

Aplicação de lamas carbonatadas da indústria extrativa e transformadora de pedra natural em compósitos pétreos

Ruben Martins^{1,a} | Luís Lopes^{1,2,b} | Paula Afonso^{1,c} | Vera Pires^{1,3,d} |
Paula Faria^{1,4,e} | Paulo Mourão^{5,f} | Jorge Velez^{1,g} | Antônio Azzalini^{1,h}

Resumo: As lamas carbonatadas (vulgarmente conhecidas por “natas”), resultam do processamento industrial de mármore e/ou calcários explorados no Anticlinal de Estremoz e no Maciço Calcário Estremenho, respectivamente. Tratando-se de materiais homogéneos e relativamente puros (> 95% CaCO₃), têm elevado potencial para aplicação industrial pelo que se justifica o estudo da viabilidade técnica e económica de aplicação em novos produtos, acrescentando-lhe valor económico e contribuindo para a classificação como subproduto. As natas apresentam boa capacidade de ligação com agregados o que permite a sua utilização como matéria-prima em argamassas e produção de compósitos, este foi o principal objetivo do projeto Calcinata onde se desenvolveu o estudo que agora se apresenta. A investigação demonstrou a viabilidade da aplicação técnica destas lamas associadas a resinas poliéster, apresentando forte capacidade de ligação com agregados, permitindo assim, a sua utilização como matéria-prima em argamassas ligantes na produção de compósitos pétreos de base mais sustentável.

Abstract: Carbonate sludge (commonly known in the marble region as “cream”) is the result of the industrial processing of marble and/or limestone exploited in the Estremoz Anticlinal and the Estremadura Limestone Massif, respectively. As these materials are homogeneous and relatively pure (> 95% CaCO₃), they have a high potential for indus-

¹ Departamento de Geociências, Universidade de Évora.

² ICT – Instituto de Ciências da Terra, Pólo de Évora.

³ Laboratório HERCULES & IN2PAST – Laboratório Associado para a Investigação e Inovação em Património, Artes, Sustentabilidade e Território, Universidade de Évora.

⁴ GeoBioTec, Departamento de Geociências, Universidade de Aveiro.

⁵ Departamento de Química e Bioquímica, CHANGE & MED, Universidade de Évora.

^a rubenvm@uevora.pt, ^b lopes@uevora.pt, ^c pafonso@uevora.pt, ^d vlcp@uevora.pt,

^e pagf@uevora.pt, ^f pamm@uevora.pt, ^g jmav@uevora.pt, ^h antonioazzalini@hotmail.com

trial application, which is why it is worth studying the technical and economic feasibility of applying them to new products, adding economic value and contributing to their classification as a by-product. Cream has a good bonding capacity with aggregates, which allows it to be used as a raw material in mortars and composite production. This was the main objective of the Calcinata project, where the study presented here was conducted. The research demonstrated the viability of the technical application of these sludges, associated with polyester resins, which have a strong bonding capacity with aggregates, thus allowing them to be used as a raw material in binding mortars in the production of more sustainable stone-based composites.

1. Introdução

A investigação a que reporta este trabalho foi realizada no Departamento de Geociências da Universidade de Évora no âmbito do projeto Calcinata, (Projeto de I&dT Empresas em Copromoção, com referência n.º 72239 cofinanciado pelo Alentejo 2020, Portugal 2020 e União Europeia através do Programa “Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional”). Teve como principal objetivo o estudo da viabilidade técnica da aplicação, em compósitos pétreos, de lamas carbonatas, provenientes do corte e processamento de mármore e calcários, provenientes respetivamente do Anticlinal de Estremoz e do maciço Calcário Estremenho. Foram parceiros do projeto a empresa Ineditbrown Lda. (líder) e a empresa Solid Defender, Máquinas Industriais Lda. A gestão do projeto foi realizada pela Associação Cluster Portugal Mineral Resources e pelo Gabinete de Apoio aos Projectos da Universidade de Évora (Martins *et al.*, 2021, 2022, 2022a). Não obstante o uso generalizado na indústria da pedra de resinas epóxi, por razões técnicas e económicas, os estudos foram direcionados para a aplicação de resina poliéster.

Sendo as lamas carbonatadas um rejeito da indústria extractiva e transformadora do Sector da Pedra Natural (por vezes designada por “Rocha Ornamental” ou mesmo “Dimension Stone” na nomenclatura anglo-saxónica), a comprovação da sua aplicação industrial, acrescenta-lhes valor económico, possibilitando assim a substituição da atual classificação como resíduo, pela classificação de subproduto (Alves, 2015; Juvandes, 2002; Korneliussen *et al.*, 2014; Ventura *et al.*, 2009).

São conhecidos os baixos rendimentos quer na extração, quer no processamento (ou transformação) de mármore e calcários. Nas unidades extrativas (pedreiras), estes rejeitos resultam do ciclo produtivo, fundamentalmente de operações de perfuração, corte e desmonte. O baixo rendimento neste subsector e em particular na Zona dos Mármore (Estremoz, Borba e Vila Viçosa) deve-se em grande parte às características geológicas do maciço nomeadamente a elevada densidade de descontinuidades que apresenta. O rendimento produtivo nas pedreiras oscila entre 10% e 30% (sendo por vezes substancialmente inferior), significa que 90% a 70% do material extraído é depositado diariamente em escombrelas e depósitos de lamas carbonatadas. Nas pedreiras estes rejeitos são constituídos por fragmentos rochosos (95%) e lamas (5%). Nas unidades transformadoras, o ciclo produtivo é

Aplicação de lamas carbonatadas da indústria extrativa e transformadora de pedra natural em compósitos pétreos

constituído essencialmente por operações de corte e tratamento de superfícies, onde se destaca o polimento de chapas e ladrilhos, produzindo 30% de rejeitos nos processos ligados ao corte de blocos para produção de chapas e 30% noutras operações de corte e acabamento de superfícies. Analisando a tipologia dos rejeitos, obtém-se em média cerca de 58% de fragmentos rochosos e 42% de lamas carbonatadas (Fig. 1).



Figura 1 – Nível médio de produção de resíduos em pedreiras e serrações.

