

Caracterização geotécnica de cinzas de carvão mineral e sua utilização como barreiras impermeabilizantes

Geotechnical characterization of coal ash and its use as waterproofing barriers

Deyvid de Souza Elias¹, Anderson Borghetti Soares¹,
Henrique Petisco de Souza¹

¹ Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Campus do Pici, Bloco 713, CEP: 60451-970, Fortaleza, CE, Brasil
e-mail: deyvidselias@gmail.com, borghetti@ufc.br, henrique.petisco@gmail.com

RESUMO

Para adequar-se à realidade da sociedade contemporânea, a organização de todo e qualquer processo produtivo deverá prevê planos de gerenciamento de resíduos, que buscam encontrar alternativas técnicas, econômicas e ambientalmente viáveis para os subprodutos advindos de sua operação. Sob esta premissa as empresas Energia Pecém e Eneva, que gerenciam as Usinas Termelétricas Porto Pecém I e II, firmaram parceria com a Universidade Federal do Ceará (UFC), visando o desenvolvimento de projeto científico que objetivava dar destinos adequados aos resíduos advindos da queima do carvão mineral nas UTE's. O resultado foi o desenvolvimento de diversos trabalhos que avaliaram alternativas para o emprego das cinzas. O presente estudo verificou a possibilidade de empregar as cinzas em camadas de barreiras impermeabilizantes de fundo de aterros (*liners*). Foram realizados diversos ensaios geotécnicos com o intuito de caracterizar o material e verificar se o mesmo possui as propriedades necessárias a utilização proposta, como por exemplo, a condutividade hidráulica, que para este fim deverá ser inferior a 10^{-7} cm/s. Entretanto, observou-se variabilidade significativa nos valores dos parâmetros estudados, o que levou a necessidade de analisar o uso de um material composto, misturas de solo (areia argilosa) e cinza composta em diferentes proporções, que apresentou resultados mais consistentes, atingindo valores de condutividade hidráulica próximos aos exigidos para uso como *liner*. Dentre as misturas de solo e cinza analisadas, mistura denominada S70C30 (70% de massa de solo e 30% em massa de cinza), apresentou um coeficiente de permeabilidade saturada de $4,26 \times 10^{-7}$ cm/s que juntamente com outras características geotécnicas, mostrou-se adequada para o uso proposto.

Palavras-chave: Cinzas, geotecnia, barreiras impermeabilizantes, permeabilidade.

ABSTRACT

In order to adapt to the reality of contemporary society, the organization of any and all productive processes should include waste management plans, which seek to find technical, economic and environmentally viable alternatives to the by-products arising from its operation. Under this premise the companies Energia Pecém and Eneva, which manage the Porto Pecém I and II thermoelectric plants, entered into a partnership with the Federal University of Ceará, aiming at the development of a scientific project that aimed to provide adequate destinations for the residues arising from the burning of coal in the thermoelectric plants. The result was the development of several works that evaluated alternatives for the use of ashes. The present study verified the possibility of using the ashes in layers of waterproofing barriers of landfills (*liners*). Several geotechnical tests were carried out in order to characterize the material and verify if it has the necessary properties for the proposed use, such as hydraulic conductivity, which for this purpose should be less than 10^{-7} cm/s. However, significant variability was observed in the values of the studied parameters, which led to the need to analyze the use of a composite material, mixtures of soil (clayey sand) and composite ash in different proportions, which presented more consistent results, reaching hydraulic conductivity values close to those required for use as a *liner*. Among the mixtures of soil and ash analyzed, a mixture called S70C30 (70% soil mass and 30% ash mass) had a saturated permeability coefficient of 4.26×10^{-7} cm/s which together with other geotechnical characteristics, was adequate for the proposed use.

Key words: Ash, geotechnics, waterproofing barriers, permeability.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, o aumento da produção das indústrias tem conduzido a uma crescente elevação no volume de resíduos e rejeitos gerados. Na maioria das vezes esses resíduos são nocivos ao meio ambiente e a saúde humana, tornando-se imprescindível definir uma correta destinação. Os subprodutos muitas vezes são apenas descartados ou armazenados, não sendo reciclados ou reaproveitados em outras atividades ou processos produtivos. É fato que a reutilização de qualquer que seja o resíduo, direta ou indiretamente, exige o pleno conhecimento de suas características, para assim garantir a segurança e qualidade do novo produto.

As Usinas Termoelétricas (UTE's), fazem uso do carvão mineral para geração de energia elétrica, produzindo toneladas de resíduos advindos do processo de combustão do carvão mineral, dentre os quais podemos citar, a cinza leve, a cinza grossa, a escória e os resíduos do processo de dessulfuração. Muitos são os estudos que avaliam a reutilização desses resíduos em diversas outras atividades, sobretudo na construção civil. A maior parte é empregada na indústria cimenteira na fabricação de cimento Portland, o que, no entanto, não é capaz de absorver o enorme volume gerado. Sob esta perspectiva, diversos outros estudos vêm sendo desenvolvidos, avaliando o emprego de cinzas em camadas de pavimento [1, 2], em camadas de cobertura [3-5] e camadas de fundo impermeabilizante de aterros [6], na síntese de zeólitas [7], na fabricação de concreto [8] e outros materiais de construção como argamassas [9], tijolos, telhas, manilhas, etc., buscando alternativas técnicas, econômicas e ambientalmente viáveis.

Nesse contexto as empresas Energia Pecém e ENEVA, responsáveis pela operação das UTE's Porto Pecém I e II, localizadas no município de São Gonçalo do Amarante, no Ceará, firmaram parceria com Universidade Federal do Ceará, com objetivo de buscar alternativas viáveis para utilização dos resíduos gerados na produção de energia elétrica. O Complexo Termoelétrico do Pecém, conta hoje com duas unidades geradoras, a Pecém I e Pecém II, com capacidade de 360 MW cada, totalizando 720 MW de capacidade total instalada, sendo capaz de produzir anualmente até 6.307 GWh. Toda essa estrutura gera enormes quantidades de resíduos, dos quais uma pequena parte das cinzas leves, é utilizada na indústria cimenteira, sendo o restante depositados em dois módulos (bacias) construídos dentro do próprio complexo.

