

Estudo de solo-cimento com a incorporação de resíduo proveniente do beneficiamento secundário de rochas ornamentais

Eliziane da Silva¹
Fabiano Alexandre Nienov²

Resumo

O presente estudo visa oferecer uma alternativa de reaproveitamento do resíduo produzido em marmorarias, avaliando o comportamento de misturas de solo-cimento com substituição parcial da areia pelo rejeito. Foram analisados parâmetros como a resistência à compressão simples, absorção de água e porosidade dos corpos de prova. Para tanto, elaborou-se traços com percentuais de substituição de 0%, 5%, 10%, 15% e 20%, enquanto o cimento foi utilizado como adição em 10%. Observou-se que o acréscimo do resíduo elevou a massa específica aparente seca e a resistência à compressão e reduziu a absorção de água. A melhor resistência obtida foi de 15,20 MPa com a mistura A80-R20-C10 (areia-resíduo-cimento) aos 28 dias de cura, equivalente a um aumento de 122,55% da resistência alcançada no traço sem resíduo. De igual modo, o menor valor da absorção foi de 0,75%, verificado na mistura A80-R20-C20 (areia-resíduo-cimento), aos 7 dias de cura. Diante disto, o resíduo se mostra com potencial para a aplicação em solo-cimento para utilização em bases e sub-bases de pavimentos, em tijolos ecológicos, paredes monolíticas e em contenções, aspirando à preservação ambiental, à melhora das propriedades físicas e mecânicas e à economia.

Palavras-chave: resíduo de marmorarias; solo-cimento; resistência.

1 INTRODUÇÃO

A preservação ambiental e a produção sustentável são temas muito pautados atualmente. Especialmente se tratando da construção civil, existe a preocupação em atrelar a qualidade das obras tentando minimizar ao máximo seu custo e o impacto que causam ao meio ambiente e, diante disso, pesquisas quanto ao reaproveitamento dos resíduos gerados ao longo de processos executivos dentro do próprio setor da construção têm se mostrado eficientes.

O Brasil é responsável por uma forte atividade industrial de extração e beneficiamento de rochas ornamentais, tais como granito, mármore, gnaisse, entre outras. De acordo com a Associação Brasileira das Indústrias de Rochas Ornamentais (ABIROCHAS, 2019) no ano de 2018 as rochas ornamentais figuraram como o 5º produto de base mineral mais exportado

¹ Acadêmica do Curso de Engenharia Civil na Universidade do Oeste de Santa Catarina, campus de Joaçaba; elizianne.silvaa@gmail.com

² Professor Doutor, Universidade do Oeste de Santa Catarina; fabiano.nienov@unoesc.edu.br

pelo Brasil, ultrapassando os 2,20 milhões de toneladas, atrás apenas do minério de ferro, minério de cobre, ferro-ligas e do ouro.

A atividade de extração e de beneficiamento de rochas gera enormes quantidades de resíduos sólidos que não possuem destinação senão o descarte na natureza. Os resíduos produzidos em marmorarias, os quais serão objetos de estudo, são oriundos do processo de beneficiamento secundário das pedras ornamentais, em que há transformação de parte da rocha em material pulverulento através da etapa de corte, polimento e acabamento das peças.

Embora seja um elemento natural, a geração indiscriminada e a disposição inadequada do rejeito geram prejuízos às empresas, bem como inúmeros impactos ao meio ambiente. Posto isto, devido as boas características específicas do material de origem, além de sua elevada finura, que é capaz de preencher vazios entre partículas, há potencialidades de reutilização do resíduo de marmorarias em setores da construção civil, a citar, no solo-cimento.

O solo-cimento consiste na mistura homogênea de solo, cimento e água, compactada a umidade ótima, a qual ganha resistência ao longo do período de cura. Pode ser utilizado em diversos setores como pavimentação, construção e em muros de contenção e permite a incorporação de materiais alternativos, como resíduos, na sua fabricação, agregando valor ambiental.

Diante do exposto, a pesquisa tem por finalidade contribuir com os estudos de melhoramentos de solos, atribuindo um possível destino ao resíduo gerado no beneficiamento de rochas ornamentais, com uma perspectiva de ganho nas propriedades das misturas de solo-cimento. O estudo é composto por misturas contendo areia comercial e cimento com a substituição parcial da areia por resíduo, a fim de verificar as propriedades físicas e mecânicas de corpos de prova para os diferentes teores do rejeito.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 ROCHAS ORNAMENTAIS

Rocha ornamental é a denominação empregada para designar o material rochoso natural, submetido a diferentes graus ou tipos de beneficiamento, conferindo-lhe características de beleza, funcionalidade, facilidade de aplicação e durabilidade, com foco principal para exercer uma função estética. Possui um campo de aplicação bastante vasto e historicamente distribuído em 75% em obras civis, 15% em arte funerária e 10% em aplicações diversas (ALENCAR, 2013).

Qualquer que seja a aplicação, as rochas ornamentais possuem um ciclo produtivo que pode ser dividido em três etapas bem definidas, desde a atividade mineral até a conformação do produto, tais quais: extração, beneficiamento primário e beneficiamento secundário ou final (ALENCAR, 2013).

A etapa de extração consiste na remoção do material útil e economicamente aproveitável dos maciços rochosos ou dos matacões. O produto da etapa de extração é um bloco de arestas aproximadamente retangulares e de dimensões variadas, que procuram se aproximar àquelas que proporcionam o melhor aproveitamento do material e a maior utilização da capacidade produtiva dos equipamentos nas etapas de beneficiamento (ALENCAR, 2013).

O processo de beneficiamento possui como objetivo o tratamento final da rocha, adequando as peças às especificações de dimensões e de acabamento superficial que o produto requer. O beneficiamento primário ocorre nas serrarias, onde os blocos são transformados em chapas através de maquinário específico, os teares. Durante esta fase, utiliza-se uma mistura de água, cal e granalha para aumentar o atrito no processo e lubrificar as lâminas do equipamento, sendo expurgada juntamente com o pó da rocha serrada e com o resíduo da lâmina de aço produzindo (SÁ LEITÃO, 2018).

Por fim, o beneficiamento secundário ou final ocorre dentro das marmorarias, nas quais as peças tomam forma, dimensões e aparência definitivas. O processo pode ser subdividido em corte, polimento e acabamento, o que gera uma quantidade significativa de resíduos na forma de aparas e em lama, composta basicamente por rocha moída e água (ALENCAR, 2013).

Todo este ciclo de produção contribui consideravelmente na economia brasileira. O Brasil detém grande parte das reservas mundiais de rochas ornamentais e ocupa as primeiras posições no ranking mundial de extração e comercialização dos produtos, representando um importante setor na economia, visto que movimenta o mercado interno e externo, com exportações principalmente para os EUA, correspondente a 62% do total do faturamento, seguido pela China (12,1%), Itália (6,3%), México (3%), Reino Unido (1,7%), Canadá (1,5%) e Espanha (1%) (ABIROCHAS, 2019).

Embora seja um setor produtivo, não se pode desconsiderar os problemas ambientais decorrentes desta atividade, em especial a geração de quantidades expressivas de resíduos os quais, em sua maior parte, são descartados diretamente na natureza, levando à contaminação dos corpos hídricos e do solo, à poluição atmosférica e à desfiguração da paisagem natural.

2.1.1 Resíduos de Marmorarias

Os resíduos produzidos em marmorarias são oriundos, basicamente, do processo de corte e polimento.

Na etapa de corte as chapas são adequadas à forma e à dimensão final do produto, gerando resíduos na figura de aparas, que são pedaços de pedras desperdiçadas por possuírem menor qualidade ou pouco valor comercial. Já na etapa de polimento e acabamento final os equipamentos mais utilizados durante a operação são as politrizes, instrumentos dotados de rebolos abrasivos fixados em cabeçotes rotativos que, por sua vez, são aplicados sob pressão

e em movimentos circulares sobre a superfície das placas, utilizando um fluxo constante de água para a refrigeração do processo e escoamento dos resíduos em forma de lama (SOUSA, 2007).

Através do Fluxograma 1, é possível identificar a sequência de produção do resíduo em lama gerado nas marmorarias e sua configuração visual quando seco, bem como a comum destinação no meio ambiente.

Fluxograma 1 - Sequência de produção dos resíduos em lama nas marmorarias



Fonte: os autores (2020).

Em relação à classificação do resíduo em lama perante a NBR 10004 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004), conforme Lima *et al.* (2011) o material gerado no processo de beneficiamento secundário em marmorarias possui características não biodegradáveis, inertes e atóxicas, sendo, portanto, classificados como resíduo Classe II-B.

Consoante Oliveira (2005 apud LIMA, 2010) embora a lama de marmorarias possa ser considerada inerte e atóxica, sua geração indiscriminada e disposição inadequada geram para as empresas, incômodo e despesa, além de inúmeros impactos ao meio ambiente como: alteração das condições de drenagem do solo, poluição do ar, poluição visual, modificação e destruição da paisagem natural e danos à saúde humana, visto que quando seca, a lama forma um pó que pode causar doenças respiratórias, se inalada.

A partir dessas informações, percebe-se que é de suma importância o acompanhamento do destino dos resíduos de marmorarias. Este material possui algumas características específicas como granulometria fina, composição química predefinida e a inexistência de grãos mistos entre os componentes básicos que favorece seu aproveitamento e reciclagem (LIMA *et al.*, 2011). À vista disso, há potencialidades da utilização como elemento de acréscimo de propriedades em algumas misturas em áreas da construção civil, como no solo-cimento.

