

Incorporação de pó de casca de ovo de galinha em misturas de solo-cimento

Gilberto Regalin Júnior
Fabiano Alexandre Nienov

Resumo

O solo é um dos elementos mais importantes dentro da engenharia, visto que ele serve como suporte para as construções. Desse modo, torna-se evidente o conhecimento das características na determinação da capacidade de suporte. Quando o solo por si só não consegue atender aos esforços impostos, cabe a necessidade do seu melhoramento, o que possibilita ganho de resistência. Nesse contexto, a casca de ovo de galinha, insumo composto basicamente por carbonato de cálcio, traz consigo características benéficas para o uso em melhoramento de solo. Sendo assim, o presente estudo avalia o uso de biochar (cinza ou carvão vegetal), feitos por meio da incineração de cascas de ovos de galinha em diferentes temperaturas, juntamente com solo argiloso e cimento, em teores variados. Para isso, determinou-se a resistência à compressão simples de corpos de prova cilíndricos e o índice de atividade pozolânica, esse último com incorporação de biochar, que foram produzidos a 400, 500 e 600 °C. Os traços adotados tiveram substituição de solo por biochar nos teores de 4%, 6%, 8%, 10% e 12%, e adição de cimento sob a massa total de 8%. De modo geral, o aumento do teor de substituição de solo por biochar provocou o ganho de resistência à compressão simples, na tendência de 18,1%. Além disso, o traço com 12% de substituição do solo por biochar, obtido com incineração a 500 °C, e 8% de adição de cimento sobre a massa total demonstrou um ganho de resistência de 29,7% em relação ao traço composto somente por solo e 8% de adição de cimento, demonstrando assim benefícios no uso do resíduo. Enquanto isso, o índice de atividade pozolânica não foi superior a 90% em nenhum dos casos, o que não caracteriza os biochar como sendo materiais pozolânicos. Entretanto, observa-se que o acréscimo da temperatura de incineração das cascas de ovos no preparo do biochar trouxe consigo o aumento de até 9% do índice de atividade pozolânica. Sendo assim, a utilização das cinzas de cascas de ovos em misturas com solo argiloso e cimento traz consigo um potencial benéfico, tanto pelo ganho de resistência, como pelo reaproveitamento de um resíduo.

Palavras-chave: estabilização; solo-cimento; pó de casca de ovo de galinha.

1 INTRODUÇÃO

O ovo de galinha é um alimento altamente consumido em todo o mundo. Além de ser considerado um alimento pronto, que pode ser ingerido sem nenhum acompanhamento, ele também é utilizado no preparo de muitas massas, como pães, bolos, tortas, macarrão, entre outros.

Sendo assim, a Associação Brasileira de Proteína Animal (ABPA, 2020) traz, em seu relatório anual, dados referentes a produção e ao consumo do ovo de galinha. Foram produzidos, no ano de 2019, mais de 49 bilhões de ovos de galinha em todo o país. Dessa produção, somente 0,41% foi destinado a exportação, sendo todo o restante consumido pelo mercado interno.

Além disso, o relatório apresenta o consumo médio per Capita de ovos, sendo esse de 230 unidades para o ano de 2019. Ao conciliar essa informação com o número de habitantes de Santa Catarina, que era de aproximadamente 6,2 milhões de pessoas em 2010, segundo publicação do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2010), tem-se um consumo aproximado de 1,4 bilhões de ovos de galinha por ano para o estado de Santa Catarina. Destaca-se que esse consumo não considera o crescimento populacional ocorrido desde 2010.

De acordo com o estudo dirigido por Almeida *et al.* (2019), os ovos de linhagem comercial têm um peso médio de 66,21 g, sendo 5,13 g de casca, aproximadamente. Desse modo, ao confrontar esse valor com o consumo aproximado para Santa Catarina, obtém-se uma geração média de 7,182 mil toneladas (7.182.000 kg) de casca de ovo de galinha por ano para o estado de Santa Catarina.

A maior parte desse material é descartado, não tendo, portanto, um aproveitamento adequado, visto que, de acordo com Winton (2003 apud OKONKWO; ODIONG; AKPABIO, 2012), a casca de ovo é composta por 93,7% de carbonato de cálcio, 4,2% de material orgânico, 1,3% de carbonato de magnésio e 0,8% de fosfato de cálcio. Além disso, quando incinerado, o carbonato de cálcio é decomposto em óxido de cálcio (CaO) e dióxido de carbono (CO₂).

O óxido de cálcio, popularmente conhecido como cal, já é amplamente utilizado em misturas com solo argiloso. Esse material tem capacidade de proporcionar correções do pH do solo, além de ser utilizado como estabilizante, provocando o aumento da resistência à compressão simples, conforme diz Sartori (2015).

Além disso, a adição de agentes aglomerantes, como o cimento, aumenta a resistência e rigidez, altera os limites de consistência e provoca redução da compressibilidade, sendo essas alterações variáveis de acordo com o tipo de solo (PRIETTO, 1996).

O presente estudo teve como objetivo avaliar o comportamento mecânico de misturas de solo-cimento, quando há variação do teor de pó de casca de ovo de galinha. Com isso, espera-se elevar a resistência à compressão simples, tendo como referência um traço padrão, composto somente por solo argiloso e cimento. Assim, será possível reduzir o descarte desse material no ambiente, além da possibilidade de obter benefícios, como o ganho de resistência, visando a aplicação em obras geotécnicas.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 ESTABILIZAÇÃO DOS SOLOS

O solo é um dos elementos mais importantes dentro da engenharia, visto que a necessidade de trabalhar com ele existe desde os tempos mais remotos. Sendo assim, o seu estudo é importante pois evita, desse modo, problemas de *fundações* e de *obras de terra* como já ocorrido (CAPUTO, 1988).

Entretanto, o solo presente no local da obra muitas vezes não atende aos parâmetros exigidos para que possa ser utilizado, sendo necessário à sua substituição por outro material, com melhores características. Como essa substituição de material acarreta altos custos construtivos, busca-se a estabilização do solo encontrado no local da obra, tendo assim o reaproveitamento do material. Essa estabilização pode ocorrer de três métodos: mecânico, granulométrico e químico (SARTORI, 2015).

Na estabilização mecânica busca-se corrigir a granulometria do solo por meio do emprego de compactação em umidade ótima. Desse modo, o solo estabilizado adquire melhor densificação. Esse método é comumente usado, além de servir como complemento para outros modos de estabilização (SARTORI, 2015).

Já a estabilização granulométrica, para Sartori (2015), consiste na alteração da granulometria do solo. Isso ocorre por meio da adição ou retirada de partículas, que é feito mediante a mistura de diferentes materiais, que apresentem dimensões variadas de grãos, de modo a se obter um solo que tenha uma faixa granulométrica que possibilite o atendimento aos requisitos necessários, sejam físicos ou mecânicos.

Por fim, a estabilização química faz o uso de agentes aglomerantes como a cal e o cimento. A mistura desses aditivos com o solo altera a sua estrutura, proporcionando, desse modo, melhoras físicas e mecânicas (SARTORI, 2015).

Estudos realizados por Rauschkolb (2018), mostram que a adição da cal provoca aumento na resistência à compressão simples, redução da massa específica aparente seca e da umidade ótima de compactação, bem como melhoras no pH e alterações no índice de plasticidade de solos argilosos.

Dados obtidos do trabalho efetuado por Goularte e Pedreira (2009) indicam que misturas contendo 10% de cimento obtiveram maior ganho de resistência se comparadas com as que contém 15% de cal. Esse fato sugere que o cimento apresenta melhor eficácia como agente aglomerante, se comparado a cal.

