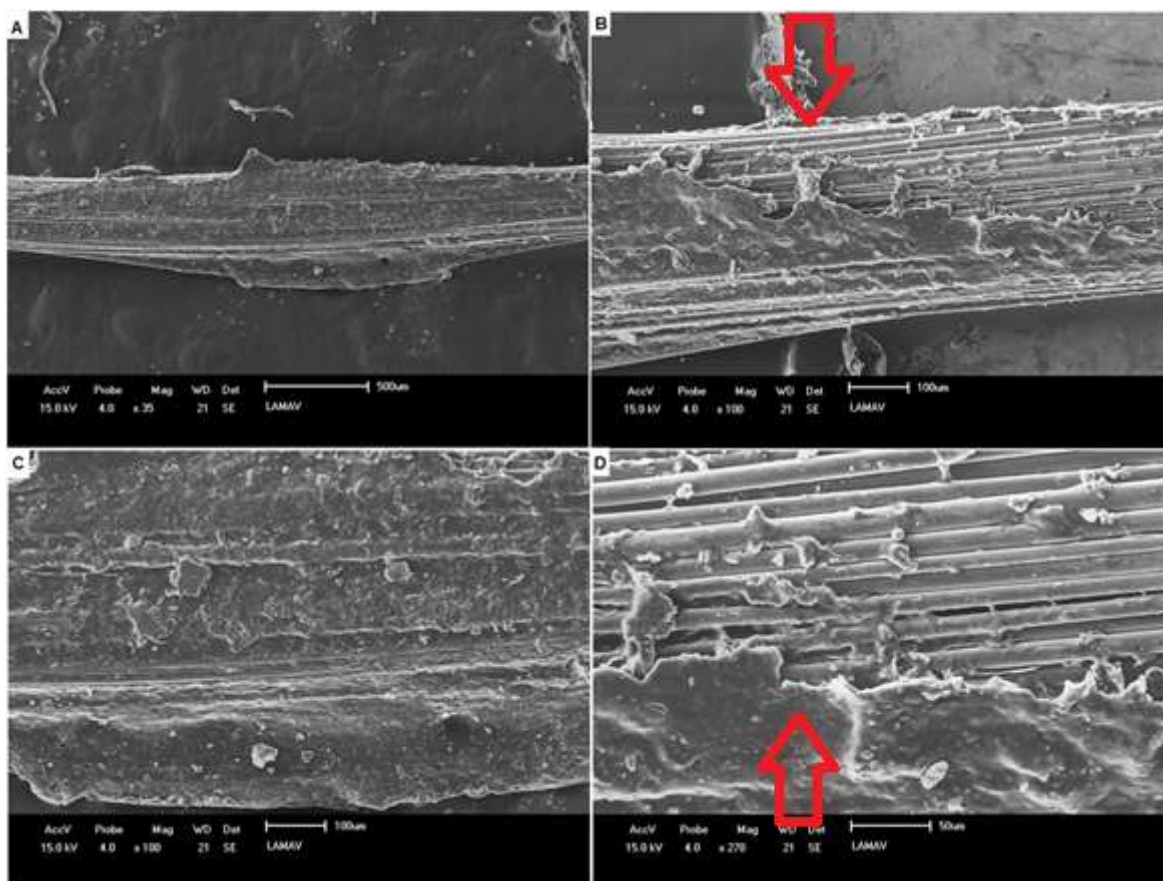


Figura 82 (A, B, C, D)- Micrografia eletrônica de varredura da fibra de vidro fina produzida com aumentos de 35x(A), 100x(B), 100x(C) e 270x(D)

Na Figura 83 (A, B, C, D) visualiza-se a microscopia da fibra de vidro retangular com ampliações de 30, 120, 150 e 270 vezes, respectivamente. É possível perceber na imagem (A), o local exato em que há a ausência da resina que recobre a fibra (setas indicativas), no qual é visível os filamentos de vidro que se repetem ao longo da estrutura.

A resina serve como elemento ligante dos filamentos e proporciona resistência a estrutura da fibra de vidro. A resistência mecânica que a fibra de vidro apresenta é proveniente dos filamentos da fibra de vidro que se repetem constantemente e também da resina que preenche os vazios deixados entre os filamentos. O local com ausência de resina na amostra de microscopia ocorreu em função de neste exato local, ter sido retirado o fio da rede entrelaçada da fibra de vidro, ou seja, o fio foi retirado de seu local de origem, no qual a resina que atuava como elemento ligante da rede, foi deslocado com a retirada do mesmo, apresentando essa falha de recobrimento da superfície pela resina.

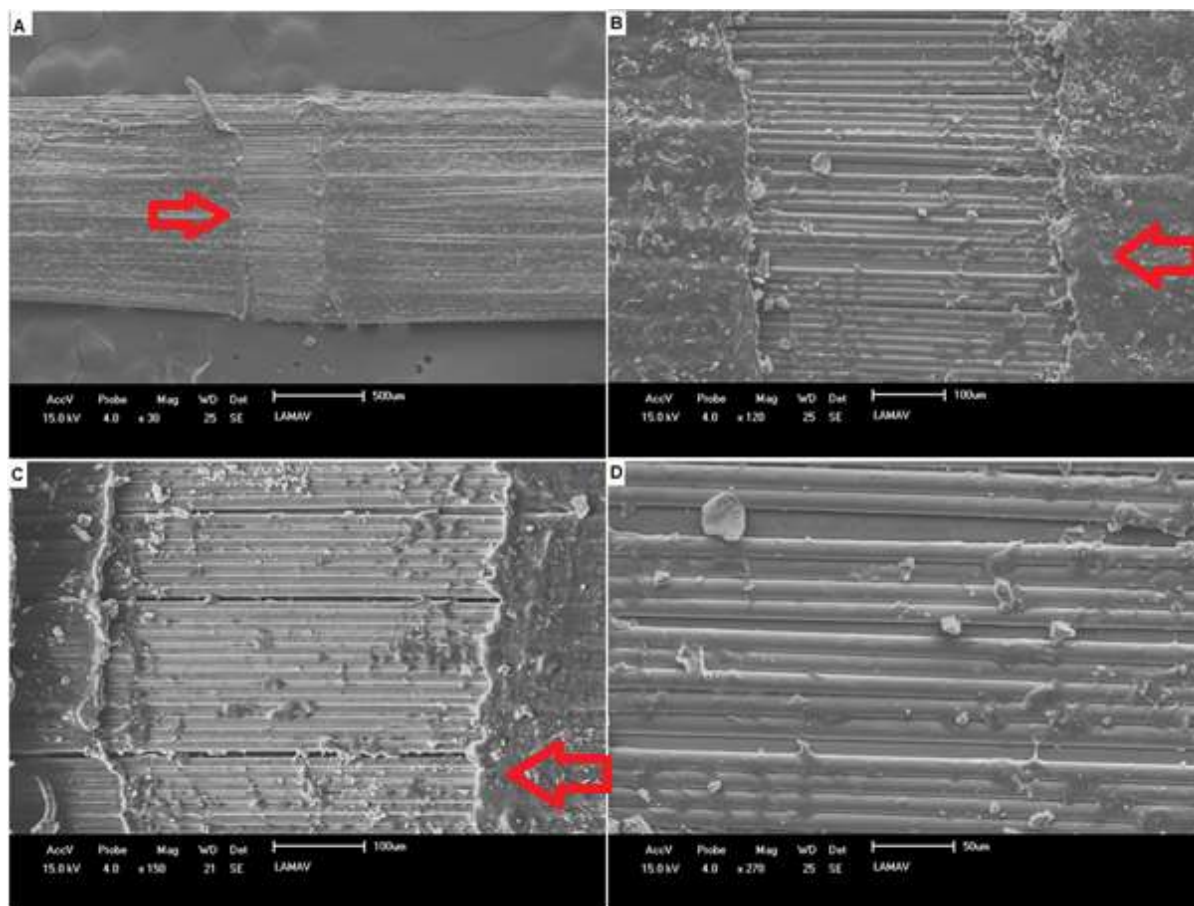


Figura 83 (A, B, C, D)- Micrografia eletrônica de varredura da fibra de vidro retangular produzida com aumentos de 30x(A), 120x(B), 150x(C) e 270x(D)

4.1.11 Resistência à flexão em rochas não laminadas

A rocha calcítica natural proveniente da empresa Polita em Cachoeiro de Itapemirim foi ensaiada no teste de resistência à flexão. A norma ASTM C503 determina que este tipo de rocha calcítica necessita ter pelo menos 7 MPa de resistência para atender a classificação de rocha comercial. O resultado obtido nesta pesquisa foi o valor de $7,52 \pm 1,76$ MPa. Apesar de o valor de resistência estar dentro do valor exigido pela norma, é possível aumentar este valor de resistência da rocha natural através do processo de laminação, no qual a rocha teria uma melhoria nos valores mecânicos e, com isso, o material poderia ter uma melhor aceitação no mercado e maior gama de utilização. A Figura 84 mostra as curvas de resistência à flexão versus deformação dos corpos de prova ensaiados.

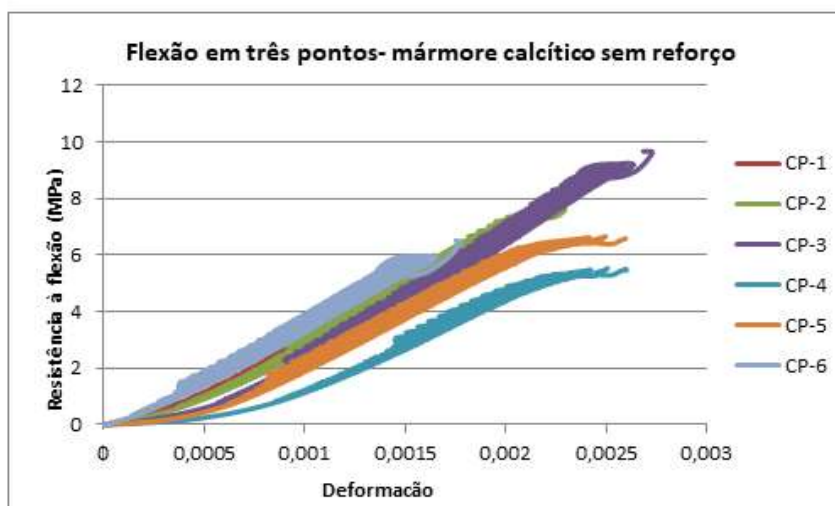


Figura 84- Resistência à flexão de rochas calcíticas naturais sem laminação

As rochas calcíticas apresentam diferentes granulometrias e muitas partes das rochas com pequenas avarias que prejudicam as propriedades mecânicas, por isso um reforço seria interessante no lado inferior da mesma. Para o módulo elástico, foi obtido o valor de $2,28 \pm 0,38$ GPa.

A Figura 85 ilustra o histograma juntamente com a Distribuição. O intervalo de variação dos valores foi mínimo e as variações que ocorreram, provavelmente, foram em função das avarias naturais provenientes do material.

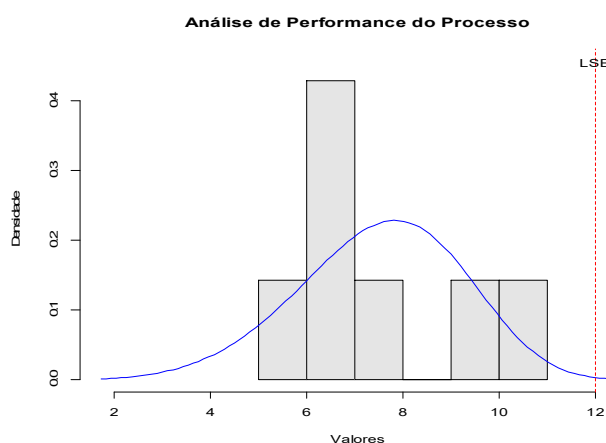


Figura 85- Distribuição dos valores de resistência à flexão dos mármore calcíticos naturais

É possível perceber que houve uma homogeneidade nos resultados, sem existir grandes dispersões nos resultados. A fratura identificada foi do tipo frágil, já que o material apresenta certa rigidez e os grãos se rompem mediante a solicitação de esforços.

Nos gráficos, o início da curva apresentou um comportamento constante que representa o ponto inicial do teste, no qual o corpo de prova tende a ficar paralelo com a base. Posteriormente, inicia-se a deformação no comportamento elástico, mantém-se linear até o ponto em que a tensão de escoamento é atingida e posteriormente ocorre a fratura.

O comportamento homogêneo dos corpos de prova se justifica em virtude de terem sido retirados do mesmo lote de amostras, originário da empresa Polita. Além disso, o corte realizado para a fabricação dos corpos de prova teve velocidade controlada e houve refrigeração a fim de evitar qualquer dano ao material.

O mármore artificial comercial sem laminação também foi submetido ao ensaio de flexão em três pontos. A Figura 86 mostra o comportamento das curvas dos corpos ensaiados. Para este material, foi obtido o valor de resistência à flexão de $35,367 \pm 3,597$ MPa. Tal valor já é bem elevado e apresenta uma baixa dispersão nos valores, isto porque o mármore artificial possui a granulometria fina e possui como matriz a resina, tendo como reforço, o mármore granulado e outros componentes adicionados. O processo industrial também é primordial na homogeneidade da produção, qualidade, baixa porosidade e resistência mecânica.

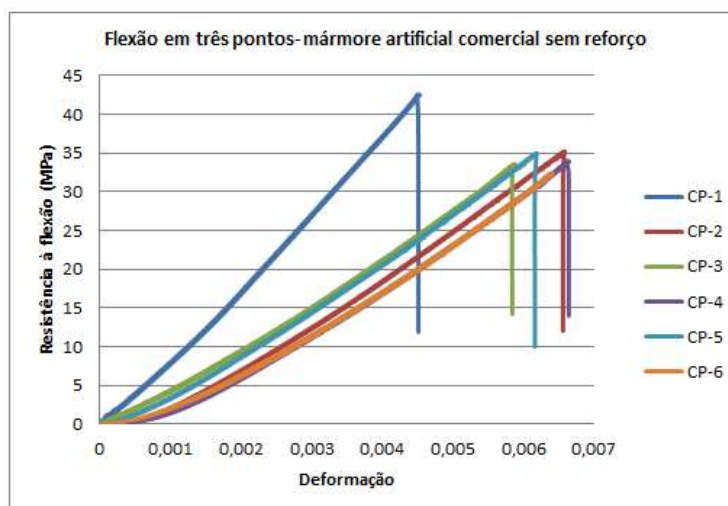


Figura 86- Resistência à flexão do mármore artificial comercial sem laminação

Já para o valor de módulo elástico, foi obtido o valor de $5,859 \pm 1,633$ GPa, representando a rigidez do material artificial. O mármore artificial apresentou uma dispersão bem pequena de valores, mostrando a qualidade, confiabilidade e resistência mecânica que os fabricantes conseguem impor a um material artificial.

Diversos estudos e pesquisa são realizados constantemente visando melhorias mecânicas e físicas, além de sempre tentar melhorar o custo benefício, gerando lucro e benefícios ao empresário e ao público alvo a quem se destina.

A Figura 87 mostra a distribuição dos valores obtidos no teste, mostrando a regularidade dos resultados e que o desvio da curva foi menor se comparado com os materiais naturais.

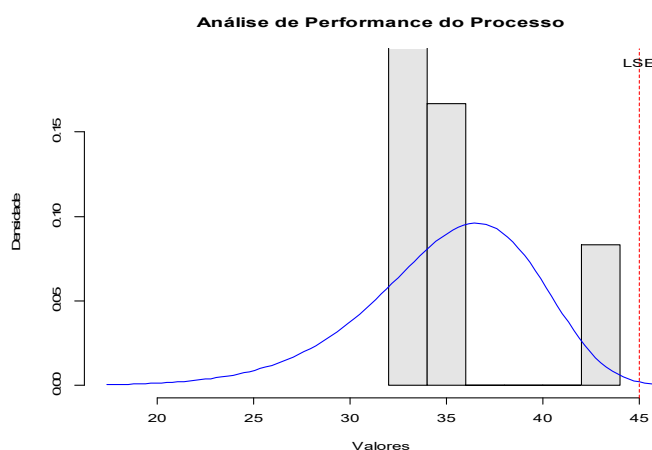


Figura 87- Distribuição dos valores de resistência à flexão dos mármore artificiais comerciais sem laminação

Os comportamentos dos gráficos gerados são muito semelhantes entre si. Até mesmo a curva gerada mostra alta confiabilidade e estatisticamente, segue o comportamento previsto, ou seja, a parte que representa o intervalo elástico (Lei de Hooke) possui uma consistência e regularidade na curva devido à ausência de falhas na estrutura do material artificial.

As pesquisas existentes a respeito de rochas artificiais, relatam valores bem próximos de resistência mecânica encontrada nesta pesquisa. Ribeiro *et al.* (2017) que produziram rocha artificial a partir de resíduos de mármore calcítico e resina poliéster com o sistema de vibro compressão à vácuo, obtiveram o valor de resistência à flexão de $26,6 \pm 1,6$ MPa; já Silva *et al.* (2017) que utilizaram resíduos de mármore calcítico com resina eposídica no sistema de vibro compressão à vácuo, registraram o valor de $31,8 \pm 2,5$ MPa; e Demartini *et al.* (2018) que fizeram uso de resíduo fino de mármore dolomítico e resina epoxídica, registraram o valor de $33,93 \pm 0,49$ MPa.

As rochas artificiais produzidas nesta pesquisa a partir do resíduo calcítico e resina epoxídica também foram ensaiadas por flexão em três pontos para

caracterização mecânica e assim, comparar os resultados obtidos de tais rochas isentas de laminação e também com as que foram laminadas com malha de fibra de vidro e malha de fibra de bananeira para poder verificar se o processo de laminação proporcionou melhorias mecânicas na rocha artificial produzida. A Figura 88 mostra a rocha artificial produzida a partir de resíduo calcítico e resina epoxídica DGEBA/TEPA.



Figura 88- Rocha artificial produzida com conceitos de Silva (2016)

As rochas artificiais isentas de laminação apresentaram uma resistência à flexão de $32,703 \pm 3,26$ MPa e um módulo elástico de $1,37 \pm 0,08$ GPa. O resultado teve um valor considerável caso fosse comparado com as rochas artificiais comerciais. A baixa dispersão do erro padrão justifica-se por ser um material artificial e a resina preencher os espaços vazios e assim apresentar homogeneidade. A Figura 89 mostra o comportamento dos corpos de prova no ensaio de flexão em três pontos.

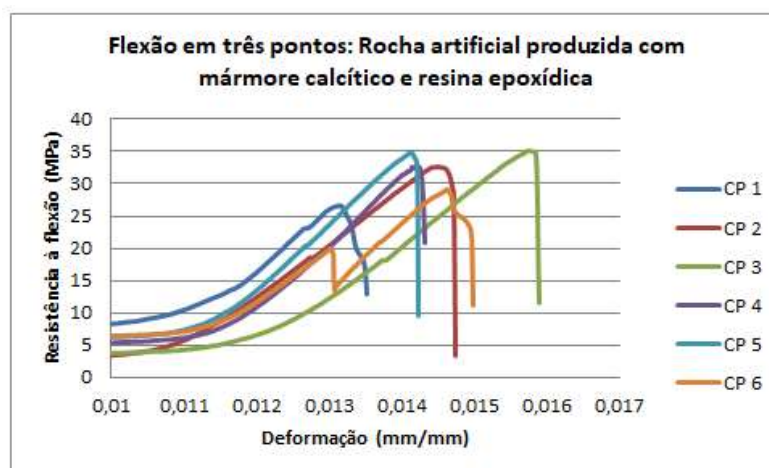


Figura 89- Gráfico de resistência flexural da rocha artificial produzida com resíduo calcítico e resina epoxídica

4.1.12 Análise dinâmico- mecânico

A fibra de bananeira recoberta por resina apresenta um módulo elástico menor comparada a fibra *in natura*, em decorrência da presença da resina epoxídica. O comportamento observado da fibra impregnada é de menor mobilidade em função da resina epoxídica. O platô observado no intervalo aproximado entre 50 e 90°C, refere-se à cristalização da fibra.

A diminuição do módulo em temperaturas próximas a 200°C, provavelmente, está relacionado ao início da degradação das fibras, que ocorre a partir desta temperatura. A Figura 90 ilustra o teste dinâmico mecânico na fibra de bananeira *in natura* e na fibra de bananeira laminada.

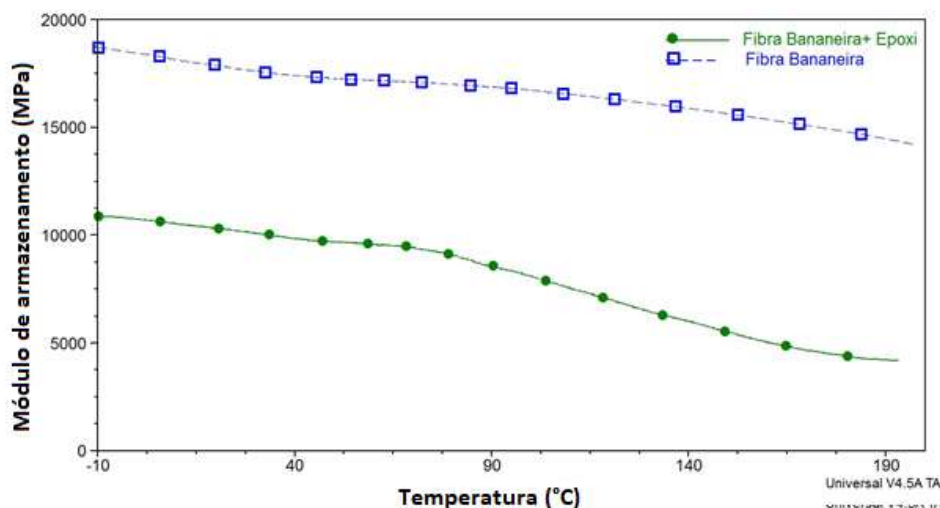


Figura 90- Análise dinâmico mecânica da fibra de bananeira e da fibra de bananeira laminada com resina epoxídica

Já o gráfico ilustrado na Figura 91 ilustra o primeiro (curva vermelha) e o segundo aquecimento (curva preta) da fibra de bananeira. Na curva proveniente do primeiro aquecimento observa-se um platô aproximadamente entre 50-70°C que pode ser associado a formação de fase cristalina na fibra, o que retarda a queda do módulo de armazenamento neste intervalo. Este processo como é de se esperar, não é observado no segundo aquecimento.

