

RECICLAGEM DE RESÍDUO DE CONCRETAGEM E ASFALTAMENTO NO DESENVOLVIMENTO DE ROCHA AGLOMERADA

DOI: <http://dx.doi.org/10.55449/congea.16.25.III-021>

Marcelo Barcellos Reis (*), Elaine Aparecida Santos Carvalho, Geovana Carla Girondi Delaqua, Carlos Maurício Fontes Vieira

* Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF / CCT / LAMAV – Campos dos Goytacazes, Rio de Janeiro/Brasil - mbarcellosreis@gmail.com

RESUMO

Este trabalho avaliou a viabilidade técnica e ambiental de produzir rocha aglomerada a partir de resíduos de concretagem e asfaltamento (RCD), substituindo agregados naturais por frações grosseira, média e fina do RCD. O planejamento de misturas adotou o modelo Simplex Centróide para maximizar densidade seca e reduzir vazios; a demanda mínima de resina foi estimada e fixou-se teor operacional de 15% para assegurar molhabilidade sob vibrocompressão a vácuo. As placas foram moldadas em vácuo (≈ 600 mmHg), prensadas a 10 MPa com aquecimento a 90 °C e pós-cura a 100 °C por 24 h. A caracterização incluiu FRX do RCD (base dominada por SiO_2 , CaO e Al_2O_3), FTIR da resina poliéster ortoftálica e ensaios conforme ABNT NBR 15845 (densidade aparente, porosidade e absorção), flexão em três pontos, compressão uniaxial, dilatometria e resistência ao ataque químico. Entre dez formulações, as composições #4, #5 e #8 apresentaram os melhores empacotamentos; a #5 (RCD-5) destacou-se com maior densidade aparente de placa ($\approx 2,26$ g/cm³), baixa porosidade ($\approx 1,55\%$), absorção reduzida ($\approx 0,69\%$) e resistência à flexão de $\approx 34,7$ MPa. Em compressão uniaxial, RCD-5 atingiu ≈ 112 MPa, dentro da faixa de rochas para revestimento, enquanto a dilatometria indicou coeficiente linear compatível com aplicações internas. As micrografias (MEV) evidenciaram morfologia rugosa dos grãos e boa ancoragem partícula-matriz na RCD-5, explicando a transferência eficiente de tensões e os ganhos mecânicos. No ensaio de ataque químico, observou-se estabilidade cromática frente a soluções neutras/oxidantes diluídas e maior sensibilidade a ácidos orgânicos e HCl concentrado, coerente com a natureza da matriz poliéster. Os resultados demonstram que o RCD, convenientemente classificado e graduado, pode compor rocha artificial com propriedades físicas e mecânicas competitivas, reduzindo a demanda por agregados naturais e a disposição de resíduos em aterros. Concluímos que a rota proposta é tecnicamente promissora para bancadas, pisos e escadas, alinhando desempenho, custo e benefícios de economia circular.

PALAVRAS-CHAVE: Resíduo de concretagem; Reciclegem; Rocha aglomerada; Meio ambiente.

INTRODUÇÃO

A construção civil é uma das atividades mais antigas conhecidas na humanidade. A produção e aplicação de concreto para uso em edificações está presente em todo o planeta, independente da condição econômica e geográfica de cada país, tendo em sua composição o cimento Portland, que é o segundo material mais consumido no mundo, atrás apenas da água [1].

Assim, considerando seu alto consumo, pesquisas buscam por longos anos avaliar diversas condições de desempenho tecnológico [2], durabilidade [3], potencial para aplicação de novos materiais [4], e questões relacionadas à sua sustentabilidade [5] em diversos materiais de base, como concreto e argamassas. Os resíduos de construção e demolição são uma das principais fontes de produção de agregados reciclados em todo o mundo, devido à sua elevada disponibilidade e compatibilidade [6], [7].

Na atualidade, com foco na preservação do meio ambiente intensificou-se o reaproveitamento dos resíduos sólidos na construção civil requerendo, regulamentações que sustentem e orientem os procedimentos de descarte e reaproveitamento adequado dos resíduos. O reaproveitamento garante diretamente a diminuição de extração de recursos naturais. Calcula-se que a construção civil consuma entre 14% a 50% dos recursos naturais disponíveis no planeta [8]. Inúmeras pesquisas têm sido desenvolvidas para avaliar a utilização de agregados reciclados na construção civil. É consenso no meio científico que a geração de resíduos da construção civil e demolição é considerada atividade insustentável, pois causa constante deterioração ao meio ambiente. Estima-se em até 48% do total de resíduos sólidos urbanos gerados em escala global [9].

O crescimento da indústria da construção civil tem elevado consideravelmente o consumo de matérias-primas naturais e a produção de resíduos, intensificando problemas derivados de procedimentos inadequados, como a disposição sem controle desses resíduos nas grandes cidades [10]. Destaca-se no Brasil, por exemplo, que as construtoras são responsáveis por 52% dos resíduos de construção civil gerados, enquanto o restante é gerado informalmente. Além disso, por serem materiais volumosos e de elevada massa específica, a disposição de resíduos da construção civil gera um grande impacto ambiental, irreversível [11]. Porém, é deficitário estudos que buscam a utilização do resíduo da construção civil e demolição na elaboração de pedras artificiais para uso como acabamento: bancadas de cozinhas e banheiros, revestimento de escadas e outros; em substituição a pedras naturais (ornamentais) e até mesmo diversas pedras artificiais comerciais.

Esta pesquisa busca este nicho. Substituir, na produção de pedras artificiais a matéria-prima padrão (resíduos de rochas ornamentais) por resíduos da construção civil e demolição; buscando atingir resultados positivos em comparação a inúmeras pesquisas já desenvolvidas na área de rochas artificiais.