O teor de cimento para estabilização está diretamente ligado com o tipo de solo, ficando compreendido entre 4% e 6% para argilas arenosas, 6% e 8% para argilas siltosas e 8% e 15% para argilas (INGLES; METCALF, 1972 apud ROJAS, 2015).

2.2 PÓ DE CASCA DE OVO DE GALINHA

Como já citado anteriormente, a geração de casca de ovo de galinha é de aproximadamente 7,182 mil toneladas por ano para o estado de Santa Catarina, mediante a união de informações fornecidas pela ABPA (2020), IBGE (2010) e Almeida *et al.* (2019). Sendo assim, cabe a reutilização desse resíduo, visto a possibilidade de obtenção de benefícios aliados a obras geotécnicas.

A casca de ovo de galinha é formada basicamente por 93,7% de carbonato de cálcio, 4,2% de material orgânico, 1,3% de carbonato de magnésio e 0,8% de fosfato de cálcio (WINTON, 2003 apud OKONKWO; ODIONG; AKPABIO, 2012). Ao supor que esse resíduo seja formado somente por carbonato de cálcio, tem-se a sua reação de queima demonstrada na Equação 1.



Com o aumento da temperatura, provocado pela incineração da casca de ovo, percebe-se a transformação do carbonato de cálcio em óxido de cálcio e dióxido de carbono. O óxido de cálcio também é conhecido por cal, cal viva ou cal virgem, e a sua utilização em misturas com solo tem grande potencial benéfico, como já mostrado em pesquisas, dentre elas a realizada por Azevêdo (2010), onde a adição da cal, mesmo que em pequenos teores, proporcionou aumento da capacidade de suporte do solo.

Bashir e Manusamy (2015) realizaram um estudo a respeito da caracterização do pó de casca de ovo cru, onde foi possível determinar a composição química presente no material, conforme mostrado na Tabela 1.

Tabela 1 - Composição Química do Pó de Casca de Ovo

Composição Química	Peso (%)
C	21,1286
Na ₂ O	0,1046
MgO	0,9261
P ₂ O ₅	0,4149
SO ₃	0,3264
K ₂ O	0,0542
CaO	76,9922
Fe ₂ O ₃	0,0132
SrO	0,0396

Fonte: adaptada de Bashir e Manusamy (2015).

Além disso, a cinza de casca de ovo de galinha demonstrou eficiência ao ser misturada com cimento, pois acelerou o ganho de resistência, devido ao óxido de cálcio extra fornecido (MTALLIB; RABIU, 2009).

2.2.1 Obtenção do pó a partir da casca de ovo de galinha

As cascas de ovo, após serem coletadas, devem passar por um procedimento de limpeza para que possam ser armazenadas. Essa limpeza pode ser feita de diversas maneiras, sendo realizada somente com uso de água ou com adição de outros produtos.

Beraldo e Nagumo (2004) realizaram três tipos diferentes de limpeza, onde foram moldados corpos de prova para cada um deles afim de aferir a resistência à compressão simples. A primeira amostra foi lavada em água pura e secada em estufa a 105 °C por 24 horas; a segunda amostra foi tratada em solução composta por 3% de NaOH por 24 horas, lavada em água corrente e seca em estufa a 105 °C por 24 horas; por fim, a terceira amostra foi tratada em solução contendo 5% de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ por 24 horas, lavada em água corrente e secada em estufa por 24 horas.

Como resultado, a primeira amostra apresentou valores superiores de resistência à compressão simples se comparada as demais. Sendo assim, observa-se maior eficácia no tratamento de limpeza das cascas de ovos feito somente com água pura, seguido da secagem em estufa a 105 °C (BERALDO; NAGUMO, 2004).

Okonkwo, Odiong e Akpabio (2012), em seu estudo, realizaram a incineração das cascas de ovos à temperatura de aproximadamente 500 °C. Com isso, foi possível remover a matéria orgânica presente no resíduo, deixando, em maior percentual, o óxido de cálcio. Em seguida, o material passou por um processo de trituração e peneiramento, sendo descartado o material retido na peneira com abertura de 0,075 mm. O material passante foi utilizado em seu estudo afim de determinar a resistência à compressão simples em misturas com solo e agente aglomerante.

2.2.2 Trabalhos já realizados com o emprego do pó de casca de ovo de galinha

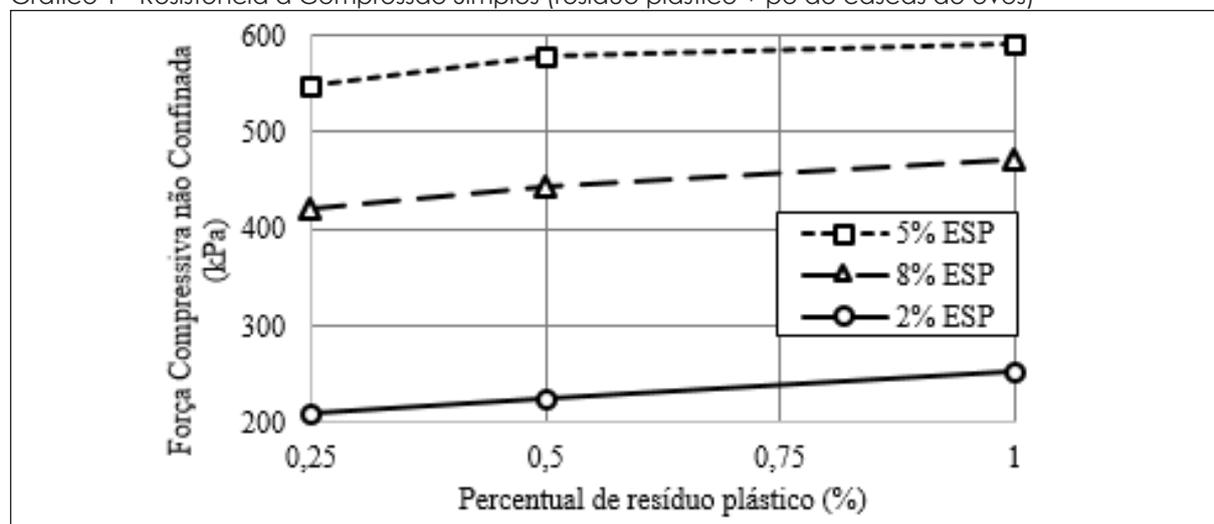
Okonkwo, Odiong e Akpabio (2012) realizaram a moldagem de corpos de prova, os quais foram rompidos em prensa padronizada afim de determinar a resistência à compressão simples. Os autores utilizaram solo laterítico, pó de casca de ovo de galinha, que foi incinerada a 500 °C, e cimento Portland comum, em diferentes percentuais. O cimento foi utilizado em 6% e 8%, enquanto o pó de casca de ovo em 2%, 4%, 6%, 8% e 10%, ambos em relação a massa de solo. A umidade para moldagem das amostras foi determinada por meio do ensaio de compactação, realizado em todas as misturas.

Com o estudo foi possível determinar que com o aumento da quantidade de cinza de casca de ovo na mistura ocorreu ganho de resistência à compressão simples de, em média, 35%. Além disso, o aumento do teor de resíduo também provocou melhoras de CBR (%) (OKONKWO; ODIONG; AKPABIO, 2012).

Alzaidy (2019) realizou a modelagem de corpos de prova contendo pó de casca de ovo, nos teores de 2%, 5% e 8% em peso de solo seco, e resíduo plástico, nos teores e 0,25%, 0,5% e 1,0% em peso de solo seco. As cascas de ovos de galinha foram lavadas em água, secas ao sol e trituradas, utilizando somente o material passante na peneira com abertura de 0,075 mm. Sendo assim, o material não foi submetido a nenhum procedimento de incineração ou secagem a altas temperaturas.