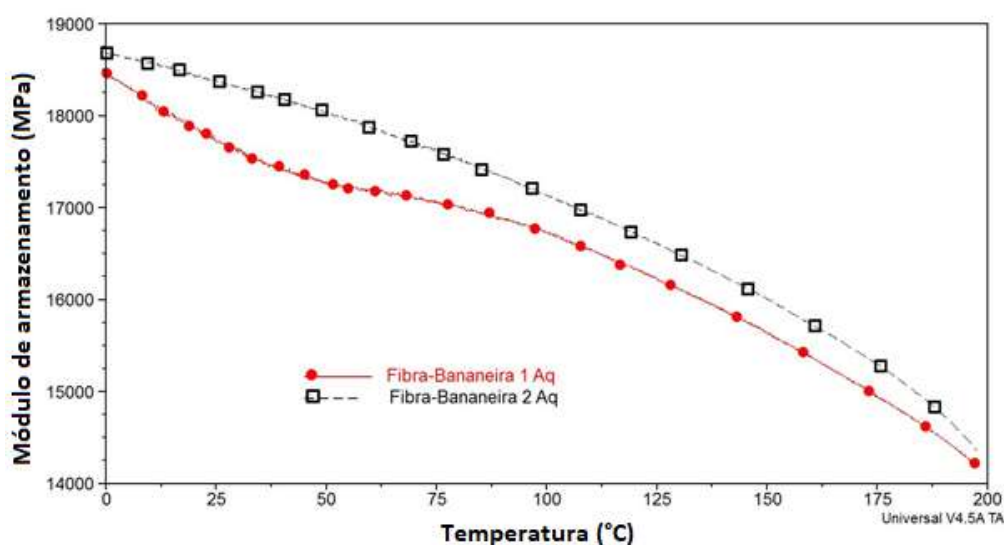


Figura 91- Análise dinâmico mecânica da fibra de banana *in natura* no primeiro e no segundo aquecimento

A fibra de vidro pura e a fibra de vidro impregnada com resina epoxídica também foram analisadas em teste dinâmico mecânico (Figura 92). Observa-se na curva Tan delta que a fibra de vidro pura apresenta uma mudança na curva em torno de 40 a 60° C devido a mobilidade dos fios formadores da fibra de vidro. Já a segunda mudança na curva da fibra de vidro ocorre, provavelmente, em função da transição vítrea. A fibra de vidro impregnada com resina epoxídica mostra que a resina impede a mobilidade inicial dos fios formadores da fibra de vidro, no entanto também apresenta a mudança de direção no final da curva, indicando a transição vítrea.

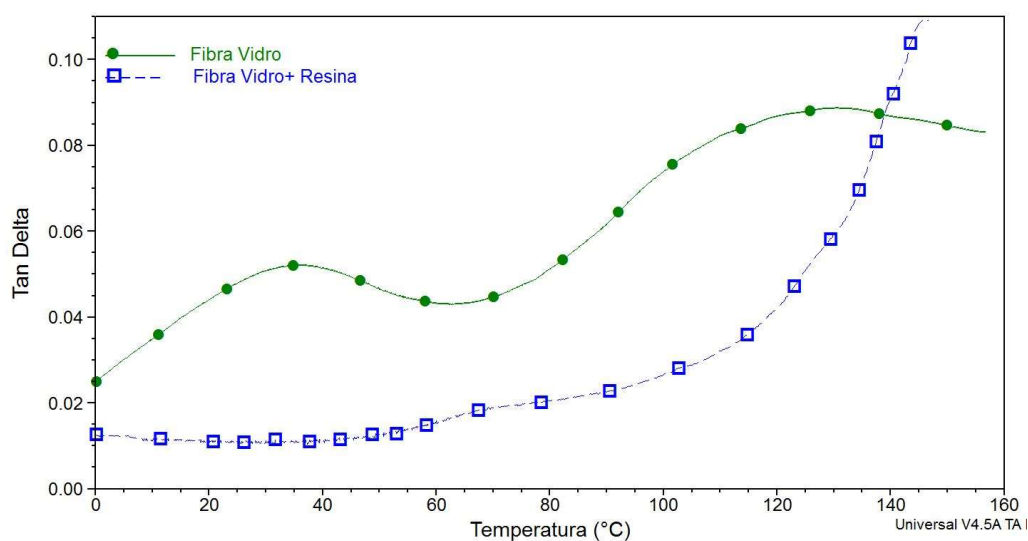


Figura 92- Análise dinâmico mecânico da fibra de vidro pura e fibra de vidro impregnada com resina epoxídica

4.2 Caracterização da Malha da Fibra de Bananeira

4.2.1 Determinação da gramatura da malha entrecruzada da fibra de bananeira

A gramatura representa uma classificação da matéria prima para padronização do peso das malhas no sistema produtivo. Como as redes foram feitas manualmente e as fibras utilizadas também são provenientes de origem natural, normalmente há diferentes espessuras e podem existir avarias nas fibras ao longo do comprimento, fato que normalmente ocorre em fibras naturais (Figura 93).



Figura 93 – Gramatura da malha de fibra de bananeira

Foi obtido um valor de $176,40 \pm 34,03$ g/cm² de gramatura das redes de fibra entrelaçada da fibra de bananeira. Já a fibra de vidro utilizada teve um valor registrado de 82,80 g/cm² referente a gramatura.

A Figura 94(A) mostra o histograma da distribuição da gramatura da rede de bananeira. É possível perceber que houve uma variação considerável nos resultados de gramatura, mas para sanar tal variação nos testes mecânicos, foram utilizadas redes com gramaturas semelhantes em cada tipo de análise mecânica para não ocorrer distorção nos resultados analisados.

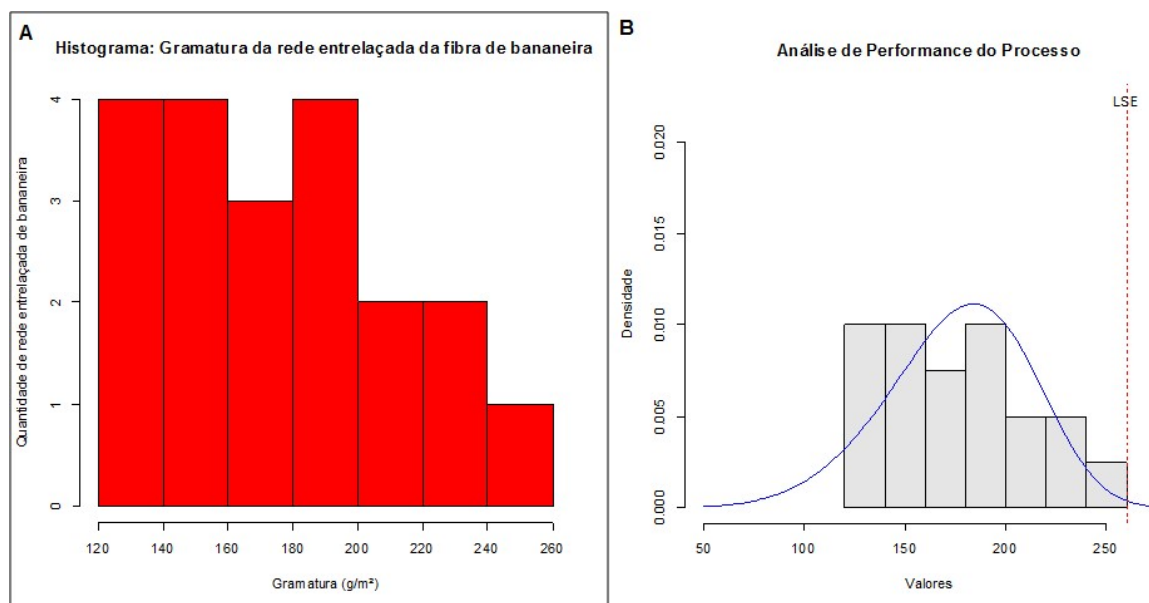


Figura 94- (A) Histograma da gramatura da rede entrelaçada da fibra de bananeira; (B) Índice de performance da gramatura (Distribuição)

Em uma análise estatística, a Figura 94(B) ilustra uma Análise de performance via Distribuição, em que é possível identificar a curva de distribuição da gramatura. Nesta imagem fica ainda mais visível a dispersão dos dados obtidos em relação a gramatura. Espera-se que futuramente com o desenvolvimento de uma máquina de produção industrial de tecelagem das redes, ocorra uma padronização no processo de produção e que possíveis avarias de produção sejam minimizadas consideravelmente.

Como esta rede foi desenvolvida para ter uma função de laminação na indústria de rochas ornamentais, não foram encontrados na literatura, dados de outros pesquisadores a respeito deste assunto, tendo em vista que este estudo é pioneiro no desenvolvimento da rede entrelaçada com dupla torção na laminação de mármore.

4.2.2 Microscopia da malha entrecruzada de fibra de bananeira e da malha de fibra de vidro

A Figura 95(A) representa o ponto de entrecruzamento da fibra de bananeira. É possível perceber na imagem que foi seguido o mesmo modo de produção da fibra de vidro, ou seja, fios de maior espessura sendo transpassado por fios de dupla

torção. A estrutura não foi danificada e para garantir o aumento de resistência da malha, foi utilizado um conjunto de 3 a 4 fios de fibra por segmento linear, pois caso ocorresse durante a fabricação algum tipo de dano à estrutura de algum fio, os outros fios sustentariam o conjunto.

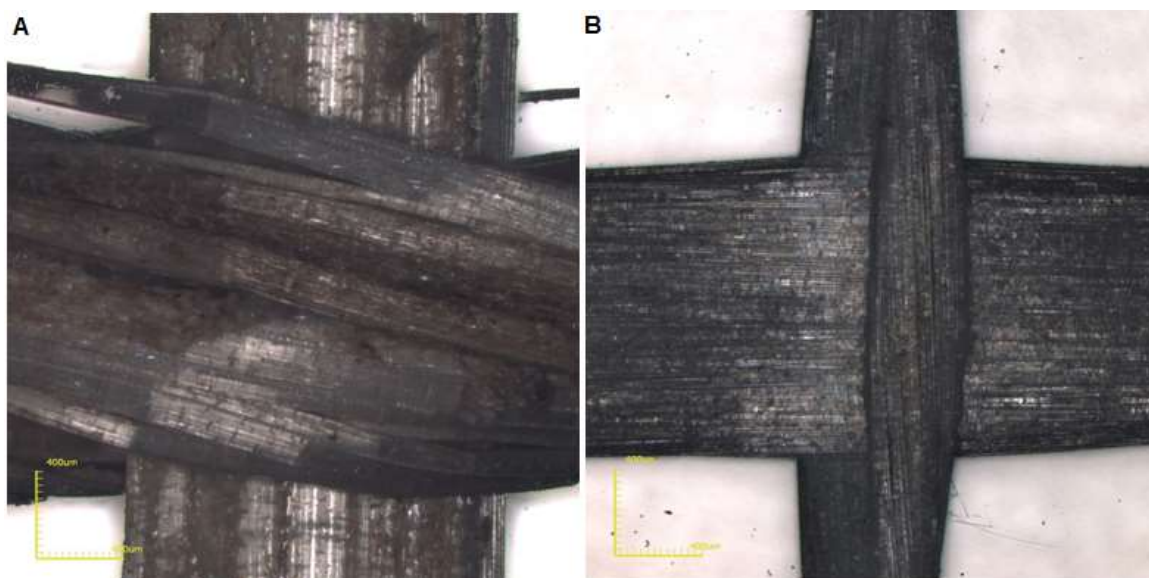


Figura 95- (A) Ponto de entrecruzamento da fibra de bananeira com aumento de 108x; (B) Ponto de entrecruzamento da fibra de vidro com aumento de 108x

A imagem da Figura 95 (B) mostra o ponto de união da malha de fibra de vidro, no qual são visíveis duas fibras mais finas com torção no sentido vertical e uma fibra de maior espessura no sentido horizontal. Uma maior homogeneidade é encontrada nesta malha em função do processo industrial de fabricação. Avarias dificilmente são encontradas nesta malha de fibra de vidro, visto que a qualidade é garantida pelos fabricantes. O inconveniente da fibra de vidro são os filamentos que podem se soltar devido a um processo de corte do rolo para colocar na chapa ou também que pode se desprender durante a movimentação dos mesmos e, consequentemente, entrar no organismo humano juntamente com a respiração.

A Figura 96 (A) ilustra a fibra de bananeira trançada com dupla torção já laminada na rocha. A superfície brilhosa mostra uma superfície na qual a resina realizou o processo de cobertura eficientemente na superfície da rocha, permitindo que a mesma seja um reforço na região que frequentemente dá início a propagação de fraturas e trincas.

Um molhamento eficiente e satisfatório de resina sobre a malha de bananeira pode garantir melhorias mecânicas e possível utilização da rocha em locais em que

antes não poderia ser utilizada em virtude da fragilidade natural apresentada nas rochas.

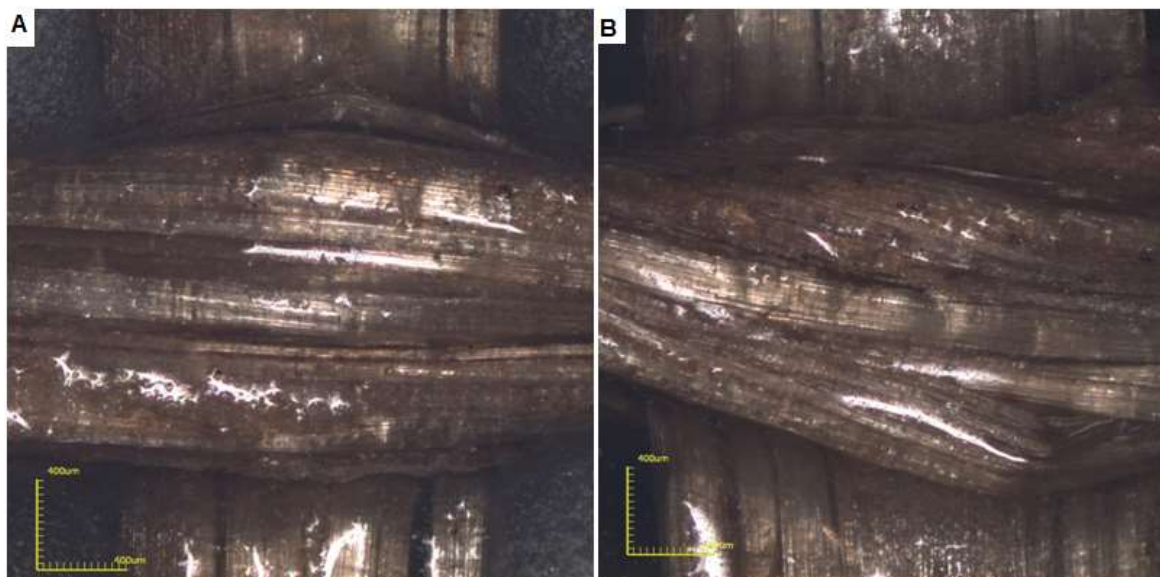


Figura 96- (A) e (B) Ponto de entrecruzamento da fibra de bananeira laminada na rocha com aumento de 108x

Algumas bolhas na superfície da fibra acontecem em função da reação exotérmica de liberação de calor que ocorre no processo de cura da resina epoxídica DGEBA/TEPA. No entanto, como a resina foi passada superficialmente, a adesão entre a malha de bananeira e a rocha não foi afetada pelas bolhas, nem agiram como concentradoras de tensão já que foi utilizada uma fina camada de resina na laminação.

A utilização de um conjunto de 3 ou 4 fios de fibra de bananeira em cada conjunto, permitiu a resistência da malha da fibra de bananeira. O espaço entre as fibras foi preenchido pela resina que foi responsável pelo molhamento no processo de laminação. A Figura 96 (B) ilustra a imagem de um fio de fibra de bananeira formando o conjunto de fio que compõe a malha.

A espessura da fibra de bananeira precisou ser maior em virtude dos defeitos naturais que acontecem na fibra natural. Não seria possível a fabricação manual da malha entrecruzada da fibra de bananeira, caso não fosse utilizado, pelo menos, 3 ou 4 fios por vez em cada conjunto. Sendo assim, a espessura da malha da fibra de bananeira foi maior se comparada com a espessura da fibra de vidro e assim, utilizou-se uma maior quantidade de resina por peça na laminação da fibra de bananeira já que haveria uma área maior de fibra a ser coberta de resina.

Como não havia um padrão na literatura, foi utilizado para laminar a fibra de bananeira, 50 gramas por peça de 250x250 mm; e na laminação da fibra de vidro, utilizou-se 30 gramas de resina epoxídica por peça de 250x250 mm. Apesar de a quantidade de resina ter sido menor para a laminação com fibra de vidro sintética, percebe-se na Figura 97 que a quantidade de resina neste material ainda foi abundante, já que houve uma maior cobertura dos fios pela resina e também nota-se um aglomerado de bolhas (setas indicativas) liberadas da reação exotérmica de cura da resina na região próxima aos fios laminados.

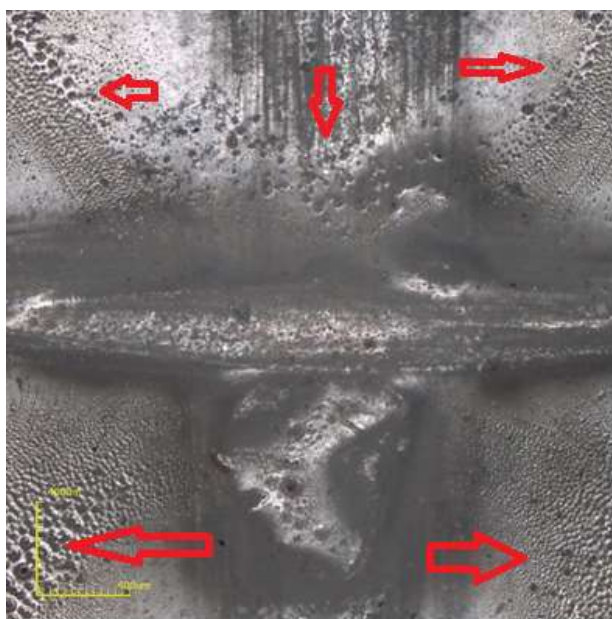


Figura 97- Ponto de entrecruzamento da fibra de vidro laminada na rocha com aumento de 108x

A Figura 98 (A, B, C, D) mostra imagens ampliadas da microscopia eletrônica de varredura da rede entrelaçada da fibra de bananeira com ampliações de 30, 33, 70, e 200 vezes, respectivamente, no qual, o ponto exato de entrecruzamento é ampliado, mostrando a torção no feixe de fibras que são utilizadas.

A torção para produção da malha entrelaçada não danificou a estrutura da fibra ao longo da rede da bananeira. Para manusear as fibras no entrelaçamento das mesmas, as fibras foram utilizadas de forma úmida, visando facilitar o manuseio e evitar danos na estrutura. São visíveis partes de polpa residual que permaneceram mesmo após o molho em água e também da retirada manual da polpa.

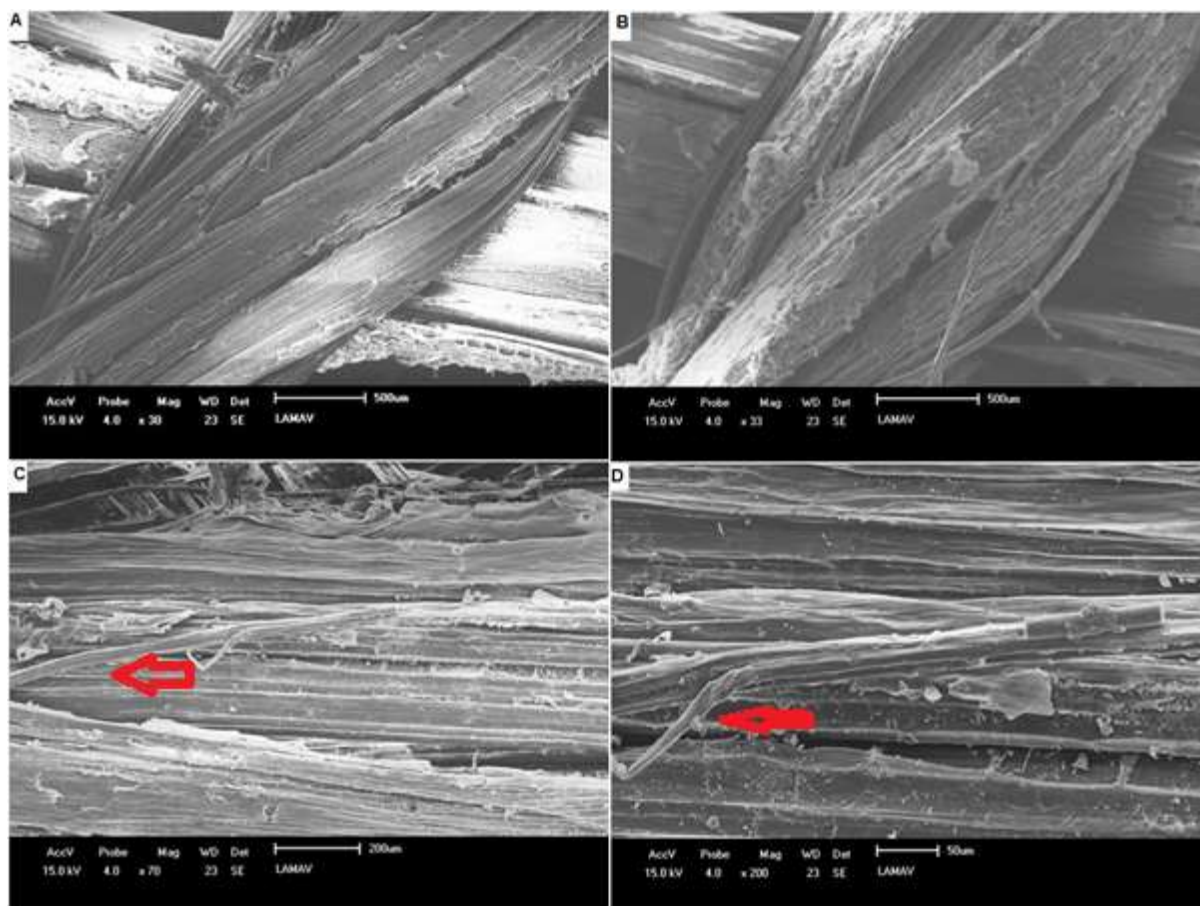


Figura 98- (A, B, C, D)- Micrografia eletrônica de varredura da rede entrelaçada da fibra de bananeira produzida com aumentos de 30x(A), 33x(B), 70x(C) e 200x(D)

Na Figura 98 (C, D) fica visível uma fibra solta (seta indicativa), tal dano foi provocado, provavelmente, na extração manual da fibra de bananeira ou durante a produção da rede entrelaçada. Por isso destaca-se a importância de ocorrer a união de uns 3 ou 4 fios de fibra para formar cada conjunto formador da rede, pois caso haja o rompimento de alguma fibra, as outras possam cumprir a função de reforço na laminação.