A escolha de uma resina termofixa poliéster ortoftálica, para a matriz polimérica, ocorreu devido a relação: custo-benefício. As resinas produzidas com anidrido ortoftálico, ou seja, as denominadas ortoftálicas, são aplicadas na maioria dos casos em função de seu baixo custo, embora apresentem limitada estabilidade térmica e resistência química [12]. Sendo assim, seu baixo custo aliado as condições primárias de resistência mecânica, física e química são, inicialmente, perfeitas para a pesquisa. Neste contexto, a fim de aliviar a pressão sobre o meio ambiente causada também pela mineração de rochas ornamentais, esta pesquisa busca novas variáveis para destinação dos resíduos oriundos da construção civil tendo na composição de pedras artificiais a adição deste resíduo uma possibilidade impar a ser analisada, de forma inédita e experimental; evidenciando diretamente o conceito de desenvolvimento sustentável (ambiental e econômico). Esta possibilidade busca não só redução de custos na produção de pedras artificiais, mas também promover a utilização, em larga escala, e com grande valor agregado, dos resíduos sólidos de um dos setores que mais cresce no planeta, a construção civil, que tem maciçamente seu descarte final em aterros sanitários.

OBJETIVOS

Este trabalho tem por objetivo desenvolver e validar uma rocha aglomerada a partir da reciclagem de resíduos de concretagem e asfaltamento (RCD), substituindo agregados tradicionais por frações grosseira, média e fina do RCD. Buscamos otimizar o empacotamento granulométrico via modelo Simplex Centróide para maximizar densidade seca e minimizar vazios; estimar a demanda mínima de resina (TMR) e definir um teor operacional para adequada molhabilidade sob vibrocompressão a vácuo; fabricar placas em condições controladas de vácuo, pressão e temperatura; e caracterizar o material quanto à densidade, porosidade, absorção, resistência à flexão e compressão, ataque químico, dilatação térmica e microestrutura (MEV), comparando com referências normativas (ABNT NBR 15845) e literatura. Pretendeu-se demonstrar viabilidade técnica e ganhos ambientais/econômicos pela valorização do RCD em aplicações de revestimentos e bancadas.

METODOLOGIA

MATERIAIS

O resíduo da construção civil e demolição (RCD) foi coletado na Usina de Beneficiamento e Britagem de Resíduos Inertes, localizada na CODIN, de propriedade da Prefeitura Municipal de Campos dos Goytacazes (Rio de Janeiro / Brasil), sob concessão da Vital Engenharia S/A. A resina poliéster Arazyn 25108T-10 (ortoftálica, transparente, pré acelerada de baixa viscosidade) da marca Redelease (Lote: 117346) e o catalizador Mekp Butanox-M50 (peróxido de metil etil cetona, média reatividade, dessensibilizado com dimetilftalato), também da marca Redelease (Lote: 151011) foram obtidos no comércio local.

MÉTODOS

A caracterização química do RCD foi realizada por FRX no Instituto SENAI de Tecnologia em Cerâmica no município de Criciúma - SC/Brasil; através de um Espectrômetro de Fluorescência de Raios X - Modelo: ZSX PRIMUS II (RIGAKU). A determinação da análise química por FRX seguiu o método B100-PR CR 098. As características dos grupos funcionais dos componentes da resina poliéster foram confirmados por FTIR, na UENF/CCT/LAMAV por um equipamento IR Prestige-21 SHIMADZU. A redução granulométrica do RCD foi obtida pelo método de peneiramento fino conforme ABNT NBR 7181 [13], conforme Tabela 1, de modo a obter três faixas granulométricas: partículas grossas, médias e finas.

Tabela 1. Composições granulométricas

Classe	Peneira (Mesh #)	Faixa Granulométrica (mm)
Grosso	10 - 40	2.000 – 0.420
Médio	40 - 200	0.420 – 0.075
Fino	< 200	< 0.075

Foram propostas 10 misturas diferentes utilizando o Modelo Simplex Centróide, conforme Figura 1. O objetivo dessas 10 misturas foi obter aquela com máxima densidade seca; melhor empacotamento. A densidade de cada mistura foi calculada de acordo com a norma brasileira ABNT NBR MB 3388 [14]. Em diversas pesquisas científicas são aplicadas planejamento fatorial. Javorsky e outros [15], utilizaram um planejamento fatorial completo no estudo da adesão de poli cloreto de vinila (PVC) em aço inox para aplicações automotivas. Romli e outros [16] utilizaram um planejamento fatorial completo com dois níveis para o fator tempo de cura e três níveis para os fatores volume de fibra, e carga compressiva, em um estudo que trata de um compósito epóxi reforçado por fibra.

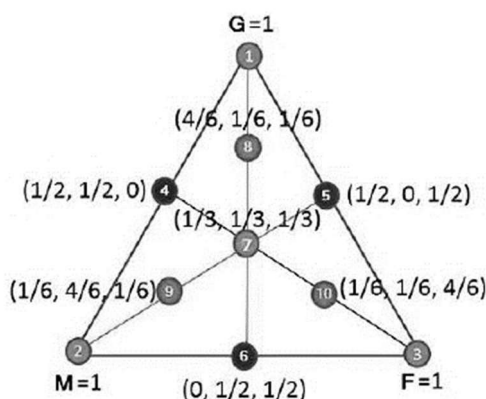


Figura 1. Diagrama ternário do modelo cúbico completo simplex

Cada mistura foi acondicionada em um recipiente de aço de 1.013,24 cm³ acoplado a um peso de 10kg, sob vibração de 60 Hz/10 minutos. A Tabela 2 apresenta a densidade de vibração das 10 misturas propostas na Figura 1.

Tabela 2. Densidade de vibração – 10 misturas

MISTURA	DENSIDADE (g/cm ³)
1	1.5692 ± 0.0081
2	1.6301 ± 0.0199
3	1.4936 ± 0.0047
4	1.7798 ± 0.0047
5	1.7403 ± 0.0163
6	1.5544 ± 0.0040
7	1.6564 ± 0.0101
8	1.7386 ± 0.0222
9	1.6482 ± 0.0201
10	1.6005 ± 0.0101

A Tabela 3 apresenta o resultado realizado por picnometria, das 3 misturas com maiores densidades aparente seca e consequentemente com melhores empacotamentos (misturas: #4, #5 e #8).