As misturas foram realizadas adotando o teor de umidade ótima, obtido por meio do ensaio de compactação. Após o rompimento dos corpos de prova, Alzaidy (2019) pode inferir que o teor ideal do pó de casca de ovo na mistura foi de 5%, visto que a utilização de teores superiores (8%) e inferiores (2%) provocaram a redução da resistência à compressão simples, como mostrado no Gráfico 1. Na legenda, "ESP" refere-se ao pó de casca de ovo.

Gráfico 1 - Resistência à Compressão Simples (resíduo plástico + pó de cascas de ovos)

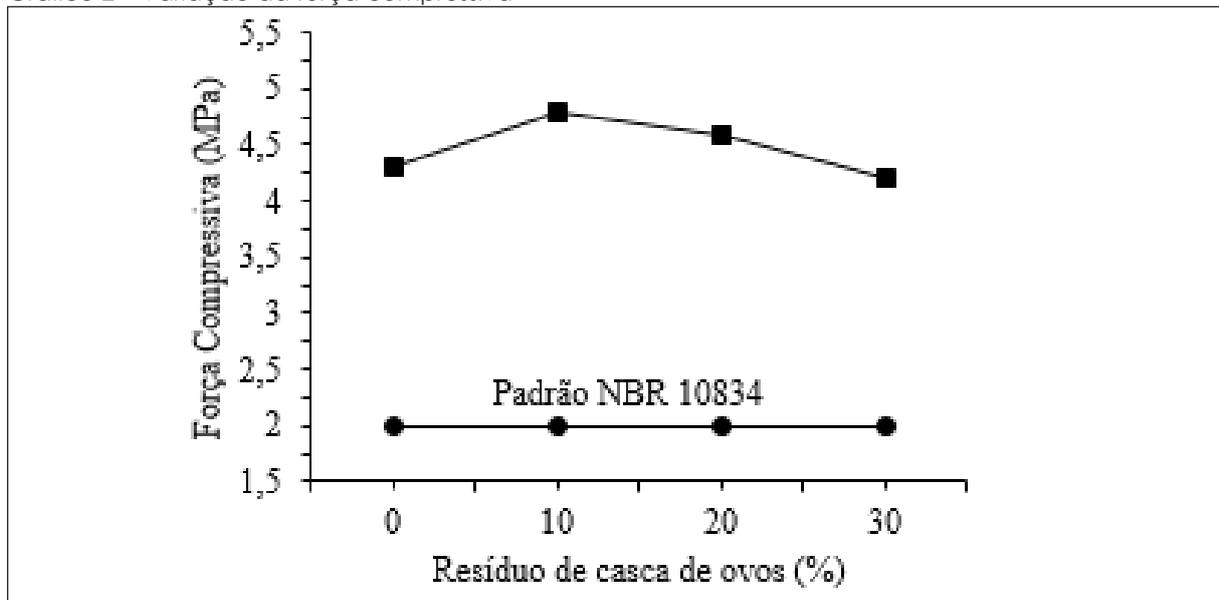


Fonte: adaptado de Alzaidy (2019).

Amaral *et al.* (2013) moldaram amostras compostas por solo arenoso, cimento Portland CP III-40RS e resíduos de casca de ovo. As misturas foram realizadas com a substituição de parte do cimento pelo pó de casca de ovo, que teve seu preparo realizado pela secagem em estufa a 110 °C por 24 horas, seguido da trituração, e homogeneização.

O traço padrão foi definido pela substituição de 10% da massa do solo por cimento, e foi denominado de MA0. Em seguida, os demais traços tiveram a substituição de 10%, 20% e 30% da massa de cimento do traço padrão por pó de casca de ovo, sendo nomeados por MA10, MA20 e MA30, respectivamente. No Gráfico 2 é possível verificar a resistência à compressão simples obtida, sendo essa em maior valor para o traço MA10, que teve 10% da massa de cimento substituída por pó de casca de ovo (AMARAL *et al.*, 2013).

Gráfico 2 – Variação da força compressiva



Fonte: adaptado de Amaral *et al.* (2013).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Com o intuito de avaliar o comportamento mecânico de misturas compostas por solo, pó de casca de ovo de galinha e cimento, foram moldados corpos de prova com diferentes teores desses materiais. Na Tabela 2 são apresentadas as composições de cada um dos traços definidos, sendo substituído parte do solo por pó de casca de ovo e adicionado cimento em relação a massa total (solo + pó de casca de ovo).

Tabela 2 - Composição das misturas

Mistura	Solo (%)	Pó de Casca de Ovo (%)	Cimento (% - em adição sob massa total)
100s/0pco + 8ci	100	0	8
96s/4pco + 8ci	96	4	8
94s/6pco + 8ci	94	6	8
92s/8pco + 8ci	92	8	8
90s/10pco + 8ci	90	10	8
88s/12pco + 8ci	88	12	8

Fonte: os autores (2021).

Para nomear as misturas adotou-se as abreviações “s”, “pco” e “ci” representando, respectivamente, “solo”, “pó de casca de ovo” e “cimento”. Previamente a cada uma dessas abreviações é apresentado um número, que condiz com o percentual do material na mistura, respeitando o uso do pó de casca de ovo em substituição e do cimento em adição, como já mencionado anteriormente.

3.1 ORIGEM, PREPARO E CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS

A amostra de solo utilizada é proveniente da região de Joaçaba-SC, sendo adquirida na propriedade da Universidade do Oeste de Santa Catarina. A coleta do material seguiu o preconizado pela PRO 003 (DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM, 1994), tratando-se, portanto, de uma amostra deformada.

Após a coleta do solo, ele foi seco ao sol e, em seguida, passou pelo processo de desagregação dos grãos, feito com auxílio de almofariz e mão de gral. Esses procedimentos foram realizados conforme recomenda a NBR 6457 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2016). Realizou-se os ensaios de granulometria, conforme NBR 7181 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2018), peso específico real dos grãos, condizente com o ME 093 (DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM, 1994), e determinação dos limites de plasticidade e liquidez, de acordo com a NBR 7180 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2016) e NBR 6459 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2016).

As cascas de ovos de galinha foram coletadas em padarias do comércio local. Após reunidas, elas foram lavadas, individualmente, com água corrente, sendo esse o procedimento de limpeza mais eficaz, como descrito por Beraldo e Nagumo (2004). Após isso, as cascas foram expostas ao sol para que pudessem secar (Fotografia 1).

Fotografia 1 - Cascas de ovos secando ao sol



Fonte: os autores (2021).

Após a secagem ao sol, as cascas de ovos foram divididas em três amostras, que foram secadas em diferentes temperaturas, sendo elas de 400, 500 e 600 °C. Esse procedimento foi realizado com a utilização de forno mufla, onde o material ficou exposto a temperatura desejada pelo período de 2 horas. Destaca-se que a variação do tempo de exposição ao calor foi testada para intervalos de 30 minutos a 2,5 horas, e o material não apresentou nenhuma diferença de coloração e resistência ao esmagamento, feito de forma manual.

A exposição das cascas em diferentes temperaturas foi realizada para que fosse possível avaliar a influência da temperatura de secagem na resistência à compressão simples dos corpos de prova, além de verificar se ocorre variação do índice de atividade pozolânica para cada uma das temperaturas.

Após passar pelo procedimento de secagem em altas temperaturas, as cascas de ovos foram fragmentadas, utilizando-se do mesmo procedimento realizado para desagregação dos grãos do solo, feito com almofariz e mão de gral. Em seguida, o material, já com característica de pó (biochar), foi peneirado em peneira com abertura de 0,3 mm, sendo armazenado somente o passante para uso nos demais ensaios. Na Fotografia 2 (a/b) é possível visualizar as cascas de ovos depois de serem submetidas aos procedimentos de secagem e desagregação.