A Figura 99 (A, B, C, D) mostra ampliações do entrelace da fibra de vidro fina com a fibra de vidro retangular, com ampliações de 17, 35, 35 e 60 vezes, respectivamente. O ponto de entrecruzamento da fibra de vidro também foi registrado por microscopia eletrônica de varredura nestas imagens.

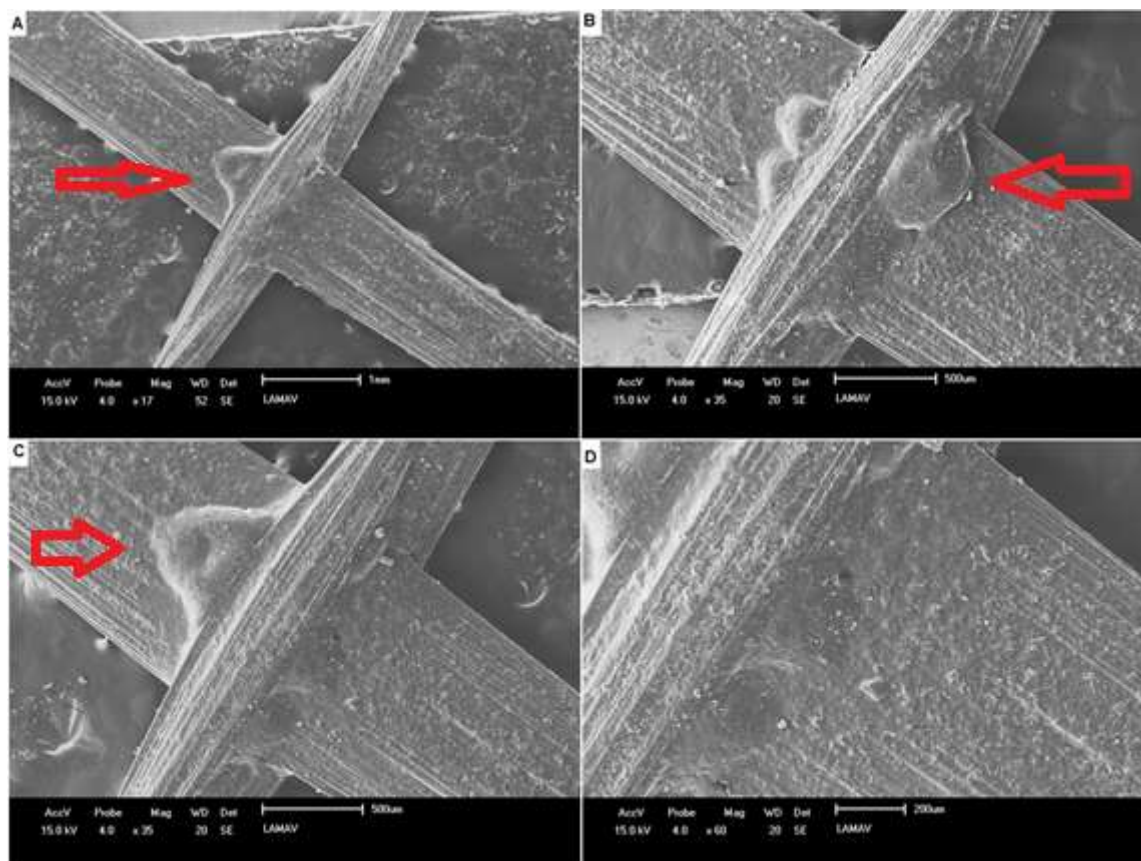


Figura 99 (A, B, C, D)- Micrografia eletrônica de varredura da rede entrelaçada da fibra de vidro produzida com aumentos de 17x(A), 35x(B), 35x(C), 60x(D)

Com as ampliações é possível perceber o recobrimento (setas indicativas) que a resina realiza sobre a fibra de vidro, acumulando-se resina no ponto de entrecruzamento em que, provavelmente, utiliza-se um quantitativo maior de elemento ligante visando um ponto de entrecruzamento com maior adesão e resistência mecânica. É nítido nas imagens que há um recobrimento eficiente, que garante a eficiência mecânica proposta pela rede entrelaçada da fibra de vidro.

4.3 Caracterização das Placas de Mármore Artificial e Natural Laminadas

4.3.1 Determinação da direção de utilização da malha entrecruzada da fibra de bananeira para utilização como reforço mecânico

Tanto a malha de fibra de vidro quanto a da fibra de bananeira possui um entrelace de dois tipos de fibra: fios duplos com torção que atuam perpendicular a um fio de maior espessura. Como não foi encontrada na literatura uma

recomendação de orientação de utilização da fibra, as mesmas foram ensaiadas nas duas direções possíveis: fios com dupla torção paralela a fratura; e fios com dupla torção perpendicular a fratura. Isto foi feito para verificar a posição ideal que proporcione melhor resistência mecânica a rocha ornamental.

A Figura 100 mostra o comportamento das curvas do mármore calcítico natural laminado com fibra de vidro com dupla torção paralela a fratura.

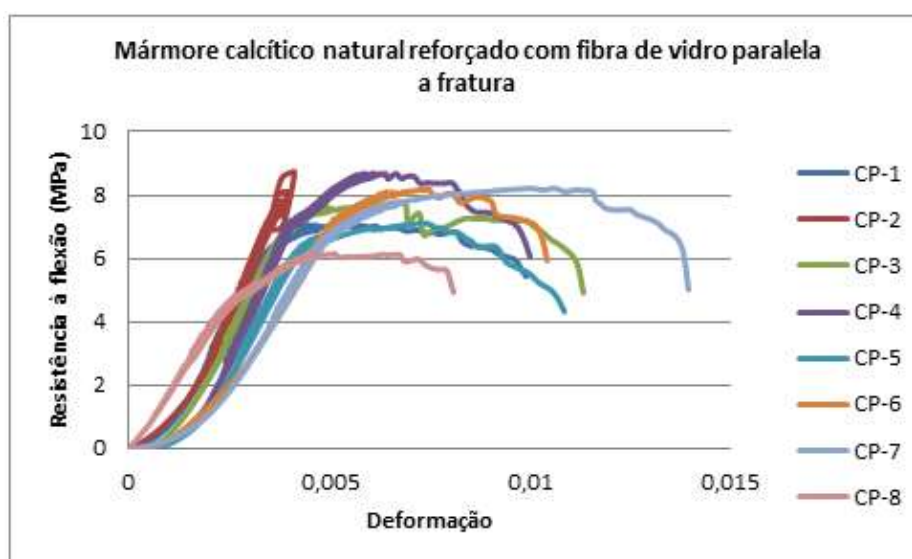


Figura 100- Resistência à flexão do mármore calcítico natural laminado com fibra de vidro dupla paralela a fratura

A fibra de vidro nesta ocasião mostrou um comportamento diferenciado, não ocorreu uma fratura frágil “instantânea”, a fibra de vidro proporcionou as duas partes fraturadas permanecerem unidas apesar de ter ocorrido a fratura. Isto em uma situação cotidiana de utilização do mármore como, por exemplo, em uma bancada, poderia evitar a queda imediata do pedaço da rocha ao se romper, proporcionando mais segurança aos usuários deste tipo de material.

A tensão de ruptura registrada para este material com a fibra de vidro foi $8,007 \pm 0,699$ MPa com um módulo de elasticidade de $1,360 \pm 0,348$ GPa. Considerando que em comparação com o mesmo tipo de mármore calcítico natural houve uma melhora de apenas 6% no valor de resistência à flexão, inferiu-se que o posicionamento paralelo dos fios de dupla torção da fibra de vidro em relação a fratura, não proporcionou as melhorias desejadas e esperadas, ou seja, apenas evita a queda imediata de um pedaço de rocha no momento do rompimento. Por isso, também foi realizado o teste de resistência à flexão na rocha calcítica com os

fios de dupla torção no modo perpendicular a fratura, conforme demonstração das curvas de resistência na Figura 101.

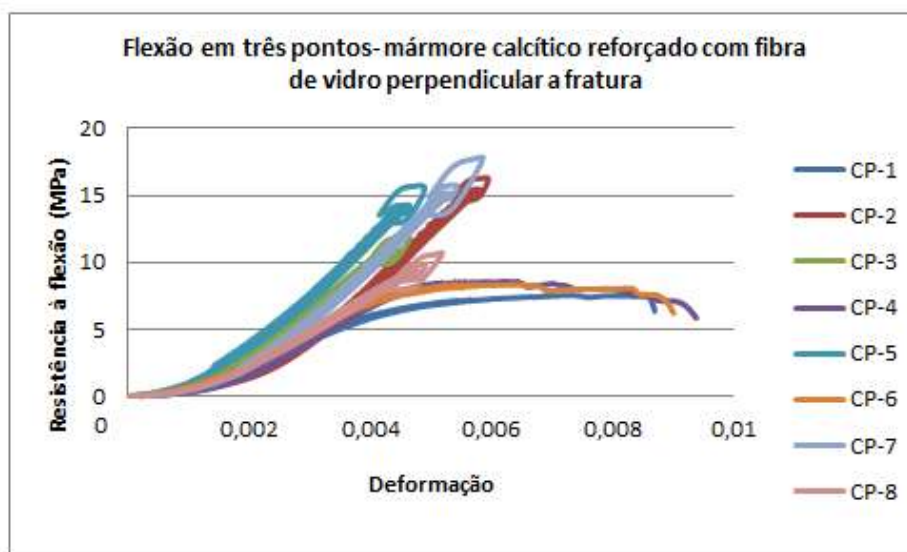


Figura 101- Resistência à flexão do mármore calcítico natural laminado com fibra de vidro dupla perpendicular a fratura

No ensaio de fibra de vidro com a dupla torção perpendicular a fratura, foi obtido um valor de $12,157 \pm 2,601$ MPa de resistência à flexão, que é aproximadamente 51% superior ao valor obtido com a laminação da fibra de vidro atuando de modo paralelo a fratura. Tal valor mostrou-se positivo e proporcionou uma melhora desejada no material natural que apresentava uma fragilidade própria, no entanto a fibra de vidro possui a desvantagem por não ser uma metodologia natural, de exibir maior custo por ser fabricado industrialmente e possuir problemas com o descarte pós-uso com a fibra de vidro.

Para o módulo elástico, foi obtido o valor de $1,890 \pm 0,609$ GPa, um valor de rigidez menor já que o mármore calcítico apresenta a característica de ter cristais de maiores dimensões que atuam como propagadores de trinca no material quando há o início da solicitação de esforço.

A Tabela 13 mostra os valores de resistência flexural para a rocha calcítica natural isenta de laminação, rocha calcítica natural laminada com fibra de vidro paralelo a fratura e rocha calcítica natural com fibra de vidro perpendicular a fratura.

Tabela 13- Valores de resistência flexural para mármore calcítico natural com resistências mecânicas dependentes da direção da dupla torção da fibra de vidro em relação a fratura

Material	Resistência flexural (MPa)	Desvio padrão
Mármore calcítico natural sem laminação	7,52	1,76
Mármore calcítico natural laminado com fibra de vidro com dupla torção paralelo a fratura	8,01	0,69
Mármore calcítico natural laminado com fibra de vidro com dupla torção perpendicular a fratura	12,16	2,60

A Figura 102 mostra o gráfico de intervalo de confiança das médias de resistência flexural do mármore calcítico sem laminação, mármore calcítico laminado com fibra de vidro paralelo a fratura e mármore calcítico laminado com fibra de vidro perpendicular a fratura. Este gráfico mostra a influência do sentido da malha para proporcionar uma real melhoria mecânica na resistência flexural. Fica visível que a malha de fibra de vidro proporciona melhorias mecânicas com o sentido da dupla torção perpendicular ao sentido da fratura. Se for utilizado o sentido da dupla torção paralela a fratura, não é registrado reforço mecânico. Por isso, recomenda-se a laminação com a fibra de vidro com o sentido da dupla torção perpendicular a fratura.

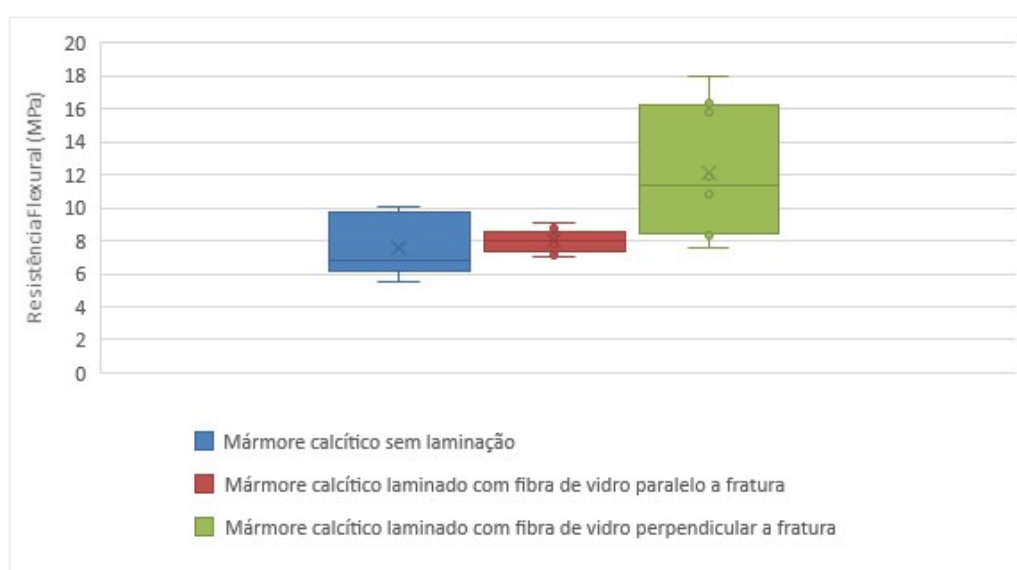


Figura 102- Comparação de resistência flexural para determinação do sentido de direção de laminação da fibra de vidro no mármore calcítico natural

Teste semelhante para determinação do sentido de utilização da fibra de bananeira também foi realizado. Utilizou-se um lote com os grãos mais homogêneos da rocha calcítica natural com a laminação de fibra de bananeira, por isso, era esperado uma resistência mecânica superior nestas rochas laminadas para este tipo de ensaio em função do comportamento visível da homogeneidade dos grãos, este lote foi denominado Lote 1. A Figura 103 mostra o gráfico de resistência à flexão no Lote 1 de rochas calcíticas com laminação de fibra de bananeira.

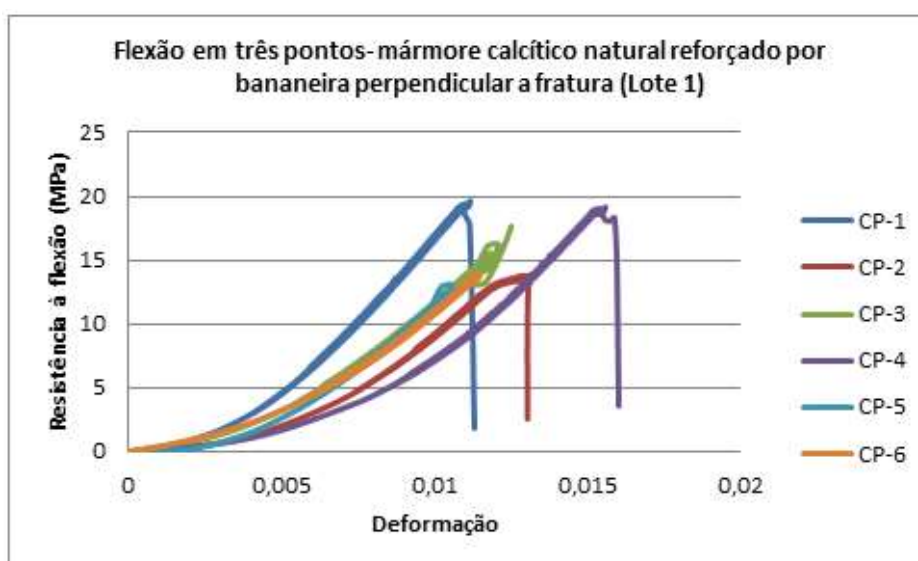


Figura 103- Resistência flexural do mármore calcítico natural laminado com fibra de bananeira dupla perpendicular a fratura

As peças do Lote 1 apresentaram o valor de resistência a ruptura em flexão de $16,721 \pm 2,697$ MPa, representando uma superioridade de 122% quando comparado com a rocha natural sem laminação. Neste lote houve duas melhorias no sistema: o pedaço da rocha estava com os grãos menores e com maior homogeneidade; e também a laminação com fibras de bananeira na posição perpendicular atuou satisfatoriamente, proporcionando a melhoria proposta com a laminação.

Já com relação ao módulo elástico, foi obtido o valor de $1,08 \pm 0,262$ GPa, um valor na faixa esperada de resultados e com baixa dispersão do erro padrão.

Para confirmar o sentido real de uso da malha de bananeira, um conjunto de amostras do Lote 1 foi laminada com fibra de bananeira com dupla torção paralela a fratura. A representação das curvas de resistência à flexão está demonstrada na Figura 104.

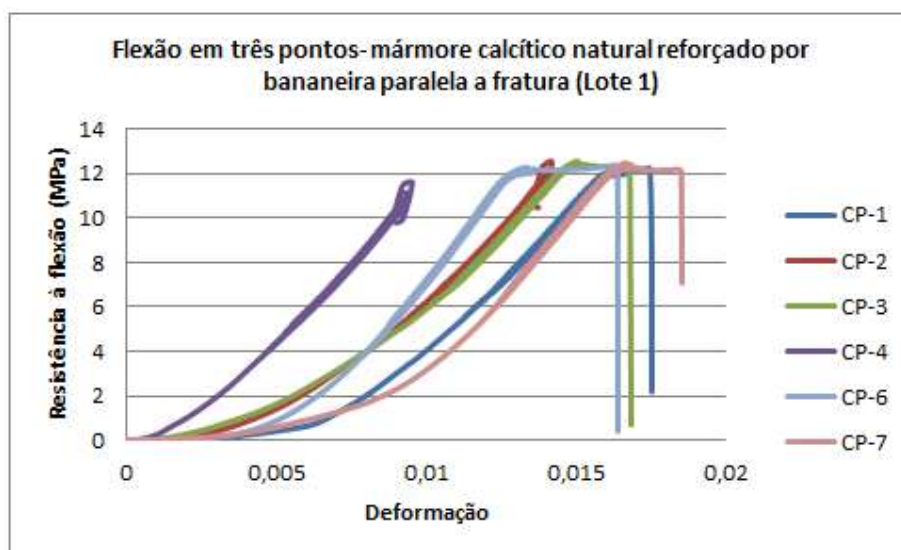


Figura 104- Resistência à flexão do mármore calcítico natural laminado com fibra de bananeira dupla paralela a fratura (Lote 1)

Neste teste, foi obtido o valor de resistência à flexão de $12,531 \pm 0,693$ MPa e para o módulo elástico, foi registrado o valor de $0,789 \pm 0,126$ GPa. Considerando que foi realizado teste de flexão no mesmo lote 1, no entanto com os fios de dupla torção de modo perpendicular a fratura e foi obtido o valor de $16,721 \pm 2,697$ MPa, infere-se que o sentido ideal de aumento de resistência com a laminação é o utilizar os fios de dupla torção de modo perpendicular a fratura, tendo em vista que foi obtida uma melhora mecânica com este posicionamento.

O teste de direção da malha foi realizado tanto para a fibra de vidro quanto para a fibra de bananeira e ambos foram consistentes no resultado, demonstrando que a posição de atuação da malha é primordial para a eficiência da laminação. Johnston (1994) em suas pesquisas também confirmou que as fibras que estão alinhadas perpendicularmente ao plano de ruptura apresentam efeito máximo, enquanto em que as fibras que estão posicionadas de forma paralela a fissura, não registram reforço no comportamento mecânico.