2.2 SOLO-CIMENTO

O solo, na sua forma natural, tende a passar por mudanças nas propriedades físicas com alterações nos teores de umidades, comprometendo a resistência. Diante disso, para ser aplicado em alguns ramos da construção, necessita que métodos de estabilização sejam aplicados, de modo a reduzir variações volumétricas e aumentar a resistência até o ponto em que possa suportar os carregamentos impostos, mantendo-se assim mesmo sob ações climáticas desfavoráveis (PEURIFOY *et al.*, 2015).

Os principais métodos de estabilização de solos são a compactação, a correção granulométrica e a adição de estabilizante químico, sendo comumente realizada a combinação entre mais de um método (BRITO; PARANHOS, 2017).

A estabilização química busca melhorar o solo por meio das reações que ocorrem entre um agente aglomerante e as partículas presentes no solo. Os métodos de estabilização mais utilizados são as misturas de solo-cal, ideal para solos argilosos e de solo-cimento, mais eficientes em solos arenosos (BRITO; PARANHOS, 2017).

As misturas de solo-cimento são compostas basicamente pela combinação homogênea de solo, cimento Portland e água, em proporções estabelecidas através de dosagem experimental, compactadas mecanicamente e endurecidas por cura (BRITO; PARANHOS, 2017). O produto resultante deste processo é um material com boa resistência à compressão, bom índice de impermeabilidade, baixo índice de retração volumétrica e boa durabilidade (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND, 2004).

De modo geral, qualquer tipo de solo pode ser utilizado e apresenta melhorias quando misturado com cimento e submetido a processos de compactação à umidade ótima, contudo, os mais viáveis são os que precisam de baixos teores de cimento para a sua estabilização. Deste modo, os solos arenosos são considerados os mais adequados, uma vez que a existência de grãos de areia e pedregulhos é benéfica, pois são materiais inertes e possuem apenas a função de enchimento, o que favorece a liberação de quantidades maiores de cimento para aglomerar os grãos menores (SAGANTINI, 2000).

O cimento é o aglomerante da mistura e é responsável por conferir o acréscimo nas propriedades mecânicas do solo através do seu processo de hidratação, em que desenvolve vínculos físicos entre as superfícies dos grãos hidratados e as partículas do solo (MARQUES, 2010 apud BRITO; PARANHOS, 2017). A melhor maneira de fixar os teores de cimento para os ensaios

é a comparação do solo em estudo com outros já ensaiados, levando-se em consideração a granulometria, os índices de consistência, dentre outras características (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND, 2004).

A Tabela 1 apresenta valores empíricos de cimento recomendados em misturas de solo-cimento, de acordo com o tipo de solo, segundo a classificação H.R.B ou AASHTO.

Tabela 1 - Teores de cimento indicados para o ensaio de compactação

Classificação do solo segundo AASHTO	Teor de Cimento (%)
A1- a	5
A1- b	6
A2	7
A3	9
A4	10
A5	10
A6	12
A7	13

Fonte: adaptada de Associação Brasileira de Cimento Portland (2004).

Na construção civil, o solo-cimento possui diversas aplicações importantes como em edificações, paisagismo, pavimentação, contenção de encostas, sendo especialmente estudado para aplicação em paredes monolíticas, tijolos ecológicos e em bases e sub-bases de pavimentos (LIMA, 2010).

2.2.1 Incorporação do resíduo em misturas de Solo-Cimento

De acordo com Lima (2010), além dos componentes básicos das misturas de solo-cimento, há possibilidade de incorporação de materiais alternativos como agregados produzidos com entulhos reciclados e rejeitos industriais (sílica ativa, cinzas volantes, escórias de alto forno e outros), agregando valor ambiental ao material. A quantidade de materiais a serem misturados é conhecida como traço, os quais devem produzir corpos de prova de solo-cimento com resistência satisfatória, de acordo com a aplicação proposta, após o período de cura.

Assim, sendo o solo-cimento uma ótima alternativa na construção civil, tanto em sua composição mais comum (solo, cimento e água) quanto nas mais diversas composições estudadas, que visam dar uma destinação correta para diferentes tipos de resíduos, pesquisas recentes incluem a fabricação de solo-cimento com a incorporação de resíduos produzidos em marmorarias, como alternativa para crescer resistência às misturas sem necessidade de aumentar o teor de cimento, atrelando economia e preservação ambiental (LIMA *et al.*, 2011).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

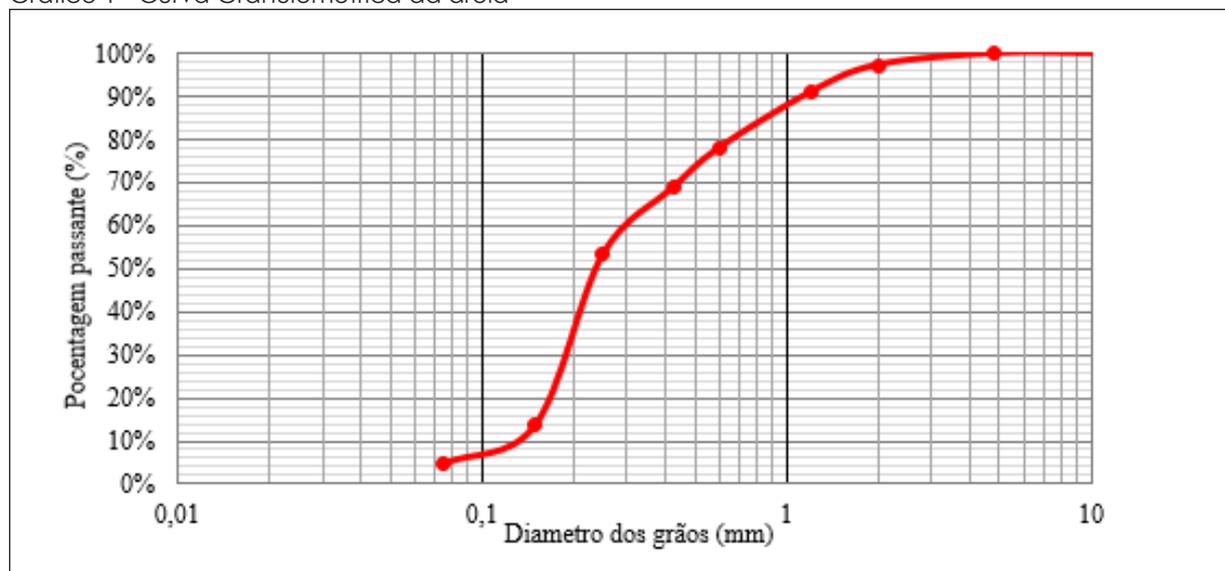
Os experimentos foram realizados utilizando como solo uma areia comercial, como aglomerante o cimento CPV ARI, o resíduo de marmoraria em substituição a areia nos traços e a água do tipo potável.

Com intuito de caracterizar e classificar o solo e o resíduo, realizou-se o ensaio de granulometria, seguindo as diretrizes da NBR 7181 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2016), bem como o ensaio de massa específica real dos grãos, consoante as premissas determinadas pela norma DNER-ME 093 (DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM, 1994).

O solo utilizado durante os ensaios foi adquirido na cidade de Videira- SC, possuindo origem desconhecida. O material foi transportado até o Laboratório de Solos, Materiais e Asfalto da Universidade do Oeste de Santa Catarina- Campus Joaçaba, onde se realizou a secagem em estufa a $105 \pm 5^\circ\text{C}$ até a constância da massa, sendo posteriormente destorroado e armazenado em sacos plásticos, a fim de que não absorvesse umidade.

O Gráfico 1 apresenta a curva granulométrica da areia, enquanto a Tabela 2 as características qualitativas.

Gráfico 1 - Curva Granulométrica da areia



Fonte: os autores (2020).

Tabela 2 - Caracterização da areia

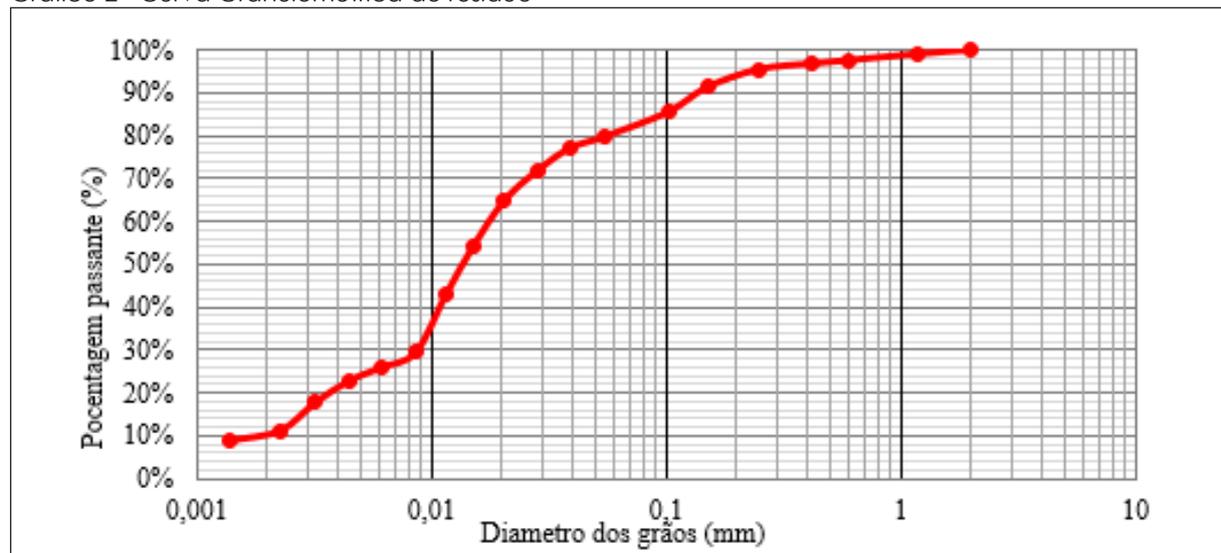
Característica	Classificação
Massa específica real dos grãos (g/cm ³)	2,613
Umidade Higroscópica	0,10%
Pedregulho - > 4,8 mm (%)	0,04%
Areia grossa - 2 a 4,8 mm (%)	2,70%
Areia média - 0,42 a 2 mm (%)	28,53%
Areia fina - 0,0075 a 0,42 mm (%)	63,92%
Silte e Argila - < 0,0075 mm (%)	4,82%
Limite de Liquidez - LL (%)	Não líquida
Limite de Plasticidade - LP (%)	Não plástica
Classificação textural	Areia
Classificação H. R. B	A3
Classificação SUCS	SP-Areia Mal graduada

Fonte: os autores (2020).

