



**MINISTÉRIO DA DEFESA
EXÉRCITO BRASILEIRO
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA
(real academia de artilharia, fortificação e desenho, 1792)
SEÇÃO DE ENSINO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS (SE-8)**

ELIZIANE MEDEIROS SANTOS

**COMPÓSITO DE POLIETILENO DE ALTA DENSIDADE REFORÇADO COM
PARTÍCULAS GEOPOLIMÉRICAS**

**RIO DE JANEIRO
2023**

©2023

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

Praça General Tibúrcio, 80 – Praia Vermelha

Rio de Janeiro – RJ CEP: 22290-270

Este exemplar é de propriedade do Instituto Militar de Engenharia, que poderá incluí-lo em base de dados, armazenar em computador, microfilmар ou adotar qualquer forma de arquivamento.

É permitida a menção, reprodução parcial ou integral e a transmissão entre bibliotecas deste trabalho, sem modificação de seu texto, em qualquer meio que esteja ou venha a ser fixado, para pesquisa acadêmica, comentários e citações, desde que sem finalidade comercial e que seja feita a referência bibliográfica completa.

Os conceitos expressos neste trabalho são de responsabilidade do(s) autor(es) e do(s) orientador(es).

Santos, Eliziane Medeiros.

COMPÓSITO DE POLIETILENO DE ALTA DENSIDADE REFORÇADO
COM PARTÍCULAS GEOPOLIMÉRICAS / Eliziane Medeiros Santos. – Rio
de Janeiro, 2023.

138 f.

Orientador(es): Ricardo Pondé Weber, Maria de Fátima Vieira Marques e Flavio
James Humberto Tommasini Vieira Ramos.

Tese (doutorado) – Instituto Militar de Engenharia, Ciência dos Materiais, 2023.

1. compósito; polietileno de alta densidade; geopolímero; escória de panela.
i. Pondé Weber, Ricardo (orient.) ii. de Fátima Vieira Marques, Maria (orient.)
iii. James Humberto Tommasini Vieira Ramos, Flavio (orient.) iv. Título

ELIZIANE MEDEIROS SANTOS

COMPÓSITO DE POLIETILENO DE ALTA DENSIDADE REFORÇADO
COM PARTÍCULAS GEOPOLIMÉRICAS

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ciência dos Materiais do Instituto Militar de Engenharia, como requisito para a obtenção do título de doutora em Ciência dos Materiais.

Orientador(es): Ricardo Pondé Weber, D.Sc.
Maria de Fátima Vieira Marques, D.Sc.
Flavio James Humberto Tommasini
Vieira Ramos, D.Sc.

Rio de Janeiro

2023

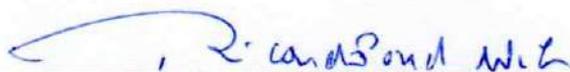
ELIZIANE MEDEIROS SANTOS

**COMPÓSITO DE POLIETILENO DE ALTA DENSIDADE
REFORÇADO COM PARTÍCULAS GEOPOLIMÉRICAS**

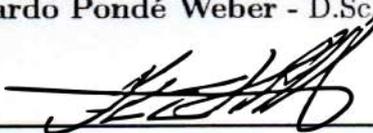
Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ciência dos Materiais do Instituto Militar de Engenharia, como requisito para a obtenção do título de doutora em Ciência dos Materiais.

Orientador(es): Ricardo Pondé Weber, Maria de Fátima Vieira Marques e Flavio James Humberto Tommasini Vieira Ramos.

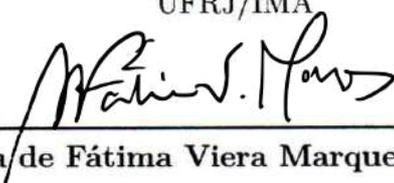
Aprovado em Rio de Janeiro, 06 de setembro de 2023, pela seguinte banca examinadora:



Professor **Ricardo Pondé Weber** - D.Sc. do IME - Presidente



Professor **Flávio James Humberto Tommasini Vieira Ramos** - D.Sc. da UFRJ/IMA



Professora **Maria de Fátima Vieira Marques** - D.Sc. da UFRJ/IMA



Professor **Alaelson Vieira Gomes** - D.Sc. do IME



Professor **Lúcio Fábio Cassiano Nascimento** - D.Sc. do IME



Professora **Daniele Cruz Bastos** - D.Sc. da UERJ-ZO



Pesquisador **Anderson Oliveira da Silva** - D.Sc. do FIEP/SENAI-PR

Rio de Janeiro

2023

AGRADECIMENTOS

Um dos desafios dessa pesquisa é conseguir colocar em palavras toda gratidão que tenho pelas pessoas que estiveram no meu caminho durante essa etapa. Não poderia deixar de começar agradecendo a Deus que me capacitou e me mostrou que eu tudo posso, pois Ele me fortalece. Um agradecimento especial ao meu esposo que foi quem me incentivou quando eu mesma não acreditava ser capaz, que segurou minha mão nos momentos difíceis e esteve ao meu lado durante toda caminhada. Meu orientador Ricardo Pondé Weber acreditou nas minhas ideias, me aconselhou e direcionou essa pesquisa com excelência. Aos meus coorientadores Maria de Fátima Vieira Marques e Flávio James Humberto Tommasini que estavam sempre disponíveis a me ajudarem e que contribuíram de forma extraordinária com este trabalho. Aos meus familiares e amigos que de alguma forma torceram e apoiaram a realização desse sonho.

Agradecimentos especiais às empresas Usiminas e Brasken que forneceram matérias primas para elaboração dessa pesquisa.

*“Não vos amoldeis às estruturas deste mundo,
mas transformai-vos pela renovação da mente,
a fim de distinguir qual é a vontade de Deus:
o que é bom, o que Lhe é agradável, o que é perfeito.
(Bíblia Sagrada, Romanos 12, 2)*

RESUMO

O Polietileno de alta densidade (HDPE) foi utilizado como matriz para elaboração de compósitos com geopolímero. A geopolimerização foi feita com escória de Panela em duas diferentes proporções sólido/líquido (1,4 e 1,6) em solução alcalina com metassilicato de sódio. Foi utilizado o método de compatibilização *in situ* com dois tipos de compatibilizantes (anidrido maleico e Polybond) na busca de comparar seus efeitos da utilização nos compósitos na adesão entre a carga e a matriz. A produção dos compósitos foi realizada por extrusão a 200°C com diferentes concentrações dos dois tipos de geopolímero (10%, 20% e 30%) e com 3% de compatibilizante. Os diferentes materiais extrusados foram utilizados como matéria prima para a produção em uma prensa a quente a 200°C seguido de resfriamento controlado em prensa a frio. A caracterização do polímero (HDPE), da escória de Panela e dos compósitos foram realizadas pelas análises de difração de raio-X (DRX), espectroscopia de infravermelho por Transformada Fourier (FTIR), análise termogravimétrica (TGA), calorimetria diferencial de varredura (DSC), microscopia eletrônica de varredura (FEG-SEM), ensaio de dureza Shore D, ensaio de densidade, ensaio mecânico de tração, análise de difusividade térmica (LFA), coeficiente de absorção acústica (CAA) e espectroscopia de ressonância magnética nuclear no domínio do tempo (*RMN – DT*). DRX indicou que os compósitos com menores concentrações de carga tendem a uma menor resistência à compressão. O TGA mostrou que os compósitos com geopolímero 1,4 apresentaram uma maior estabilidade térmica que os fabricados com geopolímero 1,6. O compatibilizante anidrido maleico diminuiu a difusividade térmica dos compósitos de forma mais eficiente que o Polybond. O DSC mostrou que as partículas de geopolímero dispersas na matriz polimérica atuaram dificultando a mobilidade das cadeias poliméricas, diminuindo a cristalinidade e aumentando o efeito na compatibilidade. As imagens de MEV mostraram uma maior porosidade no geopolímero 1,4 e confirmaram a eficiência do peneiramento. A geopolimerização diminuiu a densidade dos compósitos. Os compósitos com maiores teores de carga apresentaram maior valor de dureza e menores módulos de elasticidade. Já a análise de CAA, os compósitos com menores concentrações de geopolímero 1,4 e Polybond se mostraram mais eficientes no isolamento acústico. Os compatibilizantes aumentaram a mobilidade das amostras e quanto menor é a concentração de carga, menor é a rigidez do material. Os resultados das análises demonstraram viabilidade de processamento e inovações favoráveis para futuras aplicações e pesquisas deste compósito criado e estudado pela primeira vez no mundo. Vale ressaltar que os compósitos são grandes precursores para aquisição da sustentabilidade de produtos industrializados e para engenharia de materiais pelo reaproveitamento dos materiais provenientes de resíduos.

Palavras-chave: compósito; polietileno de alta densidade; geopolímero; escória de panela.

ABSTRACT

High-density polyethylene (HDPE) was used as a matrix for creating composites with geopolymer. Geopolymerization was carried out with ladle furnace slag in two different solid/liquid ratios (1.4 and 1.6) in an alkaline solution with sodium metasilicate. The in situ compatibilization method was used with two types of compatibilizers (maleic anhydride and Polybond) in an attempt to compare their effects when used in composites on the adhesion between the filler and the matrix. The production of the composites was carried out by extrusion at 200°C with different concentrations of the two types of geopolymer (10%, 20% and 30%) and with 3% of compatibilizer. The different extruded materials were used as raw material for production in a hot press at 200°C followed by controlled cooling in a cold press. The characterization of the polymer (HDPE), ladle furnace slag and composites were carried out by X-ray diffraction analysis (XRD), Fourier Transform infrared spectroscopy (FTIR), thermogravimetric analysis (TGA), differential scanning calorimetry (DSC), scanning electron microscopy (FEG-SEM), Shore D hardness test, density test, mechanical tensile test, thermal diffusivity analysis (LFA), acoustic absorption coefficient (CAA) and nuclear magnetic resonance spectroscopy in time domain ($RMN - DT$). XRD indicated that composites with lower filler concentrations tend to have lower compressive strength. The TGA showed that composites with geopolymer 1.4 had greater thermal stability than those manufactured with geopolymer 1.6. The compatibilizer maleic anhydride decreased the thermal diffusivity of the composites more efficiently than Polybond. The DSC showed that the geopolymer particles dispersed in the polymer matrix acted to hinder the mobility of the polymer chains, reducing crystallinity and increasing the effect on compatibility. SEM images showed greater porosity in geopolymer 1,4 and confirmed the sieving efficiency. Geopolymerization decreased the density of the composites. Composites with higher filler contents had higher hardness values and lower elastic moduli. As for the CAA analysis, composites with lower concentrations of geopolymer 1,4 and Polybond proved to be more efficient in acoustic insulation. The compatibilizers increased the mobility of the samples and the lower the charge concentration, the lower the stiffness of the material. The results of the analyzes demonstrated processing feasibility and favorable innovations for future applications and research of this composite created and studied for the first time in the world. It is worth mentioning that composites are great precursors for acquiring the sustainability of industrialized products and for materials engineering by reusing materials from waste.

Keywords: composite; high density polyethylene; geopolymer; ladle furnace slag.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 – Materiais utilizados em um boeing 787 (CHAUHAN; BHUSHAN, 2017).	19
Figura 2.1 – Linha do tempo do desenvolvimento sustentável	24
Figura 2.2 – Fluxograma simplificado da produção do aço (SILVA FILHO et al., 2014).	27
Figura 2.3 – Tipos de fornos no processo de fabricação de aço (PACKER, 2020) . .	28
Figura 2.4 – Desenho representativo das etapas do processo (STRAGLIOTTO, 2017).	29
Figura 2.5 – Etapas do processo de geopolimerização (FIGUEREDO et all., 2019) .	31
Figura 2.6 – Processo de geopolimerização: (a) reorganização do aluminossilicato, (b) formação de gel a partir da condensação de oligômeros e (c) polime- rização (SINGH; MIDDENDORF, 2020).	32
Figura 3.1 – Composição da escória de panela em porcentagem (%).	36
Figura 3.2 – Escória de aciaria de panela antes (a) e depois (b) da moagem.	37
Figura 3.3 – Quantidades de cada material utilizadas nas fabricação dos geopolímeros 1,4 e 1,6.	37
Figura 3.4 – Processos da geopolimerização: mistura dos materiais pelo agitador mecânico (a), geopolímero após as 20 h de agitação (b), geopolímero solidificado (c), geopolímero macerado (d) e geopolímero peneirado (e).	38
Figura 3.5 – Etapas da pesquisa.	42
Figura 3.6 – Dimensões (em milímetros) dos corpos de prova utilizados no ensaio de tração.	46
Figura 4.1 – Difratoograma do HDPE.	50
Figura 4.2 – Difratoograma dos compósitos 1.4.20:80:00 (a), E.20:77:03 (b) e E.20:77:03.POLY (c); onde Q = quartzo (SiO ₂), Z= zeólitas, Cr= cristobalita (SiO ₂). . .	51
Figura 4.3 – Difratoograma dos compósitos com anidrido maleico: 1.4.10:87:03 (a), 1.4.20:77:03 (b), 1.4.30:67:03 (c), 1.6.10:87:03 (d), 1.6.20:77:03 (e) e 1.6.30:67:03 (f).	52
Figura 4.4 – Difratoograma dos compósitos com Polybond: 1.4.10:87:03.POLY (a), 1.4.20:77:03.POLY (b), 1.4.30:67:03.POLY (c), 1.6.10:87:03.POLY (d), 1.6.20:77:03.POLY (e) e 1.6.30:67:03.POLY (f).	53
Figura 4.5 – Espectro de infravermelho por transformada Fourier (FTIR) do HDPE.	54
Figura 4.6 – Espectro de infravermelho por transformada Fourier (FTIR) da escória de Panela e dos geopolímeros 1,4 e 1,6.	55
Figura 4.7 – Espectro de infravermelho por transformada Fourier (FTIR) dos com- pósitos 1.4:30:67:03 e 1.6:30:67:03.	56
Figura 4.8 – Espectro de infravermelho por transformada Fourier (FTIR) dos com- pósitos 1.4:30:67:03 e 1.6:30:67:03.	56

Figura 4.9 – Espectro de infravermelho por transformada Fourier (FTIR) dos compósitos 1.4:30:67:03.POLY e 1.6:30:67:03.POLY.	57
Figura 4.10–Perda de massa das amostras em porcentagem.	59
Figura 4.11–TG do HDPE.	60
Figura 4.12–DTG do HDPE.	60
Figura 4.13–TG da escória de panela e dos geopolímeros 1,4 e 1,6.	61
Figura 4.14–DTG da escória de panela e dos geopolímeros 1,4 e 1,6.	62
Figura 4.15–TG dos compósitos E.20:77:03 e E.20:77:03.POLY.	63
Figura 4.16–DTG dos compósitos E.20:77:03 e E.20:77:03.POLY.	63
Figura 4.17–TG dos compósitos fabricados com diferentes concentrações de geopolímero 1,4, sem compatibilizante e com 3 % de anidrido maleico.	64
Figura 4.18–DTG dos compósitos fabricados com diferentes concentrações de geopolímero 1,4, sem compatibilizante e com 3 % de anidrido maleico.	65
Figura 4.19–TG dos compósitos fabricados com diferentes concentrações de geopolímero 1,6 com 3 % de anidrido maleico.	66
Figura 4.20–DTG dos compósitos fabricados com diferentes concentrações de geopolímero 1,6 com 3 % de anidrido maleico.	66
Figura 4.21–TG dos compósitos fabricados com diferentes concentrações de geopolímero 1,4 com 3 % de Polybond.	67
Figura 4.22–DTG dos compósitos fabricados com diferentes concentrações de geopolímero 1,4 com 3 % de Polybond.	68
Figura 4.23–TG dos compósitos fabricados com diferentes concentrações de geopolímero 1,6 com Polybond.	69
Figura 4.24–DTG dos compósitos fabricados com diferentes concentrações de geopolímero 1,6 com Polybond.	69
Figura 4.25–Gráfico do grau de cristalinidade de cada amostra em porcentagem.	71
Figura 4.26–DSC do resfriamento das amostras 1.4.20:80:00, 1.4.20:87:03 e 1.4.20:87:03.POLY.	73
Figura 4.27–DSC do segundo aquecimento das amostras 1.4.20:80:00, 1.4.20:87:03 e 1.4.20:87:03.POLY.	73
Figura 4.28–DSC do resfriamento das amostras fabricadas com anidrido maleico.	74
Figura 4.29–DSC do segundo aquecimento das amostras fabricadas com anidrido maleico.	74
Figura 4.30–DSC do resfriamento das amostras fabricadas com Polybond.	75
Figura 4.31–DSC do segundo aquecimento das amostras fabricadas com Polybond.	75
Figura 4.32–Imagem de micrografia com aumento de 100x da escória de panela macerada (a) e peneirada (b).	76
Figura 4.33–Imagem de micrografia com aumento de 250x dos geopolímeros: 1,4 macerado (a0, 1,4 peneirado (b), 1,6 macerado (c) e 1,6 peneirado (d).	77

Figura 4.34–Imagem de micrografia com aumento de 2000x da escória de panela (a) e do geopolímero 1,4 (b) pulverizados.	78
Figura 4.35–Imagem de micrografia com aumento de 1000x da escória de panela (a) e do geopolímero 1,6 (b) pulverizados.	78
Figura 4.36–Imagem de micrografia do geopolímero 1,4 com aumento de 5000x com morfologia similar às zeólitas.	79
Figura 4.37–Imagem de micrografia com aumento de 2000x dos pedaços do geopolímero 1,4 (a) e 1,6 (b).	79
Figura 4.38–Imagem de micrografia com aumento de 1000x da fratura do compósito 1.4.20:77:03 extrusado com 60 RPM (a), 90 RPM (b), 120 RPM (c) e 150 RPM (d).	80
Figura 4.39–Imagem de micrografia com aumento de 1000x da superfície do compósito 1.4.20:77:03 (a) e 1.4.20:80:00 (b).	81
Figura 4.40–Imagem de micrografia com aumento de 250x da superfície do compósito E.20:77:03 (a), E.20:77:03POLY (b) 1.4.20:77:03POLY (c).	81
Figura 4.41–Imagem de MEV com aumento de 1000x da superfície dos compósitos com diferentes concentrações de geopolímero 1,4 fabricados com anidrido maleico e Polybond: 1.4:10:87:03 (a); 1.4:20:77:03 (b); 1.4:30:67:03 (c); 1.4:10:87:03.POLY (d); 1.4:20:77:03.POLY (e); 1.4:30:67:03.POLY (f).	82
Figura 4.42–Imagem de MEV com aumento de 1000x da superfície dos compósitos com diferentes concentrações de geopolímero 1,6 fabricados com anidrido maleico e Polybond: 1.6:10:87:03 (a); 1.6:20:77:03 (b); 1.6:30:67:03 (c); 1.6:10:87:03.POLY (d); 1.6:20:77:03.POLY (e); 1.6:30:67:03.POLY (f).	83
Figura 4.43–Gráfico dos resultados do ensaio de dureza.	84
Figura 4.44–Gráfico com valores de densidade de cada amostra em g/cm ³	87
Figura 4.45–Gráfico com valores dos módulos de elasticidade de cada amostra em Mpa.	89
Figura 4.46–Resultados do ensaio de Difusividade Térmica (LFA).	92
Figura 4.47–Gráfico dos resultados do ensaio de Difusividade Térmica (LFA) em m ² /s.	92
Figura 4.48–Coeficientes de Absorção Acústica do HDPE.	95
Figura 4.49–Coeficientes de Absorção Acústica do HDPE e dos compósitos E.20:77:03 e E.20:77:03.POLY.	96
Figura 4.50–Coeficientes de Absorção Acústica dos compósitos com geopolímero 1,4 com e sem anidrido maleico.	97
Figura 4.51–Coeficientes de Absorção Acústica dos compósitos com geopolímero 1,6 com anidrido maleico.	98
Figura 4.52–Coeficientes de Absorção Acústica dos compósitos com geopolímero 1,4 com Polybond.	99

Figura 4.53–Coeficientes de Absorção Acústica dos compósitos com geopolímero 1,6 com Polybond.	100
Figura 4.54–Coeficientes de Absorção Acústica de todas as amostras.	101
Figura 4.55–Gráfico com os valores de NRC.	103
Figura 4.56–Gráfico com os valores das frações rígidas e móveis em porcentagem. . .	107
Figura C.1–RMN-DT da amostra 8.	130
Figura C.2–RMN-DT da amostra 11.	130
Figura C.3–RMN-DT da amostra 13.	131
Figura C.4–RMN-DT da amostra 14.	131
Figura C.5–RMN-DT da amostra 15.	132
Figura C.6–RMN-DT da amostra 16.	132
Figura C.7–RMN-DT da amostra 17.	133
Figura C.8–RMN-DT da amostra 18.	133
Figura C.9–RMN-DT da amostra 19.	134
Figura C.10–RMN-DT da amostra 20.	134
Figura C.11–RMN-DT da amostra 21.	135
Figura C.12–RMN-DT da amostra 22.	135
Figura C.13–RMN-DT da amostra 23.	136
Figura C.14–RMN-DT da amostra 24.	136
Figura C.15–RMN-DT da amostra 25.	137
Figura C.16–RMN-DT da amostra 26.	137
Figura C.17–RMN-DT da amostra 27.	138
Figura C.18–RMN-DT da amostra 28.	138

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Propriedades desejáveis para material isolante térmico e acústico. . . .	35
Tabela 3.1 – Amostras.	40
Tabela 3.2 – corpos de prova utilizados em cada análise.	41
Tabela 3.3 – Modelo de Tabela de cálculo - ANOVA	48
Tabela 4.1 – Dados obtidos no ensaio de TGA.	58
Tabela 4.2 – Resultados de DSC.	71
Tabela 4.3 – Resultados do ensaio de dureza Shore D.	84
Tabela 4.4 – Resultados ANOVA - Dureza.	85
Tabela 4.5 – Comparação entre médias (d.m.s) - Dureza.	86
Tabela 4.6 – Resultados do ensaio de densidade.	87
Tabela 4.7 – Média dos resultados obtidos no ensaio de tração.	89
Tabela 4.8 – Resultados ANOVA - Tração.	90
Tabela 4.9 – Comparação entre médias (d.m.s) - Tração.	91
Tabela 4.10–Resultados ANOVA - LFA.	93
Tabela 4.11–Comparação entre médias (d.m.s) - LFA.	94
Tabela 4.12–Análise das amostras para isolamento acústico.	101
Tabela 4.13–Cálculo do NRC.	103
Tabela 4.14–Resultados ANOVA - NRC.	104
Tabela 4.15–Comparação entre médias (d.m.s) - NRC.	104
Tabela 4.16–Resultados do ensaio de <i>RMN – DT</i>	106
Tabela 4.17–Propriedades desejáveis para material isolante térmico e acústico. . . .	108
Tabela A.1 – Resultados de tração - parte 1.	124
Tabela A.2 – Resultados de tração - parte 2.	125
Tabela B.1 – Resultados CAA - parte 1.	126
Tabela B.2 – Resultados CAA - parte 2.	127
Tabela B.3 – Resultados CAA - parte 3.	128
Tabela B.4 – Resultados CAA - parte 4.	129

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

α	Alpha
$\alpha(T)$	Difusividade térmica
ANOVA	Análise de Variância
ΔH_m	Entalpias de fusão
$\Delta H_{100\%}$	Entalpia do polímero totalmente cristalino
λ	Lambda
Θ	Theta
Al	Alumínio
Al_2O_3	Alumina
BOF	Escória de forno de oxigênio básico
CBPF	Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas
CMMAD	Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento
CP's	Corpos de prova
CTEx	Centro Tecnológico do Exército
d	Valor médio das duas diagonais de recuo.
DRX	Difração de raio-X
e	Espessura da amostra
EAF	Escória de forno elétrico a arco
EOF	Escória de forno otimizador de energia
F	Força de teste
(F_eO)	Óxido de ferro
FTIR	Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (“Fourier-transform infrared spectroscopy”)
g	Aceleração gravitacional local

HDPE	Polietileno de alta densidade
ICI	Imperial Chemical Industries
ICSD	Inorganic Cristal Structure Databese
IMA	Instituto de Macromoléculas
IME	Instituto Militar de Engenharia
K_2SiO_3	Silicato de potássio
KOH	Hidróxido de potássio
LDPE	polietileno de baixa densidade
LFA	Laser Flash Analysis
LLDPE	polietileno linear de baixa densidade
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
(Na_2SiO_3)	Metassilicato de sódio
NaOH	Hidróxido de sódio
Na_2SiO_3	Silicato de sódio
NRC	Noise Reduction Coefficient
ONU	Organização das Nações Unidas
PE	Polietileno
RMN-DT	Espectroscopia de Ressonância Magnética Nuclear no Domínio do Tempo
Si	Silício
SiO_2	Sílica
$t_{1/2}$	Tempo necessário para que a parte de trás da amostra atinja a metade da temperatura máxima após o aquecimento por pulso.
TGA	Análise termogravimétrica (“Thermogravimetric analysis”)
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
WSA	World Steel Association (WSA)
x	Proporção da carga na matriz
X_c	Grau de cristalinidade

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	POSICIONAMENTO DA PESQUISA	17
1.2	OBJETIVOS	19
1.2.1	GERAL	19
1.2.2	ESPECÍFICOS	19
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1	SUSTENTABILIDADE E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL	21
2.2	POLIETILENO DE ALTA DENSIDADE	24
2.2.1	COMPÓSITOS	25
2.3	ESCÓRIA DE ACIARIA DE PANELA	25
2.4	GEOPOLÍMERO	29
2.4.1	MECANISMOS DE REAÇÃO	31
2.4.2	ATIVAÇÃO ALCALINA	33
2.5	ISOLAMENTO TÉRMICO E ACÚSTICO EM AERONAVES	34
3	MATERIAIS E MÉTODOS	36
3.1	MATERIAIS	36
3.2	PREPARAÇÃO DOS MATERIAIS	36
3.3	SÍNTESE DO GEOPOLÍMERO	37
3.4	POLIETILENO DE ALTA DENSIDADE	38
3.5	FABRICAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	39
3.6	DIFRAÇÃO DE RAIOS X (DRX)	42
3.7	ESPECTROSCOPIA DE INFRAVERMELHO POR TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR)	42
3.8	ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA (TGA)	43
3.9	CALORIMETRIA DE VARREDURA DIFERENCIAL (DSC)	43
3.10	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)	44
3.11	ENSAIO DE DUREZA SHORE D	44
3.12	ENSAIO DE DENSIDADE	44
3.13	ENSAIO MECÂNICO DE TRAÇÃO	45
3.14	ANÁLISE DE DIFUSIVIDADE TÉRMICA (LFA)	46
3.15	COEFICIENTE DE ABSORÇÃO ACÚSTICA (CAA)	46
3.16	ESPECTROSCOPIA DE RESSONÂNCIA MAGNÉTICA NUCLEAR NO DOMÍNIO DO TEMPO (<i>RMN – DT</i>)	47
3.17	ANÁLISE ESTATÍSTICA	47

3.17.1	ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA)	47
3.17.2	TESTE DE TUKEY	49
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	50
4.1	DIFRAÇÃO DE RAIOS X (DRX)	50
4.2	ESPECTROSCOPIA DE INFRAVERMELHO POR TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR)	53
4.3	ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA (TGA)	57
4.4	CALORIMETRIA DE VARREDURA DIFERENCIAL (DSC)	70
4.5	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)	76
4.6	ENSAIO DE DUREZA SHORE D	83
4.7	ENSAIO DE DENSIDADE	86
4.8	ENSAIO MECÂNICO DE TRAÇÃO	88
4.9	ANÁLISE DE DIFUSIVIDADE TÉRMICA (LFA)	91
4.10	COEFICIENTE DE ABSORÇÃO ACÚSTICA (CAA)	94
4.11	ESPECTROSCOPIA DE RESSONÂNCIA MAGNÉTICA NUCLEAR NO DOMÍNIO DO TEMPO (RMN-DT)	105
4.12	COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS	107
5	CONCLUSÕES	109
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	111
	REFERÊNCIAS	112
	APÊNDICE A – RESULTADOS DO ENSAIO DE TRAÇÃO	124
	APÊNDICE B – RESULTADOS COEFICIENTE DE ABSORÇÃO ACÚSTICA (CAA)	126
	APÊNDICE C – RESULTADOS DE ESPECTROSCOPIA DE RES- SONÂNCIA MAGNÉTICA NUCLEAR NO DOMÍ- NIO DO TEMPO (RMN-DT)	130

1 INTRODUÇÃO

1.1 POSICIONAMENTO DA PESQUISA

Um dos problemas globais existentes é a poluição do ecossistema que é resultado de múltiplos fatores, os quais os efluentes industriais se destacam devido ao inegável efeito na saúde pública e no meio ambiente (ALOUANI et al., 2021). Nesse contexto, na busca de melhorias e soluções, a redução de resíduos na mineração e das atividades industriais se tornou uma das principais preocupações ambientais, sendo uma questão fundamental para o desenvolvimento de novas tecnologias e na busca de converter resíduos em produtos de valor agregado (MURALEEDHARAN; NADIR, 2021).

Durante a fabricação do aço, existem subprodutos como as escórias que são geralmente descartadas, principalmente pelo seu alto conteúdo metálico e por ter comportamento de expansão (SATISH KUMAR et al., 2019). Assim, a utilização destas escórias de aciaria começaram então a serem estudadas como matéria prima constituinte em pavimentações e estradas, aterros, alvenaria de edifícios, produção de cimento e produção de fertilizantes (PAUL; SURESH; PAL, 2021). Estas escórias de aciaria são ricas em minerais de sílica e alumina que se qualificam para a síntese de geopolímeros, permitindo a reciclagem dos resíduos como material secundário (LIN et al., 2020). Os geopolímeros são materiais inorgânicos semicristalinos formados pela ativação alcalina de aluminossilicato. Suas propriedades podem ser comparadas ao concreto de cimento Portland comum, tendo uma resistência mecânica comparável ou ainda superior, além de boas propriedades físicas como menor retração, baixa relação densidade-resistência e durabilidade. Desta forma, o geopolímero encontrou amplas aplicações como ligante para concretos, tijolos, aterros, estradas e telhas (HUI-TENG et al., 2021). Nos últimos anos, houve um aumento substancial de estudos voltados à utilização de precursores tradicionais, como derivados de resíduos, sendo estes escória, cinza volante de carvão e sintéticos como metacaulim (PAYA et al., 2019). Estudos mostraram que a escória do forno panela tem propriedades cimentícias e um potencial em melhorar as propriedades dos geopolímeros (YONG-SING et al., 2021).

O polietileno de alta densidade (HDPE) é um tipo de poliolefina termoplástica produzida por polimerização catalítica de etileno, sendo considerado mundialmente um dos polímeros mais utilizados devido seu baixo custo e boas propriedades como alta resistência à corrosão, alto nível de tenacidade, boa resistência ao calor e ao frio, boa estabilidade química, alta rigidez e boa resistência mecânica. Tais fatores supracitados favorecem a sua ampla aplicação na indústria e no cotidiano (KORIEEM; OLLICK; ELHADARY, 2021; SHAHIN; BARSOUM; KORKEES, 2021; WANG et al., 2021a). O HDPE tem excelente flexibilidade em baixas temperaturas e boa resistência à permeação de umidade (GARCÍA

et al., 2021). Alguns estudos revelam que o HDPE sofre pouca degradação possuindo um desempenho de vida útil de mais de 100 anos (NGUYEN et al., 2021).

Compósitos termoplásticos são materiais notáveis e compreendem a fase contínua da matriz polimérica e a fase dispersa (fase de reforço) distribuída nessa matriz. As duas fases devem possuir diferença nas propriedades químicas, físicas e mecânicas, sendo separadas por uma interface bem definida. A resistência do compósito produzido depende principalmente da razão entre a matriz e o reforço e da qualidade da interface entre os materiais, isto é, da adesão entre as fases. Compósitos termoplásticos tem se destacado cada vez mais por serem leves, possuírem alta resistência à fadiga, resistência à corrosão e isolamento elétrico, tornando-se amplamente utilizados nos campos da engenharia, como automotiva, civil, aeronáutica, entre outras (KHOUAJA; KOUBAA; BEN DALY, 2021; SADIK et al., 2021).

Nos últimos anos, a demanda por aviões produzidos com novos materiais e tecnologia vem crescendo com o avanço da aviação comercial e executiva (SCOTTON; GUERRINI; OLIVEIRA, 2021). Desde 1960, a utilização de compósitos na indústria aeroespacial tem crescido ao longo dos anos, conferindo às estruturas uma redução no peso e uma resistência comparável ou até mesmo superior a alguns metais utilizados na aviação. A leveza das estruturas das aeronaves acarreta também uma menor geração de poluentes pelo fato de consumir uma menor quantidade de combustíveis (DUBIELLA; VICENTINI, 2018). Os compósitos são muito utilizados na fabricação das aeronaves principalmente nas seguintes partes: asas, estabilizadores vertical e horizontal, feixe de quilha e seções de fuselagem. Além disso, são aplicados em elementos de controle de voo, em carenagens e no interior da aeronave, como portas, pisos e painéis de revestimento da cabine (RÊGO; SANTOS; MARINHO, 2020). Os materiais compósitos tornaram-se um fator importante para o avanço das aeronaves devido ao seu peso leve, alta resistência e projetabilidade. Algumas aeronaves avançadas são fabricadas com mais de 50% dos materiais utilizados sendo compósitos.(MIAO et al., 2023). No boeing 787, por exemplo, 50% dos materiais utilizados são compósitos, o que confirma a ampla aplicação destes materiais, como mostra a Figura 1.1 (CHAUHAN; BHUSHAN, 2017).

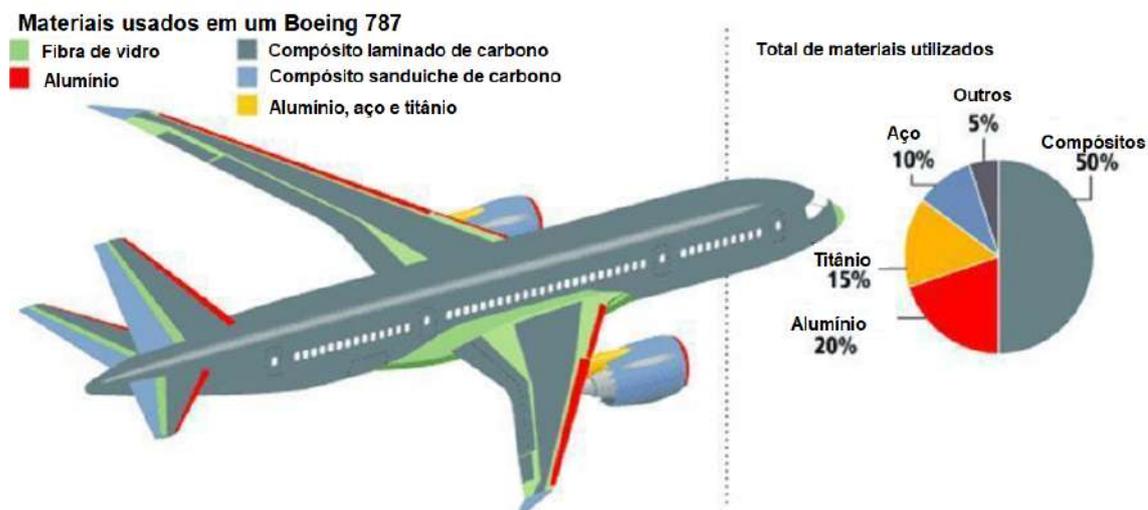


Figura 1.1 – Materiais utilizados em um boeing 787 (CHAUHAN; BHUSHAN, 2017).

Existem pesquisas que demonstram que os geopolímeros possuem grande potencial de isolamento térmico e acústico, bem como dos compósitos termoplásticos (SEKKAL; ZAOUI, 2023; ALY et al., 2021). Diante disso e da grande utilização de compósitos na produção de aeronaves, este trabalho tem a finalidade de criar um compósito de polietileno de alta densidade com partículas geopoliméricas obtidas a partir de escória de panela, reaproveitando um rejeito industrial proveniente da fabricação do aço, contribuindo com a sustentabilidade. É esperado que este compósito, fabricado e estudado pela primeira vez no mundo, possibilite o uso alternativo de rejeitos industriais, resultando na redução de impactos ambientais e gerando lucro, bem como o emprego de um material alternativo para revestimentos interno de aeronaves, possibilitando um bom isolamento térmico e acústico e reduzindo o peso de uma aeronave, por ser um material leve e de elevada resistência.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Geral

Neste trabalho, foi produzido e caracterizado um compósito de polietileno de alta densidade, reforçado por geopolímero oriundo de escória de aciaria de panela. O trabalho visa obter um compósito com reaproveitamento de rejeitos industriais buscando aplicações em revestimentos de aeronaves que melhorem o isolamento térmico e acústico.

1.2.2 Específicos

O presente trabalho envolve as seguintes etapas:

- Caracterização granulométrica, química, estrutural e morfológica da escória de aciaria e do polímero.

-
- Avaliar a influência das diferentes concentrações sólido/líquido na geopolimerização;
 - Otimizar as condições de mistura dos materiais através de extrusão e fabricação dos corpos de prova em prensa com aquecimento;
 - Caracterizar os compósitos através de análises de espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR), difração de raios X (DRX), análises de termogravimetria (TGA), calorimetria de varredura diferencial (DSC), microscopia eletrônica de varredura (MEV), dureza Shore D, densidade, ensaio mecânico de tração, ensaio de difusividade térmica (LFA), coeficiente de absorção acústica e espectroscopia de ressonância magnética nuclear no domínio do tempo (RMN-DT).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 SUSTENTABILIDADE E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

Sustentável, sustentabilidade e desenvolvimento sustentável são termos usados globalmente. “Sustentável” se refere as soluções à deterioração do sistema ambiental humano com auxílio da sustentabilidade e do desenvolvimento sustentável. A sustentabilidade mensura o nível da qualidade deste sistema buscando avaliar o seu grau de distância em relação ao sustentável. Já o desenvolvimento sustentável atua com estratégias para aproximar o nível de sustentabilidade ao sistema ambiental humano sustentável. Todos esses termos possuem o mesmo objetivo: alcançar a ideia de sistema ambiental humano sustentável (FEIL; SCHREIBER, 2017). A sustentabilidade e o desenvolvimento sustentável são termos que estão entrelaçados, ou seja, envolvidos com propósitos semelhantes, uma vez que a sustentabilidade é o objetivo do desenvolvimento sustentável (CARVALHO, 2019).

Em 1970 começaram as preocupações com as modificações severas na qualidade do ar, do solo e da água. Em 1972, com a observação de que o fluxo de degradação se mantinha e que os recursos naturais não seriam suficientes para as futuras gerações, a ONU (Organização das Nações Unidas) realizou então a Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente Humano, com a participação de 113 países, 250 organizações não governamentais e organismos da ONU” na cidade de Estocolmo, sendo o momento que a comunidade mundial passa a conceber a possibilidade de se desenvolver sem degradar de modo excessivo e insustentável o planeta (GOMES; FERREIRA, 2018).

A interpretação sobre o termo “desenvolvimento sustentável” não é única. O conceito está sempre em construção e constantemente é revisado e aperfeiçoado (CORREIA et al., 2018). O conceito mais aceito e utilizado é o de 1987 publicado no Relatório Brundtland proposto pela Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (CMMAD). Nesse relatório surgiu a definição de desenvolvimento sustentável que popularizou a noção de garantir que o meio ambiente natural seja mantido na sua forma e que possa seguir satisfazendo as necessidades humanas das gerações futuras, combinado com o duplo desafio de assegurar a igualdade das gerações passadas, atuais e futuras (LAZARO; GREMAUD, 2017).

Em 1992 foi realizada no Rio de Janeiro a Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento, também chamada de Cúpula da Terra, ou ECO-92, com representantes de 108 países. O objetivo foi avaliar os acontecimentos ambientais

ocorridos desde a Conferência de Estocolmo. Esse evento resultou em cinco documentos importantes: Declaração do Rio sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, Agenda 21, Princípios para a Administração Sustentável das Florestas, Convenção da Biodiversidade Biológica, Convenção sobre Mudança do Clima (MARCO; MEZZAROBÀ, 2017).

Em 1997 ocorreu a conferência Rio+5 que deixa claro que o modelo de desenvolvimento do tipo capitalista é contraditório as diretrizes estabelecidas para o desenvolvimento sustentável, fomentando desigualdades sociais numa dinâmica de exploração econômica da natureza (ANTUNES; NASCIMENTO; QUEIROZ, 2017). Na África do Sul, na cidade de Joanesburgo, ocorreu a Rio+10, em 2002, conhecida também como Cúpula da Terra sobre a Sustentabilidade e Desenvolvimento. O objetivo principal foi discutir os avanços e lições aprendidas a partir da Conferência Eco-92, discutindo também a aplicação real da Agenda 21. O resultado desse fórum foi desalentador, pois ao avaliarem as mudanças ocorridas de dez anos a partir da mega conferência do Rio, assumiram que recomendações contidas na Agenda 21 se transformaram em proposições jamais cumpridas por nenhum país (BARRETO; VILAÇA, 2018). No ano de 2012, ocorreu no Rio de Janeiro a reunião de Cúpula denominada Rio+20. Nessa reunião, a preocupação principal era com os riscos de retrocessos em relação às conquistas obtidas no encontro de 1992, principalmente no tocante às questões climáticas e proteção da diversidade biológica (JAPIASSÚ; GUERRA, 2017).

Em 2015 as Nações Unidas aprovaram um plano para abordar o desenvolvimento sustentável em todos os contextos, a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável. Nela, existem 169 alvos com 17 objetivos a serem alcançados em termos de meio ambiente e desenvolvimento humano até o ano de 2030 (FERREIRA et al., 2021). Os objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) representam o eixo central da Agenda 2030, orientando as ações nas três dimensões do desenvolvimento sustentável: econômica, social e ambiental. As metas indicam os caminhos a serem trilhados e as medidas a serem adotadas para promover o seu alcance. Existem 17 ODS que serão descritas a seguir, destacando as ODS 12 e 13, pois este trabalho tem estes como objetivo. As 17 ODS são:

ODS 1: Acabar com a pobreza em todas as suas formas, em todos os lugares;

ODS 2: Acabar com a fome, alcançar a segurança alimentar e melhoria da nutrição e promover a agricultura sustentável;

ODS 3: Assegurar uma vida saudável e promover o bem-estar para todos, em todas as idades;

ODS 4: Assegurar a educação inclusiva e equitativa e de qualidade, e promover oportunidades de aprendizagem ao longo da vida para todos;

ODS 5: Alcançar a igualdade de gênero e empoderar todas as mulheres e meninas;

ODS 6: Assegurar a disponibilidade e gestão sustentável da água e saneamento

para todas e todos;

ODS 7: Assegurar o acesso confiável, sustentável, moderno e o preço acessível à energia para todos;

ODS 8: Promover o crescimento econômico sustentado, inclusivo e sustentável, emprego pleno e produtivo, e trabalho decente para todos e todas;

ODS 9: Construir infraestruturas resilientes, promover a industrialização inclusiva e sustentável e fomentar a inovação;

ODS 10: Reduzir a desigualdade dentro dos países e entre eles;

ODS 11: Tornar as cidades e os assentamentos humanos inclusivos, seguros, resilientes e sustentáveis;

ODS 12: Assegurar padrões de produção e de consumo sustentáveis;

ODS 13: Tomar medidas urgentes para combater a mudança climática e seus impactos;

ODS 14: Conservação e uso sustentável dos oceanos, dos marres e dos recursos marinhos para o desenvolvimento sustentável;

ODS 15: Proteger, recuperar e promover o uso sustentável dos ecossistemas terrestres, gerir de forma sustentável as florestas, combater a desertificação, deter e reverter a degradação da terra e deter a perda de biodiversidade;

ODS 16: Promover sociedades pacíficas e inclusivas para o desenvolvimento sustentável, proporcionar o acesso à justiça para todos e construir instituições eficazes, responsáveis e inclusivas em todos os níveis;

ODS 17: Fortalecer os meios de implementação e revitalizar a parceria global para o desenvolvimento sustentável (SILVA, 2018).

A Figura 2.1 mostra de forma simplificada a linha do tempo dos principais acontecimentos relacionados ao desenvolvimento sustentável.



Figura 2.1 – Linha do tempo do desenvolvimento sustentável

2.2 POLIETILENO DE ALTA DENSIDADE

A primeira síntese industrialmente prática de polietileno foi descoberta em 1933 por Eric Fawcett e Reginald Gibson, na Imperial Chemical Industries (ICI), Inglaterra. O polietileno (PE) se tornou um dos materiais termoplásticos mais utilizados no mundo. Originalmente ele era aplicado em isolamento de cabos de radar durante a Segunda Guerra Mundial. Em 1953, dois grupos de pesquisa (o de John P. Hogan e Robert L. Banks (EUA) e de Karl Ziegler (Alemanha)) produziram ao mesmo tempo, pela primeira vez, o polietileno de alta densidade (HDPE) (NGUYEN et al., 2021; CHAKRABARTY; VASHISHTHA; LEEDER, 2015).

O polietileno possui grande valor comercial devido ao seu baixo custo e boas propriedades de processamento. Classificado de acordo com seu índice de fluidez e densidade, podendo ser polietileno de alta densidade (HDPE), polietileno de baixa densidade (LDPE) e polietileno linear de baixa densidade (LLDPE). O HDPE possui várias vantagens sobre outros materiais plásticos, como baixo custo de fabricação, melhor hidrofobicidade e propriedades físicas, químicas, mecânicas e térmicas excepcionalmente boas. Dentre essas propriedades está a alta flexibilidade, translucidez e dureza considerável em temperaturas muito baixas. Algumas propriedade que podem ser vistas como desvantagens incluem

uma baixa rigidez, maior encolhimento do molde e pobre resistência ao calor (MOHAN BHASNEY et al., 2020).

O HDPE é um termoplástico semicristalino que possui uma ampla gama de aplicações devido à sua facilidade de processamento, boas propriedades mecânicas, excelente biocompatibilidade, boa resistência química, reciclabilidade e baixo custo. Através do desenvolvimento de novas tecnologias que envolvem o HDPE, como sua utilização em compósitos, é possível produzir materiais avançados com propriedades superiores ao polímero puro, o que favorece a expansão de seu uso e a competição com outros polímeros de maior valor agregado (SAVINI; ORÉFICE, 2020).

2.2.1 COMPÓSITOS

Os compósitos são materiais oriundos da mistura de um ou mais materiais que visam combinar suas propriedades buscando melhorar suas características mecânicas, das quais o material puro não é capaz de alcançar (SANTOS et al., 2020). Os compósitos são constituídos de duas fases: a matriz e o reforço. São fabricados buscando otimizar os pontos fortes de cada uma das fases. A matriz é o que proporciona estrutura ao material compósito, preenchendo os espaços vazios e mantendo os materiais em suas posições relativas. Já o reforço é o que destaca as propriedades mecânicas, eletromagnéticas ou químicas do compósito como um todo (LIGOWSKI; SANTOS; FUJIWARA, 2015).

Os compósitos podem ser classificados em três divisões principais: os compósitos reforçados com partículas, os reforçados com fibras e os estruturais (SOUZA, 2018). A interface, ou seja, a adesão entre as fases produz uma das maiores influências nas propriedades mecânicas dos compósitos. Essa adesão atua diretamente sobre as propriedades mecânicas e químicas do compósito criado. Dessa forma é preciso ter uma boa interação entre os dois materiais constituintes (PEREIRA et al., 2021).

Cada vez mais tem se buscado desenvolver materiais que sejam capazes de conciliar o alto desempenho dos polímeros com a questão ecológica. Assim, a utilização de materiais compósitos tem aumentado continuamente pelas melhorias das características dos materiais, ou seja, das propriedades da matriz polimérica, do reforço e da interface matriz-reforço (RESENDE; OLIVEIRA; MULINARI, 2017).

2.3 ESCÓRIA DE ACIARIA DE PANELA

Desde a Revolução Industrial, no século 18, a demanda por aço aumentou continuamente, principalmente devido aos seus custos de produção relativamente baixos e sua propriedade de ser totalmente reciclável. A World Steel Association (WSA) estimou o crescimento da produção anual de aço de 189 milhões de toneladas em 1950 para 1869,9 milhões de toneladas em 2019 e ainda reuniu um aumento de 7% da produção de aço

bruto para 161,9 milhões de toneladas em outubro de 2020, em comparação ao mesmo mês do ano anterior (LUCA; PETRESCU, 2021). No Brasil, mesmo com a crise econômica dos dias atuais, de acordo com o Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços e Instituto Aço Brasil (2020), a demanda por aço aumentou cerca de 4,5% ao ano, desde 1970 até 2013. A exportação do produto é bem significativa no país, sendo exportado 40% do aço produzido, o que tornou o Brasil o 6º maior exportador líquido em 2018, de acordo com a WSA. Com a melhoria do setor econômico é esperado que as emissões desse setor aumentem (SOUZA; PACCA, 2021).

No processo de fabricação do aço, o minério de ferro é transformado em aço de forma que seja utilizado comercialmente. A primeira etapa é chamada de redução, onde tem como objetivo reduzir ao máximo o teor de oxigênio do minério (óxido de ferro (F_eO)). O minério então é colocado em alto fornos na presença de carbono (em forma de coque ou carvão vegetal) e alguns fundentes que auxiliam a produção de escórias. Assim é obtido o ferro-gusa, que tem cerca de 3,5 a 4,0% de carbono em sua estrutura. Caso ocorra uma segunda fusão, tem-se o ferro fundido, com teores de carbono entre 2 e 6,7%. A partir daí é feita uma análise química do ferro verificando os teores de carbono, silício, fósforo, enxofre, manganês e outros elementos. O material então vai para a aciaria, uma unidade da siderúrgica onde é feita a transformação desse material em aço, que é a etapa de refino. Nesta etapa o aço resulta da descarbonatação do ferro-gusa controlando o teor de carbono para no máximo 2%. Tem-se então uma liga metálica constituída basicamente de ferro e carbono (variando de 0,008% a 2,11%) e elementos residuais resultantes do processo de fabricação. Por fim, ocorre o ligotamento, onde o aço sofre o processo de solidificação e é deformado mecanicamente para ser transformado em produtos siderúrgicos, constituindo assim o processo de laminação (FERRAZ, 2003) (BISPO et al., 2019). A Figura 2.2 mostra o fluxograma simplificado da produção de aço (SILVA FILHO et al., 2014).

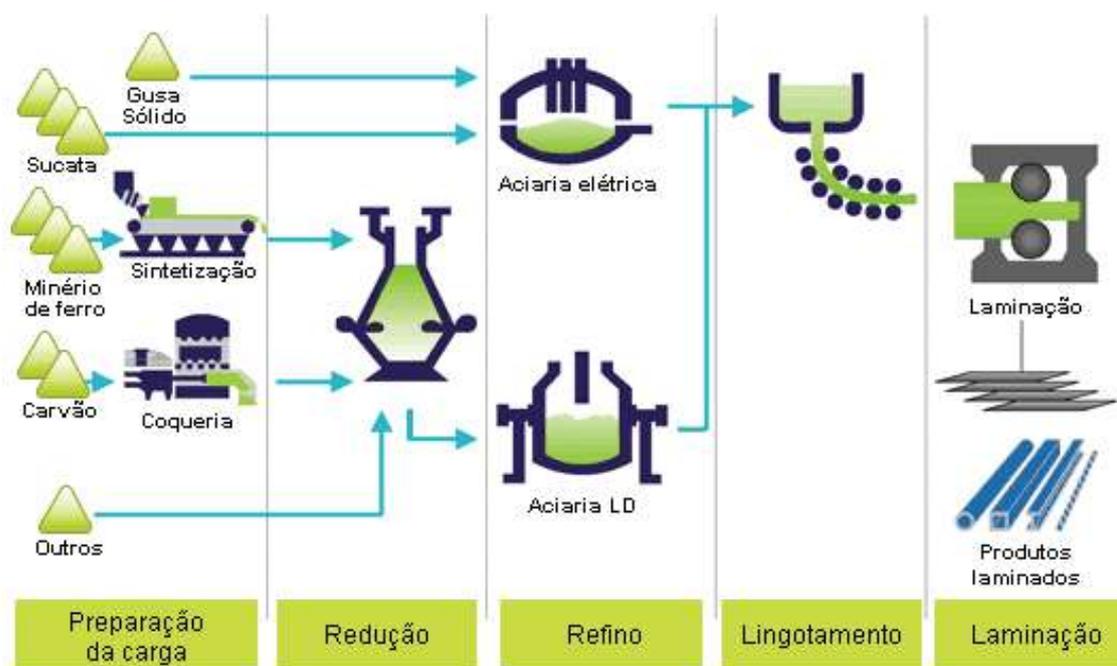


Figura 2.2 – Fluxograma simplificado da produção do aço (SILVA FILHO et al., 2014).