O Termo de Cooperação (Nº 01/2015) firmado entre as partes deu origem ao projeto de pesquisa que contou com três linhas, que buscaram alternativas variadas para o uso dos resíduos. O presente estudo pertence a linha de pesquisa 3, que avaliou o uso do material em obras geotécnicas e ambientais, sendo o presente artigo fruto da análise do material para emprego como camada impermeabilizante de fundo de aterros sanitários. Com o objetivo de avaliar o emprego do material como liner, foi realizada a caracterização do resíduo (geotécnica, mineralógica, físico-química e ambiental), sendo apresentado neste artigo os resultados da caracterização geotécnica. Os resultados de todas as caracterizações são apresentados em Elias [10]. Dentre as análises realizadas, merece especial atenção as análises de condutividade hidráulica do material, que segundo recomendações técnicas, para resíduos Classe II, deve possuir uma permeabilidade inferior a 10^{-7} cm/s, considerando uma camada de 0,60 m de espessura [11]. Como as cinzas de carvão apresentaram valores de coeficientes de permeabilidades superiores ao mínimo exigido no emprego como liner, foi necessário o estudo de misturas de solo e cinza, em diferentes proporções. Os resultados indicaram a mistura composta por 70% em massa de solo e 30% de cinzas, promissora para o uso como material impermeabilizante.

Deve-se destacar que a aplicação de materiais, sobretudo resíduos, em obras geotécnicas prevê a realização de ensaios ambientais, com o intuito de verificar o grau de periculosidade do material para o meio ambiente, evitando contaminações do solo e corpos d'água, bem como sua nocividade a saúde humana. Tais ensaios foram realizados, e as cinzas compostas foram classificadas como resíduo Classe II-A (não perigoso e não inerte).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Inicialmente foi feita a coleta de amostras na bacia de armazenamento localizada no complexo termoelétrico do Pecém, no Módulo I. O local onde as amostras encontravam-se armazenadas (exceto as amostras de cinzas leves) cobria uma área de aproximadamente 45.000 m² (FIGURA 1), no qual havia também uma lagoa de efluentes, onde eram despejadas as águas servidas da UTE. Com o intuito de caracterizar o maior volume possível do material, foram coletadas amostras de superfície (PA's) e de profundidade (PP's), além da coleta de amostras compostas somente por cinzas leves (CL), dispostas em outro local (Módulo II). Os materiais analisados tratavam-se de resíduos da queima de carvão mineral das duas unidades da UTE Porto Pecém. As amostras eram compostas principalmente por cinzas grossas, havendo também cinzas leves e resíduos do processo de dessulfuração. No total foram coletadas 34 amostras, sendo 21 amostras de superfície (profundi-

dade de 0,50-0,75m), 11 amostras de profundidade (distribuídas em dois pontos, coletadas de metro em metro, sendo no ponto PP-1 coletadas até a profundidade de 5,25m e no Ponto PP-2 até a profundidade de 6,25m) e ainda 2 amostras de cinzas leves, uma da unidade Pecém I e outra da unidade Pecém II. Das amostras coletadas todas foram analisadas, exceto, a amostra de cinza leve da unidade de produção Pecém II.

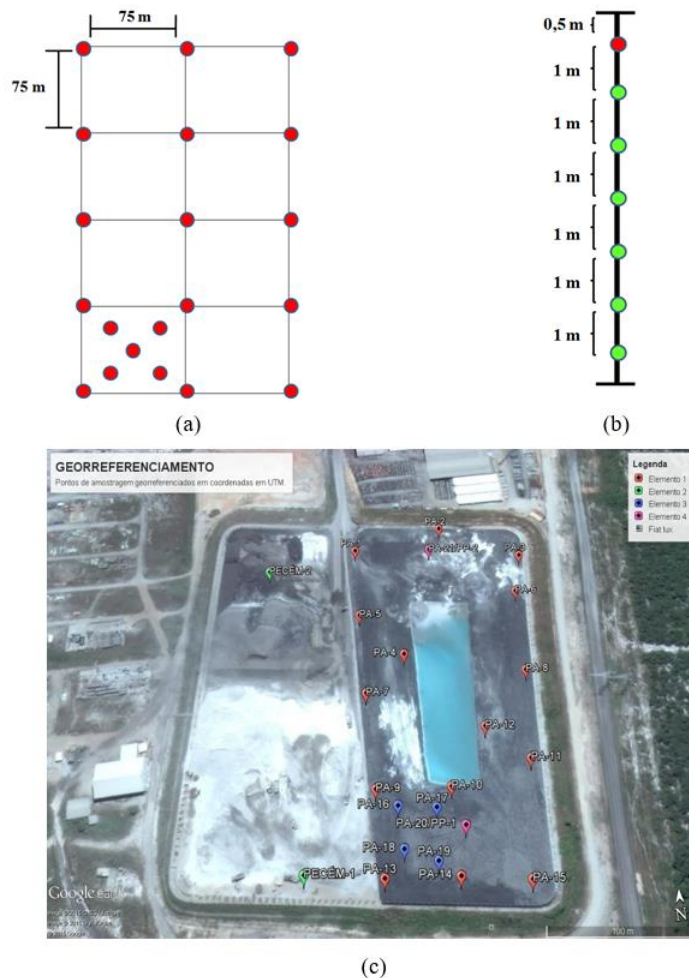


Figura 1: Plano de amostragem previsto para (a) pontos de superfície e (b) pontos de profundidade; (c) Local de armazenamento das cinzas – a direita pátio onde era depositado resíduos variados, no qual foram feitas as coletas da maioria das amostras conforme plano amostral da figura (Módulo I); a esquerda local de armazenamento das cinzas leves (módulo II).

Os ensaios seguiram os procedimentos prescritos por normas técnicas do DNER (Departamento Nacional de Estradas de Rodagem), ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) e ASTM (*American Society for Testing and Materials*).