No ensaio em que a malha com a dupla torção foi posicionada de modo paralelo a fratura até registrou melhorias na resistência mecânica, mas ainda é inferior ao obtido com a laminação em que se utiliza a malha com os fios de dupla torção perpendicular a fratura.

A Tabela 14 mostra os valores de resistência flexural da rocha calcítica natural em função da direção de laminação com a rede entrelaçada da fibra de bananeira.

Tabela 14- Valores de resistência flexural para mármore calcítico natural com resistências mecânicas dependentes da direção da dupla torção da fibra de bananeira em relação a fratura

Material	Resistência flexural (MPa)	Desvio padrão
Mármore calcítico sem laminação	7,52	1,76
Mármore calcítico laminado com fibra de bananeira paralela a fratura	12,53	0,69
Mármore calcítico laminado com fibra de bananeira perpendicular a fratura	16,72	2,69

A Figura 105 mostra o gráfico de intervalo de confiança da resistência flexural em função do sentido de direção da laminação da malha de fibra de bananeira no mármore calcítico natural. De acordo com os valores obtidos, resultado semelhante foi encontrado para o sentido de laminação da fibra de bananeira, ou seja, variando apenas o sentido da laminação, foi obtida uma melhora mecânica de 33% na resistência flexural. Isto ocorre porque utilizado a laminação com dupla torção paralela a fratura foi identificado o valor de $12,53 \pm 0,69$ MPa; já para a laminação com a rede da bananeira perpendicular a fratura, foi obtido o valor de $16,72 \pm 2,69$ MPa, mostrando o quão importante é a direção da laminação. Foi identificado que a rede da bananeira com dupla torção no sentido perpendicular proporciona a resistência mecânica esperada para a laminação, apresentando comportamento semelhante ao posicionamento de direção da fibra de vidro.

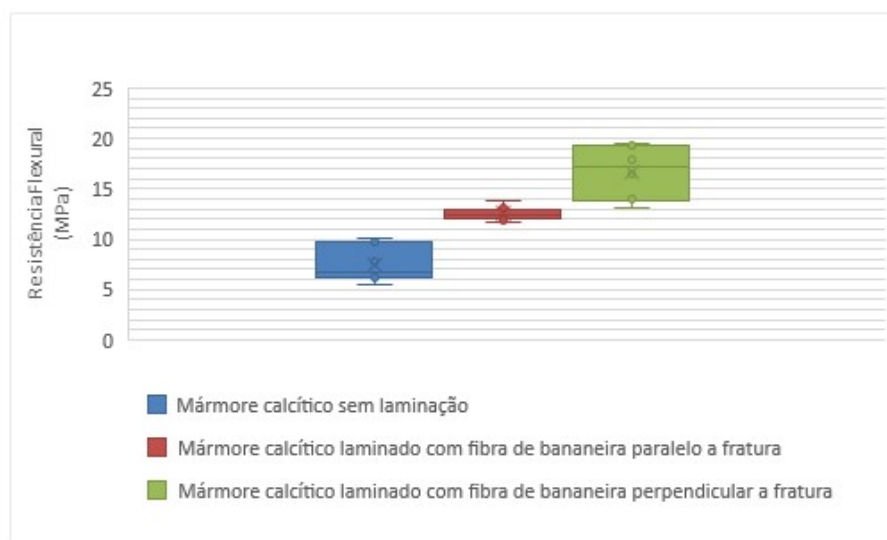


Figura 105- Comparação de resistência flexural para o sentido de direção de laminação da fibra de bananeira no mármore calcítico natural

4.3.2 Resistência à flexão

Para obtenção de resultados mecânicos, testes de resistência à flexão também foram feitos para o mármore calcítico natural no Lote 2 (grãos com maiores dimensões, região heterogênea) e foi registrado o valor de resistência a fratura de $10,966 \pm 1,769$ MPa. Tal valor representa uma melhoria de aproximadamente 46% no resultado mecânico quando comparado com o mármore calcítico sem laminação ($7,52 \pm 1,76$ MPa), ou seja, a malha entrelaçada com dupla torção perpendicular a fratura garantiu uma maior resistência ao material, fato que permite uma maior aplicabilidade do mármore, pois o mesmo pode ser aplicado em locais com maior solicitação de esforços. Há um ganho comercial com esta melhoria, pois isso aumenta a venda deste tipo de material que além de apresentar uma estética agradável aos olhos humanos, passa a ter uma maior resistência mecânica com um material sustentável. A Figura 106 mostra a representação das curvas de resistência à flexão.

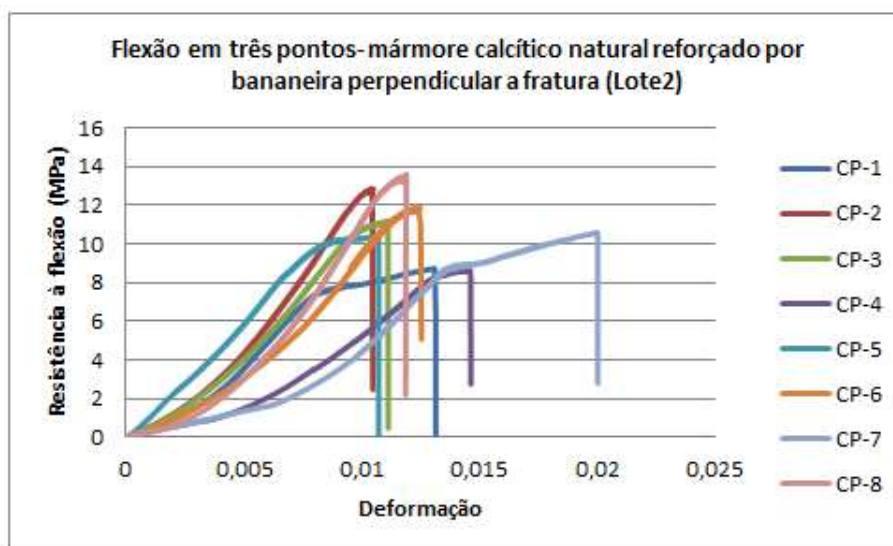


Figura 106- Resistência flexural do mármore calcítico natural laminado com fibra de bananeira dupla perpendicular a fratura (Lote 2)

Já em relação ao módulo elástico, foi obtido o valor de $0,934 \pm 0,216$ GPa. Este valor foi reduzido em relação ao mármore sem laminação, mostrando que a laminação na parte inferior aumentou a elasticidade do material, já que houve um crescimento progressivo e constante da curvatura, ou seja, maior ductilidade e tenacidade do material.

A parte superior da curva mostra a atuação da malha da bananeira no material, na qual é possível verificar que a curva demonstra no final da vida útil, um crescimento menor na curva da resistência, mostrando o início da fase plástica proporcionado, provavelmente, pela ação do conjunto da malha da bananeira com a resina epoxídica.

A Figura 107 mostra o intervalo de confiança das médias de resistência flexural da rocha calcítica natural, da rocha calcítica natural laminada com malha de fibra de vidro e da rocha calcítica natural laminada com malha de fibra de bananeira. No gráfico é possível perceber que a rocha calcítica por ser natural e apresentar avarias naturais, a mesma apresenta sua resistência mecânica comprometida e necessitada de reforço. A laminação com fibra de vidro proporciona melhorias mecânicas conforme o anunciado pelo fabricante industrial. Percebe-se que a laminação com malha de fibra de bananeira também proporciona melhorias mecânicas, com valores um pouco inferiores, mas que proporcionam a utilização das rochas em locais que anteriormente não poderiam ser utilizadas, além de ter benefícios ambientais.

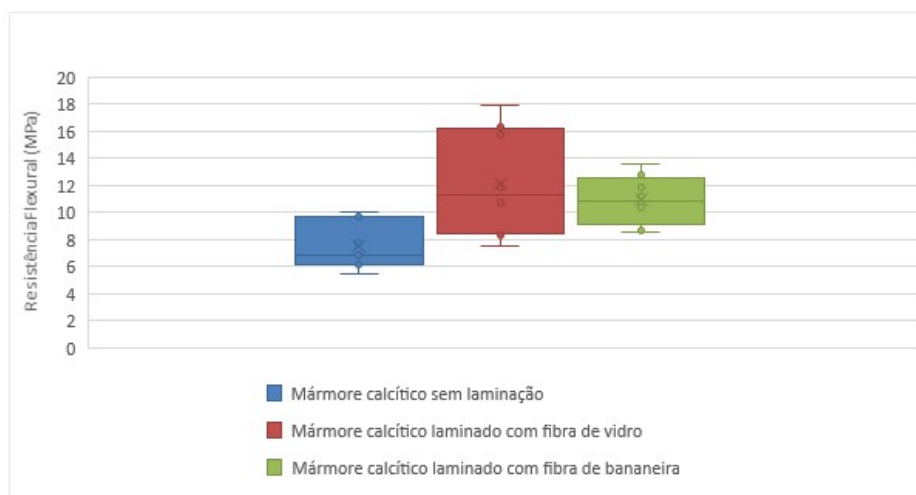


Figura 107- Intervalo de confiança da resistência flexural da rocha calcítica natural, rocha calcítica laminada com fibra de vidro e rocha calcítica laminada com fibra de bananeira

Também buscou identificar se a laminação fornecia melhoria mecânica do mármore artificial. Então, o mármore artificial laminado com fibra de bananeira foi submetido ao teste de flexão em três pontos. Vale destacar que o material utilizado foi do mesmo fabricante (exportado pela empresa Brumagran, em Cachoeiro de Itapemirim), no entanto não se sabe se a procedência do mesmo é derivada do mesmo lote, fato que pode explicar os valores diferenciados obtidos neste teste.

Devido a qualidade do material artificial, esperava-se, pelo menos, um valor maior ou igual de resistência mecânica do mármore artificial sem laminação. Ao contrário do esperado, foi obtido o valor de $32,817 \pm 1,356$ MPa. O valor está abaixo do resultado obtido sem a laminação, que foi de $35,367 \pm 3,597$ MPa. A Figura 108 mostra as curvas do ensaio de resistência à flexão.

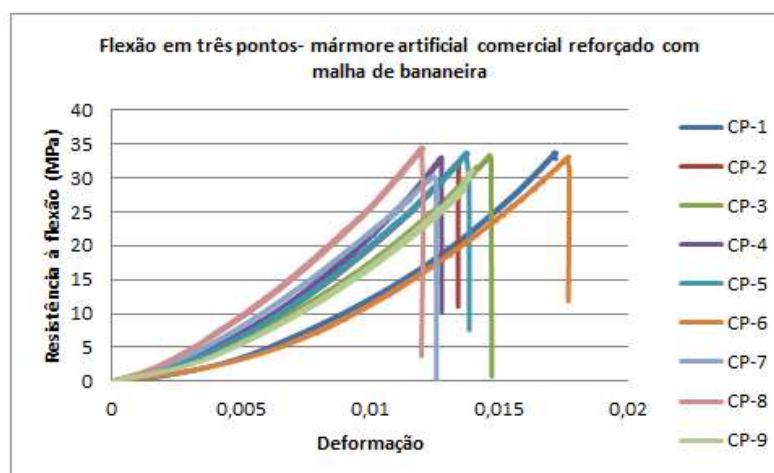


Figura 108- Resistência à flexão do mármore artificial comercial laminado com malha de bananeira

Para o módulo elástico, foi obtido um valor de $2,254 \pm 0,306$ GPa, o valor também está abaixo do encontrado no mármore sem laminação, que foi de $5,859 \pm 1,633$ MPa. Não houve absorção da resina pelo mármore em função da baixa porosidade do material e também pela verificação das imagens por microscopia. A fibra de bananeira com dupla torção foi posicionada de forma perpendicular a fratura, pois foi a posição identificada que proporcionou melhores propriedades mecânicas.

O resultado diferenciado obtido neste teste explica-se em virtude de possíveis lotes diferentes de fabricação do material artificial, no qual pode ter ocorrido algum procedimento diferente na fabricação. Não houve melhorias na resistência mecânica do material com o uso da laminação com fibras de bananeira, já que o mármore artificial por ser produzido industrialmente, já foi submetido a melhorias constantes e o mesmo dispensa o uso da laminação na parte inferior. Não há evidências e nem possibilidades de a laminação proporcionar propriedades mecânicas inferiores, pois no caso, somente não houve a atuação da malha da fibra de bananeira no material já que a resistência proposta pela fibra é inferior a resistência mecânica atuante da rocha artificial comercial.

A rocha comercial artificial também foi laminada com fibra de vidro e submetida a testes de flexão em três pontos. O resultado encontrado de valor de resistência foi bem semelhante ao obtido com a laminação de bananeira. Para a laminação com fibra de vidro, foi encontrado o valor de $33,193 \pm 2,632$ MPa, no qual também está inferior ao encontrado na rocha sem laminação. Ou seja, para as rochas artificiais, a laminação tanto com fibra de bananeira quanto com fibra de vidro na parte inferior não proporcionou melhorias mecânicas. A Figura 109 mostra as curvas do teste de flexão em três pontos da rocha artificial laminada com fibra de vidro.

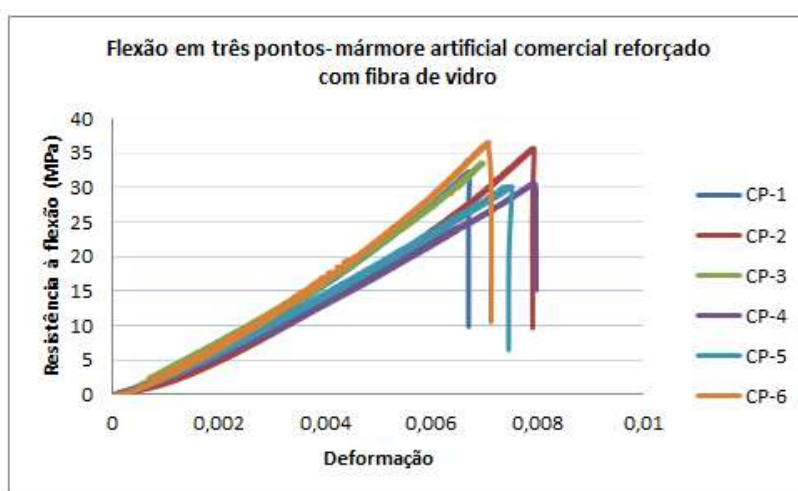


Figura 109- Resistência à flexão do mármore artificial comercial laminado com fibra de vidro

Para o módulo elástico, foi obtido o valor de $4,402 \pm 0,473$ GPa. O valor obtido está dentro da faixa comercial encontrada para rochas artificiais. A fratura denotou ser do tipo frágil, a laminação não atuou mecanicamente como um reforço. Como a laminação teve uma fina camada e a rocha artificial possui uma espessura superior, houve a predominância da resistência mecânica da rocha artificial. As fibras com dupla torção foram colocadas de modo perpendicular a fratura, pois foi a posição indicada nos testes que proporcionaria maior resistência mecânica. No entanto, não houve melhorias nem mesmo no sentido recomendado.

A Figura 110 mostra o gráfico de intervalo de confiança das médias da tensão flexural das rochas artificial comercial sem laminação, da rocha artificial laminada com fibra de vidro e da rocha artificial laminada com fibra de bananeira. Este gráfico confirma nas médias que não houve melhorias mecânicas na rocha artificial comercial com o processo de laminação. Isto ocorreu em virtude de as rochas

artificiais comerciais já possuem resistência mecânica considerável que, provavelmente, é obtida através do processo de produção com o agente aglutinante (resina). Ocorreu uma pequena variação de resistência das rochas artificiais que são provenientes em função dos diferentes lotes de produção comercial. Não há possibilidade de a laminação reduzir a resistência mecânica das rochas, a mesma poderia não acrescentar melhorias mecânicas, mas não reduzir propriedades mecânicas do material.

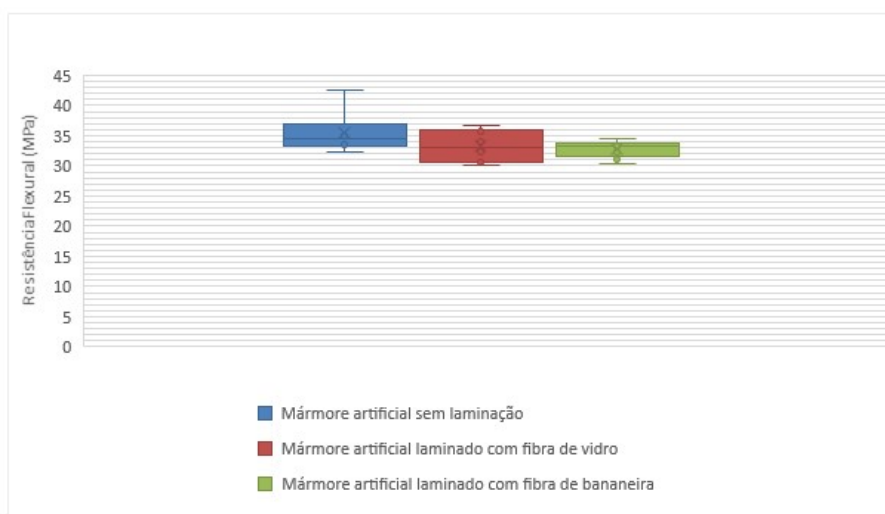


Figura 110- Intervalo de confiança da resistência flexural das rochas artificiais comerciais isentas de laminação, laminadas com fibra de bananeira e com fibra de vidro

A rocha artificial produzida com resíduo de rocha calcítica e resina epoxídica também foram laminadas com malha de fibra de vidro (Figura 111), seguindo as mesmas orientações de laminação, colocando a malha de fibra de vidro de forma perpendicular a fratura.

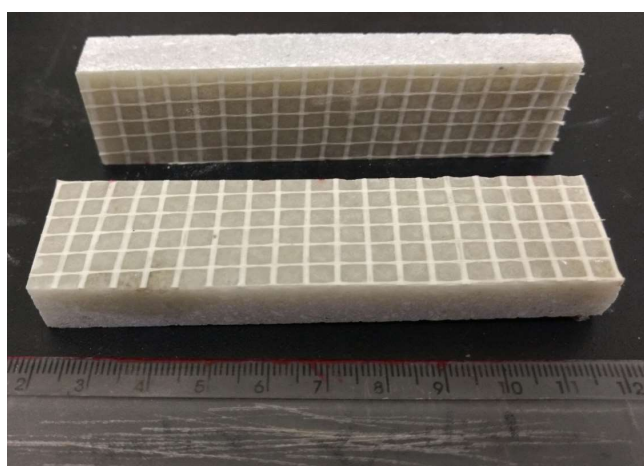


Figura 111- Rocha artificial produzida e laminada com fibra de vidro

O teste de flexão em três pontos apresentou uma resistência flexural de $30,79 \pm 2,78$ MPa para a rocha artificial laminada com malha de fibra de vidro. Percebe-se que no gráfico (Figura 112) que as curvas de tensão versus deformação apresentaram homogeneidade. O valor encontrado encontra-se na mesma faixa encontrada para os mármore artificiais isentas de laminação. Tal fato demonstra que a laminação com fibra de vidro não proporcionou melhorias mecânicas na rocha produzida. Isto ocorreu, provavelmente, porque a confecção deste material já ocorre em vibro compressão a vácuo, produzindo um material com excelentes propriedades mecânicas, dispensando o uso de reforços na base inferior do material.

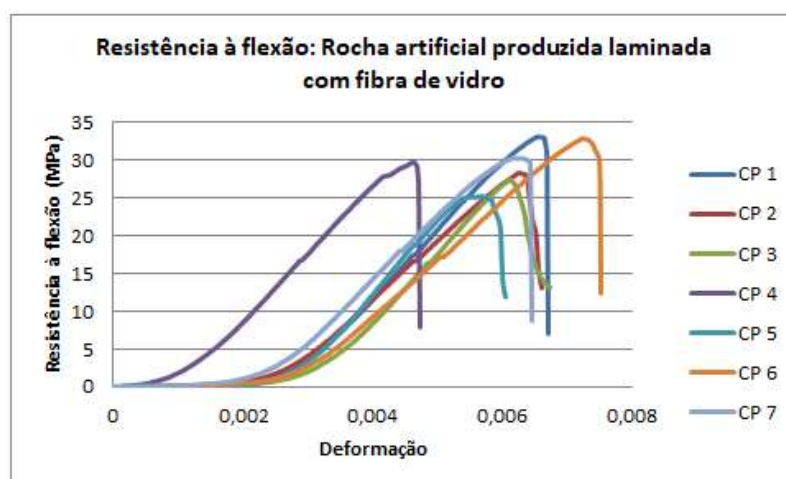


Figura 112- Gráfico de resistência flexural da rocha artificial produzida e laminada com fibra de vidro

A rocha artificial que teve a malha de fibra de vidro prensada juntamente com a malha de fibra de vidro (Figura 113) também teve a resistência mecânica avaliada através do teste de flexão em três pontos.

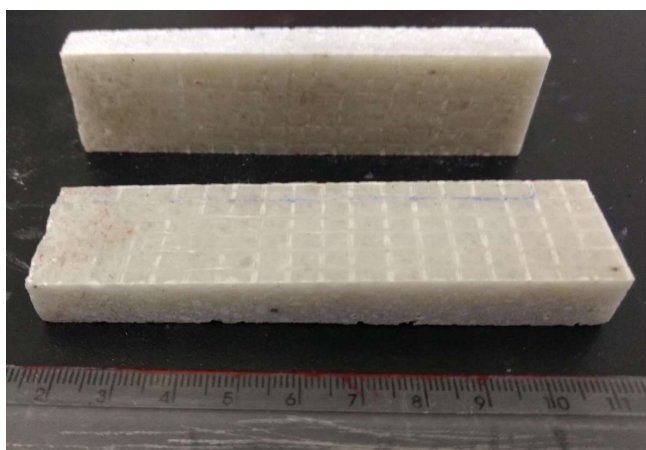


Figura 113- Rocha artificial produzida com fibra vidro reforçando o interior da matriz epoxídica

A resistência flexural para a rocha sintética com a matriz reforçada com fibra de vidro apresentou um comportamento homogêneo das curvas tensão versus deformação (Figura 114). Foi registrado um valor de resistência de $30,86 \pm 2,91$ MPa, valor que demonstra que nem mesmo a rede de fibra de vidro no interior da matriz proporciona um reforço mecânico na rocha artificial a base de resíduo calcítico e resina epoxídica.