Durante a fabricação do aço, com o objetivo de extrair impurezas do ferro, são adicionados materiais de fluxo que projetam um coproduto complexo chamado de escória. As escórias podem ser caracterizadas como ácidas, neutras ou básicas. As características físico-químicas das escórias dependem das impurezas químicas originais no minério de ferro, sinter, carvão, sucata, natureza dos materiais de fluxo e do ambiente químico sob o qual a escória é produzida. As impurezas químicas do aço incluem silício, manganês, fósforo e enxofre, que são quimicamente convertidas e removidas em escória. A composição da escória depende também de alguns parâmetros (temperatura, ambiente do gás, taxa de resfriamento, entre outros) que resultam em uma enorme variedade de escórias. A maioria das escórias de fabricação de aço são materiais alcalinos devido à matriz do material ser solúvel, liberando óxidos de magnésio e cálcio. Esses óxidos se combinam com a água para produzir soluções de hidróxido de cálcio e hidróxido de magnésio (O'CONNOR et al., 2021).

A escória de aciaria tem a função de servir como um receptor para os constituintes indesejáveis do banho metálico e também de agir como um reservatório oxidante, o que faz com que ocorra uma dissolução considerável do composto portador (SILVA et al., 2016). As siderúrgicas produzem dois tipos de escórias em larga escala de acordo com o processo produtivo utilizado: as escórias de alto-forno, resultantes da fusão do minério de ferro para a obtenção do ferro-gusa com alto teor de carbono e as escórias de aciaria que resultam da produção do aço, podendo ser obtidas em fornos elétricos e conversores a oxigênio, processo conhecido como *Lins-Donawitz* ou *Blast Oxygen* (COSTA et al., 2017). A escória flutua acima do aço fundido, pois esta tem uma densidade menor que o aço, sendo removida separadamente a 1600 °C e resfriada. Para cada tonelada de aço produzida, são gerados

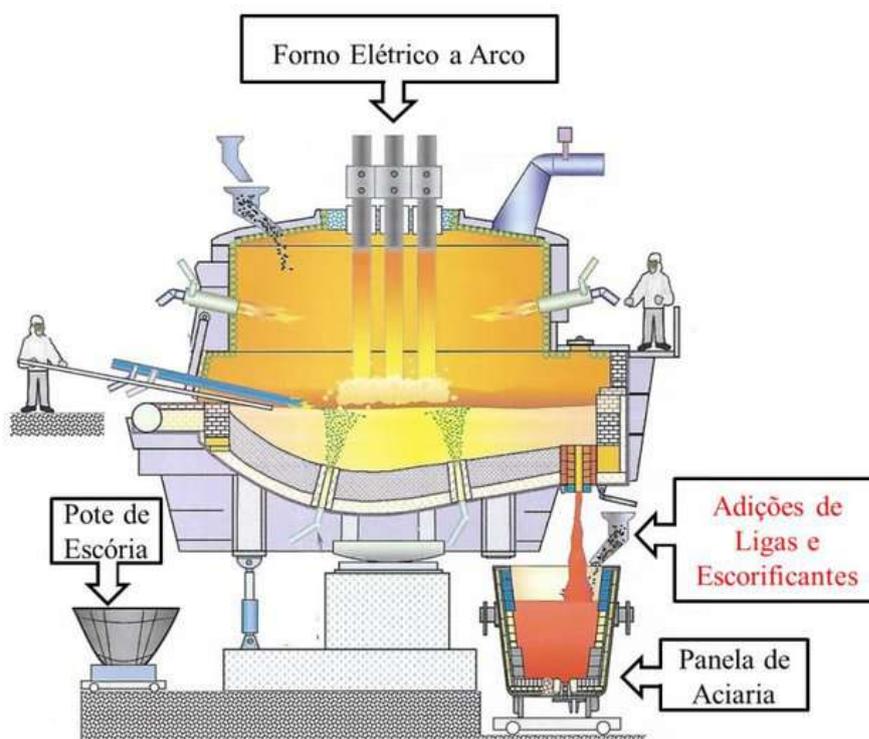


Figura 2.4 – Desenho representativo das etapas do processo (STRAGLIOTTO, 2017).

A escória vem sendo utilizada em diversas aplicações nos últimos tempos, como em concreto, asfalto, lastro, bases de estrada, drenagem livre, preparo de terrenos, agricultura, pavimentação, entre outras (MALTEZ et al., 2017).

2.4 GEOPOLÍMERO

Os materiais geopoliméricos estão sendo cada vez mais estudados em diversas áreas da engenharia por ser um material com excelente resistência química, mecânica e térmica. O geopolímero é um material poroso, o que contribui para o isolamento termoacústico e o qualifica para utilização em aeronaves (EL ALOUANI et al., 2021). O primeiro conceito de geopolímero foi proposto por Davidovits em 1978, afirmando que o material é sustentável e resultante da reação de subprodutos industriais (cinzas volantes, escória, metacaulim, cinza de óleo de palma, cinza de casca de arroz, entre outros) com soluções alcalinas (soluções de hidróxido e silicatos solúveis) em ambiente de alta temperatura (CHEN et al., 2021). Davidovits propôs uma estrutura -Si-O-Al- (rede tridimensional de silicoaluminato), com a razão Si:Al variando com base em seleção de precursores e ativadores (DHASINDRAKRISHNA et al., 2021). A rede de geopolímeros consiste em tetraedros de SiO_4 e AlO_4 ligados por átomos de oxigênio. Há um equilíbrio com a carga negativa e os íons positivos (por exemplo, K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , e Li^+) presentes na estrutura. A fórmula empírica básica para a estrutura do geopolímero é (XIAOLONG et al., 2021):

$$M_n[-(SiO_2)_z - AlO_2]_n \cdot wH_2O \quad (2.1)$$

onde:

M = cátion monovalente de metal alcalino/alcalino-terroso (Ca^{+2} , Li^+ , K^+ ou Na^+);

n = grau de policondensação;

z = número de tetraedros de SiO_4

w = quantidade de moléculas de água.

Geopolímeros são aluminossilicatos semicristalinos que se formam devido à reação de aluminossilicatos em meio alcalino. Sua composição química se assemelha a das zeólitas, porém sua microestrutura é amorfa (JOHN; NADIR; GIRIJA, 2021). Os geopolímeros podem ser usados em compósitos possuindo uma ampla gama de aplicações, como por exemplo, adequação para infraestrutura de transporte, pavimentos, aplicações subaquáticas, reparo e reabilitação de estruturas, bem como os recentes desenvolvimentos em impressão 3D (ALBIDAH, 2021).

Davidovits desenvolveu a geopolimerização pela primeira vez em 1979 e se tratando de rejeitos industriais é considerada um excelente agente de imobilização de resíduos (SHEHATA; SAYED; ABDELKAREEM, 2021). A geopolimerização pode ser interpretada como um processo com uma série de estágios: dissolução, difusão, oligomerização, polimerização adicional e endurecimento por desidratação das fontes de alumínio-silício em uma solução alcalina (ZHU et al., 2021). Na etapa de dissolução, as soluções alcalinas são responsáveis por dissolver as fontes de aluminossilicatos produzindo os monômeros de aluminatos e silicatos. Em seguida ocorre o equilíbrio das espécies onde uma mistura complexa de espécies de aluminatos, silicatos e aluminossilicatos é formada. Ocorre então a formação de um gel por uma solução supersaturada de aluminossilicatos com elevado pH, fazendo com que o processo libere a água que foi consumida durante a dissolução. Após a gelificação, o sistema se reorganiza resultando em redes tridimensionais de aluminossilicatos. Durante o crescimento dessas redes, o núcleo atinge um tamanho crítico iniciando a formação de cristais ordenados, que são responsáveis pela polimerização e solidificação do material (FIGUEIREDO; COURA; MAZZINGHY, 2019). A Figura 2.5 apresenta as etapas do processo de geopolimerização.

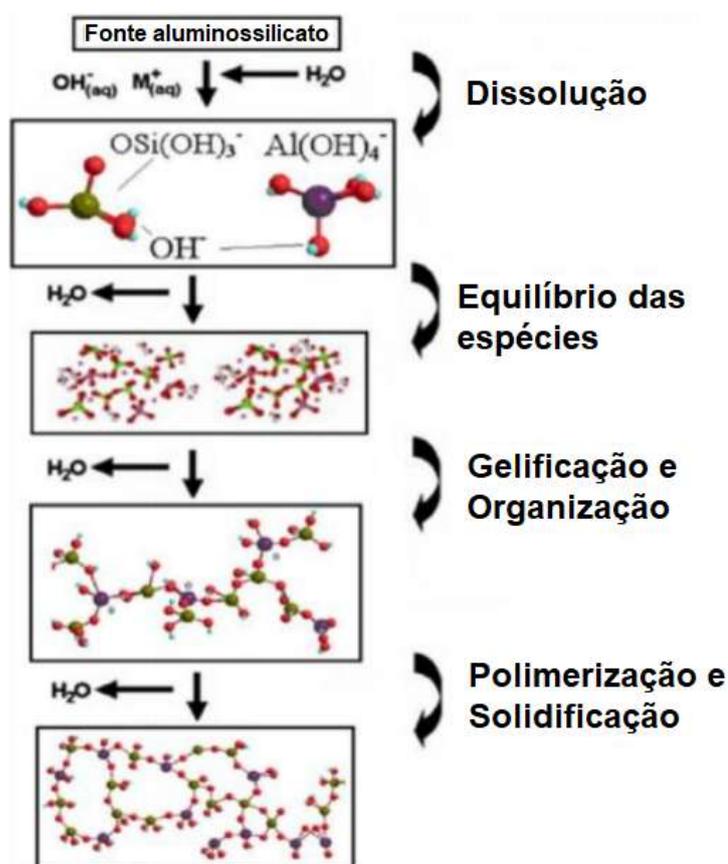


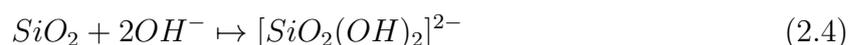
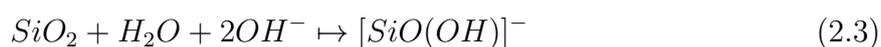
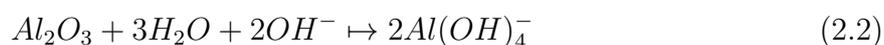
Figura 2.5 – Etapas do processo de geopolimerização (FIGUEREDO et al., 2019)

2.4.1 MECANISMOS DE REAÇÃO

Materiais precursores na forma natural ou como subproduto devem ser ricos em alumina (Al_2O_3) e sílica (SiO_2). Esses precursores de aluminossilicato requerem soluções de ativação alcalina como hidróxido de sódio ou potássio (NaOH , KOH), silicato de potássio ou sódio (K_2SiO_3 , Na_2SiO_3), entre outros. Para que ocorra uma síntese de geopolímero, por exemplo, ocorre uma fase primária que é a dissolução das espécies de Al e Si dos materiais precursores sob a ação de uma solução ativadora alcalina. Ocorre interação iônica entre as espécies em meio alcalino, seguida pela quebra da ligação covalente entre os átomos de silício, alumínio e oxigênio. Íons carregados negativamente associados ao Al tetraédrico são balanceados por cátions alcalinos, como Na^+ , Ca^{2+} , K^+ , Li^+ . Após esse processo, ocorre então o transporte, a orientação e a condensação dos íons precursores em monômeros, seguido dos processos de coagulação e gelificação. Assim, as redes 3D rígidas de aluminatos de sílica são formadas por policondensação de monômeros (FARHAN; JOHARI; DEMIRBOĞA, 2020).

As propriedades finais do geopolímero podem ser afetadas por alguns fatores como: concentração e tipo de fonte alcalina; propriedades e composição da fonte de aluminossilicato; distribuição granulométrica das matérias-primas; temperatura e tempo de

cura; solução para a razão de sólidos e pela proporção de Si para Al e silicato a hidróxido. Para melhorar essas propriedades é preciso otimizar o processo aumentando as taxas de liberação de Al e Si na fase primária (reação de dissolução), onde ocorrem as seguintes reações (KÜÇÜK; KINNARINEN; HÄKKINEN, 2021):



Na fase de condensação, os oligômeros se conectam e os grupos OH em sua extremidade se encontram liberando água e compartilhando um átomo de oxigênio (SINGH; MIDDENDORF, 2020). A condensação da espécie de metal hidrolisado segue um mecanismo de reação nucleofílica. O ataque nucleofílico de um grupo OH carregado negativamente em um metal carregado positivamente é o que leva à saída da molécula de água e resulta na formação de uma ponte de oxigênio (ZHENG; WANG; GAO, 2016).

A última fase é a polimerização que é uma reação entre catalisadores químicos para a formação de silicato de alumínio, onde os átomos de silício e alumínio reagem entre si formando moléculas (ZABIHI; TAVAKOLI, 2019). Nessa fase o gel endurece ocorrendo o processo de policondensação, levando à formação de polímeros amorfos ou semi-cristalinos de aluminossilicatos (SILVA et al., 2014). Conforme o gel endurece, ele se condensa para formar uma rede tridimensional de silicoaluminato que forma um geopolímero (CONG; CHENG, 2021).

A Figura 2.6 ilustra esquematicamente o processo de geopolimerização com as etapas de reorganização do aluminossilicato (a), formação de gel a partir da condensação de oligômeros (b) e polimerização (c).

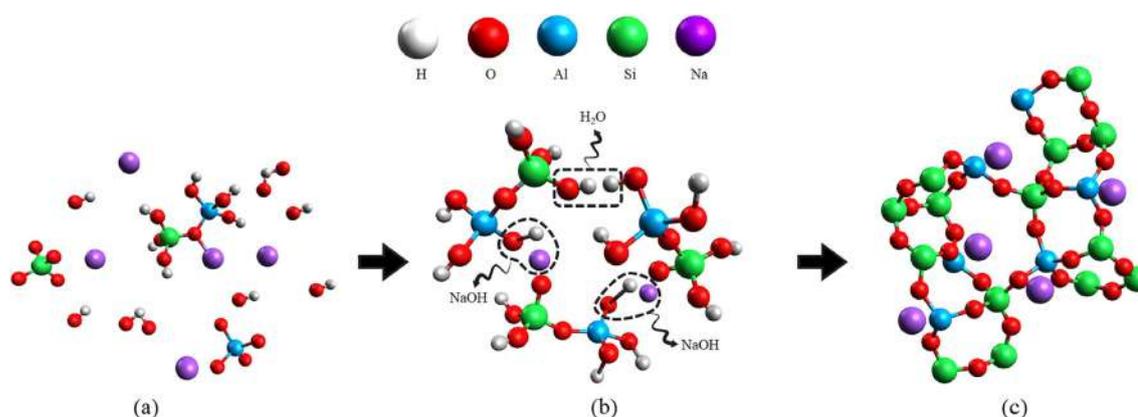


Figura 2.6 – Processo de geopolimerização: (a) reorganização do aluminossilicato, (b) formação de gel a partir da condensação de oligômeros e (c) polimerização (SINGH; MIDDENDORF, 2020).

2.4.2 ATIVAÇÃO ALCALINA

Os aluminossilicatos são materiais reativos que se dissolvem rapidamente em uma solução alcalina, formando oligômeros hidroxilados do tipo $S_i(OH)_4^- e Al(OH)_4^-$. Durante a policondensação, as unidades tetraédricas se unem alternadamente para formar redes amorfas que compõem os geopolímeros (GOMEZ-CASERO et al., 2021). O papel dos agentes ativadores é liberar íons Si e Al para a solução quebrando as ligações Si-O-Si, Al-O-Al e Si-O-Al, o que produz o gel geopolimérico chamado geopolímero (SITHOLE; MASHIFANA, 2020). Dependendo da solução de ativação, o ligante geopolimérico pode ser de dois tipos: geopolímeros alcalino-aluminossilicato (resultantes da ativação em meio alcalino com hidróxido de metal alcalino) e silico-aluminofosfato (em meio ácido com ácido fosfórico ou ortofosfórico). O mecanismo de ambos ligantes incluem dissolução, especiação, gelificação, reorganização e polimerização/policondensação (TOME et al., 2021). A ativação alcalina é um processo de estabilização química na qual se obtém uma estrutura resistente à compressão, mas instável e sujeita à corrosões (PAIVA; CARVALHO; SIMAS, 2020).

Durante a síntese, são utilizados normalmente dois tipos de ativadores: soluções de hidróxidos alcalinos ou uma mistura de soluções de silicato alcalino com hidróxido alcalino. A diferença entre estes dois ativadores é que o primeiro não adiciona sílica ao sistema, enquanto o segundo tem essa concentração de sílica elevada. Na reação, o Al é liberado antes do Si, o que faz com que a variação na quantidade de sílica no ativador resulte em produtos com propriedades e estruturas distintas. Alguns ativadores alcalinos que podem ser utilizados incluem: silicato de sódio (Na_2SiO_3), hidróxido de potássio (KOH), silicato de potássio (K_2SiO_3) e hidróxido de sódio (NaOH) (LI et al., 2021). Mistura de hidróxido de sódio ou hidróxido de potássio (NaOH ou KOH) com silicatos de sódio (Na_2SiO_3) são os ativadores mais utilizados em sínteses alcalinas (SEVERO et al., 2013). Os ativadores a base de silicato promovem uma aceleração na reação geopolimérica, pois a sílica presente inicia a reação com a alumina livre na solução. O silicato favorece o processo de polimerização, o que leva a um produto de reação com maior quantidade de Si e maior resistência mecânica (COSTA et al., 2015).

A solução de ativador alcalino contém geralmente hidróxidos à base de sódio ou potássio, silicatos, carbonatos ou uma combinação desses materiais. Para a síntese, a solução de ativador à base de silicato é a mais eficaz para o desenvolvimento de resistência. Para silicato de sódio e ativador híbrido de hidróxido existe um M_s ótimo ($M_s = SiO_2/M_2O$, com M sendo Na ou K) variando de 1 a 1,5. O metassilicato de sódio já foi utilizado como ativador alcalino sólido em estudos anteriores, sendo um material de grande importância na indústria química, produzido através da fusão de carbonato de sódio com dióxido de silício ou areia de sílica a cerca de 1400°C (YU et al., 2020). O metassilicato de sódio disponível comercialmente tem um M_s entre 0,9 e 1,0, que chega próximo ao intervalo

ideal, o que faz com que reduza as etapas de mistura agilizando a produção (DONG; ELCHALAKANI; KARRECH, 2020).

2.5 ISOLAMENTO TÉRMICO E ACÚSTICO EM AERONAVES

Nas últimas décadas, houve pesquisas substanciais sobre controle de ruído nas aeronaves. O ruído dos aviões representam um risco crescente para a saúde dos passageiros e, em particular, para o desempenho da tripulação. Os níveis de pressão sonora na fuselagem de aeronaves multimotores da aviação geral são tipicamente da ordem de 130 dB. Os ruídos podem ser causados por diversos fatores, como por exemplo, o ruído transmitido pela estrutura induzido por forças desequilibradas dentro do motor e o ruído das vibrações na estrutura da aeronave que irradiam energia acústica para o interior da cabine. Os componentes de ruído estruturalmente estimulados da aeronave ocorrem nas frequências de rotação do ventilador e do compressor, que normalmente variam de 75 a 200 Hz (PARAMESHWARA et al., 2022).

O ruído produzido por uma aeronave não deve ser considerado apenas pela fuselagem, mas também pelo ruído dos trens de pouso, do ventilador, do jato e sua influência no ruído da cabine. Uma das fontes de ruído da cabine é a coincidência entre a excitação do fluxo e a vibração interna dos painéis, que está na faixa de frequência entre 800 Hz e 2000 Hz. O tipo e a localização do motor afeta o ruído da cabine. Motores turboélice produzem frequências na faixa de 60 a 400 Hz, enquanto motores montados na cauda (aeronaves a jato) estão na faixa de 100 a 500 Hz. O ruído do vento, é audível em toda a cabine e, em geral, está acima da faixa de 400 Hz. Para um avião bimotor turboélice, a excitação mais forte ocorre na faixa de frequência de 100–500 Hz. Para um jato executivo o espectro de ruído interno de banda estreita é de até 800 Hz. Para aviões a jato comerciais de médio porte com até 140 passageiros, a banda de ruído fica em uma faixa de 1000 a 1200 Hz. De uma forma geral, a busca por um material à prova de som para cabine de avião deve considerar uma faixa de frequência conservadora entre 800 e 1800 Hz (LEÃO et al., 2022).

A rigidez de um material é uma característica de alto desempenho em isolamento termoacústico e um dos principais mecanismos de influência no controle da transmissão do ruído. Uma menor rigidez contribui na redução do ruído. Em baixas frequências, a rigidez do material é que controla a perda de transmissão sonora. (GOMES, 2023; XAVIER; MELO; FERREIRA, 2020; OLIVEIRA; HEISSLER, 2020).

A absorção acústica de geopolímeros é afetada pela quantidade de porosidade e distribuição do tamanho dos poros, se relaciona intimamente com a perda de energia por atrito na parede dos poros, uma vez que a atenuação da onda acústica e o coeficiente de absorção sonora são sensíveis à porosidade do geopolímero. O coeficiente de absorção sonora aumenta com a porosidade (SEKKAL; ZAOUI, 2023).

O desenvolvimento de materiais leves com isolamento térmico é fundamental para a indústria aeroespacial. A alta porosidade e a baixa densidade são desejáveis para materiais de isolamento térmico(LI et al., 2022). A densidade é significativa na avaliação da porosidade em geopolímeros. Quando a densidade diminui, pode ser pelo aumento da porosidade(GAO et al., 2020). A densidade de um material também está relacionada a cristalinidade, um material com uma menor densidade possui baixa cristalinidade que contribui para um melhor isolamento térmico(JIA; ZHANG; ZHANG, 2022). O módulo de elasticidade e a dureza diminuem com o aumento do tamanho dos poros (SEKKAL; ZAOUI, 2023). Uma aeronave está sujeita a grandes saltos térmicos. Por exemplo, a temperatura varia de -30 °C a -55 °C em altitudes de cruzeiro (9.100 a 12.400 metros onde tem baixa densidade do ar economizando combustível) e de 30 °C a 50 °C em aeroportos, dependendo do país. (GUERRERO et al., 2023).

Diante das informações contidas nesse tópico, o resumo das propriedades desejáveis de um material com bom isolamento térmico e acústico para utilização em aeronaves se encontram na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Propriedades desejáveis para material isolante térmico e acústico.

PROPRIEDADES DESEJÁVEIS PARA MATERIAL ISOLANTE TÉRMICO E ACÚSTICO
Maior porosidade
Menor densidade
Menor dureza
Menor módulo de elasticidade
Menor difusividade térmica
Maior coeficiente de absorção acústica
Menor resistência a compressão
Menor rigidez

Com isso, diante de toda revisão bibliográfica e das propriedades desejáveis para um material com bom isolamento térmico e acústico é possível então analisar os compósitos buscando os mais adequados para o objetivo desse trabalho.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

Os materiais utilizados na pesquisa foram:

- anidrido maleico - adquirido da empresa *Orion Cientific*; escolhido por apresentar bons resultados em estudos anteriores na compatibilização de materiais tanto com HDPE quanto com geopolímeros.

- Compatibilizante Polybond 3200 - Procedência: *Addivant*, USA; escolhido por ser um polipropileno maleatado que quando utilizado como agente compatibilizante de poliolefinas confere uma boa adesão entre carga e matriz. polares.

- Escórias de aciaria de panela - fornecidas pela Usiminas Ltda; escolhida por ser a mais produzida no Brasil e ainda não ter utilizações suficientes que impeça seu despejo em aterros.

- Metasilicato de sódio (Na_2SiO_3) - adquirido da Proquimios Comércio e Indústria LTDA; escolhido por reduzir as etapas de mistura e agilizar a produção.

- Polietileno de alta densidade (HDPE) – HS 5407 - fornecido pela empresa *Braskem*; escolhido por ser um polietileno de alta densidade, copolímero, de alta massa molar, que apresenta rigidez adequada, excelente resistência ao impacto e por ser o termoplástico com menor densidade existente.

3.2 PREPARAÇÃO DOS MATERIAIS

A composição da escória de panela foi fornecida pela Usiminas e pode ser observada na 3.1, assim como a quantidade total de ferro (FeT) na composição.

FeT	Fe⁰	FeO	CaO	SiO₂	MgO
53.58	32.03	26.42	17.30	7.11	5.35
MnO	Al₂O₃	S	ZnO	K₂O	Na₂O
2.09	3.97	0.68	< 0.005	0.26	0.08

Figura 3.1 – Composição da escória de panela em porcentagem (%).

Na busca da diminuição da granulometria, a escória de panela foi colocada em um moinho planetário durante o período de uma hora e trinta minutos, sob a velocidade de 300 rpm. Após a moagem, o material foi peneirado com a peneira de 75 μm , o que

corresponde a uma peneira de 230 *mesh* (SANTOS et al., 2019). A Figura 3.2 apresenta o estado da escória de aciaria de panela antes e depois da moagem.

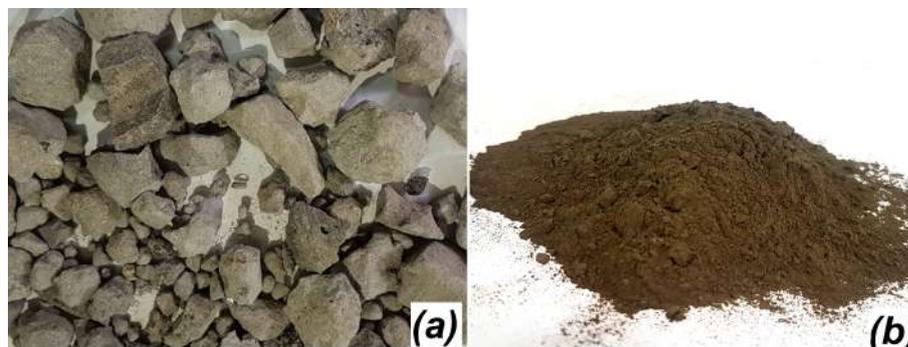


Figura 3.2 – Escória de aciaria de panela antes (a) e depois (b) da moagem.

3.3 SÍNTESE DO GEOPOLÍMERO

Para a realização da geopolimerização, foram testadas duas diferentes proporções de sólido/líquido, pela razão entre a massa de escória particulada e o volume de solução: 1,4 e 1,6 g/ml. Na concentração 1,4, foram adicionadas 83,70 g de metassilicato de sódio em 180 ml de água destilada. Essa mistura ficou em agitação por 2 h para que ocorresse dissolução completa. Em seguida, a escória de aciaria foi adicionada aos poucos, totalizando 168,30 g e a mistura continuou no agitador mecânico por mais 20 h. Já a proporção de 1,6 foram executados os mesmos procedimentos, porém com 95,40 g de metassilicato de sódio e 191,97 g de escória, também em 180 ml de água destilada (TOMMASINI et al., 2020). As quantidades de cada material utilizadas nas duas diferentes proporções se encontram na Figura 3.3.

Geopolímero 1,4	Geopolímero 1,6
Metassilicato de sódio: 83,7 g	Metassilicato de sódio: 95,40 g
Água deionizada: 180 ml	Água deionizada: 180 ml
Agitação: 2 horas	Agitação: 2 horas
Escória de aciaria: 168,30 g	Escória de aciaria: 191,97 g
Agitação: + 20 h	Agitação: + 20 h

Figura 3.3 – Quantidades de cada material utilizadas nas fabricação dos geopolímeros 1,4 e 1,6.

Após o tempo de agitação, a mistura ganhou viscosidade e foi colocada na estufa a 70 °C para solidificação. Com o material solidificado foram retiradas algumas amostras para caracterização neste estado. O restante do material foi macerado para pulverização e posteriormente peneirado para se obter novamente a granulometria desejada, podendo assim ser adicionado na fabricação do compósito futuramente.

A Figura 3.4 apresenta as etapas realizadas no processo de geopolimerização, iniciando na mistura dos materiais pelo agitador mecânico (a), geopolímero após as 20 h de agitação (b), geopolímero solidificado (c), geopolímero macerado (d) e geopolímero peneirado (e).

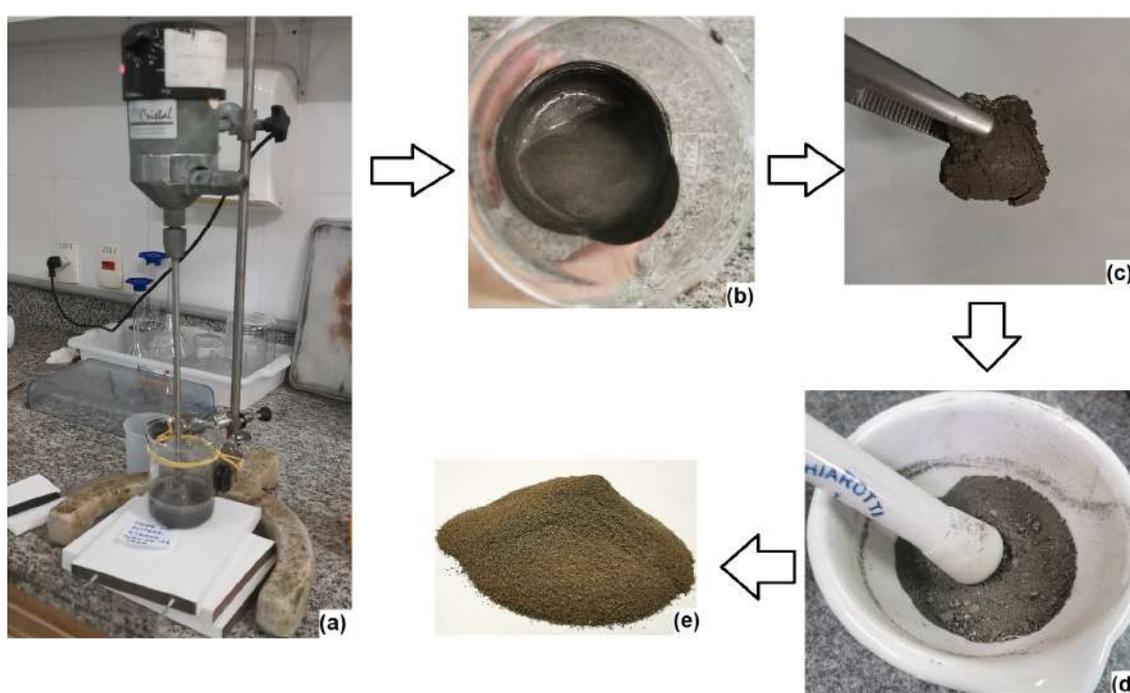


Figura 3.4 – Processos da geopolimerização: mistura dos materiais pelo agitador mecânico (a), geopolímero após as 20 h de agitação (b), geopolímero solidificado (c), geopolímero macerado (d) e geopolímero peneirado (e).

3.4 POLIETILENO DE ALTA DENSIDADE

O polietileno de alta densidade (HDPE) foi escolhido para esse estudo por ser um polímero flexível com adequada processabilidade e propriedades mecânicas. O material com grade HS 5407 foi fornecido pela Braskem em forma de pellets com diâmetros de aproximadamente 4,3 mm. Para pulverização do material, os pellets ficaram por duas horas em nitrogênio líquido, sendo utilizado um moinho de facas para a realização da moagem criogênica.

Para melhorar suas propriedades físico-químicas foi utilizado o método de compatibilização *in situ* com anidrido maleico e com o produto comercial Polybond como

compatibilizantes, permitindo assim a comparação entre eles. (RAHAYU et al., 2020). A concentração de anidrido maleico já foi analisada em pesquisas variando de 0,5% a 3% em massa. Neste trabalho foi considerado uma concentração de 3% (SAMSUDIN et al., 2016). O mesmo teor de Polybond foi utilizado.

Com o processo de geopolimerização realizado, o HDPE pulverizados, os compatibilizantes adquiridos, se torna possível a realização das misturas e a fabricação dos corpos de prova.

3.5 FABRICAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Para a fabricação dos corpos de prova (CP's), o geopolímero, o HDPE e o compatibilizante foram misturados por fusão em uma mini-extrusora de dupla rosca *Haake Minilab*. Foi fabricado também um CP com apenas HDPE e um escória pura no lugar do geopolímero para verificar a eficiência da geopolimerização. A extrusão foi realizada a 200 ° C durante 7 minutos. A velocidade do parafuso contra-rotante foi testada em compósitos fabricados com 20% em massa de carga, 77% do polímero e 3% de anidrido maleico, testando a 60, 90, de 120 e 150 rpm. Esses compósitos foram fraturados criogenicamente (colocados em nitrogênio líquido por duas hora e fraturando em seguida). Com a análise das imagens de microscopia destes compósitos apresentada na Figura 4.38, foi fixada a velocidade do parafuso em 120 RPM por apresentar melhor dispersão de carga. Os compatibilizantes utilizados foram o anidrido maleico e o Polybond, polipropileno já maleatado. O anidrido maleico foi utilizado para avaliar se está havendo extrusão reativa, isto é, se há maleatação parcial do polietileno, sendo o compatibilizante sintetizando in situ para melhorar a adesão da matriz com a carga. Os compatibilizantes foram comparados nos compósitos. Após a extrusão, os corpos de prova foram produzidos na prensa da marca Caver aquecida a 200 °C, fazendo 10 degasagens, aplicando 5 toneladas por 7 minutos seguido de resfriamento controlado pela prensa também da marca Caver, com circulação de água, aplicada 5 toneladas por 5 minutos. Os moldes utilizados possuem 2 mm de espessura e foram apropriados a cada ensaio realizado.

As amostras utilizadas tanto dos materiais puros quanto dos compósitos estão descritas na Tabela 3.1 com suas respectivas composições em porcentagem.

Tabela 3.1 – Amostras.

AMOSTRAS						
n	AMOSTRA	%G	%E	%HDPE	%am	%pl
1	Escória macerada		100	-		-
2	Escória peneirada	-	100	-		-
3	HDPE pelete	-		100		-
4	HDPE moído	-	-	100		-
5	Anidrido Maleico	-	-	-	100	-
6	Polybond	-	-	-	-	100
7	Geo. 1.4 pedaço	100	-	-	-	-
8	Geo. 1.4 macerado	100	-	-	-	-
9	Geo. 1.4 peneirado	100	-	-	-	-
10	Geo. 1.6 pedaço	100	-	-	-	-
11	Geo. 1.6 macerado	100	-	-	-	-
12	Geo. 1.6 peneirado	100	-	-	-	-
13	HDPE.00:00:00	-	-	100	-	-
14	1.4.20:80:00	20	-	80	-	-
15	1.4.10:87:03	10	-	87	3	-
16a	1.4.20:77:03 (60RPM)	20	-	77	3	-
16b	1.4.20:77:03 (90RPM)					
16c	1.4.20:77:03 (120RPM)					
16d	1.4.20:77:03 (150RPM)					
17	1.4.30:67:03	30	-	67	3	-
18	1.6.10:87:03	10	-	87	3	-
19	1.6.20:77:03	20	-	77	3	-
20	1.6.30:67:03	30	-	67	3	-
21	E.20:77:03	-	20	77	3	-
22	1.4.10:87:03.POLY	10	-	87	-	3
23	1.4.20:77:03.POLY	20	-	77	-	3
24	1.4.30:67:03.POLY	30	-	67	-	3
25	1.6.10:87:03.POLY	10	-	87	-	3
26	1.6.20:77:03.POLY	20	-	77	-	3
27	1.6.30:67:03.POLY	30	-	67	-	3
28	E.20:77:03.POLY	-	20	77	-	3

Onde,

n = numeração das amostras;

%G = Quantidade de geopolímero em porcentagem;

%E = Quantidade de escória em porcentagem;

%HDPE = Quantidade de HDPE em porcentagem;

%am = Quantidade de anidrido maleico em porcentagem;

%pl = Quantidade de Polybond em porcentagem.

Após a extrusão foram fabricados corpos de prova com formatos apropriados de acordo com as exigências de cada análise. Os CP's foram produzidos através de prensa

quente seguida de prensa fria com circulação de água. Com os CP's prontos, foi possível então fazer as caracterizações do compósito. A Tabela 3.2 apresenta as amostras utilizadas para fabricação dos corpos de prova para cada análise.

Tabela 3.2 – corpos de prova utilizados em cada análise.

CORPOS DE PROVA											
n	XRD	FTIR	TGA	DSC	SEM	Dureza	Dens.	Tração	LFA	CAA	RMN
1	X		X	X	X						X
2		X			X						
3					X						
4	X				X						
5											
6											
7					X						
8	X		X	X	X						X
9		X			X						
10					X						
11	X		X	X	X						X
12		X			X						
13			X	X	X	X	X	X	X	X	X
14	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X
15	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X
16a				X	X	X		X			
16b				X	X	X		X			
16c	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X
16d				X	X	X		X			
17	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
18	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X
19	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X
20	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
21	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X
22	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X
23	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X
24	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
25	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X
26	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X
27	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
28	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X

As etapas deste trabalho podem ser observadas na Figura 3.5, incluindo desde a aquisição dos materiais até a caracterização dos compósitos.

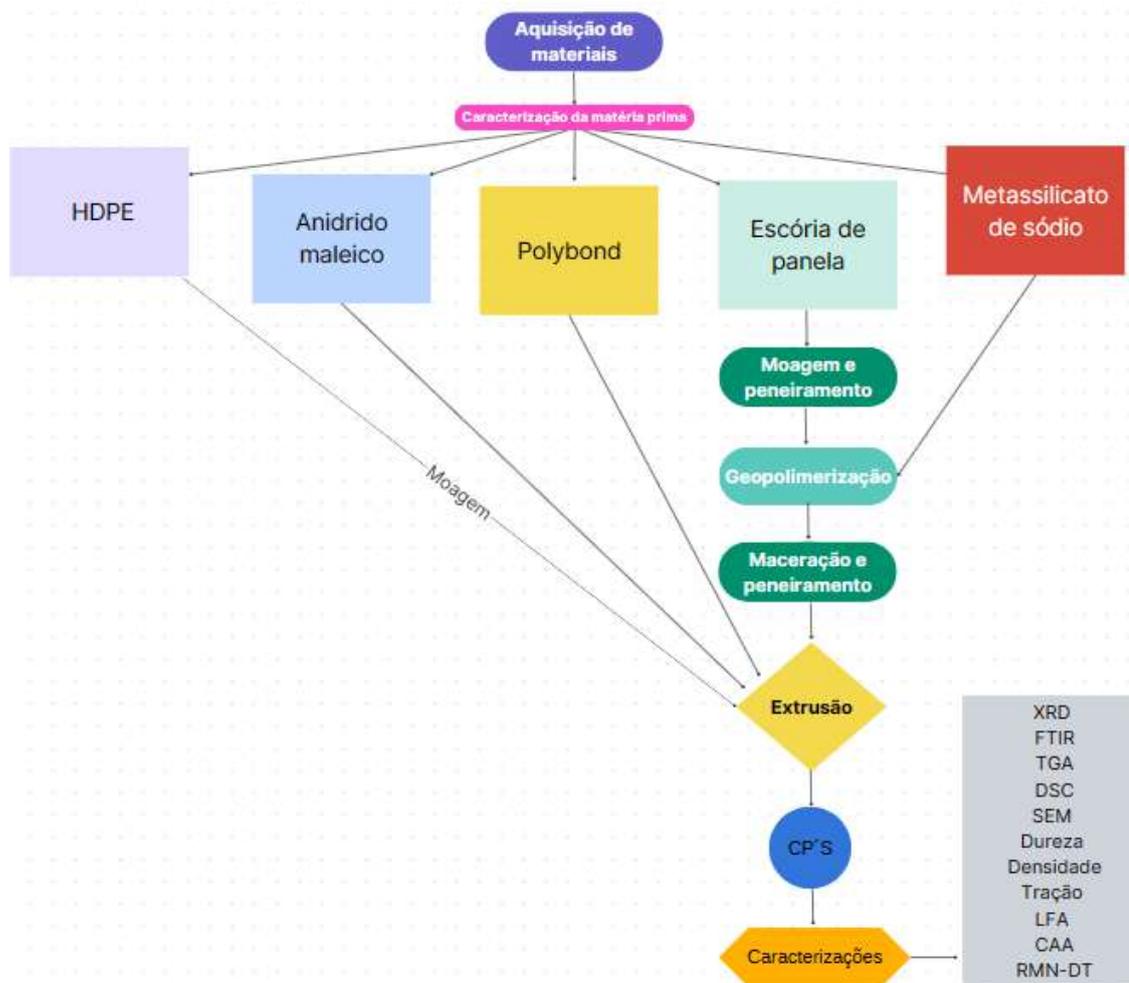


Figura 3.5 – Etapas da pesquisa.

3.6 DIFRAÇÃO DE RAIOS X (DRX)

Com o intuito de investigar as fases cristalinas presentes da matéria prima e dos compósitos, foi realizada a análise de DRX no Laboratório de Difração de Raios X do IME. A análise foi feita em um difratômetro da marca *PANalytical*, modelo *X'Pert MRD*, operado com fonte de cobre $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda=1,54060 \text{ \AA}$), corrente de 40 mA, tensão de 45 kV, intervalo de 2Θ de 10° a 90° , varredura com passo de $0,050^\circ$ e tempo de coleta de 180 segundos.

3.7 ESPECTROSCOPIA DE INFRAVERMELHO POR TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR)

Amostras em forma de filme foram submetidas a análise de espectroscopia de infravermelho por transformada de *Fourier* (FTIR) com o objetivo de identificar os grupos funcionais. A realização do ensaio ocorreu no Instituto de Macromoléculas (IMA), com

um equipamento da marca PerkinElmer, modelo Frontier FT-IR/FIR, sendo utilizado na faixa de IR média de 4000 a 400 cm^{-1} , com 128 *scans* e uma resolução de 4 cm^{-1} .

3.8 ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA (TGA)

A análise de termogravimetria (TGA) foi realizada para avaliar a resistência térmica dos materiais e suas transformações estruturais pela variação da massa da amostra durante o aumento da temperatura. Foram observados alguns pontos importantes como a perda de umidade e a decomposição. A partir das curvas de TG foram plotadas as curvas de DTG, exibindo as temperaturas de início e fim dos eventos a serem estudados. O equipamento utilizado no ensaio foi um analisador térmico SHIMADZU TA-60, analisador simultâneo termogravimétrico – térmico diferencial DTG-60H. Esse equipamento foi utilizado no Instituto de Pesquisas da Marinha. Os parâmetros utilizados no ensaio foram: intervalo de 25 °C até 1000 °C, com taxa de aquecimento de 10 °C/min e em atmosfera inerte N_2 .

3.9 CALORIMETRIA DE VARREDURA DIFERENCIAL (DSC)

A análise por calorimetria de varredura diferencial (DSC) foi realizada no Laboratório de Apoio Instrumental (LAPIN) do Instituto de Macromoléculas (IMA - UFRJ). O equipamento utilizado foi o DSC 7020, da Hitachi, a uma faixa de temperatura avaliada de 20 a 180 °C com taxa de aquecimento de 10 °C/min e atmosfera de nitrogênio, com ciclo de aquecimento para remoção de histórico térmico, seguido de resfriamento e novo aquecimento.

As principais determinações deste ensaio foram: temperatura máxima de fusão (T_m) onde a maioria dos cristais se fundem, temperatura de cristalização (T_c) onde a maior parte dos cristais se cristalizam, as respectivas entalpias de fusão (ΔH_m) e grau de cristalinidade (X_c). A cristalinidade de um material é o alinhamento de suas cadeias no arranjo tridimensional. Seu cálculo pode ser realizado através da equação 3.1, considerando o grau de cristalinidade do HDPE puro ($\Delta H_{100\%}$) equivalente a 293 J/g (RUIZ; CINTHO; SOWEK, 2020).

$$X_c = \frac{\Delta H_m}{\Delta H_{100\%}} \cdot \frac{100}{(1 - x)} \quad (3.1)$$

Onde:

ΔH_m : Entalpia final de fusão;

$\Delta H_{100\%}$: Entalpia do polímero teoricamente 100% cristalino = 293,0 J/g;

x: Proporção da carga na matriz.

3.10 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

O microscópio eletrônico de varredura (MEV) foi utilizado para analisar a microestrutura e as dimensões de partículas, amostras da escória de aciaria e de todas as etapas da geopolimerização. O equipamento de FEG-SEM, fabricado pela FEI, modelo Quanta 250, pertence ao IME utilizando uma tensão de 15 kV. As superfícies das amostras foram recobertas com ouro, o qual foi depositado no aparelho de recobrimento, fabricado pela Leica, modelo Ace600, durante 180 segundos, com uma camada estimada de 16 nm.

3.11 ENSAIO DE DUREZA SHORE D

O ensaio foi realizado para buscar os compósitos com menores valores de dureza, visto que uma menor dureza contribui para um bom isolamento termoacústico. A dureza de um compósito de HDPE pode ser determinada através de aplicação de carga. No método Shore D, um penetrador é submetido contra a superfície plana da amostra e é aplicada uma pressão. A profundidade de penetração é medida em uma escala de 0 a 100 e a unidade convencional é expressa para o dispositivo, denominada graus Shore D. De acordo com ASTM D2240, um corpo de prova de 6 mm de espessura mínima foi utilizado. Foi feita uma endentação na amostra e a leitura foi registrada. Cinco leituras de dureza em diferentes posições foram feitas e o valor médio foi calculado (AWAD et al., 2019).

As análises foram realizadas em um durômetro Shore tipo D, da Shore Instruments & MFG Co, do Laboratório de Apoio Tecnológico (LAPTEC-1/ IMA). Foram realizadas 5 endentações em cada amostra calculando um valor médio das durezas.

3.12 ENSAIO DE DENSIDADE

Para verificar a densidade dos corpos de prova produzidos e encontrar as amostras com menores valores de densidade que é uma das características desejáveis de um bom isolante, foi utilizado um picnômetro de 250 ml. O ensaio foi realizado no laboratório do Instituto de Macromoléculas onde inicialmente, o picnômetro foi pesado vazio, depois preenchido com etanol absoluto e por último com etanol e aproximadamente 0,50 g de amostra. Desta forma foi possível calcular a massa de etanol, o volume do picnômetro, volume do etanol e o volume da amostra para chegar na densidade da amostra. O ensaio foi realizado a uma temperatura de 20 °C e a densidade do etanol absoluto considerada nessa temperatura no valor de 0,793 g/cm³. As equações utilizadas para os cálculos estão a seguir:

$$V_p = \frac{m_1 - m_2}{d_e} \quad (3.2)$$

$$m_e = m_4 - m_3 - m_1 \quad (3.3)$$

$$V_e = \left(\frac{m_e}{d_e}\right) \quad (3.4)$$

$$V_a = V_p - V_e \quad (3.5)$$

$$d_a = \frac{m_3}{V_a} \quad (3.6)$$

Onde,

m_1 = massa do picnômetro vazio em gramas;

m_2 = massa do picnômetro cheio de etanol absoluto em gramas;

m_3 = massa da amostra em gramas;

m_4 = massa do picnômetro com etanol e amostra em gramas;

m_e = massa de etanol absoluto em gramas;

V_p = volume do picnômetro em cm^3 ;

V_e = volume de etanol absoluto em cm^3 ;

V_a = volume da amostra em cm^3 ;

d_e = densidade do etanol absoluto em g/cm^3 ;

t = temperatura do ensaio;

d_a = densidade da amostra.

3.13 ENSAIO MECÂNICO DE TRAÇÃO

O ensaio foi realizado buscando verificar qual amostra possui o menor módulo de elasticidade, que é uma das características procuradas para ter um bom isolamento térmico e acústico. Os compósitos foram submetidos ao ensaio de tração realizado no laboratório de ensaios mecânicos do IME à temperatura ambiente, em uma máquina universal de ensaios da marca EMIC, modelo DL10000, segundo a norma ASTM D-638, na velocidade de ensaio de 5 mm/min. Foram testados 5 corpos de prova. O ensaio foi realizado com o objetivo de verificar a tensão de escoamento, alongamento na ruptura e o módulo de elasticidade. As dimensões em milímetros do molde utilizado para fabricação dos corpos de prova utilizados no ensaio se encontram na Figura 3.6.

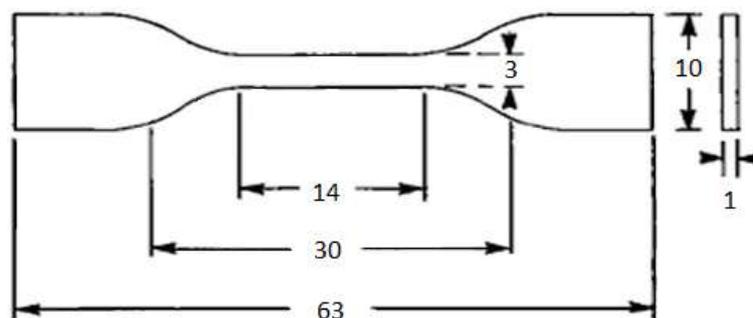


Figura 3.6 – Dimensões (em milímetros) dos corpos de prova utilizados no ensaio de tração.

3.14 ANÁLISE DE DIFUSIVIDADE TÉRMICA (LFA)

Para avaliar o isolamento térmico dos compósitos, a difusividade térmica foi analisada através do método de *Laser Flash Analysis* (LFA), de acordo com a ASTM-E-1461, uma vez que um menor valor de difusividade térmica contribui para um melhor isolamento térmico. Nesta análise, um feixe de laser foi direcionado a um disco sólido no vácuo e um pulso de calor aplicado. A mudança na temperatura na parte posterior a incidência do feixe de laser da amostra foi monitorada. O aumento da temperatura com o tempo corresponde à difusão da energia térmica ao longo da direção da espessura na amostra. Assim, a difusividade térmica ao longo da espessura do disco da amostra pôde ser obtida (LIAN et al., 2016).

As análises foram realizadas no Centro Tecnológico do Exército (CETx), no equipamento LFA 457, da Nezsch, através da técnica de pulso laser. Os corpos de prova foram fabricados com dimensão de 9,75 x 9,75 cm aproximadamente, analisados a temperatura ambiente (25 °C), considerando a densidade das amostras de 0,92 g/cm³.

3.15 COEFICIENTE DE ABSORÇÃO ACÚSTICA (CAA)

A medição do coeficiente de absorção acústica (CAA) foi realizada segundo a norma ASTM-E-1050, buscando encontrar o maior CAA entre as amostras, o que proporciona um melhor isolamento acústico. Na análise foi utilizado um tubo de impedância, dois microfones, um analisador digital e o *software Labview*. Essa metodologia consiste na emissão de ruído branco, que possui distribuição de energia constante (MASINI, 2011). Inicialmente foi feita a calibração dos microfones através do programa de cálculo. Durante a análise, é aplicado um espectro de frequências que varia de 100 a 3150 Hz. O ruído foi emitido a partir de uma das extremidades do tubo, com determinadas pressões sonoras. A onda percorreu ao longo do tubo até a outra extremidade, contendo a amostra com o material sendo testado. Parte da onda foi absorvida pelo material, outra é refletida pelo próprio material e pela parede oposta do tubo. Os microfones então captaram a pressão

sonora emitida e a refletida (FERNANDES, 2002).

A análise foi realizada no Laboratório de Acústica e Vibrações da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Um ruído branco foi gerado e a pressão sonora no interior do tubo foi determinada por dois microfones posicionados em aberturas na parte superior do tubo, que contém quatro posições para colocação dos microfones com distanciamento de 40 mm entre os centros dos furos adjacentes. Um dos microfones teve sua posição fixa em um dos furos e o outro variando entre os demais furos para cada sequência de medida. Assim, o programa utilizado forneceu a frequência principal da banda de frequência e os coeficientes de absorção por banda. Foi feita então a média dos coeficientes de absorção da amostra obtidos com os 3 pares de furos.