2. Materiais e Métodos

Obedecendo a uma sequência lógica, o planeamento da investigação seguiu um cronograma projetado no arranque do projeto (Fig. 2), onde se considerou a diversidade das lamas provenientes dos mármore e calcários. A amostragem decorreu na Zona dos Mármore, com recolha de amostras de lamas carbonatadas marmóreas nas empresas António Galego & Filhos – Mármore SA, referenciadas como M(AGF) e A.L.A. de Almeida SA., referenciada como M(A), e no Maciço Calcário Estremenho (Santarém) com recolha de amostras de lamas carbonatadas calcárias nas empresas Solancis – Sociedade Exploradora de Pedreiras SA, referenciadas como C(S), e MVC – Mármore de Alcobça Lda., referenciadas como C(MVC). Por sua vez, os agregados de mármore, doravante apenas referidos como “agregados”, foram cedidos pela empresa Marvisa, Mármore Alentejanos Lda.

Considerando a produção de “natas” e não havendo atualmente qualquer aplicação industrial, estas são acumuladas em depósitos a céu aberto. Daqui resultam impactes ambientais tais como a redução do coberto vegetal, a diminuição da atividade agrícola, a impermeabilização dos solos, a alteração das linhas de água com significativa redução da qualidade da mesma, a alteração dos ecossistemas, a diminuição da qualidade do ar, a redução do processo fotossintético das plantas e o impacte visual, este último evidente devido à cor branca dos depósitos em contraste com o ambiente circundante (Martins, 1997, Fig. 3).

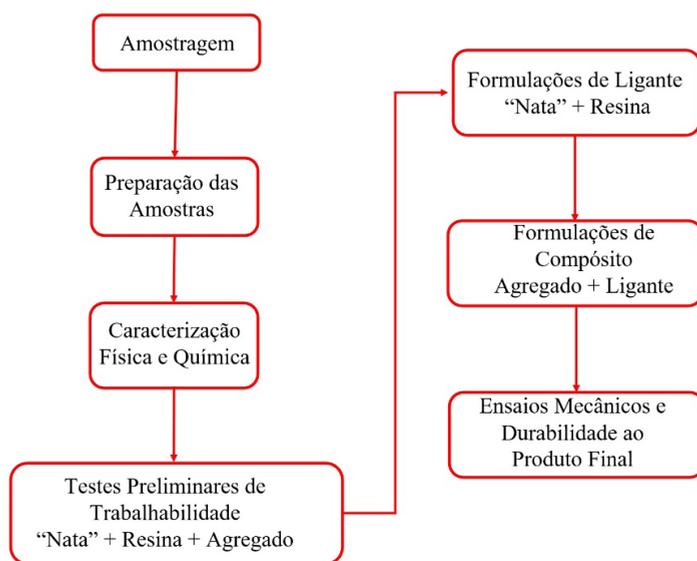


Figura 2 – Sequência dos trabalhos realizados.



Figura 3 – Linha de água com carga sólida e depósito de “natas” a céu aberto.

Aplicação de lamas carbonatadas da indústria extrativa e transformadora de pedra natural em compósitos pétreos

Nos laboratórios do Departamento de Geociências da Universidade de Évora as amostras foram secas à temperatura ambiente, posteriormente desagregadas num moinho de maxilas Retsch – BB200 e de seguida ensacadas em lotes de 5 kg (Fig. 4).



Figura 4 – Secagem e desagregação das “natas”.

Seguiu-se uma fase dedicada à caracterização física e química das lamas carbonatadas, tendo-se determinado as distribuições granulométricas, as massas volúmicas, as composições químicas e composições mineralógicas. A distribuição granulométrica das partículas foi obtida pela conjugação das análises granulométricas da fração composta pelas partículas de diâmetro esférico equivalente (d.e.e.) > 0.063 mm e da fração composta pelas partículas de diâmetro esférico equivalente (d.e.e.) < 0.063 mm. A distribuição granulométrica da fração constituída pelas partículas de d.e.e. > 0.63 mm, foi determinada por peneiração, segundo a Norma E234-1969, especificação LNEC (Laboratório Nacional de Engenharia Civil). As análises granulométricas da fração inferior a 0.063 mm foram efetuadas no Laboratório Ambiterria, da Universidade de Évora, tendo a distribuição dimensional das partículas sido determinada com recurso a um sedimentógrafo, da marca Micromeritics, modelo Sedigraph 5100, com fontes de raios-X (Afonso *et al.*, 2024; Martins *et al.*, 2023; Viegas *et al.*, 2023).

Para determinação da massa volúmica da lama carbonatada, fundamental para a formulação das composições, foi utilizada a norma NP EN 1097-7 2002 – Determinação da massa volúmica do filler – Método do Picnómetro (Viegas *et al.*, 2023).

As composições químicas efetuadas às lamas carbonatadas, foram determinadas no Laboratório Ambiterria, da Universidade de Évora a partir das frações < 63 μm , tendo-se determinado a perda ao rubro e os teores dos seguintes elementos maiores: Mn, Ti, Ca, K, Si, Al, Mg, Na e Fe, expressos sob a forma de óxidos: MnO , TiO_2 , CaO , K_2O , SiO_2 , Al_2O_3 , MgO , Na_2O e Fe_2O_3 , através de Espectroscopia de Emissão Ótica com Fonte Indutiva de Plasma (ICP-OES) (Afonso *et al.*, 2024; Viegas *et al.*, 2023).

A composição mineralógica foi determinada no Laboratório Hércules da Universidade de Évora através da difração de raios-X em pós (DRX), em partículas de diâmetro esférico equivalente inferior a 63 μm . Utilizou-se um difratômetro Bruker D8 Discover com tubo de radiação $\text{CuK}\alpha$ operado a 40 kV e 40 mA e um detector linear Lynxeye, (Martins et al., 2022).

Paralelamente fizeram-se testes preliminares com formulações de “nata” e resina em diferentes proporções, no sentido de se perceber até que ponto as misturas constituíam um material com elevado grau de ligação entre partículas, condição primordial para serem classificadas como argamassa.