Em relação ao resíduo de marmoraria, a coleta foi realizada na empresa Marmoraria Santa Tereza, localizada em Videira- SC, a qual realiza o processo de beneficiamento secundário utilizando água, produzindo o resíduo em lama. O armazenamento do material foi efetuado em baldes plásticos e após a secagem em estufa a 105 ± 5 °C até a constância de massa, o material foi conservado em sacos plásticos, assim como com a areia.

O Gráfico 2 apresenta a curva granulométrica do resíduo, enquanto a Tabela 3 suas características.

Gráfico 2 - Curva Granulométrica do resíduo



Fonte: os autores (2020).

Tabela 3 - Caracterização do resíduo

Característica	Classificação
Massa específica real dos grãos (g/cm ³)	2,725
Umidade Higroscópica	0,13%
NBR 10004 (2004)	Classe II-B
Classificação Granulométrica	Pulverulento, com boa graduação de finos

Fonte: os autores (2020).

Analisando o Gráfico 2, observa-se que se trata de um material fino de caráter pulverulento, haja vista que possui mais que 80% dos seus grãos com dimensões inferiores a 0,075 mm. Verifica-se também que possui uma boa graduação dos finos, visto que as dimensões das partículas abrangem uma extensa faixa de valores.

Visando obter uma estimativa de produção do resíduo, coletou-se os dados declarados na autorização ambiental ao órgão fiscalizador (IMA SC- Instituto do Meio Ambiente de Santa Catarina), do ano de 2020, de duas empresas localizadas no município de Videira/SC que realizam somente o beneficiamento secundário das pedras ornamentais. Os resíduos declarados são classificados como lodo, oriundo da limpeza dos tanques de decantação e resíduos de cimento, que é o lodo quando já não possui água, ambos com destinação em aterros sanitários. Através da leitura dos dados foi possível concluir que há uma produção média, por empresa, de 25.000 Kg/ano, o que se mostra não ser um valor exorbitante e, portanto, se houver viabilidade de aplicação, pode-se agregar valor comercial ao resíduo.

Quanto ao cimento, embora se possa utilizar qualquer tipo em misturas de solo-cimento, optou-se para a pesquisa pelo uso CPV ARI- MAX, fabricante Brennand Cimentos, devido ao ganho de resistência em um curto período de tempo, atingindo aproximadamente 80% da resistência final nos primeiros 7 dias. Já a água utilizada nas misturas, foi do tipo potável, proveniente da rede pública de abastecimento da cidade de Joaçaba- SC.

3.2 MÉTODOS

3.2.1 Misturas desenvolvidas

As misturas foram desenvolvidas almejando avaliar a alteração nas propriedades de corpos de prova de solo-cimento devido à substituição parcial da areia pelo resíduo, para tanto, fixou-se em 10% a adição de cimento, variando 5 traços com as substituições em 5%. Um traço somente com areia foi realizado a fim de obter parâmetros comparativos no ensaio de compactação, uma vez que não havia condições de moldar corpos de prova, já que a ausência de aglomerante provocaria a desintegração do material ao perder água.

A Tabela 4 demonstra os traços desenvolvidos, sendo "A", "R" e "C", respectivamente areia, resíduo e cimento.

Tabela 4 - Misturas desenvolvidas no estudo

Mistura	Areia (%)	Resíduo (%)	Cimento (Adição) (%)
A100-R0-C0	100	0	0
A100-R0-C10	100	0	10
A95-R05-C10	95	5	10
A90-R10-C10	90	10	10
A85-R15-C10	85	15	10
A80-R20-C10	80	20	10

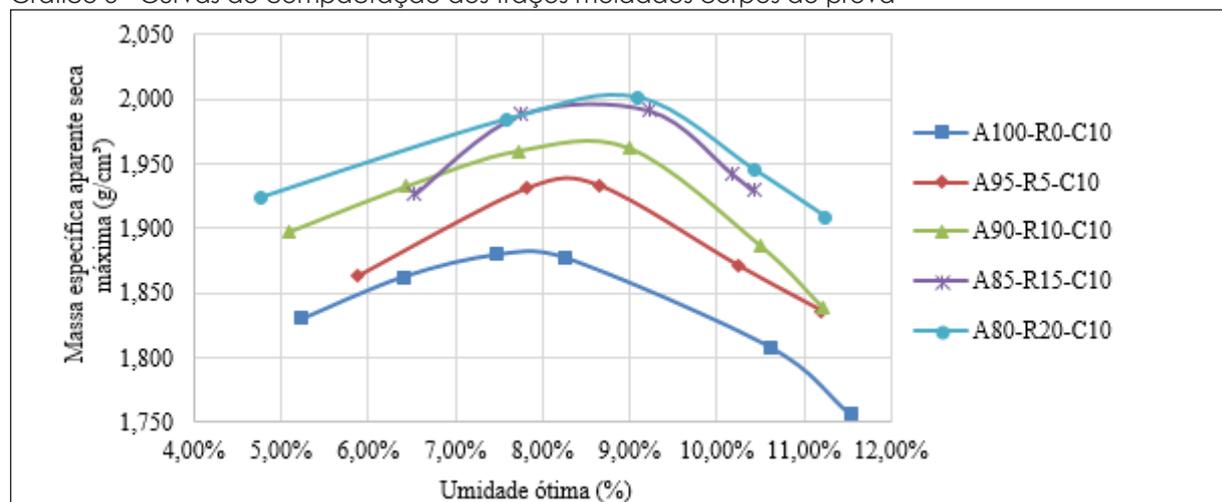
Fonte: os autores (2020).

3.2.2 Ensaio de Compactação

O ensaio possui como objetivo relacionar o teor de umidade e a massa específica aparente seca do solo ou mistura compactada. Durante a compactação, quando se adiciona água ao solo, esta atua como agente lubrificante e faz com que as partículas de solo deslizem umas sobre as outras, promovendo um aumento na densidade da mistura. Este fenômeno ocorre até o momento em que se atinja o limite ótimo de umidade, com o qual se obtém o peso específico máximo, que corresponde ao ponto em que o solo está potencialmente apto para atingir seu pico de resistência. Quando a adição de água ultrapassa o limite ótimo, verifica-se que a densidade do material compactado tende a reduzir, pois a água amortiza a compactação já que passa a ocupar os espaços que eram preenchidos pelas partículas sólidas (DAS; SOBHAN, 2019).

Experimentalmente, foram seguidos os parâmetros estabelecidos pela NBR 7182 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2016). O ensaio foi realizado para os seis traços discriminados na Tabela 4, sendo adotada a energia de compactação normal do ensaio de proctor para todas as misturas, modificando apenas a quantidade de cada material. As curvas de compactação dos traços utilizados para a moldagem podem ser observadas no Gráfico 3.

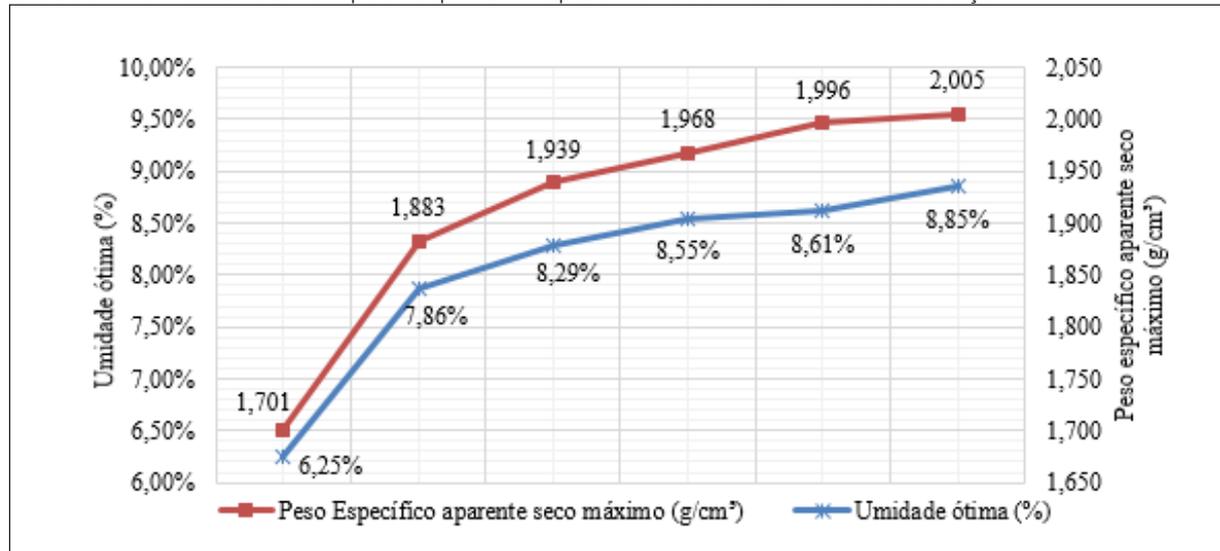
Gráfico 3 - Curvas de compactação dos traços moldados corpos de prova



Fonte: os autores (2020).