Nas amostras de cinzas coletadas não era possível distinguir os tamanhos das partículas, ou mesmo, dividi-las em frações de acordo com o seu tamanho. As cinzas encontravam-se em um estado “sinterizado”, o que levou a necessidade submeter as amostras a processos de cominuição. No que diz respeito a preparação das amostras, seguiu-se os procedimentos previstos pela norma NBR 6457/2016 [12]. Vale ressaltar que todas as amostras ensaiadas foram previamente secas em estufa a temperatura de 105°C. O ensaio de determinação da densidade real seguiu o procedimento previsto na norma DNER-ME 093/1994 [13]. A análise granulométrica foi regida pela norma da ABNT NBR 7181/2016 [14]. Os ensaios de determinação do limite de liquidez e plasticidade foram orientados pelas normas da ABNT NBR 6459/2016 [15] e NBR 7180/2016 [16], respectivamente. Para o ensaio de compactação seguiu-se a norma da ABNT NBR 7182/2016 [17], enquanto para o ensaio de permeabilidade utilizou-se a NBR 14545/2000 [18]. Os ensaios de resistência ao cisalhamento foram regidos pelas normas da ASTM D3080 [19] (ensaio de cisalhamento direto) e D7181 [20] (ensaio de compressão triaxial sob condições consolidada e drenada). Vale destacar que os ensaios de compactação, permeabilidade saturada e resistência ao cisalhamento foram feitos em duplicatas.

Os ensaios de compactação indicaram uma grande variabilidade dos parâmetros de ω_{otimo} e $\gamma_{d\ max}$, nas

cinzas do depósito, tornando difícil definir um padrão de compactação em campo. Aliado a isto, resultados de análises ambientais de ensaios de lixiviação e solubilização indicaram que 18 % das amostras foram classificadas como resíduos classe I (perigosos e não-inertes) (PA-2; PA-5; PA-7; PA-9; PA-12 e PP-2 (1)), sendo o restante classificados como classe II-A (não perigosos e não-inertes).

Algumas limitações técnicas e operacionais, tornaram inexecutável a realização de todos os ensaios geotécnicos previstos com todas as amostras coletadas, sendo apenas os ensaios de massa específica real dos grãos e granulometria realizados em todas as amostras. Isto aliado aos resultados dos ensaios ambientais e de compactação, indicaram a necessidade de buscar alternativas de análise que se adequassem a logística do programa experimental e ao mesmo tempo fosse representativa do material que estava sendo analisado. Devido à relativa dispersão de determinados parâmetros geotécnicos, tornou-se tecnicamente inviável a utilização das cinzas considerando as características de cada ponto amostral. Em função disto decidiu-se pelo uso de uma amostra composta de cinzas, constituída pela mistura de todas as amostras de cinza coletadas (exceto as de cinzas leves), repetindo-se os ensaios de caracterização nesta amostra, denominada de cinzas compostas (CC). Adicionalmente, foi realizada uma análise estatística com algumas amostras de cinzas selecionadas, de modo a avaliar a representatividade dos parâmetros da cinza composta para todo o volume de resíduo estudado.

Os resultados de ensaios de permeabilidade, indicaram que as cinzas coletadas não apresentaram permeabilidade desejável (condutividade hidráulica do material saturado superiores a 10^{-9} m/s) para o uso como *liners* (tanto para as amostras individual e quanto para das cinzas compostas), o que levou a necessidade de avaliar o uso de misturas de solo e cinza como barreiras impermeabilizante. O solo escolhido foi o utilizado pelo ASMOC (Aterro Sanitário Metropolitano Oeste de Caucaia) como material de cobertura final do aterro de resíduos sólidos urbanos. Foram propostas três misturas com diferentes proporções de solo e cinza composta: a mistura S30C70, composta por 30% em massa de solo e 70% em massa de cinza; a mistura S50C50, composta por 50% em massa de solo e 50% em massa de cinza; e a mistura S70C30, composta por 70% em massa de solo e 30% em massa de cinza.

Deve-se ressaltar, que para a escolha das amostras de cinzas individuais foram estabelecidos dois critérios. O primeiro referia-se a granulometria. Observou-se pelo os referidos ensaios que todas as amostras possuíam sempre quantidades de finos (material passante na peneira N° 200) superiores a 60%. Dessa forma estabeleceu-se 4 faixas de porcentagens de finos, sendo selecionada pelo menos uma amostra de cada faixa. O outro critério, foi tentar selecionar dentro de cada faixa, amostras classificadas como resíduo classe I. Com base nesses critérios foram selecionadas 7 amostras de cinzas individuais apresentadas na tabela 1. Além dessas, foram realizados ensaios também com as cinzas leves e as cinzas compostas

Tabela 1: Amostras de cinzas selecionadas

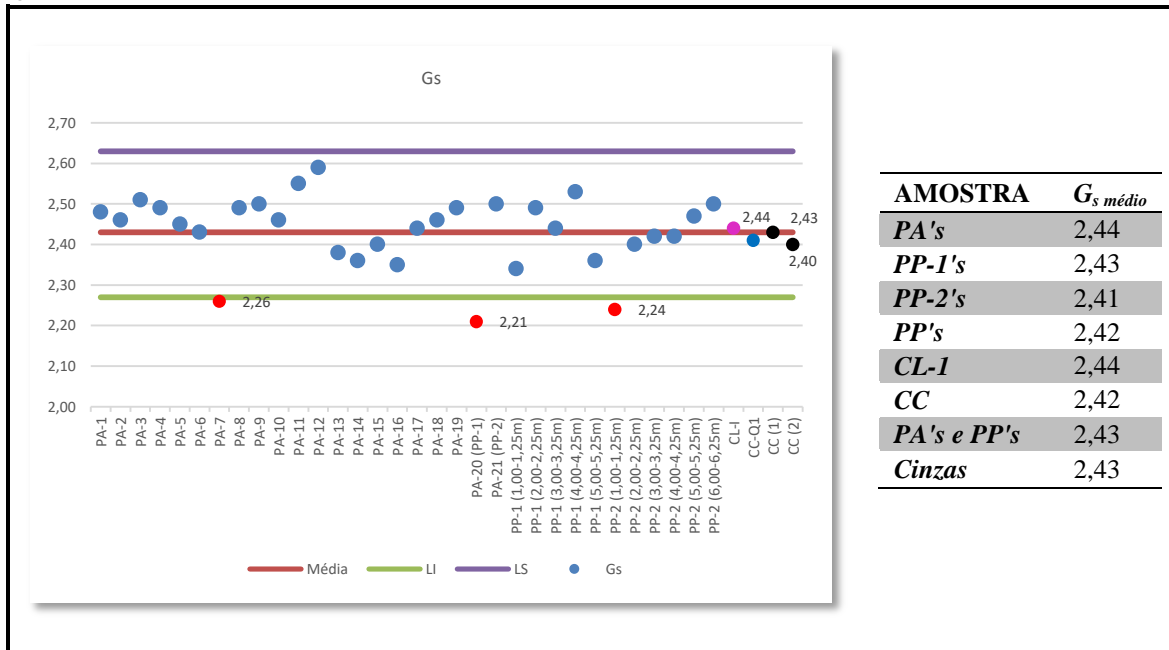
GRUPO	FAIXA (% FINOS)	AMOSTRAS SELECIONADAS
GRUPO 60	60 – 69%	PA-4
GRUPO 70	70 – 79%	PA-17
GRUPO 80	80 – 89%	PA-9; PP-1 (2,00-2,25m) e PP-2 (1,00-1,25m)
GRUPO 90	90 – 99%	PA-7 e PP-1 (5,00-5,25m)