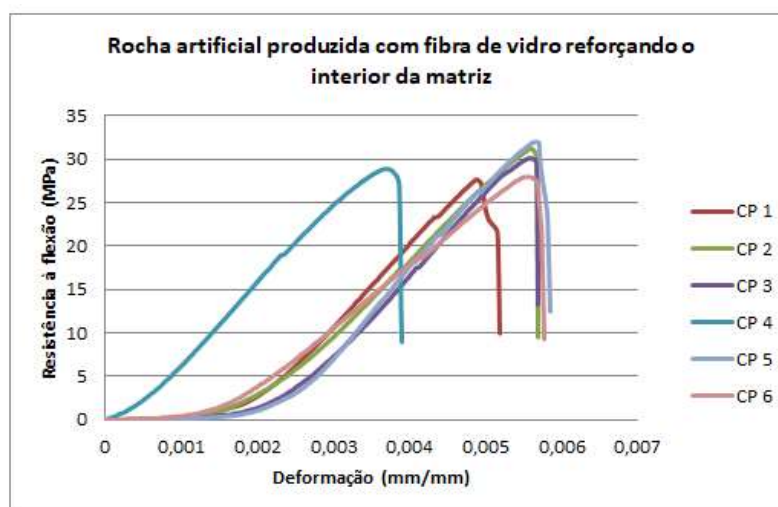


Figura 114- Gráfico de resistência flexural da rocha artificial produzida com fibra de vidro reforçando o interior da matriz

A rocha artificial produzida também teve a laminação com malha de bananeira entrelaçada com dupla torção (Figura 115). Os corpos de prova foram cortados com refrigeração, evitando qualquer tipo de aquecimento que pudesse modificar as ligações químicas da matriz.

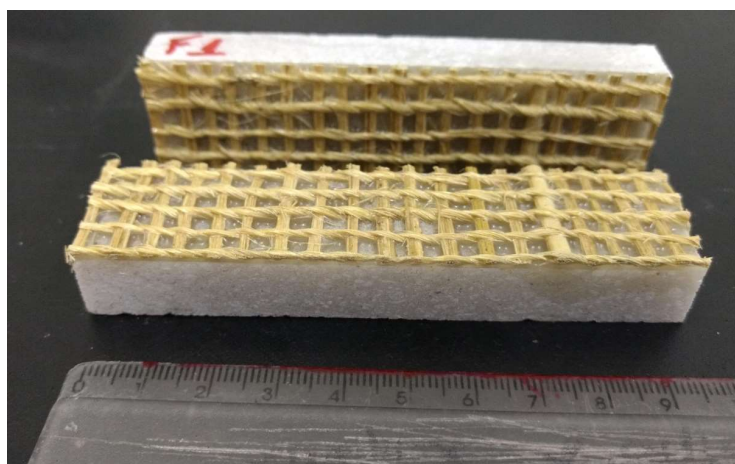


Figura 115- Rocha artificial produzida e laminada com malha de fibra de bananeira

Os resultados do teste de ensaio de flexão em três pontos (Figura 116) também foram semelhantes e ficaram dentro da média encontrada para os outros testes realizados em rocha produzida. Foi obtida uma média de $28,79 \pm 4,38$ MPa, demonstrando que a laminação com fibra de bananeira também não teve influências mecânicas positivas.

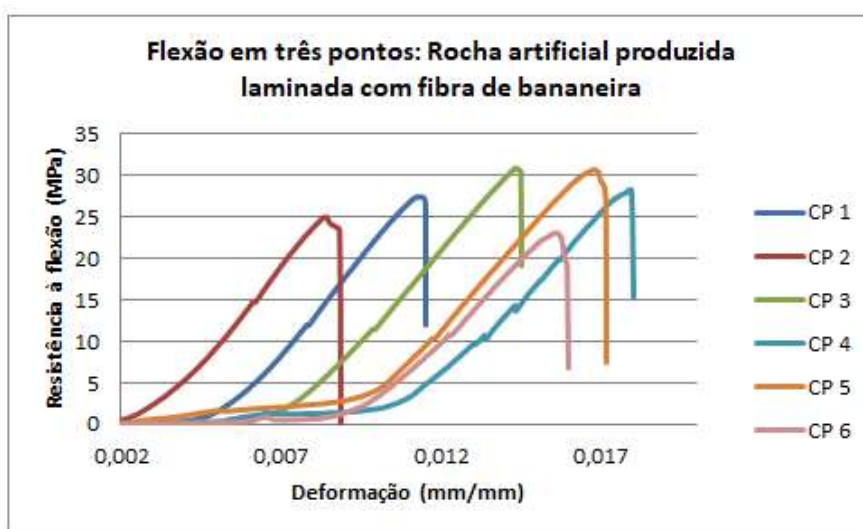


Figura 116- Gráfico de resistência flexural da rocha artificial produzida e laminada com fibra de bananeira

A malha entrecruzada da fibra de bananeira também foi prensada juntamente com a matriz epoxídica com os resíduos da rocha calcítica (Figura 117), em uma hipótese de a mesma poder fortalecer a matriz e suportar um maior esforço mecânico.

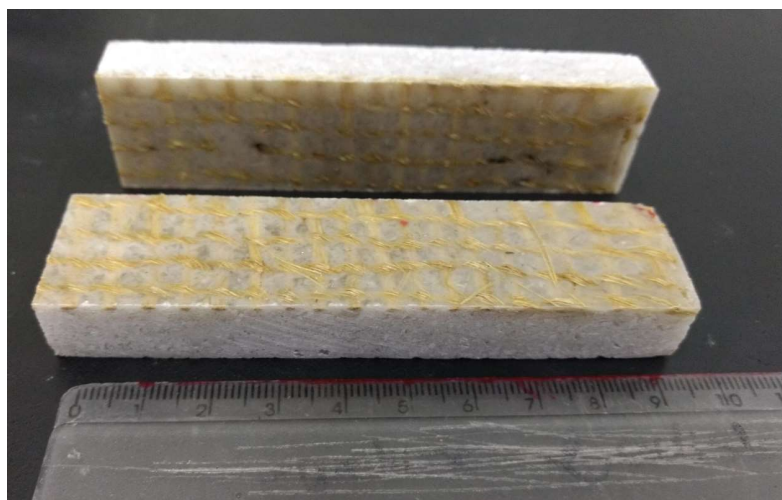


Figura 117- Rocha artificial produzida com malha de fibra de bananeira reforçando o interior da matriz epoxídica

A média da resistência flexural da rocha calcítica com malha de bananeira em sua matriz epoxídica apresentou uma resistência de $31,62 \pm 3,77$ MPa (Figura 118), resultado que se encontra dentro do esperado para rochas a partir da base epoxídica e resíduo calcítico.

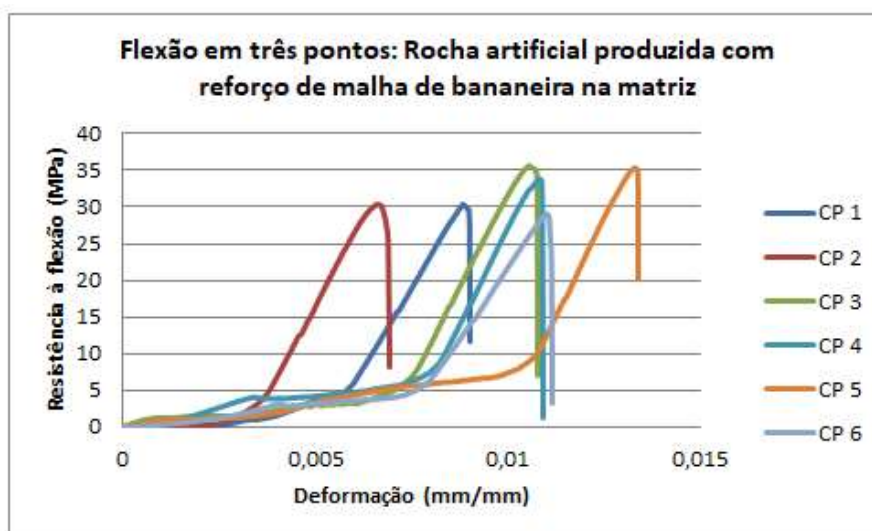


Figura 118- Gráfico de resistência flexural da rocha artificial produzida com fibra de vidro reforçando o interior da matriz

A Figura 119 mostra o gráfico de intervalo de confiança média dos testes de flexão em três pontos para o mármore artificial produzido sem laminação, laminado com fibra de vidro e laminado com fibra de bananeira. É ilustrado no gráfico que como as rochas artificiais produzidas já são confeccionadas a partir de resina epoxídica que preenche os vazios e como são produzidas por meio da vibro compressão a vácuo, as propriedades mecânicas de tais rochas já foram otimizadas e apresentam propriedades mecânicas consideráveis. Assim, tanto a laminação com fibra de vidro ou com fibra de bananeira, não proporciona melhorias mecânicas neste tipo de material.

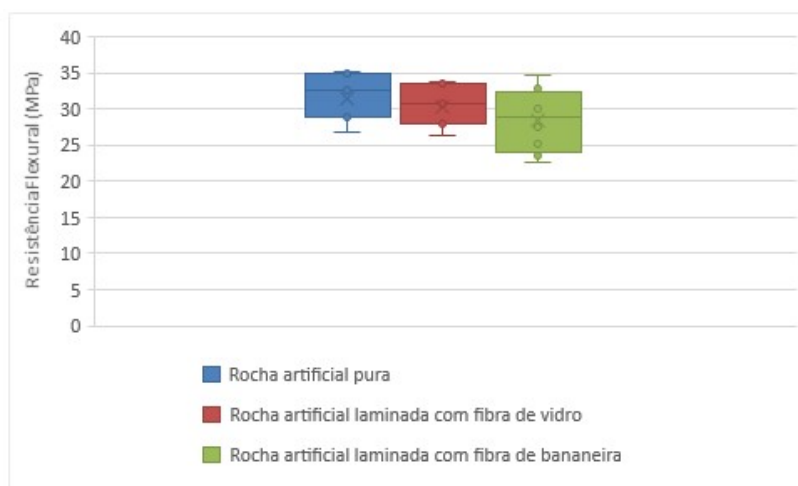


Figura 119- Intervalo de confiança da resistência flexural do mármore artificial produzido sem laminação, laminado com malha de fibra de vidro e laminado com malha de fibra de bananeira

Já a Figura 120 mostra o gráfico de intervalo de confiança média dos testes de flexão em três pontos para o mármore artificial produzido sem laminação, mármore artificial produzido com reforço de fibra de vidro na matriz epoxídica e também o mármore artificial produzido com reforço de fibra de bananeira na matriz epoxídica. Neste teste, nem mesmo o reforço interno, tanto da fibra de vidro quanto da fibra de bananeira no interior da matriz epoxídica, proporcionaram melhorias mecânicas no mármore artificial produzido. O reforço interno na matriz foi feito como tentativa de melhorias e inovações na produção da rocha artificial, no entanto, a laminação somente teve resultados positivos em rochas ornamentais naturais.

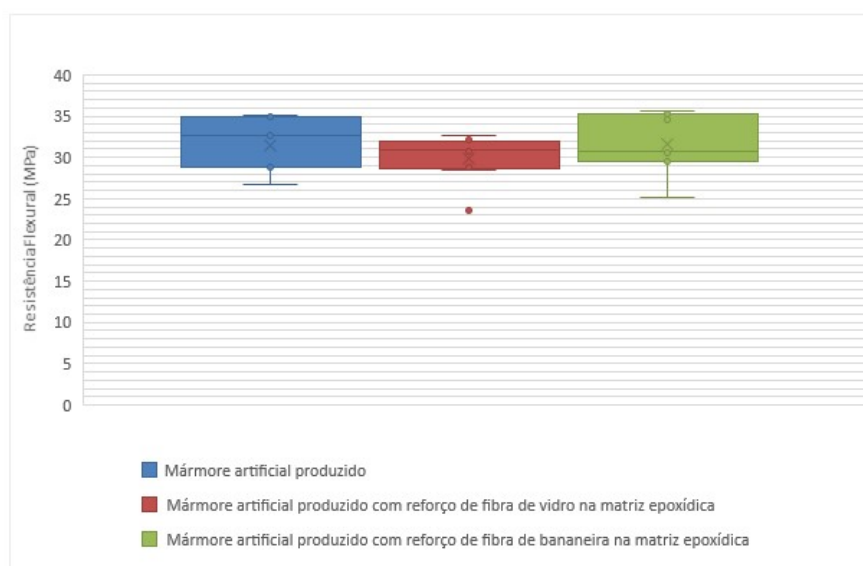


Figura 120- Intervalo de confiança da resistência flexural do mármore artificial produzido sem laminação, reforçado com fibra de vidro no interior da matriz e reforçado com malha de bananeira no interior da matriz

4.3.3 Impacto de Corpo Duro

O teste de impacto de corpo duro é utilizado para analisar a resistência da rocha mediante a queda de um objeto. Neste teste, uma bola de metal é submetida a queda de alturas variáveis até ter a detecção inicial de uma trinca e posteriormente a fratura na rocha.

O mármore calcítico foi submetido ao teste em três condições (Figura 121): sem laminação, com laminação de fibra de bananeira e laminada com fibra de vidro. As três condições foram utilizadas para verificar se a laminação proporcionou melhorias mecânicas na rocha calcítica natural.

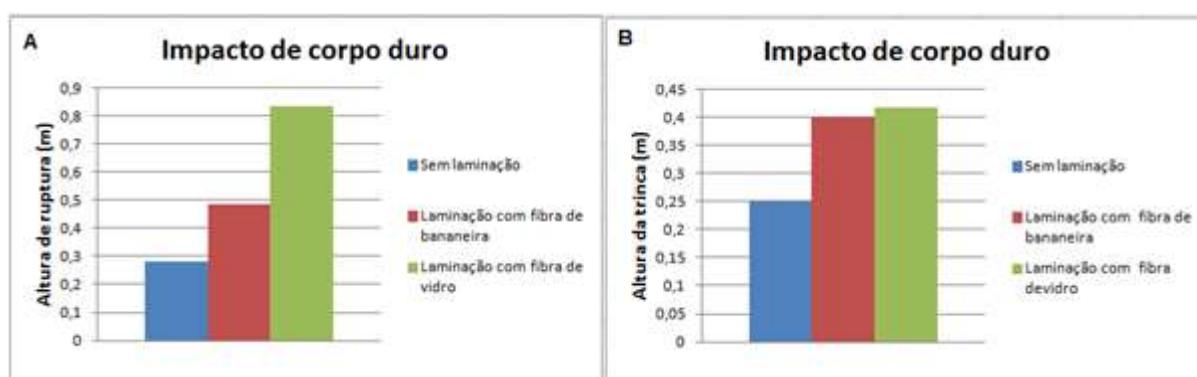


Figura 121- (A) Valores de ruptura no teste do impacto de corpo duro para a rocha calcítica natural; (B) Valores de trinca para o ensaio de impacto de corpo duro para a rocha calcítica natural.

A rocha calcítica natural sem laminação apresentou fissuras em 0,25m e teve ruptura em $0,283 \pm 0,028$ m. Já a rocha laminada com fibra de bananeira teve fissura em $0,4 \pm 0,05$ m e a ruptura em $0,483 \pm 0,057$ m. Comparando a rocha laminada com fibra de bananeira com a rocha sem laminação, percebe-se que a laminação com a bananeira proporcionou melhoras mecânicas em relação ao aparecimento de fissuras em torno de 60%, Já em relação à ruptura, a rocha laminada com fibra de bananeira apresentou cerca de 70% de aumento em relação à altura de ruptura se comparada com a rocha calcítica sem a laminação. Essas melhorias proporcionariam a utilização da rocha em locais que anteriormente não poderiam ser utilizadas, ou seja, a mesma apresentou melhores resultados e tornou-se mais resistente a quedas de objetos no cotidiano.

Já a rocha calcítica laminada com fibra de vidro apresentou fissuras em $0,416 \pm 0,028$ m e ruptura em $0,833 \pm 0,076$ m. Em relação a fissura, o valor apresentado encontra-se próximo ao valor proporcionado de melhoria da fibra de

bananeira, ou seja, houve um aumento no valor de aproximadamente 66%. Já comparado com o valor de ruptura, a fibra de vidro proporcionou uma superioridade de aproximadamente 240% em relação a rocha sem laminação. É nítido que a fibra de vidro proporciona melhorias, no entanto também ocorreu otimização significativa com a fibra de bananeira, os valores não foram tão elevados quanto a de vidro, mas proporcionou uma utilização maior da rocha em locais anteriormente não utilizadas.

4.3.4 Análise Termogravimétrica- TGA

O teste de termogravimetria permite avaliar a variação percentual em peso das amostras quando as mesmas são submetidas a um aumento constante de temperatura. A análise do gráfico demonstra que a curva característica do mármore calcítico natural (em verde) apresenta apenas uma queda, demonstrando a decomposição do carbonato do mármore em óxido, registrando uma perda de massa em torno de 40% (RIBEIRO e RODRIGUEZ, 2015; SILVA, 2016; SILVA *et al.*, 2017). Resultado semelhante foi encontrado por Silva *et al.* (2017) que também registrou uma perda de massa de 40% para o mármore calcítico; Souza e Bragança (2013) registraram uma queda de massa de 43% em um material calcítico com 57% de CaO; Barcina *et al.* (1997) em pesquisa com calcário, observou uma perda de 44% em aproximadamente 800°C; e Ribeiro e Rodriguez (2015) em suas pesquisas com mármore calcítico natural encontraram uma perda de massa de 44% em 850°C.

É possível visualizar no gráfico (Figura 122) que em torno de 330°C, houve a temperatura inicial do primeiro evento térmico tanto para a rocha natural laminada com fibra de bananeira, quanto para a rocha natural laminada com fibra de vidro.

Na curva da rocha laminada com fibra de bananeira, é possível perceber três eventos térmicos, eventos semelhantes aos observados na fibra de bananeira “*in natura*”, a primeira queda de massa na curva refere-se à degradação da fibra de bananeira, em torno de 330°C. Já a segunda queda da curva refere-se ao início da degradação da resina epoxídica que é utilizada para laminar, em torno de 350°C; e o terceiro evento retrata a decomposição do carbonato do mármore em óxido.

Para a rocha laminada com fibra de vidro, foi identificada decomposição da fibra de vidro em torno de 350°C, associado a decomposição da resina epoxídica, e posteriormente a decomposição do mármore.

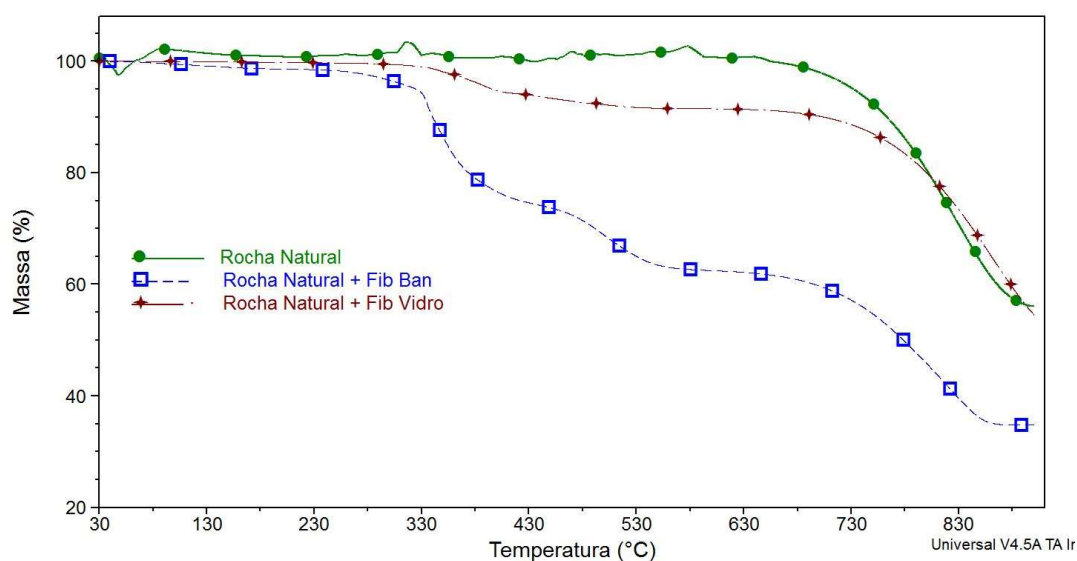


Figura 122- Análise termogravimétrica da rocha natural isenta de laminação, rocha natural laminada com fibra de bananeira e rocha natural laminada com fibra de vidro

As perdas de massa do gráfico (Figura 123) são provenientes tanto da decomposição do polímero, registrando informações diretas sobre a estabilidade térmica dos materiais. Para o mármore artificial, são registrados dois momentos com perda de massa, sendo que a primeira perda se refere a queima da resina epoxídica, já a segunda perda refere-se à decomposição do carbonato em cálcio (RIBEIRO e RODRIGUEZ, 2015; SILVA, 2016; SILVA *et al.*, 2017).