Tabela 3. Densidade aparente seca – 03 melhores misturas

Empacotamento	Grosso	Médio	Fino	Densidade
4	1/2	1/2	---	2.510 g/cm ³
5	1/2	---	1/2	2.308 g/cm ³
8	4/6	1/6	1/6	2.308 g/cm ³

Para a confecção das pedras artificiais foi calculado, inicialmente, o volume de vazios (VV), através da Equação 1, apresentada abaixo:

$$VV\% = 1 - \left(\frac{\text{Densidade aparente seca das partículas}}{\text{Densidade do Resíduo}} \right) \times 100 \quad (1)$$

Onde a densidade aparente seca das partículas é referente a média do empacotamento, e a densidade do resíduo é a média da densidade do empacotamento. A quantidade mínima de resina (TMR) necessária para preencher o volume de vazios, para a confecção das pedras artificiais é apresentada pela Equação 2, apresentada abaixo:

$$TMR\% = \frac{VV\% \times \rho \text{ resina}}{(VV\% \times \rho \text{ resina}) + (100 - VV\%) \times \rho \text{ resíduo}} \times 100 \quad (2)$$

Onde o ρ resina é a densidade da resina e ρ resíduo é a densidade do resíduo.

Após a determinação VV e TMR foi acolhido o valor de 15% de resina para a confecção das placas de pedra artificial de ambos empacotamentos (4, 5 e 8), visto na Tabela 4. A definição deste valor leva em consideração diretamente a molhabilidade no processo de interação resíduo/resina. Pois na prática, existe perda de parte da resina na transferência do

recipiente de mensuração para o sistema de mistura; bem como também pela própria escolha da resina, poliéster; onde se faz uso de catalizador na proporção de apenas 1%, limitando assim a parte líquida da mistura.

Tabela 4. Valores (VV% e TMR%)

Empacotamento	VV%	TMR%
4	29.09	13.14
5	24.67	12.22
8	24.67	12.22

O RCD, nas granulometrias especificada na Tabela 1, foram secos em estufa a 100°C por 24 horas; pesadas nas proporções adequadas e levadas ao misturador cilíndrico automático com a resina poliéster e o catalizador nas proporções 85% RCD e 15% resina em massa, respectivamente. A mistura foi colocada em um molde metálico, para confecção de placas com dimensões de 100mm x 100mm x 10mm, conectado a um sistema de vácuo (600 mmHg), que ficou sobre uma mesa vibratória por 2 minutos; esta etapa favorece a remoção do ar nos interstícios dos grãos que promovem plasticidade facilitando assim o molhamento da resina e melhor distribuição das partículas [17]. O molde, ainda sob vácuo, por mais 2 minutos, foi posicionado em uma prensa hidráulica, onde foi comprimido (10 MPa) por 20 minutos sob aquecimento de 90°C, favorecendo a cura da resina [18]. Após finalizada a etapa de compactação, as placas foram desmoldadas e colocadas em estufa a 100°C por 24 horas para posterior corte com disco diamantado nas dimensões exigidas pelas normas para realização dos ensaios propostos, Figura 2.



Figura 2. Etapas de confecção das placas de pedra artificial: (1) misturador; (2) moldagem com vácuo no misturador; (3) moldagem com vácuo no agitador; (4) moldagem com compactação no vácuo

Através do Teste de Tukey, que consiste em comparar todos os possíveis pares de médias e se baseia na diferença mínima significativa, considerando os percentis do grupo, onde foi analisada a variância e comparação múltipla entre médias de experimentos, os empacotamentos (composições) 4, 5 e 8 obtiveram os melhores resultados. A realização dos testes de índices físicos foi determinada de acordo com ABNT_NBR 15845-2 [19]. Foi realizado ensaio de flexão por carregamento em três pontos conforme ABNT_NBR 15845-6 [20] das composições 4, 5 e 8 em uma Máquina de teste universal INSTRON 5582 na UENF/CCT/LAMAV. A composição 5 apresentou melhores índices de compactação e resistência mecânica, direcionando esta composição, que passa a ser renomeada para RCD-5, para estudos mais detalhados na pesquisa.

A caracterização da pedra artificial RCD-5 ocorreu da seguinte forma: a superfície da fratura da RCD-5 que foi submetida ao ensaio de flexão foi levada ao MEV (Microscópio eletrônico de varredura) para análise microestrutural. O ensaio foi realizado UENF/CCT/LAMAV em um equipamento Super Scan SSX-550 da SHIMADZU, a 15 kV de elétrons secundários; para comparação, a fratura das composições 4 e 8 também foram analisadas micro estruturalmente. O RCD em pó, nas granulometrias discriminadas na Tabela 1, também foi levado ao MEV para análise de sua morfologia. O ensaio para determinação da resistência à compressão uniaxial foi realizado com conforme a ABNT_NBR 15845-5 [21] na UENF/CCT/LAMAV em uma Máquina de teste universal INSTRON 5582. A resistência ao ataque químico foi realizada conforme ABNT_NBR 16596 [22]. A análise térmica foi determinada por dilatometria na UENF/CCT/LAMAV em conformidade a ABNT_NBR 15845-3 [23]; o ensaio foi realizado no equipamento Netzsch DIL402PC sob taxa de aquecimento de 10°C/minuto e faixa de temperatura de 30–350°C. Como forma de apresentação final, foram preparadas três placas para receberem lixamento, impermeabilização e polimento como acabamento final.

RESULTADOS

A Tabela 5 apresenta, em porcentagem, a composição química realizada por FRX do RCD. A base da composição, com 77.63% está relacionada a presença dos óxidos: Al_2O_3 , CaO e SiO_2 ; situação já esperada, tendo em vista se tratar de um resíduo com grandes concentrações de concretagem e asfaltamento.

Tabela 5. Análise Química por FRX (Resíduo da Construção Civil e Demolição)

Determinação da Análise Química por Espectrometria de FRX - PR-CR-098 (Amostra: RCD) %									
Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	MnO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	SiO ₂	
9.752	22.308	3.276	1.782	1.948	0.056	1.007	0.219	45.568	
TiO ₂	BaO	Co ₂ O ₃	PbO	SrO	ZnO	ZrO ₂ /Hf	Cl	SO ₃	Perda Fogo
0.472	0.061	<0.050	<0.050	0.111	<0.050	<0.050	0.891	2.533	9.987

A base da composição do RDC é similar a base da composição química do clínquer (Tabela 6), que por sua vez é a base da composição do cimento [24].

Tabela 6. Composição química do clínquer

Composição Química - Clinquer (%)						
CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	SO ₃
61-67	17-24	3-8	1-6	0.1-4	0.5-1.5	1-3

O espectro de infravermelho com transformada de Fourier, apresentado na Figura 3, apresenta as bandas características dos grupos funcionais presentes na resina poliéster, que estão listadas na Tabela 7.