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Densidade real, análise granulométrica e limites de consistência

As análises de massa específica real dos grãos, também chamada de densidade real (G_s), foram realizadas com todas as amostras de cinzas coletadas, nas amostras de cinza composta, no solo coletado no ASMOC e nos materiais compósitos (misturas de solo e cinza) (Quadro 1).

Quadro 1: Resultados das análises de densidade real de todas as amostras de cinza.



O valor obtido para cinza composta foi o mesmo valor da média das amostras individuais ($G_s = 2,43$) e para o solo obteve-se uma densidade real de 2,62. Para as misturas os valores médios variaram de 2,39 para a mistura S30C70 a 2,46 para a mistura S70C30, ou seja, um aumento no valor de G_s a medida que se aumentava a fração de solo na mistura.

Das análises estatísticas realizadas, este foi um dos parâmetros que menos sofreu variação, evidenciado pelo baixo desvio padrão ($\sigma = 0,08$). O valor médio foi de $G_s = 2,43$, sendo que o máximo valor obtido (não-outlier) foi de 2,59

A análise granulométrica foi realizada em todas as amostras de cinzas coletadas, obtendo-se as distribuições granulométricas (Tabela 2). Destaca-se que devido ao processo de cominuição, trabalhou-se apenas o material passante na peneira de abertura de malha de #2,00 mm.

Tabela 2: Distribuições Granulométricas de todas as amostras de cinzas individuais.

AMOSTRA	Pedregulho (%)	Areia Grossa (%)	Areia Média (%)	Areia Final (%)	Silte (%)	Argila (%)	% #200	G_s	SUCS
PA									
Pontos de Superfície (0,50 < p < 0,75m)									
PA-1	0	0	8	11	78	3	81	2,48	ML
PA-2	0	0	3	12	82	4	86	2,46	ML
PA-3	0	0	6	6	84	4	88	2,51	ML
PA-4	0	0	25	11	59	5	64	2,49	ML
PA-5	0	0	18	9	69	5	74	2,45	ML
PA-6	0	0	7	11	62	20	82	2,43	ML
PA-7	0	0	1	8	87	5	92	2,26	ML
PA-8	0	0	1	6	83	10	93	2,49	ML
PA-9	0	0	5	10	78	7	85	2,50	ML
PA-10	0	0	8	15	69	8	77	2,46	ML
PA-11	0	0	5	9	81	5	86	2,55	ML
PA-12	0	0	12	5	79	3	82	2,59	ML
PA-13	0	0	2	8	77	13	90	2,38	ML
PA-14	0	0	1	7	81	11	92	2,36	ML
PA-15	0	0	5	7	76	12	88	2,40	ML
PA-16	0	0	1	8	75	15	90	2,35	ML
PA-17	0	0	19	10	63	8	71	2,44	ML
PA-18	0	0	17	14	66	3	69	2,46	ML
PA-19	0	0	12	8	75	5	80	2,49	ML
PA-20 (PP-1)	0	0	11	24	47	18	65	2,21	ML

PA-21 (PP-2)	0	0	4	11	80	5	85	2,49	ML
PP-1 (PA-20)	Pontos em Profundidade (> 1,00m) (1)								
PP-1 (1,00-1,25m)	0	0	8	14	68	10	78	2,34	ML
PP-1 (2,00-2,25m)	0	0	3	11	66	20	86	2,49	ML
PP-1 (3,00-3,25m)	0	0	9	9	76	6	82	2,44	ML
PP-1 (4,00-4,25m)	0	0	7	11	80	2	82	2,53	ML
PP-1 (5,00-5,25m)	0	0	0	7	88	5	93	2,36	ML
PP-2 (PA-21)	Pontos em Profundidade (> 1,00m) (2)								
PP-2 (1,00-1,25m)	0	0	10	8	76	6	82	2,24	ML
PP-2 (2,00-2,25m)	0	0	1	9	87	3	90	2,40	ML
PP-2 (3,00-3,25m)	0	0	16	13	62	10	72	2,42	ML
PP-2 (4,00-4,25m)	0	0	3	14	78	5	83	2,42	ML
PP-2 (5,00-5,25m)	0	0	12	10	75	3	78	2,46	ML
PP-2 (6,00-6,25m)	0	0	7	17	71	5	76	2,47	ML
CL	Cinza Leves								
Pecém I (CL-1)	0	0	0	4	95	1	96	2,44	ML

Observou-se que as cinzas são compostas principalmente por partículas do tamanho de silte, com frações menores de argila, areia fina e média e com percentagem de finos acima de 60%. As amostras analisadas foram separadas de acordo com o percentual de material fino (passante na peneira de 0,075mm), das quais foram selecionadas as que seriam submetidas as demais análises geotécnicas (Tabela 3)

Tabela 3: Faixas Granulométricas e amostras de cinzas selecionadas.