Por meio do ensaio se obteve os parâmetros para a moldagem dos corpos de prova de cada traço, sendo estes o teor de umidade ótimo e o peso específico aparente seco máximo, representados no Gráfico 4.

Gráfico 4 - Umidade ótima e peso específico aparente seco máximo de cada traço



Fonte: os autores (2020).

Verifica-se um aumento no teor da umidade ótima com a adição de cimento, comparado com a areia natural, o que é justificado pelo fato do cimento possuir grãos mais finos e, portanto, necessitar de mais água para lubrificar as suas partículas. Nas misturas com substituição do solo pelo resíduo e adição de cimento, também se observou um ligeiro acréscimo na umidade ótima conforme houve o aumento de resíduo nos traços. Assim como com o cimento, a quantidade de água extra é destinada aos grãos do resíduo de marmoraria, uma vez que a necessidade de água varia de acordo com a quantidade de partículas e o seu diâmetro, sendo que com o aumento dos finos é necessária maior umidade para lubrificar os grãos, devido a superfície específica ser maior.

Quanto a densidade dos traços, verificou-se que a adição de cimento provocou um aumento de aproximadamente 10,70% comparado à areia natural. Já entre as misturas de areia-resíduo-cimento constata-se que quanto maior o teor de resíduo no traço, maior o valor da massa específica aparente seca máxima, o que se deve ao entrosamento entre as partículas menores, de resíduo, com as maiores, de areia, gerando o preenchimento de vazios e conseqüentemente aumento na densidade.

Ademais, o aumento no peso específico aparente seco das misturas com resíduo também é influenciado pela substituição da areia pelo rejeito, já que o peso específico real dos grãos de resíduo corresponde a um acréscimo de aproximadamente 4,30% do peso da areia.

Analisando o Gráfico 4 constata-se também que o aumento no $y_{d_{max}}$ não tende a crescer de forma linear com acréscimo de resíduo, visto que houve somente uma pequena variação entre o traço A85-R15-C10 e A80-R20-C10, o que é coerente, em virtude de que a interação com os grãos de cimento e de areia ocorrerá até o limite máximo de fechamento granulométrico.

3.2.3 Preparação das misturas, moldagem e cura dos corpos de prova

Os procedimentos de moldagem e de cura seguiram as recomendações da NBR 12024 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2012).

A elaboração das misturas e a moldagem dos corpos de prova foram efetuadas para todos os traços em estudo, discriminados na Tabela 4, exceto para o composto somente por areia (A100-R0-C0). O preparo ocorreu com base nos dados de peso específico aparente seco máximo e de umidade ótima, obtidos no ensaio de compactação para cada traço, separando material suficiente para a moldagem de 3 corpos de prova para cada mistura, repetindo o processo para cada tempo de cura de 7, 14 e 28 dias.

Deste modo, com os materiais previamente secos em estufa, em uma fôrma de alumínio adicionou-se a areia, o resíduo de marmoraria e o cimento, nas devidas porcentagens, num total de 1.650 g da mistura por traço, realizando a homogeneização de forma manual até que apresentasse uma coloração uniforme. Em seguida, o material foi armazenado em potes plásticos, vedados, até o momento da moldagem dos CPs, a fim de evitar o contato com a umidade do ambiente.

Para a moldagem, utilizou-se uma prensa manual e um molde tripartido com diâmetro de aproximadamente 5,1 cm e altura de 10,0 cm. Utilizou-se 550 g da mistura seca para cada corpo de prova, logo fazendo a adição de água conforme a umidade ótima de cada traço, acrescida em 1%, com intuito de compensar as perdas de umidade por evaporação. Os corpos de prova foram moldados com três camadas uniformes, para as quais foram separadas as quantidades da mistura correspondentes a cada camada do molde, sendo armazenadas em potes fechados para garantir o teor de umidade desejado.

Finalizada a moldagem, os corpos de provas foram removidos do molde (Fotografia 1 (a)) e passaram por uma aferição de diâmetro, altura e peso, para obter subsídios para a determinação da porosidade. Em seguida, foram identificados e embalados em um saco plástico, permanecendo deste modo em uma caixa térmica até a data de rompimento, conforme pode ser visualizado na Fotografia 1 (b).

Fotografia 1 – (a) Corpo de Prova desmoldado e (b) processo de cura



(a)



(b)

Fonte: os autores (2020).

O processo de moldagem foi finalizado com a fabricação de 45 CPs, sendo moldados 9 CPs para cada traço e destes, 3 para cada tempo de cura de 7, 14 e 28 dias.

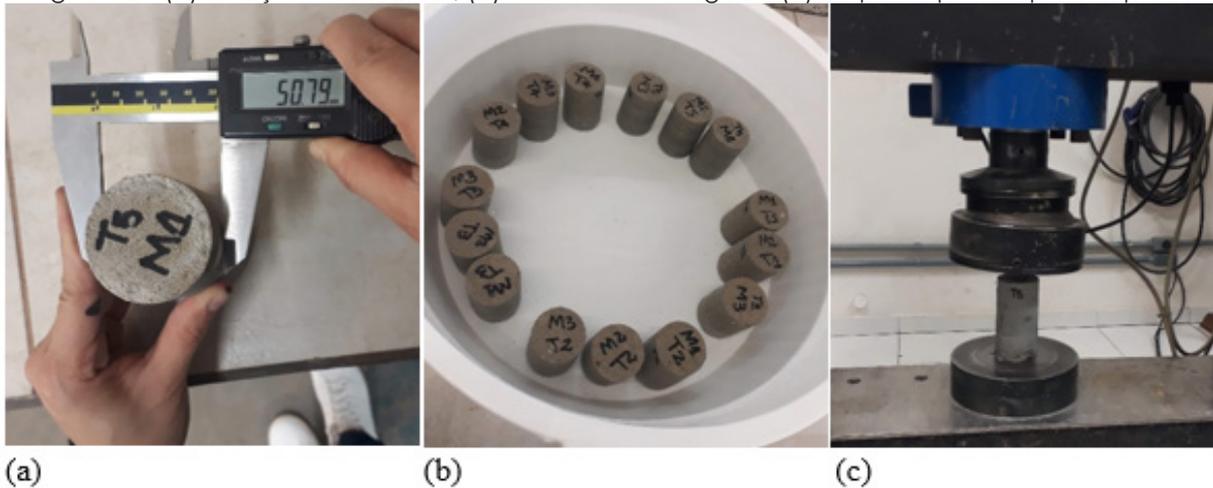
3.2.4 Rompimento dos Corpos de Prova

Após o tempo de cura necessário para cada grupo de corpos de prova, eles foram submetidos ao teste de resistência à compressão simples. De antemão, os CPs tiveram suas dimensões e pesos determinados, sendo em seguida condicionados à imersão em água pelo período mínimo de 4 horas, a fim de obter os índices de absorção.

Posteriormente à imersão, aferiu-se a massa dos corpos de prova. Em seguida, ocorreu o rompimento em prensa hidráulica padronizada, através da qual obteve-se os valores correspondentes às cargas de ruptura e os valores de resistência à compressão. Após o rompimento dos CPs, foram retiradas amostras do seu centro, com o objetivo de determinar a umidade durante esta etapa.

A Fotografia 2 (a/b/c) exhibe os procedimentos executados para o teste de resistência dos CPs.

Fotografia 2 – (a) Aferição de medidas, (b) submersão em água e (c) corpo de prova após rompido



Fonte: os autores (2020).

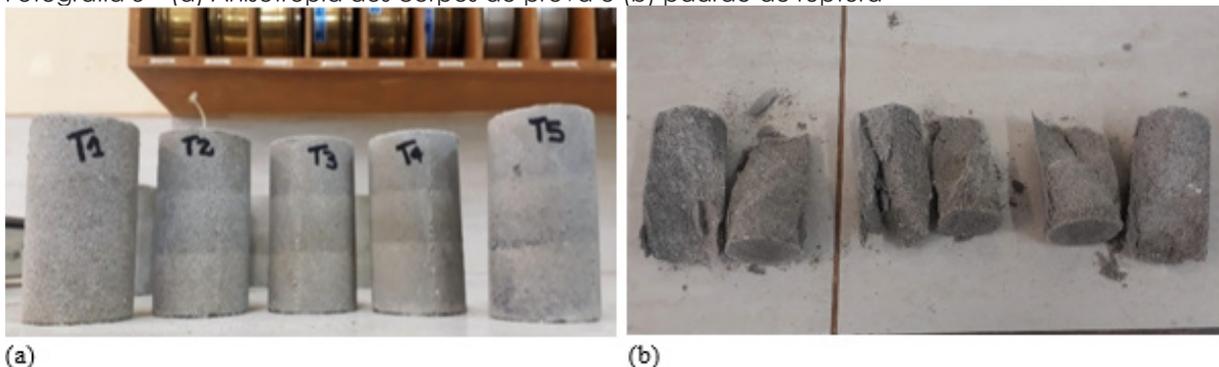
4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 ANÁLISE DO ROMPIMENTO

Anteriormente ao rompimento, observou-se que ocorreu uma variação de coloração entre as camadas dos CPs, sendo mais perceptíveis conforme o acréscimo de resíduo nos traços (Fotografia 3 (a)). Santos (2015) estudou a anisotropia entre as camadas de moldagem de solos gerada pelo método estabelecido na NBR 12024 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2012) e concluiu que a técnica de moldagem gera um gradiente de massa específica, acentuado pela finura dos grãos, o que pode influenciar negativamente na resistência. Através disto, infere-se que os traços potencialmente podem atingir melhores valores de resistência.