Foram feitas 3 medições para cada amostra. As amostras utilizadas foram em formato de cilindro com $\varnothing 45$ mm e 2 mm de espessura.

3.16 ESPECTROSCOPIA DE RESSONÂNCIA MAGNÉTICA NUCLEAR NO DOMÍNIO DO TEMPO (*RMN – DT*)

A análise de *RMN – DT* foi realizada no Laboratório de Soluções em Relaxometria no IMA, com a finalidade de verificar a fração rígida e a fração móvel das amostras e encontrar qual é a menos rígida, uma vez que a menor rigidez contribui a um melhor isolamento termoacústico. Utilizou-se um espectrômetro MARAN Ultra 0,54 T (Instruments, Oxford) onde as amostras foram analisadas na frequência de 23,4 MHz (1H). O tempo de relaxação foi medido a uma temperatura de 30°C em intervalos de 2 segundos e 512 pontos.

3.17 ANÁLISE ESTATÍSTICA

3.17.1 Análise de Variância (ANOVA)

Para analisar os resultados verificando se existem diferenças significativas entre as médias dos valores encontrados foi utilizada a análise de variância ANOVA - "analysis of variance". Este teste se baseia na distribuição por amostragem do teste "F" de Snedecor, a qual possui eficácia ao identificar diferenças entre médias. A aplicação do teste no presente estudo tem como objetivo tratar dados do ensaio de dureza, tração, difusividade térmica e coeficiente de absorção acústica. Foi utilizado um nível de confiabilidade para os testes de 95% ou nível de significância de 5%, em que os parâmetros estatísticos utilizados estão representados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Modelo de Tabela de cálculo - ANOVA

Causa de Variação	GL	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	F Calculado	F Crítico
Tratamentos	k -1	SQT_r	QMT	QMT/QMR	Tabela F (5% de significância)
Resíduo	k(r -1)	SQR	QMR		
Total	kr -1	SQT_0			

onde,

SQT_r : soma dos quadrados dos tratamentos;

SQT_0 : soma dos quadrados total;

GL: número de graus de liberdade;

k: número de tratamentos;

n: multiplicação entre o número de tratamentos pelo número de repetições do tratamento (r x n);

k(r - 1): número de graus de liberdade do resíduo;

(kr - 1): número total de graus de liberdade;

SQT_r : soma dos quadrados dos tratamentos;

SQR: soma dos quadrados do resíduo ($SQR = SQT_0 - SQT$);

SQT_0 : soma de quadrados total;

QMT: quadrado médio dos tratamentos ($QMT = SQT / (k - 1)$);

QMR: quadrado médio do resíduo ($QMR = SQR / k(k-1)$);

O SQT e o SQT_0 são calculados pelas Equações 3.7 e 3.8, respectivamente.

$$SQT = \frac{\sum(\text{valor obtido para cada tratamento})^2}{r} - \frac{(\sum(\text{valor obtido da propriedade}))^2}{n} \quad (3.7)$$

$$SQT_0 = \sum(\text{valor obtido da propriedade})^2 - \frac{(\sum(\text{valor obtido da propriedade}))^2}{n} \quad (3.8)$$

Quando o valor de F obtido é menor que o F crítico (tabelado), assume-se então a hipótese nula (H0), indicando que as médias dos resultados dos tratamentos aplicados não possuem diferença significativa entre si ao nível de significância de 5%. Caso o valor de F calculado seja superior ao F tabelado, assume-se então a hipótese alternativa (H1) concluindo que existe diferença entre as médias dos tratamentos aplicados com nível de

significância de 5% ou nível de confiabilidade de 95%. Diante dessa informação, passa a ser necessário o emprego do Teste de Tukey.

3.17.2 Teste de Tukey

A utilização do Teste de Tukey permite a comparação entre as médias obtidas dois a dois, para cada um dos tratamentos empregados. A diferença entre o teste de Tukey e a ANOVA é que a ANOVA pode indicar que existe uma diferença considerável entre as médias, enquanto o teste de Tukey diz quais são essas diferenças. A partir dos resultados do teste de Tukey é possível rejeitar ou não a hipótese de igualdade entre as médias comparadas através da diferença mínima significativa (d.m.s.), conforme a Equação 3.9.

$$d.m.s. = q \cdot \sqrt{\frac{QMR}{r}} \quad (3.9)$$

Onde:

q: a amplitude total estudentizada (valor tabelado, dependente do grau de liberdade, resíduo e número de tratamentos);

QMR: quadrado médio do resíduo;

r: número de repetições de cada tratamento.

Com o emprego desta metodologia é possível determinar de forma comparativa se existe apenas um compósito mais adequado para o objetivo da pesquisa ou se resultados próximos tornarão mais de um compósito adequado para tal finalidade.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 DIFRAÇÃO DE RAIOS X (DRX)

O difratograma de raios X apresentado na Figura 4.1 corresponde a amostra de HDPE. O difratograma apresenta dois picos fortes centrados em $2\theta = 25^\circ$ e $2\theta = 28^\circ$, correspondendo às reflexões (110) e (200), respectivamente, da fase ortorrômbica do HDPE. Dois picos fracos também aparecem centrados em $2\theta = 42^\circ$ e $2\theta = 51^\circ$ correspondendo ao plano de reflexão (020) (ATLI et al., 2022; XIANG et al., 2018).

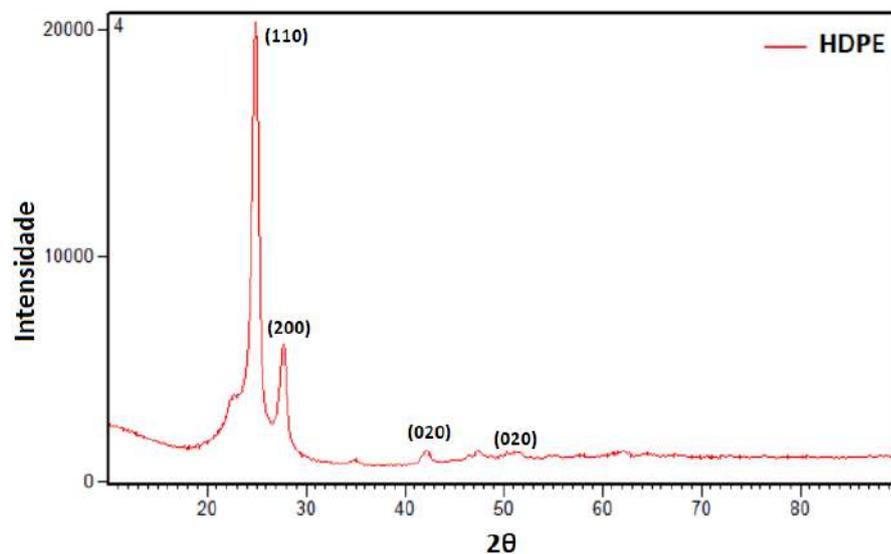


Figura 4.1 – Difratograma do HDPE.

Os difratogramas dos compósitos 1.4.20:80:00, E.20:77:03 e E.20:77:03.POLY se apresentam na Figura 4.2. Os compósitos fabricados com anidrido maleico se encontram na Figura 4.3, enquanto os fabricados com Polybond se encontram na Figura 4.4. Todos os compósitos apresentam tipos de fase que incluem quartzo (SiO_2), cristobalita (SiO_2) e zeólitas ($Na_9Al_6Si_9O_{384} \cdot 216H_2O$) conforme indicado nas Figuras 4.2, 4.3 e 4.4. Fases amorfas de sílica são indicadas por picos entre 21° e 32° que é a região que apresenta os picos mais intensos em todas as amostras (POOJALAKSHMI et al., 2023; KUQO et al., 2023). Os picos característicos do HDPE aparecerem em todos os compósitos. Os largos picos na faixa de $20-40^\circ$ estão principalmente relacionados ao $Ca_2(SiO_4)$, $Ca_3Si_2O_7$, CaO, MgO, SiO_2 e Fe_2O_3 (LIU et al., 2023). O pico mais intenso em todas as amostras é o $2\theta = 21,7^\circ$ e corresponde ao dióxido de silício (quartzo) que desempenha um papel essencial na formação do gel do geopolímero juntamente com o gel de hidrato de silicato de cálcio (CSH) (MAREYA et al., 2023). Picos de difração indexado ao SiO_2 (quartzo e cristobalita),

como em $2\theta = 20^\circ$ e $2\theta = 30^\circ$, apresentam intensidade mais forte nas amostras fabricadas com escória (Figura 4.2 b e c) do que nas com geopolímero 1,4 (Figuras 4.3 e 4.4), o que pode indicar que alguns reagentes químicos presentes nas matérias-primas da escória não participaram das reações de geopolimerização, mas incorporaram na matriz do gel como materiais esqueleto, o que é benéfico para melhorar a resistência à compressão. (LIU et al., 2021). Os compósitos com menores concentrações de carga apresentaram o pico de quartzo próximo a $2\theta = 20^\circ$ muito mais intenso que as demais amostras, o que pode sugerir uma menor resistência à compressão pelo alto valor de porosidade e baixa densidade que são características desejáveis num material isolante (CARDOSO et al., 2021).

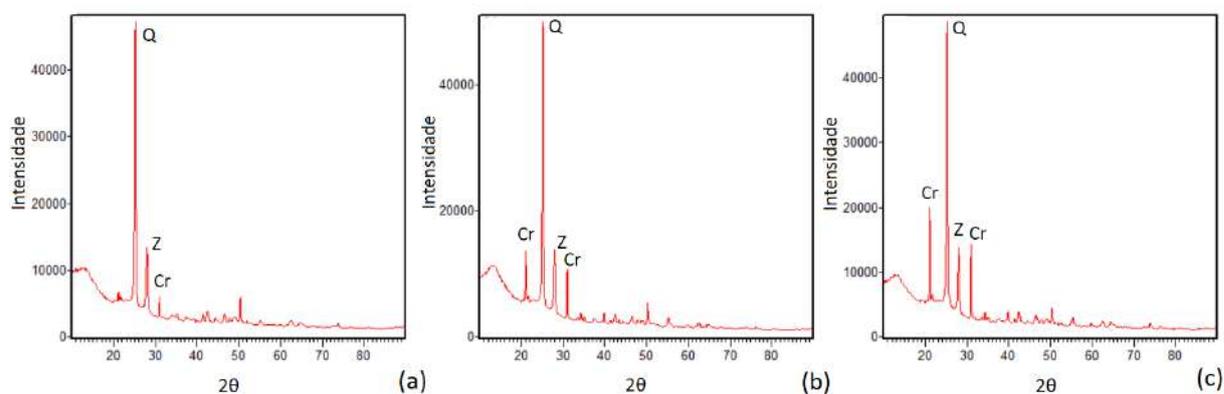


Figura 4.2 – Difratoograma dos compósitos 1.4.20:80:00 (a), E.20:77:03 (b) e E.20:77:03.POLY (c); onde Q = quartzo (SiO_2), Z= zeólitas, Cr= cristobalita (SiO_2).

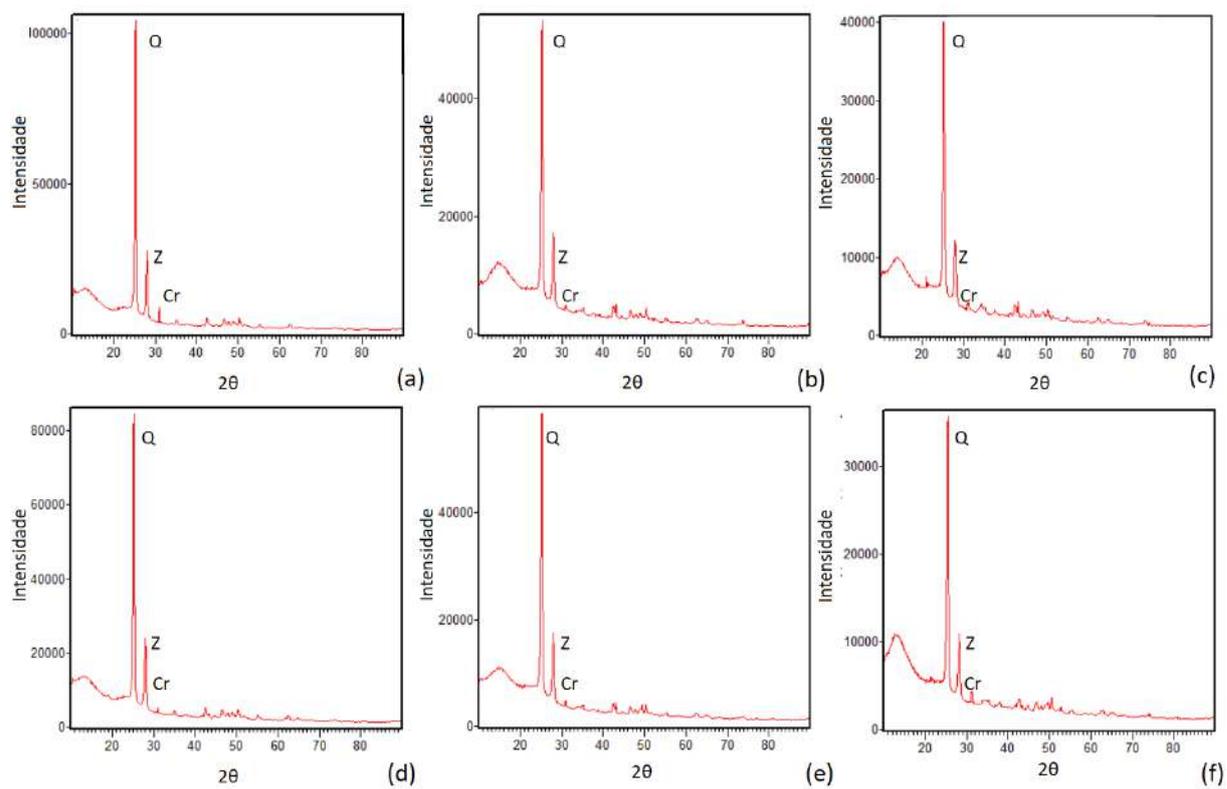


Figura 4.3 – Difratoograma dos compostos com anidrido maleico: 1.4.10:87:03 (a), 1.4.20:77:03 (b), 1.4.30:67:03 (c), 1.6.10:87:03 (d), 1.6.20:77:03 (e) e 1.6.30:67:03 (f).

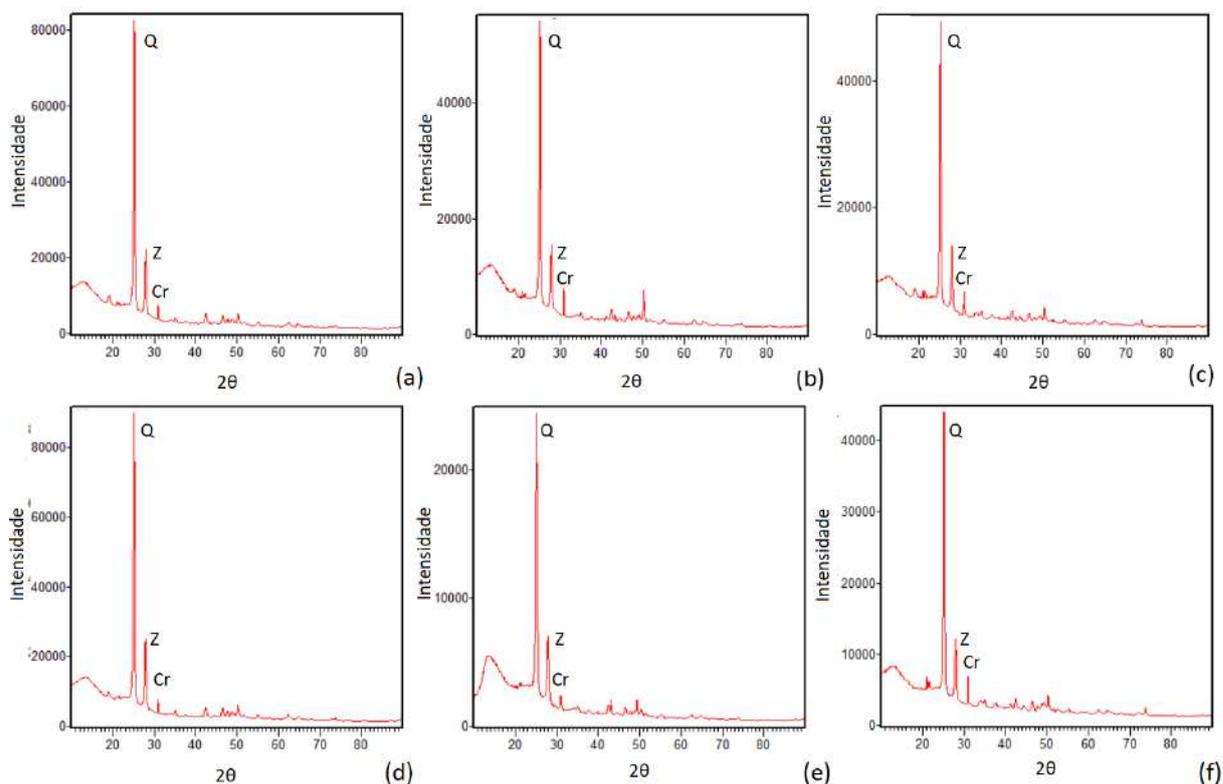


Figura 4.4 – Difratoograma dos compósitos com Polybond: 1.4.10:87:03.POLY (a), 1.4.20:77:03.POLY (b), 1.4.30:67:03.POLY (c), 1.6.10:87:03.POLY (d), 1.6.20:77:03.POLY (e) e 1.6.30:67:03.POLY (f).

A análise de DRX contribuiu com o objetivo da pesquisa mostrando que os compósitos com menores concentrações de carga se tornam mais adequados para isolamento termoacústico, uma vez que a análise indicou uma menor resistência a compressão dessas amostras, sendo uma das características desejáveis de acordo com o item 2.6.

4.2 ESPECTROSCOPIA DE INFRAVERMELHO POR TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR)

A espectroscopia de absorção no infravermelho foi utilizada para a caracterização do HDPE, da escória de Panela e dos compósitos. A Figura 4.5 mostra o espectro do HDPE. O polímero apresenta bandas intensas relativas ao grupo CH_2 presentes em sua estrutura. A banda 2892 cm^{-1} corresponde ao alongamento simétrico de C-H nos grupos CH_2 , enquanto a banda 2331 cm^{-1} a presença de aditivos no homopolímero. As bandas 1439 cm^{-1} e 729 cm^{-1} correspondem ao alongamento C-H (Dönmez Çavdar et al., 2021; GUPTA et al., 2023; SALLEH et al., 2022).

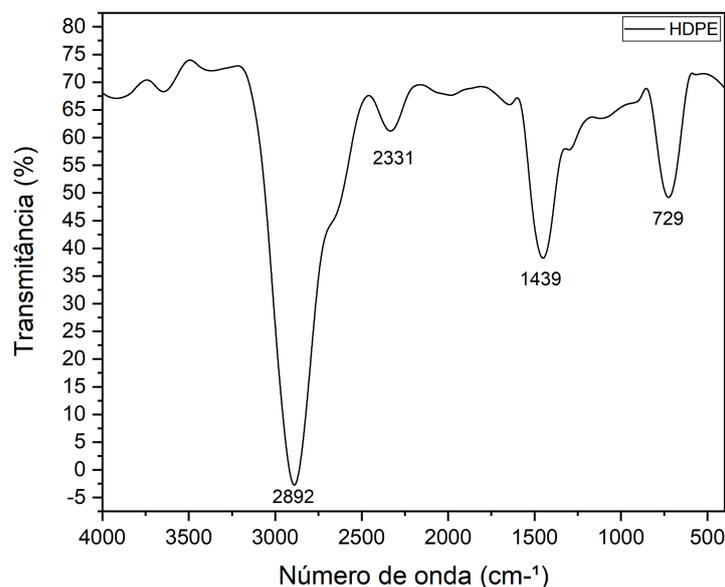


Figura 4.5 – Espectro de infravermelho por transformada Fourier (FTIR) do HDPE.

A Figura 4.6 apresenta os espectros da escória de Panela e dos geopolímeros 1,4 e 1,6. Os espectros dos geopolímeros 1,4 e 1,6 não apresentaram diferenças nas bandas. As bandas 3550 cm^{-1} e 3125 cm^{-1} correspondem à vibração de estiramento -OH (LAZORENKO et al., 2020). Observa-se uma diferença no alargamento da banda da escória para as bandas dos geopolímeros referente a diferença na força de ligação de O-H. Isso pode ser devido ao alongamento de O-H em água ou outras ligações fracas contendo hidroxila (WANG et al., 2023). A banda em 1435 cm^{-1} é devido à presença de carbonato de sódio, que é consistente com a vibração de alongamento da ligação O-C-O, que pode ter se formado devido à carbonatação atmosférica de meios alcalinos. O deslocamento dessa banda na escória para 1420 cm^{-1} nos geopolímeros é devido a interação física e química entre a escória e geopolímero (BAI et al., 2018). A banda 862 cm^{-1} se refere a flexão de Al-O e Si-O e evidência de formação de AlO_4 (AKARKEN; CENGIZ, 2023). Essa banda foi deslocada nos espectros dos geopolímeros para 892 cm^{-1} , que é um sinal importante de geopolymerização que se associa à dissolução das fases Al por ativação alcalina e seu rearranjo na matriz geopolimérica formada, o que confirma a geopolymerização (GIANNOPOULOU et al., 2023).

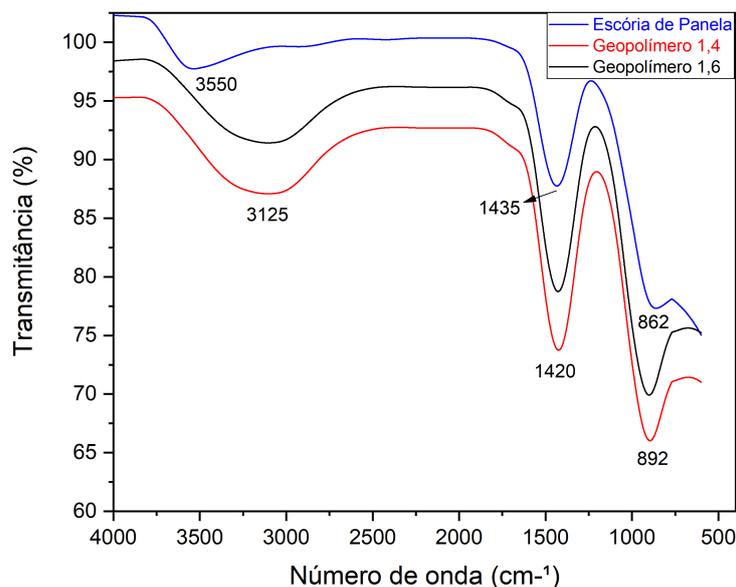


Figura 4.6 – Espectro de infravermelho por transformada Fourier (FTIR) da escória de Panela e dos geopolímeros 1,4 e 1,6.

As Figuras 4.8 e 4.9 mostram os espectros dos compósitos com os compatibilizantes anidrido maleico e Polybond, respectivamente, juntamente com o espectro do HDPE para efeito de comparação (1.4:30:67:03, 1.6:30:67:03 e HDPE na Figura 4.8 e HDPE, 1.4:30:67:03.POLY e 1.6:30:67:03.POLY na Figura 4.9). A banda 3391 cm^{-1} em ambas as Figuras indica que existia uma banda OH entre o esqueleto de HDPE e a molécula de peróxido, que iniciou o processo de enxerto dos compatibilizantes (VAHIDI et al., 2022). Nas Figuras é possível observar também o deslocamento da banda 2892 cm^{-1} do HDPE para a banda 2904 cm^{-1} (nas duas Figuras), que corresponde ao alongamento simétrico de C-H nos grupos CH_2 . A banda 1439 cm^{-1} do HDPE é deslocada para a banda 1468 cm^{-1} dos compósitos com Polybond (Figura 4.9) que correspondentes ao HDPE amorfo (Dönmez Çavdar et al., 2021; GUPTA et al., 2023), o que também acontece na Figura 4.8 com um deslocamento ainda maior para a banda 1508 cm^{-1} dos compósitos com anidrido maleico. Esses deslocamentos ocorrem devido as mudanças na banda de absorção de todos os grupos funcionais presentes nos espectros e que pode indicar a presença de grupos carboxila que desempenha um papel vital na reação com o compatibilizante (GUPTA et al., 2023; SARFRAZ, 2016). Vale ressaltar também que a banda característica dos compatibilizantes fica próxima a 1730 cm^{-1} e não aparece nas Figuras, pois o espectro dos compósitos são dominados pelo espectro do HDPE, formando assim bandas mais largas nos espectros com os compatibilizantes, o que demonstra que a compatibilização foi efetivada tanto com anidrido maleico quanto com Polybon (COSTA et al., 2020; SHAO et al., 2015). Já as bandas 963 cm^{-1} e 981 cm^{-1} nas Figuras 4.9 e 4.8 respectivamente, se relacionam a

dissolução das fases reativas dos materiais aluminossilicatos, evidenciando a substituição das ligações Si-O-Si por Si-O-Al(PEYNE et al., 2017).

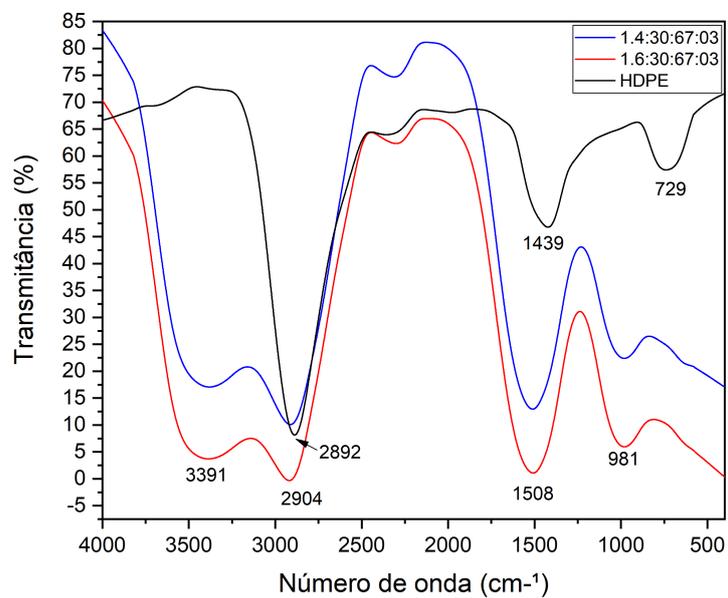


Figura 4.7 – Espectro de infravermelho por transformada Fourier (FTIR) dos compósitos 1.4:30:67:03 e 1.6:30:67:03.

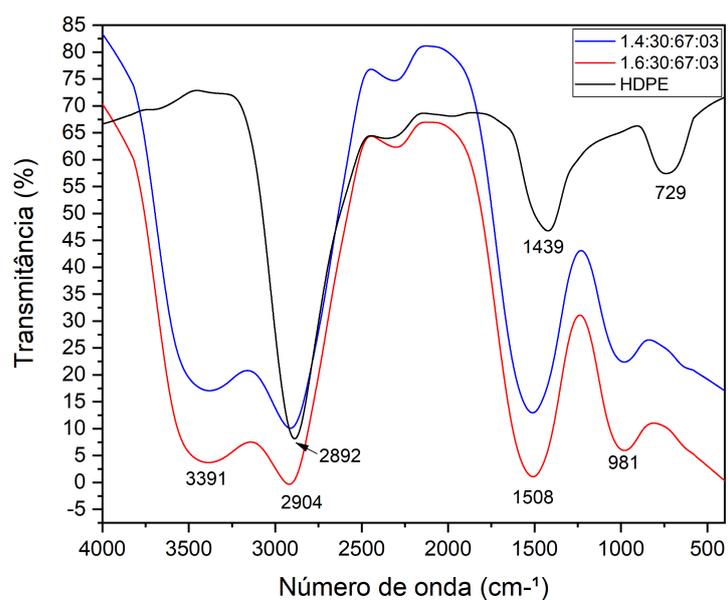


Figura 4.8 – Espectro de infravermelho por transformada Fourier (FTIR) dos compósitos 1.4:30:67:03 e 1.6:30:67:03.

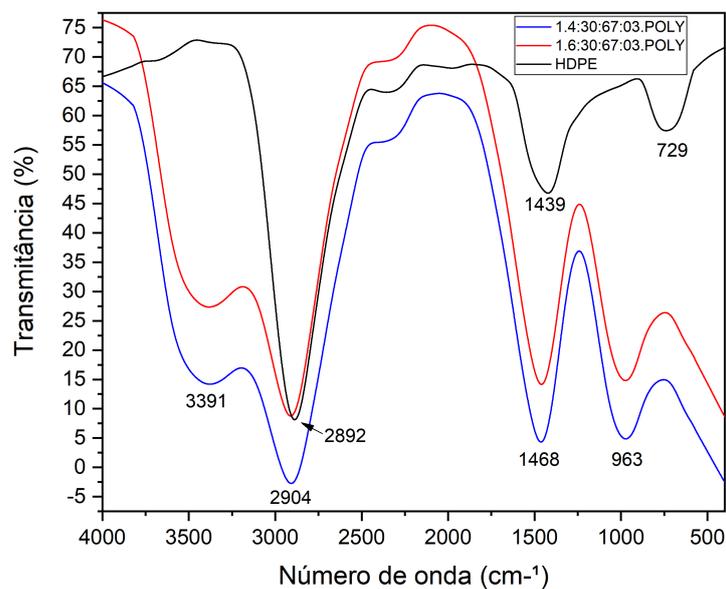


Figura 4.9 – Espectro de infravermelho por transformada Fourier (FTIR) dos compósitos 1.4:30:67:03.POLY e 1.6:30:67:03.POLY.

4.3 ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA (TGA)

Os resultados obtidos na análise termogravimétrica se encontram na Tabela 4.1 contendo a temperatura inicial T_{onset} , temperatura máxima T_{max} , temperatura final T_{final} , resíduo e perda de massa. As amostras estão nomeadas de acordo com o Tabela 3.1.

Tabela 4.1 – Dados obtidos no ensaio de TGA.

DADOS OBTIDOS NO ENSAIO DE TGA						
Amostra	Elemento	T _{onset} (°C)	T _{máxima} (°C)	T _{final} (°C)	Resíduo (%)	Perda de massa (%)
1	Escória	25,0	-	1000,0	95,1	4,9
8	Geopolímero 1.4	25,0	-	1000,0	84,2	15,8
11	Geopolímero 1.6	25,0	-	1000,0	82,3	19,2
13	HDPE	359,8	469,2	501,0	4,3	95,7
14	1.4.20:80:00	401,9	457,9	490,1	24,4	75,6
15	1.4.10:87:03	403,6	469,2	508,9	18,8	81,2
16c	1.4.20:77:03 (120RPM)	412,4	463,1	479,5	71,9	28,1
17	1.4.30:67:03	384,8	485,6	508,9	35,4	64,6
18	1.6.10:87:03	387,4	468,5	506,7	31,2	68,8
19	1.6.20:77:03	411,3	467,9	498,9	39,4	60,6
20	1.6.30:67:03	393,6	470,6	505,0	36,6	63,4
21	E.20:77:03	413,5	451,4	483,2	35,7	64,4
22	1.4.10:87:03 POLY	397,4	459,3	499,0	25,8	74,2
23	1.4.20:77:03 POLY	397,4	459,3	487,0	28,3	71,7
24	1.4.30:67:03 POLY	411,3	463,4	493,2	29,4	70,6
25	1.6.10:87:03 POLY	426,5	454,9	494,5	33,0	67,0
26	1.6.20:77:03 POLY	398,1	460,7	500,3	27,0	73,0
27	1.6.30:67:03 POLY	414,8	460,7	494,5	45,9	54,2
28	E.20:77:03 POLY	389,5	456,6	490,8	27,8	72,2

As perdas de massa podem ser mais facilmente comparadas através do gráfico apresentado na Figura 4.10.

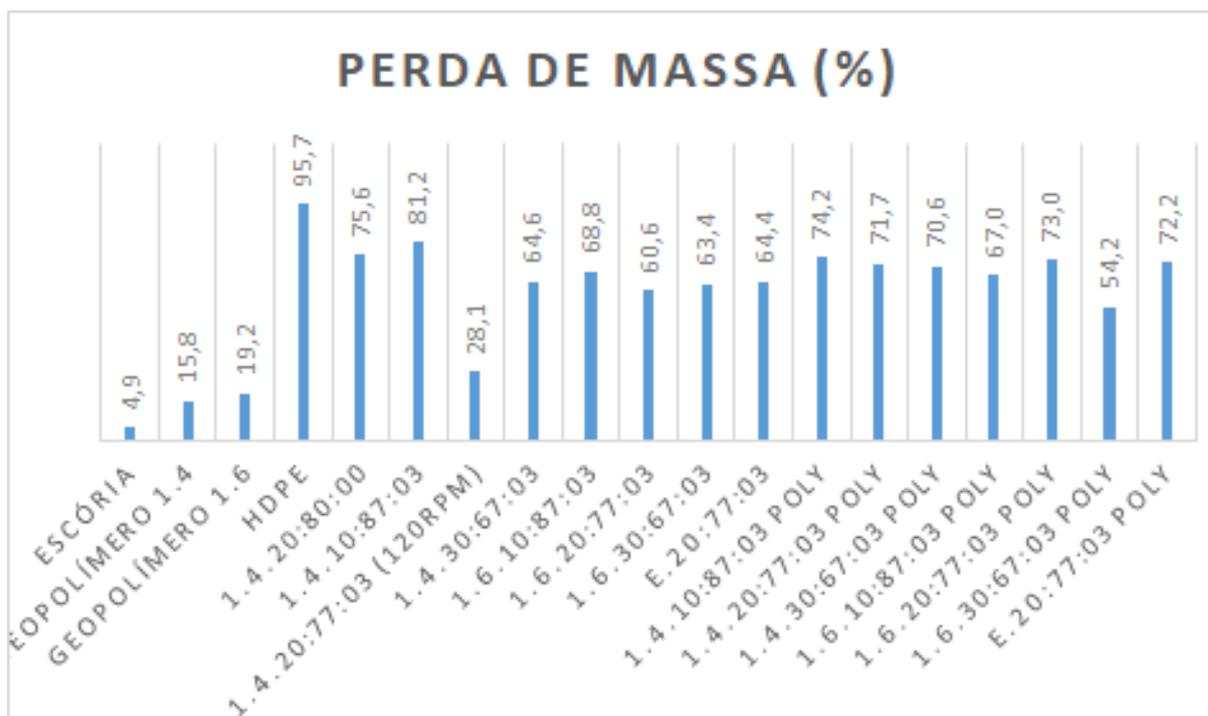


Figura 4.10 – Perda de massa das amostras em porcentagem.

As Figuras 4.11 e 4.12 mostram a curva de TG e DTG do HDPE, respectivamente, da análise realizada sob N₂.

Na curva de TG é possível observar que a decomposição do HDPE ocorre em uma única etapa, totalizando uma perda de massa de 95,7 %, como esperado em matrizes poliméricas. A $T_{on, set}$ é 359,8 °C enquanto a $T_{f, final}$ é de 501,0 °C. Na curva de DTG, a $T_{m, ax}$ ocorre em 469,2 °C.

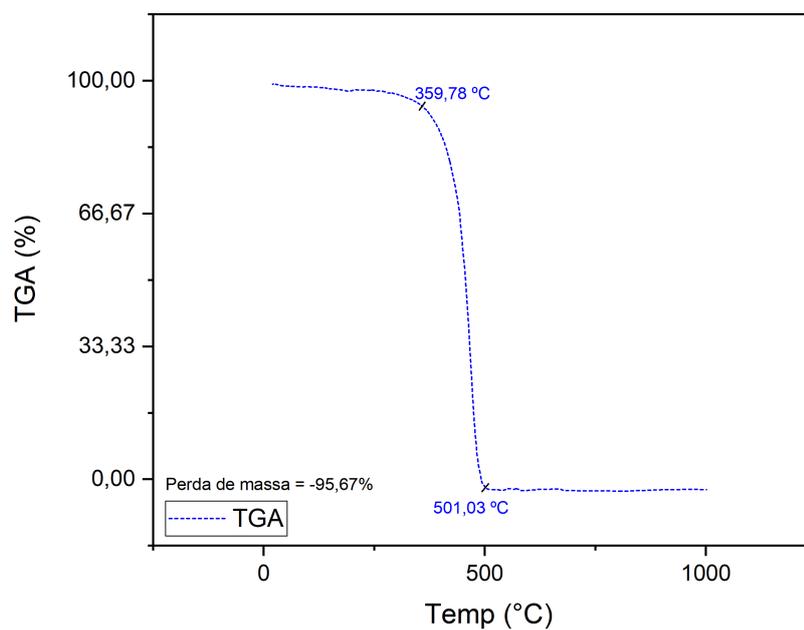


Figura 4.11 – TG do HDPE.

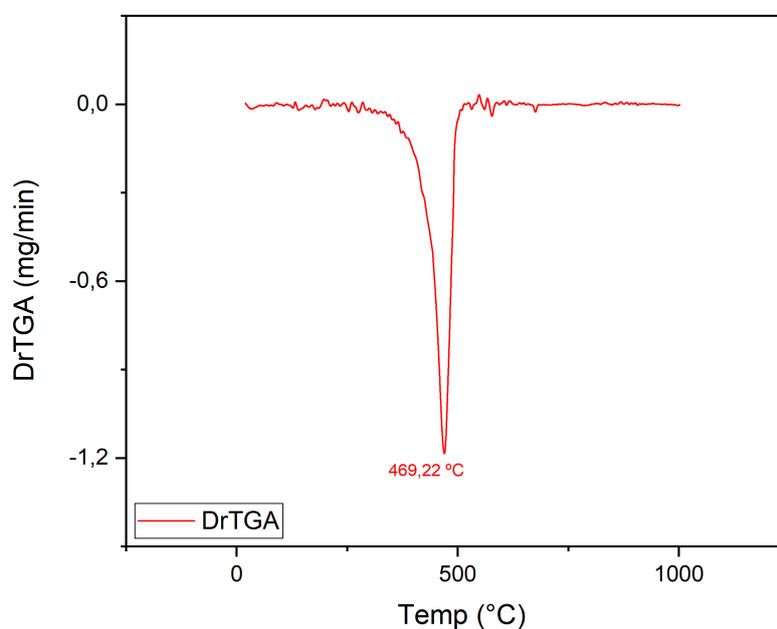


Figura 4.12 – DTG do HDPE.

As Figuras 4.13 e 4.14 apresentam as curvas de TG e DTG da escória de aciaria de panela e dos geopolímeros 1,4 e 1,6 g/L entre sólido/líquido (nomeados geopolímero 1,4 e 1,6), respectivamente. Analisando as curvas de DTG das amostras da escória e dos

geopolímeros, nota-se que há múltiplas etapas de perda de massa em toda a faixa de temperaturas. Em temperaturas próximas aos 100 °C, a perda de massa ocorre devido a liberação de água presente nos materiais. A escória de aciaria de panela totaliza uma perda de umidade igual a 4,9% enquanto os geopolímeros 1,4 e 1,6 possuem uma perda de água muito maior, equivalente a 15,8% e 19,2%, respectivamente. Na amostra da escória de panela ocorre perda de massa próxima as temperaturas de 290 °C e 430 °C devido à decomposição de $Mg(OH)_2$ e $Ca(OH)_2$, respectivamente(XU; YI, 2022). De uma forma geral, as curvas de DTG dos geopolímeros mostram uma grande perda de massa antes de 200°C, o que mostra a decomposição de água livre e gel C-(A)-S-H. Próximo aos 400 °C, a perda de massa foi devido a decomposição $Ca(OH)_2$. Na faixa de 600-800°C ocorreu também uma pequena perda de massa pela decomposição do calcita(RASHAD; KHAFAGA; GHARIEB, 2021; CONG; MEI, 2021). O geopolímero 1,6 apresenta perdas em massa em torno de 861,49 °C devido a carbonatos e/ou monocarbonatos(WANG et al., 2021b).

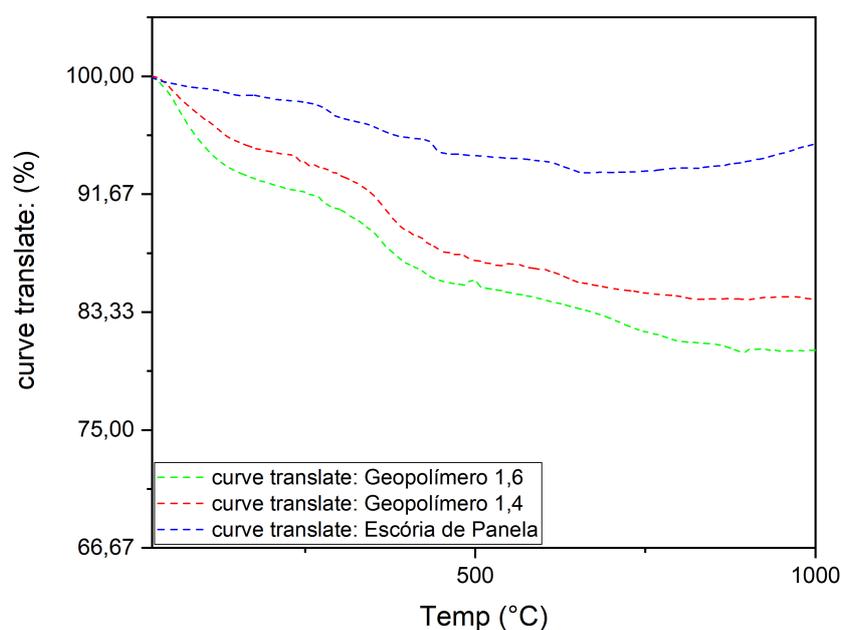


Figura 4.13 – TG da escória de panela e dos geopolímeros 1,4 e 1,6.

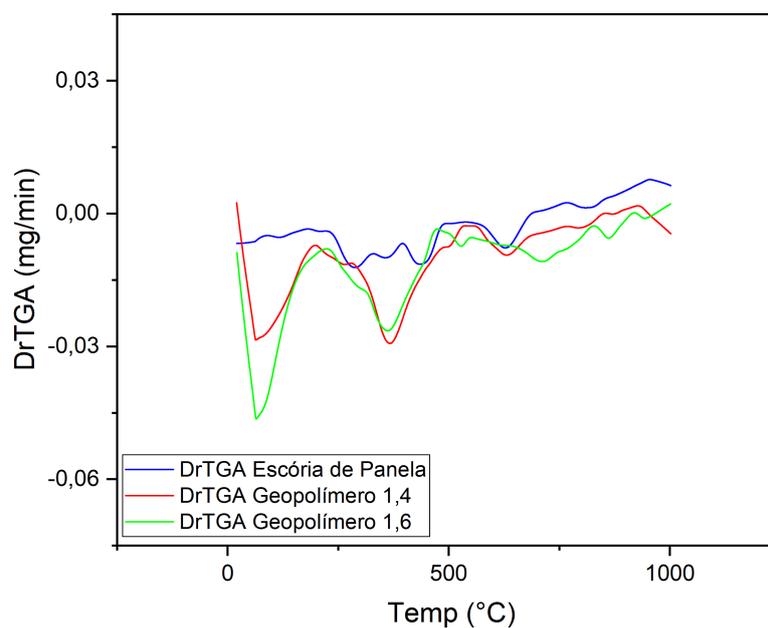


Figura 4.14 – DTG da escória de panela e dos geopolímeros 1,4 e 1,6.

Nas Figuras 4.15 e 4.16 é possível analisar as curvas de TG e DTG dos compósitos de HDPE (77%) com 20% de escoria pura e 3% de compatibilizante (amostras E.20:77:03 e E.20:77:03.POLY, respectivamente), permitindo a comparação entre os materiais com diferentes compatibilizantes. Comparando as curvas dos diferentes compatibilizantes nota-se que a T_{max} e T_{final} do Polybond foi aumentada em aproximadamente 5 e 7,5 °C, respectivamente, se comparadas ao anidrido maleico, o que demonstra uma maior estabilidade térmica devido a uma melhor interação entre a carga e a matriz (POLETTO et al., 2012).

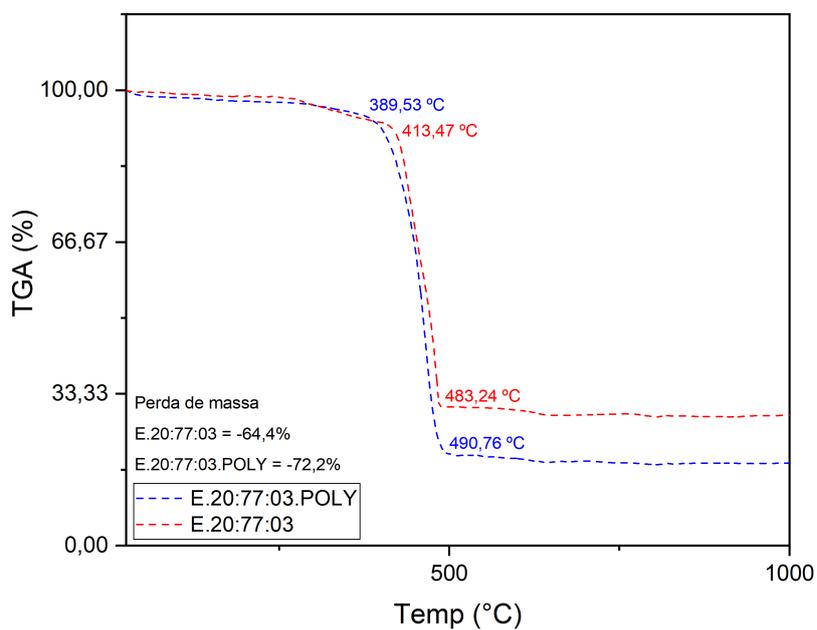


Figura 4.15 – TG dos compósitos E.20:77:03 e E.20:77:03.POLY.

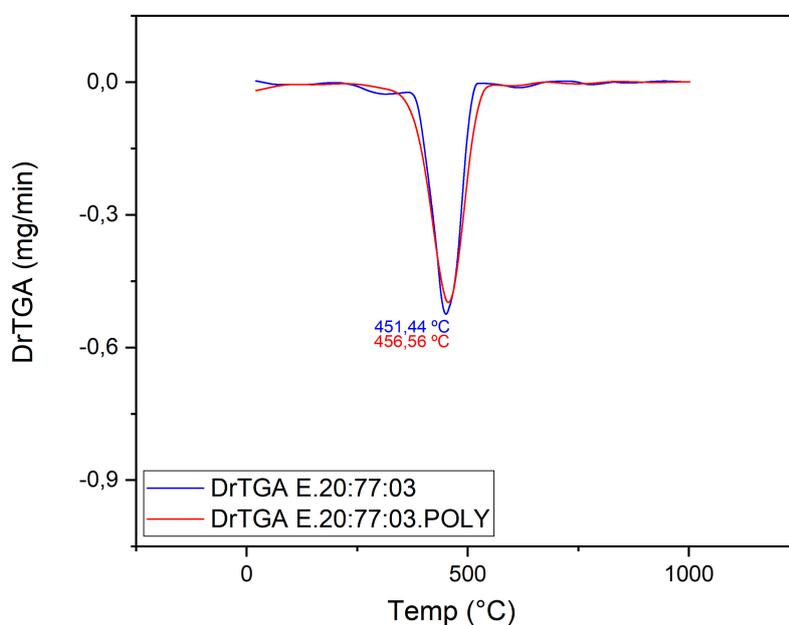


Figura 4.16 – DTG dos compósitos E.20:77:03 e E.20:77:03.POLY.

Nas Figuras 4.17 e 4.18 são mostradas as curvas de TG e DTG, respectivamente, dos compósitos fabricados com diferentes concentrações de geopolímero 1,4, um sem anidrido maleico e os outros com 3 %: 1.4:20:80:00, 1.4:10:87:03, 1.4:20:77:03 e 1.4:30:67:03.

Comparando as curvas termogravimétricas dos diferentes compósitos nota-se que a amostra sem compatibilizantes resultou em uma menor T_{max} , enquanto o compósito 1.4:30:67:03 teve a menor T_{onset} e a maior T_{max} . Uma grande diferença na perda de massa é observada no compósito 1.4:20:77:03 quando comparado aos demais. Foi observado um pequeno aumento de estabilidade térmica no compósito com compatibilizante anidrido maleico em relação ao sem compatibilizante.

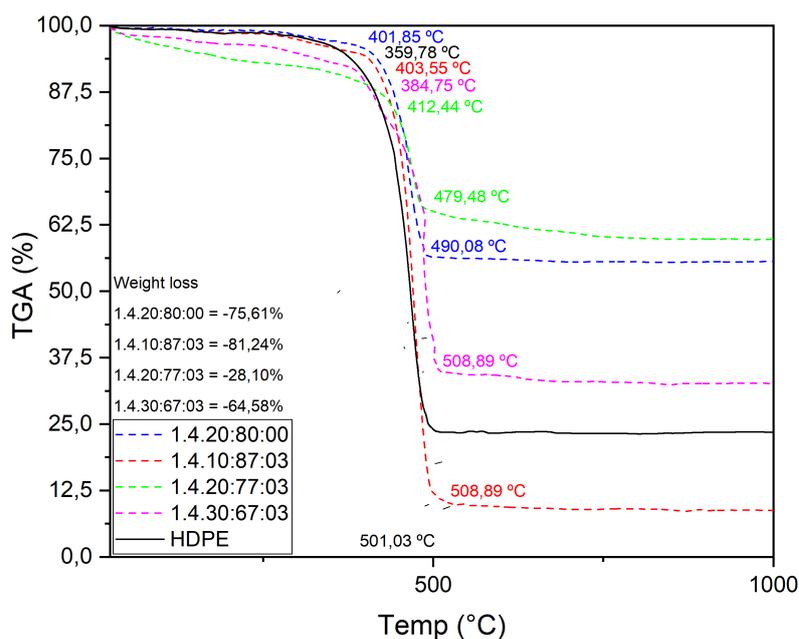


Figura 4.17 – TG dos compósitos fabricados com diferentes concentrações de geopolímero 1,4, sem compatibilizante e com 3 % de anidrido maleico.

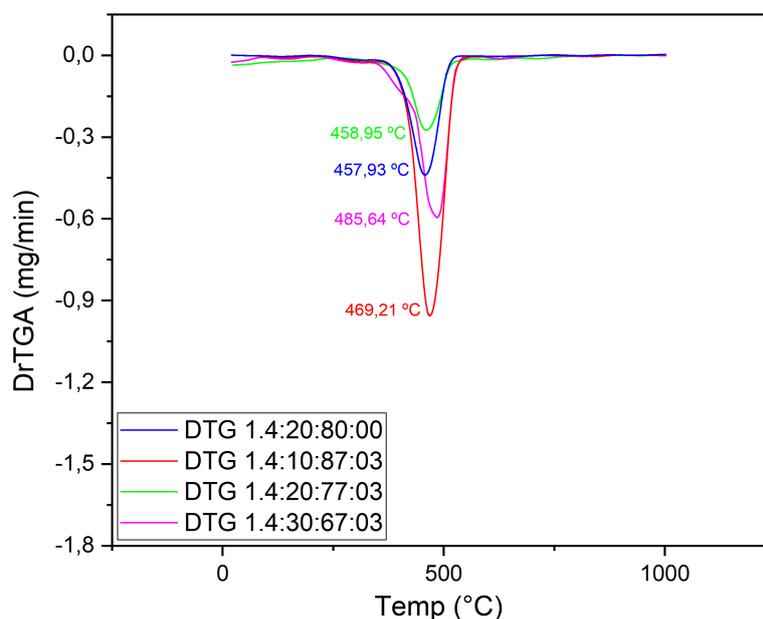


Figura 4.18 – DTG dos compósitos fabricados com diferentes concentrações de geopolímero 1,4, sem compatibilizante e com 3 % de anidrido maleico.