Após a determinação das melhores composições de “nata” e resina poliéster, realizaram-se provetes em moldes cúbicos com 15 cm de aresta e escolheram-se três tempos de cura: 7, 14 e 28 dias para os ensaios seguintes. Estes provetes foram serrados e deles foram obtidos provetes cúbicos com sensivelmente 5 cm de aresta para ensaios de resistência mecânica à compressão uniaxial executados numa prensa de marca Pegasil, de acordo com a norma NP EN 1926:2008.

Para a seleção das melhores composições percentuais de “nata” e resina poliéster, de forma a obter-se o melhor compromisso entre fluidez e tempo de secagem, procedeu-se a ensaios de viscosidade num dispositivo desenvolvido pelos investigadores do projeto. A medição da velocidade de fluência da mistura foi realizada em plano graduado e inclinado a 45°. Após a adição da “nata” com a resina e o secante procedeu-se a uma mistura manual durante 60 s, findo os quais se enchia uma seringa (30 ml), despejando-se o conteúdo no plano inclinado deixando fluir livremente a mistura até um tempo máximo de 90 s e fazendo registo continuo da distância percorrida em função do tempo (Fig. 5).

Na fase seguinte e depois de selecionado o ligante ideal (“nata” + resina), procedeu-se à realização de formulações onde o ligante foi misturado com o agregado de mármore com três granulometrias distintas, com diferentes proporções, e que possuíam dimensões nominais compreendidas entre 4 mm e 6.3 mm (Bago de Arroz, BA), 8 mm e 14 mm (Brita 1, B1) e 14 mm e 25 mm (Brita 2, B2).



Figura 5 – Realização do ensaio de viscosidade.

Aplicação de lamas carbonatadas da indústria extrativa e transformadora de pedra natural em compósitos pétreos

Após a definição da proporção ótima, foram produzidos provetes para análises e ensaios mecânicos e físicos mais detalhados, tais como resistência à flexão, ao impacto, ensaio de gelo/degelo, ensaio ao escorregamento, à abrasão, entre outros, com vista à completa caracterização destes para perceber o seu comportamento se utilizado em contexto de obra. Os tempos de cura considerados foram idênticos aos das formulações do ligante.

3. Resultados

A seguir apresentam-se os resultados dos ensaios de caracterização das lamas em estudo.

a) Análise Granulométrica

A distribuição granulométrica das partículas constituintes das “natas” é um parâmetro fundamental para a compreensão do seu comportamento, quer nas formulações de ligante com a resina, quer nas formulações com o agregado. Ambas as “natas” apresentam distribuições semelhantes, com as de calcário [C(MVC) e C(S)] a revelarem uma granulometria ligeiramente mais fina que as de mármore [M(AGF) e M(A)], não sendo ultrapassada a dimensão máxima de 2 mm (Fig. 6).

b) Massas Volúmicas

As massas volúmicas determinadas pelo método do picnómetro revelaram os seguintes valores: M(A) – 2.537 g/cm³; M(AGF) – 2.559 g/cm³; C(S) – 2.490 g/cm³; e C(MVC) – 2.493 g/cm³.

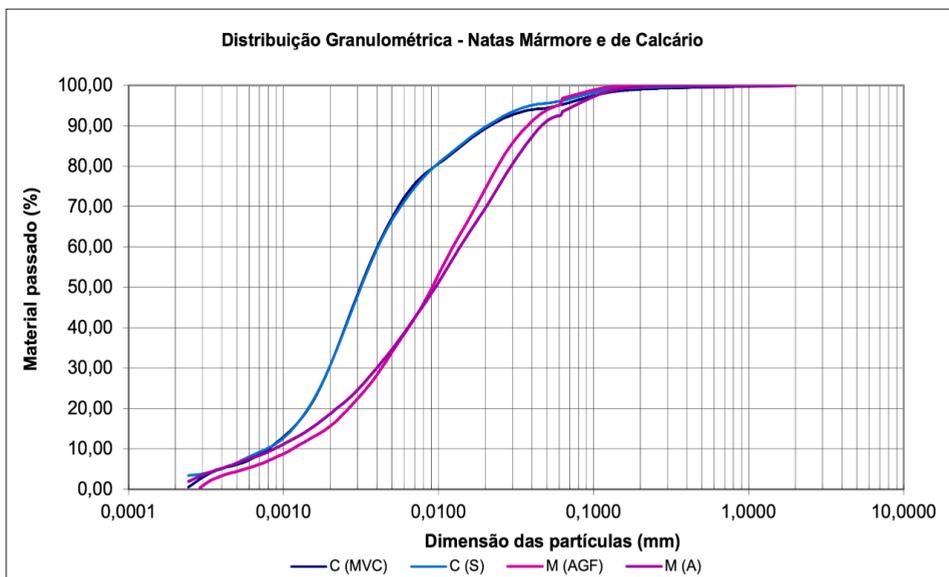


Figura 6 – Distribuição granulométricas das “natas” de mármore e calcário.

c) Análises Químicas

Todas as lamas revelaram uma componente fortemente carbonatada com percentagens significativas de CaO e perda ao rubro. M(AGF) e M(A) apresentam uma pequena percentagem de SiO₂ (2.5 – 3.5%), naturalmente associada ao quartzo e M(AGF) ligeiramente dolomítica atendendo à presença de magnésio (MgO) (Tabela 1).

Tabela 1 – Composição química e perda ao rubro (P.R.). Valores em percentagem (%).

AMOSTRAS	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	MnO	P. R.
C(MVC)	0.278	0.357	52.580	0.337	0.089	0.092	0.583	0.004	43.50
C(S)	0.276	0.297	54.189	0.301	0.089	0.143	0.620	0.004	43.30
M(AGF)	0.545	2.549	45.504	3.156	0.228	0.253	0.564	0.030	42.97
M(A)	0.716	3.537	51.555	0.829	0.274	0.362	0.670	0.008	42.15

d) Composição Mineralógica

A análise mineralógica por difração de raios-X (DRX), corroborou o carácter carbonatado das lamas, revelando um pico bem definido na calcite (CaCO₃), principal mineral constituinte das rochas carbonatadas (Fig. 7). Registaram-se ainda os picos referentes ao quartzo (SiO₂) e à dolomite CaMg(CO₃)₂ na amostra M(AGF) o que está em sintonia com o teor de MgO encontrado na análise química. A existência de um pico correspondente à illite/moscovite, somente nos mármore é justificada por serem minerais comuns em rochas metamórficas, como é o caso do mármore.