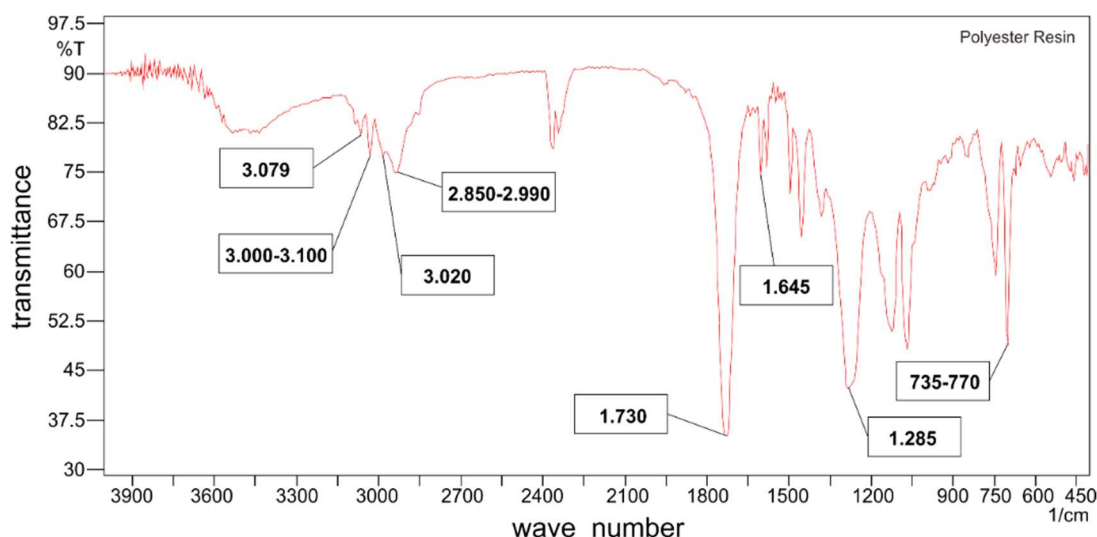


Figura 3. Espectro de Infravermelho por Transformada de Fourier (Resina Poliéster)

A banda a 744 cm⁻¹ no espectro de FTIR é relativa ao benzeno orto substituído, devido à presença de anidrido ftálico na resina, com o objetivo de regular a quantidade de reticulações. A dupla ligação favorece a formação de ligação cruzada, deixando o material com maior resistência mecânica.

Tabela 7. bandas características dos grupos funcionais- Resina Poliéster

Número de Onda	Bandas
3.000 - 3.100	estiramento C-H aromático
3.079	estiramento = CH ₂ assimétrico
3.020	estiramento = CHR assimétrico
2.990 - 2.850	-CH ₃ e -CH ₂
1.730	estiramento = CH ₂
1.645	RCH = CH ₂
1.285	estiramento C-O éster
770 - 735	benzeno orto substituído

A Tabela 8, apresenta os resultados dos índices físicos bem como os resultados da flexão em 3 pontos, entre as 3 melhores misturas (4, 5 e 8), confirmando a composição 5 com melhores índices de compactação e resistência mecânica (Figura 4).

Tabela 8. Índices Físicos e Flexão 3 pontos

Composição	Densidade Aparente Pa (g/cm ³)	Porosidade Aparente ηa (%)	Absorção Água αa (%)	Volume m ³	PLACAS FLEXÃO MPa
# 4					
1/2 grosso + 1/2 médio	2.129 ±0.12	1.46 ±0.30	0.66 ±0.14	0.0309 ±0.002	24.66 ±2.31
# 5					
1/2 grosso + 1/2 fino	2.256 ±0.10	1.55 ±0.28	0.69 ±0.13	0.0296 ±0.002	34.74 ±2.55
# 8					
2/3 grosso + 1/6 médio + 1/6 fino	2.252 ±0.98	2.32 ±0.28	1.03 ±0.13	0.0308 ±0.001	20.55 ±2.41

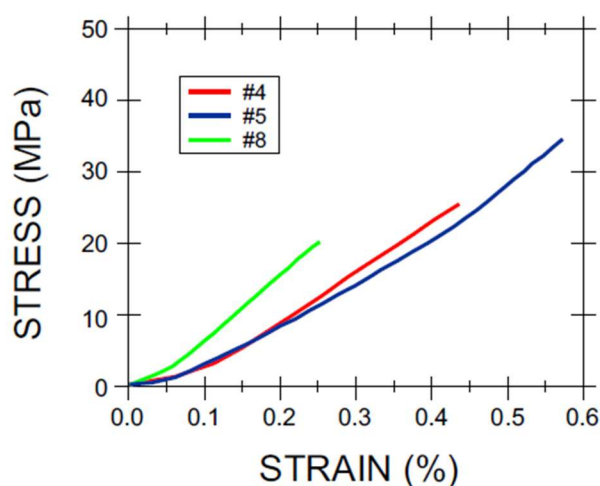


Figura 4. Diagrama (Tensão de ruptura por flexão X deformação por flexão) composições 4, 5 e 8

A Figura 5 apresenta a resistência máxima à compressão uniaxial da RDC-5.

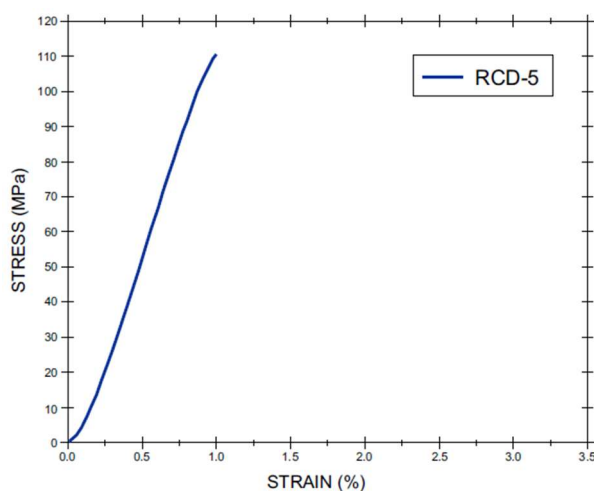


Figura 5. Diagrama (Tensão X Deformação - Compressão) RDC-5

A Figura 6 apresenta as micrografias das granulometrias do RCD (fino, médio e grosso) presentes nesta pesquisa obtidas por MEV.