Nas Figuras 4.19 e 4.20 é possível analisar as curvas de TG e DTG, respectivamente, dos compósitos fabricados com diferentes concentrações de geopolímero 1,6, com 3 % anidrido maleico: 1.6:10:87:03, 1.6:20:77:03 e 1.6:30:67:03. Fazendo a comparação entre as curvas termogravimétricas desses compósitos, observa-se que o compósito 1.6:20:77:03 teve maior T_{onset} , as T_{max} ficaram próximas e em relação as T_{final} , o compósito 1.6:20:77:03 teve um valor um pouco abaixo das demais amostras comparadas. Se compararmos esses compósitos com os compósitos com mesmas concentrações de geopolímero, porém geopolímero 1,4, cujas curvas termogravimétricas se encontram nas Figuras 4.17 e 4.18, é possível perceber que as T_{onset} dos compósitos com geopolímero 1,6 foram inferiores as dos compósitos com geopolímeros 1,4. Já as T_{max} e finais tiveram um pequeno aumento de estabilidade térmica.

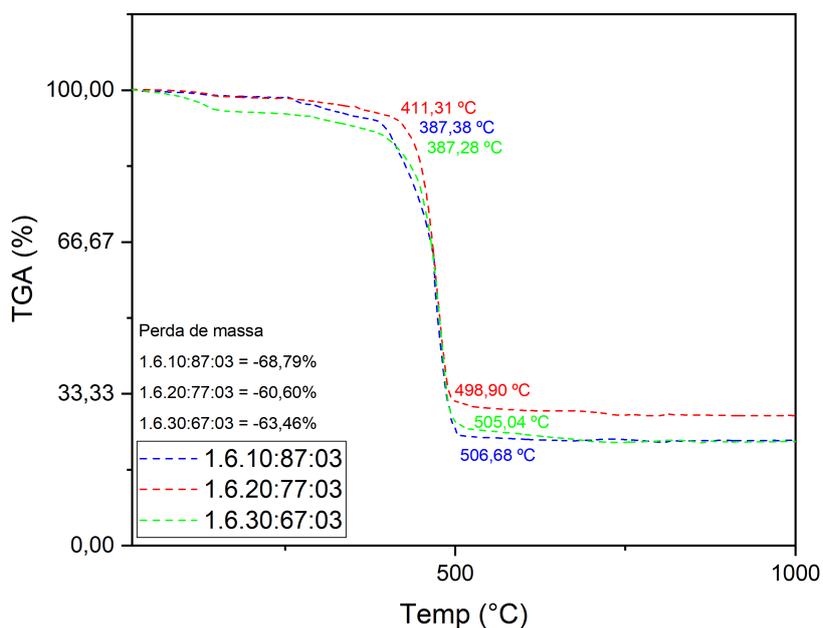


Figura 4.19 – TG dos compósitos fabricados com diferentes concentrações de geopolímero 1,6 com 3 % de anidrido maleico.

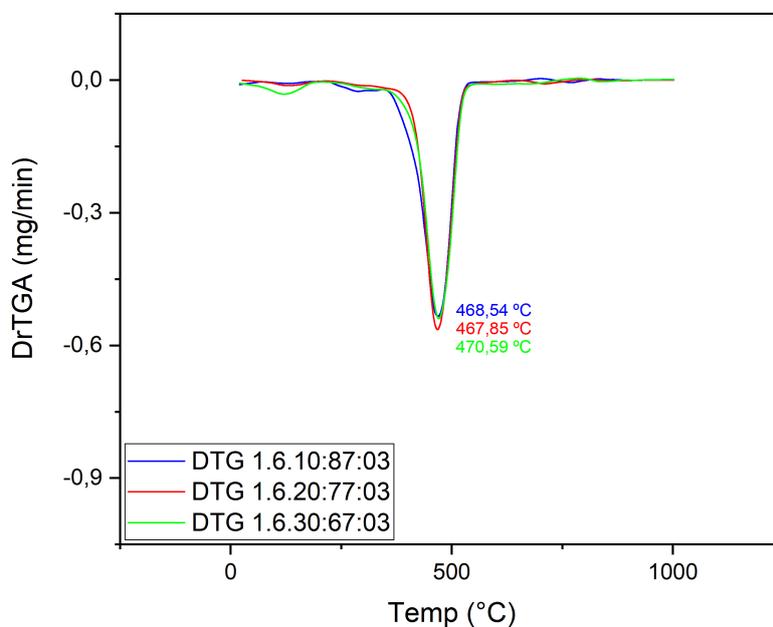


Figura 4.20 – DTG dos compósitos fabricados com diferentes concentrações de geopolímero 1,6 com 3 % de anidrido maleico.

Nas Figuras 4.21 e 4.22 é possível analisar as curvas de TG e DTG dos compósitos fabricados com diferentes concentrações de geopolímero 1,4 com 3 % de compatibili-

zante Polybond, respectivamente. Os compósitos apresentados são: 1.4:10:87:03.POLY, 1.4:20:77:03.POLY e 1.4:30:67:03.POLY. Comparando as curvas termogravimétricas dos compósitos, observa-se que o compósito 1.4:10:87:03.POLY resultou em uma maior perda de massa, o compósito 1.4:30:67:03.POLY teve uma T_{onset} mais elevada, as temperaturas máximas ficaram bem próximas. Já o compósito 1.4:20:77:03.POLY teve uma T_{final} um pouco inferior quando comparado as outros compósitos fabricados com o geopolímero 1,4 e Polybond. Se compararmos esses compósitos com os de mesma concentrações, porém fabricados com anidrido maleico, cujas curvas termogravimétricas se encontram nas Figuras 4.17 e 4.18, percebe-se que as temperaturas iniciais foram bem menores, as máximas e finais tiveram pequenas variações e a perda de massa do compósito 1.4:10:87:03.POLY foi menor, a do 1.4:20:77:03.POLY foi bem maior e do 1.4:30:67:03.POLY foi maior.

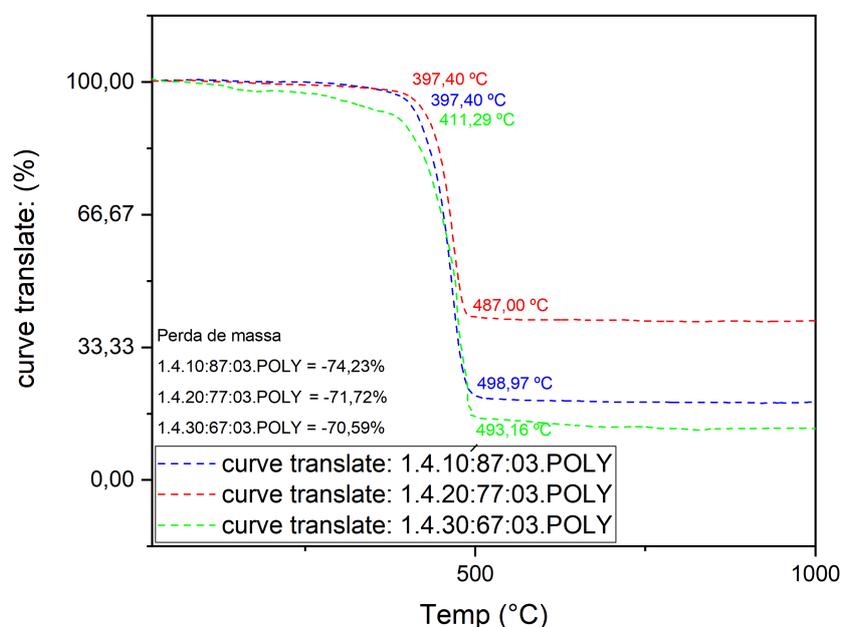


Figura 4.21 – TG dos compósitos fabricados com diferentes concentrações de geopolímero 1,4 com 3 % de Polybond.

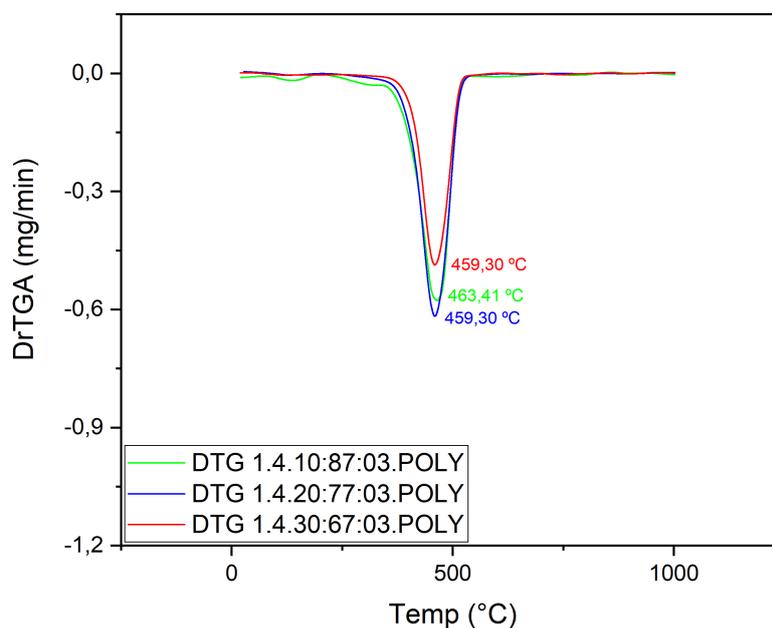


Figura 4.22 – DTG dos compósitos fabricados com diferentes concentrações de geopolímero 1,4 com 3 % de Polybond.

As Figuras 4.23 e 4.24 mostram as curvas de TG e DTG dos compósitos fabricados com diferentes concentrações de geopolímero 1,6 com 3 % Polybond, respectivamente. Os compósitos apresentados são: 1.6:10:87:03.POLY, 1.6:20:77:03.POLY e 1.6:30:67:03.POLY. Comparando as curvas termogravimétricas das amostras é possível observar que o compósito 1.6:20:87:03.POLY teve uma maior perda de massa, o compósito 1.6:10:67:03.POLY teve uma T_{onset} mais elevada, enquanto as temperaturas máximas e finais ficaram bem próximas. Comparando-se esses compósitos com os de mesma concentrações, porém fabricados com anidrido maleico, cujas curvas termogravimétricas se encontram nas Figuras 4.19 e 4.20, é possível perceber que apenas a T_{onset} do compósito 1.6.10:87:03.POLY teve um aumento considerável e as temperaturas máximas e finais tiveram pequenas diferenças. Em relação a perda de massa, apenas o compósito 1.6.30:67:03.POLY teve uma considerável menor porcentagem de perda se comparado ao fabricado com geopolímero 1,4.

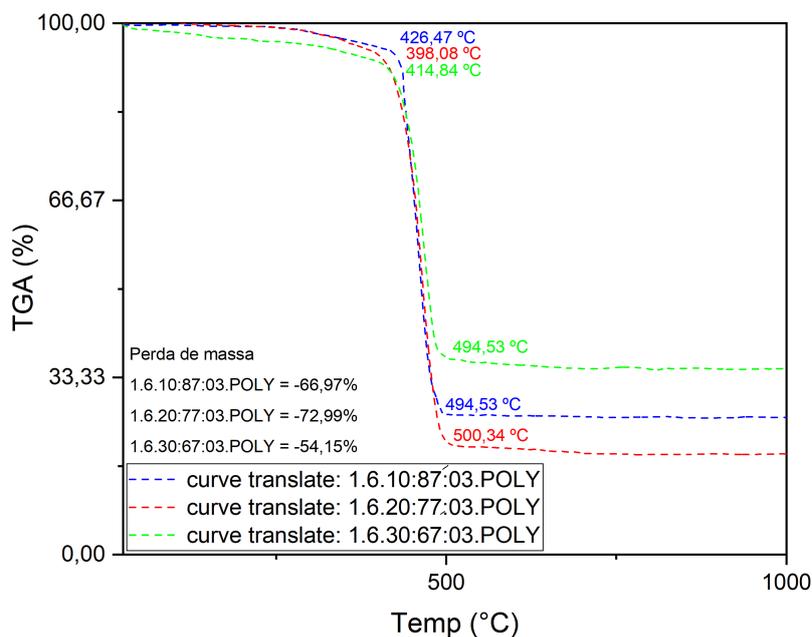


Figura 4.23 – TG dos compósitos fabricados com diferentes concentrações de geopolímero 1,6 com Polybond.

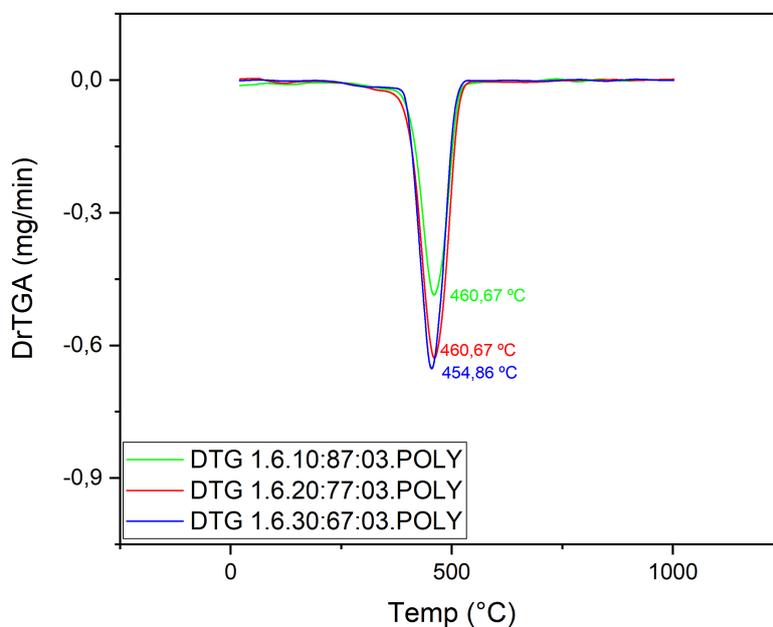


Figura 4.24 – DTG dos compósitos fabricados com diferentes concentrações de geopolímero 1,6 com Polybond.

Com a análise geral dos resultados foi possível observar que com a geopolimerização ocorre uma maior perda de massa em relação à amostra inicial de escória de panela, tendo

o geopolímero 1,6 (amostra 11) uma maior porcentagem se comparado ao 1,4 (amostra 8). Quando as amostras de geopolímeros foram incorporadas no HDPE produzindo os compósitos, a perda de massa foi maior ainda devido a grande quantidade de polímero, confirmado pela amostra de HDPE pura (amostra 13) ter a maior perda de massa de todas as amostras analisadas.

Quando se analisa as amostras com e sem compatibilizante (amostra 14 e 16c) se observa pequenas diferenças nas temperaturas de decomposição (inicial, máxima e final), porém ocorre uma grande diferença na perda de massa da amostra com compatibilizante, sendo a menor de todos os compósitos, o que mostra um efeito de aumento de resistência à degradação térmica do material. As amostras diferenciadas apenas pelos compatibilizantes, amostras 21 e 28, tiveram poucas alterações nas temperaturas de decomposição.

Os compósitos fabricados com geopolímero 1,4 tiveram a maioria das temperaturas de decomposição (inicial, máxima e final) maiores do que dos compósitos fabricados com geopolímero 1,6. Essa diferença de estabilidade térmica entre os compósitos se deve ao fato de que a estabilidade térmica do geopolímero depende da relação Si/Al no ligante de geopolímero, do tipo de cátion alcalino da solução ativadora e também dos teores de sólido/líquido (LEMOUGNA et al., 2020; PEREIRA; RAMOS; SILVA, 2020).

A análise termogravimétrica mostra um aumento na estabilidade térmica dos compósitos por meio das reações que ocorrem durante o processamento, como por exemplo, na formação de interações secundárias que ocorrem na interface entre os componentes da mistura e promovem um aumento da interação interfacial (CUNHA, 2009).

4.4 CALORIMETRIA DE VARREDURA DIFERENCIAL (DSC)

Os resultados de DSC são apresentados na Tabela 4.2, onde se encontram os valores das temperaturas máximas de fusão (T_m), as temperaturas de cristalização (T_c), entalpias de fusão (ΔH_m) e grau de cristalinidade (X_c) de cada amostra. A comparação dos valores do grau de cristalinidade também pode ser comparada na Figura 4.25.

Tabela 4.2 – Resultados de DSC.

RESULTADOS DE DSC						
n	AMOSTRA	T _c	T _m	ΔH _m (mJ/mg)	ΔH _m 1 aq	X _c
13	HDPE.00:00:00	114,10	128,80	170,00	154,00	58,02
14	1.4.20:80:00	113,70	129,60	126,00	135,00	53,75
15	1.4.10:87:03	112,70	131,40	127,00	127,00	48,16
16a	1.4.20:77:03 (60RPM)	113,70	129,20	135,00	148,00	57,59
16b	1.4.20:77:03 (90RPM)	112,40	130,60	116,00	86,10	49,49
16c	1.4.20:77:03 (120RPM)	113,20	129,50	85,10	120,00	36,31
16d	1.4.20:77:03 (150RPM)	114,20	128,80	113,00	117,00	48,21
17	1.4.30:67:03	114,50	129,20	71,30	76,10	34,76
18	1.6.10:87:03	112,00	130,90	114,00	106,00	43,23
19	1.6.20:77:03	114,10	128,40	108,00	122,00	46,08
20	1.6.30:67:03	114,00	130,00	85,30	85,50	41,59
21	E.20:77:03	113,10	129,70	137,00	117,00	58,45
22	1.4.10:87:03.POLY	112,60	130,50	130,00	116,00	49,30
23	1.4.20:77:03.POLY	112,90	130,00	121,00	119,00	51,62
24	1.4.30:67:03.POLY	113,00	129,80	102,00	100,00	49,73
25	1.6.10:87:03.POLY	114,10	129,30	125,00	120,00	47,40
26	1.6.20:77:03.POLY	114,10	129,10	122,00	127,00	52,05
27	1.6.30:67:03.POLY	113,50	128,60	78,60	78,40	38,32
28	E.20:77:03.POLY	113,50	129,50	115,00	110,00	49,06

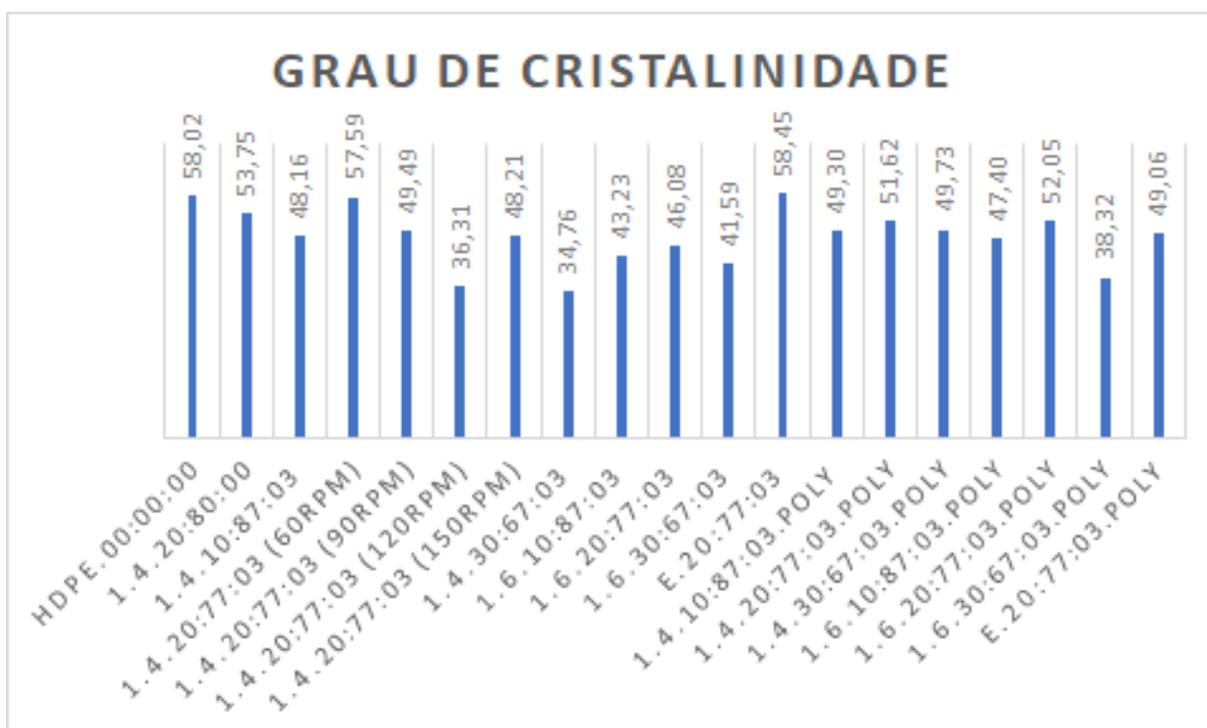


Figura 4.25 – Gráfico do grau de cristalinidade de cada amostra em porcentagem.

As Figuras 4.26 e 4.27 apresentam o resfriamento e o segundo aquecimento, respec-

tivamente, das amostras 1.4.20:80:00, 1.4.20:87:03 e 1.4.20:87:03.POLY.

As Figuras 4.28 e 4.29 apresentam o resfriamento e o segundo aquecimento, respectivamente, do HDPE e das amostras fabricadas com anidrido maleico: 1.4.10:87:03, 1.4.20:77:03, 1.4.30:67:03, 1.6.10:87:03, 1.6.20:77:03, 1.6.30:67:03, E.20:77:03.

As Figuras 4.30 e 4.31 apresentam o resfriamento e o segundo aquecimento, respectivamente, do HDPE e das amostras fabricadas com Polybond: 1.4.10:87:03.POLY, 1.4.20:77:03.POLY, 1.4.30:67:03.POLY, 1.6.10:87:03.POLY, 1.6.20:77:03.POLY, 1.6.30:67:03.POLY, E.20:77:03.POLY.

Analisando os resultados é possível perceber que a T_c não teve grandes variações. Os resultados confirmam a presença de HDPE e sua temperatura de fusão entre 125 e 132 °C. As temperaturas máximas dos compósitos também não saíram desse intervalo não tendo alterações significativas, o que sugere que a variação no teor de carga não afetou o caráter cristalino. Os compósitos apresentaram um claro pico endotérmico de 20 °C a 180 °C que é ligeiramente diminuído conforme aumenta a concentração de carga (EZZAHRAE et al., 2023).

As blendas das amostras com compatibilizantes tiveram um pequeno deslocamento das T_m , como mostrado na Figura 4.27, que pode estar relacionado a interação entre os homopolímeros, comportamento este que pode ser atribuído a uma melhor interface entre a carga e a matriz, corroborando assim com as análise de Densidade e Dureza (MACHADO et al., 2019).

As partículas de geopolímero dispersas na matriz parecem atuar diminuindo a mobilidade das cadeias poliméricas, reduzindo assim sua organização e diminuindo a cristalinidade (QUITADAMO et al., 2019). Materiais com menor grau de cristalinidade possuem menor densidade, o que contribui para um bom isolamento térmico e acústico, como visto no item 2.6. Sendo assim, analisando os resultados da Figura 4.2 é possível perceber que os compósitos com menores grau de cristalinidade são o 1.4.30:67:03 e 1.4.20:77:03 com X_c iguais a 34,76% e 36,31% respectivamente.

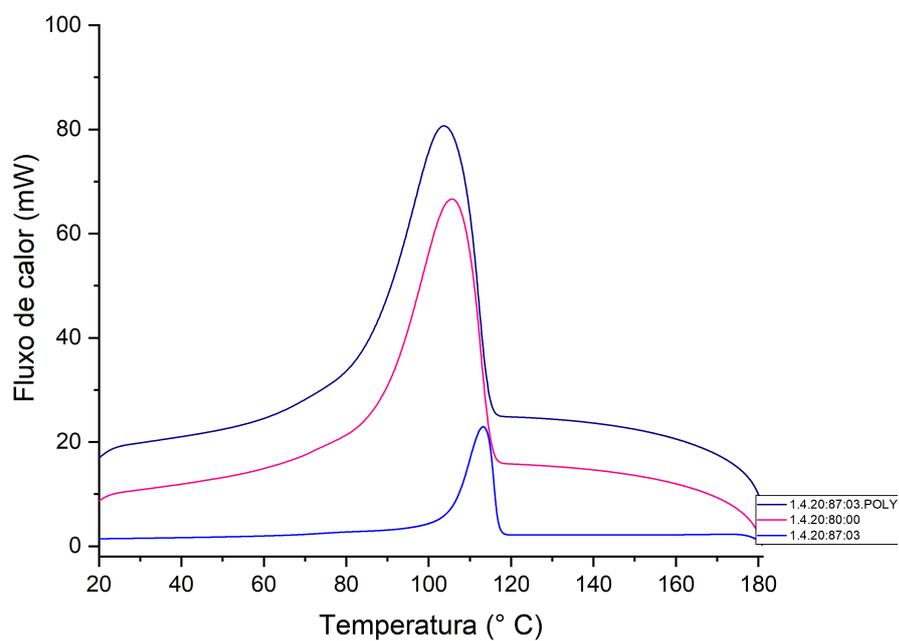


Figura 4.26 – DSC do resfriamento das amostras 1.4.20:80:00, 1.4.20:87:03 e 1.4.20:87:03.POLY.

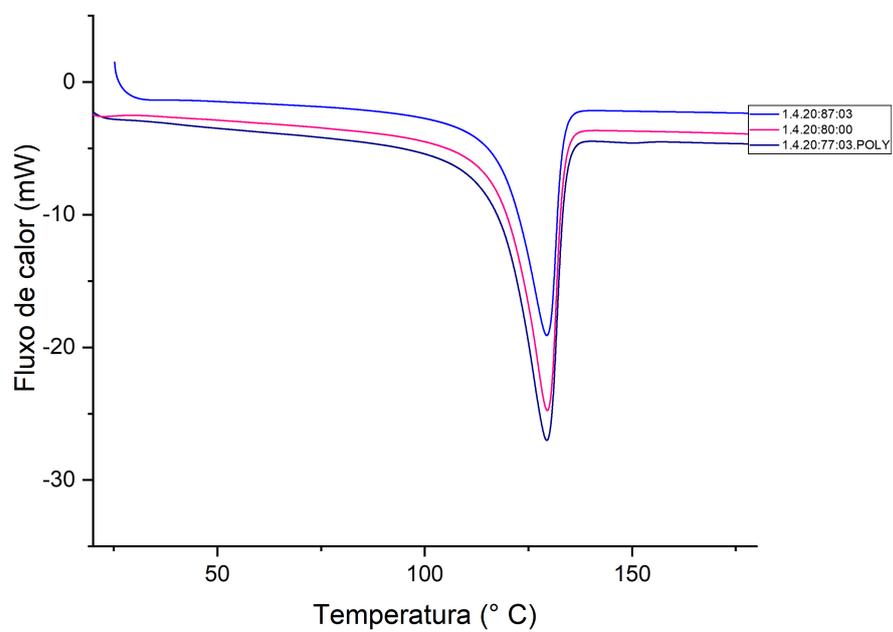


Figura 4.27 – DSC do segundo aquecimento das amostras 1.4.20:80:00, 1.4.20:87:03 e 1.4.20:87:03.POLY.

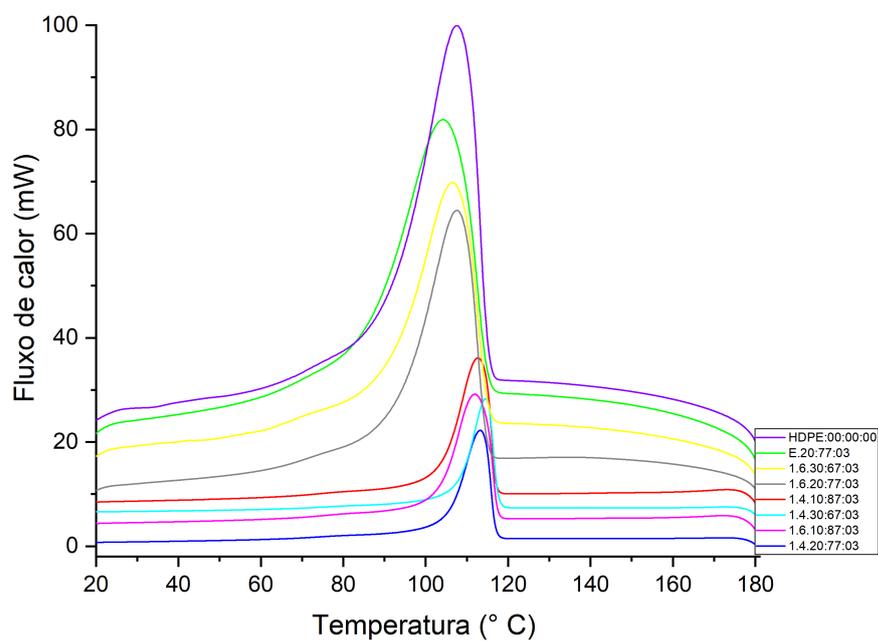


Figura 4.28 – DSC do resfriamento das amostras fabricadas com anidrido maleico.

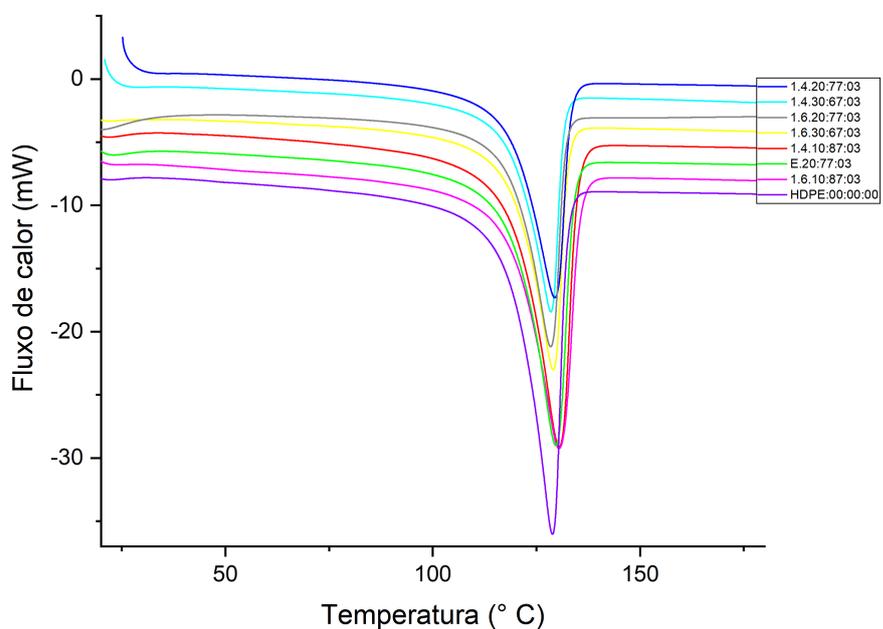


Figura 4.29 – DSC do segundo aquecimento das amostras fabricadas com anidrido maleico.

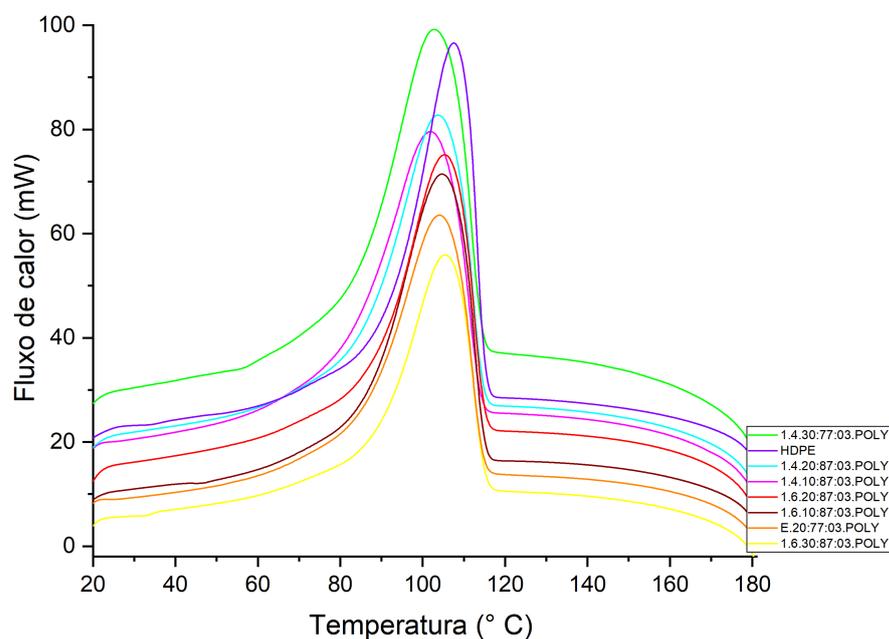


Figura 4.30 – DSC do resfriamento das amostras fabricadas com Polybond.

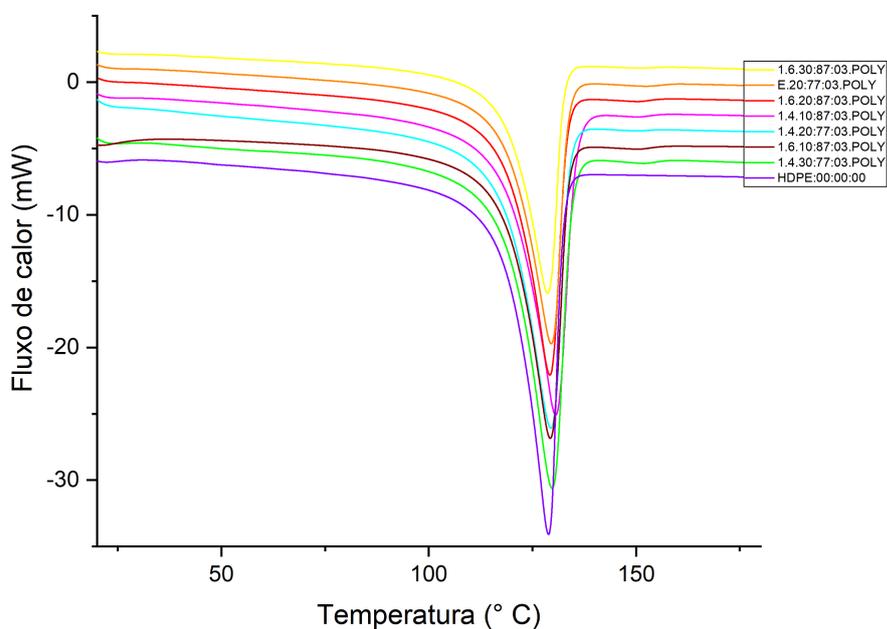


Figura 4.31 – DSC do segundo aquecimento das amostras fabricadas com Polybond.

A análise de DSC contribuiu com o objetivo da pesquisa mostrando que os compósitos 1.4.30:67:03 e 1.4.20:77:03 apresentam os menores graus de cristalinidade, o que é

uma das características desejáveis para materiais com bom isolamento térmico e acústico de acordo com o item 2.6.

4.5 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

As imagens de microscopia apresentadas na Figura 4.32 mostram a escória de panela macerada e peneirada. A escória macerada tem uma média de tamanho das partículas de $302,86 \mu\text{m}$ com um desvio padrão de $157,85 \mu\text{m}$, enquanto a peneirada em 230 mesh tem um tamanho médio de $85,47 \mu\text{m}$ com desvio padrão de $25,09 \mu\text{m}$. Através da análise das imagens de microscopia, foi possível verificar a eficiência do peneiramento, pois quase todas as partículas são menores que $75 \mu\text{m}$, dimensão esta da abertura da peneira utilizada. A presença de poucas partículas com medidas que ultrapassaram o limite da peneira, se justifica por sua medida transversal ser menor viabilizando assim a passagem pela peneira entretando, ainda tornando o peneiramento eficiente.

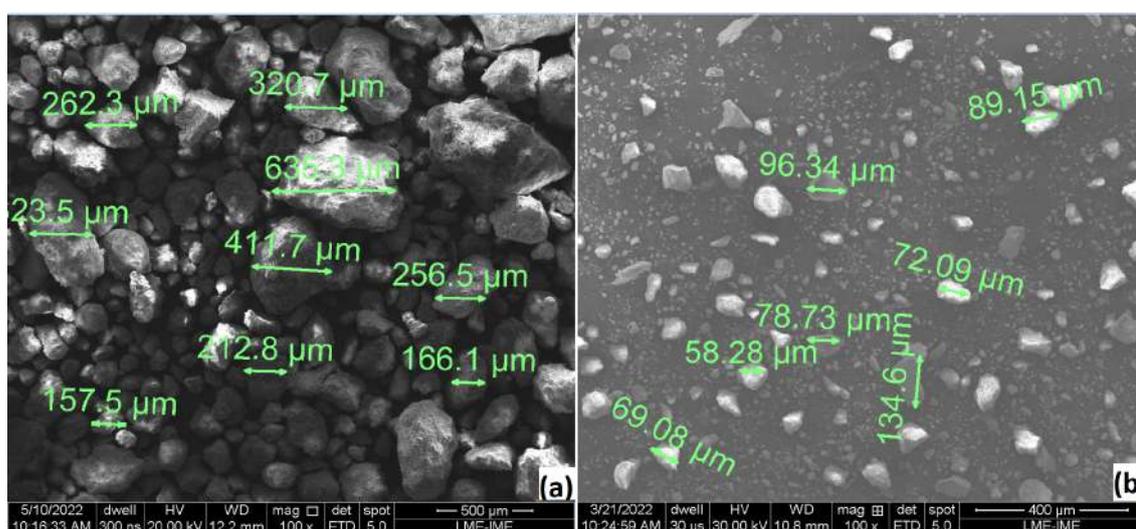


Figura 4.32 – Imagem de micrografia com aumento de 100x da escória de panela macerada (a) e peneirada (b).

A dimensão das partículas dos geopolímeros 1,4 e 1,6 foram analisadas tanto no estado macerado quanto peneirado, como mostra a imagem com aumento de 250x na Figura 4.33. Através das imagens de microscopia foi possível calcular uma média dos tamanhos das partículas do geopolímero 1,4 macerado, apresentando um valor de $91,14 \mu\text{m}$ com um desvio padrão de $25,98 \mu\text{m}$, enquanto o peneirado apresentou um valor de $63,41 \mu\text{m}$ com um desvio padrão de $7,40 \mu\text{m}$. Já o valor médio do geopolímero 1,6 no estado macerado foi de $110,84 \mu\text{m}$ com um desvio padrão de $27,46 \mu\text{m}$, enquanto o peneirado de $53,50 \mu\text{m}$ com um desvio padrão de $13,70 \mu\text{m}$. Comparando as imagens de microscopia dos geopolímeros macerados com os peneirados, é possível verificar a diminuição da granulometria consideravelmente e a eficiência do peneiramento mediante ao tamanho das partículas serem menores que

a abertura da peneira ($75 \mu\text{m}$). A diminuição na granulometria contribui no isolamento térmico, onde a morfologia influencia na difusividade térmica. O comportamento da difusividade térmica é influenciado pelo tamanho de grão, onde menores partículas tendem a menores valores de difusividade térmica e conseqüentemente uma maior a capacidade de isolamento térmico (JOSEPH et al., 2022; CAETANO et al., 2017).

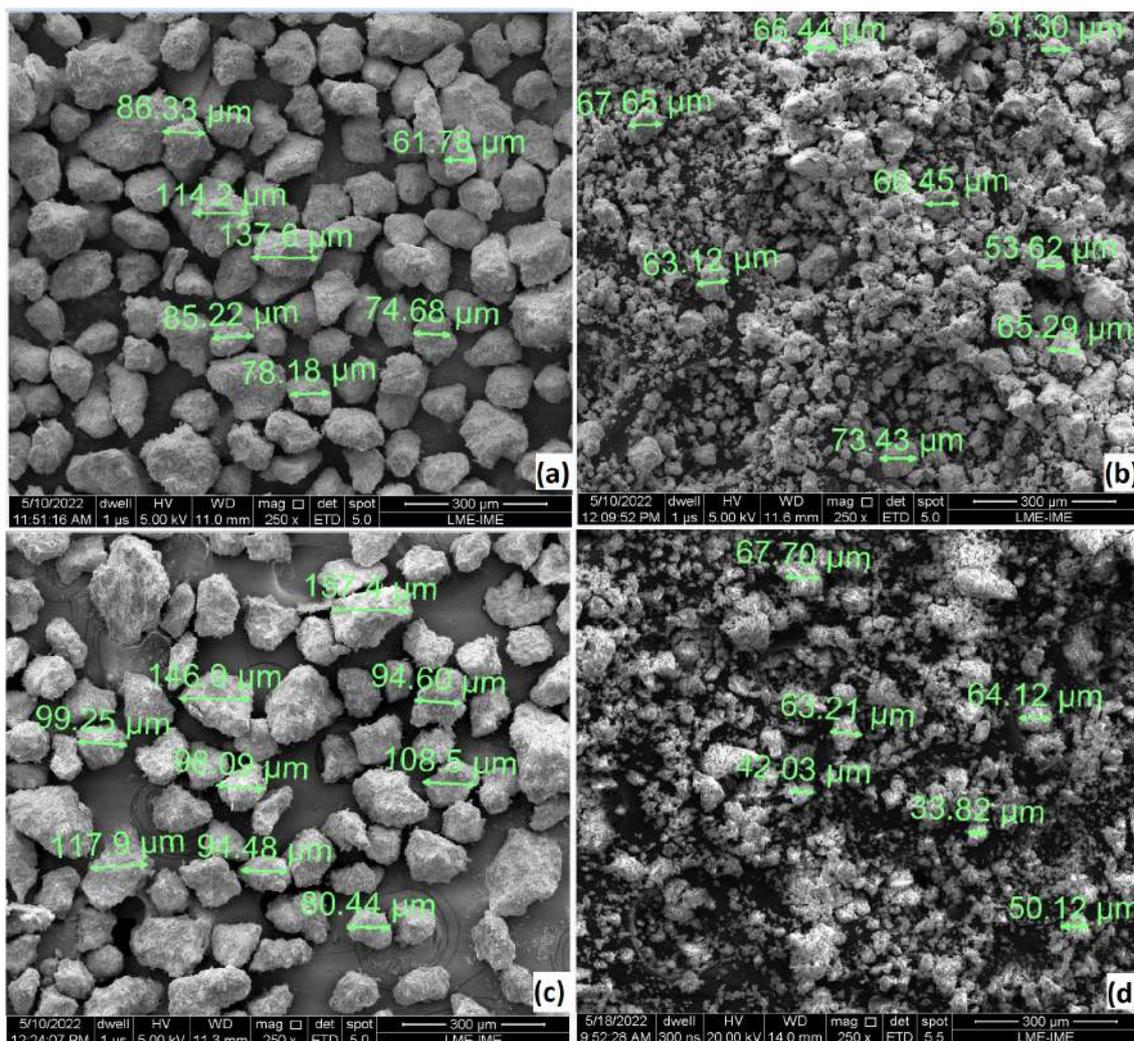


Figura 4.33 – Imagem de micrografia com aumento de 250x dos geopolímeros: 1,4 macerado (a), 1,4 peneirado (b), 1,6 macerado (c) e 1,6 peneirado (d).

Uma modificação na morfologia pode ser sugerida pela ocorrência da geopolimerização. A diferença morfológica entre a escória e os geopolímeros é mostrada nas Figuras 4.34 e 4.35, onde se encontram imagens de microscopia com aumento de 2000x da escória de panela (a) e o geopolímero 1,4 (b) na Figura 4.34 e as imagens de micrografia com aumento de 1000x da escória de panela (a) e do geopolímero 1,6 na Figura 4.35.

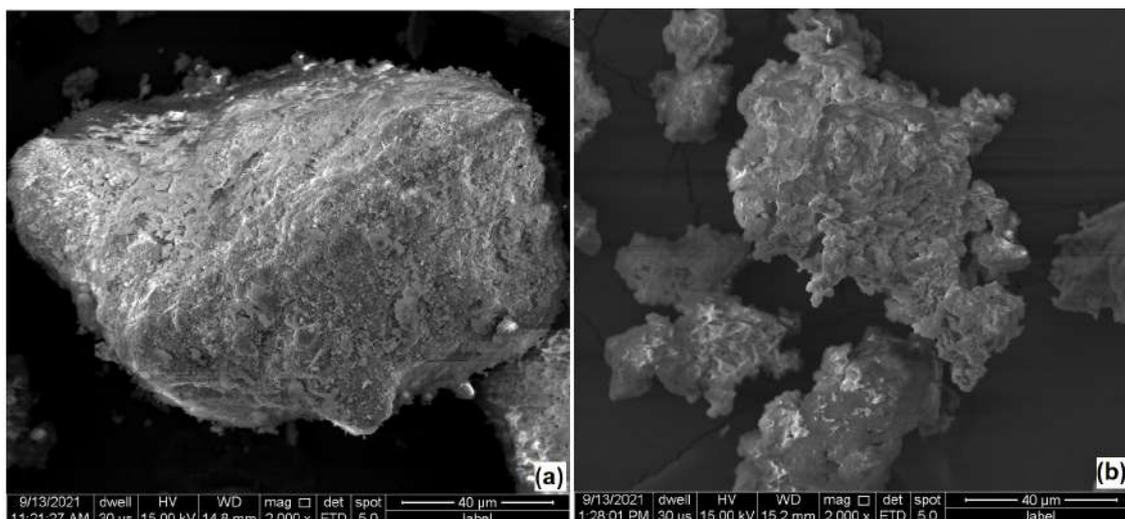


Figura 4.34 – Imagem de micrografia com aumento de 2000x da escória de panela (a) e do geopolímero 1,4 (b) pulverizados.

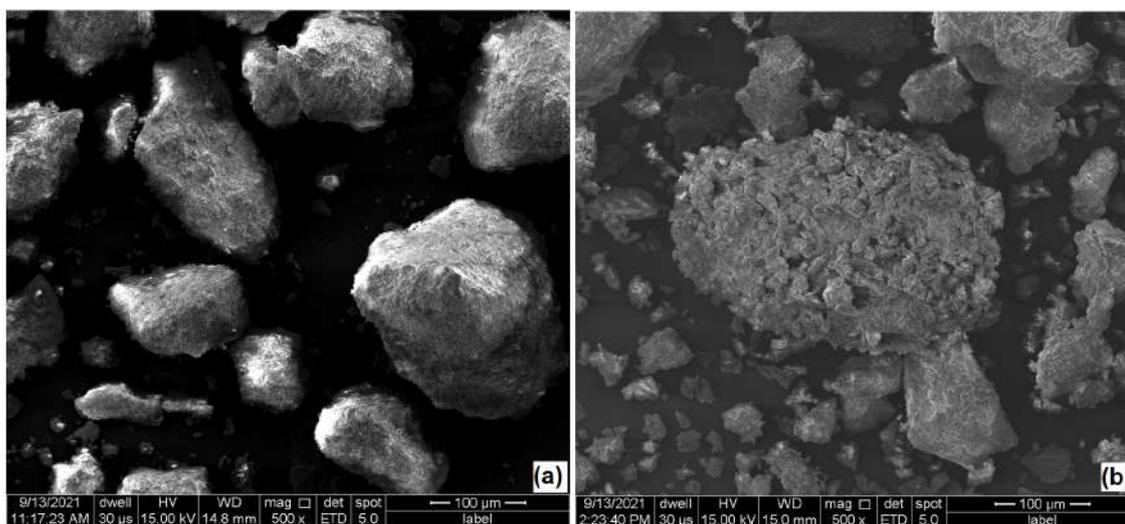


Figura 4.35 – Imagem de micrografia com aumento de 1000x da escória de panela (a) e do geopolímero 1,6 (b) pulverizados.

A Figura 4.36 apresenta a imagem de micrografia do geopolímero 1,4 com aumento de 5000x, onde é possível observar uma estrutura composta por grânulos compactados em uma estrutura homogênea. Essa estrutura cúbica do cristal apresenta morfologia similar às zeólitas (ABDEL-GHANI; ELSAYED; ABDELMOIED, 2018; SIMANJUNTAK et al., 2021).

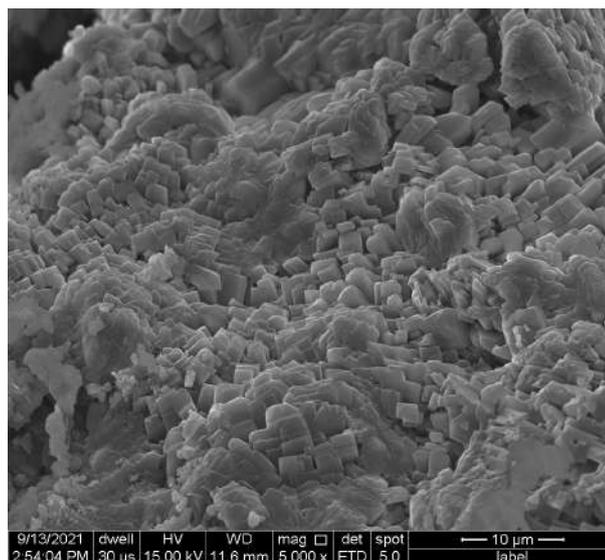


Figura 4.36 – Imagem de micrografia do geopolímero 1,4 com aumento de 5000x com morfologia similar às zeólitas.

O geopolímero 1,4 tem uma maior porosidade quando comparado ao geopolímero 1,6, o que pode ser considerado na produção de materiais que buscam um melhor desempenho mecânico e acústico em algumas funcionalidades (PEREIRA; RAMOS; SILVA, 2020). Essa maior porosidade pode ser confirmada na Figura 4.37 que mostra a imagem de microscopia com aumento de 2000x do geopolímero 1,4 (a) e 1,6 (b).

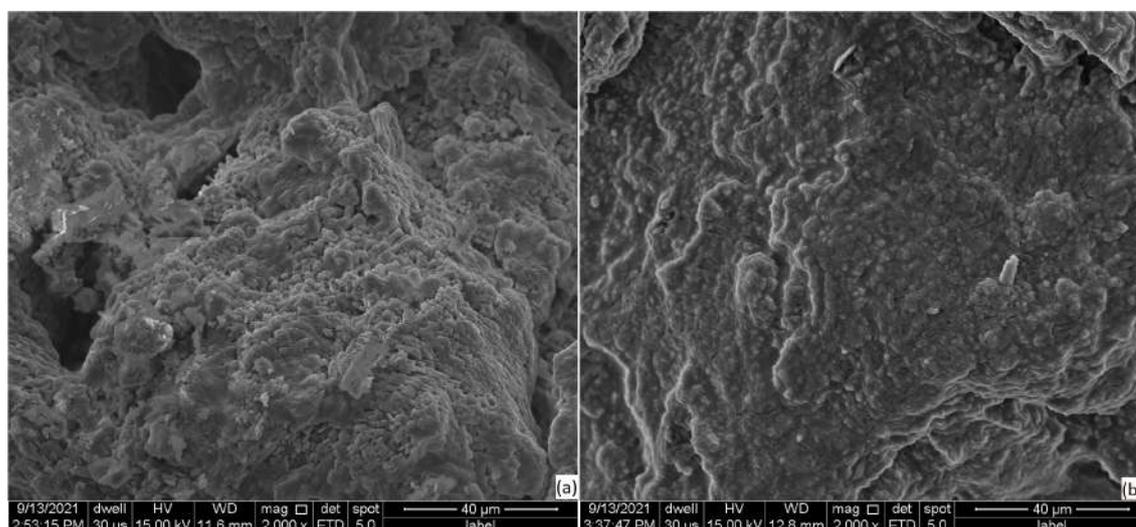


Figura 4.37 – Imagem de micrografia com aumento de 2000x dos pedaços do geopolímero 1,4 (a) e 1,6 (b).

A fim de estudar a dispersão da carga, foram analisadas as imagens de microscopia do compósito 1.4.20:77:03 com 4 diferentes rotações dos parafusos durante a extrusão: 60, 90, 120 e 150 RPM, como mostra a Figura 4.38. Através da análise das imagens de microscopia, a amostra produzida com velocidade do parafuso de 120 RPM mostrou uma melhor dispersão da carga. Com isso, os demais compósitos foram fabricados com esta

rotação. O polímero tem um comportamento pseudoplástico e em uma maior rotação, como a de 150 RPM, a viscosidade fica tão baixa que não provoca o cisalhamento necessário à boa dispersão das partículas da carga e a migração do compatibilizante para a interface carga-matriz.