Após o rompimento, verificou-se um padrão de colapso por cisalhamento paralelo ao plano, a 45° com o eixo vertical, ocorrendo formação de cone nas extremidades dos corpos de prova (Fotografia 3 (b)). Não foi observado, em nenhum deles, a formação de linha de ruptura entre as camadas de compactação.

Fotografia 3 – (a) Anisotropia dos corpos de prova e (b) padrão de ruptura

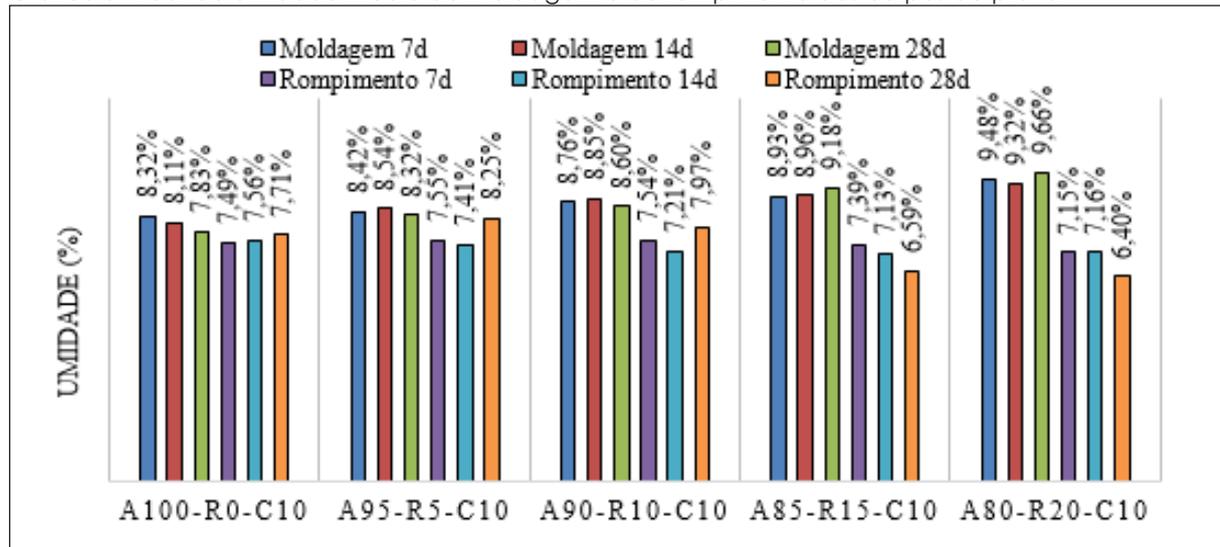


Fonte: os autores (2020).

4.2 UMIDADE DE MOLDAGEM E ROMPIMENTO

A confrontação da umidade de moldagem e de rompimento dos corpos de prova possui relevância para analisar o grau de precisão dos ensaios. O Gráfico 5, abaixo, demonstra os resultados obtidos.

Gráfico 5 - Teor de umidade médio de moldagem e de rompimento dos corpos de prova



Fonte: os autores (2020).

Verifica-se que as médias de umidade de moldagem dos corpos de prova respeitaram os valores determinados através dos ensaios de compactação, com variação aceitável de até 1%, devido ao acréscimo de água para considerar a perda de umidade em função da manipulação do material.

Todos os traços, para todos os tempos de cura, seguiram o padrão de redução no teor de umidade de rompimento em relação ao de moldagem, demonstrando que houve a formação de cristais com grande parte da água de moldagem, tendo por indicativo que mesmo após a submersão em água o valor total absorvido não superou o estabelecido no ensaio de proctor.

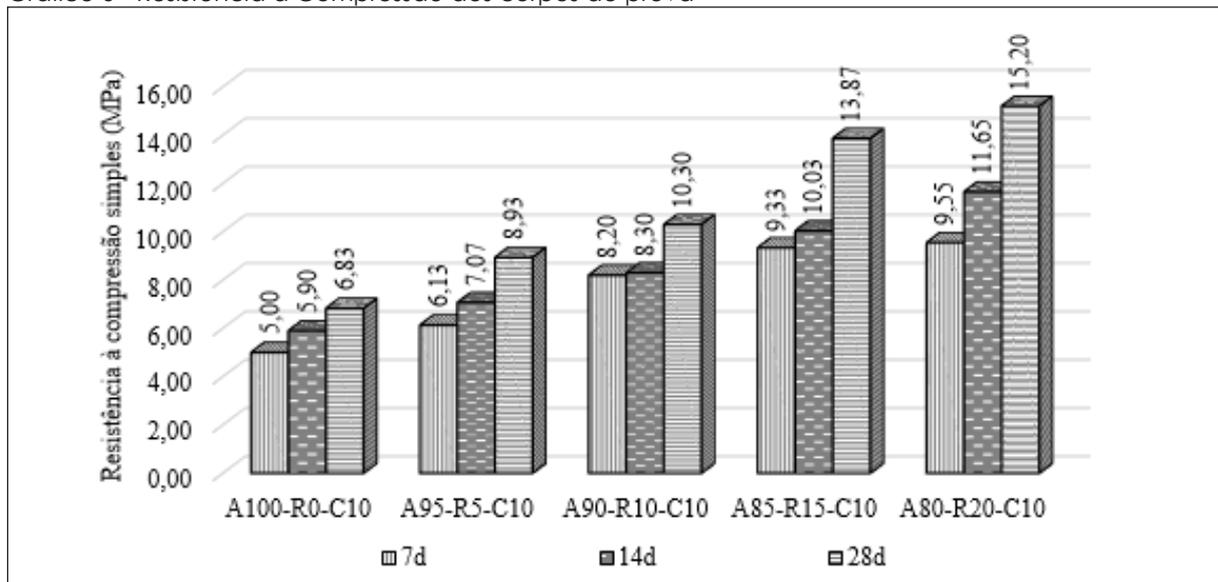
4.3 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES DOS CORPOS DE PROVA

O ensaio de resistência à compressão simples foi realizado sob amparo da NBR 12025 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2012), de acordo com o tempo de cura de cada lote.

A resistência à compressão foi aferida em todos os corpos de prova, sendo realizada a média dentre os 3 CPs testados para cada traço em cada tempo de cura, descartando valores no intervalo $\pm 10\%$ em relação à média.

Por meio do Gráfico 6 é possível visualizar os valores obtidos.

Gráfico 6 - Resistência à Compressão dos corpos de prova



Fonte: os autores (2020).

Analisando o Gráfico 6 é possível observar que as misturas com maior quantidade de resíduo apresentaram os maiores valores de resistência para o mesmo teor de cimento, demonstrando que este material contribuiu para a melhora dos traços. Isto pode ser explicado pelo fato de que, embora o resíduo não possua ação pozolânica, a grande quantidade de finos e a distribuição granulométrica uniforme geram o preenchimento dos vazios entre as partículas de cimento e de areia, aumentando assim a compacidade da mistura e, por consequência, a sua resistência.

Todas as misturas obtiveram ganhos proporcionais de resistência ao longo dos tempos de cura. Percebeu-se que as diferenças mais expressivas entre os 7 dias iniciais e 28 dias finais de cura ocorreram nos traços com maiores teores de resíduo. A mistura contendo 20% de resíduo manifestou aproximadamente 63% da sua resistência final nos primeiros 7 dias, enquanto a composição sem resíduo expressou cerca de 73%. Isto se deve a maior quantidade de resíduo conseguir um fechamento de vazios superior por possibilitar a hidratação prolongada do cimento com a água de lubrificação das partículas.

O ápice de resistência foi alcançando aos 28 dias com o traço contendo 20% de substituição do solo (A80-R20-C10), atingindo o valor médio de 15,20 MPa. Comparando este resultado com o traço sem a substituição por resíduo, somente com acréscimo de cimento (A100-R0-C10), verifica-se que o ganho foi de 8,37 MPa, representando um aumento de 122,55%.