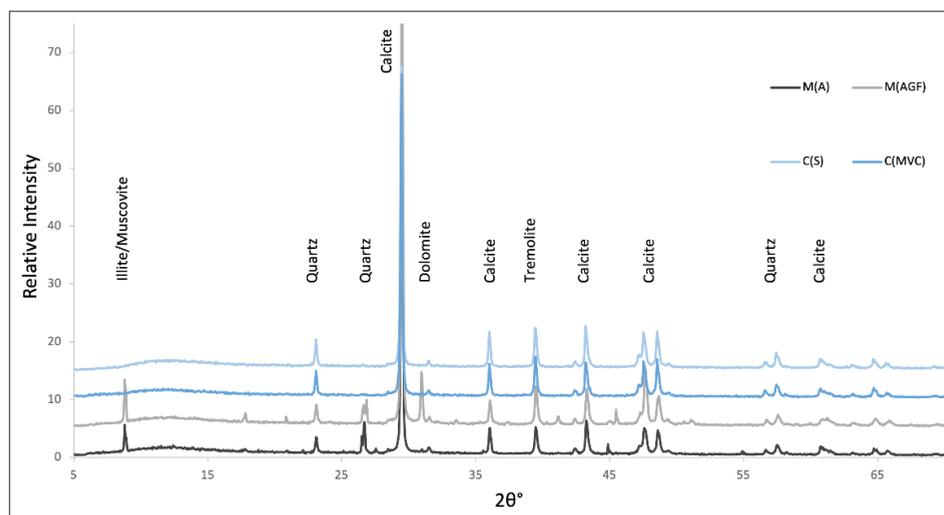


Figura 7 – Difractogramas realizados às amostras de mármore e calcário.

e) Viscosidades

Este ensaio não sendo de caracterização física e química das “natas” estudadas, foi fundamental para perceber a fluidez e trabalhabilidade quando misturada em diferentes proporções com a resina poliéster (Recapoli 2196 da Empresa Castro Composites), e posterior avaliação físico-mecânica. A seleção desta resina baseou-se na comparação de resultados laboratoriais com outra resina poliéster (Crystic), tendo a Recapoli revelado melhores desempenhos. É também uma resina transparente, com filtro UV para evitar amarelecimento e ideal para vazamento sobre moldes de silicone na fabricação de peças decorativas de grande transparência, maquetes, protótipos, etc. (Martins, 2017; Odegard *et al.*, 2011).

Foram realizadas quatro formulações de resina e “nata” calcária e outras quatro de resina com “nata” marmórea, tendo o seu comportamento no dispositivo de plano inclinado sido representado num gráfico tempo *versus* distância (Fig. 8) O número fracionário na legenda da figura 8 representa a percentagem de lamas (numerador) e a percentagem de resina de poliéster (denominador).

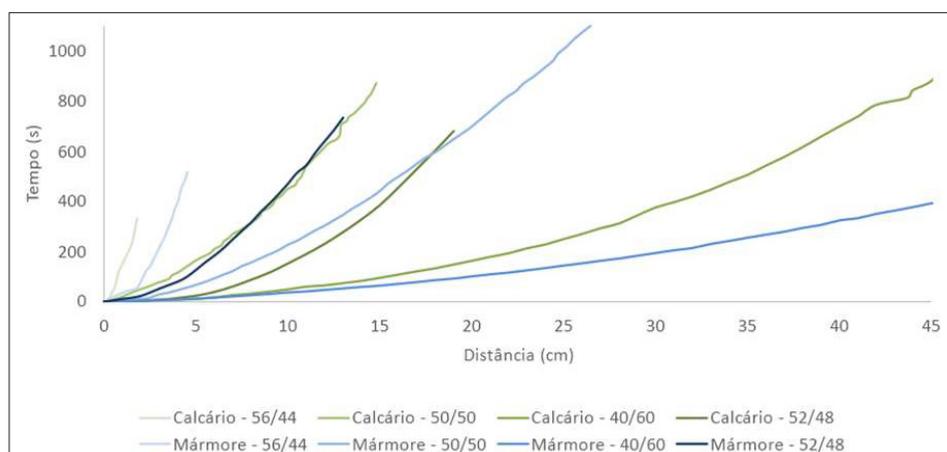


Figura 8 – Viscosidades das diferentes composições “nata” / resina.

Da análise do gráfico constata-se que há um comportamento semelhante entre formulações com os mesmos contributos percentuais de “nata” calcária e marmórea, bem como a fluidez que aumenta com o incremento de resina.

As argamassas (futuros ligantes) foram homogeneizadas com um misturador mecânico e despejadas em moldes cúbicos com 15 cm de aresta. Em seguida utilizou-se um vibrador de cimento para forçar a saída de bolhas de ar e os provetes foram deixados a secar à temperatura ambiente. Terminado os tempos de cura foram desmoldados e serrados em provetes cúbicos de 5 cm de aresta utilizados na determinação das resistências à compressão uniaxial (Fig. 9). Como o principal propósito desta investigação foi o de reduzir ao máximo a utilização da resina, aumentando os contributos da “nata” no ligante, sem comprometer a sua resistência, foram efetuados posteriormente ensaios de resistência à compressão uniaxial

das diferentes formulações a tempos de cura de 7, 14 e 28 dias, tendo-se obtidos os máximos valores no maior período de secagem (Tabela 2) (Viegas *et al.*, 2023).

Tabela 2 – Resistência mecânica à compressão uniaxial aos 28 dias de cura.