Fotografia 2 - (a) Cascas de ovos depois da secagem em alta temperatura e (b) Pó de casca de ovo (Biochar)



(a)



(b)

Fonte: os autores (2021).

Foi realizado ensaio para determinação do peso específico real dos grãos para o biochar preparado a 500 °C, conforme preconiza a ME 093 (DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM, 1994).

O cimento utilizado foi do tipo CP V-ARI, foi adquirido em comércio local e passou por procedimento de peneiramento antes de cada ensaio, utilizando somente o material passante na peneira com abertura de 0,3 mm. Tal procedimento foi realizado de modo a evitar a utilização de aglomerados de materiais que possivelmente tenham recebido umidade.

3.2 ENSAIO DE COMPACTAÇÃO

O ensaio de compactação foi realizado com o intuito de determinar a umidade ótima de compactação e a massa específica aparente seca máxima, dados que foram utilizados para o cálculo das quantidades, em massa, dos materiais para moldagem dos corpos de prova.

Todos os procedimentos empregados na realização do ensaio seguiram o preconizado pela NBR 7182 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2016), sendo adotada a energia de compactação normal. Destaca-se que, previamente a realização do ensaio, os materiais utilizados foram secos em estufa, a 100 °C, e homogeneizados em seus teores correspondentes.

O ensaio foi realizado somente para os traços "96s/4pco + 8ci", "92s/4pco + 8ci" e "88s/12pco + 8ci", pois eles apresentam, respectivamente, o menor, o intermediário e o maior teor de pó de casca de ovo na mistura. Como não ocorreu variação significativa da massa específica seca máxima e da úmida ótima para os traços ensaiados, adotou-se a média dos 3 ensaios apresentados.

Esses valores foram fundamentais na determinação das massas para moldagem dos corpos de prova e, como adotou-se um mesmo teor de umidade ótima para todas as misturas, a relação água/cimento não é uma variável na análise da resistência à compressão simples.

3.3 MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA

A moldagem dos corpos de prova foi realizada para todos os traços apresentados anteriormente na Tabela 2, em três diferentes temperaturas de secagem das cascas de ovos (400, 500 e 600 °C). Com isso, foram moldados um total de 64 corpos de prova, sendo 20 para cada uma das temperaturas (representando os 5 traços que contêm o biochar) e 4 para o traço "100s/0pco + 8ci", que não contém o resíduo (biochar).

Primeiramente determinou-se a quantidade de cada componente a ser misturado (solo, pó de casca de ovo e cimento) em massa, utilizando como parâmetro a massa específica seca máxima e a umidade ótima, obtidas por meio do ensaio de compactação. Além disso, considerou-se uma porção excedente na mistura, de modo a suprir possíveis perdas e coletas para determinação da umidade.

Após isso, os materiais a serem utilizados foram secos em estufa, a 100 °C, por 24 horas. A mistura foi realizada com os componentes secos, e em seguida foi adicionado a quantidade calculada de água, seguido de nova homogeneização. Por fim, retirou-se duas amostras para determinação da umidade da mistura, que foi utilizada posteriormente na determinação do grau de compactação.

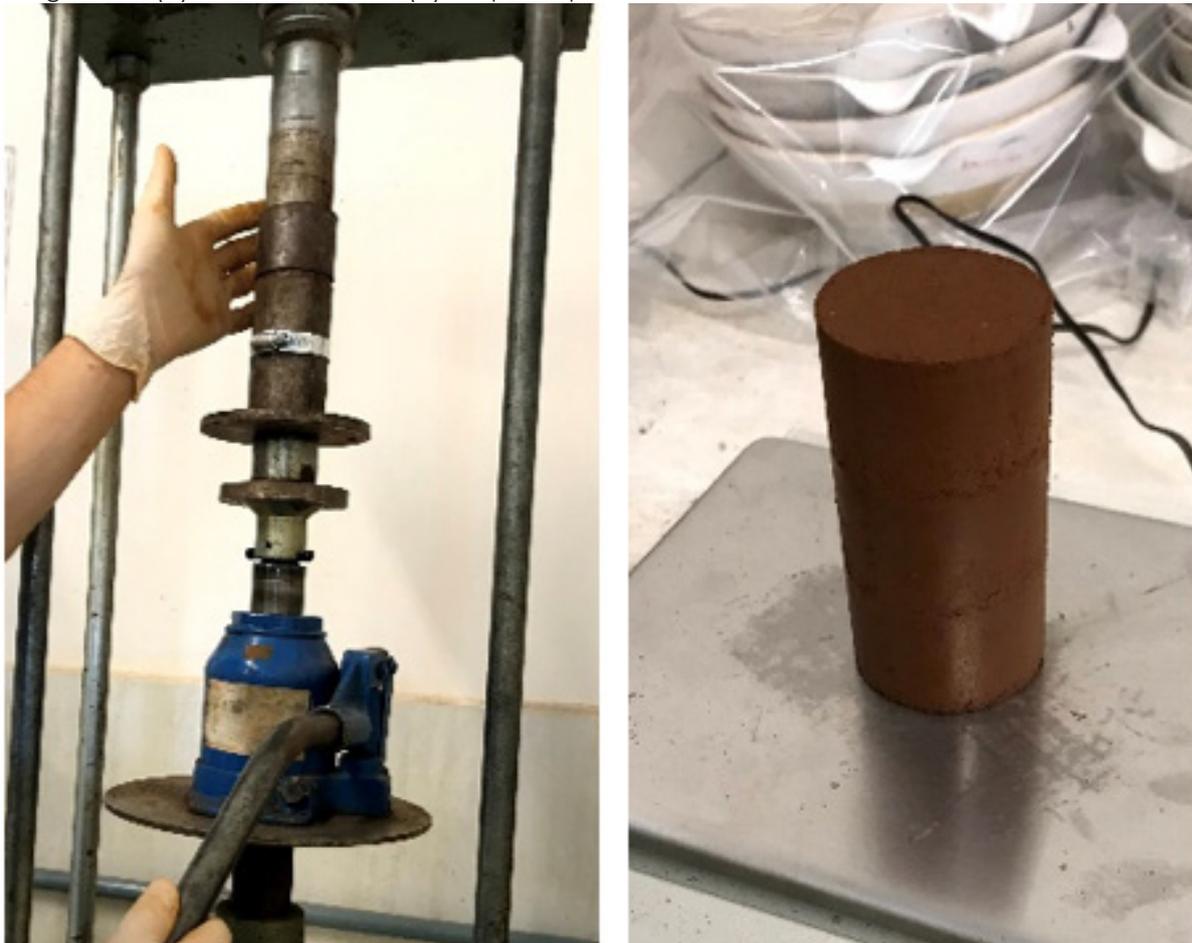
Os corpos de prova moldados são compostos por 3 camadas equivalentes, o que totaliza um diâmetro de 5 cm e altura de 10 cm. De modo a garantir que cada uma das

camadas tivessem a mesma quantidade de material e a mesma energia de compactação, foram pesados, individualmente, a quantidade de material para cada uma delas. Esse material foi armazenado dentro de potes plásticos, visando a não perda de umidade para o ambiente até o momento de sua compactação.

Para assegurar a correta energia de compactação de cada camada, utilizou-se de medidas de referência na prensa manual, fazendo com que as três camadas compactadas seguissem a mesma espessura. A compactação das camadas foi confeccionada individualmente, sempre havendo escarificação entre elas, para garantir a aderência entre as camadas.