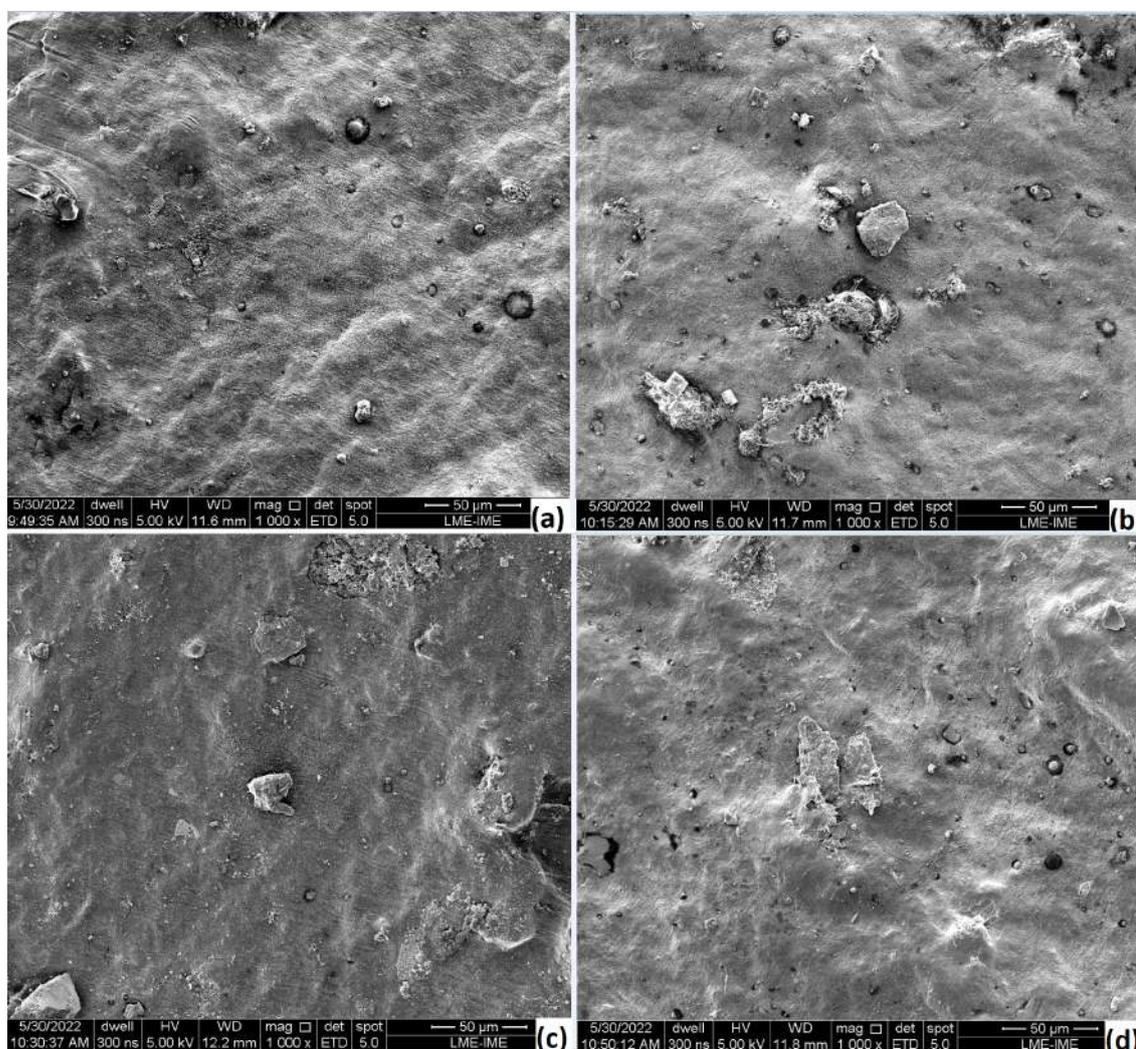


Figura 4.38 – Imagem de micrografia com aumento de 1000x da fratura do compósito 1.4.20:77:03 extrusado com 60 RPM (a), 90 RPM (b), 120 RPM (c) e 150 RPM (d).

Foram analisadas imagens de microscopia dos compósitos 1.4:20:77:03 e 1.4:20:80:00 a fim de se verificar a eficácia da utilização de compatibilizante, nesse caso o anidrido maleico. As imagens são mostradas na Figura 4.39 sendo a primeira com o compatibilizante (a) e a segunda sem compatibilizante (b). Com a análise é possível verificar que o compósito extrusado com compatibilizante teve um melhor processamento apresentando uma superfície bem mais lisa.

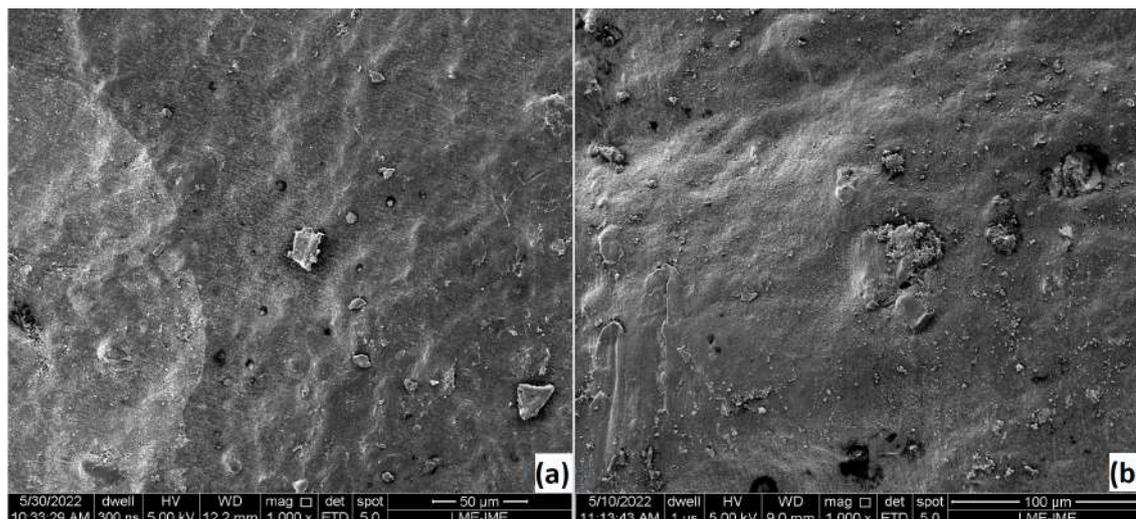


Figura 4.39 – Imagem de micrografia com aumento de 1000x da superfície do compósito 1.4:20:77:03 (a) e 1.4:20:80:00 (b).

Com o objetivo de verificar a necessidade da geopolimerização e comparar a eficácia dos diferentes compatibilizantes (anidrido maleico e Polybond), foram analisadas as imagens de microscopia com aumento de 250x dos compósitos E.20:77:03 (a), E.20:77:03POLY (b) e 1.4:20:77:03POLY (c) representadas na Figura 4.40. As imagens de microscopia mostraram um melhor encapsulamento das partículas com a utilização do compatibilizante Polybond (Figura 4.40 (b)). Um resultado ainda melhor foi do compósito com geopolímero com a superfície bem mais lisa, que sugere que com a porosidade do geopolímero, quando compatibilizado, a matriz recobre melhor as partículas (Figura 4.40 (c)).

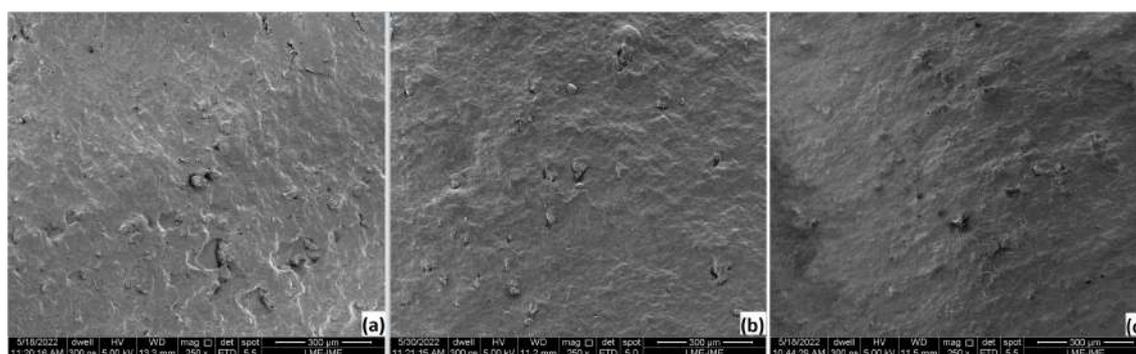


Figura 4.40 – Imagem de micrografia com aumento de 250x da superfície do compósito E.20:77:03 (a), E.20:77:03POLY (b) 1.4:20:77:03POLY (c).

A Figura 4.41 apresenta as imagens de MEV com aumento de 1000x dos compósitos com diferentes concentrações de geopolímero 1,4 fabricados com anidrido maleico e Polybond: 1.4:10:87:03 (a); 1.4:20:77:03 (b); 1.4:30:67:03 (c); 1.4:10:87:03.POLY (d); 1.4:20:77:03.POLY (e); 1.4:30:67:03.POLY (f). Ao contrario da escória, para o geopolímero o compatibilizante Polybond parece ter tido melhor desempenho que o anidrido maleico,

uma vez que a superfície mostra as partículas mais recobertas, especialmente no teor de 20% de geopolímero.

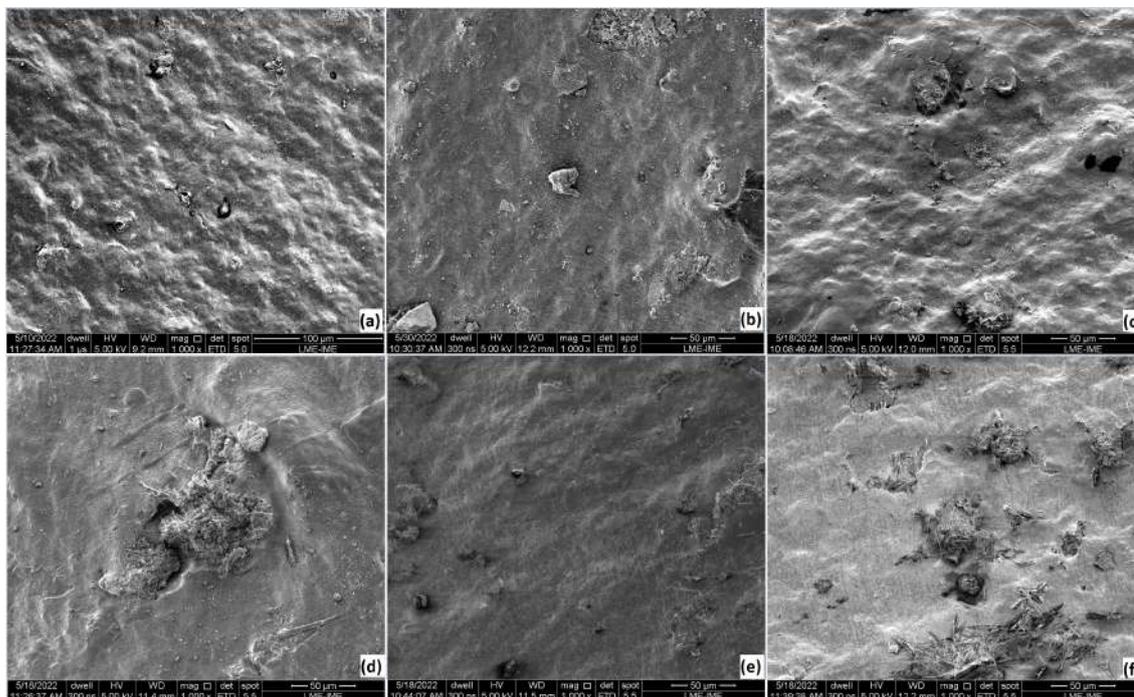


Figura 4.41 – Imagem de MEV com aumento de 1000x da superfície dos compósitos com diferentes concentrações de geopolímero 1,4 fabricados com anidrido maleico e Polybond: 1.4:10:87:03 (a); 1.4:20:77:03 (b); 1.4:30:67:03 (c); 1.4:10:87:03.POLY (d); 1.4:20:77:03.POLY (e); 1.4:30:67:03.POLY (f).

A Figura 4.42 apresenta as imagens de MEV com aumento de 1000x dos compósitos com diferentes concentrações de geopolímero 1,6 fabricados com anidrido maleico e Polybond: 1.6:10:87:03 (a); 1.6:20:77:03 (b); 1.6:30:67:03 (c); 1.6:10:87:03.POLY (d); 1.6:20:77:03.POLY (e); 1.6:30:67:03.POLY (f). Mais uma vez nota-se que para este geopolímero o melhor compatibilizante parece ter sido o Polybond e a concentração de 20% apresenta superfície mais lisa, contudo, menos recoberta que no caso do geopolímero 1,4. Notou-se também uma tendência à formação de fios nesses compósitos fabricados com geopolímero 1,6, que pode estar relacionado com uma melhor ligação de interface entre o geopolímero e a matriz, o que inibe o desenvolvimento de micro-fissuras e torna os compósitos mais impermeáveis e menos porosos(LI et al., 2023).

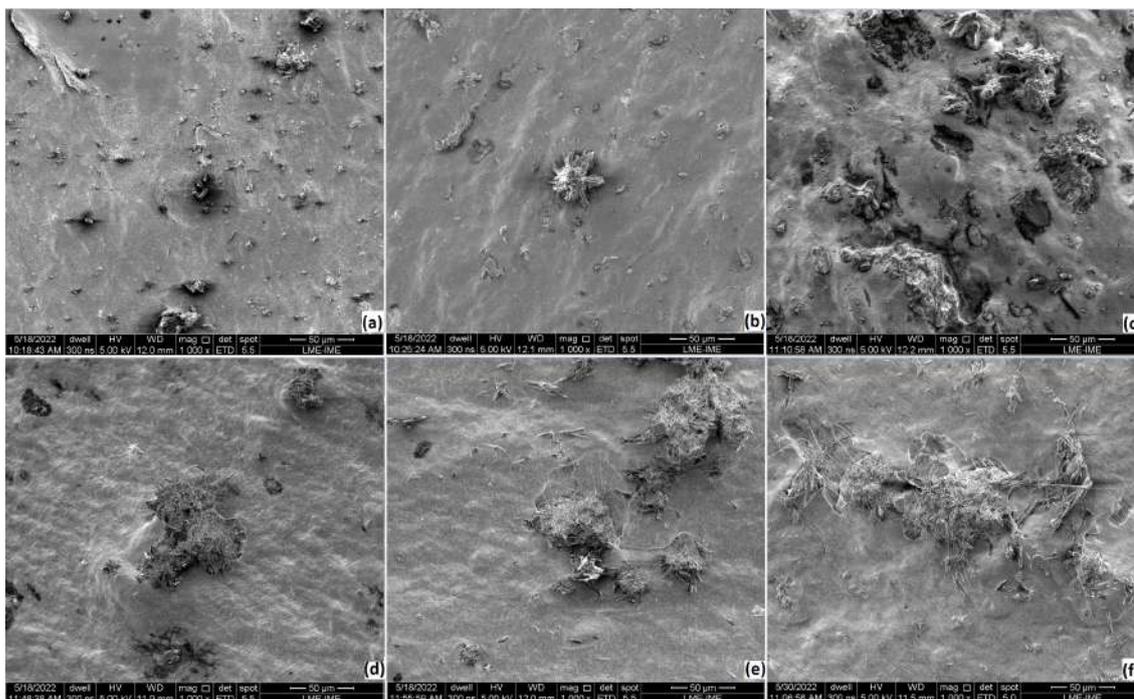


Figura 4.42 – Imagem de MEV com aumento de 1000x da superfície dos compósitos com diferentes concentrações de geopolímero 1,6 fabricados com anidrido maleico e Polybond: 1.6:10:87:03 (a); 1.6:20:77:03 (b); 1.6:30:67:03 (c); 1.6:10:87:03.POLY (d); 1.6:20:77:03.POLY (e); 1.6:30:67:03.POLY (f).

A análise de MEV contribuiu para o objetivo desse trabalho mostrando que o geopolímero 1,4 se mostra mais poroso que o 1,6 e que o anidrido maleico também proporciona maior porosidade aos compósitos quando comparado ao Polybnd. Diante disso e sabendo que a porosidade é uma das característica desejáveis de um bom isolante termoacústico de acordo com o item 2.6, os compósitos fabricados com geopolímero 1,4 e anidrido maleico são mais adequados para a pesquisa quando analisado apenas o fator porosidade.

4.6 ENSAIO DE DUREZA SHORE D

Os resultados do ensaio de dureza Shore D se encontram na Tabela 4.3, onde consta 5 medições de cada amostra, a média e o desvio padrão dos valores encontrados. Os resultados também foram colocados em um gráfico para facilitar a comparação entre os mesmos como mostra a Figura 4.43.

Tabela 4.3 – Resultados do ensaio de dureza Shore D.

RESULTADOS DO ENSAIO DE DUREZA								
AMOSTRAS		MED. 1	MED.2	MED.3	MED. 4	MED. 5	MÉDIA	D. PADRÃO
13	HDPE	56	56	55	53	48	55	3
14	1.4.20:80:00	61	60	59	59	57	60	1
15	1.4.10:87:03	58	58	58	59	59	58	1
16c	1.4.20:77:03 (120RPM)	60	60	63	57	60	60	2
17	1.4.30:67:03	52	60	55	55	50	56	4
18	1.6.10:87:03	60	60	62	62	61	61	1
19	1.6.20:77:03	60	60	58	61	58	60	1
20	1.6.30:67:03	63	62	61	62	61	62	1
21	E.20:77:03	62	62	58	55	50	59	5
22	1.4.10:87:03 POLY	62	61	61	61	60	61	1
23	1.4.20:77:03 POLY	61	61	60	60	58	61	1
24	1.4.30:67:03 POLY	63	62	63	60	59	62	2
25	1.6.10:87:03 POLY	60	60	58	59	58	59	1
26	1.6.20:77:03 POLY	61	60	59	58	57	60	2
27	1.6.30:67:03 POLY	60	57	54	56	53	57	3
28	E.20:77:03 POLY	65	64	62	61	60	63	2

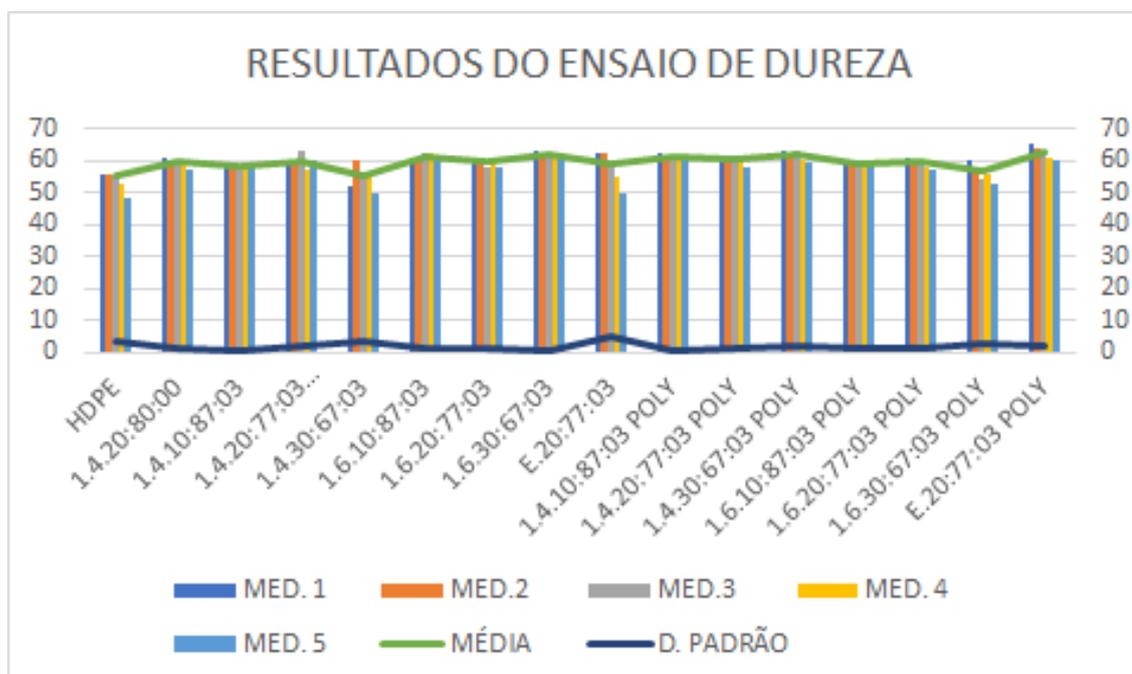


Figura 4.43 – Gráfico dos resultados do ensaio de dureza.

O menor valor absoluto de dureza foi observado na amostra de HDPE puro com valor igual a 55 e o compósito que apresentou o menor valor foi o 1.4.30:67:03 com um valor de 56 que é bem próximo do HDPE puro. As amostras com e sem o compatibilizante anidrido maleico e com mesma concentração de geopolímero (1.4.20:80:00 e 1.4.20:77:03) não apresentaram diferença nos valores de dureza. Já a amostra também com 20% de

geopolímero, porém fabricada com Polybond teve um aumento na sua dureza, o que sugere uma melhoria na interface entre a carga e a matriz (MACHADO et al., 2019). Todos os compósitos resultaram em dureza superior ao HDPE. Os compósitos fabricados com geopolímero 1,4 e anidrido maleico tiveram os valores de dureza superiores aos fabricados com Polybond se comparados com mesmas concentrações de carga, ao contrário do que acontece com os compósitos fabricados com geopolímero 1,6 e anidrido maleico que tiveram seus valores iguais ou inferiores ao de mesmas concentrações de carga fabricados com Polybond. Como visto no item 2.6 da revisão bibliográfica, materiais porosos contribuem para o isolamento térmico e acústico e a porosidade está inversamente proporcional a dureza do material. Diante disso, o compósito 1.4.30:67:03 apresenta o menor valor de dureza, o que o tornam os mais adequados para o objetivo do estudo.

Com o objetivo de verificar a ocorrência de diferença significativa entre os resultados do ensaio, foi aplicada análise de variância (ANOVA) nos resultados e os dados encontrados estão apresentados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Resultados ANOVA - Dureza.

CAUSA DE VARIAÇÃO	GL	SOMA DE QUADRADOS	QUADRADO MÉDIO	F CALCULADO	F CRÍTICO
Tratamentos	15,00	56247,80	3749,85	1840,42	1,83
Resíduo	64,00	130,40	2,04		
Total	79,00	56378,20			

De acordo com os valores obtidos pela análise de variância apresentados pela 4.4, rejeita-se a hipótese de equidade entre as médias com um nível de significância de 5%, pois $F_{\text{calculado}} = 1840,42$ é maior que $F_{\text{crítico}} = 1,83$. Conclui-se então que os valores de dureza entre as amostras possuem diferenças significativas.

Com o objetivo de identificar se existem outros compósitos adequados para o objetivo da pesquisa, ou seja, que possuem diferenças não significativas quando comparados ao compósito 1.4.30:67:03, foi aplicado o Teste de Tukey para comparação entre médias com nível de confiança de 95%. A diferença média significativa (d.m.s.) encontrada foi 3,22, os dados de comparação entre as médias dos tratamentos estão apresentados na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Comparação entre médias (d.m.s) - Dureza.

Amostras	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
13	0,0	5,6	4,8	6,4	0,8	7,4	5,8	8,2	3,8	7,4	6,4	7,8	5,4	5,4	2,4	8,8
14	5,6	0,0	0,8	0,8	4,8	1,8	0,2	2,6	1,8	1,8	0,8	2,2	0,2	0,2	3,2	3,2
15	4,8	0,8	0,0	1,6	4,0	2,6	1,0	3,4	1,0	2,6	1,6	3,0	0,6	0,6	2,4	4,0
16	6,4	0,8	1,6	0,0	5,6	1,0	0,6	1,8	2,6	1,0	0,0	1,4	1,0	1,0	4,0	2,4
17	0,8	4,8	4,0	5,6	0,0	6,6	5,0	7,4	3,0	6,6	5,6	7,0	4,6	4,6	1,6	8,0
18	7,4	1,8	2,6	1,0	6,6	0,0	1,6	0,8	3,6	0,0	1,0	0,4	2,0	2,0	5,0	1,4
19	5,8	0,2	1,0	0,6	5,0	1,6	0,0	2,4	2,0	1,6	0,6	2,0	0,4	0,4	3,4	3,0
20	8,2	2,6	3,4	1,8	7,4	0,8	2,4	0,0	4,4	0,8	1,8	0,4	2,8	2,8	5,8	0,6
21	3,8	1,8	1,0	2,6	3,0	3,6	2,0	4,4	0,0	3,6	2,6	4,0	1,6	1,6	1,4	5,0
22	7,4	1,8	2,6	1,0	6,6	0,0	1,6	0,8	3,6	0,0	1,0	0,4	2,0	2,0	5,0	1,4
23	6,4	0,8	1,6	0,0	5,6	1,0	0,6	1,8	2,6	1,0	0,0	1,4	1,0	1,0	4,0	2,4
24	7,8	2,2	3,0	1,4	7,0	0,4	2,0	0,4	4,0	0,4	1,4	0,0	2,4	2,4	5,4	1,0
25	5,4	0,2	0,6	1,0	4,6	2,0	0,4	2,8	1,6	2,0	1,0	2,4	0,0	0,0	3,0	3,4
26	5,4	0,2	0,6	1,0	4,6	2,0	0,4	2,8	1,6	2,0	1,0	2,4	0,0	0,0	3,0	3,4
27	2,4	3,2	2,4	4,0	1,6	5,0	3,4	5,8	1,4	5,0	4,0	5,4	3,0	3,0	0,0	6,4
28	8,8	3,2	4,0	2,4	8,0	1,4	3,0	0,6	5,0	1,4	2,4	1,0	3,4	3,4	6,4	0,0

Com base nos resultados têm-se que, com o nível de confiança de 95% que os compósitos 21 (E.20:77:03) e 27 (1.6.30:67:03.POLY) não apresentaram diferenças significativas entre os valores de dureza, pois a diferença entre as médias não foi superior ao d.m.s. Sendo assim, os compósitos 1.4.30:67:03, E.20:77:03 e 1.6.30:67:03.POLY são os mais adequados para a finalidade do trabalho quando analisado apenas os resultados do ensaio de dureza.

4.7 ENSAIO DE DENSIDADE

Com a realização do ensaio de densidade utilizando um picnômetro foi possível encontrar as densidades das amostras como mostra a Tabela 4.6:

Tabela 4.6 – Resultados do ensaio de densidade.

RESULTADOS ENSAIO DE DENSIDADE							
DADOS UTILIZADOS:		m1 (g)	m2 (g)	Vp (cm ³)	t	de (g/cm ³)	
		23,388	43,528	25,397	20 °C	0,793	
AMOSTRA		m3 (g)	m4 (g)	me (g)	Ve (cm ³)	Va (cm ³)	da (g/cm ³)
13	HDPE.00:100:00	0,551	43,672	19,733	24,884	0,513	1,074
14	1.4.20:80:00	0,540	43,782	19,854	25,037	0,361	1,497
15	1.4.10:87:03	0,549	43,762	19,825	25,000	0,397	1,382
16c	1.4.20:77:03 (120RPM)	0,604	43,905	19,913	25,111	0,286	2,110
17	1.4.30:67:03	0,648	43,990	19,954	25,163	0,235	2,763
18	1.6.10:87:03	0,553	43,823	19,882	25,072	0,325	1,700
19	1.6.20:77:03	0,501	43,848	19,959	25,169	0,228	2,195
20	1.6.30:67:03	0,640	43,903	19,875	25,063	0,334	1,915
21	E.20:77:03	0,526	43,867	19,953	25,161	0,236	2,231
22	1.4.10:87:03.POLY	0,577	43,715	19,750	24,905	0,492	1,173
23	1.4.20:77:03.POLY	0,593	43,768	19,787	24,952	0,445	1,332
24	1.4.30:67:03.POLY	0,668	43,909	19,853	25,035	0,362	1,846
25	1.6.10:87:03.POLY	0,557	43,819	19,874	25,062	0,335	1,661
26	1.6.20:77:03.POLY	0,598	43,874	19,888	25,079	0,318	1,882
27	1.6.30:67:03.POLY	0,613	43,953	19,952	25,160	0,237	2,586
28	E.20:77:03.POLY	0,579	43,922	19,955	25,164	0,233	2,482

A Figura 4.44 mostra um gráfico com os valores das densidades de cada amostra, facilitando a comparação entre os valores.

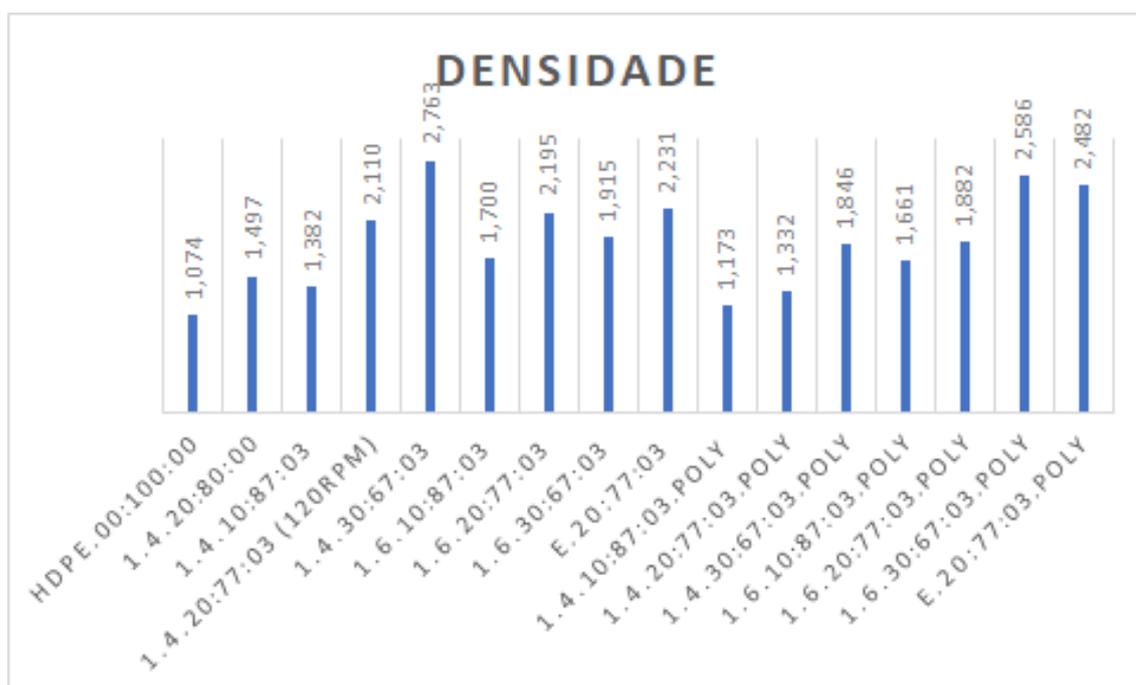


Figura 4.44 – Gráfico com valores de densidade de cada amostra em g/cm³.

Conforme citado no item 2.6, bons isolantes térmicos possuem alta porosidade

e baixas densidades e que a porosidade também é significativa no isolamento acústico, tendo maiores coeficientes de absorção acústica materiais mais porosos. Os compósitos que possuem as menores densidades são: 1.4.10:87:03.POLY com densidade igual a $1,17 \text{ g/cm}^3$, 1.4.20:77:03.POLY com densidade de $1,33 \text{ g/cm}^3$ e 1.4.10:87:03 com densidade de $1,38 \text{ g/cm}^3$. O maior valor de densidade é encontrado no compósito produzido com o maior teor de geopolímero 1,4 (30%) e com anidrido maleico, que é bem diferente do encontrado no compósito fabricado com Polybond. Quando são comparados os compósitos fabricados com mesma concentração de escória e diferentes compatibilizantes, o compósito com Polybond apresenta uma maior densidade.

A amostra extrusada de polímero puro teve seu valor da densidade um pouco acima do valor teórico ($0,965 \text{ g/cm}^3$) (ARAÚJO, 2019).

Quando se comparam as amostras com e sem os diferentes compatibilizantes com mesma concentração de carga (20% de carga comparando amostras 14, 16c e 23), observa-se que a amostra com anidrido maleico (16c) teve a maior densidade, sendo a amostra com Polybond e sem compatibilizante com densidades similares, pois a densidade do Polybond ($0,91 \text{ g/cm}^3$) é muito próxima ao do HDPE.

Ao comparar as amostras fabricadas com escória e com os geopolímeros 1,4 e 1,6 com mesmas concentrações de carga (20% sendo as amostras comparadas 16c, 19, 21, 26 e 28), as amostras fabricadas com escória possuem maiores densidades se comparadas as fabricadas com geopolímeros, o que já era esperado pela escória possuir maior densidade que os geopolímeros.

Quando são comparadas as amostras com 10% de carga (amostras 15, 18, 22 e 25) é possível observar que as amostras fabricadas com geopolímero 1,4 possuem menor densidade, o que conseqüentemente leva a uma maior porosidade, como foi confirmado pela análise de MEV. Já as amostras com 30% de carga (amostras 17, 20, 24 e 27), apresentam maiores densidades de uma forma geral se comparadas as demais concentrações.

Conforme o item 2.6, uma menor densidade leva a uma maior porosidade que é uma das características buscadas nesse trabalho para um bom isolamento térmico e acústico. Desta forma, considerando somente o fator densidade, os compósitos que terão os melhores resultados para o objetivo da pesquisa são: 1.4.10:87:03.POLY, 1.4.20:77:03.POLY e 1.4.10:87:03.

4.8 ENSAIO MECÂNICO DE TRAÇÃO

Os resultados das propriedades como tensão de escoamento, alongamento na ruptura e o módulo de elasticidade obtidas no ensaio de tração se encontram no apêndice A. As médias desses resultados são apresentadas na Tabela 4.7 para análise e os módulos de

elasticidade podem ser comparados através da Figura refme.

Tabela 4.7 – Média dos resultados obtidos no ensaio de tração.

PROPRIEDADES DO ENSAIO DE TRAÇÃO				
	AMOSTRA	TENSÃO DE ESCOAMENTO (MPa)	ALONGAMENTO NA RUPTURA (mm/mm)	MÓDULO DE ELASTICIDADE (MPa)
13	HDPE.00:00:00	5,61	14,93	0,50
14	1.4.20:80:00	9,49	20,65	0,37
15	1.4.10:87:03	9,63	37,68	0,39
16c	1.4.20:77:03 (120RPM)	4,67	8,44	0,41
17	1.4.30:67:03	9,44	8,80	0,39
18	1.6.10:87:03	10,74	23,97	0,40
19	1.6.20:77:03	8,59	5,32	0,31
20	1.6.30:67:03	9,33	7,65	0,36
21	E.20:77:03	6,08	12,73	0,60
22	1.4.10:87:03.POLY	6,17	12,56	0,51
23	1.4.20:77:03.POLY	11,23	16,25	0,40
24	1.4.30:67:03.POLY	10,18	3,78	0,37
25	1.6.10:87:03.POLY	10,10	49,92	0,47
26	1.6.20:77:03.POLY	8,98	27,97	0,40
27	1.6.30:67:03.POLY	11,97	4,81	0,46
28	E.20:77:03.POLY	9,13	21,35	0,34

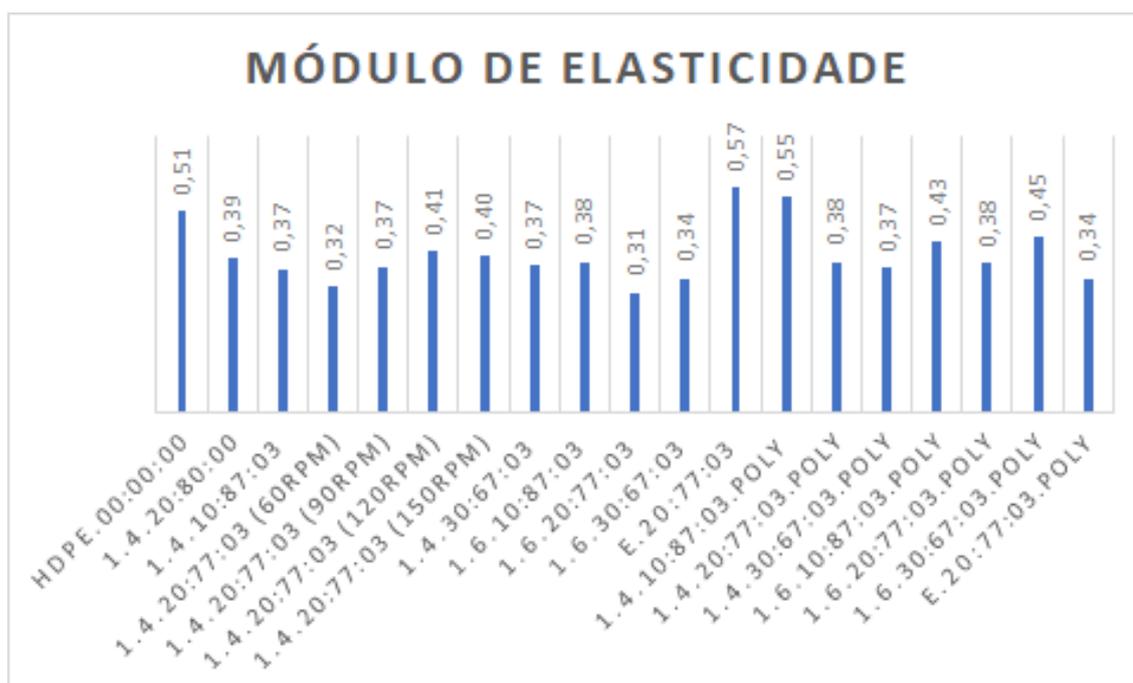


Figura 4.45 – Gráfico com valores dos módulos de elasticidade de cada amostra em Mpa.

Conforme descrito no item 2.6, materiais com bom isolamento térmico e acústico são materiais porosos e quanto maior a porosidade, menor é o módulo de elasticidade. Dessa forma, analisando a Tabela 4.7, o compósito 1.6.20:77:03 é o que apresenta o menor módulo de elasticidade, se tornando o mais indicado para utilização como isolante térmico e acústico, se for considerado somente este fator. Observa-se que com o aumento da concentração de carga no compósito há uma tendência na diminuição do módulo de elasticidade, que pode ser devido ao aumento do volume dos poros dentro da estrutura (BADACHE et al., 2018). Isso também explica o menor módulo de elasticidade dos compósitos com geopolímero (16c e 19) quando comparado ao fabricado com escória (21), indicando uma maior porosidade e menor densidade do geopolímero, como confirmado no ensaio de densidade.

A utilização do Polybond melhorou a adesão entre a carga e a matriz, melhorando as propriedades e apresentando módulos de elasticidade maiores do que nos compósitos fabricados com anidrido maleico (GONÇALVES et al., 2013).

Na busca de verificar a ocorrência de diferença significativa entre os resultados do ensaio, foi aplicada análise de variância (ANOVA) nos resultados e os dados encontrados estão apresentados na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 – Resultados ANOVA - Tração.

CAUSA DE VARIÇÃO	GL	SOMA DE QUADRADOS	QUADRADO MÉDIO	F CALCULADO	F CRÍTICO
Tratamentos	15,00	2,93	0,20	183,81	1,83
Resíduo	64,00	0,07	0,00		
Total	79,00	3,00			

De acordo com os valores obtidos pela análise de variância apresentados pela 4.4, rejeita-se a hipótese de equidade entre as médias com um nível de significância de 5%, pois F calculado = 183,81 é maior que F crítico = 1,83. Conclui-se então que os valores dos módulos de elasticidade entre as amostras possuem diferenças significativas.

Com o objetivo de identificar se existem outros compósitos adequados para o objetivo da pesquisa, ou seja, que possuem diferenças não significativas quando comparados ao compósito 1.6.20:77:03, foi aplicado o Teste de Tukey para comparação entre médias com nível de confiança de 95%. A diferença média significativa (d.m.s.) encontrada foi 0,074, os dados de comparação entre as médias dos tratamentos estão apresentados na Tabela 4.9.

Tabela 4.9 – Comparação entre médias (d.m.s) - Tração.

Amostras	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
13	0,00	0,13	0,11	0,11	0,12	0,10	0,19	0,14	0,10	0,01	0,10	0,13	0,03	0,10	0,04	0,17
14	0,13	0,00	0,02	0,02	0,01	0,03	0,06	0,02	0,23	0,13	0,03	0,00	0,09	0,03	0,08	0,04
15	0,11	0,02	0,00	0,00	0,01	0,01	0,08	0,03	0,21	0,12	0,01	0,02	0,08	0,01	0,07	0,06
16	0,11	0,02	0,00	0,00	0,01	0,01	0,08	0,03	0,21	0,12	0,01	0,02	0,08	0,01	0,07	0,06
17	0,12	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,07	0,03	0,22	0,12	0,01	0,02	0,08	0,01	0,07	0,05
18	0,10	0,03	0,01	0,01	0,01	0,00	0,09	0,04	0,20	0,11	0,00	0,03	0,07	0,00	0,06	0,06
19	0,19	0,06	0,08	0,08	0,07	0,09	0,00	0,05	0,29	0,20	0,09	0,06	0,16	0,09	0,15	0,02
20	0,14	0,02	0,03	0,03	0,03	0,04	0,05	0,00	0,24	0,15	0,04	0,01	0,11	0,04	0,10	0,02
21	0,10	0,23	0,21	0,21	0,22	0,20	0,29	0,24	0,00	0,09	0,20	0,23	0,13	0,20	0,14	0,27
22	0,01	0,13	0,12	0,12	0,12	0,11	0,20	0,15	0,09	0,00	0,11	0,14	0,04	0,11	0,05	0,17
23	0,10	0,03	0,01	0,01	0,01	0,00	0,09	0,04	0,20	0,11	0,00	0,03	0,07	0,00	0,06	0,06
24	0,13	0,00	0,02	0,02	0,02	0,03	0,06	0,01	0,23	0,14	0,03	0,00	0,10	0,03	0,09	0,03
25	0,03	0,09	0,08	0,08	0,08	0,07	0,16	0,11	0,13	0,04	0,07	0,10	0,00	0,07	0,01	0,13
26	0,10	0,03	0,01	0,01	0,01	0,00	0,09	0,04	0,20	0,11	0,00	0,03	0,07	0,00	0,06	0,06
27	0,04	0,08	0,07	0,07	0,07	0,06	0,15	0,10	0,14	0,05	0,06	0,09	0,01	0,06	0,00	0,12
28	0,17	0,04	0,06	0,06	0,05	0,06	0,02	0,27	0,17	0,06	0,03	0,13	0,06	0,12	0,00	

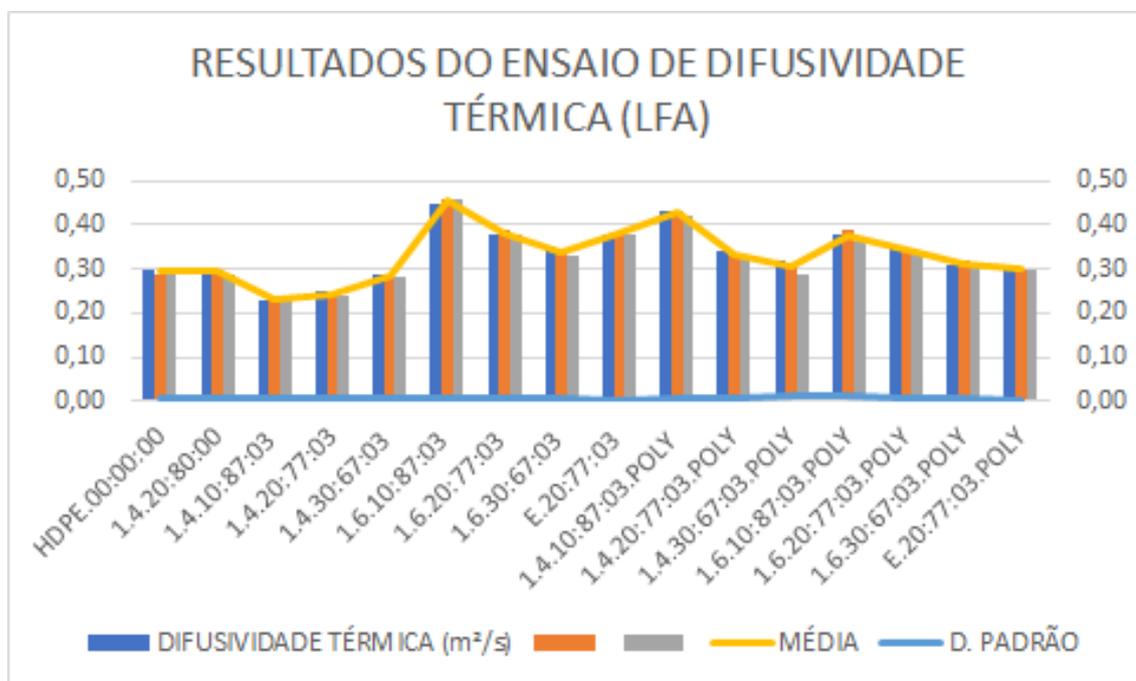
Com base nos resultados têm-se que, com o nível de confiança de 95% que os compósitos 14 (1.4.20:80:00), 20 (1.6.30:67:03), 24 (1.4.30:67:03.POLY) e 28 (E.20:77:03.POLY) não apresentaram diferenças significativas entre os valores dos módulos de elasticidade quando comparados ao compósito 19 (1.6.20:77:03), pois a diferença entre as médias não foi superior ao d.m.s. Diante disso, os compósitos 1.6.20:77:03, 1.4.20:80:00, 1.6.30:67:03, 1.4.30:67:03.POLY e E.20:77:03.POLY são os mais adequados para a finalidade do trabalho quando analisado apenas os resultados do ensaio de tração.

4.9 ANÁLISE DE DIFUSIVIDADE TÉRMICA (LFA)

Na análise de difusividade térmica foram feitas 3 medições da difusividade de cada amostra. Os valores da difusividade, assim como a média aritmética desses valores e o desvio padrão constam na Figura 4.46. Os resultados também foram colocados em um gráfico para auxiliar a comparação entre os resultados como mostra a Figura 4.47.

RESULTADOS DO ENSAIO DE DIFUSIVIDADE TÉRMICA (LFA)						
n	AMOSTRA	DIFUSIVIDADE TÉRMICA (m ² /s)			MÉDIA	D. PADRÃO
		MEDIÇÃO 1	MEDIÇÃO 2	MEDIÇÃO 3		
13	HDPE.00:00:00	0,30	0,29	0,29	0,29	0,01
14	1.4.20:80:00	0,30	0,30	0,29	0,30	0,01
15	1.4.10:87:03	0,23	0,23	0,24	0,23	0,01
16c	1.4.20:77:03	0,25	0,24	0,24	0,24	0,01
17	1.4.30:67:03	0,29	0,28	0,28	0,28	0,01
18	1.6.10:87:03	0,45	0,46	0,46	0,46	0,01
19	1.6.20:77:03	0,38	0,39	0,38	0,38	0,01
20	1.6.30:67:03	0,35	0,34	0,33	0,34	0,01
21	E.20:77:03	0,38	0,38	0,38	0,38	0,00
22	1.4.10:87:03.POLY	0,43	0,43	0,42	0,43	0,01
23	1.4.20:77:03.POLY	0,34	0,33	0,33	0,33	0,01
24	1.4.30:67:03.POLY	0,32	0,31	0,29	0,31	0,02
25	1.6.10:87:03.POLY	0,38	0,39	0,36	0,38	0,02
26	1.6.20:77:03.POLY	0,35	0,34	0,34	0,34	0,01
27	1.6.30:67:03.POLY	0,31	0,32	0,31	0,31	0,01
28	E.20:77:03.POLY	0,30	0,30	0,30	0,30	0,00

Figura 4.46 – Resultados do ensaio de Difusividade Térmica (LFA).

Figura 4.47 – Gráfico dos resultados do ensaio de Difusividade Térmica (LFA) em m²/s.

A difusividade térmica é uma propriedade do material que denota a razão entre a capacidade de transferência de energia no material pela sua capacidade de armazenamento. Bons isolantes térmicos possuem um valor característico baixo de difusividade

térmica (MENDES et al., 2012). Dessa forma, observa-se que a amostra 1.4.10:87:03 foi a que apresentou a menor média dos valores obtidos de difusividade no ensaio, $0,23 \text{ m}^2/\text{s}$, sendo a amostra mais adequadas para isolamento térmico. Vale chamar a atenção para a amostra 1.6.10:87:03, fabricada com as mesmas concentrações e compatibilizante da amostra considerada a mais adequada, porém fabricada com geopolímero 1,6 em vez do 1,4, o que sugere que o geopolímero 1,4 proporciona um melhor isolamento se comparado ao 1,6. Essa amostra com geopolímero 1,6 teve a maior média com valor de $0,46 \text{ m}^2/\text{s}$, o que a torna a menos adequada para utilização em isolamento térmico.

Quando se analisa os compósitos 1.4.20:80:00 (sem compatibilizante), 1.4.20:77:03 (com anidrido maleico) e 1.4.20:77:03.POLY (com Polybond), com as médias da difusividade $0,30 \text{ m}^2/\text{s}$, $0,24 \text{ m}^2/\text{s}$ e $0,33 \text{ m}^2/\text{s}$, respectivamente, se observa que a utilização do anidrido maleico diminuiu a difusividade, melhorando a capacidade de isolamento térmico, enquanto o Polybond teve efeito contrário, piorando. Isso aconteceu com a maioria dos compósitos quando comparados com mesma concentrações, diferenciando apenas o compatibilizante. Esse efeito não pode ser observado nos compósitos fabricados com escória no lugar do geopolímero, E.20:77:03 e E.20:77:03.POLY, que tiveram médias de $0,38 \text{ m}^2/\text{s}$ e $0,30 \text{ m}^2/\text{s}$, respectivamente, tendo assim o compósito com Polybond uma melhor capacidade de isolante, porém não superior ao compósito fabricado com geopolímero 1,4 e anidrido maleico (1.4.10:87:03), que foi considerado nessa análise a amostra mais adequada.

A análise de variância (ANOVA) foi aplicada nos resultados na busca de verificar se existe diferença significativa entre os resultados do ensaio. Os dados encontrados estão apresentados na Tabela 4.10.

Tabela 4.10 – Resultados ANOVA - LFA.

CAUSA DE VARIÇÃO	GL	SOMA DE QUADRADOS	QUADRADO MÉDIO	F CALCULADO	F CRÍTICO
Tratamentos	15,00	0,76	0,05	4878,39	2,00
Resíduo	32,00	0,00	0,00		
Total	47,00	0,76			

De acordo com os valores obtidos pela análise de variância apresentados pela 4.4, rejeita-se a hipótese de equidade entre as médias com um nível de significância de 5%, pois $F_{\text{calculado}} = 4878,39$ é maior que $F_{\text{crítico}} = 2,00$. Conclui-se então que os resultados de difusividade térmica possuem diferenças significativas.

Com o objetivo de identificar se existem outros compósitos adequados para o objetivo da pesquisa, ou seja, que possuem diferenças não significativas quando comparados ao compósito 1.4.10:87:03 (amostra 15), foi aplicado o Teste de Tukey para comparação entre médias com nível de confiança de 95%. A diferença média significativa (d.m.s.)

encontrada foi 0,01, os dados de comparação entre as médias dos tratamentos estão apresentados na Tabela 4.11.

Tabela 4.11 – Comparação entre médias (d.m.s) - LFA.