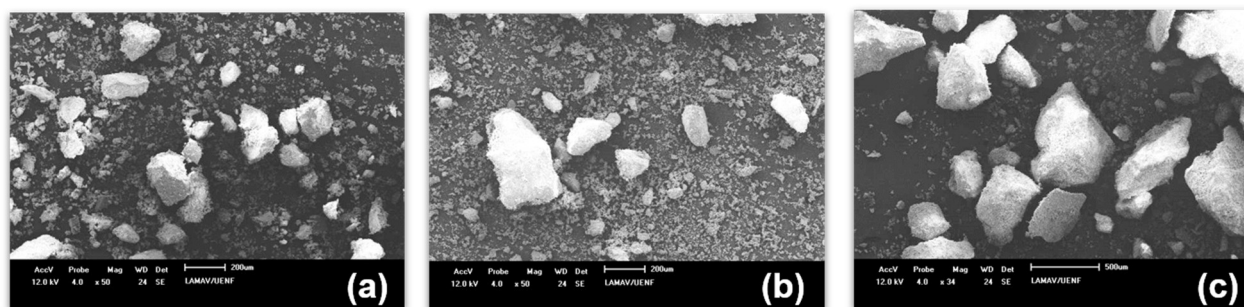


Figura 6. Micrografias RDC (x50) granulometrias: (a) fino; (b) médio; (c) grosso

Em ambas as micrografias é possível apontar a morfologia dos grãos com superfícies rugosas, com formas irregulares e com protuberâncias nos contornos. A Figura 7 apresenta bem como a morfologia dos grãos do RCD (grosso) se moldam como um quebra cabeça, formando uma compactação natural tão logo os vazios sejam preenchidos, posteriormente, pela granulometria fina.

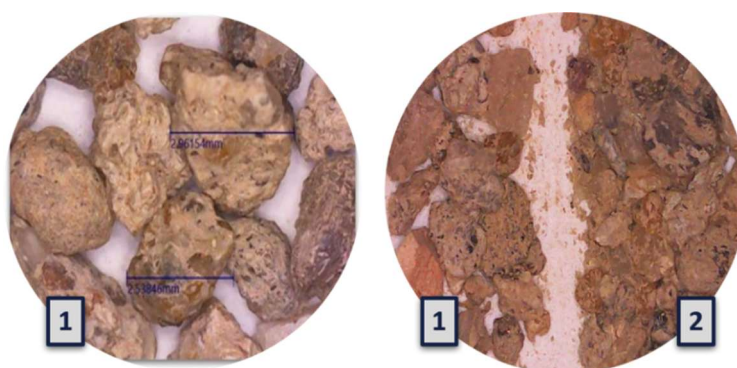


Figura 7. Micrografia Digital RDC: (1) granulometria grosso; (2) empacotamento – granulometria grosso/fino

A Figura 8 apresenta as micrografias, obtidas por MEV, das superfícies das fraturas dos corpos de prova (composições 4, 5 e 8) do ensaio de flexão.

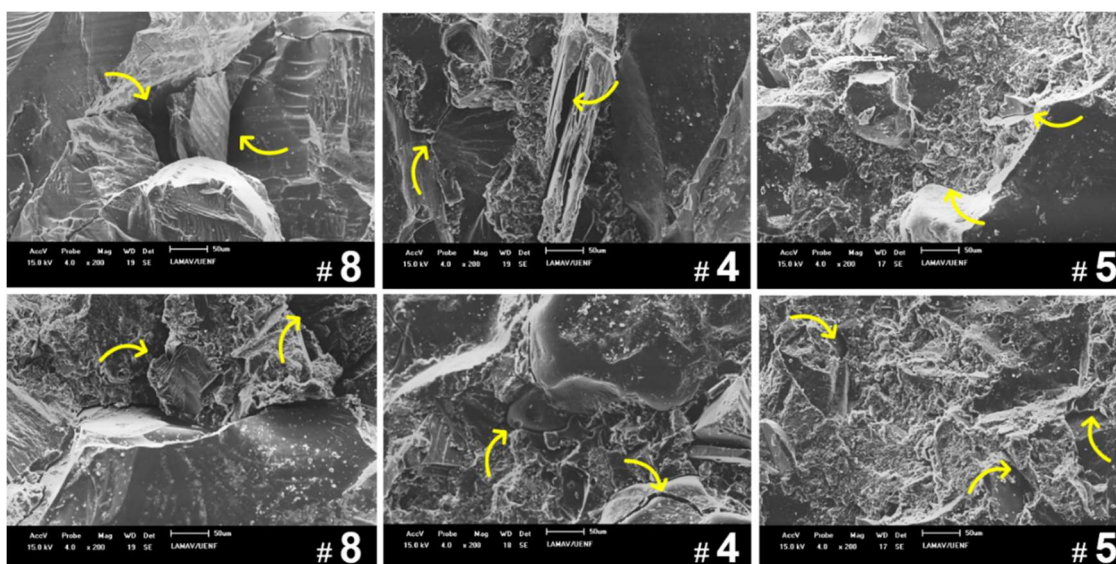


Figura 8. Micrografias das fraturas (x200): composições – 8, 4 e 5

É visível a progressão do empacotamento na sequência das micrografias. A composição 8 apresenta fissuras ao longo da ancoragem entre os reticulados, a interação com a resina deixa “espaços” vazios ao longo da fratura. A composição 4 tem um comportamento melhorado em função a com posição 8, suas fissuras são de menor porte e a interação resíduo/resina tem uma melhor aderência. Porém a composição 5, mesmo ainda pontuando algumas micro falhas na superfície analisada, tem infinitamente uma melhor ancoragem do reticulado a matriz polimérica. O recobrimento da resina é mais eficiente com a granulometria proposta para esta composição, traduzindo-se em melhores resultados de densidade e resistência

mecânica. A qualidade da interação interfacial está diretamente relacionada à melhoria da resistência mecânica de um compósito. Isto se deve ao fato de que uma boa molhabilidade interfacial significa maior resistência adesiva [25]. Os reagentes utilizados no ensaio de resistência ao ataque químico simulam a composição químicos de algumas substâncias presentes em alimentos e produtos de limpeza em geral. Observando os resultados apresentados na Figura 9, podemos constatar modificações cromáticas em diversos corpos de prova que tiveram exposição por 24h, bem como, por 96h; excetuam-se os corpos de prova 01 (cloreto de amônia); 02 (hipoclorito de sódio) e 10 (água destilada).