GRUPO	FAIXA (% FINOS)	AMOSTRAS POR FAIXA	AMOSTRAS SELECIONADAS
GRUPO 60	60 – 69%	PA-4; PA-18 e PA-20 (PP-1)	PA-4
GRUPO 70	70 – 79%	PA-1; PA-5; PA-10; PA-17; PP-1 (1,00-1,25m); PP-2 (3,00-3,25m); PP-2 (6,00-6,25m)	PA-17
GRUPO 80	80 – 89%	PA-2; PA-3; PA-6; PA-9; PA-12; PA-15; PA-19; PA-21 (PP-2); PP-1 (2,00-2,25m); PP-1 (3,00- 3,25m); PP-1 (4,00-4,25m); PP-2 (1,00-1,25m) e PP-2 (5,00-5,25m)	PA-9; PP-1 (2,00-2,25m) e PP-2 (1,00-1,25m)
GRUPO 90	90 – 99%	PA-7; PA-8; PA-11; PA-13; PA-14; PA-16; PP-1 (5,00-5,25m) e PP-2 (2,00-2,25m)	PA-7 e PP-1 (5,00-5,25m)

As cinzas compostas (mistura de todas as amostras de cinza) apresentaram uma percentagem de finos superior a 70%. O solo utilizado apresentou um elevado teor de argila (aproximadamente 30%), além de uma pequena percentagem de silte e com frações elevadas de areia média e fina.

As misturas apresentaram curvas granulométricas de transição entre a curva do solo e da cinza composta, de acordo com a percentagem de cada material presente, de modo que se observou um aumento gradual da fração de partículas de tamanho de siltes, a medida em que a percentagem de cinza aumentava na composição da mistura. As curvas granulométricas da CC, do solo e das misturas pode ser observada na figura 2.

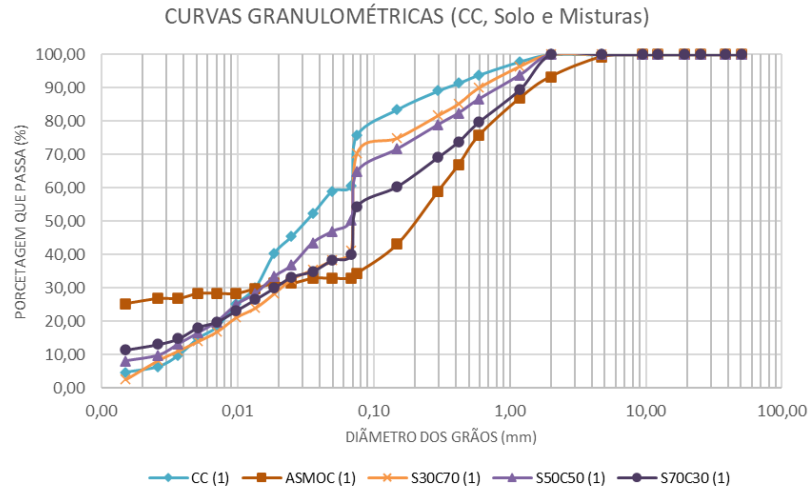


Figura 2: Curvas granulométricas – (a) CC; (b) solo AMSOC; (c) misturas; (d) CC, solo e misturas.

As cinzas submetidas aos ensaios para determinação dos limites de Atterberg, apresentaram-se como materiais não líquidos e não plásticos. O solo utilizado na composição das misturas possui um LL = 23,75 e um LP = 15,77. Os valores da mistura variam de acordo com a proporção de cada material presente na mistura. A amostra S30C70 devido ao elevado teores de cinza mostrou-se não líquida e não plástica. As amostras S50C50 e S70C30 apresentaram em sua granulometria teores de argilas muito próximos, contudo, as frações de areia média e fina conferiram a S70C30 uma menor plasticidade.

Foi realizada para as amostras de CC, solo e misturas a classificação SUCS. A cinza segundo o SUCS é classificada como um silte de baixa plasticidade (ML), enquanto o solo foi classificado como uma areia argilosa (SC). As misturas passaram a apresentar Limites de Liquidez e de Plasticidade não nulos a medida em que se aumentava a fração de solo nas mesmas, sendo todas classificadas como ML, o que demonstra a maior influência das cinzas nas propriedades da mistura no que diz respeito às características granulométricas e plásticas do material (Tabela 4)

Tabela 4: Frações Granulométricas, LL, LP, IP e Classificação SUCS da CC, solo e misturas.

AMOS-TRA	Pedre-dre-gulho (%)	Areia Gros-sa (%)	Areia Média (%)	Areia Final (%)	Silte (%)	Argila (%)	G _s	LL (%)	LP (%)	IP (%)	SUCS
CC	0	0	9	16	61	15	2,43	NL	NP	-	ML
ASMOC	1	6	26	31	6	29	2,62	24	16	8	SC
S30C70	0	0	15	15	56	14	2,39	NL	NP	-	ML
S50C50	0	0	18	18	48	16	2,45	31	28	3	ML
S70C30	0	0	26	20	36	18	2,46	26	25	1	ML

3.2 Compactação

Todos os ensaios de compactação foram realizados em duplicata. A umidade ótima e o peso específico seco máximo, obtidos através dos ensaios de compactação para as amostras de cinzas, foram os parâmetros com a maior variação, contudo foi possível observar um padrão nas curvas de compactação (Figura 3 a e b). Para as amostras de cinzas (individuais) coletadas no depósito, os teores de umidade ótima (ω_{ot}) variaram de 34,65% a 63,10% (Quadro 2) e o peso específico seco máximo (γ_d) de 0,869 g/cm³ a 1,231 g/cm³ (Quadro 3).