ANM – “Nata” Mármore; ANC – “Nata” Calcário; Res. – Resina

Formulações	R (MPa)	Formulações	R (MPa)
ANM3 – 54%NM / 46%Res.	102.73	ANC3 – 52%NC / 48%Res.	103.20
ANM4 – 50%NM / 50%Res.	98.35	ANC4 – 50%NC / 50%Res.	102.12
ANM5 – 47%NM / 53%Res.	96.23	ANC5 – 47%NC / 53%Res.	96.04
ANM6 – 52%NM / 48%Res.	106.37		



Figura 9 – Mistura mecânica do ligante, despejo em moldes, cubos desmoldados, provetes elementares de 15 cm de aresta e provete com 5 cm de aresta ensaiado na prensa para obtenção da resistência mecânica à compressão.

Aplicação de lamas carbonatadas da indústria extrativa e transformadora de pedra natural em compósitos pétreos

As formulações com melhores resultados foram as que apresentaram as proporções de 52%/48%, tendo a formulação ANM6 (52%NM/48% Res) revelado o melhor desempenho. De facto, cruzando esta informação com o resultado do teste de viscosidade, onde se observou o melhor compromisso entre fluidez e tempo de presa, conclui-se que estas proporções constituem os ligantes ideais

4. Formulações de Compósitos (Agregados + Ligante)

As formulações com agregados destinaram-se a criar o protótipo de um compósito pétreo, mais sustentável ambientalmente e mais económico. Selecionou-se o ligante com melhor desempenho, máximo teor em “nata” e menor incorporação de resina (52/48). A mistura de agregados de mármore inclui três frações granulométricas e também aqui se fizeram vários testes laboratoriais a pequena escala para se determinar quais os contributos percentuais de agregado e ligante com melhor desempenho. Coincidentemente, as proporções ideais de Agregado e Ligante são 52% / 48%.

Assim, elaboraram-se 8 misturas com agregado marmóreo (Bago de Arroz (BA), Brita 1 (B1) e Brita 2 (B2)): 4 com ligante calcário (“nata” calcária + poliéster); 4 com ligante marmóreo (“nata” de mármore + poliéster), tal como é observável na tabela 3.

Tabela 3 – Formulações de Agregados (52%) / Ligante (48%) e os contributos percentuais individuais de cada um dos componentes.

BA – Bago de Arroz; B1 – Brita 1; B2 – Brita 2; NC – Nata Calcária; NM – Nata Marmórea.

Formulações	Agregados (52%)			Ligantes (48%)		
	BA	B1	B2	NC	NM	Resina
F1	30%	30%	40%	52%		48%
F2	20%	20%	60%	52%		48%
F3	35%	15%	50%	52%		48%
F4	40%	40%	20%	52%		48%
F5	30%	30%	40%		52%	48%
F6	20%	20%	60%		52%	48%
F7	35%	15%	50%		52%	48%
F8	40%	40%	20%		52%	48%

O procedimento foi idêntico ao adotado para os provetes do ligante: produção de cubos com 15 cm de aresta, cortados em provetes cúbicos com sensivelmente 5 cm de aresta (Fig. 10), a utilizar no ensaio de resistência mecânica à compressão (Tabela 4).



Figura 10 – Provetes cúbicos de 15 cm de aresta e 5 cm de aresta, estes para o ensaio de resistência mecânica à compressão.

Tabela 4 – Resistência mecânica à compressão das oito formulações aos 28 dias de cura.

Formulações	R.M.C. (MPa)
F1	73.30
F2	69.06
F3	61.11
F4	91.96
F5	52.26
F6	76.33
F7	81.20
F8	88.19

Pela análise da tabela anterior, conclui-se que as formulações com valores mais altos de resistência mecânica à compressão foram as F4: 52% Agregados (40%BA / 40%B1 / 20%B2) + 48% Ligante (52% Nata Calcária + 48% Resina) e a F8: 52% Agregados (40%BA / 40%B1 / 20%B2) + 48% Ligante (52% Nata Marmórea + 48% Resina),

Terminada a fase que permitiu definir quais as formulações de misturas com melhor desempenho, o projeto entrou numa nova etapa, com a preparação das for-

Aplicação de lamas carbonatadas da indústria extrativa e transformadora de pedra natural em compósitos pétreos

mulações em moldes paralelepípedicos de maiores dimensões (55 cm x 15 cm x 15 cm) para a obtenção de novos provetes para mais ensaios de caracterização, nomeadamente testes de polimento em contexto industrial. Para o efeito os moldes foram cuidadosamente preparados com o revestimento de um filme plástico, tendo-se procedido de forma semelhante em relação aos ensaios anteriores (Fig. 11). Realce-se o facto, que a fase de vibração da mistura no molde ter sido fundamental, devido à inexistência de câmara de vácuo este é processo mais eficaz para a libertação de bolhas de ar. Terminado o tempo de cura, os provetes foram cortados de acordo com as dimensões requeridas para os ensaios a realizar posteriormente (cubos, paralelepípedos e chapas para polimento).

Na Tabela 5 constam os resultados referentes à resistência mecânica à compressão, à flexão, massa volúmica aparente e porosidade aberta, absorção de água à pressão atmosférica, absorção de água por capilaridade.

Tabela 5 – Ensaios de caracterização do protótipo de compósito.

NM – Formulação com ligante de Nata Marmórea; NC – Formulação com ligante de Nata Calcária.

Ensaio	Agregado + Ligante	
	NM	NC
Resistência Mecânica à Compressão (MPa)	88.19	91.96
Resistência Mecânica à Flexão (MPa)	15.49	13.49
Vol. Poros Abertos (ml)	0.224	0.214
Vol. Aparente (ml)	117.01	104.59
Massa volúmica aparente (g/m ³)	2.279	2.263
Porosidade aberta (%)	0.191	0.203
Absorção de água à pressão atmosférica (%)	0.2	0.1
Absorção de água por capilaridade (%)	0.088	0.062

Dos blocos de dimensões de 55 cm x 15 cm x 15 cm foram cortadas placas a 2 cm de espessura e posteriormente polidas na fábrica da empresa António Galego & Filhos – Mármore S.A. (Fig. 12), tendo-se obtido superfícies com um padrão estético aceitável. Do ponto de vista cromático realça-se o facto do compósito cujo ligante incorporou “nata” calcária” apresentou uma matriz mais escura de cor bege do que o compósito com ligante que incorporou “nata” de mármore, revelando-se esta mais clara e esbranquiçada.