O molde utilizado é cilíndrico, tripartido, em aço carbono, e apresenta junto consigo uma base, um colarinho e um funil, para facilitar o posicionamento do material no seu interior. As três partes que formam a região cilíndrica do molde são presas com utilização de uma abraçadeira metálica. Destaca-se que foi realizado o emprego de desmoldante nas peças do molde, visto que se removia o corpo de prova do molde imediatamente após finalizada a sua compactação. Na Fotografia 3 (a/b) apresenta-se o corpo de prova, depois de desformado, a prensa e molde utilizados na sua compactação.

Fotografia 3 - (a) Prensa e molde e (b) Corpo de prova



(a)

(b)

Fonte: os autores (2021).

Após desmoldado, aferiu-se as dimensões e o peso dos corpos de prova, com uso de paquímetro e balança de precisão. Esses dados foram utilizados, juntamente com a umidade da mistura, para determinação do grau de compactação. Em seguida, os corpos de prova foram armazenados dentro de sacos plásticos fechados, de modo a evitar a perda excessiva de umidade durante o período de cura, tendo cada um à sua respectiva identificação.

3.4 ROMPIMENTO DOS CORPOS DE PROVA

O rompimento dos corpos de prova foi realizado aos 28 dias de cura, sendo as últimas 24 horas de submersão em água, de modo a submetê-los a uma pior condição. As amostras tiveram sua massa e dimensões aferidas antes da submersão em água, e sua massa aferida antes do rompimento (depois do período de submersão).

O rompimento foi realizado em prensa hidráulica padronizada, da marca EMIC, modelo DL30000, pertencente ao laboratório de solos, materiais e asfalto da Universidade do Oeste de Santa Catarina. Com isso, obteve-se os valores correspondente as cargas de ruptura de cada um dos corpos de prova.

Sendo assim, foi possível determinar a resistência à compressão simples, obtida pelo quociente entre a carga de ruptura e a área da seção transversal dos corpos de prova. Destaca-se que a resistência adotada para cada um dos traços foi definida pela máxima obtida por quatro amostras.

3.5 DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE ATIVIDADE POZOLÂNICA

O ensaio para determinação do índice de atividade pozolânica foi realizado para as três temperaturas de secagem das cascas de ovo, sendo elas 400, 500 e 600 °C. Foi utilizado no ensaio a fração de biochar passante pela peneira 0,3 mm, condizendo com o material utilizado na modelagem dos corpos de prova.

A realização do ensaio ocorreu conforme o recomendado pela NBR 5752 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014), sendo feita a modelagem dos corpos de prova de acordo com a NBR 7215 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2019), como recomenda a NBR 5752 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014).

Salienta-se que, em distinção do recomendado pelas normas citadas acima, utilizou-se moldes plásticos, confeccionado com cano de PVC, o que resultou em um diâmetro interno da amostra levemente inferior ao definido normativamente. Além disso, os corpos de prova não passaram pelo período inicial de cura úmida, com duração de 20 a 24 horas, conforme definido pelas normas. Em desacordo a isso, as amostras tiveram sua cura inicial com cobrimento do molde com sacos plásticos, durante um dia, até que tivessem resistência suficiente para que pudessem ser desmoldadas, e então passar o restante do período de cura submersas em água, conforme recomendado normativamente.

Destaca-se que, mesmo que os procedimentos diferem, em parte, do recomendado normativamente, o resultado obtido pelo ensaio ainda é apropriado, visto que o índice de atividade pozolânica é determinado pela razão entre as resistências obtidas pelo traço com substituição do cimento por resíduo e pelo traço sem essa substituição, os quais foram moldados do mesmo modo.

4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Nesta seção será apresentado os resultados obtidos pelos ensaios realizados em laboratório, bem como as suas análises.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Por meio dos ensaios de caracterização realizados classificou-se a amostra de solo, conforme mostra a Tabela 3. As faixas granulométricas definidas para pedregulho, areia grossa, média e fina, silte e argila são provenientes da NBR 6502 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1995).

Tabela 3 - Classificação da amostra de solo

Parâmetros	Resultados
Argila - $\varnothing < 0,002$ mm (%)	69,74
Silte - $0,002$ mm $< \varnothing < 0,06$ mm (%)	26,64
Areia fina - $0,06$ mm $< \varnothing < 0,2$ mm (%)	1,13
Areia média - $0,2$ mm $< \varnothing < 0,6$ mm (%)	1,67
Areia grossa - $0,6$ mm $< \varnothing < 2,0$ mm (%)	0,82
Pedregulho - $2,0$ mm $< \varnothing < 60$ mm (%)	0
LL - Limite de Liquidez (%)	53
LP - Limite de Plasticidade (%)	37
IP - Índice de Plasticidade (%)	16
Peso específico real dos grãos (g/cm^3)	2,91
Classificação Textural	Argila
H.R.B ou A.A.S.H.T.O.	A7-5

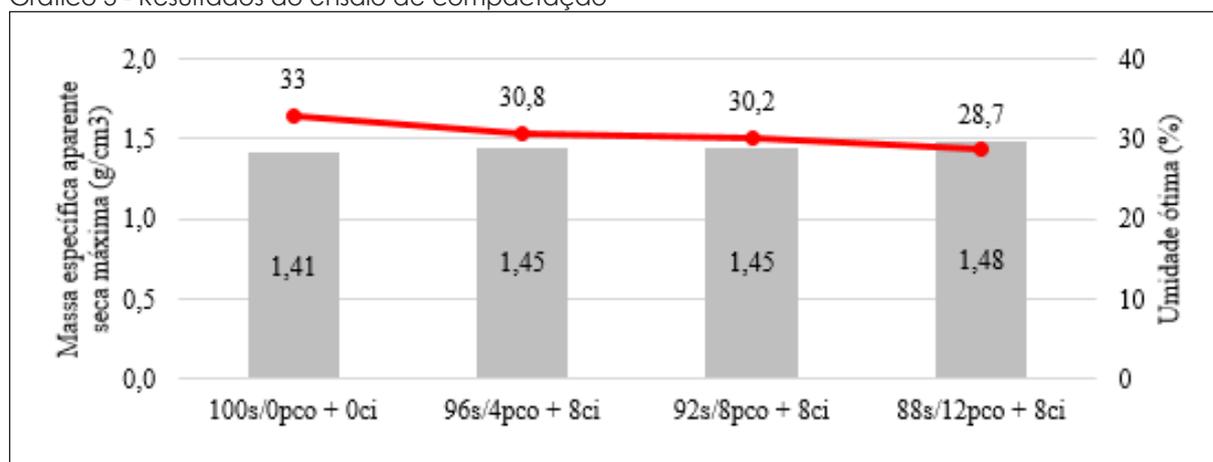
Fonte: os autores (2021).

Enquanto isso, o biochar teve seu peso específico real dos grãos de $2,51 \text{ g}/\text{cm}^3$, valor esse inferior ao obtido pela amostra de solo argiloso, que foi de $2,91 \text{ g}/\text{cm}^3$.

4.2 ENSAIO DE COMPACTAÇÃO

No Gráfico 3 é possível verificar os resultados obtidos para o ensaio de compactação, realizado em 3 amostras, sendo elas "96s/4pco + 8ci", "92s/4pco + 8ci" e "88s/12pco + 8ci".

Gráfico 3 - Resultados do ensaio de compactação



Fonte: os autores (2021).

A análise do gráfico permite inferir que não houve variação significativa da umidade ótima de compactação e da massa específica seca máxima com a variação do teor de biochar. Com isso, adotou-se uma média dos valores obtidos pelo ensaio, sendo 1,46 g/cm³ para a massa específica seca máxima e 30% para a umidade ótima de compactação.