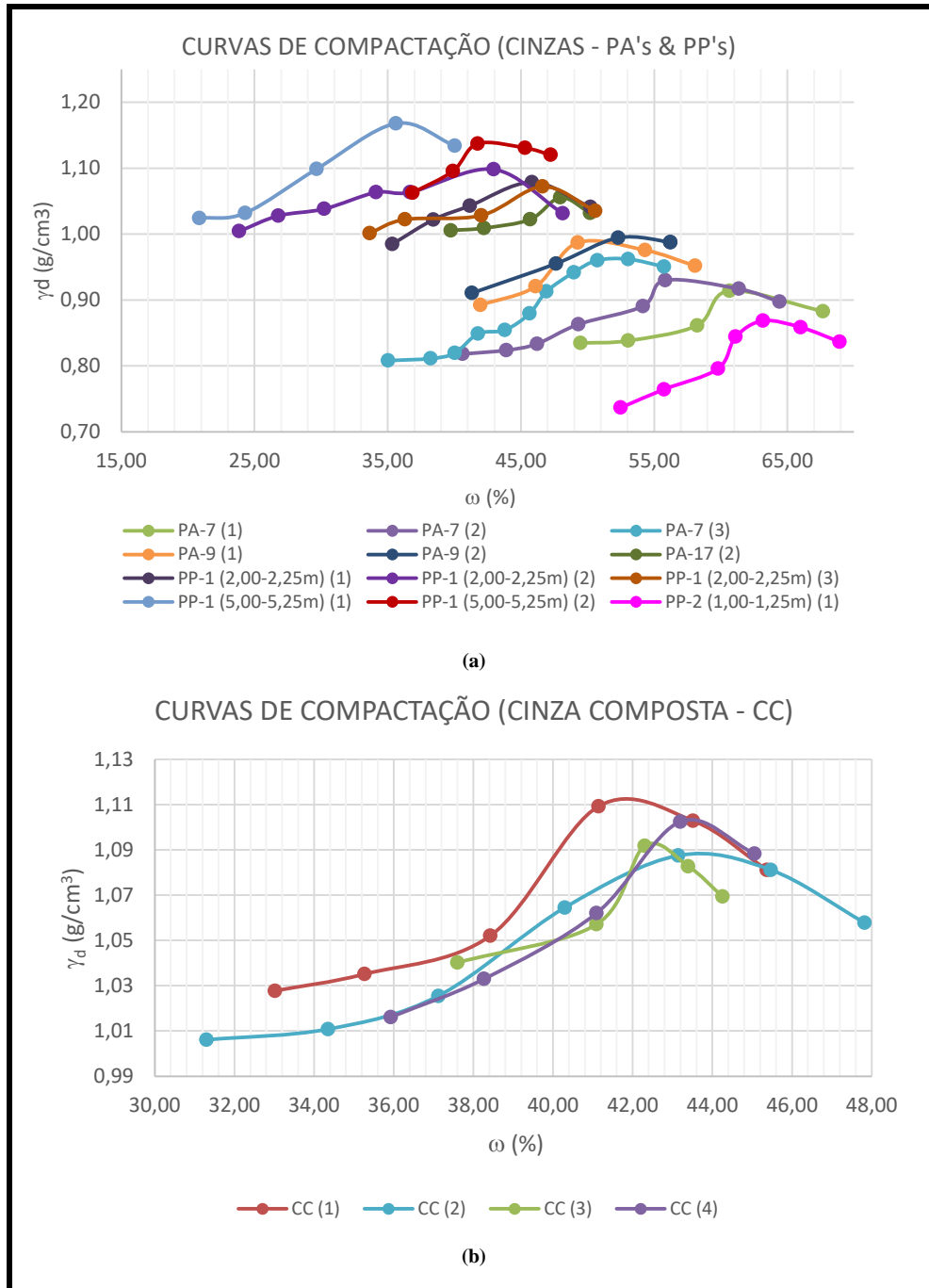
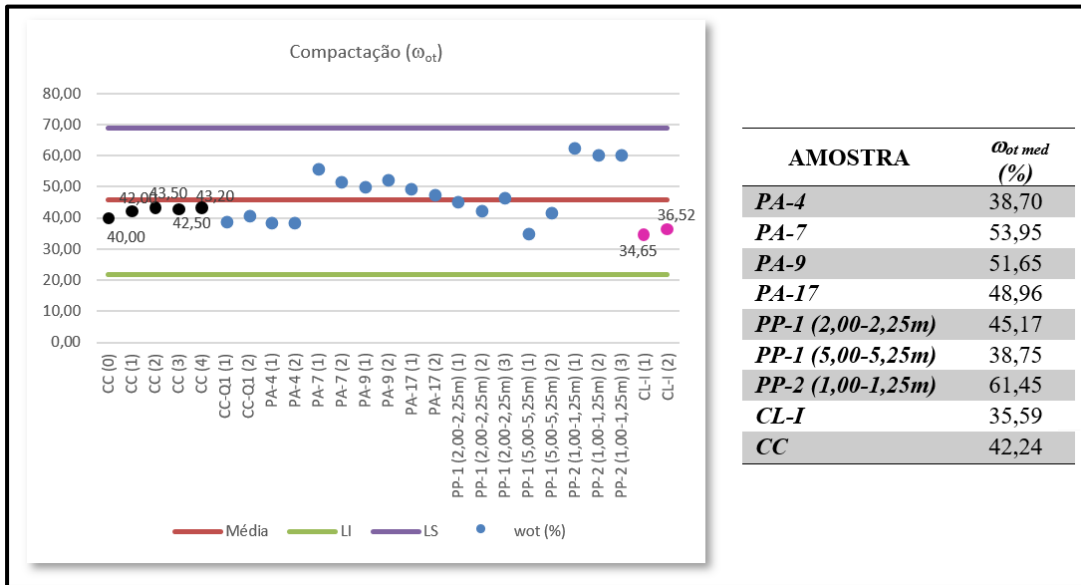
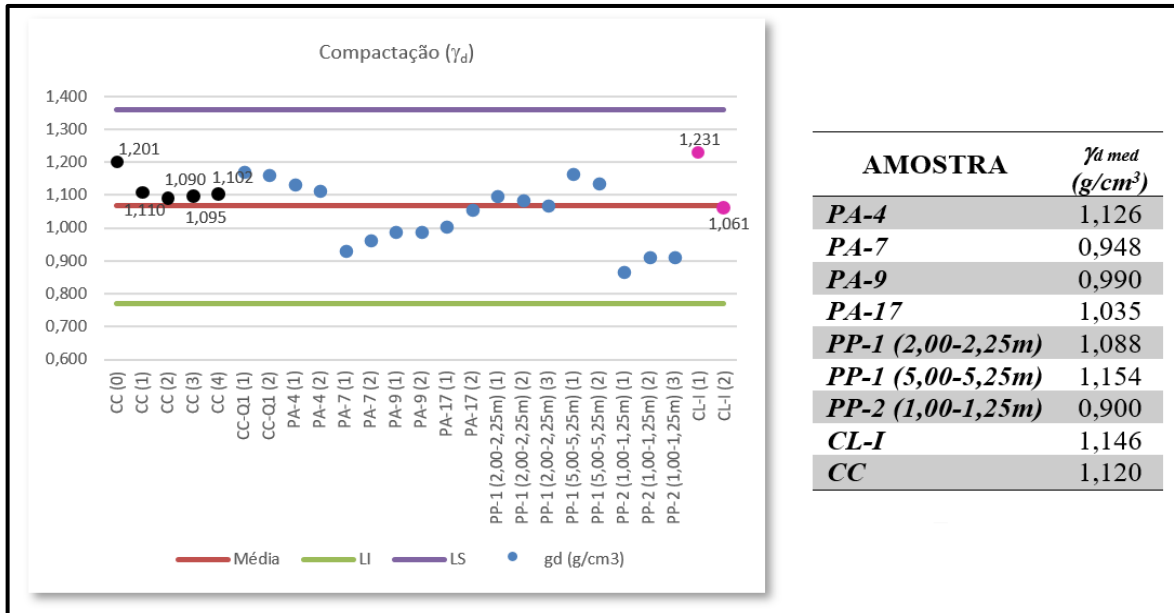