Amostras	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
13	0,00	0,00	0,06	0,05	0,01	0,16	0,09	0,05	0,09	0,13	0,04	0,01	0,08	0,05	0,02	0,01
14	0,00	0,00	0,06	0,05	0,01	0,16	0,09	0,04	0,08	0,13	0,04	0,01	0,08	0,05	0,02	0,00
15	0,06	0,06	0,00	0,01	0,05	0,22	0,15	0,11	0,15	0,19	0,10	0,07	0,14	0,11	0,08	0,07
16	0,05	0,05	0,01	0,00	0,04	0,21	0,14	0,10	0,14	0,18	0,09	0,06	0,13	0,10	0,07	0,06
17	0,01	0,01	0,05	0,04	0,00	0,17	0,10	0,06	0,10	0,14	0,05	0,02	0,09	0,06	0,03	0,02
18	0,16	0,16	0,22	0,21	0,17	0,00	0,07	0,12	0,08	0,03	0,12	0,15	0,08	0,11	0,14	0,16
19	0,09	0,09	0,15	0,14	0,10	0,07	0,00	0,04	0,00	0,04	0,05	0,08	0,01	0,04	0,07	0,08
20	0,05	0,04	0,11	0,10	0,06	0,12	0,04	0,00	0,04	0,09	0,01	0,03	0,04	0,00	0,03	0,04
21	0,09	0,08	0,15	0,14	0,10	0,08	0,00	0,04	0,00	0,05	0,05	0,07	0,00	0,04	0,07	0,08
22	0,13	0,13	0,19	0,18	0,14	0,03	0,04	0,09	0,05	0,00	0,09	0,12	0,05	0,08	0,11	0,13
23	0,04	0,04	0,10	0,09	0,05	0,12	0,05	0,01	0,05	0,09	0,00	0,03	0,04	0,01	0,02	0,03
24	0,01	0,01	0,07	0,06	0,02	0,15	0,08	0,03	0,07	0,12	0,03	0,00	0,07	0,04	0,01	0,01
25	0,08	0,08	0,14	0,13	0,09	0,08	0,01	0,04	0,00	0,05	0,04	0,07	0,00	0,03	0,06	0,08
26	0,05	0,05	0,11	0,10	0,06	0,11	0,04	0,00	0,04	0,08	0,01	0,04	0,03	0,00	0,03	0,04
27	0,02	0,02	0,08	0,07	0,03	0,14	0,07	0,03	0,07	0,11	0,02	0,01	0,06	0,03	0,00	0,01
28	0,01	0,00	0,07	0,06	0,02	0,16	0,08	0,04	0,08	0,13	0,03	0,01	0,08	0,04	0,01	0,00

Com base nos resultados têm-se que, com o nível de confiança de 95% que apenas o compósito 1.4.20:77:03 (amostra 16c) não apresenta diferenças significativas quando comparado ao compósito 1.4.10:87:03 (amostra 15), pois a diferença entre as médias não foi superior ao d.m.s. Diante disso, os compósitos 1.4.10:87:03 e 1.4.20:77:03 são os mais adequados para a finalidade do trabalho, quando se analisa apenas o ensaio de difusividade térmica.

4.10 COEFICIENTE DE ABSORÇÃO ACÚSTICA (CAA)

Com os valores das medições realizadas através da análise para adquirir o coeficiente de absorção acústica (CAA), que se encontram no apêndice B, foi possível traçar os gráficos para analisar os resultados.

A Figura 4.48 apresenta os coeficientes de absorção acústica do HDPE. Verifica-se que entre 100 Hz e 315 Hz o coeficiente de absorção aumentou de 0,17 para 0,26, onde teve seu maior valor. Logo depois ocorre uma queda no valor do coeficiente até 0,20 na frequência de 500 Hz e se manteve variando levemente entre 0,18 e 0,22 até 3150 Hz. Verifica-se que o HDPE teve melhor capacidade de absorção acústica nas frequências entre 200 e 400 Hz.



Figura 4.48 – Coeficientes de Absorção Acústica do HDPE.

A Figura 4.49 apresenta os coeficientes de absorção acústica do HDPE e dos compósitos E.20:77:03 e E.20:77:03.POLY, fabricados com mesma concentração de escória e polímero, porém com diferente compatibilizantes. O compósito com anidrido maleico (E.20:77:03) manteve o CAA em 0,26 na frequência de 315 Hz como apresentou também o HDPE. Já o compósito com Polybond teve um menor coeficiente de 0,21 nessa mesma frequência. Os compósitos apresentaram mesmos coeficientes apenas nas frequências de 125 Hz (CAA=0,17) e 800 Hz (CAA=0,17). A partir da frequência de 1600 Hz, as curvas referentes aos compósitos começam a ter comportamento completamente opostos. A melhor capacidade de absorção acústica do compósito E.20:77:03 é na frequência 3150 Hz (CAA=0,27) e do E.20:77:03.POLY em 2000 Hz (CAA=0,26). Até a frequência de 630 Hz o compósito com anidrido maleico teve os CAA muito próximo ao do HDPE, enquanto o com Polybond teve valores inferiores. Entre a frequência 630 Hz até próximo a 1500 Hz, ambos os compósitos tiveram CAA inferiores aos do HDPE. Na faixa de 1550 a 2000 Hz apenas o compósito com Polybond tem seus valores de CAA superiores aos do HDPE e a partir de 2000 Hz o compósito com anidrido maleico também tem valores de CAA superiores aos do HDPE. Entre 3000 e 3500, a curva do compósito com anidrido maleico ultrapassa a do Polybond, tendo assim valores de CAA superiores.

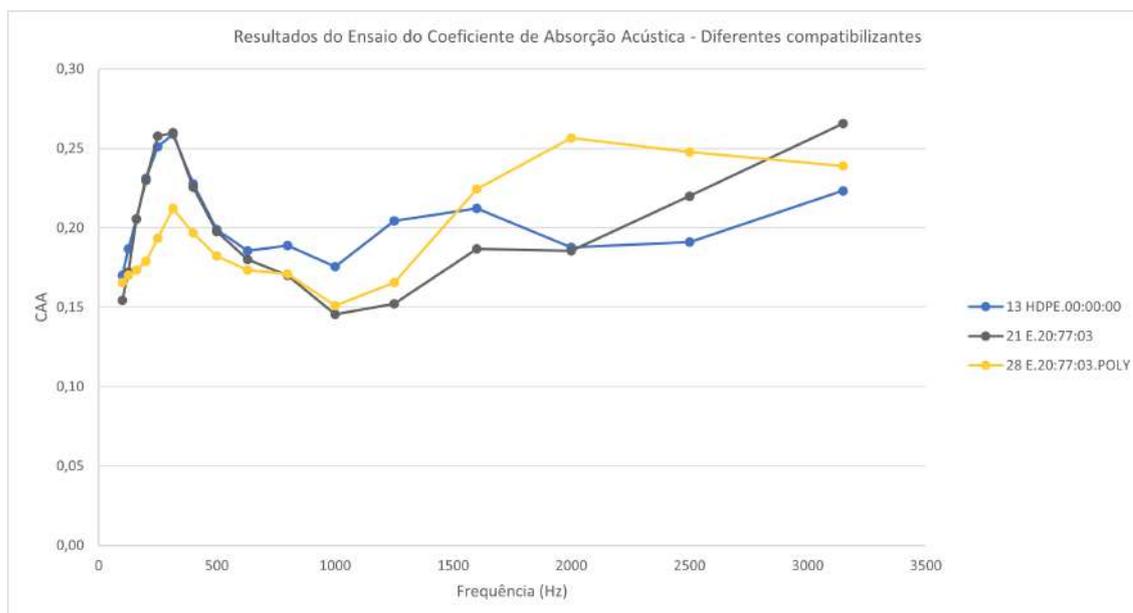


Figura 4.49 – Coeficientes de Absorção Acústica do HDPE e dos compósitos E.20:77:03 e E.20:77:03.POLY.

A Figura 4.50 apresenta os coeficientes de absorção acústica dos compósitos com geopolímero 1,4 com e sem anidrido maleico. A curva do compósito sem anidrido maleico (1.4.20:80:00) teve um comportamento similar aos demais compósitos fabricados com o compatibilizante, com exceção do compósito com teor de 20% de geopolímero 1,4 (1.4.20:77:03), que teve em quase todas as frequências o CAA superior ao HDPE e aos demais compósitos. Esse compósito teve uma melhor absorção acústica na frequência de 315 Hz onde o CAA chegou a 0,38. Já o compósito com 30% de geopolímero 1,4 (1.4.30:77:03) teve em quase todas as frequências o CAA inferior ao dos demais compósitos comparados, com exceção do compósito 10% de geopolímero 1,4 que teve o pior resultado em baixas frequências nessa Figura. Possivelmente, a composição de 20% de geopolímero 1,4 e anidrido maleico teve uma boa compatibilização e o geopolímero faz uma barreira acústica.

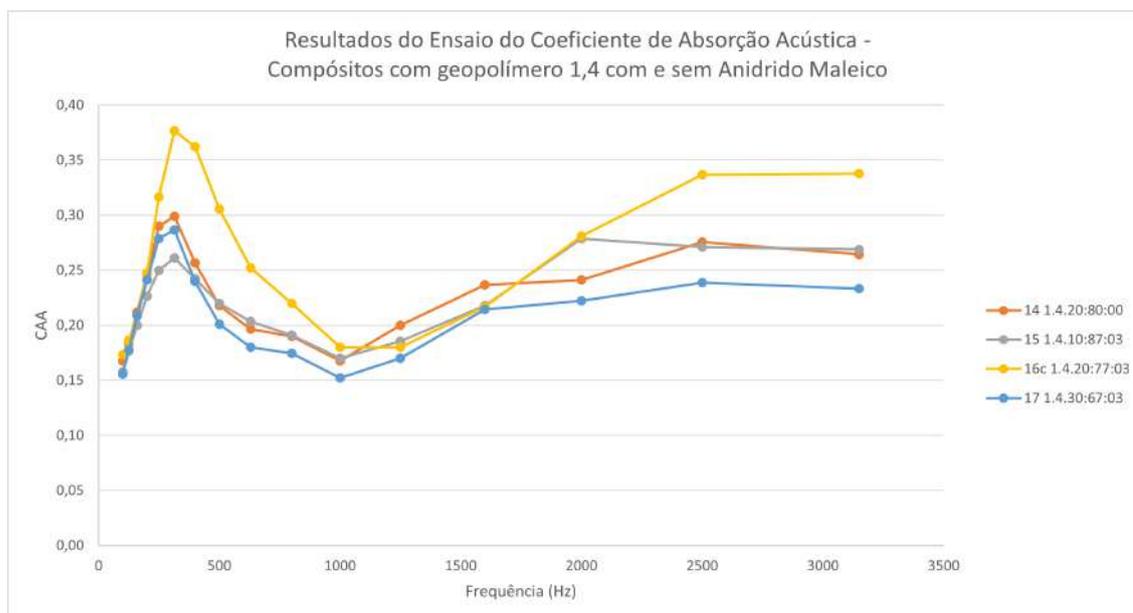


Figura 4.50 – Coeficientes de Absorção Acústica dos compósitos com geopolímero 1,4 com e sem anidrido maleico.

A Figura 4.51 apresenta os coeficientes de absorção acústica dos compósitos com geopolímero 1,6 com anidrido maleico. Diferente do que aconteceu com os compósitos fabricados com geopolímero 1,4 e anidrido maleico, o compósito com maior concentração de geopolímero 1,6 (1.6.30:67:03) teve a melhor absorção acústica em praticamente todas as frequências, com exceção apenas da frequência de 3150 Hz, onde apresentou um CAA de 0,25 enquanto o compósito 1.6.10:87:03 teve um CAA de 0,26. Na frequência de 315 Hz é onde se encontra o maior CAA do compósito 1.6.30:67:03 no valor de 0,30. As curvas dos compósitos 1.6.10:87:03 e 1.6.20:77:03 tiveram comportamentos bem próximos, só a partir da frequência 1600 Hz que o compósito 1.6.10:87:03 começou apresentar uma considerável melhor absorção acústica.

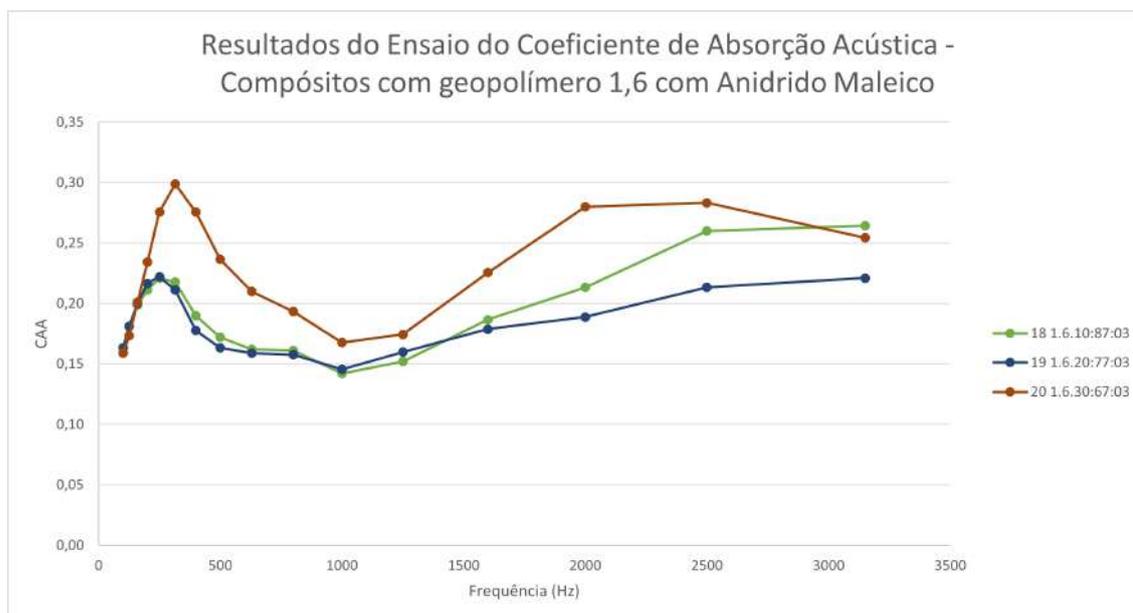


Figura 4.51 – Coeficientes de Absorção Acústica dos compósitos com geopolímero 1,6 com anidrido maleico.

A Figura 4.52 apresenta os coeficientes de absorção acústica dos compósitos com geopolímero 1,4 com Polybond. O compósito com menor concentração de geopolímero 1,4 (1.4.10:87:03.POLY) teve a melhor absorção acústica em todas as frequências, tendo os maiores valores de CAA entre as frequências 100 e 315 Hz, sendo o maior CAA igual a 0,34 em 125 Hz e 160 Hz. Esse compósito também superou os valores de CAA do compósito com mesma concentração de geopolímero, porém com anidrido maleico. As curvas dos compósitos 1.4.20:77:03.POLY e 1.6.30:67:03.POLY tiveram comportamentos parecidos, embora a do compósito 1.6.30:67:03.POLY permaneceu em quase todas as frequências superior ao compósito 1.4.20:77:03.POLY. A partir da frequência 2500 Hz esses compósitos começaram a ter comportamentos opostos, onde o compósito 1.4.20:77:03.POLY permaneceu aumentando seu CAA com o aumento da frequência enquanto o compósito 1.6.30:67:03.POLY diminuindo.

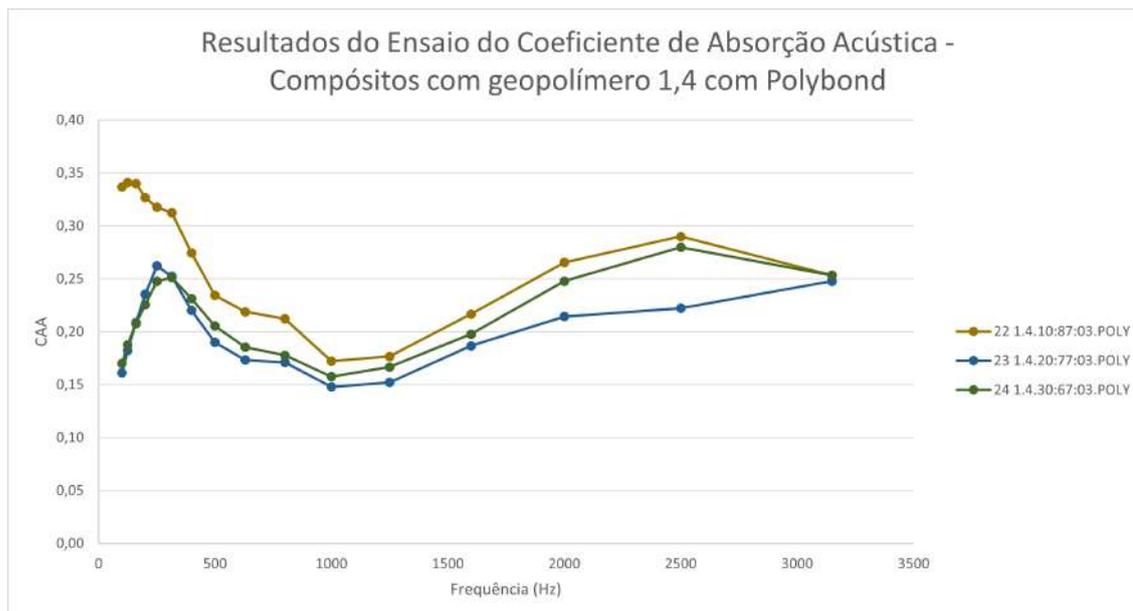


Figura 4.52 – Coeficientes de Absorção Acústica dos compósitos com geopolímero 1,4 com Polybond.

A Figura 4.53 apresenta os coeficientes de absorção acústica dos compósitos com geopolímero 1,6 com Polybond. O compósito com menor concentração de geopolímero 1,6 (1.6.10:87:03.POLY) teve a melhor absorção acústica em quase todas as frequências, exceto entre as frequências de 100 a 250 Hz, onde o compósito 1.6.20:87:03.POLY teve seus valores de CAA superiores. O maior valor do CAA atingido foi de 0,33 nas frequências de 400 Hz e 2000 Hz do compósito 1.6.10:87:03.POLY. O compósito 1.6.30:87:03.POLY permaneceu por quase todas as frequências com a pior capacidade de absorção acústica, porém, na última frequência analisada (3150 Hz) ele atingiu um CAA = 0,25 que foi superior aos demais.

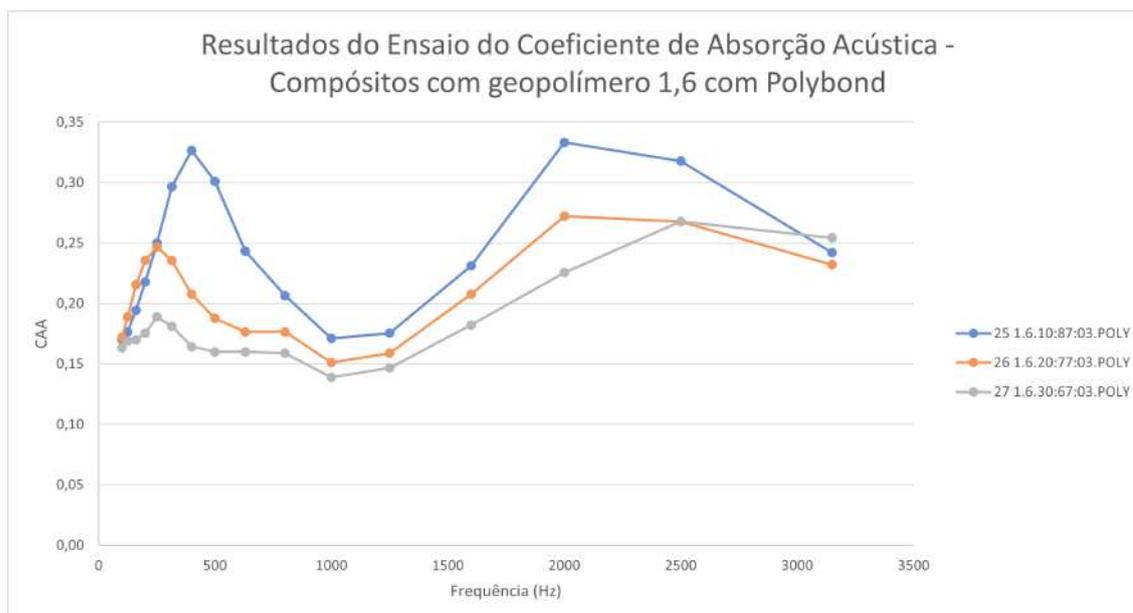


Figura 4.53 – Coeficientes de Absorção Acústica dos compostos com geopolímero 1,6 com Polybond.

Observando a Figura 4.54 é possível ter uma visão geral do comportamento de todas as amostras em relação ao coeficiente de absorção acústica. O composto fabricado com 20% de geopolímero 1,4 e com anidrido maleico (1.4.20:77:03) foi o que apresentou a melhor capacidade de absorção acústica, tendo um CAA de 0,38 em 315 Hz, uma pequena queda para 0,36 em 400 Hz e se manteve com CAA superior aos demais nos intervalos de frequência de 250-1000 Hz e 2500-3150 Hz. Todas as amostras começaram com CAA menores na frequência de 100 Hz e tiveram seus maiores valores de CAA nas frequências de 315 Hz e 2500 Hz, com exceção do composto 1.4.10:87:03.POLY, que teve sua curva com comportamento diferente das demais, começando com seus maiores valores de CAA em baixas frequências. Vale chamar atenção também para o composto 1.6.10:87:03.POLY, onde o comportamento da curva se diferenciou das demais e sua capacidade de absorção acústica foi uma das melhores, ultrapassando até o valor do CAA do composto 1.4.20:77:03 (CAA = 0,28) na frequência de 2000 Hz cujo valor foi de 0,33. Um fator comum de todas as amostras testadas é ter baixos CAA em frequências próximas a 1000 Hz.

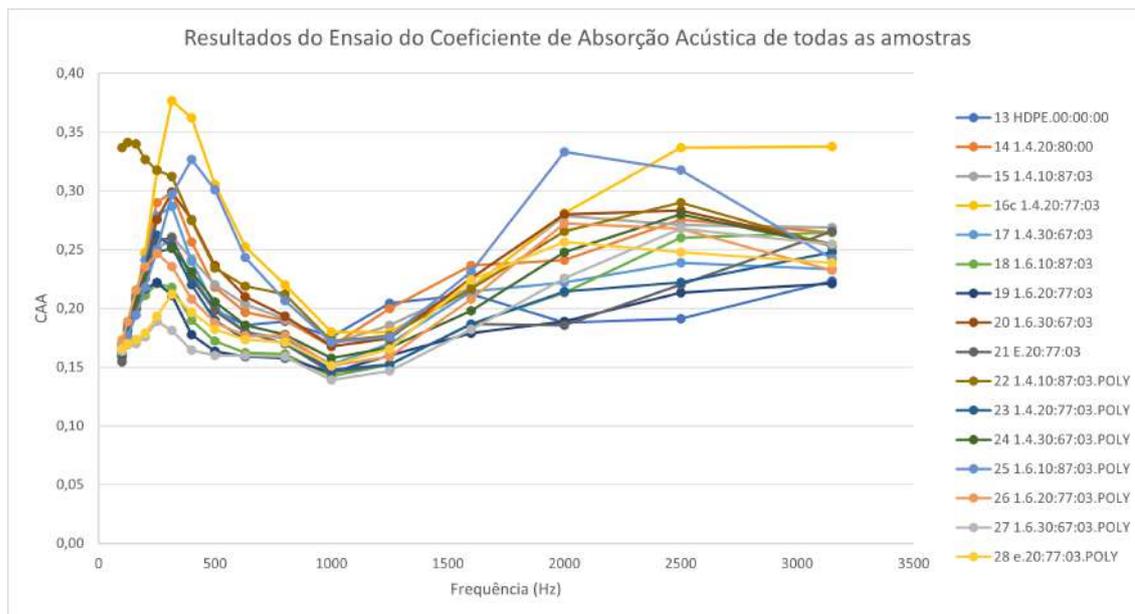


Figura 4.54 – Coeficientes de Absorção Acústica de todas as amostras.

Conforme visto na revisão bibliográfica no item 2.6.1, os ruídos podem ser gerados por diferentes partes dos distintos modelos de aeronaves. Sendo assim, analisando os resultados dos compósitos na Figura 4.54 juntamente com as informações do item 2.6.1, a Tabela 4.12 mostra qual amostra é mais apropriada na busca de isolamento acústico em cada caso.

Tabela 4.12 – Análise das amostras para isolamento acústico.

ANÁLISE DAS AMOSTRAS PARA ISOLAMENTO ACÚSTICO			
CASO	FINALIDADE DO ISOLAMENTO	FAIXA DE FREQUÊNCIA (Hz)	AMOSTRA
1	Excitação do fluxo e a vibração interna dos painéis	800 a 2000	1.6.10:87:03.POLY
2	Motores turboélice	60 a 400	1.4.10:87:03.POLY
3	Motores montados na cauda (aeronaves a jato)	100 a 500	1.4.10:87:03.POLY
4	Ruído do vento	Acima de 400	1.4.20:77:03
5	Excitação mais forte num avião bimotor turboélice	100 a 500	1.4.10:87:03.POLY
6	Espectro de ruído interno de banda estreita de um jato executivo	Até 800	1.4.20:77:03
7	Banda de ruído em aviões a jato comerciais de médio porte com até 140 passageiros	1000 a 1200	HDPE.00:00:00
8	De uma forma geral em uma faixa de frequência conservadora	800 a 1800	1.6.10:87:03.POLY

Para o caso 1, o compósito 1.6.10:87:03.POLY é o mais adequado por ter em quase todas as frequências da faixa analisada um CAA superior aos demais compósitos. O compósito 1.4.10:87:03.POLY é o único que tem altos valores de CAA superiores a 0,32 até a frequência de 250 Hz. Com isso, nos casos 2, 3 e 5 ele se torna mais adequado pela análise ser em baixas frequências. Mesmo o compósito 1.4.20:77:03 tendo valores de CAA superiores entre 250 e 500 Hz, o compósito 1.4.10:87:03.POLY se torna mais adequado por

não apresentar nenhum valor inferior a 0,27 dentro das faixas analisadas. O compósito 1.4.20:77:03 tem a maioria dos valores de CAA superiores aos demais compósitos em frequências acima de 400 Hz, o que o torna o mais adequado para o caso 4. Esse compósito também se torna apropriado no caso 6, onde os valores de CAA também superam aos demais na maiorias das frequências analisadas. Na pequena faixa de frequência analisada no caso 7, o HDPE puro se mostrou um bom isolante se comparado as demais amostras. De uma forma geral analisando uma faixa de frequência conservadora, o compósito 1.6.10:87:03.POLY se mostra o mais adequado.

Uma ótima forma de transmitir a capacidade de absorção sonora de um material é através do cálculo do Noise Reduction Coefficient (NRC), que é calculado de acordo com a norma ASTM C423 como na Equação 4.3(ATEF et al., 2022):

$$NRC = \left(\frac{\alpha_{250} + \alpha_{500} + \alpha_{1000} + \alpha_{2000}}{4} \right) \quad (4.1)$$

onde,

$\alpha =$ é a média aritmética dos valores encontrados dos coeficientes de absorção acústica em uma determinada frequência.

A Tabela 4.13 apresenta os cálculos dos valores do NRC e com a Figura 4.13 é possível compará-los. O compósito 1.4.20:77:03 (amostra 16c) apresentou o maior valor de NRC, 0,27, o que reflete uma maior capacidade de redução de ruído.

Tabela 4.13 – Cálculo do NRC.

CÁLCULO DO NRC						
AMOSTRA		MÉDIA CAA NA FREQUÊNCIA				NRC
		250,00	500,00	1000,00	2000,00	
13	HDPE.00:00:00	0,25	0,20	0,18	0,19	0,20
14	1.4.20:80:00	0,29	0,22	0,17	0,24	0,23
15	1.4.10:87:03	0,25	0,22	0,17	0,28	0,23
16c	1.4.20:77:03 (120RPM)	0,32	0,31	0,18	0,28	0,27
17	1.4.30:67:03	0,28	0,20	0,15	0,22	0,21
18	1.6.10:87:03	0,22	0,17	0,14	0,21	0,19
19	1.6.20:77:03	0,22	0,16	0,15	0,19	0,18
20	1.6.30:67:03	0,28	0,24	0,17	0,28	0,24
21	E.20:77:03	0,26	0,20	0,15	0,19	0,20
22	1.4.10:87:03.POLY	0,32	0,23	0,17	0,27	0,25
23	1.4.20:77:03.POLY	0,26	0,19	0,15	0,21	0,20
24	1.4.30:67:03.POLY	0,25	0,21	0,16	0,25	0,21
25	1.6.10:87:03.POLY	0,25	0,30	0,17	0,33	0,26
26	1.6.20:77:03.POLY	0,25	0,19	0,15	0,27	0,21
27	1.6.30:67:03.POLY	0,19	0,16	0,14	0,23	0,18
28	E.20:77:03.POLY	0,19	0,18	0,15	0,26	0,20

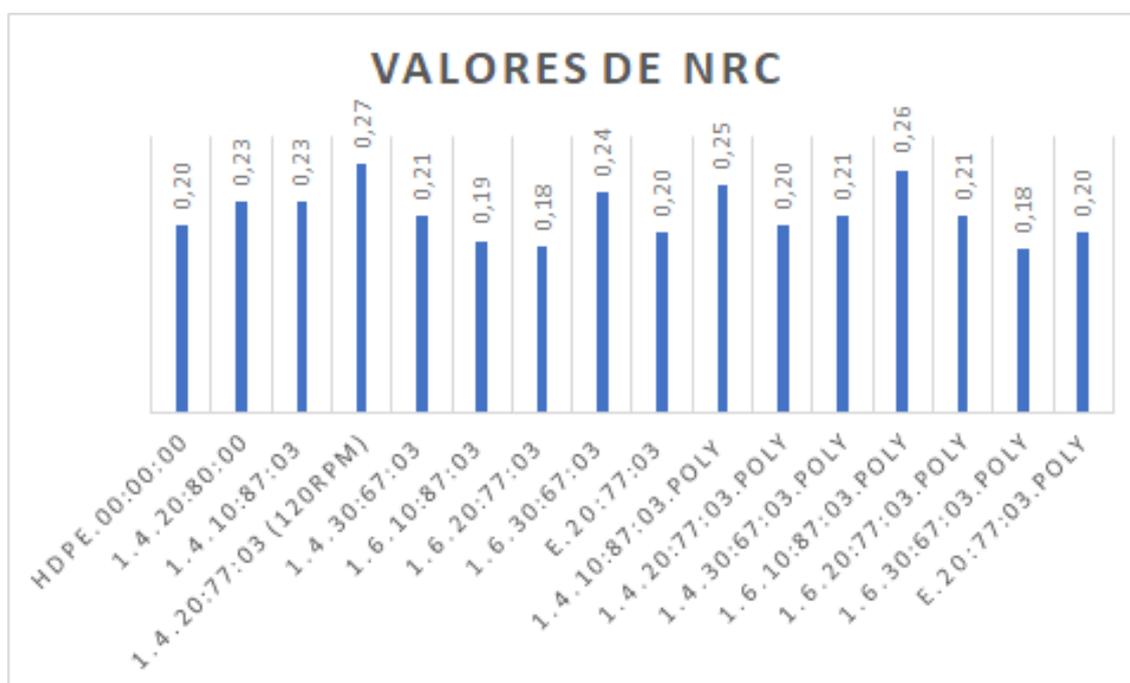


Figura 4.55 – Gráfico com os valores de NRC.

Com o objetivo de verificar a ocorrência de diferença significativa entre os valores de NRC, foi aplicada análise de variância (ANOVA) nos resultados e os dados encontrados

estão apresentados na Tabela 4.14.

Tabela 4.14 – Resultados ANOVA - NRC.

CAUSA DE VARIACÃO	GL	SOMA DE QUADRADOS	QUADRADO MÉDIO	F CALCULADO	F CRÍTICO
Tratamentos	15,00	0,74	0,05	62,42	1,88
Resíduo	48,00	0,04	0,00		
Total	63,00	0,78			

De acordo com os valores obtidos pela análise de variância apresentados pela 4.14, rejeita-se a hipótese de equidade entre as médias com um nível de significância de 5%, pois F calculado = 62,42 é maior que F crítico = 1,88. Conclui-se então que os valores de NRC possuem diferenças significativas.

Com o objetivo de identificar se existem outros compósitos com valores de NRC que são adequados para o objetivo da pesquisa, ou seja, que possuem diferenças não significativas quando comparados ao NRC do compósito 1.4.20:77:03 (amostra 16c), foi aplicado o Teste de Tukey para comparação entre médias com nível de confiança de 95%. A diferença média significativa (d.m.s.) encontrada foi 0,07, os dados de comparação entre as médias dos tratamentos estão apresentados na Tabela 4.15.

Tabela 4.15 – Comparação entre médias (d.m.s) - NRC.

Amostras	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
13	0,00	0,03	0,03	0,07	0,01	0,02	0,03	0,04	0,01	0,04	0,01	0,01	0,06	0,01	0,03	0,01
14	0,03	0,00	0,00	0,04	0,02	0,05	0,05	0,01	0,03	0,02	0,01	0,01	0,03	0,02	0,05	0,04
15	0,03	0,00	0,00	0,04	0,02	0,05	0,05	0,01	0,03	0,02	0,01	0,01	0,03	0,02	0,05	0,04
16	0,07	0,04	0,04	0,00	0,06	0,09	0,09	0,03	0,07	0,03	0,06	0,06	0,01	0,06	0,09	0,08
17	0,01	0,02	0,02	0,06	0,00	0,03	0,03	0,03	0,01	0,04	0,01	0,01	0,05	0,00	0,03	0,02
18	0,02	0,05	0,05	0,09	0,03	0,00	0,01	0,06	0,02	0,06	0,03	0,03	0,08	0,03	0,01	0,01
19	0,03	0,05	0,05	0,09	0,03	0,01	0,00	0,06	0,02	0,07	0,04	0,04	0,08	0,04	0,00	0,02
20	0,04	0,01	0,01	0,03	0,03	0,06	0,06	0,00	0,04	0,01	0,03	0,03	0,02	0,03	0,06	0,05
21	0,01	0,03	0,03	0,07	0,01	0,02	0,02	0,04	0,00	0,05	0,02	0,02	0,06	0,02	0,02	0,01
22	0,04	0,02	0,02	0,03	0,04	0,06	0,07	0,01	0,05	0,00	0,03	0,03	0,02	0,03	0,07	0,05
23	0,01	0,01	0,01	0,06	0,01	0,03	0,04	0,03	0,02	0,03	0,00	0,00	0,05	0,00	0,04	0,02
24	0,01	0,01	0,01	0,06	0,01	0,03	0,04	0,03	0,02	0,03	0,00	0,00	0,05	0,00	0,04	0,02
25	0,06	0,03	0,03	0,01	0,05	0,08	0,08	0,02	0,06	0,02	0,05	0,05	0,00	0,05	0,08	0,07
26	0,01	0,02	0,02	0,06	0,00	0,03	0,04	0,03	0,02	0,03	0,00	0,00	0,05	0,00	0,04	0,02
27	0,03	0,05	0,05	0,09	0,03	0,01	0,00	0,06	0,02	0,07	0,04	0,04	0,08	0,04	0,00	0,02
28	0,01	0,04	0,04	0,08	0,02	0,01	0,02	0,05	0,01	0,05	0,02	0,02	0,07	0,02	0,02	0,00

Com base nos resultados têm-se que, com o nível de confiança de 95% que os compósitos 14 (1.4.20:80:00), 15 (1.4.10:87:03), 17 (1.4.30:67:03), 20 (1.6.30:67:03), 22 (1.4.10:87:03.POLY), 23 (1.4.20:77:03.POLY), 24 (1.4.30:67:03.POLY), 25 (1.6.10:87:03.POLY)

e 26 (1.6.20:77:03.POLY) não apresentaram diferenças significativas entre os valores de NRC, pois a diferença entre as médias não foi superior ao d.m.s. Sendo assim, os compósitos 14 (1.4.20:80:00), 15 (1.4.10:87:03), 16 (1.4.20:77:03), 17 (1.4.30:67:03), 20 (1.6.30:67:03), 22 (1.4.10:87:03.POLY), 23 (1.4.20:77:03.POLY), 24 (1.4.30:67:03.POLY), 25 (1.6.10:87:03.POLY) e 26 (1.6.20:77:03.POLY) são os mais adequados para a finalidade do trabalho quando analisado apenas o resultado do ensaio de NRC.

Analisando e comparando os resultados das Tabelas 4.12 e 4.13, juntamente com a análise estatística da Tabela 4.15, é possível dizer que os compósitos 1.4.20:77:03, 1.4.10:87:03.POLY e 1.6.10:87:03.POLY são os mais adequados para isolamento acústico. Porém, os compósitos 1.4.20:80:00, 1.4.10:87:03, 1.4.30:67:03, 1.6.30:67:03, 1.4.20:77:03.POLY e 1.6.20:77:03.POLY não tiveram diferenças significativas nos valores de NRC se comparados aos mais adequados, se tornando também adequados ao objetivo do trabalho.

4.11 ESPECTROSCOPIA DE RESSONÂNCIA MAGNÉTICA NUCLEAR NO DOMÍNIO DO TEMPO (RMN-DT)

Os gráficos obtidos na análise de *RMN – DT* se encontram no apêndice C. As frações rígidas e móveis de cada amostra estão apresentadas na Tabela 4.16 e podem ser comparadas na Figura 4.56. Quando se analisa a amostra sem compatibilizante (14) com as amostras com anidrido maleico (16) e Polybond (23), percebe-se uma maior fração móvel nas amostras compatibilizadas, apresentando uma maior mobilidade. O geopolímero 1,4 quando analisado puro se apresentou mais rígido que o geopolímero 1,6 (amostras 8 e 11, respectivamente), tendo uma menor mobilidade do sistema por meio das mudanças da morfologia (LESSA; TAVARES; PITA, 2009). Analisando os compósitos fabricados com 20% de carga (escória ou os geopolímeros) e os diferentes compatibilizantes (amostras 16, 19, 21, 23 e 28), a amostra 28 fabricada com escória e Polybond apresentou uma rigidez significativamente superior às demais.

Tabela 4.16 – Resultados do ensaio de *RMN – DT*.

RESULTADOS DO ENSAIO DE RMN-DT			
Numeração	Amostra	Fração Rígida	Fração Móvel
8	Geopolímero 1,4	4 μ s (91%)	22 μ s (9%)
11	Geopolímero 1,6	5 μ s (88%)	51 μ s (12%)
13	HDPE.00:00:00	8 μ s (70%)	34 μ s (30%)
14	1.4.20:80:00	7 μ s (85%)	16 μ s (15%)
15	1.4.10:87:03	6 μ s (75%)	19 μ s (25%)
16	1.4.20:77:03	6 μ s (75%)	13 μ s (25%)
17	1.4.30:67:03	7 μ s (89%)	21 μ s (11%)
18	1.6.10:87:03	7 μ s (84%)	20 μ s (16%)
19	1.6.20:77:03	7 μ s (85%)	19 μ s (15%)
20	1.6.30:67:03	6 μ s (94%)	27 μ s (6%)
21	E.20:77:03	6 μ s (84%)	15 μ s (16%)
22	1.4.10:87:03.POLY	6 μ s (74%)	19 μ s (26%)
23	1.4.20:77:03.POLY	7 μ s (83%)	16 μ s (17%)
24	1.4.30:67:03.POLY	5 μ s (88%)	16 μ s (12%)
25	1.6.10:87:03.POLY	6 μ s (74%)	19 μ s (26%)
26	1.6.20:77:03.POLY	7 μ s (88%)	17 μ s (12%)
27	1.6.30:67:03.POLY	4 μ s (88%)	17 μ s (12%)
28	E.20:77:03.POLY	8 μ s (91%)	25 μ s (9%)

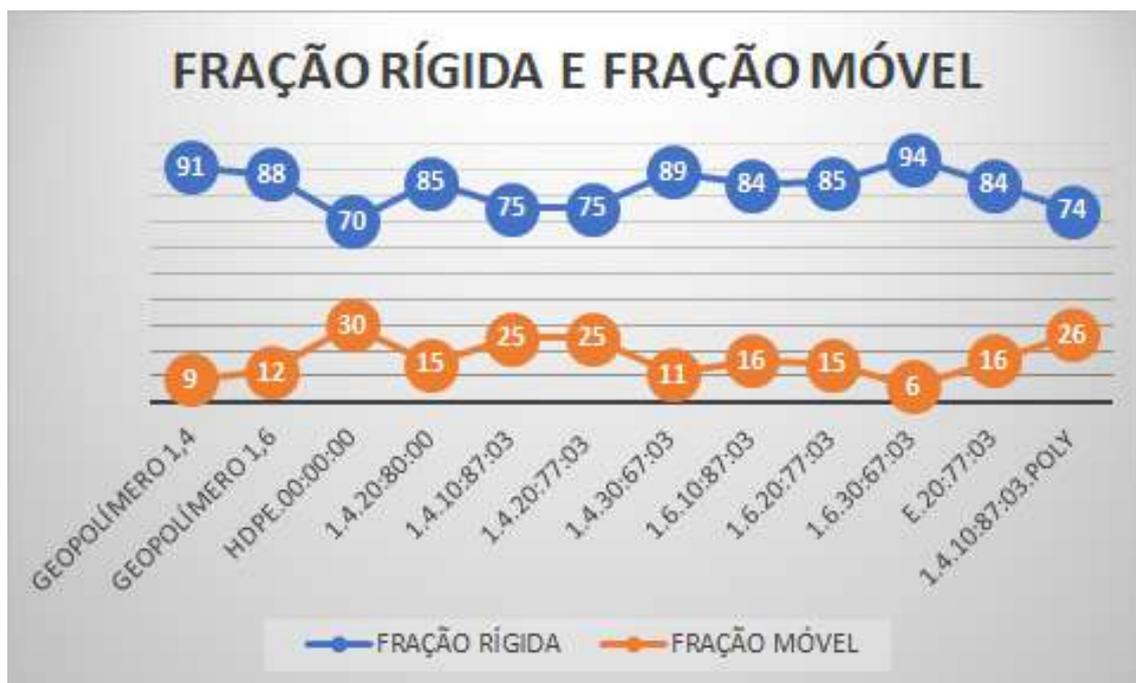


Figura 4.56 – Gráfico com os valores das frações rígidas e móveis em porcentagem.

Para um bom isolamento termoacústico é necessário uma menor rigidez, como visto no item 2.6. Desta forma, a análise mostrou que quanto menor a concentração de carga, o compósito se torna menos rígido, sendo que os compósito que apresentaram os menores valores de rigidez foram 1.4.10:87:03.POLY, 1.6.10:87:03.POLY, 1.4.10:87:03 e 1.4.20:77:03.

4.12 Comparação entre os resultados

Com as referências apresentadas no item 2.6 foi possível definir as propriedades desejáveis para um bom isolamento térmico e acústico como foram resumidas na Tabela 2.1. Com a realização das análises foram encontrados compósitos mais adequados para cada propriedade buscada. A Tabela 4.17 apresenta 3 escolhas onde a escolha 1 é a que teve o melhor resultado para a propriedade analisada, o segundo melhor resultado na escolha 2 e o terceiro melhor na escolha 3.

Tabela 4.17 – Propriedades desejáveis para material isolante térmico e acústico.

PROPRIEDADES DESEJÁVEIS PARA MATERIAL ISOLANTE TÉRMICO E ACÚSTICO			
PROPRIEDADE DESEJÁVEL	ESCOLHA 1	ESCOLHA 2	ESCOLHA 3
Maior porosidade	Compósitos com geopolímero 1,4 e anidrido maleico.		
Menor densidade	1.4.10:87:03.POLY	1.4.20:87:03.POLY	1.4.10:87:03
Menor dureza	1.4.30:67:03	1.6.30:67:03.POLY	E.20:77:03
Menor módulo de elasticidade	1.6.20:77:03	1.6.30:67:03	E.20:77:03.POLY
Menor resistência a compressão	Compósitos com menor concentração de carga.		
Menor difusividade térmica	1.4.10:77:03	1.4.20:77:03	-
Maior coeficiente de absorção acústica	1.4.20:77:03	1.6.10:87:03.POLY	1.4.10:87:03
Menor rigidez	1.4.10:87:03	1.4.20:77:03	1.4.10:87:03.POLY
Menor cristalinidade	1.4.30:67:03	1.4.20:77:04	-

1.4.10:87:03	E.20:77:03	1.4.10:87:03.POLY	1.6.30:67:03.POLY
1.4.20:77:03	1.6.20:77:03	1.4.20:87:03.POLY	E.20:77:03.POLY
1.4.30:67:03	1.6.30:67:03	1.6.10:87:03.POLY	- sem outra opção

Entre as análises realizadas, a difusividade térmica e o coeficiente de absorção acústica são as que podem definir melhor os compósitos que são mais eficientes no isolamento térmico e acústico para serem utilizados em revestimento de aeronaves. As demais análises ajudaram a buscar as propriedades que proporcionam um bom isolamento termoacústico. Desta forma, analisando a Tabela 4.17 é possível concluir que os compósitos mais indicados para o objetivo da pesquisa são o 1.4.10:87:03 e 1.4.20:77:03, por serem os compósitos com melhores resultados na análise de LFA e CAA e também por terem bons resultados nas demais análises, o que confirma serem a melhor escolha para a utilização em revestimento de aeronaves buscando o melhor isolamento térmico e acústico, atendendo de forma mais eficiente o objetivo da pesquisa.

5 CONCLUSÕES

Com as análises foi possível ter as seguintes conclusões:

- A difração de raios X mostrou um maior teor de SiO_2 pode indicar uma menor resistência à compressão dos compósitos com menores concentrações de carga, o que pode ser explicado por um alto valor de porosidade e baixo valor de densidade que são algumas das características procuradas em um material com bom isolamento térmico e acústico.
- A análise termogravimétrica constatou um aumento na estabilidade térmica dos compósitos por meio das reações que ocorrem durante o processamento, promovendo um aumento da interação interfacial mais evidente nos compósitos com Polybond. A perda de massa dos geopolímeros foi maior do que a da escória, tendo uma maior perda de massa o geopolímero 1,6. Os compósitos fabricados com geopolímero 1,4 tiveram uma maior estabilidade térmica se comparados aos compósitos fabricados com geopolímero 1,6.
- Com a análise de DSC foi possível confirmar que os compatibilizantes proporcionaram uma melhor interface entre a carga e a matriz no compósito, o que também foi confirmado nas análises de TGA, dureza, densidade, MEV e tração. A análise também mostrou que as partículas de geopolímero dispersas na matriz polimérica atuaram mais dificultando a mobilidade das cadeias poliméricas do que como agente nucleante, diminuindo a cristalinidade e que quanto maior a inserção de carga e maior o efeito na compatibilidade.
- As imagens de MEV puderam mostrar uma maior porosidade do geopolímero 1,4 e comprovar a diminuição das partículas através do peneiramento, o que influencia diretamente a difusividade térmica aumentando a capacidade de isolamento térmico. A análise também confirmou que a adesão entre a carga e a matriz dos compósitos com anidrido maleico não foi tão boa quanto a do Polybond, porém mesmo assim é a mais adequada para a utilização como isolantes térmicos e acústicos devido a sua maior porosidade.
- O ensaio de densidade mostrou que com a geopolimerização ocorreu a diminuição da densidade dos compósitos. Na busca de uma baixa densidade para um melhor isolante, o compósito 1.4.10:87:03.POLY apresentou a menor densidade. O Polybond apresentou uma maior densidade nos compósitos fabricados com escória. Em relação as amostras fabricadas com os geopolímeros, as que possuem maior concentração de carga apresentaram maiores densidades de uma forma geral.

- Os compósitos com maiores concentrações de carga apresentaram menor valor de dureza e menores módulos de elasticidade, sugerindo maior porosidade. Os menores valores de dureza encontrados foram dos compósitos 1.4.30:67:03 e 1.6.30:67:03.POLY e E.20:77:03.
- A análise de tração mostrou menores módulos de elasticidade nos compósitos fabricados com Polybond, sugerindo uma melhor adesão entre a carga e a matriz.
- Os compósitos 1.4.10:87:03 e 1.4.20:77:03 apresentaram os menores valores de difusividade térmica, indicando um melhor isolamento térmico. O geopolímero 1,4 se apresentou mais eficiente no isolamento térmico se comparado ao 1,6. Em relação aos compatibilizantes, o anidrido maleico diminuiu a difusividade térmica se tornando o mais adequado para o objetivo da pesquisa.
- A análise de CAA proporcionou a verificação do isolamento acústico dos compósitos em diferentes casos, o que mostrou não apenas um compósito mais eficiente, mas sim o mais eficiente para cada caso. Na maioria dos casos os compósitos com menores concentrações de geopolímero 1,4 foram mais adequados, o que também foi confirmado no cálculo do NCR.
- Os compatibilizantes aumentaram a mobilidade das amostras e quanto menor é a concentração de carga, menos rígido é o compósito.
- Os compósitos 1.4.10:87:03 e 1.4.20:77:03 se mostraram os mais adequados de uma forma geral na utilização em isolamento térmico e acústico em aeronaves, por apresentarem bons resultados em todas as análises realizadas.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para pesquisas futuras que possam dar continuidade a este trabalho, são sugeridas algumas considerações relevantes:

- Realizar o ensaio de flamabilidade para avaliar o tempo e a taxa de velocidade de queima dos compósitos.
- Fabricar compósitos com espessura superiores a 2 mm para verificar a eficiência no isolamento térmico e acústico.
- Fabricar e analisar compósitos com diferentes concentrações de anidrido maleico e Polybond.
- Fazer teste de porosidade nas amostras.
- Avaliar a resistência ao impacto.
- Criar compósitos com diferentes proporções sólido/líquido.

REFERÊNCIAS

- ABDEL-GHANI, N. T. et al. Geopolymer synthesis by the alkali-activation of blast-furnace steel slag and its fire-resistance. *HBRC Journal*, v. 14, n. 2, p. 159–164, 2018. ISSN 1687-4048. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1687404816300219>>.
- AKARKEN, G.; CENGIZ, U. Fabrication and characterization of metakaolin-based fiber reinforced fire resistant geopolymer. *Applied Clay Science*, v. 232, p. 106786, 2023. ISSN 0169-1317. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169131722003817>>.
- ALBIDAH, A. S. Effect of partial replacement of geopolymer binder materials on the fresh and mechanical properties: A review. *Ceramics International*, 2021. ISSN 0272-8842. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0272884221004892>>.
- ALOUANI, M. E. et al. Application of geopolymers for treatment of water contaminated with organic and inorganic pollutants state-of-the-art review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, Elsevier, p. 105095, 2021.
- ALY, N. M. et al. Acoustic and thermal performance of sustainable fiber reinforced thermoplastic composite panels for insulation in buildings. *Journal of Building Engineering*, v. 40, p. 102747, 2021. ISSN 2352-7102. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710221006057>>.
- ANTUNES, J. et al. Narrativa crítica acerca do desenvolvimento sustentável: quais relações podemos estabelecer? narrativa crítica acerca del desarrollo sostenible:¿ qué relaciones podemos establecer? narrative criticism about sustainable development: what can establish relations? *REMEA-Revista Eletrônica do Mestrado em Educação Ambiental*, v. 34, n. 2, p. 57–75, 2017.
- ARAÚJO, T. T. A. d. Revestimento de polietileno de alta densidade (pead) como sistema de proteção contra corrosão em oleodutos no rn. Universidade Federal Rural do Semi-Árido, 2019.
- ATEF, M. et al. On the acoustical performance of eco-friendly cementitious composite with recycled fine rubber particles. *Construction and Building Materials*, v. 325, p. 126830, 2022. ISSN 0950-0618. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061822005165>>.
- ATLI, A. et al. Exploring the mechanical performance of batío3 filled hdpe nanocomposites: A comparative study of the experimental and numerical approaches. *Polymer*, v. 254, p. 125063, 2022. ISSN 0032-3861. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0032386122005511>>.
- AWAD, A. et al. A study of some thermal and mechanical properties of hdpe blend with marble and granite dust. *Ain Shams Engineering Journal*, v. 10, n. 2, p. 353–358, 2019. ISSN 2090-4479. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2090447919300036>>.