Esses valores foram utilizados para determinação da quantidade necessária dos materiais para modelagem dos corpos de prova. Salienta-se que, como o teor de umidade adotado para todas as misturas foi o mesmo, a relação água/cimento não é uma variável na análise da resistência à compressão simples obtida pelos corpos de prova.

4.3 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

Os corpos de prova foram rompidos à compressão simples após 28 dias da data de moldagem. Este período de cura foi realizado dentro de sacos plásticos, de modo a evitar a perda de umidade para o ambiente, e teve as últimas 24 horas antecedentes ao rompimento de submersão em água, visando submeter as amostras às piores condições.

Na Tabela 4 é possível verificar os resultados obtidos, sendo que PCO 400, PCO 500 e PCO 600 tratam-se, respectivamente, dos traços onde houve a substituição de solo por biochar a 400 °C, 500 °C e 600 °C.

Tabela 4 - Dados obtidos dos corpos de prova

Identificação	Umidade de mistura (%)	Grau de compactação médio (%)	Resistência à compressão simples máxima (kPa)
100s/0pco + 8ci	27,3	101,3	1588,8
96s/4pco + 8ci (PCO 400)	27,5	101,1	1754,9
94s/6pco + 8ci (PCO 400)	27,8	101,1	1748,0
92s/8pco + 8ci (PCO 400)	28,4	100,3	1705,3
90s/10pco + 8ci (PCO 400)	27,8	101,4	1810,1
88s/12pco + 8ci (PCO 400)	28,4	100,8	1876,5

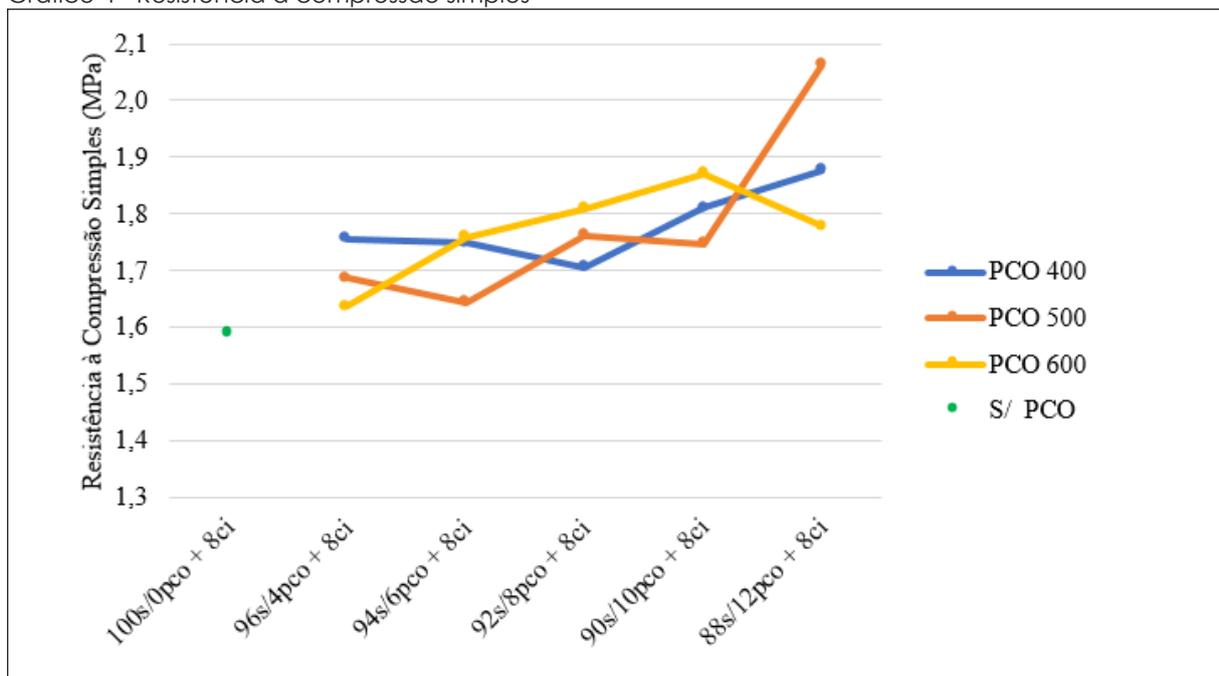
Identificação	Umidade de mistura (%)	Grau de compactação médio (%)	Resistência à compressão simples máxima (kPa)
96s/4pco + 8ci (PCO 500)	27,3	100,8	1685,9
94s/6pco + 8ci (PCO 500)	27,8	100,5	1643,8
92s/8pco + 8ci (PCO 500)	27,7	100,8	1760,7
90s/10pco + 8ci (PCO 500)	27,9	101,6	1745,9
88s/12pco + 8ci (PCO 500)	28,1	100,8	2060,5
96s/4pco + 8ci (PCO 600)	27,7	101,2	1636,3
94s/6pco + 8ci (PCO 600)	27,9	101,0	1758,7
92s/8pco + 8ci (PCO 600)	28,3	100,9	1806,9
90s/10pco + 8ci (PCO 600)	27,3	101,8	1870,0
88s/12pco + 8ci (PCO 600)	28,1	100,9	1779,8

Fonte: os autores (2021).

A resistência à compressão simples foi definida pelo maior valor obtido pelas 4 amostras que representavam cada traço. Além disso, o grau de compactação ficou compreendido entre 100% e 102% para todos os corpos de prova. Destaca-se que a umidade de mistura foi levemente inferior a umidade ótima, determinada pelo ensaio de compactação, mas que isso não afeta a análise e comparação realizada entre as resistências obtidas pelas amostras, visto que as umidades obtidas foram uniformes para todas as misturas.

No Gráfico 4 é possível verificar o comportamento ocorrido com a variação do teor de solo substituído por pó de biochar. O ponto isolado demonstra a resistência obtida para o traço padrão, composto somente por solo e cimento.

Gráfico 4 - Resistência à compressão simples



Fonte: os autores (2021).

Observando o Gráfico 4, ao analisar o comportamento da linha PCO 400, que representa os traços em que teve a substituição de solo por biochar a 400 °C, percebe-se um possível comportamento linear, onde há aumento da resistência conforme maior for o teor de substituição. Entretanto, o segundo e o terceiro pontos da reta, que representam as misturas “94s/6pco + 8ci” e “92s/8pco + 8ci”, respectivamente, estão fora dessa tendência linear, visto que tiveram decréscimo da resistência à compressão simples. A justificativa para redução da resistência nesses pontos pode ser a heterogeneidade parcial do resíduo, devido a singularidade das características das cascas de ovo, bem como a desigualdade da escarificação entre camadas, o que se caracteriza como um defeito de moldagem.

O Gráfico 4 também expõe as resistências alcançadas pelos traços compostos com biochar a 500 °C (reta PCO 500). Assim como o comportamento da reta PCO 400, essa também simboliza um crescimento geral da resistência, ocorrido com o aumento do teor de biochar. Contudo, também há dois pontos em que houve decréscimo de resistências, que correspondem aos traços “94s/6pco + 8ci” e “90s/10pco + 8ci”. A justificativa para esta redução de resistência está baseada nos mesmos princípios citados anteriormente, para o comportamento PCO 400.