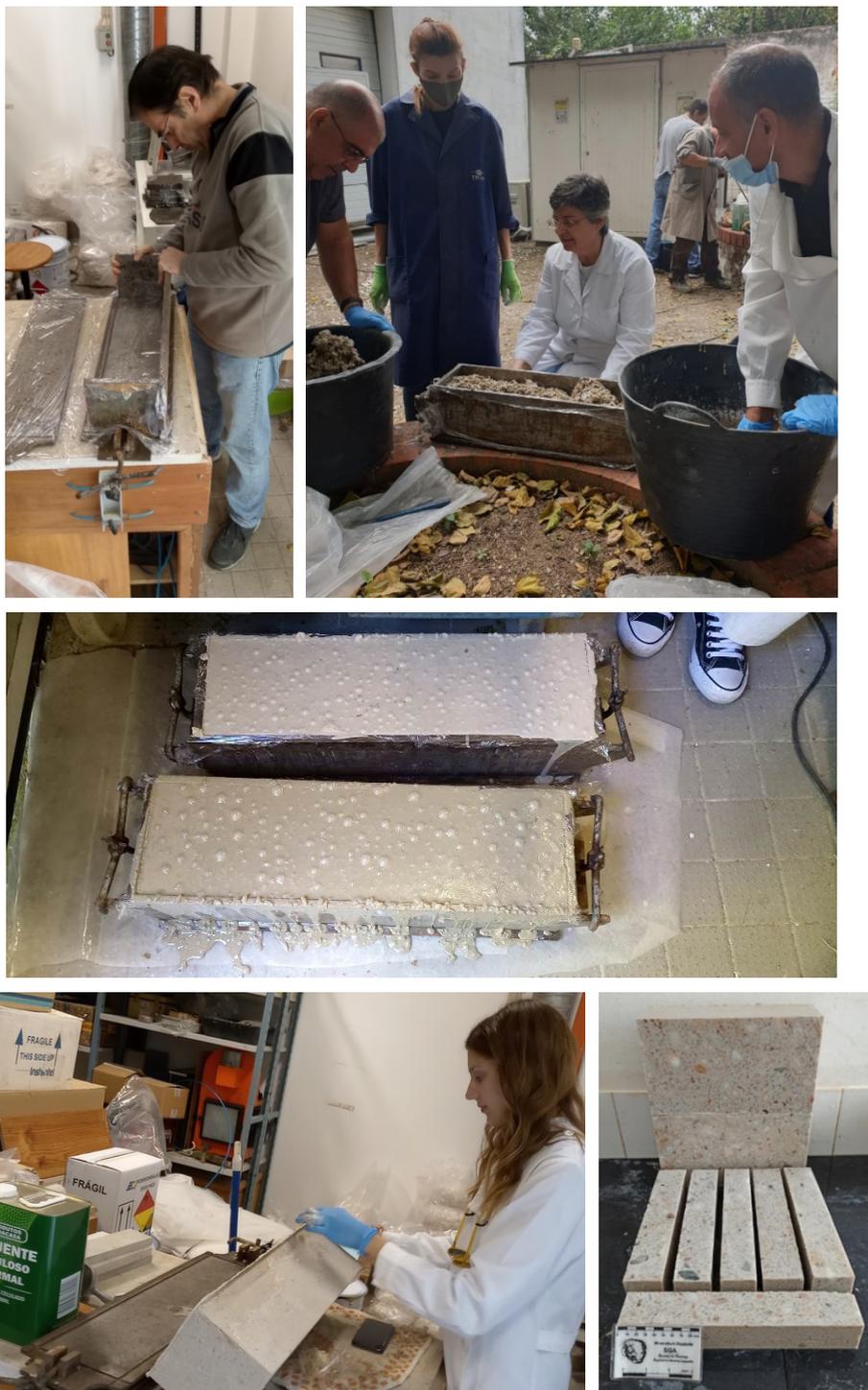


Figura 11 – Preparação dos moldes, enchimento dos mesmos, vibração, desmoldagem e provetes longitudinais após corte para ensaios de resistência mecânica à flexão.

Aplicação de lamas carbonatadas da indústria extrativa e transformadora de pedra natural em compósitos pétreos