- BADACHE, A. et al. Thermo-physical and mechanical characteristics of sand-based lightweight composite mortars with recycled high-density polyethylene (hdpe). *Construction and Building Materials*, v. 163, p. 40–52, 2018. ISSN 0950-0618. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061817324741>>.
- BAI, T. et al. Influence of steel slag on the mechanical properties and curing time of metakaolin geopolymer. *Ceramics International*, v. 44, n. 13, p. 15706–15713, 2018. ISSN 0272-8842. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0272884218313890>>.
- BARRETO, L. M.; VILAÇA, M. T. M. Controvérsias e consensos em educação ambiental e educação para o desenvolvimento sustentável. *Research, Society and Development*, Grupo de Pesquisa Metodologias em Ensino e Aprendizagem em Ciências, v. 7, n. 5, p. e975167, 2018.
- BISPO, V. M. S. et al. O entendimento do aço: Do desenvolvimento a suas patologias. *ETIC-ENCONTRO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA-ISSN 21-76-8498*, v. 15, n. 15, 2019.
- CAETANO, G. et al. Estudo do comportamento da difusividade térmica do aço inoxidável duplex uns s32304 submetido a processo de soldagem tig, em função do tratamento térmico. *Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória*, 2017.
- CARDOSO, D. N. et al. Produção de geopolímeros ativado alcalinamente utilizando resíduos de construção e demolição (rcd). *Conjecturas*, v. 21, n. 7, p. 1–8, 2021.
- CARVALHO, G. O. Sustentabilidade e desenvolvimento sustentável: uma visão contemporânea. *Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental*, v. 8, n. 1, p. 789–792, 2019.
- CHAKRABARTY, G. et al. Polyethylene in knee arthroplasty: A review. *Journal of Clinical Orthopaedics and Trauma*, v. 6, n. 2, p. 108–112, 2015. ISSN 0976-5662. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0976566215000983>>.
- CHAUHAN, S.; BHUSHAN, R. K. Study of polymer matrix composite with natural particulate/fiber in pmc : A review. *International Journal of Advance Research, Ideas and Innovations in Technology*, v. 3, p. 1168–1179, 2017.
- CHEN, K. et al. Geopolymer concrete durability subjected to aggressive environments – a review of influence factors and comparison with ordinary portland cement. *Construction and Building Materials*, v. 279, p. 122496, 2021. ISSN 0950-0618. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061821002567>>.
- CONG, P.; CHENG, Y. Advances in geopolymer materials: A comprehensive review. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, v. 8, n. 3, p. 283–314, 2021. ISSN 2095-7564. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095756421000441>>.
- CONG, P.; MEI, L. Using silica fume for improvement of fly ash/slag based geopolymer activated with calcium carbide residue and gypsum. *Construction and Building Materials*, v. 275, p. 122171, 2021. ISSN 0950-0618. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095006182034174X>>.

CORREIA, S. N. et al. Inovação social para o desenvolvimento sustentável: um caminho possível. *Administração Pública e Gestão Social*, v. 10, n. 3, p. 199–212, 2018.

COSTA, C. C. et al. Biocompósito de polietileno de alta densidade com casca de arroz e oxibiodegradante orgânico para a produção de embalagens biodegradáveis. *Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental*, v. 9, n. 3, p. 202–216, 2020.

COSTA, F. et al. Influência da concentração de hidróxido de sódio na síntese de geopolímero usando a escória como precursor. *Blucher Chemical Engineering Proceedings*, v. 1, n. 2, p. 13352–13359, 2015.

COSTA, K. Á. et al. Estudo do processo de lixiviação controlada da escória de aciaria em extrator soxhlet visando emprego em pavimentos. *Matéria (Rio de Janeiro)*, SciELO Brasil, v. 22, 2017.

CUNHA, C. T. A. C. I. R. O. F. R. Morfologia e propriedades térmicas de misturas poliméricas baseadas em amido termoplástico. *Anais do 10o Congresso Brasileiro de Polímeros*, 2009.

DHASINDRAKRISHNA, K. et al. Progress, current thinking and challenges in geopolymer foam concrete technology. *Cement and Concrete Composites*, v. 116, p. 103886, 2021. ISSN 0958-9465. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958946520303905>>.

DONG, M. et al. Development of high strength one-part geopolymer mortar using sodium metasilicate. *Construction and Building Materials*, v. 236, p. 117611, 2020. ISSN 0950-0618. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061819330636>>.

DUBIELLA, K.; VICENTINI, D. Estudo de laminados de materiais compósitos no transporte aéreo. *1º Simpósio de Transportes do Paraná 2º Seminários em Aeroportos e Transporte Aéreo 2º Urbanidade Livro de resumos e trabalhos completos*, p. 31, 2018.

Dönmez Çavdar, A. et al. Accelerated weathering resistance of high-density polyethylene composites reinforced with microcrystalline cellulose and fire retardants. *Journal of Building Engineering*, v. 39, p. 102282, 2021. ISSN 2352-7102. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710221001388>>.

EL ALOUANI, M. et al. Application of geopolymers for treatment of water contaminated with organic and inorganic pollutants: State-of-the-art review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, v. 9, n. 2, p. 105095, 2021. ISSN 2213-3437. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213343721000737>>.

EZZAHRAE, M. et al. Thermal and mechanical properties of a high-density polyethylene (hdpe) composite reinforced with wood flour. *Materials Today: Proceedings*, v. 72, p. 3602–3608, 2023. ISSN 2214-7853. Fifth edition of the International Conference on Materials Environmental Science (ICMES 2022). Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785322055821>>.

FARHAN, K. Z. et al. Assessment of important parameters involved in the synthesis of geopolymer composites: A review. *Construction and Building Materials*, v. 264, p. 120276, 2020. ISSN 0950-0618. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061820322819>>.

- FEIL, A. A.; SCHREIBER, D. Sustentabilidade e desenvolvimento sustentável: desvendando as sobreposições e alcances de seus significados. *Cadernos Ebape. BR*, SciELO Brasil, v. 15, p. 667–681, 2017.
- FERNANDES, J. C. Acústica e ruídos. *Bauru: Unesp*, 2002.
- FERRAZ, H. O aço na construção civil. *Revista eletrônica de ciências. São Paulo*, n. 22, 2003.
- FERREIRA, J. C. et al. Ocean literacy to promote sustainable development goals and agenda 2030 in coastal communities. *Education Sciences*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 11, n. 2, p. 62, 2021.
- FIGUEIREDO, R. et al. OBTENÇÃO DE ARGAMASSA GEOPOLIMÉRICA A PARTIR DE REJEITOS DE FLOTAÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO. *XXVIII Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa*, p. 8, 2019.
- GAMA, R. et al. Substituição parcial de agregado por escória de forno panela em concretos convencionais. 2013.
- GAO, H. et al. A bifunctional hierarchical porous kaolinite geopolymer with good performance in thermal and sound insulation. *Construction and Building Materials*, v. 251, p. 118888, 2020. ISSN 0950-0618. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095006182030893X>>.
- GARCÍA, E. et al. Mechanical, dynamic and tribological characterization of hdpe/peanut shell composites. *Polymer Testing*, v. 98, p. 107075, 2021. ISSN 0142-9418. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142941821000258>>.
- GIANNOPOULOU, I. et al. High temperature performance of geopolymers based on construction and demolition waste. *Journal of Building Engineering*, v. 72, p. 106575, 2023. ISSN 2352-7102. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710223007544>>.
- GOMES, I. G. Benefícios das telhas termoacústicas na indústria da construção civil. *Rebena-Revista Brasileira de Ensino e Aprendizagem*, v. 6, p. 404–416, 2023.
- GOMES, M. F.; FERREIRA, L. J. Políticas públicas e os objetivos do desenvolvimento sustentável. *Direito e Desenvolvimento*, v. 9, n. 2, p. 155–178, 2018.
- GOMEZ-CASERO, M. et al. Synthesis of clay geopolymers using olive pomace fly ash as an alternative activator. influence of the additional commercial alkaline activator used. *Journal of Materials Research and Technology*, v. 12, p. 1762–1776, 2021. ISSN 2238-7854. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S223878542100329X>>.
- GONÇALVES, A. et al. Caracterização mecânica de blendas de pet reciclado/pead. *CEP*, v. 41650, p. 010, 2013.
- GUERRERO, J. M. et al. Experimental and virtual testing of a composite-aluminium aircraft wingbox under thermal loading. *Aerospace Science and Technology*, v. 138, p. 108329, 2023. ISSN 1270-9638. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1270963823002262>>.

- GUPTA, K. K. et al. Degradation of high density polyethylene (hdpe) through bacterial strain from cow faeces. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, v. 48, p. 102646, 2023. ISSN 1878-8181. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1878818123000476>>.
- HUI-TENG, N. et al. Formulation, mechanical properties and phase analysis of fly ash geopolymer with ladle furnace slag replacement. *Journal of Materials Research and Technology*, v. 12, p. 1212–1226, 2021. ISSN 2238-7854. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2238785421002921>>.
- JAPIASSÚ, C. E.; GUERRA, I. F. 30 anos do relatório brundtland: nosso futuro comum e o desenvolvimento sustentável como diretriz constitucional brasileira. *Revista de Direito da Cidade*, v. 9, n. 4, p. 1884–1901, 2017.
- JIA, Y. et al. The effect of peroxide cross-linking on the thermal conductivity and crystallinity of low-density polyethylene. *Materials Today Communications*, v. 31, p. 103735, 2022. ISSN 2352-4928. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352492822005967>>.
- JOHN, S. K. et al. Effect of source materials, additives on the mechanical properties and durability of fly ash and fly ash-slag geopolymer mortar: A review. *Construction and Building Materials*, v. 280, p. 122443, 2021. ISSN 0950-0618. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061821002038>>.
- JOSEPH, M. et al. Morphology and concentration-dependent thermal diffusivity of biofunctionalized zinc oxide nanostructures using dual-beam thermal lens technique. *Materials Letters*, v. 323, p. 132599, 2022. ISSN 0167-577X. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167577X22009521>>.
- KHOUAJA, A. et al. Dielectric properties and thermal stability of cellulose high-density polyethylene bio-based composites. *Industrial Crops and Products*, v. 171, p. 113928, 2021. ISSN 0926-6690. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926669021006920>>.
- KORIEM, A. et al. The effect of artificial weathering and hardening on mechanical properties of hdpe with and without uv stabilizers. *Alexandria Engineering Journal*, v. 60, n. 4, p. 4167–4175, 2021. ISSN 1110-0168. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110016821001800>>.
- KUQO, A. et al. Enhancement of physico-mechanical properties of geopolymer particleboards through the use of seagrass fibers. *Construction and Building Materials*, v. 374, p. 130889, 2023. ISSN 0950-0618. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061823006013>>.
- KÜÇÜK, M. E. et al. Dissolution kinetics of aluminosilicates from biomass ashes in alkaline solutions. *Ceramics International*, v. 47, n. 8, p. 11714–11726, 2021. ISSN 0272-8842. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0272884221000201>>.
- LAZARO, L. L. B.; GREMAUD, A. P. Contribuição para o desenvolvimento sustentável dos projetos de mecanismo de desenvolvimento limpo na américa latina. *Organizações & Sociedade*, SciELO Brasil, v. 24, p. 53–72, 2017.

- LAZORENKO, G. et al. Effect of pre-treatment of flax tows on mechanical properties and microstructure of natural fiber reinforced geopolymer composites. *Environmental Technology Innovation*, v. 20, p. 101105, 2020. ISSN 2352-1864. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S235218642031405X>>.
- LEMOUGNA, P. N. et al. Thermal stability of one-part metakaolin geopolymer composites containing high volume of spodumene tailings and glass wool. *Cement and Concrete Composites*, v. 114, p. 103792, 2020. ISSN 0958-9465. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958946520302985>>.
- LESSA, T. C. R. F. et al. Desenvolvimento de nanocompósitos empregando polietileno de alta densidade e argila organofílica. 2009.
- LEÃO, S. G. et al. Noise attenuation inside airplane cabin: Preliminary results on combined porous/nano-fibrous materials. *Applied Acoustics*, v. 199, p. 109009, 2022. ISSN 0003-682X. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0003682X22003838>>.
- LI, F. et al. Influence of modified multi-walled carbon nanotubes on the mechanical behavior and toughening mechanism of an environmentally friendly granulated blast furnace slag-based geopolymer matrix. *Ceramics International*, v. 47, n. 1, p. 907–922, 2021. ISSN 0272-8842. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0272884220325839>>.
- LI, F. et al. Investigation on physical behavior, impermeability and micromechanism of engineering geopolymer composites modified with mwcnts. *Materials Today Communications*, v. 36, p. 106471, 2023. ISSN 2352-4928. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352492823011625>>.
- LI, J. et al. Polyimide composite aerogels towards highly efficient microwave absorption and thermal insulation. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, v. 161, p. 107112, 2022. ISSN 1359-835X. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359835X22002949>>.
- LIAN, T.-W. et al. Rapid thermal conductivity measurement of porous thermal insulation material by laser flash method. *Advanced Powder Technology*, v. 27, n. 3, p. 882–885, 2016. ISSN 0921-8831. Special issue of the 5th Int'l Conf. on the Characterization and Control of Interfaces for High Quality Advanced Materials (ICCCI2015). Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921883116000108>>.
- LIGOWSKI, E. et al. Composite materials based on fibers from sugar cane and recycled polymers obtained by extrusion technique. *Polímeros, SciELO Brasil*, v. 25, n. 1, p. 70–75, 2015.
- LIN, W. Y. et al. A factorial experimental analysis of using wood fly ash as an alkaline activator along with coal fly ash for production of geopolymer-cementitious hybrids. *Science of The Total Environment*, v. 718, p. 135289, 2020. ISSN 0048-9697. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969719352817>>.
- LIU, H. et al. Coupling effect of steel slag in preparation of calcium-containing geopolymers with spent fluid catalytic cracking (fcc) catalyst. *Construction and Building Materials*, v. 290, p. 123194, 2021. ISSN 0950-0618. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061821009545>>.

- LIU, J. et al. Steel slag base geopolymer for efficient removal of zn and ni ions from aqueous solutions: Preparation and characterization. *Materials Letters*, v. 340, p. 134173, 2023. ISSN 0167-577X. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167577X23003580>>.
- LUCA, A.-V.; PETRESCU, L. Membrane technology applied to steel production: Investigation based on process modelling and environmental tools. *Journal of Cleaner Production*, v. 294, p. 126256, 2021. ISSN 0959-6526. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652621004765>>.
- MACHADO, R. G. C. et al. Blendas de pead: efeito da concentração de pead reciclado e do compatibilizante pead-g-ma. *Acta Scientiae et Technicae*, 2019.
- MALATHY, R. et al. Effect of surface-treated energy optimized furnace steel slag as coarse aggregate in the performance of concrete under corrosive environment. *Construction and Building Materials*, v. 284, p. 122840, 2021. ISSN 0950-0618. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061821006000>>.
- MALTEZ, N. G. et al. POTENCIALIDADE DO USO DA ESCÓRIA DE ACIARIA NA PRODUÇÃO DE BLOCOS DE CONCRETO PARA PAVIMENTAÇÃO. p. 2–5, 2017.
- MARCO, C. M. D.; MEZZARROBA, O. O direito humano ao desenvolvimento sustentável: contornos históricos e conceituais. *Veredas do Direito: Direito Ambiental e Desenvolvimento Sustentável*, v. 14, n. 29, p. 323–349, 2017.
- MAREYA, M. et al. Transformation of rice husk modified basic oxygen furnace slag into geopolymer composites. *Journal of Materials Research and Technology*, v. 24, p. 6264–6278, 2023. ISSN 2238-7854. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2238785423009195>>.
- MASINI, H. F. Medição automática do coeficiente de absorção acústica de materiais. *Horizonte Científico*, 2011.
- MENDES, J. U. L. et al. DETERMINAÇÃO DA DIFUSIVIDADE TÉRMICA DE UM COMPÓSITO NATURAL VISANDO CLASSIFICÁ-LO COMO ISOLANTE TÉRMICO. 2012. 8 p. Disponível em: <<file:///C:/Users/emidi/Downloads/211-007.pdf>>.
- MIAO, J. et al. Design and spraying-preparation of the gradient coatings with various diameters and contents of sio2 nano-particles for the enhanced anti-impact and thermal insulation performance. *Progress in Organic Coatings*, v. 179, p. 107491, 2023. ISSN 0300-9440. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0300944023000875>>.
- MOHAN BHASNEY, S. et al. Effect of microcrystalline cellulose [mcc] fibres on the morphological and crystalline behaviour of high density polyethylene [hdpe]/polylactic acid [pla] blends. *Composites Science and Technology*, v. 187, p. 107941, 2020. ISSN 0266-3538. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S026635381932932X>>.
- MURALEEDHARAN, M.; NADIR, Y. Factors affecting the mechanical properties and microstructure of geopolymers from red mud and granite waste powder: A review. *Ceramics International*, 2021. ISSN 0272-8842. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0272884221003382>>.

NGUYEN, K. Q. et al. Long-term testing methods for hdpe pipe - advantages and disadvantages: A review. *Engineering Fracture Mechanics*, v. 246, p. 107629, 2021. ISSN 0013-7944. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013794421000965>>.

OLIVEIRA, M. F.; HEISSLER, R. Análise comparativa do isolamento acústico em diferentes geometrias: ensaios em campo e simulações computacionais. *Ambiente Construído*, SciELO Brasil, v. 21, p. 385–402, 2020.

O'CONNOR, J. et al. Production, characterisation, utilisation, and beneficial soil application of steel slag: A review. *Journal of Hazardous Materials*, v. 419, p. 126478, 2021. ISSN 0304-3894. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389421014436>>.

PAIVA, M. V. et al. Geopolímeros: Uma revisão das características e aplicações na construção civil. *II Congresso araguaense de Ciências Exatas*, p. 1–11, 2020.

PARAMESHWARA, S. et al. Vibro-acoustic modelling and analysis of segmented aluminum fuselage of transport aircraft with blankets. *Materials Today: Proceedings*, v. 54, p. 492–497, 2022. ISSN 2214-7853. 5th International Conference on Advanced Research in Mechanical, Materials and Manufacturing Engineering-2021. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785321071674>>.

PAUL, D. et al. Utilization of fly ash and glass powder as fillers in steel slag asphalt mixtures. *Case Studies in Construction Materials*, v. 15, p. e00672, 2021. ISSN 2214-5095. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221450952100187X>>.

PAYA, J. et al. 13 - application of alkali-activated industrial waste. In: de Brito, J.; AGRELA, F. (Ed.). *New Trends in Eco-efficient and Recycled Concrete*. Woodhead Publishing, 2019, (Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering). p. 357–424. ISBN 978-0-08-102480-5. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081024805000130>>.

PECKER, H. *Manufacturing Process of Steel – Properties Fabrication Uses*. 2020. Disponível em: <<https://constructionhow.com/manufacturing-process-of-steel/>>.

PEREIRA, A. P. D. S. et al. Structural characterization of sustainable geopolymers of steel slag Id and steel slag If with koh. *Revista Materia*, Universidade Federal do Rio de Janeiro, v. 25, p. 1–14, 2020. ISSN 15177076.

PEREIRA, W. A. et al. Desenvolvimento de compósitos poliméricos reforçados com fibra da folha do buriti. *Matéria (Rio de Janeiro)*, SciELO Brasil, v. 26, 2021.

PEYNE, J. et al. Influence of calcium addition on calcined brick clay based geopolymers: A thermal and ftir spectroscopy study. *Construction and Building Materials*, v. 152, p. 794–803, 2017. ISSN 0950-0618. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095006181731382X>>.

POLETTTO, M. et al. Efeito da utilização de Ácidos orgânicos como agentes compatibilizantes em compósitos de ppr/pÓ de madeira. In: . [S.l.: s.n.], 2012.

POOJALAKSHMI, E. et al. Effect of mechanical activation on the properties of rice husk ash-based one part geopolymer. *Materials Today: Proceedings*, 2023. ISSN 2214-7853. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785323022071>>.

QUITADAMO, A. et al. Eco-friendly approach and potential biodegradable polymer matrix for wpc composite materials in outdoor application. *International Journal of Polymer Science*, Hindawi, v. 2019, 2019.

RAHAYU, I. et al. Maleic anhydride grafted onto high density polyethylene with an enhanced grafting degree via monomer microencapsulation. *Heliyon*, v. 6, n. 4, p. e03742, 2020. ISSN 2405-8440. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844020305879>>.

RASHAD, A. M. et al. Valorization of fly ash as an additive for electric arc furnace slag geopolymer cement. *Construction and Building Materials*, v. 294, p. 123570, 2021. ISSN 0950-0618. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061821013301>>.

RÊGO, J. J. F. S. et al. Breve histórico da evolução do uso de materiais compósitos na indústria aeronáutica. 2020.

RESENDE, J. M. et al. Avaliação de compósitos híbridos para aplicações em engenharia. *Cadernos UniFOA*, v. 6, n. 15, p. 11–17, 2017.

RUIZ, B. A. et al. Caracterização de misturas de peummm com resíduo de pneu obtidos através de moagem de alta energia. *Brazilian Journal of Development*, v. 6, n. 3, p. 9746–9759, 2020.

SADIK, W. A. et al. Innovative high-density polyethylene/waste glass powder composite with remarkable mechanical, thermal and recyclable properties for technical applications. *Heliyon*, v. 7, n. 4, p. e06627, 2021. ISSN 2405-8440. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844021007301>>.

SALLEH, M. N. et al. Comparison between the tensile, water absorption and flammability properties of recycled high-density polyethylene/rice husk composite from twin-screw extruder and heated two-roll mill. *Archives of Metallurgy and Materials*, Polska Akademia Nauk, v. 67, p. 661–668, 2022. ISSN 17333490.

SAMSUDIN, D. et al. Comparative study of glut palmitate salt and polyethylene grafted maleic anhydride compatibilizer on the properties of silica filled high-density polyethylene composites. *Polymer Testing*, v. 52, p. 104–110, 2016. ISSN 0142-9418. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142941816300630>>.

SANTOS, E. M. et al. Novel sustainable composites with geopolymeric steel slag and recycled from packing pet. In: *23rd Brazilian Conference on Materials Science and Engineering*. [S.l.]: Trans Tech Publications Ltd, 2020. (Materials Science Forum, v. 1012), p. 26–31.

SANTOS, E. M. et al. ANÁLISE DE ABSORÇÃO DE UMIDADE EM COMPÓSITOS À BASE DE POLI(TEREFTALATO DE ETILENO) (PET) COM PARTÍCULAS GEOPOLIMÉRICAS. *74^o Congresso Anual da ABM*, 2019.

SARFRAZ, M. Upgrading electrical, mechanical, and chemical properties of cnts/polybond® nanocomposites: Pursuit of electroconductive structural polymer nanocomplexes. *International Journal of Polymer Science*, Hindawi Limited, v. 2016, 2016. ISSN 16879430.

- SATISH KUMAR, D. et al. Measurement of metallic iron in steel making slags. *Measurement*, v. 131, p. 156–161, 2019. ISSN 0263-2241. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224118308054>>.
- SAVINI, G.; ORÉFICE, R. L. Comparative study of hdpe composites reinforced with microtalc and nanotals: high performance filler for improving ductility at low concentration levels. *Journal of Materials Research and Technology*, v. 9, n. 6, p. 16387–16398, 2020. ISSN 2238-7854. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2238785420320561>>.
- SCOTTON, R. S. et al. Evaluation of solvent-based and uv-curing inkjet inks on the adhesion and printing quality of different aircraft surfaces coating. *Progress in Organic Coatings*, v. 158, p. 106389, 2021. ISSN 0300-9440. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0300944021002605>>.
- SEKKAL, W.; ZAOUI, A. Thermal and acoustic insulation properties in nanoporous geopolymer nanocomposite. *Cement and Concrete Composites*, v. 138, p. 104955, 2023. ISSN 0958-9465. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095894652300029X>>.
- SEVERO, C. et al. Características, particularidades e princípios científicos dos materiais ativados alcalinamente. *Revista eletrônica de Materiais e Processos*, v. 8, n. 2, p. 55–67, 2013.
- SHAHIN, A. et al. Analysis of a hdpe flanged connection with a time and temperature dependent constitutive behavior. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, v. 191, p. 104375, 2021. ISSN 0308-0161. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308016121000739>>.
- SHAO, L. na et al. Morphology, rheology and electrical resistivity of plla/hdpe/cnt nanocomposites: Effect of maleic anhydride. *Materials Chemistry and Physics*, v. 152, p. 104–112, 2015. ISSN 0254-0584. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0254058414008232>>.
- SHEHATA, N. et al. Recent progress in environmentally friendly geopolymers: A review. *Science of The Total Environment*, v. 762, p. 143166, 2021. ISSN 0048-9697. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969720366961>>.
- SILVA, A. M. et al. SÍNTESE DE GEOPOLÍMERO USANDO COMO PRECURSOR A ESCÓRIA. *58º Congresso Brasileiro de Cerâmica 18 a 21 de maio de 2014, Bento Gonçalves, RS, Brasil*, p. 2898–2906, 2014.
- SILVA, B. M. C. et al. CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DE ESCÓRIAS DE ACIARIA*. p. 1–8, 2016.
- SILVA, E. R. A. d. C. Agenda 2030: Ods-metas nacionais dos objetivos de desenvolvimento sustentável. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Ipea), 2018.
- SILVA FILHO, U. M. et al. Simulação Matemática Aplicada ao Processo de Abastecimento de Metálicos na Aciaria de Aços Longos da CSN. p. 1–11, 2014.

- SIMANJUNTAK, W. et al. The effect of crystallization time on structure, microstructure, and catalytic activity of zeolite-a synthesized from rice husk silica and food-grade aluminum foil. *Biomass and Bioenergy*, v. 148, p. 106050, 2021. ISSN 0961-9534. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953421000878>>.
- SINGH, N.; MIDDENDORF, B. Geopolymers as an alternative to portland cement: An overview. *Construction and Building Materials*, v. 237, p. 117455, 2020. ISSN 0950-0618. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061819329071>>.
- SITHOLE, N. T.; MASHIFANA, T. Geosynthesis of building and construction materials through alkaline activation of granulated blast furnace slag. *Construction and Building Materials*, v. 264, p. 120712, 2020. ISSN 0950-0618. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061820327173>>.
- SOUZA, J. F. T.; PACCA, S. A. Carbon reduction potential and costs through circular bioeconomy in the brazilian steel industry. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 169, p. 105517, 2021. ISSN 0921-3449. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344921001245>>.
- SOUZA, L. D. A. Aplicações de materiais compósitos na construção civil. *Exatas & Engenharias*, Institutos Superiores de Ensino do Censa, v. 8, n. 22, 2018.
- STRAGLIOTTO, B. V. Modelo de previsão de temperatura de chegada no forno-panela do aço líquido em aciaria elétrica. 2017.
- TOME, S. et al. Synthesis, characterization and application of acid and alkaline activated volcanic ash-based geopolymers for adsorptive remotion of cationic and anionic dyes from water. *Ceramics International*, v. 47, n. 15, p. 20965–20973, 2021. ISSN 0272-8842. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S027288422101141X>>.
- TOMMASINI, F. et al. Evaluation and characterization of geopolymer foams synthesized from blast furnace with sodium metasilicate. *Journal of Materials Research and Technology*, v. 9, p. 12019–12029, 09 2020.
- VAHIDI, G. et al. Experimental investigation into the direct feeding of coupling agent, cellulose nanocrystals, and nano zinc oxide in high-density polyethylene. *Composites Part C: Open Access*, v. 8, p. 100287, 2022. ISSN 2666-6820. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666682022000512>>.
- WANG, C. et al. Mechanisms of chloride transport in low carbon marine concrete: An alkali-activated slag system with high limestone powder. *Journal of Building Engineering*, v. 72, p. 106539, 2023. ISSN 2352-7102. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710223007180>>.
- WANG, H. et al. One-pot preparation of hydrophobic lignin/sio2 nanoparticles and its reinforcing effect on hdpe. *International Journal of Biological Macromolecules*, v. 180, p. 523–532, 2021. ISSN 0141-8130. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141813021006206>>.
- WANG, S. et al. Incorporating steel slag in the production of high heat resistant fa based geopolymer paste via pressure molding. *Journal of Cleaner Production*, v. 325, p. 129265, 2021. ISSN 0959-6526. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095965262103451X>>.

- XAVIER, L. A. A. et al. Isolamento do ruído de impacto no sistema de piso com aplicação de revestimento sobre o piso original. *Ambiente Construído*, SciELO Brasil, v. 20, p. 445–463, 2020.
- XIANG, D. et al. Effect of phase transitions on the electrical properties of polymer/carbon nanotube and polymer/graphene nanoplatelet composites with different conductive network structures. *Polymer International*, Wiley Online Library, v. 67, n. 2, p. 227–235, 2018.
- XIAOLONG, Z. et al. Disposal of mine tailings via geopolymerization. *Journal of Cleaner Production*, v. 284, p. 124756, 2021. ISSN 0959-6526. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652620348009>>.
- XU, B.; YI, Y. Treatment of ladle furnace slag by carbonation: Carbon dioxide sequestration, heavy metal immobilization, and strength enhancement. *Chemosphere*, v. 287, p. 132274, 2022. ISSN 0045-6535. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653521027466>>.
- YONG-SING, N. et al. Evaluation of flexural properties and characterisation of 10-mm thin geopolymer based on fly ash and ladle furnace slag. *Journal of Materials Research and Technology*, v. 15, p. 163–176, 2021. ISSN 2238-7854. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2238785421008413>>.
- YU, J. et al. Experimental study of the feasibility of using anhydrous sodium metasilicate as a geopolymer activator for soil stabilization. *Engineering Geology*, v. 264, p. 105316, 2020. ISSN 0013-7952. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001379521930153X>>.
- ZABIHI, S. M.; TAVAKOLI, H. R. Evaluation of monomer ratio on performance of ggbfs-rha alkali-activated concretes. *Construction and Building Materials*, v. 208, p. 326–332, 2019. ISSN 0950-0618. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061819305069>>.
- ZHENG, L. et al. Solidification and immobilization of mswi fly ash through aluminate geopolymerization: Based on partial charge model analysis. *Waste Management*, v. 58, p. 270–279, 2016. ISSN 0956-053X. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X16304780>>.
- ZHU, X. et al. Early-stage geopolymerization revealed by ²⁷Al and ²⁹Si nuclear magnetic resonance spectroscopy based on vacuum dehydration. *Construction and Building Materials*, v. 266, p. 121114, 2021. ISSN 0950-0618. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061820331184>>.

APÊNDICE A – RESULTADOS DO ENSAIO DE TRAÇÃO

Tabela A.1 – Resultados de tração - parte 1.

PROPRIEDADES DO ENSAIO DE TRAÇÃO				
AMOSTRA	TENSÃO DE ESCOAMENTO (MPa)	ALONGAMENTO NA RUPTURA (mm)	MÓDULO DE ELASTICIDADE (GPa)	
13	HDPE.00:00:00	6,38	20,33	0,52
		4,94	16,31	0,53
		5,81	11,6	0,41
		5,88	14,56	0,58
		5,02	11,87	0,47
		5,8	15,25	0,57
14	1.4.20:80:00	10,31	16,63	0,4
		9,24	6,74	0,33
		9,8	17,83	0,43
		10,21	46,52	0,4
		7,89	15,52	0,31
		10,99	52,7	0,48
15	1.4.10:87:03	10,27	50,03	0,34
		8,35	28,89	0,4
		10,83	37,64	0,39
		10,77	35,08	0,49
		7,91	36,78	0,34
		5,43	32,45	0,23
16a	1.4.20:77:03 (60RPM)	10,09	44,58	0,33
		8,61	16,5	0,31
		10,84	9,36	0,31
		11,47	24,11	0,35
		6,67	15,45	0,28
		8,19	23,34	0,33
16b	1.4.20:77:03 (90RPM)	4,13	2,46	0,42
		3,88	4,08	0,21
		4,46	17,92	0,56
		2,87	6	0,35
		4,28	4,7	0,31
		7,71	18,43	0,37
16c	1.4.20:77:03 (120RPM)	5,16	4,13	0,37
		5,39	5,48	0,34
		4,54	5,76	0,45
		3,6	18,38	0,47
16d	1.4.20:77:03 (150RPM)	4,38	18,17	0,37
		4,74	3,74	0,52
		3,61	11,47	0,39
		8,68	28,04	0,31
		10,07	20,35	0,29
		5,67	26,49	0,51
17	1.4.30:67:03	7,58	5,57	0,31
		8,43	7,73	0,38
		10,61	10,97	0,37
		10,23	8,66	0,47
		10,08	9,68	0,36
		7,87	6,98	0,35
18	1.6.10:87:03	11,47	21,68	0,37
		11,92	23,73	0,4
		8,98	17,14	0,4
		11,31	29,69	0,5
		9,52	30,49	0,3
		10,01	27,6	0,33

Tabela A.2 – Resultados de tração - parte 2.

PROPRIEDADES DO ENSAIO DE TRAÇÃO				
AMOSTRA		TENSÃO DE ESCOAMENTO (MPa)	ALONGAMENTO NA RUPTURA (mm)	MÓDULO DE ELASTICIDADE (GPa)
19	1.6.20:77:03	8,88	10,95	0,35
		8,09	4,51	0,31
		8,36	5,36	0,27
		9,45	4,45	0,31
		6,94	3,05	0,3
		9,6	3,65	0,29
20	1.6.30:67:03	9,53	9,2	0,43
		9,73	10,7	0,35
		10,75	3,25	0,43
		5,42	3,19	0,25
		7,15	10,55	0,26
21	E.20:77:03	9,5	4,54	0,32
		5,34	10,73	0,6
		11,77	12,36	0,42
		8,26	10,06	0,63
		6,86	14,65	0,61
		4,65	12,51	0,58
22	1.4.10:87:03.POLY	5,31	15,7	0,59
		6,78	13,86	0,57
		6,74	13,73	0,536
		4,73	13,24	0,43
		5,22	11,68	0,47
		7,39	10,29	0,53
23	1.4.20:77:03.POLY	6,31	16,68	0,75
		8,89	4,72	0,29
		14,68	21,02	0,55
		11,07	14,98	0,38
		9,57	14,4	0,36
		12,29	15,75	0,39
24	1.4.30:67:03.POLY	8,52	15,08	0,32
		5,76	4,99	0,24
		10,28	3	0,42
		9,02	2,42	0,34
		12,85	4,27	0,4
		7,92	9,87	0,35
25	1.6.10:87:03.POLY	13,01	4,24	0,45
		13,32	66,53	0,44
		9,75	62,2	0,28
		11,05	29,45	0,39
		11,73	56,54	0,52
		4,29	47,14	0,54
26	1.6.20:77:03.POLY		52,37	
		6,15	10,8	0,59
		4,34	19,29	0,28
		8,31	32,87	0,34
		10,27	53,91	0,36
		10,49	12,3	0,35
27	1.6.30:67:03.POLY	9,7	29,96	0,36
		11,69	3,74	0,46
		12,42	5,4	0,48
		11	3,4	0,48
		12,04	5,8	0,47
		12,68	5,71	0,4
28	E.20:77:03.POLY	11,09	6,2	0,38
		4,64	12,21	0,34

APÊNDICE B – RESULTADOS COEFICIENTE DE ABSORÇÃO ACÚSTICA (CAA)

Tabela B.1 – Resultados CAA - parte 1.

RESULTADOS COEFICIENTE DE ABSORÇÃO ACÚSTICA (CAA)																	
Frequência Amostra		100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150
13	13.1	0,19	0,2	0,22	0,26	0,31	0,34	0,31	0,27	0,24	0,22	0,19	0,26	0,23	0,2	0,21	0,25
		0,15	0,17	0,2	0,25	0,3	0,34	0,3	0,24	0,2	0,19	0,18	0,22	0,21	0,18	0,18	0,24
		0,17	0,18	0,21	0,25	0,3	0,33	0,3	0,24	0,19	0,18	0,18	0,21	0,2	0,17	0,17	0,22
	13.2	0,19	0,2	0,21	0,23	0,25	0,26	0,23	0,22	0,22	0,22	0,18	0,21	0,22	0,22	0,22	0,25
		0,17	0,19	0,2	0,23	0,25	0,25	0,22	0,2	0,19	0,2	0,18	0,18	0,21	0,2	0,2	0,23
		0,15	0,17	0,19	0,22	0,24	0,25	0,22	0,19	0,18	0,18	0,17	0,17	0,19	0,18	0,19	0,2
	13.3	0,19	0,21	0,22	0,22	0,21	0,19	0,16	0,16	0,18	0,2	0,17	0,22	0,23	0,2	0,2	0,23
		0,17	0,19	0,2	0,21	0,2	0,19	0,15	0,14	0,15	0,17	0,17	0,19	0,22	0,18	0,18	0,21
		0,15	0,17	0,2	0,21	0,2	0,18	0,16	0,13	0,12	0,14	0,16	0,18	0,2	0,16	0,17	0,18
	MÉDIA		0,17	0,19	0,21	0,23	0,25	0,26	0,23	0,20	0,19	0,19	0,18	0,20	0,21	0,19	0,19
D.PADRÃO		0,02	0,01	0,01	0,02	0,04	0,06	0,06	0,05	0,03	0,02	0,01	0,03	0,01	0,02	0,02	0,02
14	14.1	0,2	0,21	0,23	0,26	0,28	0,27	0,24	0,24	0,24	0,22	0,18	0,24	0,27	0,22	0,22	0,25
		0,16	0,18	0,21	0,24	0,27	0,27	0,23	0,19	0,18	0,18	0,17	0,2	0,25	0,2	0,2	0,23
		0,14	0,16	0,2	0,23	0,27	0,27	0,23	0,19	0,16	0,16	0,16	0,19	0,23	0,18	0,19	0,21
	14.2	0,18	0,19	0,22	0,23	0,25	0,25	0,22	0,21	0,21	0,21	0,17	0,25	0,26	0,23	0,26	0,28
		0,16	0,17	0,2	0,23	0,24	0,25	0,21	0,19	0,18	0,19	0,17	0,22	0,25	0,21	0,24	0,27
		0,13	0,16	0,19	0,21	0,24	0,24	0,22	0,18	0,16	0,17	0,17	0,21	0,23	0,19	0,23	0,25
	14.3	0,2	0,21	0,23	0,28	0,36	0,39	0,32	0,27	0,24	0,22	0,17	0,19	0,23	0,33	0,39	0,31
		0,18	0,19	0,22	0,27	0,35	0,38	0,32	0,25	0,21	0,19	0,16	0,16	0,21	0,31	0,38	0,3
		0,16	0,18	0,21	0,27	0,35	0,37	0,32	0,24	0,19	0,17	0,16	0,14	0,2	0,3	0,37	0,28
	MÉDIA		0,17	0,18	0,21	0,25	0,29	0,30	0,26	0,22	0,20	0,19	0,17	0,20	0,24	0,24	0,28
D.PADRÃO		0,02	0,02	0,01	0,02	0,05	0,06	0,05	0,03	0,03	0,02	0,01	0,03	0,02	0,05	0,08	0,03
15	15.1	0,19	0,21	0,22	0,25	0,28	0,3	0,3	0,29	0,28	0,26	0,22	0,27	0,26	0,39	0,35	0,33
		0,17	0,18	0,21	0,24	0,27	0,3	0,3	0,27	0,24	0,23	0,21	0,23	0,24	0,36	0,35	0,32
		0,15	0,17	0,19	0,23	0,27	0,3	0,3	0,26	0,23	0,21	0,2	0,21	0,22	0,34	0,34	0,29
	15.2	0,17	0,18	0,2	0,23	0,26	0,27	0,24	0,23	0,22	0,2	0,15	0,18	0,19	0,2	0,2	0,22
		0,15	0,16	0,19	0,22	0,25	0,27	0,24	0,21	0,19	0,17	0,15	0,14	0,18	0,18	0,18	0,2
		0,12	0,15	0,18	0,21	0,25	0,26	0,24	0,2	0,17	0,15	0,14	0,13	0,16	0,16	0,17	0,18
	15.3	0,17	0,19	0,21	0,23	0,23	0,22	0,19	0,19	0,2	0,2	0,16	0,2	0,25	0,31	0,3	0,31
		0,15	0,17	0,2	0,22	0,22	0,22	0,18	0,17	0,16	0,16	0,15	0,16	0,24	0,29	0,28	0,3
		0,15	0,18	0,2	0,21	0,22	0,21	0,19	0,16	0,14	0,14	0,15	0,15	0,22	0,28	0,27	0,27
	MÉDIA		0,16	0,18	0,20	0,23	0,25	0,26	0,24	0,22	0,20	0,19	0,17	0,19	0,22	0,28	0,27
D.PADRÃO		0,02	0,02	0,01	0,01	0,02	0,03	0,05	0,04	0,04	0,04	0,03	0,04	0,03	0,08	0,07	0,05
16c	16.1	0,15	0,18	0,2	0,25	0,31	0,35	0,31	0,26	0,24	0,22	0,17	0,2	0,23	0,26	0,26	0,26
		0,13	0,15	0,18	0,23	0,3	0,34	0,29	0,24	0,2	0,19	0,16	0,16	0,22	0,24	0,24	0,25
		0,13	0,14	0,19	0,23	0,3	0,34	0,3	0,24	0,19	0,17	0,16	0,15	0,2	0,22	0,23	0,22
	16.2	0,2	0,21	0,23	0,26	0,33	0,38	0,36	0,32	0,28	0,25	0,19	0,21	0,23	0,29	0,39	0,43
		0,18	0,19	0,21	0,25	0,32	0,38	0,35	0,3	0,25	0,22	0,18	0,17	0,21	0,27	0,37	0,42
		0,16	0,18	0,2	0,25	0,32	0,37	0,36	0,29	0,23	0,2	0,18	0,16	0,2	0,26	0,36	0,4
	16.3	0,22	0,23	0,24	0,26	0,33	0,42	0,43	0,38	0,32	0,27	0,2	0,22	0,23	0,34	0,41	0,37
		0,2	0,2	0,22	0,25	0,32	0,41	0,43	0,36	0,29	0,24	0,19	0,18	0,22	0,33	0,39	0,35
		0,19	0,2	0,21	0,25	0,32	0,4	0,43	0,36	0,27	0,22	0,19	0,17	0,21	0,32	0,38	0,34
	MÉDIA		0,17	0,19	0,21	0,25	0,32	0,38	0,36	0,31	0,25	0,22	0,18	0,18	0,22	0,28	0,34
D.PADRÃO		0,03	0,03	0,02	0,01	0,01	0,03	0,05	0,05	0,04	0,03	0,01	0,02	0,01	0,04	0,07	0,07

Tabela B.2 – Resultados CAA - parte 2.

RESULTADOS COEFICIENTE DE ABSORÇÃO ACÚSTICA (CAA)																	
Frequência Amostra		100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150
		17	17.1	0,18	0,2	0,23	0,26	0,29	0,29	0,25	0,23	0,22	0,21	0,17	0,2	0,25	0,26
0,17	0,19			0,22	0,25	0,29	0,29	0,25	0,21	0,19	0,18	0,16	0,17	0,23	0,24	0,23	0,26
0,14	0,17			0,2	0,24	0,28	0,29	0,25	0,2	0,16	0,16	0,15	0,15	0,22	0,22	0,22	0,24
17.2	0,18		0,2	0,23	0,23	0,23	0,21	0,17	0,17	0,19	0,2	0,15	0,19	0,21	0,23	0,23	0,2
	0,16		0,18	0,21	0,22	0,22	0,2	0,16	0,15	0,15	0,16	0,14	0,15	0,2	0,21	0,2	0,19
	0,15		0,17	0,2	0,21	0,21	0,2	0,16	0,14	0,13	0,14	0,14	0,13	0,19	0,19	0,19	0,17
17.3	0,16		0,18	0,21	0,26	0,33	0,37	0,31	0,25	0,22	0,2	0,16	0,21	0,22	0,24	0,29	0,27
	0,14		0,16	0,19	0,25	0,33	0,37	0,3	0,23	0,19	0,17	0,15	0,17	0,21	0,21	0,27	0,26
	0,12	0,15	0,19	0,25	0,33	0,36	0,31	0,23	0,17	0,15	0,15	0,16	0,2	0,2	0,27	0,23	
MÉDIA	0,16	0,18	0,21	0,24	0,28	0,29	0,24	0,20	0,18	0,17	0,15	0,17	0,21	0,22	0,24	0,23	
D.PADRÃO	0,02	0,02	0,01	0,02	0,05	0,07	0,06	0,04	0,03	0,02	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03	0,04	
18	18.1	0,21	0,23	0,24	0,23	0,21	0,19	0,17	0,19	0,2	0,19	0,16	0,19	0,2	0,23	0,28	0,29
		0,17	0,2	0,21	0,21	0,2	0,19	0,15	0,14	0,15	0,16	0,15	0,15	0,18	0,21	0,26	0,27
		0,15	0,19	0,2	0,21	0,2	0,18	0,16	0,14	0,12	0,14	0,14	0,13	0,17	0,19	0,25	0,24
	18.2	0,16	0,19	0,22	0,25	0,3	0,3	0,26	0,23	0,21	0,19	0,15	0,18	0,2	0,24	0,31	0,31
		0,15	0,16	0,2	0,24	0,29	0,3	0,25	0,21	0,17	0,16	0,14	0,14	0,18	0,22	0,29	0,3
		0,12	0,15	0,19	0,24	0,29	0,3	0,26	0,2	0,16	0,15	0,14	0,13	0,17	0,2	0,28	0,28
	18.3	0,18	0,19	0,19	0,18	0,17	0,17	0,16	0,17	0,18	0,18	0,14	0,18	0,21	0,23	0,24	0,25
		0,15	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,15	0,14	0,14	0,15	0,13	0,14	0,19	0,21	0,22	0,23
0,14		0,15	0,17	0,17	0,16	0,16	0,15	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,18	0,19	0,21	0,21	
MÉDIA	0,16	0,18	0,20	0,21	0,22	0,22	0,19	0,17	0,16	0,16	0,14	0,15	0,19	0,21	0,26	0,26	
D.PADRÃO	0,02	0,02	0,02	0,03	0,05	0,06	0,05	0,03	0,03	0,02	0,01	0,02	0,01	0,02	0,03	0,03	
19	19.1	0,2	0,22	0,25	0,27	0,25	0,22	0,18	0,19	0,2	0,18	0,16	0,2	0,18	0,18	0,19	0,2
		0,15	0,18	0,23	0,25	0,25	0,22	0,17	0,15	0,14	0,15	0,15	0,15	0,16	0,16	0,17	0,18
		0,14	0,17	0,21	0,25	0,25	0,21	0,18	0,14	0,12	0,13	0,14	0,14	0,15	0,14	0,16	0,16
	19.2	0,19	0,21	0,23	0,25	0,28	0,29	0,25	0,24	0,23	0,2	0,16	0,21	0,22	0,25	0,27	0,28
		0,14	0,17	0,2	0,24	0,28	0,29	0,24	0,2	0,18	0,17	0,15	0,17	0,2	0,22	0,25	0,27
		0,16	0,17	0,2	0,24	0,28	0,28	0,24	0,19	0,16	0,16	0,16	0,15	0,19	0,21	0,24	0,24
	19.3	0,19	0,18	0,18	0,16	0,14	0,13	0,12	0,15	0,17	0,17	0,13	0,17	0,18	0,2	0,23	0,24
		0,15	0,16	0,15	0,14	0,13	0,13	0,11	0,11	0,12	0,14	0,13	0,13	0,17	0,18	0,21	0,22
0,15		0,17	0,15	0,15	0,14	0,13	0,11	0,1	0,11	0,12	0,13	0,12	0,16	0,16	0,2	0,2	
MÉDIA	0,16	0,18	0,20	0,22	0,22	0,21	0,18	0,16	0,16	0,16	0,15	0,16	0,18	0,19	0,21	0,22	
D.PADRÃO	0,02	0,02	0,03	0,05	0,06	0,06	0,05	0,04	0,04	0,02	0,01	0,03	0,02	0,03	0,03	0,04	
20	20.1	0,18	0,19	0,22	0,25	0,27	0,27	0,22	0,2	0,19	0,18	0,14	0,17	0,21	0,25	0,26	0,24
		0,15	0,17	0,21	0,24	0,27	0,26	0,22	0,17	0,16	0,15	0,13	0,14	0,2	0,23	0,24	0,23
		0,15	0,16	0,2	0,23	0,26	0,26	0,22	0,17	0,13	0,13	0,13	0,12	0,18	0,21	0,23	0,21
	20.2	0,16	0,17	0,19	0,23	0,27	0,31	0,3	0,27	0,25	0,22	0,17	0,2	0,21	0,24	0,27	0,26
		0,14	0,16	0,18	0,22	0,27	0,31	0,29	0,25	0,22	0,2	0,16	0,16	0,2	0,22	0,25	0,25
		0,12	0,14	0,18	0,21	0,26	0,3	0,29	0,25	0,2	0,17	0,16	0,15	0,19	0,2	0,24	0,23
	20.3	0,19	0,2	0,22	0,25	0,3	0,33	0,31	0,29	0,27	0,25	0,21	0,24	0,29	0,41	0,37	0,31
		0,17	0,18	0,2	0,24	0,29	0,33	0,31	0,27	0,24	0,23	0,21	0,2	0,28	0,39	0,35	0,29
0,17		0,19	0,21	0,24	0,29	0,32	0,32	0,26	0,23	0,21	0,2	0,19	0,27	0,37	0,34	0,27	
MÉDIA	0,16	0,17	0,20	0,23	0,28	0,30	0,28	0,24	0,21	0,19	0,17	0,17	0,23	0,28	0,28	0,25	
D.PADRÃO	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04	0,03	0,03	0,04	0,08	0,05	0,03	

Tabela B.3 – Resultados CAA - parte 3.