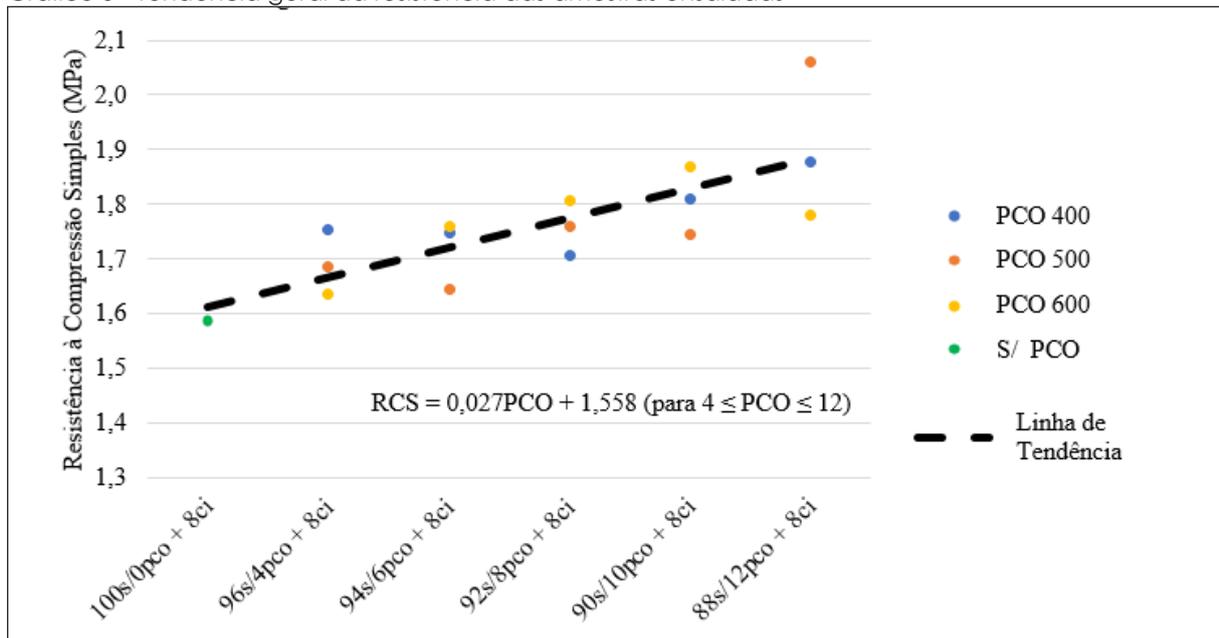
Ainda no Gráfico 4, apresenta-se as resistências obtidas pelas misturas que contêm biochar a 600 °C (reta PCO 600). O comportamento demonstrado foi de crescimento da resistência à compressão simples, que teve seu ponto máximo na mistura “90s/10pco + 8ci”. Porém, para o traço com 12% de substituição do solo argiloso por biochar, ocorreu uma redução da resistência. Com isso, identifica-se um teor ideal de substituição de solo por biochar de 10%, julgando a assertividade do último ponto da reta. Entretanto, observa-se que, de modo geral, o aumento do teor de biochar proporciona ganho de resistência, fato esse que entra em desacordo com o comportamento da reta PCO 600, sugerindo que a resistência obtida pelo traço com 12% de substituição de solo por biochar seja superior a determinada pelo ensaio.

As maiores resistências alcançadas foram de: 1,876 MPa, representando o traço “88s/12pco + 8ci”, com resíduo incinerado a 400 °C; 2,061 MPa, simbolizando o traço “88s/12pco + 8ci”, com resíduo incinerado a 500 °C; e 1,870 MPa, correspondendo ao traço “90s/10pco + 8ci”, com resíduo incinerado a 600 °C. Enquanto isso, a resistência obtida pelo traço padrão, composto somente por solo argiloso e cimento, foi de 1,589 MPa, valor inferior às resistências mínimas obtidas por todos os traços que tiveram presença do pó de casca de ovo, independente da temperatura de incineração.

As resistências máximas obtidas pelas retas PCO 400, PCO 500 e PCO 600 demonstram um ganho de resistência à compressão simples, respectivamente, de 18,1%, 29,7% e 17,7%, em relação ao traço padrão, composto somente por solo e cimento.

No Gráfico 5 é possível observar a dispersão dos valores alcançados de resistência à compressão simples, juntamente com uma reta de tendência geral, que engloba todos os traços.

Gráfico 5 - Tendência geral da resistência das amostras ensaiadas



Fonte: os autores (2021).

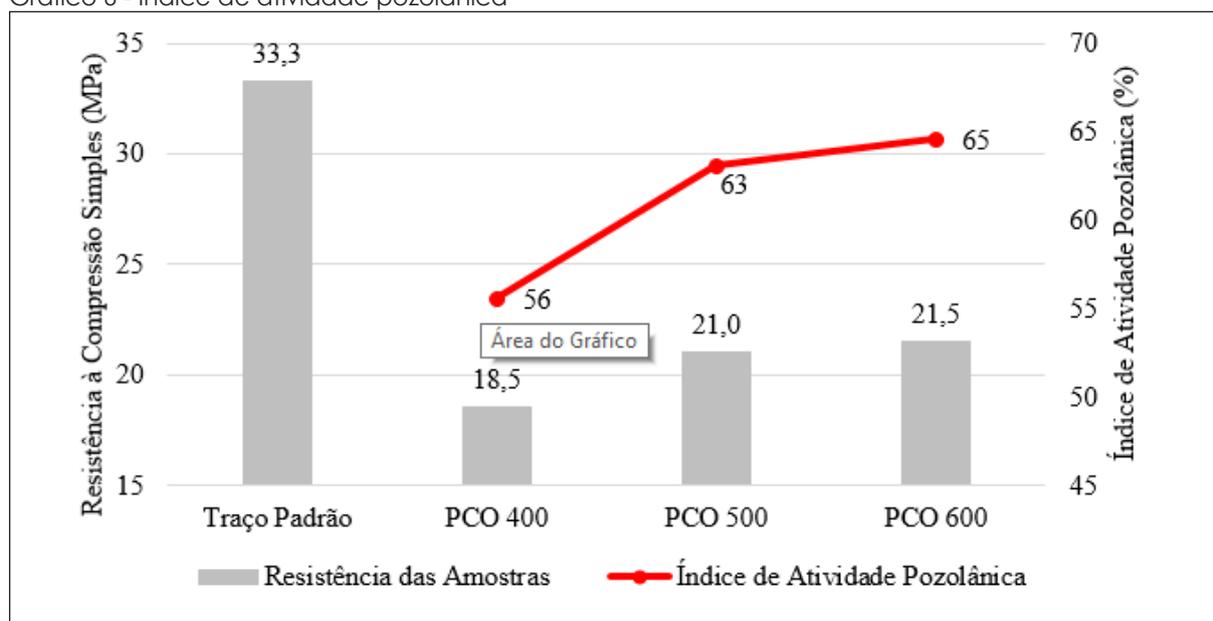
É perceptível o benefício gerado pela substituição de parte do solo por biochar, em todas as temperaturas de incineração. Além disso, infere-se que o aumento do teor de resíduo nas misturas tem capacidade de provocar ganhos significativos de resistência à compressão simples, comportamento que possivelmente continue a ocorrer para maiores proporções de substituição, conforme demonstra a reta de tendência.

Determinou-se, como mostrado no Gráfico 5, uma equação que possibilita determinar a resistência esperada, de acordo com a linha de tendência traçada. Nessa equação, "RCS" representa a resistência a compressão simples, em MPa, e "PCO" o teor de biochar, em percentual. Destaca-se que a equação determinada é válida somente para valores de "PCO" compreendidos entre 4% e 12%.

4.4 ÍNCIDE DE ATIVIDADE POZOLÂNICA

Os resultados obtidos pelo ensaio para determinação do índice de atividade pozolânica são apresentados no Gráfico 6.

Gráfico 6 - Índice de atividade pozolânica



Fonte: os autores (2021).

O Gráfico 6 apresenta, por meio de colunas, as resistências obtidas pelos traços ensaiados. Enquanto isso, a linha exibe o índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias, valor determinado de acordo com o preconizado pela NBR 5752 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014).