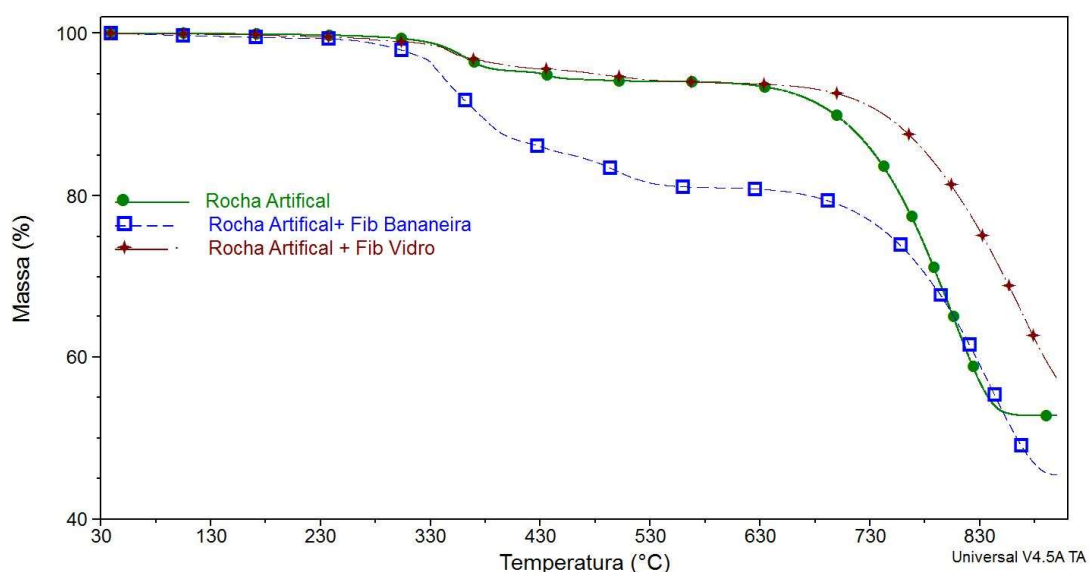


Figura 123- Análise termogravimétrica da rocha artificial comercial isenta de laminação, rocha artificial laminada com fibra de bananeira e rocha artificial laminada com fibra de vidro

4.3.5 Microscopia da região de fratura das rochas laminadas

A região de fratura também foi analisada com a microscopia confocal. A imagem da Figura 124(A) mostra a região de fratura de uma rocha natural laminada com fibra de bananeira. É possível analisar na imagem que a resina teve uma boa adesão na rocha e que os espaços vagos entre as fibras de bananeira foram preenchidos pela resina epoxídica.

Em função da característica termorrígida da resina, a fratura provocada foi do tipo frágil. Uma pequena quantidade de bolha foi identificada na região de adesão entre a bananeira e a rocha, a maior concentração das mesmas foi na parte superior da laminação, fato que justifica a melhoria mecânica proporcionada pela laminação nas rochas naturais.

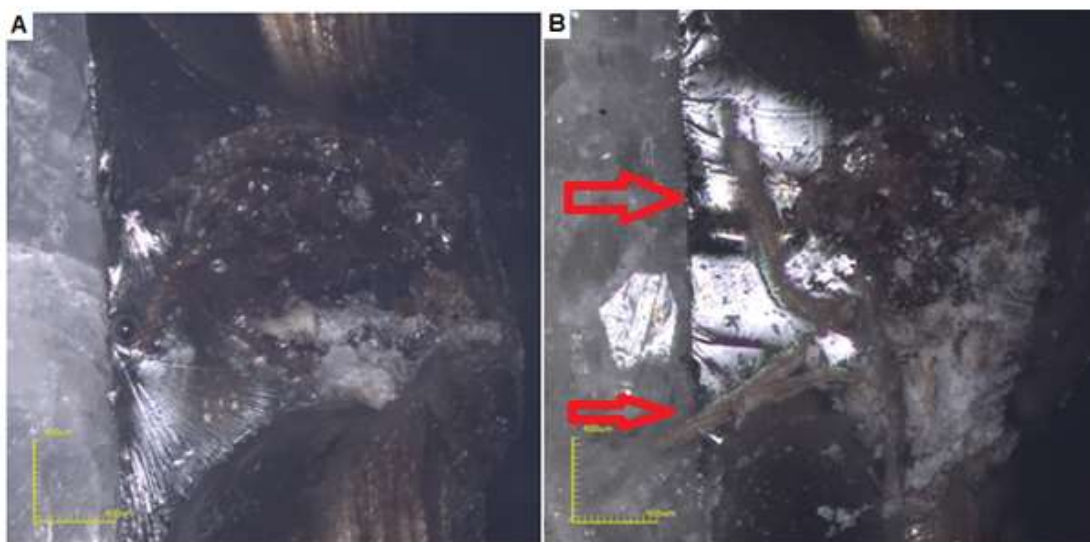


Figura 124- (A) Região de fratura da rocha natural com laminação da malha da fibra de bananeira com aumento de 108x; (B) Região de fratura da rocha artificial comercial com laminação da malha da fibra de bananeira com aumento de 108x

Comportamento semelhante foi encontrado na rocha artificial laminado com malha de bananeira (Figura 124 (B)), pois a fratura identificada também foi de característica frágil, na qual houve um desprendimento de alguns fios da bananeira da resina epoxídica que a recobria na laminação, no entanto para a caracterização geral, nota-se que houve um rompimento da fibra no local exato da fratura. Vale destacar que houve um molhamento eficiente na fibra e que ocorreu uma adesão satisfatória de resina entre a fibra e a rocha em virtude da polaridade existente que proporcionou uma adesão satisfatória entre os componentes utilizados.

Na Figura 124 (B), a fibra destacada foi desprendida da laminação. Isso ocorreu, provavelmente, porque especificamente neste ponto da laminação, pode ter ocorrido uma adesão insatisfatória devido a polpa residual em torno da fibra que pode ter dificultado a adesão entre a fibra e a resina acarretando, consequentemente, o “*pull out*” (arrancamento) da fibra mediante a solicitação de um esforço.

Na imagem, o brilho que predomina na resina que está entre a fibra e a rocha ocorreu devido a uma limitação da captação das imagens pela microscopia confocal, já que o laser refletiu na região clara e provocou a luminosidade presente na imagem.

A região de fratura da fibra de vidro na rocha natural também está ilustrada na Figura 125(A). Nesta imagem é possível perceber uma fina camada na superfície da rocha, mas que foi suficiente para recobrir a fibra. O fio de fibra neste ponto atuou como um reforço na parte inferior da rocha.

Nota-se na Figura 125(A) que houve o desprendimento da fibra de vidro da rede entrelaçada, no entanto a fibra estava aderida satisfatoriamente nesta região, já que é possível visualizar os cristais rompidos bem próximos a região em que foi desprendida a fibra. Isto ocorreu provavelmente em função do esforço e como a fibra demonstra ser mais resistente que a rocha, ao ser repuxado da rocha, os cristais próximos trincaram os grãos já que a fibra estava submetida à tração no momento crítico do esforço.

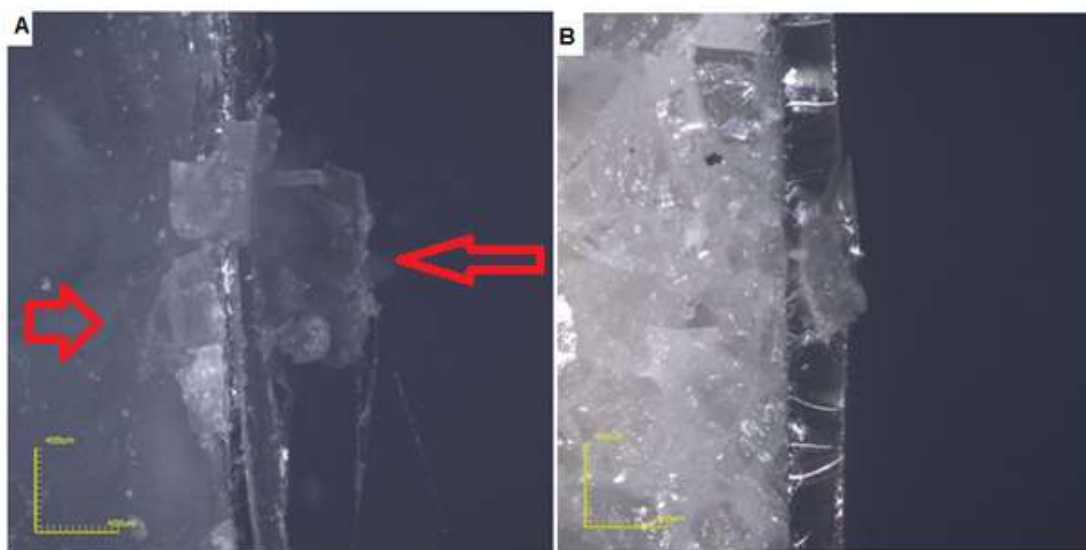


Figura 125- Região de fratura da rocha calcítica natural laminada com fibra de vidro com aumento de 108x; (B) Região de fratura da rocha artificial comercial laminada com fibra de vidro com aumento de 108x.

Na Figura 125(B) é demonstrada a imagem da fratura da rocha artificial laminada com fibra de vidro. Devido à consistência da rocha artificial comercial e propriedades mecânicas elevadas, a fibra de vidro utilizada na laminação não atuou como reforço. Nota-se que os grãos em torno da fibra não sofreram nenhum dano ou início de trincas como houve como na rocha calcítica natural. Identifica-se na imagem que a fibra de vidro teve boa adesão e o rompimento da mesma ocorreu no ponto exato de fratura frágil da rocha.

Uma fina camada de resina que estava na parte superior da fibra teve uma trinca no momento da ruptura, fato característico do rompimento. Como a rocha artificial tem porosidade baixa e não houve invasão da resina para a parte interna da rocha, a resina epoxídica utilizada na laminação não influenciou em resultados positivos de melhora de propriedades mecânicas.

Para analisar se houve uma boa adesão e como foi o rompimento da rede entrelaçada da bananeira no mármore calcítico natural, amostras de fratura da rocha natural com laminação de fibras de bananeira foram estudadas. A Figura 126 (A, B) mostra imagens da região de fratura com aumentos de 400 e 450 vezes, respectivamente.

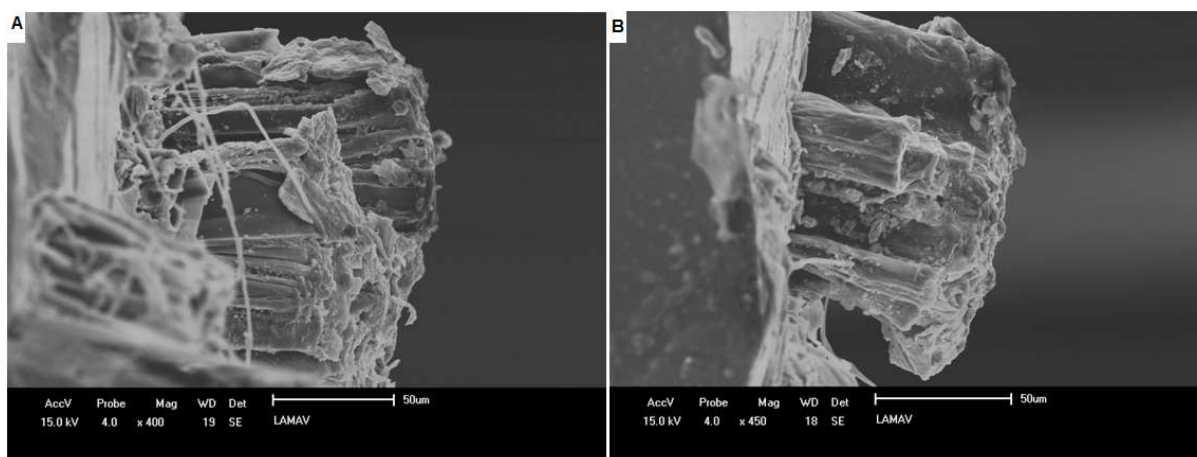


Figura 126 (A, B)- Micrografia eletrônica de varredura da região de fratura do mármore calcítico natural laminado com fibra de bananeira produzida com aumentos de 400x(A) e 450x(B)

Foi identificado na Figura 126 (A, B) que o rompimento ocorreu de forma frágil, já que com a impregnação da resina epoxídica DGEBA/TEPA, a fibra de bananeira atuou como um reforço no sistema, e a resina realizou a função de matriz no conjunto. Consequentemente, houve uma melhoria na resistência mecânica da

rocha com a utilização da rede entrelaçada da bananeira na laminação da superfície inferior da rocha.

Não houve desprendimento da rede entrelaçada da rocha calcítica natural no momento da solicitação de esforço, fato que mostra uma boa adesão entre os componentes, derivada de uma interface satisfatória.

Imagens de fratura do mármore calcítico laminadas com fibra de vidro também foram analisadas, a Figura 127 (A, B) está com ampliações de 100 e 450 vezes, respectivamente.

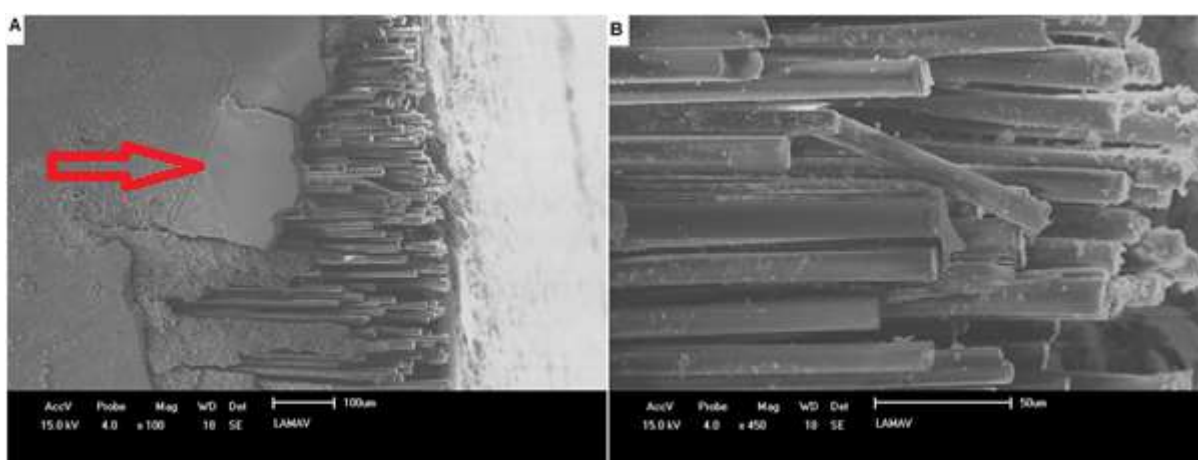


Figura 127 (A, B)- Micrografia eletrônica de varredura da região de fratura do mármore calcítico natural laminado com fibra de vidro produzida com aumentos de 100x(A) e 450x(B)

Na Figura 127 (A) é verificado que no local da fratura há uma ausência da resina na parte superior da fibra que recobre o mármore. A resina foi retirada, provavelmente, no momento da solicitação do esforço para romper o material no ensaio de flexão em três pontos. Como os filamentos não rompem todos ao mesmo tempo, provavelmente os mais externos são os primeiros a ser rompidos em virtude do esforço de flexão que são submetidos e com isso, a resina externa é deslocada, fato que permite a visualização dos filamentos de fibra de vidro rompidos.

Os filamentos rompidos possuem comportamento semelhante durante toda a fratura, mostrando homogeneidade no sistema de laminação da rocha natural com rede entrelaçada da fibra de vidro. Não foi identificada alteração no tamanho do diâmetro dos filamentos da fibra de vidro com o rompimento da rocha durante a solicitação de esforço.

Imagens microscópicas da fratura do mármore artificial comercial laminado com rede entrelaçada da fibra de bananeira também foram analisadas. A Figura 128 (A, B e C) retrata ampliações de 70 vezes, 80 vezes e 240 vezes, respectivamente.

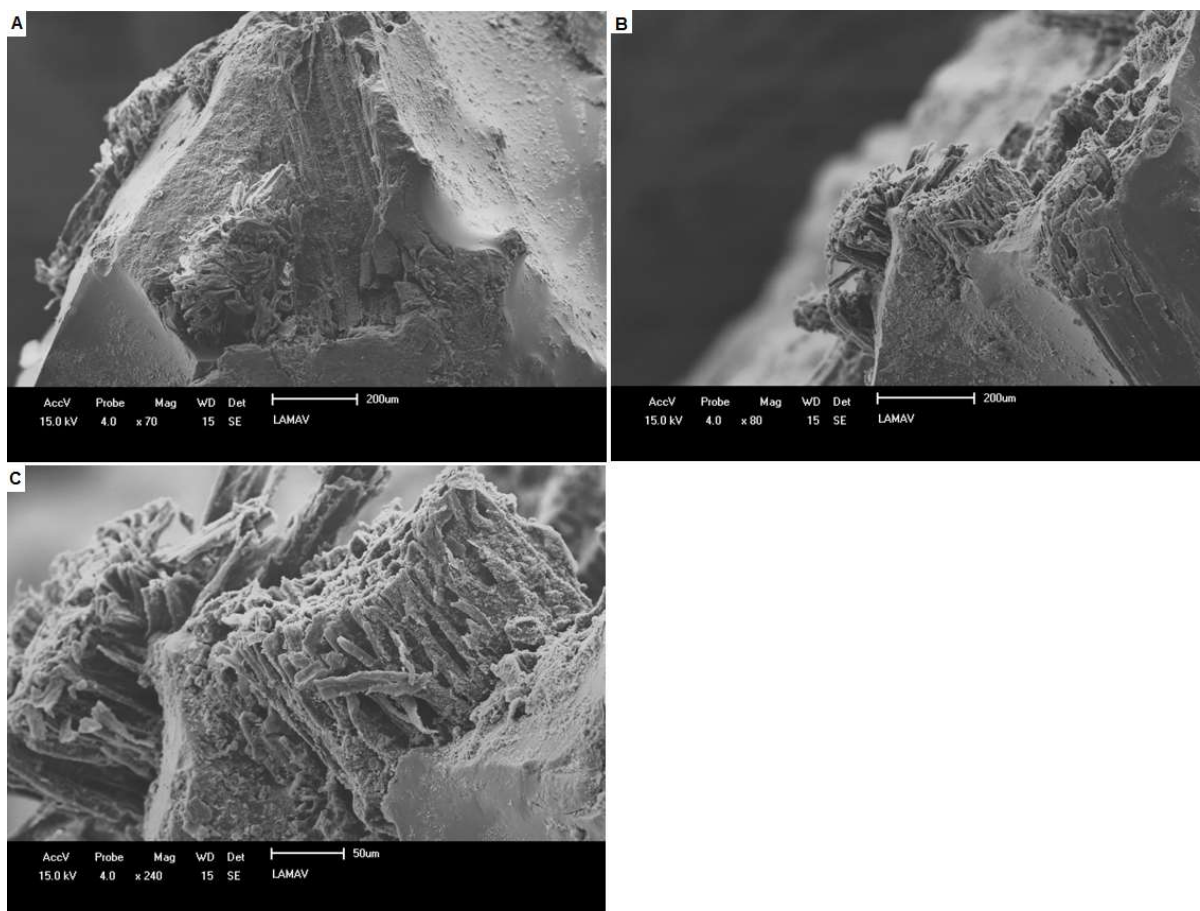


Figura 128 (A, B, C)- Micrografia eletrônica de varredura da região de fratura do mármore artificial comercial laminado com fibra de bananeira produzida com aumentos de 70x(A), 80x(B) e 240x(C)

Com as ampliações, identifica-se que houve uma boa aderência da rede de fibras de bananeira na rocha, já que as fibras estão com a superfície totalmente preenchida com a resina. Nota-se que houve o rompimento das fibras em virtude do rompimento do material mediante a solicitação de esforço no ensaio de flexão em três pontos. Imagens microscópicas da fratura do mármore artificial laminado com fibra de vidro com aumentos de 150 vezes e 350 vezes estão representadas na Figura 129(A, B).

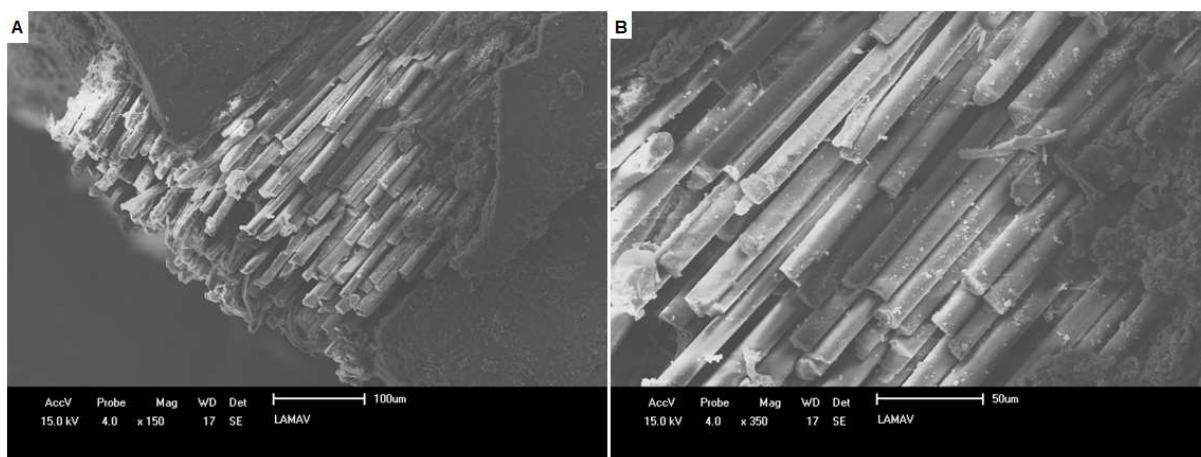


Figura 129 (A, B)- Micrografia eletrônica de varredura da região de fratura do mármore artificial comercial laminado com fibra de vidro produzida com aumentos de 150x(A) e 350x(B)

Fica visível na imagem ampliada que os filamentos da fibra de vidro não sofreram alterações no diâmetro no momento da fratura. Além disso, como característica, na imagem é possível visualizar que também há ausência da resina no local da fratura. Isto ocorreu, provavelmente, porque no rompimento dos filamentos da fibra de vidro, ocorreu a retirada da resina na parte superior da laminação na fibra de vidro em virtude dos filamentos que foram rompidos.