Figura 3: Curvas de compactação – (a) cinzas individuais selecionadas; (b) CC's



Quadro 2: Resumo dos ensaios de compactação das amostras de cinzas - ω_{ot} (%)



Quadro 3: Resumo dos ensaios de compactação das amostras cinzas - $\gamma_{d\ med}$ (g/cm³).

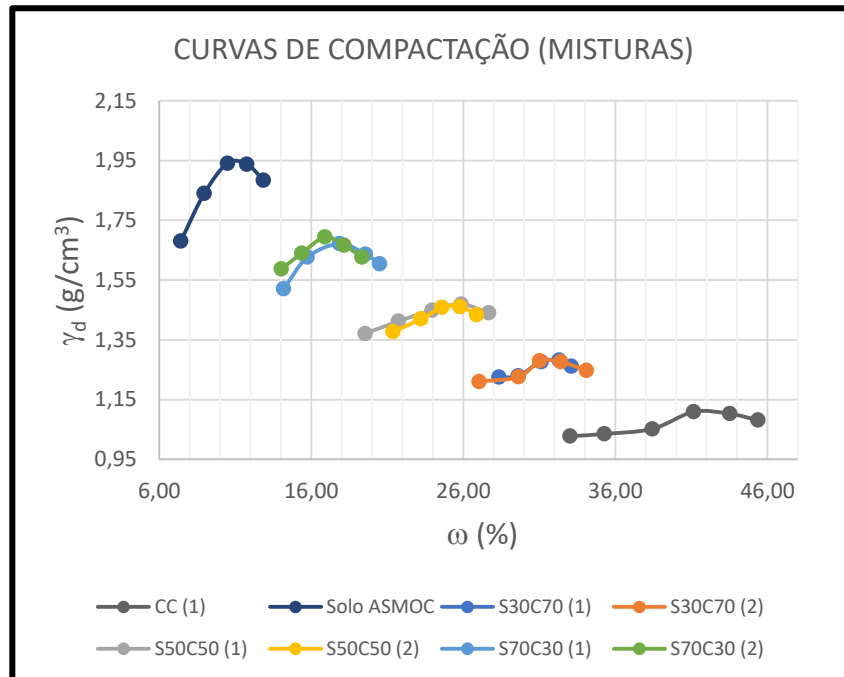
Analisando os resultados do ensaio de compactação, foi possível observar uma variabilidade bastante significativa no teor de umidade ótima, com amplitude de aproximadamente 28,5%, algo não apresentado por outros parâmetros como a densidade real (Gs) e o coeficiente de permeabilidade saturada (K_{20}), como será visto posteriormente. Isto inviabiliza a uniformização de um procedimento operacional em campo. Este foi um dos fatos que motivou a proposição de um material composto pela mistura de todas as cinzas.

Avaliando a CC foi possível observar um padrão de comportamento com poucas variações nos valores de seus parâmetros. Os valores médios de ω_{ot} (%) e γ_d (g/cm³) da CC (42,24 % e 1,120 g/cm³), ficaram próximos as médias obtidas pela análise estatística (45,85% e 1,068 g/cm³).

Os ensaios de compactação do solo retornaram valores característicos do material ensaiado, areia argilosa. As misturas apresentaram valores, tanto de umidade ótima quanto de peso específico seco máximo (Tabela 5), entre os valores da cinza composta e do solo. Nas misturas, o aumento do peso específico e consequente diminuição da umidade ótima, foi função do aumento da quantidade de solo presente nas misturas (Figura 4).

Tabela 5: Valores de $\omega_{ot\ méd}$ (%) e $\gamma_{d\ méd}$ (g/cm³) para CC, solo e misturas.