RESULTADOS COEFICIENTE DE ABSORÇÃO ACÚSTICA (CAA)																	
Frequência Amostra		100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150
		21	21.1	0,17	0,18	0,21	0,23	0,25	0,25	0,22	0,21	0,2	0,19	0,15	0,18	0,19	0,19
0,14	0,16			0,2	0,22	0,25	0,25	0,21	0,18	0,17	0,16	0,15	0,14	0,18	0,17	0,17	0,18
0,14	0,16			0,19	0,22	0,25	0,25	0,22	0,18	0,16	0,16	0,14	0,13	0,17	0,15	0,16	0,16
21.2	0,16		0,18	0,21	0,25	0,29	0,31	0,27	0,24	0,22	0,2	0,15	0,17	0,18	0,22	0,31	0,42
	0,14		0,16	0,2	0,24	0,29	0,3	0,26	0,22	0,18	0,17	0,14	0,13	0,17	0,19	0,3	0,41
	0,14		0,16	0,2	0,24	0,29	0,29	0,26	0,21	0,17	0,15	0,14	0,12	0,15	0,18	0,29	0,39
21.3	0,2		0,21	0,23	0,24	0,24	0,23	0,2	0,21	0,22	0,2	0,16	0,2	0,23	0,21	0,21	0,23
	0,16		0,18	0,21	0,22	0,23	0,23	0,19	0,17	0,16	0,16	0,14	0,16	0,21	0,19	0,18	0,21
	0,14		0,16	0,2	0,21	0,23	0,23	0,2	0,16	0,14	0,14	0,14	0,14	0,2	0,17	0,17	0,19
MÉDIA	0,15	0,17	0,21	0,23	0,26	0,26	0,23	0,20	0,18	0,17	0,15	0,15	0,19	0,19	0,22	0,27	
D.PADRÃO	0,02	0,02	0,01	0,01	0,02	0,03	0,03	0,02	0,03	0,02	0,01	0,03	0,02	0,02	0,06	0,10	
22	22.1	0,95	0,91	0,8	0,64	0,43	0,26	0,18	0,21	0,28	0,29	0,18	0,21	0,24	0,26	0,28	0,26
		0,15	0,18	0,22	0,23	0,23	0,21	0,17	0,14	0,14	0,15	0,15	0,16	0,2	0,23	0,26	0,24
		0,14	0,17	0,2	0,22	0,22	0,2	0,18	0,14	0,13	0,14	0,14	0,14	0,19	0,21	0,25	0,22
	22.2	0,95	0,9	0,78	0,61	0,49	0,46	0,39	0,33	0,35	0,35	0,22	0,24	0,29	0,32	0,29	0,28
		0,14	0,15	0,19	0,23	0,32	0,42	0,4	0,31	0,24	0,21	0,19	0,19	0,24	0,29	0,26	0,26
		0,13	0,15	0,18	0,23	0,31	0,42	0,4	0,31	0,23	0,2	0,19	0,18	0,23	0,28	0,25	0,24
	22.3	0,22	0,22	0,25	0,27	0,29	0,28	0,25	0,24	0,23	0,22	0,17	0,18	0,2	0,28	0,35	0,28
		0,19	0,21	0,23	0,26	0,29	0,28	0,25	0,22	0,19	0,19	0,16	0,15	0,19	0,26	0,34	0,26
		0,16	0,18	0,21	0,25	0,28	0,28	0,25	0,21	0,18	0,16	0,15	0,14	0,17	0,26	0,33	0,24
MÉDIA	0,34	0,34	0,34	0,33	0,32	0,31	0,27	0,23	0,22	0,21	0,17	0,18	0,22	0,27	0,29	0,25	
D.PADRÃO	0,33	0,30	0,24	0,16	0,08	0,09	0,09	0,07	0,07	0,06	0,02	0,03	0,03	0,03	0,04	0,02	
23	23.1	0,16	0,18	0,2	0,23	0,25	0,26	0,22	0,21	0,2	0,19	0,15	0,18	0,19	0,25	0,21	0,23
		0,14	0,16	0,19	0,22	0,25	0,25	0,22	0,19	0,17	0,17	0,15	0,15	0,18	0,23	0,19	0,22
		0,13	0,16	0,19	0,22	0,25	0,25	0,23	0,18	0,16	0,15	0,15	0,14	0,17	0,22	0,18	0,2
	23.2	0,16	0,18	0,21	0,24	0,27	0,28	0,24	0,22	0,2	0,19	0,15	0,18	0,21	0,21	0,21	0,23
		0,15	0,17	0,2	0,23	0,27	0,28	0,24	0,2	0,17	0,17	0,15	0,15	0,2	0,19	0,19	0,22
		0,15	0,17	0,19	0,23	0,27	0,27	0,24	0,19	0,16	0,16	0,15	0,14	0,18	0,17	0,18	0,19
	23.3	0,21	0,22	0,25	0,26	0,27	0,23	0,2	0,19	0,2	0,19	0,15	0,17	0,2	0,24	0,29	0,33
		0,18	0,21	0,23	0,25	0,27	0,23	0,19	0,17	0,16	0,17	0,14	0,14	0,18	0,22	0,28	0,31
		0,17	0,19	0,22	0,24	0,26	0,22	0,2	0,16	0,14	0,15	0,14	0,12	0,17	0,2	0,27	0,3
MÉDIA	0,16	0,18	0,21	0,24	0,26	0,25	0,22	0,19	0,17	0,17	0,15	0,15	0,19	0,21	0,22	0,25	
D.PADRÃO	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,00	0,02	0,01	0,02	0,04	0,05	
24	24.1	0,19	0,21	0,22	0,21	0,19	0,17	0,14	0,15	0,17	0,17	0,14	0,18	0,19	0,22	0,26	0,28
		0,17	0,19	0,2	0,19	0,18	0,17	0,13	0,13	0,13	0,14	0,13	0,14	0,18	0,2	0,24	0,27
		0,16	0,18	0,2	0,19	0,18	0,17	0,15	0,12	0,11	0,12	0,13	0,13	0,17	0,18	0,22	0,24
	24.2	0,2	0,2	0,22	0,25	0,31	0,35	0,36	0,32	0,29	0,26	0,2	0,22	0,25	0,38	0,41	0,31
		0,17	0,19	0,2	0,24	0,31	0,34	0,35	0,31	0,26	0,23	0,19	0,18	0,24	0,35	0,4	0,3
		0,17	0,17	0,2	0,23	0,3	0,34	0,36	0,31	0,24	0,21	0,19	0,17	0,22	0,33	0,39	0,27
	24.3	0,18	0,2	0,22	0,25	0,26	0,24	0,2	0,19	0,19	0,18	0,15	0,19	0,19	0,21	0,22	0,22
		0,16	0,18	0,21	0,24	0,25	0,24	0,19	0,16	0,15	0,15	0,15	0,15	0,18	0,19	0,19	0,21
		0,13	0,17	0,2	0,23	0,25	0,24	0,2	0,16	0,13	0,14	0,14	0,14	0,16	0,17	0,19	0,18
MÉDIA	0,17	0,19	0,21	0,23	0,25	0,25	0,23	0,21	0,19	0,18	0,16	0,17	0,20	0,25	0,28	0,25	
D.PADRÃO	0,02	0,01	0,01	0,02	0,05	0,07	0,09	0,08	0,06	0,04	0,03	0,03	0,03	0,08	0,09	0,04	

Tabela B.4 – Resultados CAA - parte 4.

RESULTADOS COEFICIENTE DE ABSORÇÃO ACÚSTICA (CAA)																	
Frequência Amostra		100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150
		25	25.1	0,2	0,19	0,19	0,2	0,25	0,38	0,54	0,53	0,39	0,29	0,22	0,24	0,31	0,59
0,17	0,17			0,17	0,19	0,25	0,38	0,54	0,52	0,36	0,27	0,21	0,2	0,3	0,57	0,53	0,33
0,17	0,16			0,17	0,19	0,24	0,38	0,54	0,51	0,35	0,26	0,21	0,19	0,29	0,56	0,53	0,31
25.2	0,2		0,21	0,22	0,22	0,22	0,21	0,19	0,2	0,22	0,2	0,16	0,19	0,2	0,21	0,22	0,23
	0,17		0,18	0,2	0,21	0,21	0,21	0,18	0,16	0,16	0,17	0,15	0,14	0,19	0,19	0,2	0,21
	0,14		0,16	0,18	0,2	0,21	0,2	0,18	0,15	0,14	0,14	0,14	0,13	0,17	0,19	0,19	0,18
25.3	0,18		0,19	0,22	0,26	0,3	0,31	0,26	0,23	0,22	0,2	0,16	0,19	0,22	0,25	0,23	0,21
	0,16		0,18	0,21	0,25	0,29	0,3	0,25	0,21	0,19	0,18	0,15	0,16	0,21	0,23	0,21	0,19
	0,14	0,15	0,19	0,24	0,28	0,3	0,26	0,2	0,16	0,15	0,14	0,14	0,19	0,21	0,2	0,17	
MÉDIA	0,17	0,18	0,19	0,22	0,25	0,30	0,33	0,30	0,24	0,21	0,17	0,18	0,23	0,33	0,32	0,24	
D.PADRÃO	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,07	0,15	0,16	0,09	0,05	0,03	0,03	0,05	0,17	0,16	0,06	
26	26.1	0,17	0,18	0,21	0,24	0,27	0,28	0,25	0,23	0,22	0,21	0,17	0,19	0,22	0,26	0,22	0,22
		0,15	0,18	0,2	0,23	0,26	0,27	0,24	0,21	0,19	0,19	0,16	0,16	0,21	0,24	0,2	0,2
		0,13	0,15	0,19	0,22	0,26	0,27	0,25	0,2	0,17	0,17	0,16	0,15	0,2	0,23	0,19	0,18
	26.2	0,19	0,21	0,24	0,24	0,23	0,2	0,16	0,16	0,17	0,17	0,13	0,17	0,2	0,24	0,26	0,26
		0,18	0,19	0,22	0,24	0,22	0,2	0,16	0,14	0,14	0,15	0,13	0,14	0,19	0,22	0,24	0,24
		0,16	0,17	0,21	0,23	0,22	0,2	0,17	0,13	0,11	0,13	0,12	0,13	0,18	0,2	0,23	0,22
	26.3	0,22	0,23	0,24	0,25	0,26	0,24	0,22	0,23	0,23	0,21	0,17	0,2	0,24	0,37	0,37	0,27
		0,18	0,2	0,22	0,24	0,25	0,23	0,2	0,2	0,19	0,19	0,16	0,15	0,22	0,35	0,35	0,26
0,17		0,19	0,21	0,23	0,25	0,23	0,22	0,19	0,17	0,17	0,16	0,14	0,21	0,34	0,35	0,24	
MÉDIA	0,17	0,19	0,22	0,24	0,25	0,24	0,21	0,19	0,18	0,18	0,15	0,16	0,21	0,27	0,27	0,23	
D.PADRÃO	0,02	0,02	0,02	0,01	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,06	0,07	0,03	
27	27.1	0,23	0,22	0,22	0,2	0,2	0,17	0,17	0,2	0,21	0,19	0,15	0,18	0,18	0,21	0,28	0,31
		0,18	0,19	0,19	0,18	0,19	0,16	0,15	0,15	0,15	0,16	0,14	0,13	0,16	0,19	0,25	0,29
		0,18	0,19	0,18	0,17	0,18	0,15	0,15	0,14	0,14	0,15	0,13	0,11	0,15	0,17	0,24	0,26
	27.2	0,17	0,19	0,21	0,24	0,28	0,29	0,25	0,24	0,23	0,2	0,17	0,2	0,22	0,24	0,24	0,25
		0,15	0,17	0,19	0,23	0,27	0,28	0,24	0,21	0,19	0,18	0,16	0,16	0,2	0,22	0,22	0,23
		0,13	0,15	0,18	0,23	0,27	0,28	0,25	0,21	0,18	0,17	0,16	0,15	0,19	0,21	0,21	0,22
	27.3	0,16	0,15	0,13	0,12	0,11	0,1	0,1	0,13	0,15	0,15	0,12	0,16	0,19	0,28	0,34	0,26
		0,13	0,13	0,12	0,1	0,1	0,1	0,08	0,09	0,1	0,12	0,11	0,12	0,18	0,26	0,32	0,25
0,14		0,13	0,11	0,11	0,1	0,1	0,09	0,07	0,09	0,11	0,11	0,11	0,17	0,25	0,31	0,22	
MÉDIA	0,16	0,17	0,17	0,18	0,19	0,18	0,16	0,16	0,16	0,16	0,14	0,15	0,18	0,23	0,27	0,25	
D.PADRÃO	0,03	0,03	0,04	0,05	0,07	0,08	0,06	0,06	0,04	0,03	0,02	0,03	0,02	0,03	0,04	0,03	
28	28.1	0,17	0,17	0,19	0,22	0,28	0,34	0,33	0,3	0,26	0,23	0,19	0,22	0,27	0,29	0,26	0,24
		0,15	0,16	0,17	0,21	0,27	0,34	0,33	0,29	0,24	0,21	0,18	0,19	0,26	0,28	0,24	0,22
		0,11	0,12	0,16	0,2	0,27	0,34	0,33	0,27	0,22	0,19	0,18	0,18	0,25	0,27	0,23	0,2
	28.2	0,17	0,18	0,19	0,19	0,18	0,18	0,16	0,15	0,17	0,17	0,13	0,17	0,21	0,25	0,24	0,22
		0,14	0,16	0,17	0,18	0,17	0,17	0,14	0,14	0,13	0,14	0,13	0,14	0,2	0,23	0,22	0,21
		0,16	0,18	0,17	0,18	0,17	0,17	0,15	0,13	0,13	0,14	0,13	0,12	0,19	0,22	0,21	0,18
	28.3	0,22	0,21	0,19	0,15	0,14	0,13	0,12	0,16	0,18	0,18	0,15	0,19	0,23	0,28	0,29	0,31
		0,19	0,17	0,16	0,14	0,13	0,12	0,1	0,11	0,13	0,15	0,13	0,15	0,21	0,25	0,27	0,29
0,18		0,18	0,16	0,14	0,13	0,12	0,11	0,09	0,1	0,13	0,14	0,13	0,2	0,24	0,27	0,28	
MÉDIA	0,17	0,17	0,17	0,18	0,19	0,21	0,20	0,18	0,17	0,17	0,15	0,17	0,22	0,26	0,25	0,24	
D.PADRÃO	0,03	0,02	0,01	0,03	0,06	0,09	0,10	0,08	0,05	0,03	0,02	0,03	0,03	0,02	0,02	0,04	

APÊNDICE C – RESULTADOS DE ESPECTROSCOPIA DE RESSONÂNCIA MAGNÉTICA NUCLEAR NO DOMÍNIO DO TEMPO (RMN-DT)

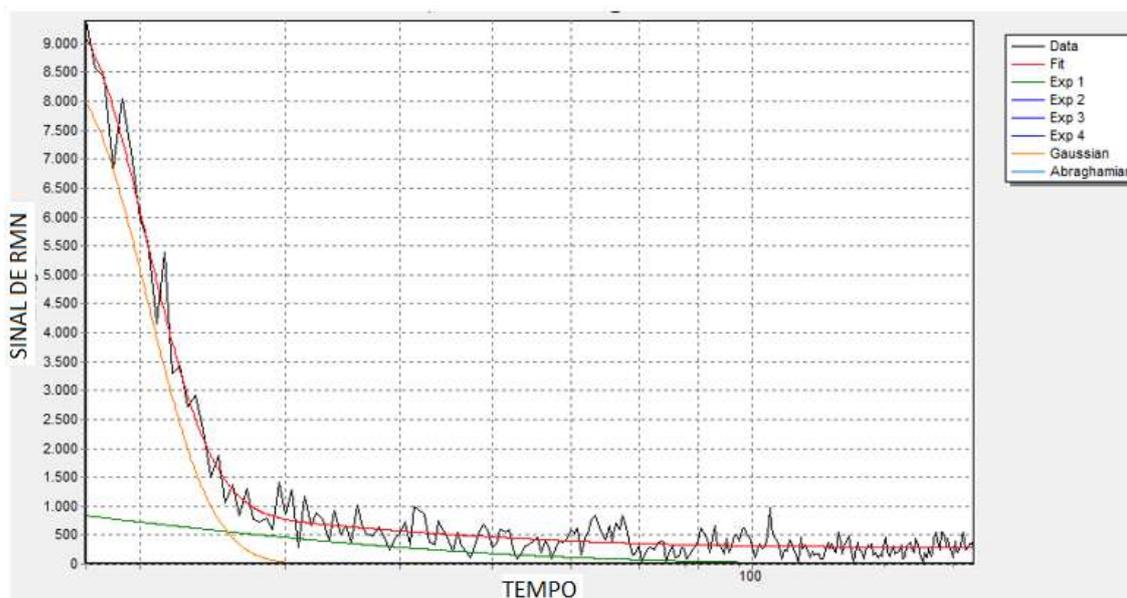


Figura C.1 – RMN-DT da amostra 8.

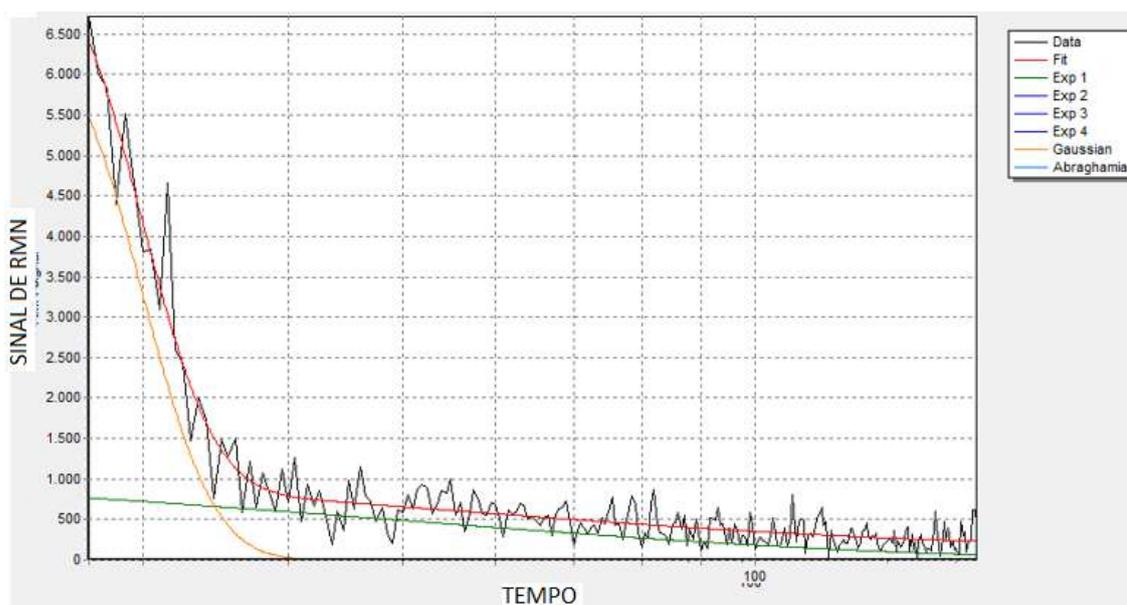


Figura C.2 – RMN-DT da amostra 11.

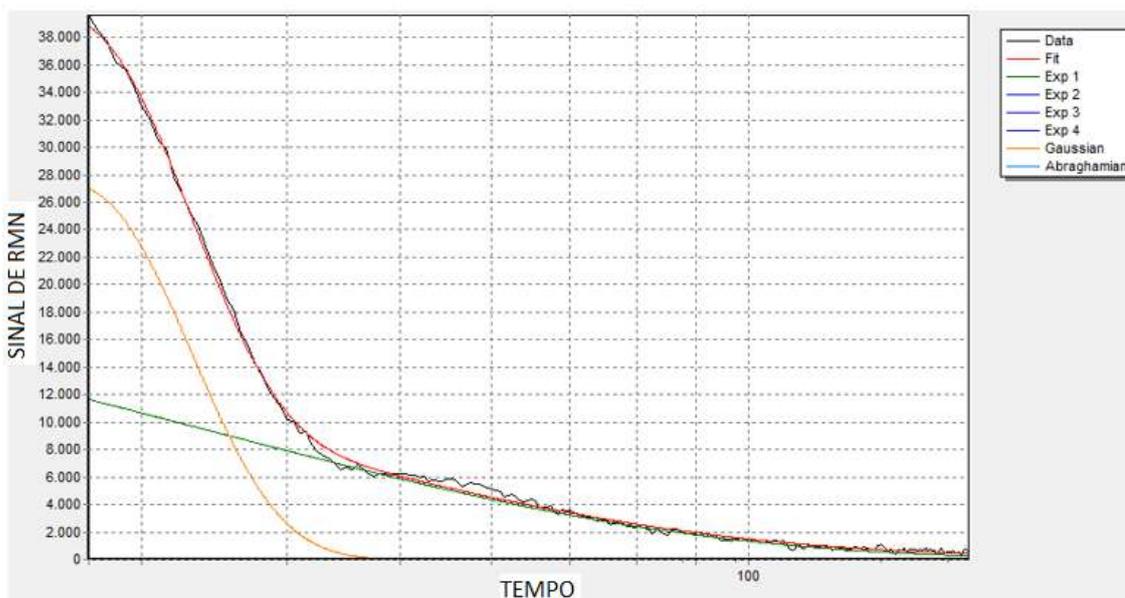


Figura C.3 – RMN-DT da amostra 13.

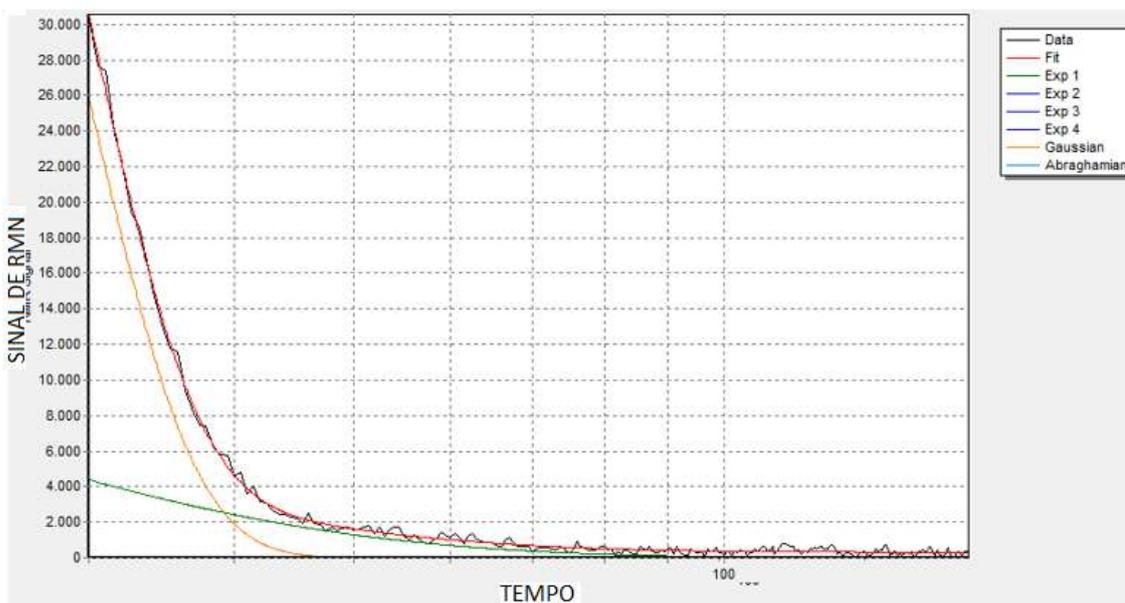


Figura C.4 – RMN-DT da amostra 14.

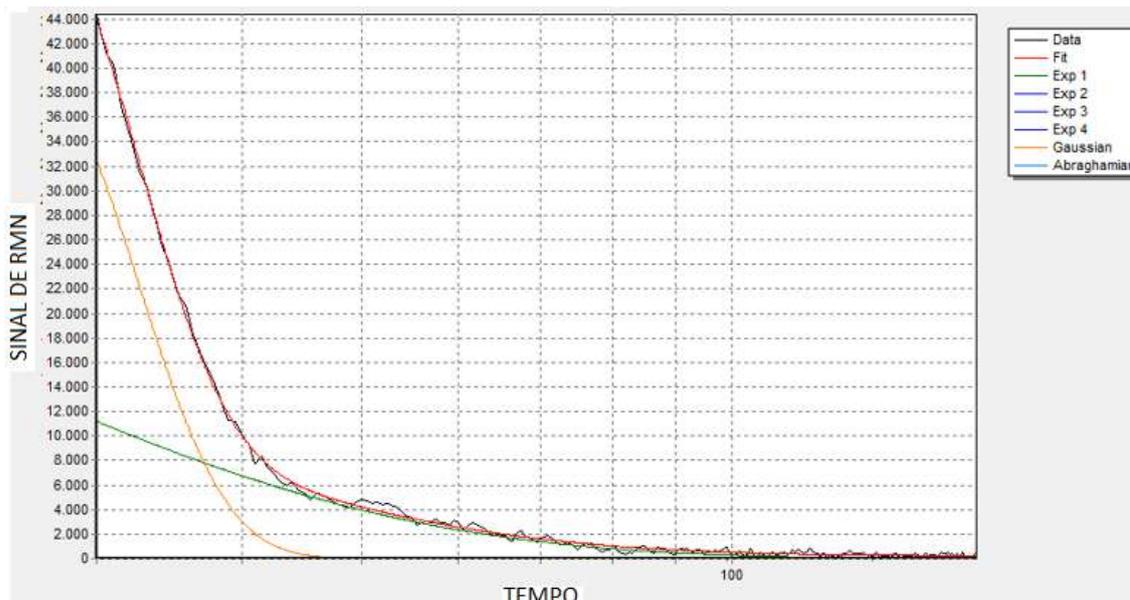


Figura C.5 – RMN-DT da amostra 15.

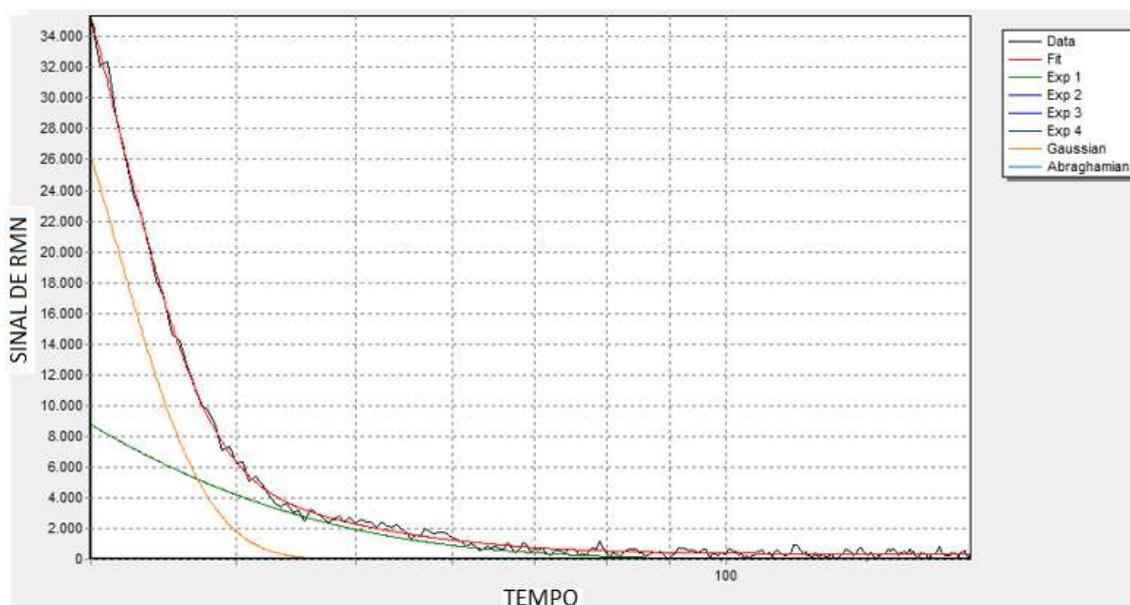


Figura C.6 – RMN-DT da amostra 16.

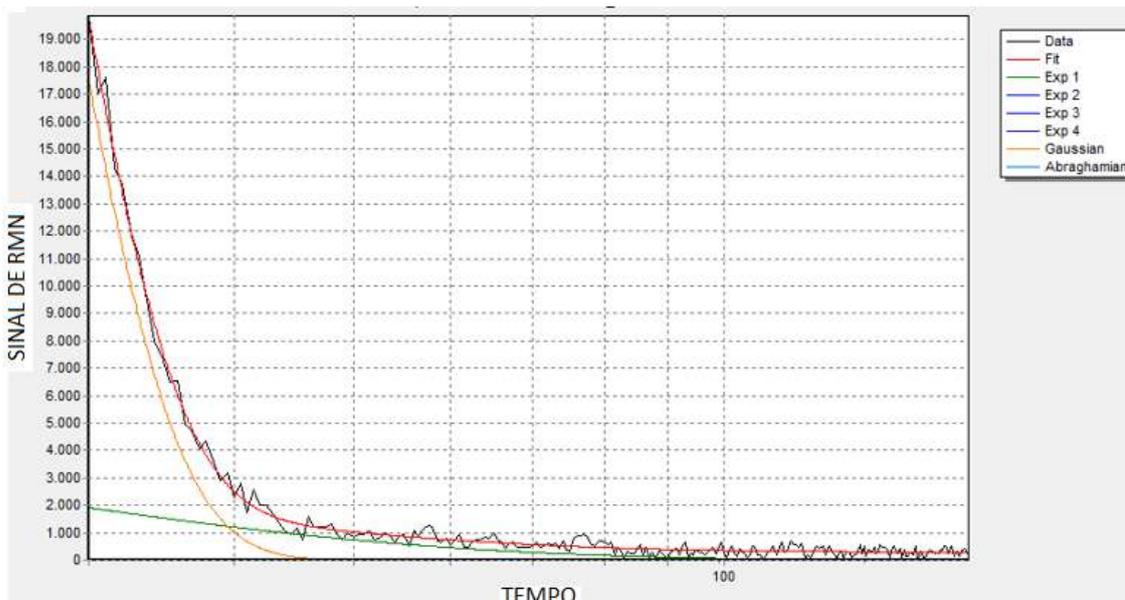


Figura C.7 – RMN-DT da amostra 17.

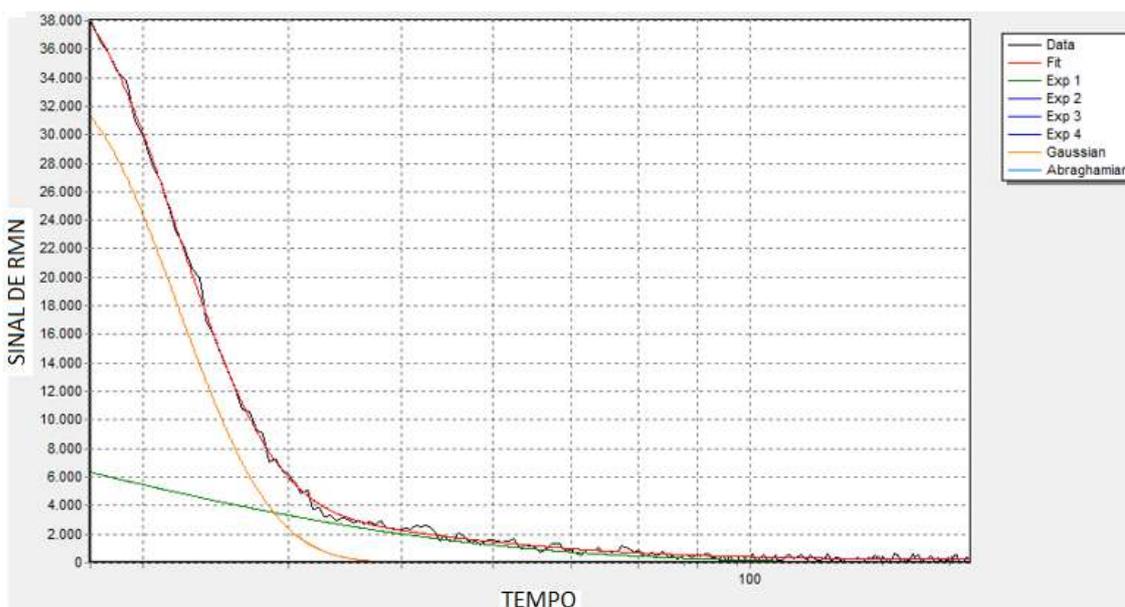


Figura C.8 – RMN-DT da amostra 18.

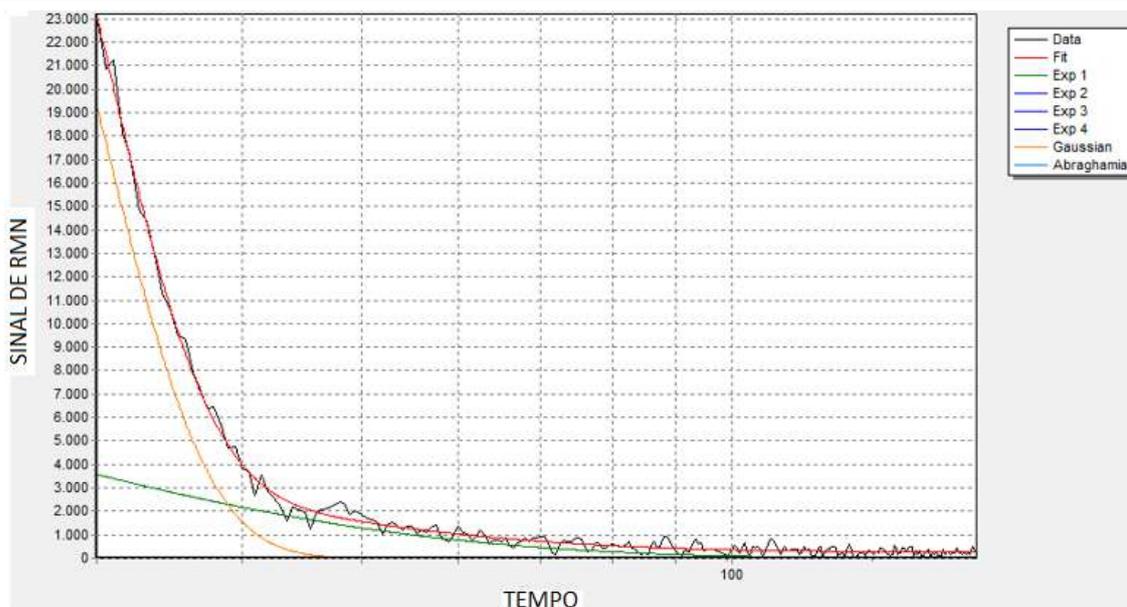


Figura C.9 – RMN-DT da amostra 19.

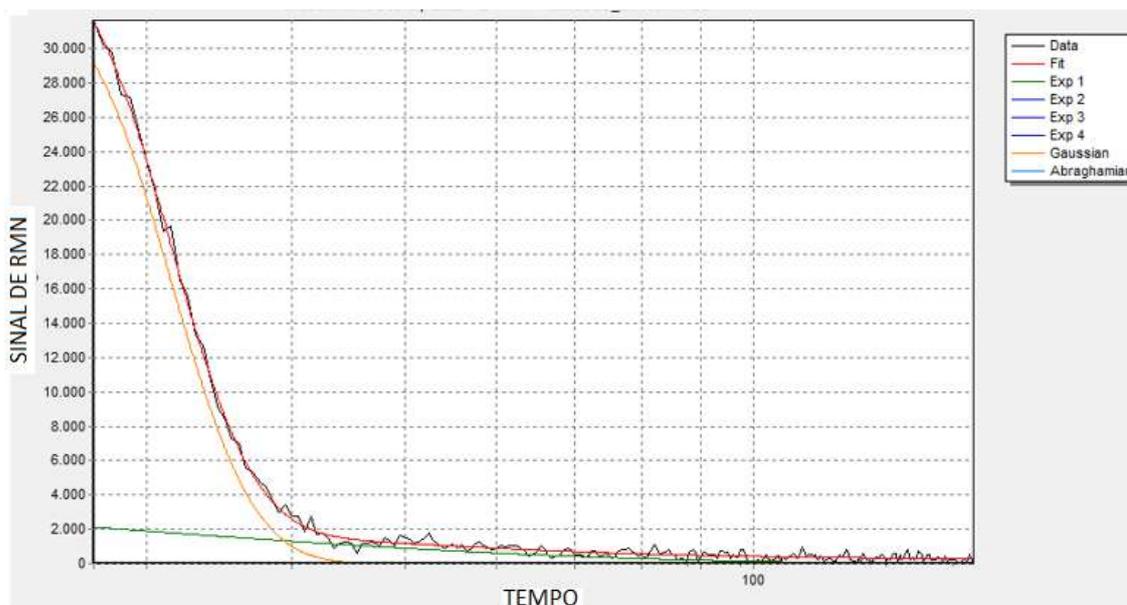


Figura C.10 – RMN-DT da amostra 20.

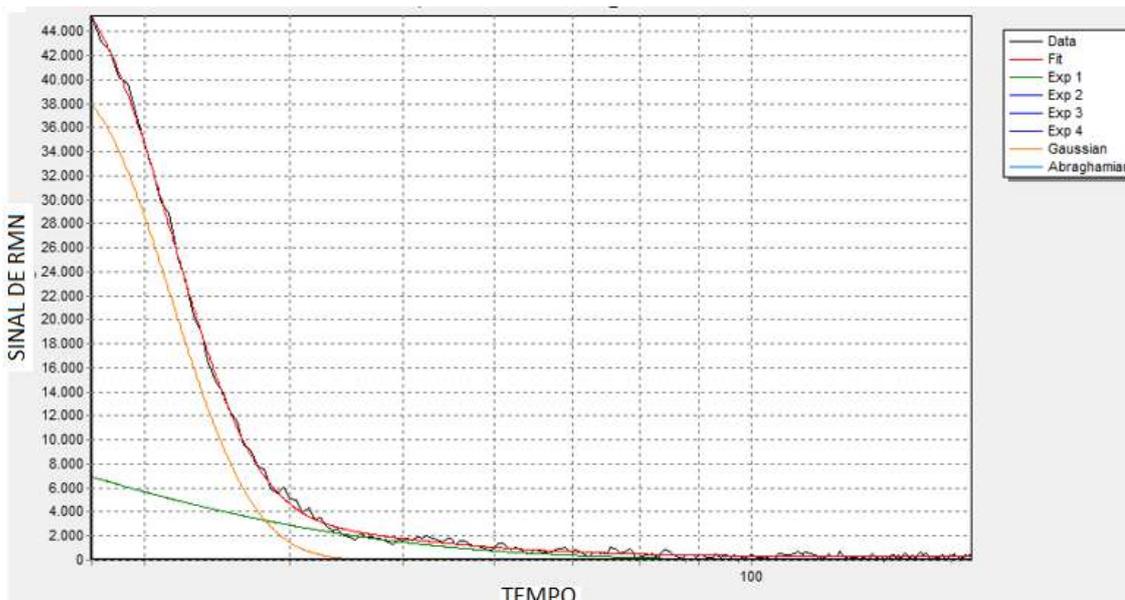


Figura C.11 – RMN-DT da amostra 21.

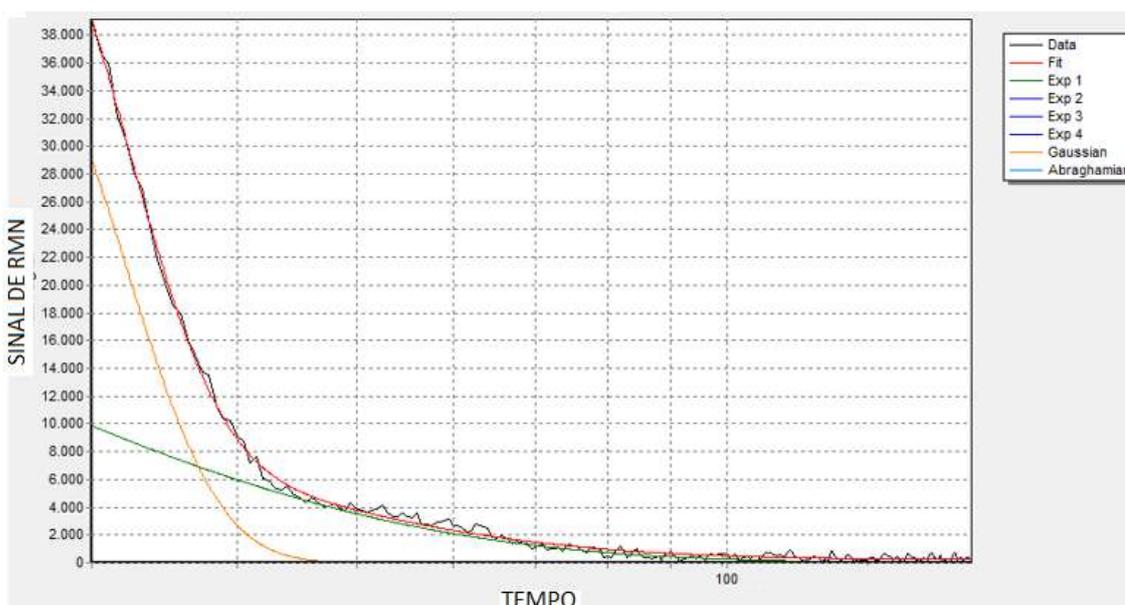


Figura C.12 – RMN-DT da amostra 22.

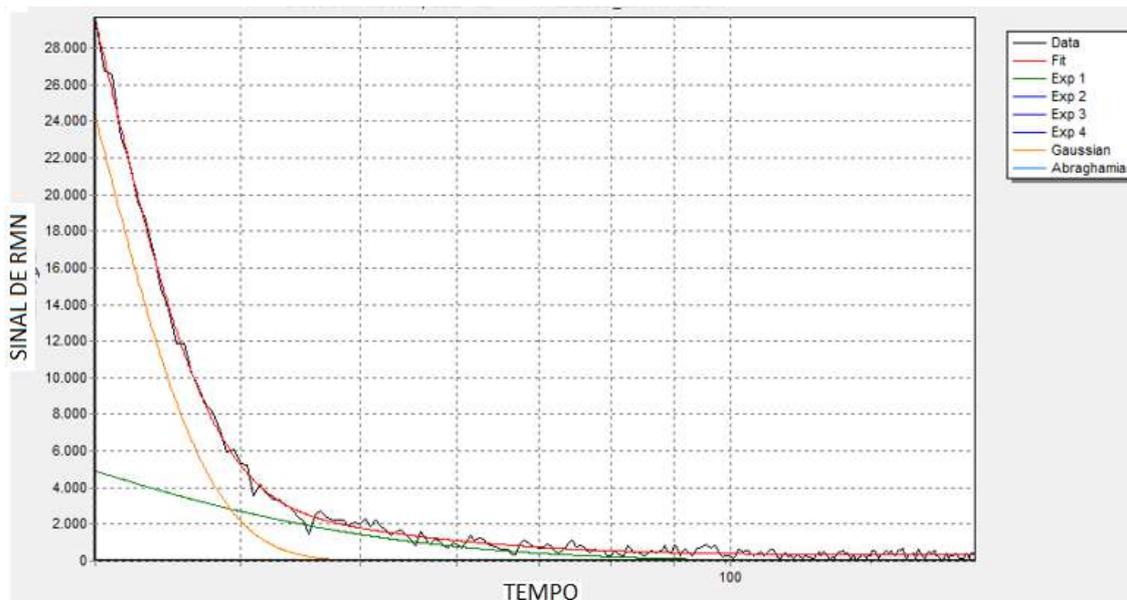


Figura C.13 – RMN-DT da amostra 23.

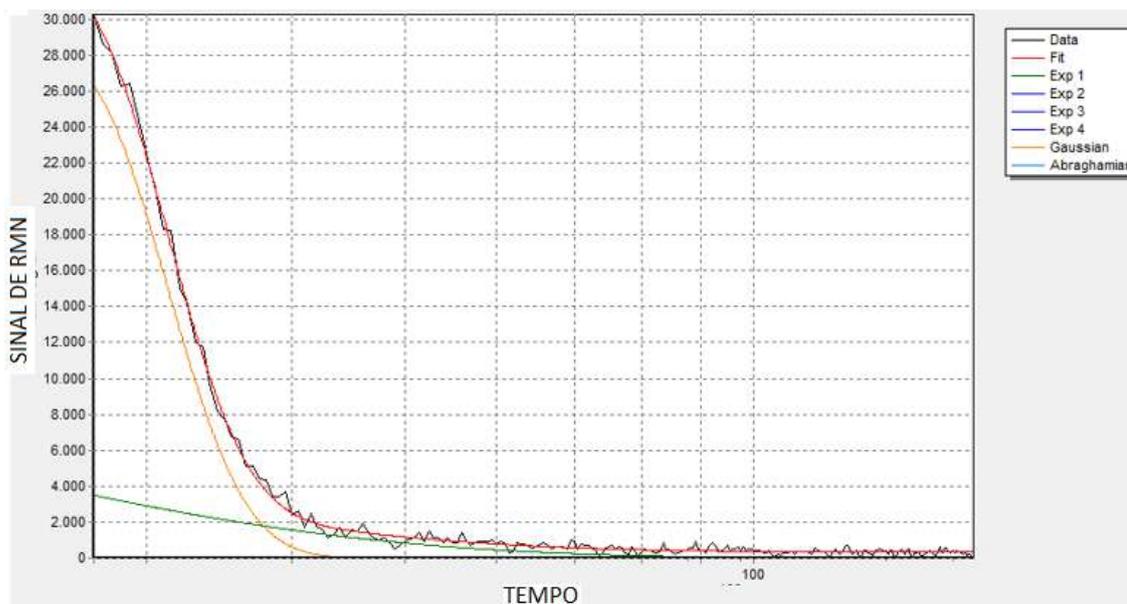


Figura C.14 – RMN-DT da amostra 24.

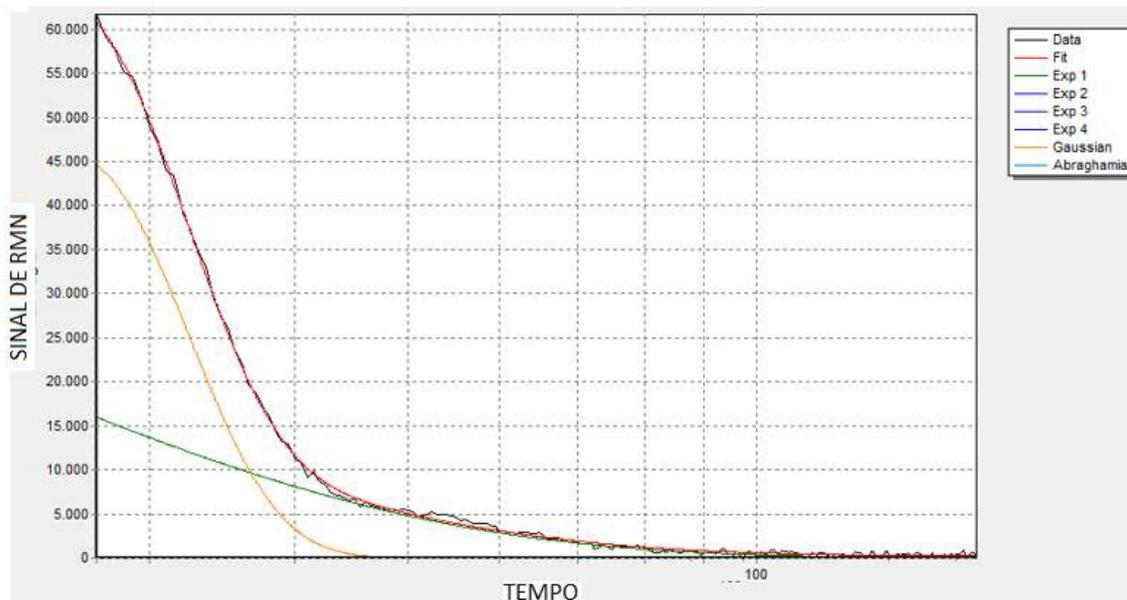


Figura C.15 – RMN-DT da amostra 25.

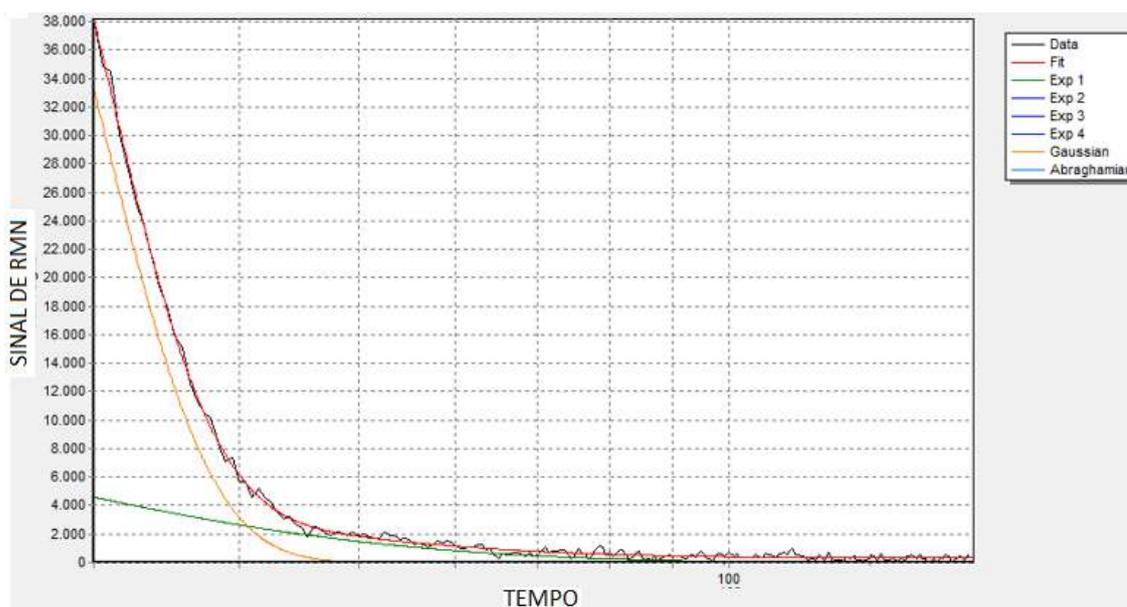


Figura C.16 – RMN-DT da amostra 26.

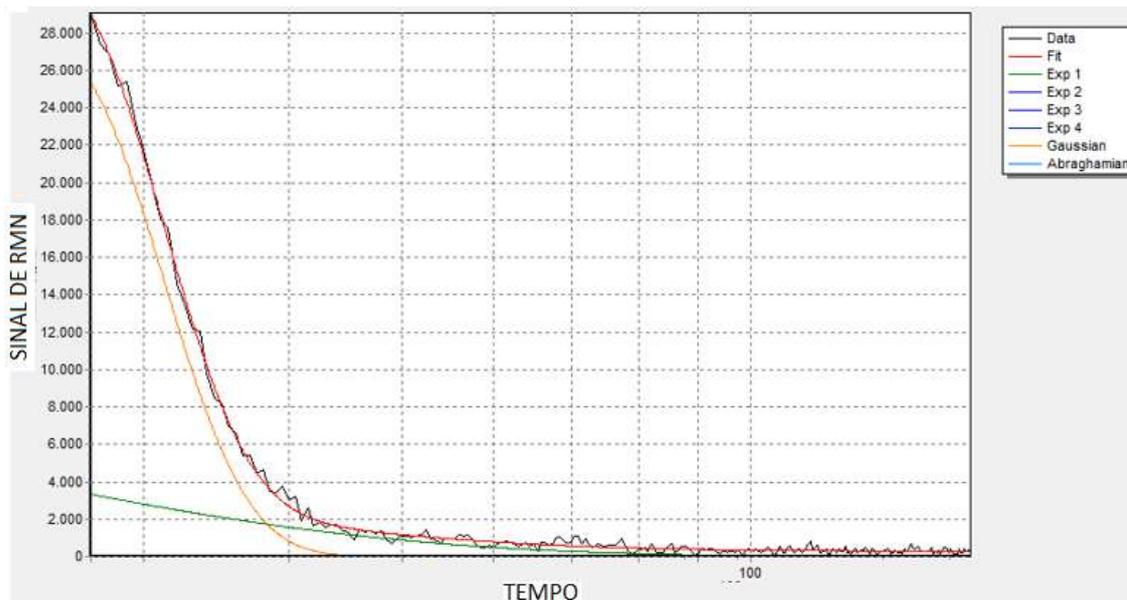


Figura C.17 – RMN-DT da amostra 27.

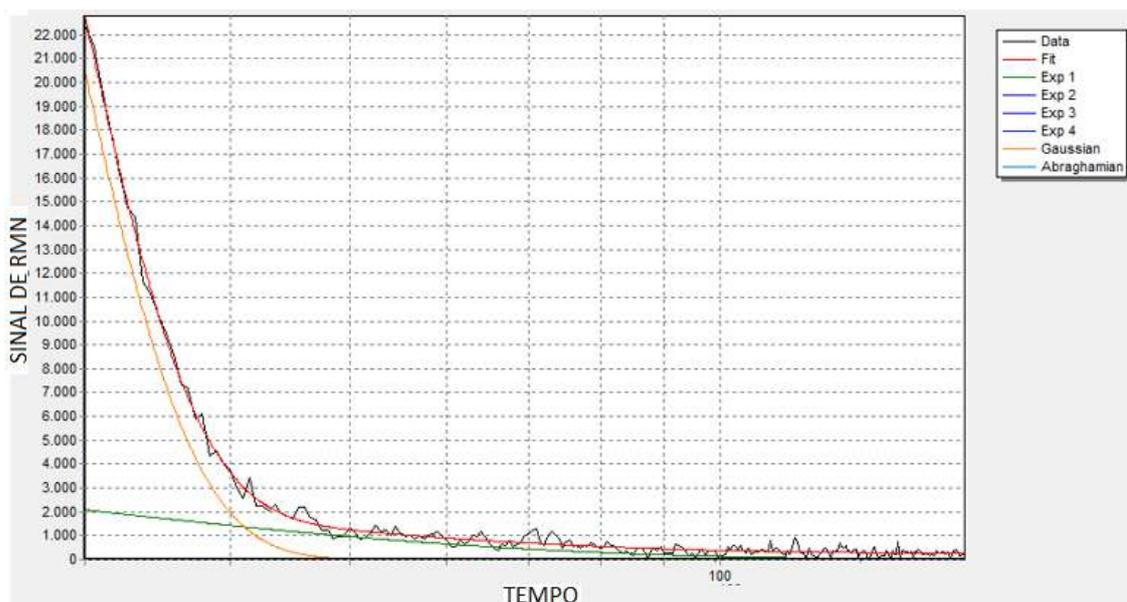


Figura C.18 – RMN-DT da amostra 28.