CAPÍTULO 5: CONCLUSÃO

A caracterização física, química e mecânica realizada na fibra do pseudocaule da bananeira na modalidade prata, colhida na região de Cachoeiro de Itapemirim, mostrou valores dentro da faixa esperada para fibras naturais, fato que permite a utilização da mesma como reforço na laminação de rochas ornamentais naturais. Vale destacar que tanto o teste de composição química quanto o teste de infravermelho, denotaram características de fibras lignocelulósicas, e os testes mecânicos (pullout e tração) denotaram resistência mecânica satisfatória para utilização da mesma no objetivo proposto desta pesquisa de doutoramento.

A utilização da malha entrecruzada da malha da bananeira proporcionou melhorias mecânicas de até 50% na resistência à flexão nas rochas calcílicas naturais, resultado satisfatório que proporciona uma maior utilização desta rocha em diversos lugares que antes não poderia ocorrer em função da fragilidade e defeitos naturais existentes na mesma.

Apesar da fibra de vidro ter proporcionando um valor de resistência mecânica maior na laminação de rochas naturais calcílicas se comparada com a laminação com fibra de bananeira, a utilização da fibra da banana ainda se destaca por deter vantagens econômicas- ambientais que justificam seu uso na laminação de rochas naturais. Além disso, a norma ASTM C503 determina que este tipo de rocha calcílica necessita ter pelo menos 7 MPa de resistência para atender a classificação de rocha comercial, sendo assim, a laminação com esta fibra natural de bananeira atende a normativa e permite a utilização da mesma com a melhoria na resistência mecânica.

Em relação ao teste de impacto de corpo duro, a laminação com fibra de bananeira aumentou em 70% a altura do aparecimento de trincas, fato positivo que denota o quanto a laminação com fibra de banana pode melhorar as propriedades mecânicas de rochas naturais.

No entanto, em rochas artificiais comerciais não foram observadas melhorias mecânicas com a utilização da malha na parte posterior destas rochas em testes de flexão em três pontos, tendo em vista que este tipo de rocha já foi produzida por um processo envolvendo melhorias mecânicas em relação a rocha calcílica natural e a matriz formadora da mesma (resina) apresenta características mecânicas superiores a malha entrecruzada da fibra de bananeira.

Vale destacar que não houve melhorias mecânicas para as rochas artificiais comerciais nem mesmo com a utilização da malha da fibra de vidro que, usualmente, é utilizada na comercialização da laminação em rochas naturais. Foi identificado que nenhum tipo de laminação acarretou melhorias neste tipo de rocha artificial comercial, já que o modo de produção da mesma já garante características mecânicas e físicas satisfatórias, pois são produzidas pela aglomeração de rochas e resina. Por isso, não há falhas no material produzido, logo não necessitem de reforço neste tipo de material, fato oposto ao que ocorre com as rochas naturais.

Em rochas artificiais produzidas partir do conceito de Silva (2016) com resíduo de mármore calcítico e resina epoxídica, também não foram notadas melhorias mecânicas nas rochas com o processo de laminação tanto com fibra de bananeira quanto com fibra de vidro. Isto também ocorreu porque assim como as rochas artificiais comerciais, a rocha artificial produzida também já apresenta características mecânicas satisfatórias obtidas pela seleção de material formador e em função da metodologia de fabricação utilizada, vibro compressão à vácuo, que proporcionou um material resistente mecanicamente.

Vale ressaltar que apesar da laminação não ter proposto melhorias mecânicas em rochas artificiais, a laminação impediu a fratura súbita e a carga oscilou em seu lento decréscimo, fato que ocorreu em virtude da resistência que a fibra acarretou à propagação de trincas por meio da matriz epoxídica.

Além disso, as imagens microscópicas e o teste pullout denotaram que houve uma boa adesão entre a rede entrecruzada da fibra de bananeira e a rocha através da resina epoxídica que atuou como elemento ligante.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se a análise da resistência mecânica da fibra de outras modalidades de espécie de banana. Como a fibra de bananeira “prata” apresentou viabilidade mecânica, recomenda-se a análise de outras espécies para verificação de propriedades, e analisar através de difração de Raios-X (DRX), Espectrometria por dispersão de Raios-X (EDS), determinação de celulose, entre outros métodos, a variação de composição química e como essas diferenças existentes nas diferentes modalidades podem interferir nas propriedades mecânicas.

Recomenda-se aplicar diferentes tratamentos químicos para analisar se as metodologias podem aumentar a adesão da fibra à resina e com isso ter melhores propriedades mecânicas, ou analisar se os tratamentos químicos podem retirar hemicelulose e celulose da fibra, comprometendo a resistência mecânica.

Recomenda-se também a produção a produção da malha entrecruzada da bananeira em um maquinário a nível industrial para poder determinar custos de produção e assim ver a viabilidade econômica do projeto.

Recomenda-se avaliar a influência do diâmetro dos fios formadores da malha e também o espaçamento entre os fios, para analisar qual seria a influência destes fatores na laminação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDUL KHALIL, H. P. S., ALWANI, M. S., OMAR, A. K. M. (2006) Chemical composition, anatomy, lignin distribution, and cell wall structure of Malaysian plant waste fibers. *Bioresources*, v.1, p. 220-232.

ABDUL KHALIL, H.P.S.; BHAT, A.H.; IREANA YUSRA, A.F. (2012) Green composites from sustainable cellulose nanofibrils: a review. *Carbohydrate Polymers*, v. 87, p. 963 – 979.

ABIROCHAS. (2015) Balanço das Exportações e Importações Brasileiras de Rochas Ornamentais em 2014. Disponível em: http://www.ivolution.com.br/mais/fotos/6/17/3397/Informe_01_2015.pdf. Acesso em: 22 jan. 2015

ABIROCHAS. (2017) Balanço das Exportações e Importações Brasileiras de Rochas Ornamentais no Período Janeiro-Setembro de 2016. 2016. Disponível em: <http://www.ivolution.com.br/mais/fotos/6/17/4012/Informe_07_2016.pdf >. Acesso em: 17 jan. 2017.

ABIROCHAS. EXPORTAÇÕES E IMPORTAÇÕES BRASILEIRAS EM 2017. (2018) Disponível em: <http://abirochas.com.br/wp-content/uploads/2018/06/Panorama/Exportacoes_e_Importacoes_Brasileiras_2017_c.pdf>. Acesso em: 27 maio 2019.

ADURIZ, X.A.; LUPI, C.; BOYARD, N.; BAILLEUL, J.L.; LEDUC, D.; SOBOTKA, V.; LEFEVRE, N.; CHAPELEAU, X.; BOISROBERT, C.; DELAUNAY, D. (2007) Quantitative control of RTM6 epoxy resin polymerization by optical index determination. *Compôs. Sci. and technol.*, 67(15-16): 3196-3201.

ALICANTE. Aglostone: mármore composto. (2015) Disponível em: <<http://www.alicante.com.br/aglostone-2/>>. Acesso em: 09 dez. 2016.

AL-QURESHI, H. A. (1988) *Composite Materials: Fabrication and Analysis*. p.p. 3.2-3.3. ITA (Instituto Tecnológico da Aeronáutica), SP.

ALVES, A. L. dos S. (2006) *Processamento de placas compósitas pela técnica de moldagem por infusão de resina de seemann (scrimp)*. 91 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciência em Engenharia Metalúrgica de Materiais, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

AMARAL, R. A. (2014) Desenvolvimento e caracterização de compósito abrasivo em matriz epoxídica. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais) Campos dos Goytacazes-RJ. Universidade Estadual do Norte Fluminense-UENF, 91p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM. (C 503). (1999) Standard specification for marble dimension stone.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. (2007) ASTM D 3822-07. Standard Test Method for Tensile Properties of Single Textile Fibers.

ANTAL, M. J. (1983) Effects of reactor severity on the gas-phase pyrolysis of cellulose and kraft lignin derived volatile matter. *Indian Engineering Chemistry Research*, New Delhi, v. 22, n. 2, p. 366-375, July 1983.

ASHBEE, K. H. G. (1993) *Fundamentals Principles of Fiber Reinforced Composites*. 2nd. ed., Technomic Publishing Company, Inc., Lancaster, PA.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2004) Resíduos sólidos: classificação – NBR 10004. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2010) Rochas para revestimento- NBR 15845. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO ESPANHOLA DE NORMALIZAÇÃO E CERTIFICAÇÃO. (2011) UNE-EN 14618: Piedra aglomerada: terminología y clasificación. Madrid: Aenor, 2011.

BARCINA L. M.; ESPINA A.; SUÁREZ, M.; GARCÍA, JR.; RODRÍGUEZ J.; Characterization of monumental carbonate stones by thermal analysis (TG, DTG and DSC). *Thermochimica Acta*. 1997; 290(2):181-189. [http://dx.doi.org/10.1016/S0040-6031\(96\)03074-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0040-6031(96)03074-2).

BARROS, A. R. F.; AQUINO, E. M. F.; RODRIGUES, L. P. S. & SILVA, R. V. (2006) "Laminados compósitos a base de fibras natural e sintética: efeito de condições ambientais adversas", in: *Anais do 17º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais*, Foz do Iguaçu - PR, Brasil.

BEAUDOIN, J. J. (1990) *Handbook of fiber-reinforced concrete*. New Jersey, U. S.A.

BILBA, K., ARSENA, M.-A., OUENSANGA, A., (2007). Study of banana and coconut fibers: botanical composition, thermal degradation and textural observations. *Bioresource Technology*, v. 98, p. 58-68.

BITTENCOURT, E. (2002) Processamento e caracterização de compósitos lignocelulósicos a partir de resíduo de madeira particulado e fibras vegetais, 157 f. Tese de doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina.

BLEDZK, A. K., GASSAN, J. (1999) Composites reinforced with cellulose based fibres. *Progress in Polymer Science*, v. 24, pp. 221-274.

BRAGA, F. dos S.; BUZZI, D. C.; COUTO, M. C. L.; LANGE, L. C. (2010) Caracterização ambiental de lamas de beneficiamento de rochas ornamentais. *Eng Sanit Ambient*, v. 15, n. 3, p.237-244.

BRETON COMPANY. (2014) Plants for Manufaturing Natural Stone Surfaces by Breton Technology. Disponível em: <<http://www.breton.it/dynamic/en/azienda/filosofia.php?PHPSESSID=7589075f46902f6787a285ee1fd4a116>>. Acesso em mar. 2014.

CAESARSTONE. (2014) CaesarStone Quartz Surfaces. Disponível em <<http://www.caesarstoneus.com/catalog/technical-specs.cfm>>. Acesso em março 2014.

CARVALHO, E. A. S. (2008) Caracterização estrutural e propriedades do (Acrilamidometil) acetato prepionato de celulose modificado via radicalar. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual do Norte Fluminense – UENF. Campos dos Goytacazes – RJ, 64p.

CARVALHO, A. C. (2015) Fabricação e caracterização de compósitos à base de resina epóxi e fibras de bananeira. 2015. 71 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de São João Del-rei, São João Del-rei.

CARRIJO, O. A.; LIZ, R. S.; MAKISHIMA, N. - *Hortic. Bras.*, 20, p.533 (2002). <http://dx.doi.org/10.1590/S0102-05362002000400003>

CHAND, N.; TIWARY, R. K.; ROHATGI, P. K. (1988) Bibliography resource structure properties of natural cellulosic fibres-an annotated bibliography. *Journal of Materials Science*, v. 23, n. 2, p. 381-387, <http://dx.doi.org/10.1007/BF01174659>.

CHANDRAMOHAN, D.; MARIMUTHU, K. A. (2011) Review of natural fibers. Disponível em: <www.arpapress.com/Volumes/Vol8Issue2/IJRRAS_8_2_09.pdf>. Acesso em: 17 jan. 2017.

CHAWLA, K.K. (1987) Composite Materials. Science and Engineering. 1. ed. New York: Springer-Verlag.

COELHO, R. R. P.; MATA, M. E. R. M. C.; BRAGA, M. E. D. (2001) Alterações dos componentes nutricionais do pseudocaule da bananeira quando processado visando sua transformação em palmito. Disponível em: <<http://www.deag.ufcg.edu.br/rbpa/rev31/Art314.pdf>>. Acesso em: 17 jan. 2017.

CONSTRUPOR. (2016) Fibra de vidro-ar (álcali resistente). Disponível em: <<http://www.construpor.com.br/index.php?p=item6-1>>. Acesso em: 17 jan. 2017.

CORDIOLI, S. (2008) Oficina de Avaliação e Planejamento do Projeto Fibra da bananeira 2008/2009. Santa Catarina.

CRUZ, J. (2010) Process for manufacturing outdoor artificial stone boards with methacrylate resin by means of the vibro-compression under vacuum system. US nº US20100063193 A1.

DEEPA, B.; ABRAHAM, E.; CHERIAN, B. M.; BISMARCK, A.; BLAKER, J. J.; POTHAN, L. A.; LEAO, A. L.; de SOUZA, S. F.; KOTTAISAMYD, M. (2011) Structure, morphology and thermal characteristics of banana nano fibers obtained by steam explosion. Bioresource Technology, 102.

DEMARCHI, C. (2010) A. Aplicabilidade de placas de fibra de bananeira: produção caracterização, e absorção sonora. 109 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Edificações e Saneamento, Universidade Estadual de Londrina, Londrina.

DEMARTINI, T.J., RODRIGUEZ, R.J.S., SILVA, F.S. (2018) Physical and mechanical evaluation of artificial marble produced with dolomitic marble residue processed by diamond-plated bladed gang-saws. J Mater Res Technol. DOI: 10.1016/j.jmrt.2018.02.001

DCI. (2018) Clima e preços devem diminuir produção de banana no Brasil. Disponível em: <<https://www.dci.com.br/impresso/clima-e-precos-devem-diminuir-producao-de-banana-no-brasil-1.709217>>. Acesso em: 14 set. 2018.

DIAS, J. do S. A.; BARRETO, M. C. (Ed.). (2011) Aspectos agronômicos, fitopatológicos e socioeconômicos da sigatoka-negra na cultura da bananeira no Estado do Amapá. Macapá: Embrapa Amapá, 95 p. 1 ISBN 978-85-61366-14-8

DOW. (2006) Tetraethylenepentamine (TEPA). Technical Data Sheet, The Dow Chemical Company, 108-01354-1104 AMS.

ECYCLE. Fibra de vidro: matéria-prima de muitos itens pode expor riscos no processo de produção. (2019) Disponível em: <<https://www.ecycle.com.br/component/content/article/35-atitude/958-fibra-de-vidro-materia-prima-de-muitos-materiais-pode-expor-riscos-no-processo-de-producao.html>>. Acesso em: 21 jan. 2019.

FERREIRA, A. C. B.; NUNES, E. de C. D. (2009) Reaproveitamento e incorporação de resíduo de mármore em poliamida 66. Revista Eletrônica de Educação e Tecnologia do Senai, São Paulo, v. 5, n. 3.

FIBERCENTER. (2014) Mármore sintético. <http://www.fibercenter.com.br/processos/marmoresintetico.html> > Acesso em mai. 2016.

FIBERTEX. (2017) Tela de fibra de vidro estrutural – Construção Civil. Disponível em: <<http://www.fibertex.com.br/produto/tecido-estrutural/>>. Acesso em: 24 abr. 2017.

FOWLER, P. A.; HUGHES, J. M.; Elias, R. M (2006). - J. Sci. Food Agr., 86, p. 1781. <http://dx.doi.org/10.1002/jsfa.2558>.

FRASCÁ, M. H.B.O. (2001) Qualificação de rochas ornamentais e para revestimento de edificações: caracterização tecnológica e ensaios de alterabilidade. In: I Simpósio Brasileiro de Rochas Ornamentais/ II Seminário de Rochas Ornamentais do Nordeste, Salvador. Anais- I Simpósio Brasileiro de Rochas Ornamentais/ II Seminário de Rochas Ornamentais do Nordeste. Rio de Janeiro: CEFET/MCT.

FRAZÃO, E. B. (2002) Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental. Tecnologia de rochas na construção civil. São Paulo: ABGE, 132p.

GAÑÁN, P., CRUZ, J., GARBIZU, S., ARBELAIZ, A., MONDRAGON, A. (2004) Stem and bunch banana fibers from cultivation wastes: effect of treatments on physico-chemical behavior. Journal of Applied Polymer Science, v. 94, p.1489–1495.

GARCIA, F.G., SILVA, P.M., SOARES, B.G., BRIONES, J.R. (2007) Combined analytical techniques for the determination of the amine hydrogen equivalent weight in aliphatic amine epoxide hardeners. *Polymer Testing*, vol.26, 95-101 p.

GHALI, L.; MSAHLI, S.; ZIDI, M.; SAKLI, F. (2011) Effects of fiber weight ratio, structure and fiber modification onto flexural properties of luffa-polyester composites. *Adv. Mater. Phys. Chem.*, 1, pp. 78-85.

GILLIO, E. F. (1997) Co-Injection Resin Transfer Molding of Hybrid Composites. CCM Report 97-23, Center Composite Materials, University of Delaware, Newark, Delaware, USA.

GONZÁLEZ, F.G., SOARES, B.G., PITA, V.J.R.R., SÁNCHEZ, R., RIEUMONT, J. (2007) Mechanical Properties of Epoxy Networks Based on DGEBA and Aliphatic Amines. *Applied Polymer Science*, vol.106,2047-2055.

GOMES, M. Produção brasileira de banana atinge R\$ 14 bilhões por ano. (2017) Disponível em: <https://www.correiobraziliense.com.br/app/noticia/economia/2017/10/23/internas_economia,635500/producao-brasileira-de-banana-atinge-r-14-bilhoes-por-ano.shtml>. Acesso em: 23 out. 2017.

GUIMARÃES, J.L., FROLLINI, E., SILVA, C.G., WYPYCH, F., SATYANARAYANA, K.G. (2009) Characterization of banana, sugarcane bagasse and sponge gourd fibers of Brazil. *Industrial Crop and Products*, v. 30, p. 407-415, 2009.

GULLICHSEN, J.; PAULAPURO, H. (2000) *Forest products chemistry*. OyHelsinki: Fapet Ou, p. 350.

GUIMARÃES, B.M.R. (2012). Tratamento químico de partículas de pseudocaule da bananeira visando a produção de painéis aglomerados. Dissertação. Universidade Federal de Lavras.

HIROCE, R. (1972) O aproveitamento do pseudocaule. *O Estado de São Paulo*, 19 mar.1972. Suplmente agrícola 877, p.11.

HULL, D.; (1995). *An introduction to composites materials*. Cambridge University Press. (Cambridge Solid State Science Series).

IDICULA, M.; MALHOTRA, S. K.; JOSEPH, K.; THOMAS, S. (2005) Dynamic mechanical analysis of randomly oriented intimately mixed short banana/sisal hybrid fibre reinforced polyester composites. *Composites Science And Technology*, [s.l.], v. 65, n. 7-8, p.1077-1087, Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compscitech.2004.10.023>.

IDICULA, M.; JOSEPH, K.; THOMAS, S. (2009) Mechanical Performance of Short Banana/Sisal Hybrid Fiber Reinforced Polyester Composites. *Journal Of Reinforced Plastics And Composites*, [s.l.], v. 29, n. 1, p.12-29, SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.1177/0731684408095033>.

IBGE. (2019) Levantamento Sistemático da Produção Agrícola. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/tabela/1618>>. Acesso em: 17 jan. 2019.

ISAIA, G. C. (2007) Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais. São Paulo: IBRACON, 2007. 2v.

JARMAN, C. G.; MYKOLUK, S.; KENNEDY, L.; CANNING, A. J. (1977) Banana fibre: a review of its properties and small-scale extraction and processing. *Tropical Scienc*, v. 19, n. 4, p. 173-185.

JAYAPRABHA, J. S., BRAHMAKUMAR, M., MANILAL, V. B. (2011) Banana Pseudostem Characterization and its fiber property evaluation on physical and bioextraction, *Journal of Natural Fiber*, v. 8, p. 149-160.

JESUS, M. S. (2005). Desenvolvimento de um Compósito Polímero-Metal à Base de Resina Epóxi para Aplicações em Moldes Rápidos. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Materiais – Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Florianópolis.

JOHNSTON, C. D. (1994) – Fibre-reinforced Cement and Concrete – *Advances in Concrete Technology*, 2ed. p.603-673

JOSEPH, K.; VARGHESE, S.; KALAPRASAD, G.; THOMAS, S.; PRASANNAKUMARI, L.; KOSHYH, P.; PAVITHRAN, C. (1996) Influence of Interfacial Adhesion on The Mechanical Properties and Fracture Behaviour of Short Sisal Fibre Reinforced Polymer Composites. *European Polymer Journal*. Vol. 32, n. 10, p. 1243-1250.

KELLY, A., TYSON, W.R. (1965). *High Strength Materials*, Nova York, Wiley.

KLOCK, U.; MUÑIZ, G.I.B. de; HERANDEZ, J.A.; ANDRADE, A. S. (2005) Química da madeira (3ª edição revisada). Curitiba: UFPR, 86p.

KULKARNI, A. G.; SATYANARAYANA, K. G.; ROHATGI, P. K.; VIJAYAN, K. (1983) Mechanical properties of banana fibres (*Musa sepientum*). *Jornal of Materials Science*, vol. 18, p. 2290–2296.

LEE, G.-W.; LEE, N.-J.; JANG, J.; LEE, K.-J.; NAM, J.-D. (2002) Effects of surface modification on the resin-transfer moulding (RTM) of glass-fibre/unsaturated-polyester composites. *Composites Science and Technology*. v.62, n.1, p. 9-16.