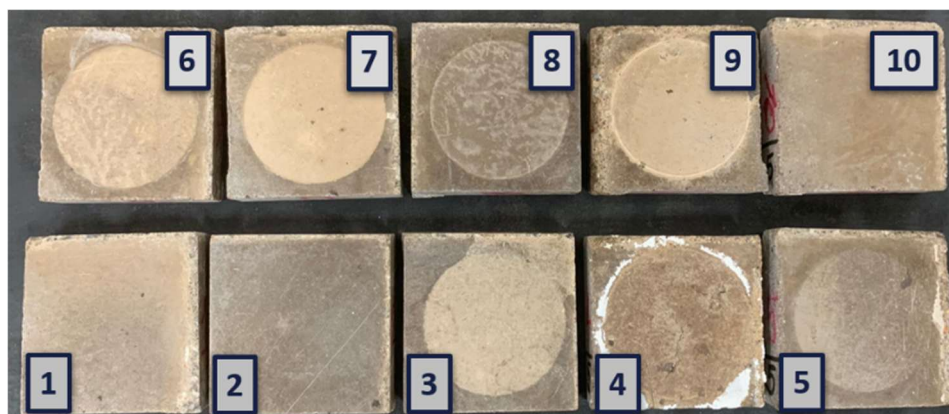


Figura 9. Modificações Cromáticas - Corpos de Prova: (1) cloreto de amônia; (2) hipoclorito de sódio; (3) ácido cítrico; (4) ácido láctico; (5) ácido acético; (6) ácido clorídrico 3%; (7) ácido clorídrico 18%; (8) hipoclorito de potássio 30g/L; (9) hipoclorito de potássio 100g/L; (10) água destilada

Estas modificações se justificam devido a composição da resina poliéster ortoftálica, pois são utilizadas como ácido modificadores, o ftálico ou seu anidrido, sendo assim suas propriedades químicas são inferiores as demais, devido à dificuldade de se obter polímeros de alto peso molecular (cadeias moleculares curtas – Figura 10). A anidrido ftálico tem forte tendência de se regenerar a partir dos meios ésteres do ácido ftálico (reação reversível), fato que incrementa a presença de espécies de baixo peso molecular, altamente sensíveis ao ataque químico [26].

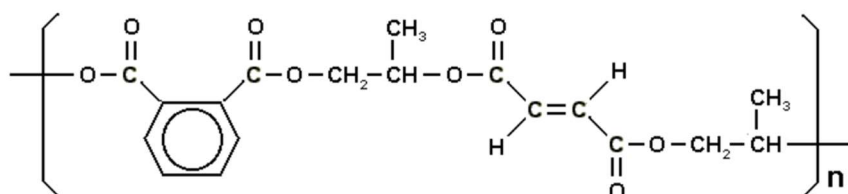


Figura 9. Cadeia molecular poliéster ortoftálica

Uma observação pontual se tornar necessário ao efeito do ataque químico referente ao corpo de prova n. 4 que foi exposto por 24h ao ácido láctico, pois além da modificação cromática uma camada de cor esbranquiçada de forma irregular foi formada pela parte líquida que possivelmente tenha vazado durante o ensaio, a presença desta forma irregular provavelmente ocorreu pela reação de oxidação do carbono primário presente no reagente [27]. Não houve desprendimento mineral, como pode ser observado pela Figura 10.

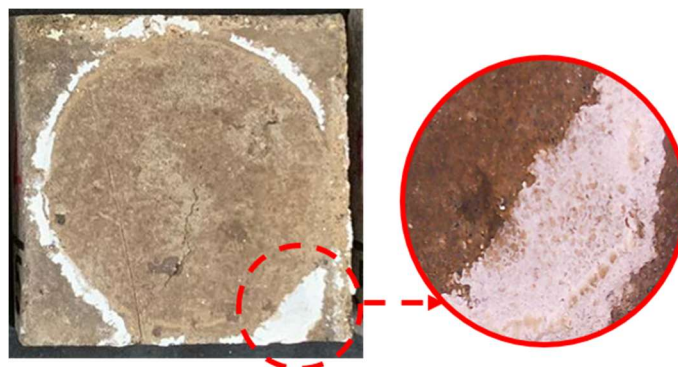


Figura 10. Microscopia digital (Detalhe ataque químico N.04 – Ácido Láctico)

A análise térmica por dilatométrica afere as mudanças dimensionais (contração e expansão) que sofre um material, em função da temperatura, quando submetido a um programa controlado de temperatura em atmosfera controlada. No

desenvolvimento da pedra artificial, as transformações térmicas ocorrem na fase de cura devido à reação de polimerização matriz/resíduo [28]. A Figura 11 apresenta a curva dilatométrica da pedra artificial RCD-5.

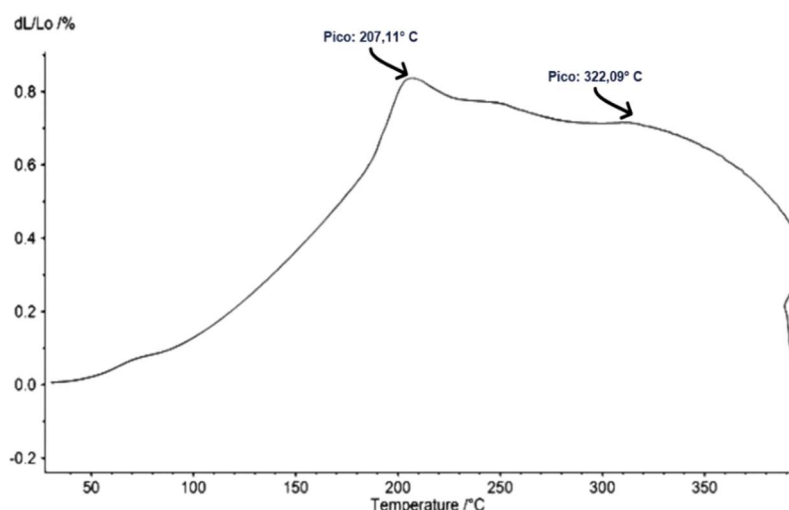


Figura 11. Curva dilatométrica RCD-5

Podemos observar o comportamento estrutural em ambiente aquecido na faixa de temperatura de 0-350°C. Na faixa de 0-200°C os materiais estão se adaptando ao ambiente aquecido, expandindo os poros e fazendo com que a estrutura perca umidade. O primeiro pico acontece ao 207°C onde até a temperatura de 322°C (segundo pico) o material tem seu momento de retração. A partir do segundo pico o material passa a se decompor lentamente, com perda de peso, em sua maioria da resina, como relatado em outras pesquisas [29].