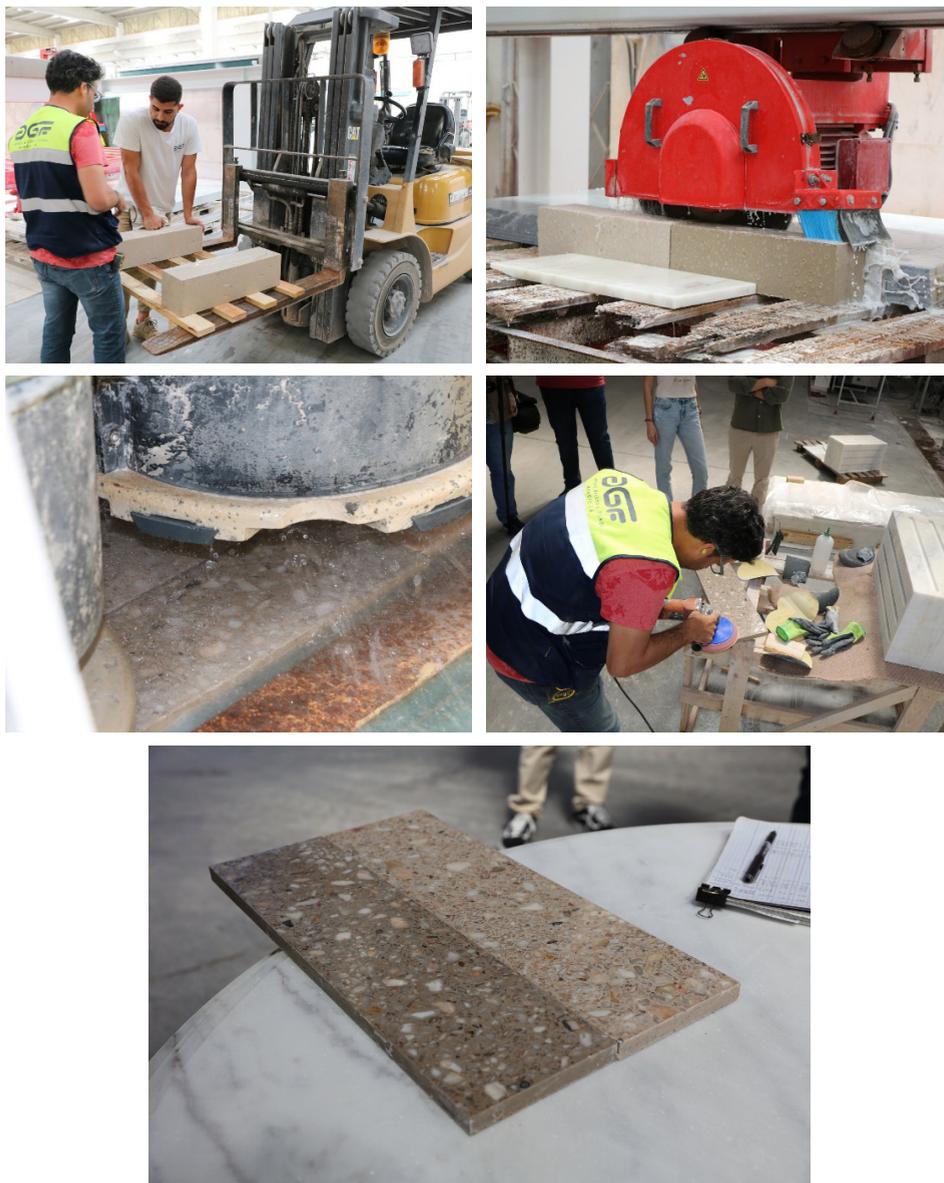


Figura 12 – Sequência do polimento das placas na Empresa António Galego & Filhos S.A.

5. Conclusões

Apesar das “natas” estudadas terem proveniências diferentes constatou-se uma grande semelhança do ponto de vista da análise granulométrica entre as amostras de natureza calcária e marmórea, este é um aspecto positivo na perspectiva de utilização industrial, já que não será necessária qualquer recolha seletiva.

A composição mineralógica das amostras M(A), M(AGF), C(S) e C(MVC) revelou lamas marcadamente carbonatadas, com picos na DRX, bem definidos na calcite.

Relativamente à composição química, todas as lamas carbonatadas possuem percentagens significativas de CaO na perda ao rubro, corroborando a composição mineralógica.

A proporção 52% de lama carbonatada e 48% de resina, revelou na formulação com a lama carbonatada de mármore uma resistência mecânica à compressão de 3 MPa superior à do calcário.

Constatou-se a possibilidade de substituição de resinas epoxídicas pelas resinas poliéster, sendo estas, em média, quatro vezes mais baratas que as resinas epoxídicas.

Os resultados obtidos, nos ensaios de resistência à compressão e flexão são promissores, devendo ser analisados à escala laboratorial, uma vez que apenas foi utilizado um misturador mecânico ligeiro de baixa capacidade para se proceder à homogeneização das formulações. A execução em contexto industrial com utilização de um misturador adequado e com câmara de vácuo, assegurará certamente um produto mais homogêneo, de maior densidade e menos defeitos estruturais, permitindo, seguramente, valores de resistência à compressão e flexão, superiores.

Comparando-se os valores obtidos para a resistência mecânica à compressão ($F_4 = 91.96$ Mpa e $F_8 = 88.19$ Mpa) com os valores de algumas rochas comercializadas como rocha ornamental, conclui-se que se encontram dentro do intervalo de valores para a Pedra Natural. Para demonstrar, apresentam-se alguns exemplos, considerando os valores mais baixos e mais altos de cada tipo de rocha (Catálogo de Rochas Ornamentais Portuguesas):

1. Calcários: Pedra de Ançã (23 MPa) – Banco de Baixo (167 MPa).
2. Mármore: Rosa Venado (70 MPa) – Branco Venado (102 MPa).
3. Granitos: Amarelo Vila Real (70 MPa) – Cinzento Alpalhão (253 MPa).

Em relação à resistência mecânica à flexão, para se estabelecer uma comparação com diferentes litótipos comercializados como rocha ornamental dá-se o exemplo de alguns valores de referência (Catálogo de Rochas Ornamentais Portuguesas):

1. Calcários: Olho de Sapo (Arrimal) (9 MPa) – Branco do Mar (31 MPa).
2. Mármore: Rosa (15 MPa) – Creme Venado (29 MPa).
3. Granitos: Amarelo Figueira (6 MPa) – Cinzento Azulália (35 MPa).

À semelhança do que se passa com os valores de resistência mecânica à compressão, também os de flexão estão dentro dos parâmetros normais de uma grande parte das rochas ornamentais (NM: 15.49 Mpa, NC: 13.49 Mpa).

Relativamente à absorção de água à pressão atmosférica, os valores para os calcários oscilam entre 0.2% e 9.6%, para os granitos entre 0.2% e 1.05% e os mármore na ordem de 0.1% (i.e. <https://www.primeirapedra.com/stones/> acesso

Aplicação de lamas carbonatadas da indústria extrativa e transformadora de pedra natural em compósitos pétreos

em 30 de junho de 2024). Pelo exposto também neste parâmetro os compósitos formulados apresentam bons valores de absorção (NM: 0.2; NC: 0.1).

Relativamente à porosidade aberta, os dois compósitos apresentam valores aproximadamente de 0.2%, equivalente às porosidades abertas que se observam no mármore e que são inferiores às dos granitos (0.4%, 0.7%) e às dos calcários (0.4%, > 1%) segundo o Portal das Rochas Ornamentais Portuguesas, LNEG (<https://geoportal.lneg.pt/pt/bds/rop/> acesso em 30 de junho de 2024).

A investigação é um processo contínuo e por isso ainda se pode ir mais longe, para já a possibilidade de utilização de resina poliéster em compósitos pétreos revelou-se promissora, assim como a incorporação de lamas e fragmentos carbonatadas provenientes do processamento de calcários e mármore, contribuindo assim para a otimização do aproveitamento da matéria-prima extraída e para a redução dos impactes ambientais provocados pela circulação e depósito a céu aberto destes materiais.