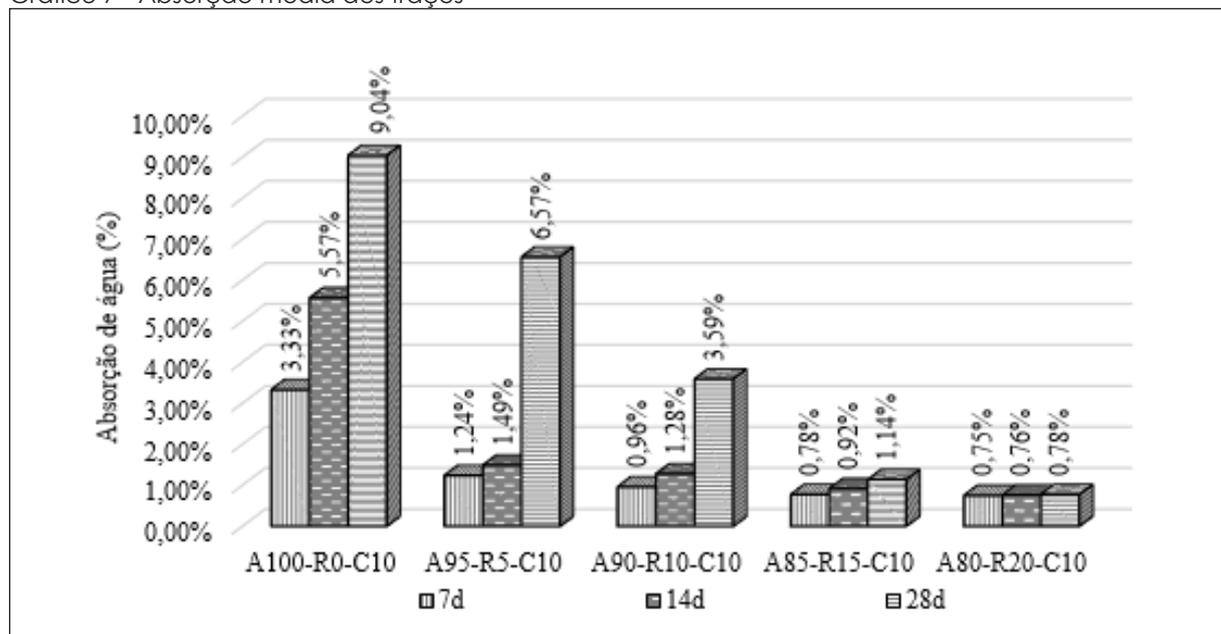
Quanto a aplicação do estudo, segundo a NBR 8491 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2012) a resistência média mínima à compressão para aplicação em tijolos ecológicos é 2 MPa, enquanto para uso em bases de pavimentação, conforme o DNER-ME 201 (DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM, 1994), é 2,1 MPa e

para o emprego em paredes monolíticas sem função estrutural, consoante a NBR 13553 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2012), restringe-se a um valor mínimo de 1 MPa aos 7 dias de cura dos corpos de prova. Visto isso, todos os traços produzidos podem ser utilizados, especialmente os com maiores teores de resíduo, devido a maior resistência e ao ganho ambiental.

4.4 ABSORÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

O Gráfico 7, abaixo, demonstra os valores médios obtidos de absorção de água após os períodos de cura.

Gráfico 7 - Absorção média dos traços



Fonte: os autores (2020).

Percebe-se que a absorção dos corpos de prova aumentou com o tempo de cura, sendo mínima para os 7 dias, com o valor de 0,75% para o traço A80-R20-C10, e máxima para os 28 dias, atingindo os 9,04% para o traço contendo somente areia e cimento. Esta propriedade se deve à hidratação do aglomerante, visto que com o passar do tempo a água de moldagem tende a ser consumida para a hidratação do cimento e, por consequência, deixa espaços vazios, passíveis de serem ocupados por água quando submersos.

Fica notório também que a absorção ao longo dos traços foi menor conforme o acréscimo no teor de resíduo, obtendo uma variação de 8,26% entre A100-R0-C10 e A80-R20-C10 aos 28 dias de cura. Outro ponto a ser ressaltado se refere a maior uniformidade de absorção ao longo dos tempos de cura para as misturas com maior quantidade de resíduo. Para A80-R20-C10 houve uma insignificante variação de 0,1% e 0,2% entre 7 e 14 dias e 14 e 28 dias, respectivamente, já para A100-R0-C10 houve a variação, na devida ordem, de 2,24% e 3,47%. Com base nisso é possível afirmar que a maior quantidade de água aderida às

partículas do resíduo de marmoraria agiu positivamente para a maior hidratação do cimento, deixando menos vazios após a formação dos cristais, além disso, a existência das partículas finas do resíduo foi capaz de ocupar os poros entre o solo e os cristais de cimento.

Fundamentado no exposto, infere-se que o traço com as proporções mais próximas da ideal foi o A80-R20-C10, uma vez que houve interação entre as partículas dos componentes e a quantidade de água retida foi suficiente somente para hidratar o cimento, não ocupando espaços extras dos sólidos, sendo capaz de gerar corpos de prova compactos, com alta resistência e baixa porosidade final.

4.5 MASSA ESPECÍFICA APARENTE SECA DE MOLDAGEM

A massa específica aparente seca de moldagem (γ_d) foi aferida e pode ser visualizada na Tabela 5, a qual relaciona, através do grau de compactação dos traços, os valores obtidos com os esperados, atingidos com o ensaio de Proctor.

Tabela 5 - Massa específica de moldagem e grau de compactação dos corpos de prova

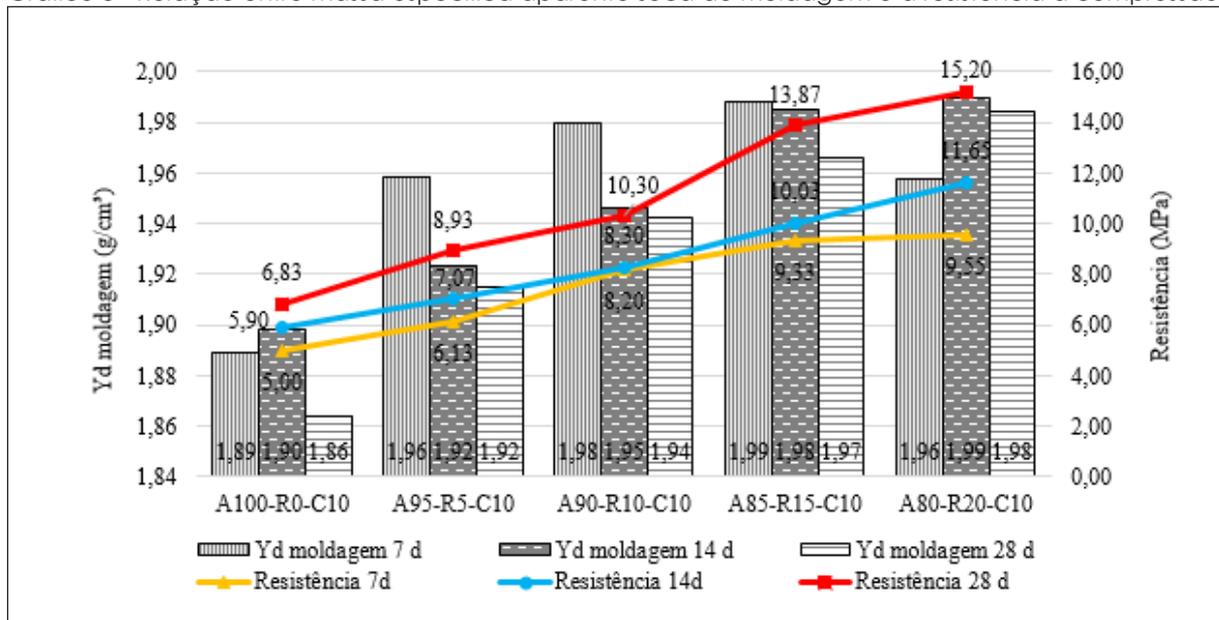
Lote	Mistura	γ_d máximo (Próctor) (g/cm ³)	γ_d moldagem (g/cm ³)	Grau de Compactação (%)
7	A100-RM0-C10	1,88	1,89	100,34%
	A95-RM5-C10	1,94	1,96	101,02%
	A90-RM10-C10	1,97	1,98	100,60%
	A85-RM15-C10	2,00	1,99	99,62%
	A80-RM20-C10	2,01	1,96	97,63%
14	A100-RM0-C10	1,88	1,90	100,79%
	A95-RM5-C10	1,94	1,92	99,20%
	A90-RM10-C10	1,97	1,95	98,91%
	A85-RM15-C10	2,00	1,98	99,44%
	A80-RM20-C10	2,01	1,99	99,25%
28	A100-RM0-C10	1,88	1,86	98,99%
	A95-RM5-C10	1,94	1,92	98,78%
	A90-RM10-C10	1,97	1,94	98,69%
	A85-RM15-C10	2,00	1,97	98,49%
	A80-RM20-C10	2,01	1,98	98,96%

Fonte: os autores (2020).

Observa-se na Tabela 5 que todos os traços obtiveram o grau de compactação próximo aos 100%. Ocorreu a tendência de aumento da massa específica aparente seca dos corpos de prova com o acréscimo no teor de resíduo, assim como aconteceu no ensaio de Proctor (Gráfico 4)

Objetivando correlacionar o γ_d de moldagem com resistência final, elaborou-se o Gráfico 8.