A Figura 12 apresenta as placas que receberam acabamento final (lixamento, impermeabilização e polimento) para melhor representarem a proposta da pedra artificial produzida com RCD e resina poliéster, para utilização em bancada de cozinhas, áreas de lazer e banheiros, bem como também como revestimento em escadas, por exemplo.

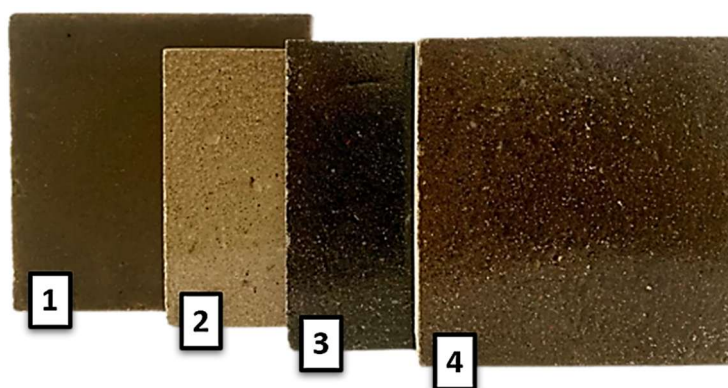


Figura 12. Pedra Artificial RCD-5: (1) Placa Bruta; (2) Pedra Pigmento Branco; (3) Pedra Pigmento Preto; (4) Pedra Natural

A composição química do RCD apresentou a mesma composição química do clínquer, base para o cimento Portland, alternando apenas algumas porcentagens. Isso demonstra diretamente a reciclagem do cimento presente no material de concretagem constante no RCD, em contra partida o RCD sendo um resíduo heterogêneo, devido a diversidade de material existente em sua coleta, a base deve ser prioritariamente de concretagem para que os parâmetros de composição química sejam atendidos, minimamente, para consequente obtenção dos resultados esperados. Ao confrontarmos o resultado (34.74 MPa +2.55) encontrado na resistência a flexão por carregamento em 3 pontos da RCD-5 com outros resultados na literatura, Lee et.al. [30] 27.9-52.7 MPa; Ribeiro et al. [17] 21.5 MPa; Hamizah et al. [31] 34.1 MPa; Peixoto et al. [32] 25.4 MPa; concluímos o excelente desempenho da RCD-5. Segundo Chiodi Filho e Rodriguez [33], as pedras ornamentais utilizadas como revestimentos na construção civil, com resistência à flexão acima de 20 MPa, são classificadas como materiais de alta resistência. O comparativo da resistência à compressão uniaxial da RCD-5 (111.96 MPa +5.24) também apresenta positividade com resultados encontrados na literatura Lee et al. [29] 78.70-151.30 MPa; Ribeiro et al. [17] 77.9 MPa; Hamizah et al. [30] 105.43 MPa; Agrizzi et al. [34] 100.70 MPa. Novamente, Chiodi Filho e Rodriguez [32], apontam que as pedras ornamentais utilizadas como revestimentos na construção civil, com resistência à compressão uniaxial entre 700 e 1.300 Kg/cm², são classificadas como materiais de média resistência. A forma dos grãos, a rugosidade da superfície e as protuberâncias, apresentadas nas micrografias das granulometrias do RCD (fino, médio e grosso)

presentes nesta pesquisa obtidas por MEV, são responsáveis pelos maiores valores de resistência mecânica, tendo em vista que essas características favorecem não só um melhor travamento interno, bem como uma melhor aderência entre a resina e os grãos (SUSKI, 2015). Chiodi Filho e Rodriguez [32], apontam que as pedras ornamentais utilizadas como revestimentos na construção civil, com coeficiente de dilatação térmica entre 8-10 são consideradas de médio padrão, onde a RCD-5 apresentou 8.33.