LI, K., FU, S., ZHAN, H., ZHAN, Y., LUCIA, L. A. (2010) Analysis of the chemical composition and morphological structure of banana pseudostem. *Bioresources*, v. 5, p. 576-585, 2010.

LIMA JÚNIOR, U. M. (2007) Fibras da Semente do Açaizeiro (*Euterpe Oleracea* Mart.): Avaliação quanto ao uso como reforço de Compósitos fibrocimentícios. Dissertação (Mestrado). Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande Do Sul. Programa de pós-Graduação em engenharia e tecnologia de materiais. Porto Alegre.

MACHADO, R. A. F.; KNIES, C. T.; LOPES, C. N.; CHECCHINATTO, F.; GUARIDO, C. E.; MILANEZ, K. W.; KUHNEN, N. C.; RIELLA, H. G. (2002) Reaproveitamento de resíduos industriais. *Acta Ambiental Catarinense*, Chapecó, v. 1, n. 1, p. 29-41.

MÁRMORE COMPOSTO. (2016) <http://www.marmorecomposto.com.br/> Acesso em mar. 2016.

MAY, C.A., TANAKA, Y. (1987) *Epoxy Resins, Chemistry and Technology*. Marcel Dekker.

MEDINA, J. C. (1959) Plantas fibrosas da flora mundial. Campinas: Instituto Agrônômico de Campinas, 913p.

MENDES, V.A. (2002) Os jazimentos de rochas ornamentais e a sua relação com os eventos tectônicos atuantes no território brasileiro. In: *Simpósio de Rochas Ornamentais do Nordeste*, Recife.

MERLIN, L. (2017) Malha de vidro M50. Disponível em: <<http://www.leroymerlin.pt/Site/Produtos/Construcao/Impermeabilizacao/Paredes-e>

fachadas/15307222_MALHA-FIBRA-VIDRO-P-IMPERM-1X50M-M50.aspx>. Acesso em: 17 jan. 2017.

MERLINI, C., SOLDI, V., BARRA, G.M.O. (2011) Influence of fiber surface treatment and length on physico-chemical properties of short random banana fiber-reinforced castor oil polyurethane composites. *Polymer Testing* 30, 833-840.

MOLINARI, E.J. (2007) Reutilização dos resíduos de rochas naturais para o desenvolvimento de compósitos poliméricos com matriz termofixa na manufatura de pedras industriais. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia dos Materiais) – Florianópolis – SC, Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, 132p.

MONTANI, C. (2014) Dossiê Brasil 2014. Brasília: Aldus, 2014.

MONTEIRO, S. N. (2009) "Properties and structure of *Attalea funifera* piassava fibers for composite reinforcement", *J. Natural Fibers*, 6 (2) 191-203.

MONTEIRO S.N.; LOPES, F.P.D.; FERREIRA, A.S.; NASCIMENTO, D.C.O. (2009) Natural fiber polymer matrix composites: cheaper, tougher and environmentally friendly. *JOM*, v. 61, n. 1, p. 17-22.

MOREIRA, R.S. (1987) *Banana: teoria e prática de cultivo*. Campinas: Fundação Cargill, 335p.

MUKHOPADHYAY, S.; FANGUEIRO, R.; SHIVANKAR, V. (2009) Variability of Tensile Properties of Fibers from Pseudostem of Banana Plant. *Textile Research Journal*, vol. 79(5), p. 387–393.

MUKHOPADHYAY, S.; FANGUEIRO, R. (2009) Physical Modification of Natural Fibers and Thermoplastic Films for Composites – A Review. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*. p.135.

MUKHOPADHYAY, S.; FANGUEIRO, R.; SHIVANKAR, V. (2016) Variability of Tensile Properties of Fibers from Pseudostem of Banana Plant. *Textile Research Journal*, Los Angeles, v. 79, n. 5, p.387-393.

NABI SAHEB, D.; JOG, J. P. (1999) Natural Fiber Polymer Composites: A Review. *Advances in Polymer Technology*, Vol. 18, No. 4, p. 351–363.

NERY, T. B. R.; JOSÉ, N. M. (2018) Estudo das Fibras de Bananeira Pré-tratadas e in natura como possível matéria-prima para reforço em compósitos poliméricos. Revista Virtual de Química, Salvador, v. 10, n. 2.

NOGUEIRA, J. A. (2000) Propriedades mecânicas da rocha intacta na mineração de ferro. 2000. 121 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

OBERT, L.; DUVALL, W. I. (1967) Rock Mechanics and the Design of Structures in Rock. Nova York: John Wiley and Sons, 1967. 459p.

OLIVEIRA, J.E.; BLOCH, M.; SOARES, A. C.; SANTOS, S. M.; SIQUEIRA, C. A. M.; DANTAS, M. A. R.; BELTRAMI, J. C.; SOARES, J. A.; COSTA, A.M. (1998) Laboratório de mecânica de rochas do cenpes: sete anos de atividades em E & P. Boletim Técnico da Petrobras, Rio de Janeiro, v. 12, n. 41, p.31-43.

OLIVEIRA, F. M. V. (2007) Estudo de diferentes condições de pré-tratamento do bagaço de cana-de-açúcar no processo de obtenção de bioetanol. 2007. 49 p. Monografia (Graduação em Ciências Biológicas) - Universidade de Pernambuco. Recife.

OWENS CORNING. (2003) Folha de informação de segurança do produto. Disponível em: <www.higieneocupacional.com.br/download/fibra-owens.doc>. Acesso em: 17 jan. 2019.

PAIVA, J. M. F.; TRINDADE, W.G.; FROLLINI, E. (2000) Compósitos de matriz termofixa fenólica reforçada com fibras vegetais. Polímeros: Ciência e Tecnologia, n.2, p. 170-176.

PAUL, S. A.; JOSEPH, K.; MATHEW, G. D. G.; POTHEEN, L. A. & THOMAS, S. (2010) - Compos. Part A, 41, p.1380.

PAULESKI D. T.; HASELEIN, C. R.; SANTINI, E. J.; RIZZATTI, E. (2007) Características de compósitos laminados manufaturados com polietileno de alta densidade (pead) e diferentes proporções de casca de arroz e partículas de madeira. Ciência Florestal. Santa Maria. v. 17. n. 2. p. 157-170.

PASSOS, P. R. A. (2005) Destinação sustentável de cascas de coco (cocos nucifera) verde: obtenção de telhas e chapas de partículas. Tese de doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Programa de pós-graduação de engenharia. Rio de Janeiro, RJ.

PAZETO, A. de A.; PARAGUASSÚ, A. B. (2013) Estudo experimental da telagem de chapas de rochas "graníticas" com fibra de sisal. Anais. Rio de Janeiro: ABGE/UFRJ.

PEDRA ARTIFICIAL. (2016) Disponível em: < www.pedraartificial.com.br>. Acesso em maio 2016.

PEREIRA, D.S.; FILHO, N.L.D.; VECCHI, G.D. (2005) Caracterização físico-química e mecânica do sistema Éster de Silsexquioxano/ resina epóxi DGEBA/dietilenotriamina, Rev. Mater., 10 (2): 317 – 330.

PIRES, G., PEREIRA, D.C., DIAS FILHO, N.L., VECCHIA, G.D (2005) Caracterização Físico-Química e Mecânica do Sistema Éster de Silsexquioxano/ Resina Epóxi DGEBA/ Dietilenotriamina. Revista Matéria, 10: 317 – 330.

PITTIMAN, C.U., HE, G.R., WU, B., GARDNER, S.D. (1997) Titration of Tetraethylenepentamine (TEPA) and Its Phenyl Isocyanate Reaction Products: A Model Correction Factor for Determination of Tepa Grafted to Carbon Surfaces. Carbon, vol.35, nº 3, 333-340.

POTHAN, L. A.; THOMAS, S. (2003) Polarity parameters and dynamic mechanical behaviour of chemically modified banana fiber reinforced polyester composites. Composites Science And Technology, [s.l.], v. 63, n. 9, p.1231-1240, Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0266-3538\(03\)00092-7](http://dx.doi.org/10.1016/s0266-3538(03)00092-7).

POTHAN, A; NEELAKANTAN, N. R.; RAO, B.; THOMAS, S. (2004) Stress Relaxation Behavior of Banana Fiber-Reinforced Polyester Composites. Journal Of Reinforced Plastics And Composites, [s.l.], v. 23, n. 2, p.153-165, SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.1177/0731684404030629>.

POTHAN, L. A.; OOMMEN, Z.; THOMAS, S. (2009) Dynamic Mechanical and Dielectric Behavior of Banana-Glass Hybrid Fiber Reinforced Polyester Composites. Journal Of Reinforced Plastics And Composites, [s.l.], v. 29, n. 8, p.1131-1145, SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.1177/0731684409103075>.

RATNA, D. (2009) Handbook of Thermoset Resins. iSmithers. Shawbury, Shrewsbury, Shropshire, SY4 4NR, United Kingdom.

RAY, D.P.; NAYAK, L. K.; AMMAYAPPAN, L.; SHAMBHU, V.B.; NAG, D. (2013) Energy Conservation Drives for Efficient Extraction and Utilization of Banana

Fibre. International Journal Of Emerging Technology And Advanced Engineering, Kolkata, v. 3, n. 8, p.296-310.

REGIANI, A. M. (2000) - “Eletrólitos sólidos poliméricos à base de polissacarídeos: síntese e caracterização”, Tese de Doutorado, Universidade Federal de São Carlos, Brasil.

RESINA COMO LIGANTE: concreto polimérico. (2014) Revista do Plástico Reforçado. Disponível em http://www.revistadoplasticoreforçado.com.br/cons_civil/resina.html >. Acesso maio 2014.

RIBEIRO, C. E. G. (2011). Produção de rocha artificial utilizando resíduo da indústria de mármore em matriz poliéster. 91 f. Mestrado (Mestrado em Engenharia e Ciência Dos Materiais), - Campos Dos Goytacazes, RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense, 91 p.

RIBEIRO, C. E. G.; RODRIGUEZ, R. J. S. (2015) Influence of Compaction Pressure and Particle Content on Thermal and Mechanical Behavior of Artificial Marbles with Marble Waste and Unsaturated Polyester. Mat. Res. [online]. ahead of print, Nov 24, 2015. ISSN 1980-5373. <http://dx.doi.org/10.1590/1516-1439.372314>.

RIBEIRO, C. E. G.; SILVA, F. S.; CORRENTE, T. S.; FRANÇA, A. S. (2017) Avaliação das propriedades físicas e mecânicas de fibras de bananeira. In: VII JORNADA ACADÊMICA DE CIÊNCIA, TECNOLOGIA E CULTURA, VII JACITEC, 2017, Cachoeiro de Itapemirim.

RIEGEL, I.Z., FREITAS, L.L., SAMIOS, D (1999) Envelhecimento físico de sistemas DGEBA/DDM investigado por análise térmica (DSC/DMA). Polímeros: Ciência e tecnologia.

ROMERO-ANAYA, A.J., MOLINA, A., GARCIA, P., RUIZ-COLORADO, A.A., LINARES-SOLANO, A., DE LECEA, C. S.-M. (2011) Phosphoric acid activation of recalcitrant biomass originated in ethanol production from banana plants. Biomass and Bioenergy, 35, 1196-1204.

ROSA, M. F., MEDEIROS, E. S., MALMONGE, J. A., GREGORSKI, K. S., WOOD, D. F., MATTOSO, L. H. C., GLENN, G., ORTS, W. J., IMAN, S. H. (2010) Cellulose nanowhiskers from coconut husk fibers: Effect of preparation conditions on their thermal and morphological behavior. Carbohydrate Polymers, v. 81, p. 83-92.

RUSHING, R.A.; THOMPSON, C.; CASSIDY, P.E., J. (1994) Applied Polymer Science, 53: 1211-1219.

SAKAI; T. (2000) Artificial Stone Composition and Method of Manufacturing Artificial Stone. Patent Number 6,127,458. Appl. Nº 08/836,105. United States Patent. Oct. 3, 2000.

SANTOS, E. A. (2007) Avaliação mecânica e microestrutural de compósitos de matriz de poliéster com adição de cargas minerais e resíduos industriais. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Natal – RN, Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN, 103p.

SARDOU FILHO, R. MATOS, G. M. M.; MENDES, V. A.; IZA, E. R. H. de F. (2013). Atlas de rochas ornamentais do estado do espírito Santo. Brasília: CPRM.

SATYANARAYANA, K.G. GUIMARÃES, J.L. WYPYCH, F. (2007) Studies on lignocellulosic fibers of Brazil. Part I: Source, production, morphology, properties and applications. Composites: Part A, v. 38, p. 1694-1709.

SINDIROCHAS. Espírito santo coloca o brasil entre os maiores países em produção e exportação de mármore e granito. (2019) Disponível em: <<http://www.sindirochas.com/noticias/-espírito-santo-coloca-o-brasil-entre-os-maiores-paises-em-producao-e-exportacao-de-marmore-e-granito.html>>. Acesso em: 17 jan. 2019

SILVA, F. S.; RIBEIRO, C. E.; RODRIGUEZ, R. (2017) Physical and Mechanical Characterization of Artificial Stone with Marble Calcite Waste and Epoxy Resin. Materials Research, [s.l.], v. 21, n. 1, 7 dez. 2017. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/1980-5373-mr-2016-0377>.

SILVA, J. M. M.; RIBEIRO, R. P. (2014) Fixação de placas de rocha de revestimento: relações entre a telagem e a aderência com argamassas colantes. USP, são Paulo, 2014, 22º simpósio Internacional de Iniciação Científica e Tecnológica da USP- Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

SILVA, V. de S. V. (2009) Estudo das propriedades biocompatíveis de redes epoxídicas do éter diglicídico do bisfenol-A. Dissertação (Mestrado em Materiais Para Engenharia) - Universidade Federal de Itajubá.

SILVA, L. J. da. (2011) Estudo experimental e numérico das propriedades mecânicas de compósitos poliméricos laminados com fibras vegetais. 2011. 154 f.

Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de São João Del-rei, São João del Rei.

SILVA, I. L. A. da. (2014) Propriedades e estrutura de compósitos poliméricos reforçados com fibras contínuas de juta. 2014. 95 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia e Ciência dos Materiais, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF, Campos dos Goytacazes.

SILVA, F.S. (2016). Desenvolvimento e caracterização de um mármore artificial produzido a partir do aproveitamento do resíduo de mármore calcítico e resina epóxica. 105 f. Mestrado (Mestrado em Engenharia e Ciência Dos Materiais), - Campos Dos Goytacazes, RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense.

SILVA, J. L.; AL-QURESHI, H. (1999) Mechanics of wetting systems of natural fibres with polymeric resin. Journal of Materials Processing Technology, v. 92–93, p. 124–128.

SILVA, L. J. da. (2011) Estudo experimental e numérico das propriedades mecânicas de compósitos poliméricos laminados com fibras vegetais. 2011. 178 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de São João Del-rei, São João del Rei.

SILVA, J. R. da. (2008) Análise de viabilidade econômica do emprego de compósitos de pvc reforçado com fibra de bananeira. 2008. 53 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Produção e Sistemas, Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville.

SILVA, R. V. (2003) Compósito de resina poliuretana derivada de óleo de mamona e fibras vegetais. 139p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

SILVEIRA, L. L. L.; VIDAL, F. W. H.; SOUZA, J. C. (2014) Beneficiamento de rochas ornamentais. In: Tecnologia de rochas ornamentais: pesquisa, lavra e beneficiamento. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, Cap.7, p.329-398.

SILVEIRA, L. L. L. da S. (2015) Processo de telagem de chapas de rochas ornamentais. BR nº BR 102013018760-7 A2.

ŠIRVAITIENE, A. JANKAUSKAITE, V.; BEKAMPIENE, P.; KONDRATAS, A. (2013) Influence of natural fibre treatment on interfacial adhesion in biocomposites. Fibres and Textiles in Eastern Europe, v. 100, n. 4, p. 123–129.

SJOSTROM, E.; ALÉN, R. (1998) Analytical methods in wood chemistry, pulping and papermaking. Berlin: Springer-Verlag, 316p.

SOCRATES, G., (2004). Infrared and Raman characteristic group frequencies: tables and charts. New York. John Willey & Sons. 3rd ed. 366.

SOFFNER, M. L. A. P. (2001) Produção de polpa de celulose a partir do engaço de bananeira. 56p. 2001. Dissertação (mestrado). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo. Piracicaba – SP.

SOFFNER, M.L.A.P.; NOLASCO, A.M.; NOLASCO, A.C.; MILAN, M. (1998) Mechanical extraction of banana fiber- Musa Cavendish, nanicao variety. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON NATURAL POLYMERS AND COMPOSITES, 2., Atibaia, 1998. Proceedings. São Carlos: EMBRAPA, p. 189-190.

SOSSAI, F. J. M. (2006) Caracterização tecnológica de rochas ornamentais. 2006. 87f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa.

SOUZA F.; BRAGANÇA, SR. Thermogravimetric analysis of limestones with different contents of MgO and microstructural characterization in oxy-combustion. *Thermochimica Acta*. 2013; 561:19-25. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tca.2013.03.006>.

SOUZA, L.R.; RIBEIRO, R.C.C.; CARRISSO, R.C.C.; SILVA, L.P.; PACHECO, E.B.A.V.; VISCONTE, L.L.Y. (2009) Aplicação de resíduos de mármore na indústria polimérica. Série tecnologia ambiental. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 36p.

SOUZA. O.; FEDERIZZI, M.; COELHO, B.; WAGNER, T. M.; WISBEBECK, E. (2010) Biodegradação de resíduos lignocelulósicos gerados na bananicultura e sua valorização para a produção de biogás. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. Campina Grande, v. 14. n. 4. p. 438-443.

SOUZA, A.T. de. (2008) Aspectos econômicos da cultura da banana. Disponível em: http://www.epagri.sc.gov.br/?page_id=3210. Acesso em: 21 dezembro 2016.

TEGAPE. Fibra de vidro álcali resistente. (2016) Disponível em: <http://www.tegape.com.br/atuacao_interna/id/73/fibra-de-vidro-alcali-resistente--tela>. Acesso em: 17 jan. 2017.

TEXIGLASS. Tecidos para Construção Civil. (2017) Disponível em: <<http://texiglass.com.br/tecidos-para-construcao-civil/>>. Acesso em: 24 abr. 2017.

TITA, S. P. S.; PAIVA, J. M. F. & FROLLINI, E. (2002) - Polímeros, 12, p.228. <http://dx.doi.org/10.1590/S0104-14282002000400005>

TONCELLI, M. (1987) Process for the formation of blocks of any material by means of the contemporaneous action of vibrations, compression and vacuum intended for cutting into slabs and apparatus adapted to carry out the said process. US nº US4698010 A, Disponível em: <<http://www.google.st/patents/US4698010>>. Acesso em: 24 jul. 2016.

UN-JUN, H.; UN-JUNG, Y.; SU-KYOUNG, K.; JAE-HYOUNG, Y.; SOON-CHUL, M.; SAE-CHUL, K.; YEON-PYO, H. (2007) Developmental Toxicity by Exposure to Bisfenol a Diglycidyl Ether during gestation and lactation period in sprague-dawley male rats. J Prev Med, 40 (2): 151-161.

VALLE. C. E. (1995) Qualidade ambiental: o desafio de ser competitivo protegendo o meio ambiente. 117 p. São Paulo: Pioneira.

VENKATESHWARAN, N.; ELAYAPERUMAL, A. (2010) Banana fiber reinforced polymer composites – a review. Journal of Reinforced Plastics and Composites, Vol. 29, p. 2387-2395.

VENKATESHWARAN, N; ELAYAPERUMAL, A. (2011) Mechanical and water absorption behaviour of banana/sisal reinforced hybrid composites. Materials & Design, [s.l.], v. 32, n. 7, p.4017-4021, Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2011.03.002>.

VIDAL, F. W. H.; BESSA, M. F.; LIMA, M. A. B. (1999) Avaliação das rochas ornamentais do Ceará através de suas características tecnológicas. - Rio de Janeiro: CETEM/MCT - (Série Tecnologia Mineral, 74). 30 p.

VIEIRA, L. M. (2015) Brasil é o terceiro maior produtor de banana. Disponível em: <<http://www.revistacampoenegocios.com.br/brasil-e-o-terceiro-maior-produtor-de-banana/>>. Acesso em: 14 set. 2018.

YANG, H.; YAN, R.; CHEN, H.; LEE, D. H.; ZHENG, C. (2007) Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. Fuel, 86, 1781.

YOSOMIYA, R.; MORIMOTO, K.; NAKAJIMA, A.; IKADA, Y.; SUZUKI, T. (1989). Adhesion and bonding in composites. New York, Marcel Dekker, Inc., 1989. RIBEIRO, Luiz G. (1984). Introdução à tecnologia têxtil. Cetiqt/SENAI. Rio de Janeiro.

YUYAO. Y. Strong Fiberglass Products Factory. (2016) Disponível em: <http://pt.made-in-china.com/co_yuyaostr/image_Fiberglass-Mesh-for-Marble-5X5mm-75G-M2_ersershig_UNZaMjzsEHki.html>. Acesso em: 17 jan. 2017.

ZHU, W.H., TOBIAS, B.C., COUTTS, R.S.P, LANGFORS, G. (1994). Air-cured banana-Wbre-reinforced cement composites. Cement and Concrete Composites 16 (1), 3–8.

WAMBUA, P.; IVENS, I.; VERPOEST, I. (2003) Natural fibers: can they replace glass and fibre reinforced plastics?" Composites Science and Technology, v. 63, p. 1259-1264. 2003.

WESTRUPP, F. L. (2008) Análise da viabilidade da usinagem de compósito de matriz de epóxi com cargas de ferro visando sua utilização em moldes de injeção. Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, 94p.