Gráfico 8 - Relação entre massa específica aparente seca de moldagem e a resistência à compressão



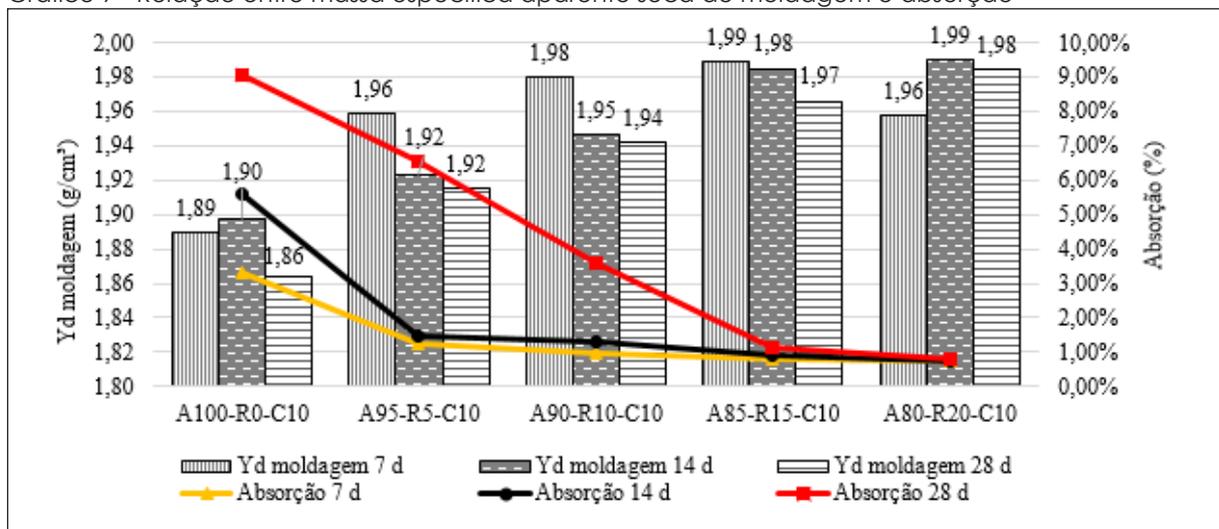
Fonte: os autores (2020).

Em geral, os traços no tempo de cura de 28 e 14 dias tiveram um aumento de resistência quando a massa específica aparente seca de moldagem foi maior, ficando evidente que o acréscimo de resíduo influencia positivamente para uma maior compactação, devido ao melhor arranjo entre as partículas de solo e cimento, e, como efeito disto, crescendo na resistência final.

Ao analisar os traços com tempo de cura de 7 dias, foi observado o mesmo comportamento que aos 28 e 14 dias, exceto para o A80-R20-C10, em que ocorreu um pequeno incremento de resistência mesmo com a ligeira redução da massa específica.

Para comparar a influência do γ_d de moldagem com a absorção dos traços, elaborou-se o Gráfico 9.

Gráfico 9 - Relação entre massa específica aparente seca de moldagem e absorção



Fonte: os autores (2020).

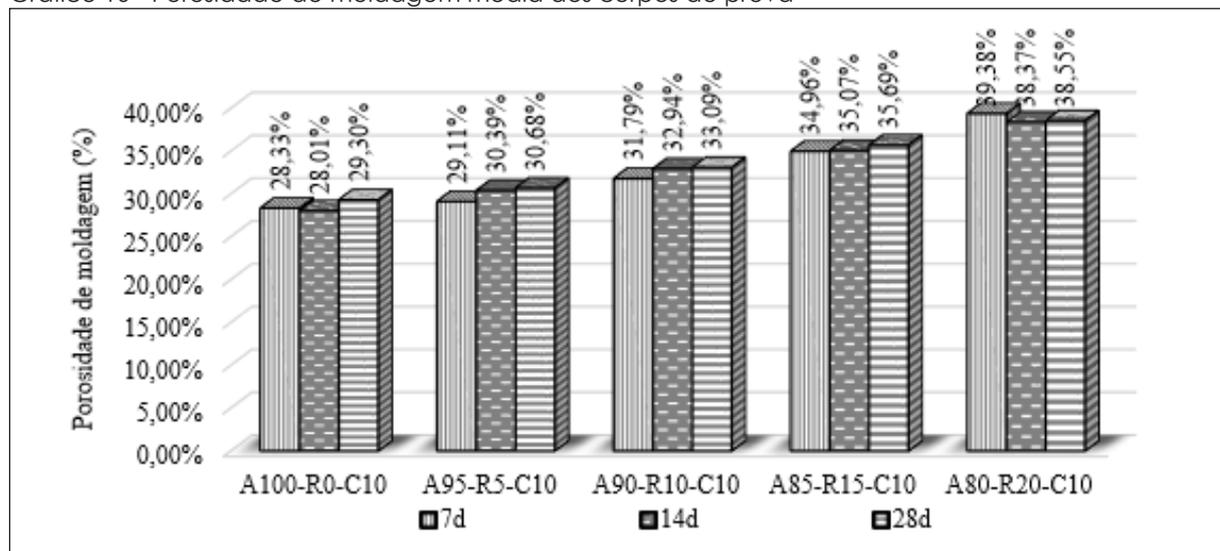
Nota-se que ocorreu a propensão de queda na absorção de água com o aumento da massa específica aparente seca de moldagem, o que se deve ao melhor fechamento de vazios provocado pelo resíduo.

4.6 POROSIDADE DE MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA

A análise da porosidade ocorreu com parâmetros aferidos logo após a moldagem, ou seja, antes de iniciarem as reações de hidratação do cimento.

Através do Gráfico 10, é possível fazer uma leitura dos valores médios obtidos em cada lote de corpos de prova, moldados para a cura de 7, 14 e 28 dias.

Gráfico 10 - Porosidade de moldagem média dos corpos de prova



Fonte: os autores (2020).

Observando os resultados, verifica-se que houve uniformidade na porosidade média dos corpos de prova em um mesmo traço, demonstrando que os critérios de moldagem foram mantidos ao longo do processo.

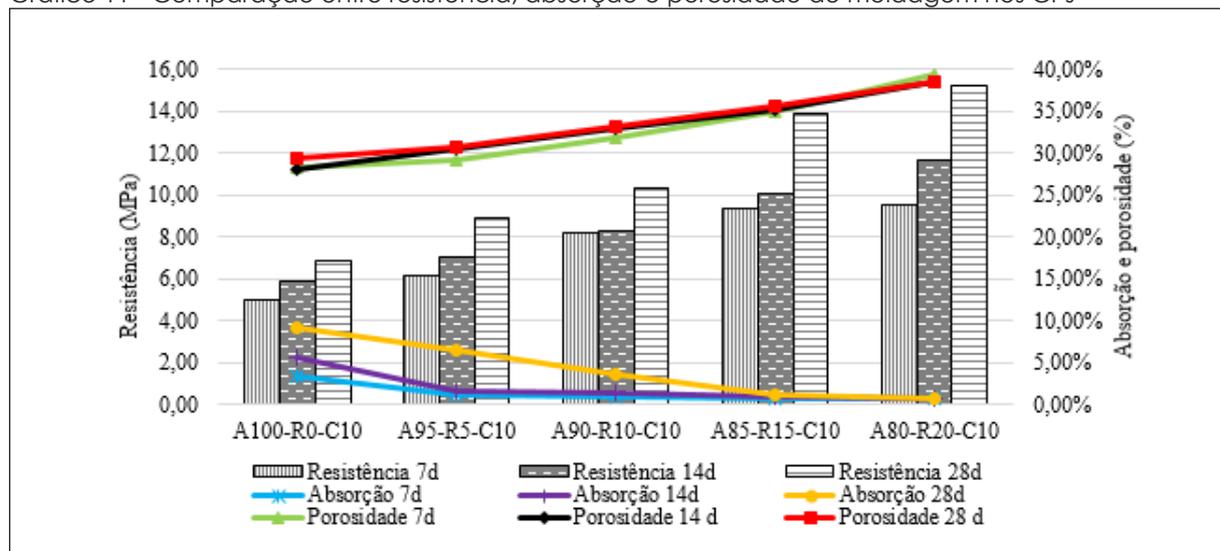
Ademais, observa-se no Gráfico 10 que a maior porosidade inicial ocorreu na mistura com a maior quantidade de resíduo (A80-R20-C10), com acréscimo máximo de 11,05% em relação ao traço sem resíduo (A100-R0-C10), na moldagem para os 7 dias. A maior porosidade obtida pode ser compreendida em virtude do maior teor de umidade ótimo, o qual teve um acréscimo progressivo conforme o aumento da porcentagem de resíduo de marmoraria nos traços, passando de 7,86 % (A100-R0-C10) para 8,85% (A80-R20-C), por efeito da maior necessidade de água para lubrificar os grãos finos.

Apesar da porosidade ser diretamente proporcional às características de resistência e absorção, pôde-se verificar nos ensaios (Gráfico 6 e Gráfico 7) que misturas contendo maiores teores de resíduo de marmoraria apresentaram melhores resultados nessas propriedades,

mesmo possuindo na moldagem maiores espaços com ausência de sólidos. Isto demonstra que ao longo do período de cura as misturas que continham resíduo conseguiram reduzir de forma mais eficiente o seu índice de vazios, ocasionando um ganho de resistência e uma menor absorção.

Elaborou-se o Gráfico 11 relacionando a resistência, a absorção e a porosidade de moldagem para cada traço, em cada tempo de cura, no qual fica evidente o explanado acima.