A NBR 12653 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014) estabelece um índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias mínimos de 90% para que o resíduo ensaiado seja considerado pozolânico. Desse modo, os biocharres, independente da sua temperatura de preparo, não são classificados como materiais pozolânicos. Entretanto, percebe-se que o aumento da temperatura de incineração das cascas de ovos de galinha causou impacto positivo, elevando o índice de desempenho com cimento Portland.

5 CONCLUSÃO

O biochar obtido com as cascas de ovos de galinha tem demonstrado um potencial benéfico em misturas com solo argiloso e cimento. Além disso, sua geração ocorre em grande escala, conforme estimado, tornando ainda mais relevante o seu reaproveitamento.

Por meio dos ensaios realizados em laboratório, juntamente com a análise feita dos respectivos resultados, define-se que a variação do teor de resíduo (biochar) não demonstrou impacto significativo na massa específica seca máxima e na umidade ótima de compactação.

A incorporação do biochar em mistura com solo argiloso e cimento proporcionou ganhos significativos de resistência, na ordem geral de 18,1% (de acordo com a reta de tendência). Esses, não demonstraram linearidade em algumas amostras, mas de modo geral, permitiu-se atingir a resistência de 2060,53 kPa para o traço "88s/12pco + 8ci" com temperatura de incineração das cascas de ovos de 500 °C, valor superior ao obtido pelo traço padrão,

composto somente por solo e cimento, que foi de 1588,80 kPa, e que representa um ganho de resistência de 29,7%.

O biochar não foi classificado como material pozolânico perante a NBR 12653 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014), visto que não apresenta índice de desempenho com cimento Portland superior a 90%. Ademais, o aumento da temperatura de incineração das cascas de ovos promoveu o aumento da atividade pozolânica, que passou de 56%, obtido pelo resíduo incineração a 400 °C, para 65%, atingido pela incineração a 600 °C.

Não foi possível determinar uma relação adequada entre a resistência à compressão simples, obtida pelos corpos de prova compostos por solo, biochar e cimento, e o índice de atividade pozolânica. Entretanto, a análise individual destes tópicos indica que o aumento, tanto do teor de biochar, quanto da temperatura do seu preparo, ocasiona o ganho de resistência à compressão simples.

A utilização do biochar obtido por meio de cascas de ovos em misturas com solo e agentes aglomerantes visando o ganho de resistência pode ser vantajoso. Porém, deve-se primeiramente dedicar-se a pesquisas mais aprofundadas, visando analisar o seu comportamento com diferentes tipos de solos, teores de substituição e temperaturas de preparo.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, Eva Clícia de Jesus *et al.* Características físicas de ovos de galinhas nativas comparadas a linhagem de postura. **Archivos de Zootecnia**, v. 68, n. 261, p. 82-87, 2019.

ALZAIDY, Mohammed N. J., Experimental study for stabilizing clayey soil with eggshell powder and plastic wastes. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SUSTAINABLE ENGINEERING TECHNIQUES*, 2., 2019, Bagdá. **Anais [...]**. Bagdá, 2019. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/518/2/022008/pdf>. Acesso em: 08 jun. 2021.

AMARAL, Mateus Carvalho *et al.* Soil-cement bricks incorporated with eggshell waste. **Waste and Resource Management**, v.166, ed. WR3, p. 137-141, 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1680/warm.12.00024>. Acesso em: 08 jun. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5752 - Materiais pozolânicos - Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias**. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457 - Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização**. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459 - Solo - Determinação do limite de liquidez**. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502 - Rochas e solos - Terminologia**. Rio de Janeiro, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180 - Solo - Determinação do limite de plasticidade**. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181 - Solo - Análise granulométrica.** Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182 - Solo - Ensaio de compactação.** Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215 - Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos.** Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653 - Materiais pozolânicos - Requisitos.** Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PROTEÍNA ANIMAL - ABPA. **Relatório Anual 2020.** São Paulo, 2020.

AZEVÉDO, André Luis Cairo. **Estabilização de solos com adição de cal:** um estudo a respeito da reversibilidade das reações que acontecem após a adição de cal. 2010. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010. Disponível em: <http://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/2281>. Acesso em: 08 jun. 2021.

BASHIR, Amal S. M.; MANUSAMY, Yamuna. Characterization of Raw Egg Shell Powder (ESP) as A Good Bio-filler. **Journal of Engineering Research and Technology**, v. 2, ed. 1, p. 56-60, 2015. Disponível em: <https://journals.iugaza.edu.ps/index.php/JERT/article/view/1637/1569>. Acesso em: 08 jun. 2021.

BERALDO, Antonio Ludovico; NAGUMO, César Hideo. Compósito casca de ovo e argamassa de cimento Portland. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA EM RESÍDUOS E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL, 2004, Florianópolis. **Anais [...]**. Florianópolis, 2004. Disponível em: <https://www.ipen.br/biblioteca/cd/ictr/2004/ARQUIVOS%20PDF/01/01-012.pdf>. Acesso em: 08 jun. 2021.

CAPUTO, Homero Pinto. **Mecânica dos solos e suas aplicações:** fundamentos. 6. ed., rev. ampl. Rio de Janeiro: LTC, 1988.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **ME 093 - Solos -determinação da densidade real.** Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **PRO 003 - Coleta de amostras deformadas de solo.** Rio de Janeiro, 1994.

GOULARTE, Cristina Lemos; PEDREIRA, Celso Luis da Silva. Estabilização química de solo com adição de cimento ou cal como alternativa de pavimento. **Associação Brasileira de Mecânica dos Solos**, Rio Grande, 2009. Disponível em: <https://docplayer.com.br/storage/62/47616873/1623158751/ujlvJzO5S3gKfeWkiB2bGg/47616873.pdf>. Acesso em: 08 jun. 2021.

IBGE. **Censo Demográfico 2010.** Rio de Janeiro, 2010.

MTALLIB, Musa Osiregbhemhe Abdul; RABIU, A. Effects of eggshells ash (ESA) on the setting time of cement. **Nigerian Journal of Technology**, v. 28, n. 2, p. 29-38, 2009. Disponível em: <https://www.ajol.info/index.php/njt/article/view/123436>. Acesso em: 08 jun. 2021.

OKONKWO, Ugochukwu N.; ODIONG, Inyeneobong Cletus; AKPABIO, E. E. The effects of eggshell ash on strength properties of cement-stabilized lateritic. **International Journal of Sustainable Construction Engineering & Technology**, v. 3, p. 18-25, 2012.

PRIETTO, Pedro Domingos Marques. **Estudo do comportamento mecânico de um solo artificialmente cimentado**. 1996. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1996. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/149702/000189066.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 08 jun. 2021.

RAUSCHKOLB, Guilherme. **Estudo para utilização de resíduo gerado pela fabricação de celulose e papel no melhoramento do solo**. 2018. Relatório de Estágio Supervisionado II (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade do Oeste de Santa Catarina, Joaçaba, 2018.

ROJAS, José Waldomiro Jiménez. **Estabilização de solo**. Caçapava do Sul: Universidade Federal do Pampa, 2015. (Coleção Ciências do Pampa). Disponível em: <http://cursos.unipampa.edu.br/cursos/engenhariasanitariaeambiental/files/2015/09/Caderno-1-Estabilização-de-Solos.pdf>. Acesso em: 08 jun. 2021.

SARTORI, Guilherme. **Estudo de estabilização de solos para fins de pavimentação na região de Campo Mourão**. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2015. Disponível em: http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/6672/1/CM_COECI_2015_2_13.pdf. Acesso em: 08 jun. 2021.