CONCLUSÃO

A RCD-5 é um material leve com densidade de 2.256 g/cm³; isso torna seu transporte e maquinário do parque industrial para sua produção com custo diminuído; as micrografias realizadas por MEV da RCD-5 corroboram a boa adesão matriz/carga, influenciando diretamente nos resultados positivos de flexão e compressão. Em um contexto geral, o RCD tem um enorme potencial como matéria prima para produção de pedras artificiais pois atende diretamente ao conceito de desenvolvimento sustentável (ambiental e econômico), reintroduzindo na cadeia produtiva um resíduo, amplamente produzido no planeta, que tem maciçamente seu descarte final em aterros sanitários; como também na qualidade do produto final (experimental) com propriedades semelhantes às pedras artificiais já comercializadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Varshney, H. et al. Utilização sustentável de diferentes águas residuais na construção de betão: A review. *Journal of Building Engineering*, v. 41, p. 102411, 1 set. 2021.
2. Galetakis, M. et al. A review on the utilisation of quarry and ornamental stone industry fine by-products in the construction sector. *Construction and Building Materials*, v. 102, p. 769-781, 15 jan. 2016.
3. Salman R, M. et al. Effect of biomineralization technique on the strength and durability characteristics of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, v. 290, p. 123280, 5 jul. 2021.
4. Hamada, H. M. et al. Sustainable use of palm oil fuel ash as a supplementary cementitious material: A comprehensive review. *Journal of Building Engineering*, v. 40, p. 102286, ago. 2021.
5. Miranda de Souza, A. et al. Application of the desirability function for the development of new composite eco-efficiency indicators for concrete. *Journal of Building Engineering*, v. 40, p. 102374, Aug. 1, 2021.
6. Ferreira, L. S. R. et al. Long-term analysis of the physical properties of recycled aggregate mixtures and their effect on mortar properties. *Construction and Building Materials*, v. 274, p. 121796, 8 Mar. 2021.
7. Mendes, B. C. et al. Technical and environmental evaluation of the incorporation of iron ore tailings in ceramic building bricks. *Construction and Building Materials*, v. 227, p. 116669, 10 Dec. 2019.
8. Lamônica, C. H. et al. Management of Solid Construction Waste: a bibliometric study in Scopus and Web of Science (2009-2019). *Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades*, v. 7, n. 51, 1 Dec. 2019.
9. Xia, B. et al. Life cycle assessment of concrete structures with reuse and recycling strategies: A novel framework and case study. *Waste Management*, v. 105, p. 268-278, 15 Mar. 2020.
10. Ossa, A. et al. Use of recycled aggregates from construction and demolition waste (CDW): A sustainable alternative for the sidewalk construction industry. *Journal of Cleaner Production*, v. 135, p. 379-386, Nov. 1, 2016.
11. Valente, D. et al. Technical analysis of construction waste recycling on construction sites. *Ambiente Construído*, v. 20, n. 3, p. 363, July 3, 2020.
12. Cheremisinoff, N. P. Processing of Unsaturated Polyesters. *Advanced Polymer Processing Operations*, p. 1-38, 1998.
13. ABNT NBR 7181. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT NBR 7181: Solo – Análise Granulométrica. Disponível em: <<https://www.abntcatalogo.com.br/>>. Acesso em: 13 out. 2023.
14. ABNT NBR MB 3388. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT NBR MB 3388: Solo – Determinação do Índice Mínimo de Índice de Vazios de Solos Não Coesivos – Método de Ensaio. Disponível em: <<https://www.abntcatalogo.com.br/>>. Acesso em: 13 out. 2023.
15. Javorsky, J. et al. Determination of optimal parameters for bonding polyvinyl chloride to stainless steel in automotive applications using a full factorial design of experiments. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, v. 7, n. 2, p. 151-158, 2014.
16. Romli, F. I. et al. Factorial study on the tensile strength of an epoxy composite reinforced with coconut fibers. *AASRI Procedia*, v. 3, p. 242-247, 2012.
17. Ribeiro, C. E. G. et al. Production of Ornamental Composite Marble with Marble Waste and Unsaturated Polyester. *TMS Annual Meeting*, p. 129-136, 2014.
18. Carvalho, E. A. S. et al. Development of Epoxy Matrix Artificial Stone Incorporated with Sintering Waste from the Steel Industry. *Materials Research*, v. 18, n. suppl 2, p. 235-239, dec. 2015.
19. ABNT NBR 15845-2. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT NBR 15845-2: Pedras para Revestimento. Parte 2: Determinação da Densidade aparente, Porosidade Aparente e Absorção de Água. Disponível em: <<https://www.abntcatalogo.com.br/>>. Acesso em: 13 out. 2023.

19. ABNT NBR15845-6. Associação Brasileira de Normas Técnicas –ABNT NBR15845-6: Pedras para Revestimento. Parte 6: Determinação do Módulo de Ruptura (flexão de três pontos). Disponível em: <<https://www.abntcatalogo.com.br/>>. Acesso em: 13 out. 2023.
20. ABNT NBR 15845-5. Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT NBR 15845-5: Rochas para revestimento Parte 5: Determinação da resistência à compressão uniaxial. Disponível em: <<https://www.abntcatalogo.com.br/>>. Acesso em: 13 out. 2023.
21. ABNT NBR 16596. Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT NBR 16596 - Rochas para revestimento — Resistência ao ataque químico — Método de ensaio. Disponível em: <<https://www.abntcatalogo.com.br/>>. Acesso em: 13 out. 2023.
22. ABNT NBR 15845-3. Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT NBR 15845-3: Rochas para revestimento Parte 3: Determinação do coeficiente de dilatação térmica linear. Disponível em: <<https://www.abntcatalogo.com.br/>>. Acesso em: 13 out. 2023.
23. Castro, V. G. DE. Portland cement. In: Wood-cement composites: a sustainable product for the future. EdUFERSA, 2021. p. 13-21.
24. Debnath, S. et al. Interface effects on the mechanical properties of particle-reinforced composites. Dental Materials, v. 20, n. 7, p. 677-686, 1 sep. 2004.
25. Silaex. Unsaturated polyester. Available at: <<http://www.silaex.com.br>>. Accessed on: Nov. 4, 2023.
26. Amaral, T. D. DO et al. Comparative methodologies for the production of lactic acid from sugarcane molasses and its application as a biopolymer (PLA). Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento, p. 150-193, 9 Sep. 2022. Barreto, G. N. S. et al. Engineered Stone Produced with Glass Packaging Waste, Quartz Powder, and Epoxy Resin. Sustainability (Switzerland), v. 14, n. 12, 1 jun. 2022.
27. Silva, F. S. et al. Physical and Mechanical Characterization of Artificial Stone with Marble Calcite Waste and Epoxy Resin. Materials Research, v. 21, n. 1, 7 dec. 2017.
28. Lee, M. Y. et al. Production of artificial stone slabs using waste glass, stone fragments and vacuum vibratory compaction. Cement and Concrete Composites, v. 30, n. 7, p. 583-587, Aug. 2008. Hamizah, A. S. et al. Characterization and evaluation of dolomite and kaolin as filler on the properties of polyartistic marble. Materials Today: Proceedings, v. 29, p. 173-178, 1 Jan. 2020.
29. Peixoto, J. et al. Incorporation of Industrial Glass Waste in Polymer Resin for the Development of Artificial Stones for Civil Construction. Arabian Journal for Science and Engineering, v. 47, n. 4, p. 4313-4322, 19 abr. 2022.
30. Chiodi Filho; Rodriguez. guia de aplicação de rochas ornamentais em revestimentos. São Paulo. Available at: <www.abirochas.com.br>. Accessed on: Nov. 3, 2023.
31. Agrizzi, C. P. et al. Comparison of Synthetic and Biodegradable Polymeric Matrices in the Development of Artificial Stone Based on Quartzite Waste. Sustainability 2022, Vol. 14, Page 6388, v. 14, n. 11, p. 6388, May 24, 2020