Gráfico 11 - Comparação entre resistência, absorção e porosidade de moldagem nos CPs



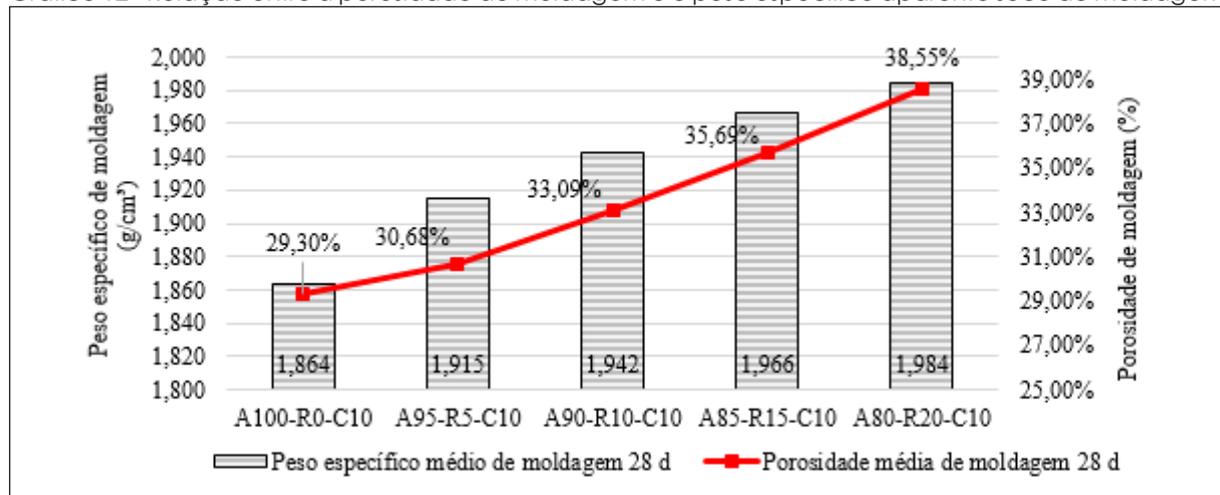
Fonte: os autores (2020).

O processo de redução de vazios, ao longo do tempo de cura, nas misturas que continham o resíduo pode ser compreendido através do processo de hidratação do cimento. No ensaio de compactação a umidade ótima de cada traço foi definida com base somente na máxima lubrificação das partículas constituintes, não sendo considerado em nenhum momento a parcela de água para a hidratação do cimento. Deste modo, o resíduo por requerer uma maior quantidade de água para a lubrificação dos grãos, atuou como retentor de umidade, contribuindo positivamente para o processo de hidratação.

De forma distinta, na mistura contendo somente areia e cimento a água se tornou o fator limitante e o processo de hidratação foi interrompido, resultando em um preenchimento de vazios deficiente e, por conseguinte, uma maior porosidade, o que sucede na redução da resistência à compressão e a maior absorção após a cura.

Com intuito de determinar a relação entre a porosidade de moldagem e o γ_d de moldagem, elaborou-se o Gráfico 12, o qual demonstra os valores médios obtidos para os CPs moldados para a cura de 28 dias, sendo este padrão visível também para a cura de 7 e 14 dias.

Gráfico 12 - Relação entre a porosidade de moldagem e o peso específico aparente seco de moldagem



Fonte: os autores (2020).

Percebe-se que ocorreu a tendência de aumento da porosidade e do γ_d com o acréscimo no teor de resíduo. Embora teoricamente sejam propriedades inversamente proporcionais, o fato pode ser explicado devido a substituição parcial da areia pelo resíduo, uma vez que o resíduo de marmoraria possui o peso específico real dos grãos aproximadamente 4,30% maior que o da areia, justificando os pequenos acréscimos na massa específica aparente seca de moldagem mesmo com uma porosidade mais elevada ao longo dos traços estudados.

5 CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos nos ensaios executados em solo-cimento com a substituição parcial do solo por resíduo de marmoraria é possível concluir que, até os teores estudados, o rejeito beneficiou as misturas nas propriedades de resistência, absorção de água e porosidade final.

O resíduo atua colaborando para a continuidade da hidratação do aglomerante ao longo do período de cura, uma vez que seu acréscimo resultou na redução da absorção de água e da porosidade, mesmo contendo vazios durante a moldagem superiores, o que implicou o aumento da resistência. A melhora dessas propriedades se deve também a granulometria do material, a qual é composta por grãos finos bem graduados, gerando a interação entre as partículas de areia e de cimento e a compactação nas misturas, o que é comprovado pelo aumento da massa específica aparente seca de moldagem, a qual também é influenciada pelo maior peso específico real dos grãos de resíduo em relação à areia.

Desse modo, o resíduo de marmoraria, aliado ao cimento como agente aglomerante e a um solo arenoso, demonstra viabilidade de aplicação em bases e sub-base de pavimentos, para a fabricação de tijolos ecológicos, em paredes monolíticas, além de contenções. O emprego deste rejeito, seja em qualquer destas áreas, já se torna vantajoso por propiciar

uma destinação diferente do descarte no meio ambiente, entretanto a perspectiva de obter melhoras físicas e mecânicas o torna ainda mais aplicável por atingir também a economia, devido a possibilidade de crescer resistência às misturas aplicando um material de descarte e sem a necessidade de aumentar o teor de cimento.

REFERÊNCIAS

- ALENCAR, C. R. **Manual de caracterização, aplicação, uso e manutenção das principais rochas comerciais no Espírito Santo**: rochas ornamentais. Espírito Santo: Instituto Euvaldo Lodi-Cachoeiro de Itapemirim, 2013. 242 p. Disponível em: <https://www.sindirochas.com/arquivos/manual-rochas.pdf>. Acesso em: 28 ago. 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE ROCHAS ORNAMENTAIS - ABIROCHAS. **Balanco das Exportações e Importações Brasileiras de Rochas Ornamentais em 2018**. Informe 01/2019. São Paulo, SP. Disponível em: https://abirochas.com.br/wp-content/uploads/2018/06/Informes/Informe_01_2019_Balanco_2018.pdf. Acesso em: 20 ago. 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND - ABCP. **Dosagem das misturas de solo-cimento**; normas de dosagem e métodos de ensaios. 3. ed. São Paulo, 2004. 63 p. Disponível em: <https://abcp.org.br/download/dosagem-das-misturas-de-solo-cimento-et-35/>. Acesso em: 20 ago. 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181 - Solo - Análise granulométrica**. Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182 - Solo - Ensaio de compactação**. Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8491 - Tijolos de solo-cimento - Requisitos**. Rio de Janeiro, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004 - Resíduos sólidos - Classificação**. Rio de Janeiro, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12024 - Solo-cimento - Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos - Procedimento**. Rio de Janeiro, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12025 - Solo-cimento - Ensaio de compressão simples de corpos de prova cilíndricos - Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13553 - Materiais para emprego em parede monolítica de solo-cimento sem função estrutural- Requisitos**. Rio de Janeiro, 2012.
- BRITO, L. C.; PARANHOS, H. S. Estabilização de Solos. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**, 6. ed., ano 02, v. 01, set. 2017. Disponível em: <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/wp-content/uploads/artigo-cientifico/pdf/estabilizacao-de-solos.pdf>. Acesso em: 20 nov. 2020.
- DAS, B. M.; SOBHAN, K. **Fundamentos de engenharia geotécnica**. 9. ed. São Paulo: Cengage Learning Brasil, 2019. 712 p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 93/94 – Solos - determinação da densidade real**. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 201/94 - Solo-cimento - Compressão axial de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 1994.

LIMA, R. C. O. **Estudo da durabilidade de paredes monolíticas e tijolos de solo-cimento incorporados com resíduo de granito**. 2010. 107 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2010. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/bitstream/riufcg/2835/1/ROSA%20DO%20CARMO%20DE%20OLIVEIRA%20LIMA%20-%20DISSERTA%c3%87%c3%83O%20PPGECA%202010..pdf>. Acesso em: 20 ago. 2020.

LIMA, R. C. O. *et al.* Aproveitamento do resíduo de serragem de granito para fabricação de membranas cerâmicas de baixo custo. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v. 6.3, p. 163-169, 2011. Disponível em: <http://www2.ufcg.edu.br/revista-remap/index.php/REMAP/article/viewFile/247/222>. Acesso em: 28 ago. 2020.

PEURIFOY, R. L. *et al.* **Planejamento, equipamentos e métodos para a construção civil**. 8. ed. Porto Alegre: AMGH Editora LTDA, 2015. 816 p.

SAGANTINI, A. A. S. **Utilização de solo-cimento plástico em estacas escavadas com trado mecânico em Ilha Solteira- SP**. 2000. 206 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2000. Disponível em: <http://repositorio.unicamp.br/jspui/handle/REPOSIP/257598>. Acesso em: 28 ago. 2020.

SÁ LEITÃO, A. I. B. L. O processo de beneficiamento de rochas ornamentais e suas implicações jurídico-ambientais. **Revista dos Estudantes de Direito da Universidade de Brasília**, n. 14, p. 181-208, 2018. Disponível em: <https://periodicos.unb.br/index.php/redunb/article/view/16570>. Acesso em: 28 ago. 2020.

SANTOS, R. A. **Comportamento anisotrópico de um solo laterítico compactado**. 2015. 151 p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18132/tde-22032016-104302/publico/Mestrado_Santos2015.pdf. Acesso em: 06 nov. 2020.

SOUSA, J. G. **Análise ambiental do processo de extração e beneficiamento de rochas ornamentais com vistas a uma produção mais limpa**: aplicação em Cachoeiro de Itapemirim – ES. 2007. 42 p. Monografia (Especialização em Análise Ambiental) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2007. Disponível em: <https://www.ufjf.br/analiseambiental/files/2009/11/Jos%C3%A9-Gon%C3%A7alves-de-Souza.pdf>. Acesso em: 20 ago. 2020.