Agradecimentos

Este estudo foi desenvolvido no âmbito do projeto “CALCINATA – Produção de argamassa à base de cal a partir da calcinação de lamas carbonatadas provenientes da indústria das rochas ornamentais (mármore e calcários)” com a referência ALT20-03-0247-FEDER-072239. Projeto cofinanciado pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER) enquadrado no ALENTEJO 2020 (Programa Operacional Regional do Alentejo).

Os autores agradecem especialmente à Associação Cluster Portugal Mineral Resources, cogestora do projeto e ao Gabinete de Apoio aos Projectos da Universidade de Évora.

Vera Pires agradece ao Contrato Programa entre FCT e a Universidade de Évora no âmbito do concurso estímulo ao emprego científico institucional 2018, à Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) no âmbito dos projetos UIDB/04449/2020 e UIDP/04449/2020—através do laboratório HERCULES.

Um especial agradecimento às empresas António Galego & Filhos – Mármore SA, A.L.A. de Almeida SA., Solancis – Sociedade Exploradora de Pedreiras SA, MVC – Mármore de Alcobaça Lda. e Marvisa, Mármore Alentejanos Lda.

Referências

- Afonso P, Pires V, Faria P, Azzalini A, Lopes L, Mourão P, Martins R. A Novel Approach for the Reuse of Waste from the Extractive and Processing Industry of Natural Stone Binders: Development of Stone Composites. *Sustainability*. 2024; 16(1):64. <https://doi.org/10.3390/su16010064>
- Alves, T. 2015. Formulação de Pastas Cerâmicas a partir de Matérias-Primas Argilosas dos Concelhos de Vila Viçosa e Redondo para a Produção de Olaria Tradicional. Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em Geociências. Universidade de Évora. 259 p.

- Comité Europeu de Normalização. CEN/TC 246 – Natural Stones. <https://standards.cen.eu/> consulta em 30 de junho de 2024
- Instituto Português da Qualidade. NP EN 1097-7 2002 – Determinação da massa volúmica do filler – Método do Picnómetro.
- Instituto Português da Qualidade. NP EN 12372_2008 – Determinação de resistência à flexão por carga central.
- Instituto Português da Qualidade. NP EN 13755_2008 – Determinação da absorção de água à pressão atmosférica.
- Instituto Português da Qualidade. NP EN 1925_2000 – Coeficiente de absorção por capilaridade.
- Instituto Português da Qualidade. NP EN 1926_2008 – Determinação de resistência à compressão uniaxial.
- Juvandes, L.F.P. 2002. Materiais Compósitos Reforçados com Fibras, FRP. Ciência dos Materiais, Licenciatura em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Departamento de Engenharia Civil, pp. 76.
- Korneliussen, A.; Lopes, L.; Martins, R. 2014. Estremoz Marbles, Portugal – a potential resource for high whiteness industrial applications; V Global Stone Congress (22–25 October 2014), Antalya, Türkiye.
- Laboratório Nacional de Engenharia Civil. NP E234-1969 – Análise granulométrica de filler.
- Martins, Dias da Silva K. A. 2017. Análise do envelhecimento acelerado de polímeros. Tese de Mestrado. Universidade de Aveiro.
- Martins, R., Faria, P., Lopes, L., Pires, V., Mourão, P., Azzalini, A. 2021. Relatório N.º 01/2021 Entregável N.º E1.1 – Relatório Preliminar. <http://hdl.handle.net/10174/31722>.
- Martins, R., Faria, P., Lopes, L., Pires, V., Mourão, P., Azzalini, A. 2022. Relatório N.º 01/2022 Entregável N.º E2.1 – Relatório sobre as especificações técnicas da nata e da argamassa. <http://hdl.handle.net/10174/33766>.
- Martins, R., Lopes, L., Faria, P., Pires, V., Afonso, P., Mourão, Paulo., Velez, J. 2022a. Relatório N.º 02/2022 Entregável N.º E3.1 – Relatório sobre construção dos protótipos necessários para a validação dos resultados da solução estrutural. Ajuste de detalhe nas especificações dos protótipos. <http://hdl.handle.net/10174/33701>.
- Martins, R., Lopes, L., Faria, P., Pires, V., Afonso, P., Mourão, Paulo., Velez, J. 2023. Produção de argamassa à base de cal a partir da calcinação de lamelas carbonatadas provenientes da indústria das rochas ornamentais (mármore e calcários) RELATÓRIO N.º 01/2023 Entregável N.º E7.6 – Relatório Final. <http://hdl.handle.net/10174/36916>.
- Martins, R., V. 1997. Aplicações Industriais de “Natas” Resultantes da Indústria Transformadora de Rochas Ornamentais Carbonatadas. Tese de Mestrado. Universidade de Aveiro, pp. 150.
- Odegard, G.M., Bandyopadhyay, A., 2011. Physical aging of epoxy polymers and their composites. J. Polym. Sci. Part B Polym. Phys. <https://doi.org/10.1002/polb.22384>.
- Ventura, A., Martins, R., Andrade, G., Gomes, C., Lopes, L. 2009. Incorporação de lamelas de serragem e polimento de rochas carbonatadas em pastas para produção de cerâmica monoporosa; *Kerâmica, Revista da Indústria Cerâmica Portuguesa*, APICER, pp. 6-15.

Aplicação de lamas carbonatadas da indústria extrativa e transformadora de pedra natural em compósitos pétreos

Viegas, P., Azzalini, A., Lopes, L., Faria, P., Mourão, P., Martins, R., Ribeiro, V. 2023. Escombreiras e depósitos de lamas provenientes da indústria de rochas ornamentais carbonatadas – um caso de estudo de aplicação de "natas" na produção de ligantes à base de resina para a produção de compósitos pétreos; Atas do 18.º Congresso Nacional de Geotecnia (18CNG) Geotecnia e Alterações Climáticas, Évora, 14 a 17 de maio de 2023; ISBN: 978-989-54038-9-9.