AMOSTRA	$\omega_{ot\ méd}$ (%)	$\gamma_{d\ méd}$ (g/cm ³)
CC	42,24	1,120
Solo ASMOC	11,00	1,951
S30C70	32,10	1,285
S50C50	25,82	1,457
S70C30	17,45	1,679

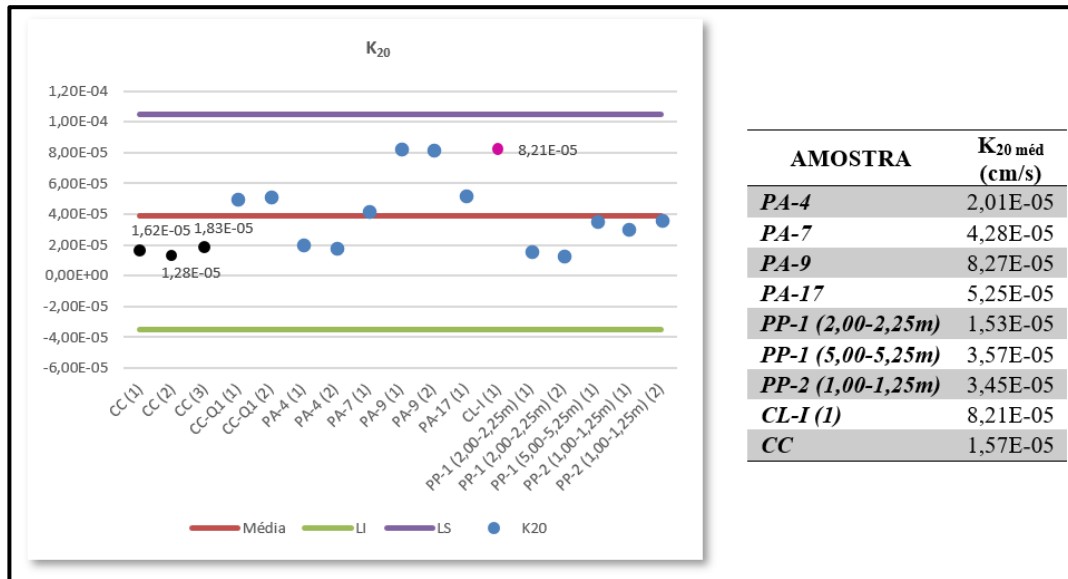

Figura 4: Curvas de compactação da CC, solo ASMOC e misturas

3.3 Condutividade hidráulica

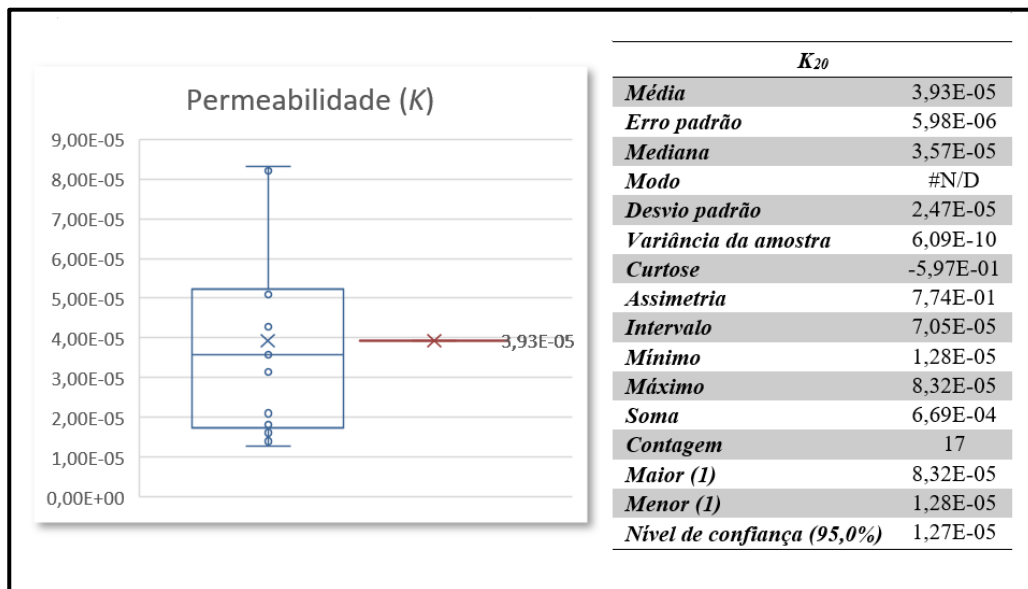
Os ensaios de permeabilidade saturada tiveram resultados na mesma ordem de grandeza para todas as amostras de cinza (Quadro 4). As cinzas compostas apresentaram coeficiente de permeabilidade médio de $1,57 \times 10^{-5}$ cm/s.

A análise estatística, mais uma vez retornou valores médios próximos dos valores da cinza composta, estando a permeabilidade desta distante da média menos que 1 desvio padrão, o que mostra que a proposta de um material composto da mistura de todas as cinzas, pode apresentar um comportamento mais previsível do que a considerando parâmetros ponto a ponto, além de confirmar que esse tipo de análise pode retornar valores mais confiáveis (Quadro 5).

Quadro 4: Ensaios de permeabilidade (cinzas individuais, leves e compostas) – $K_{20\text{ méd}}$ (cm/s)



Quadro 5: Análise estatísticas dos resultados do ensaio de permeabilidade – K_{20} (cm/s)



O solo utilizado nas misturas apresentou um teor de argila de cerca de 30%, e os resultados dos ensaios de permeabilidade indicaram um coeficiente de permeabilidade de $1,09 \times 10^{-7}$ cm/s, que credencia o material para o emprego como *liner*. Ao misturamos o solo com a cinza em diferentes proporções, observou-se que o aumento gradativo da quantidade de solo na mistura diminuía a condutividade hidráulica da mesma. Foram avaliadas três proporções distintas de mistura de solo e cinza, uma com 30% de solo, outra com 50%, e a última com 70% de solo (Tabela 6).

Tabela 6: Valores de K_{20} (cm/s), $\omega_{ot\text{ méd}}$ (%), $\gamma_{d\text{ méd}}$ (g/cm³), Gs, e para CC, solo e misturas.

AMOSTRA	$K_{20\text{ méd}}$ (cm/s)	$\omega_{ot\text{ méd}}$ (%)	$\gamma_{d\text{ méd}}$ (g/cm ³)	Gs	e
CC (1)	1,57E-05	42,24	1,120	2,43	1,170
Solo ASMOC (1)	1,09E-07	11,00	1,951	2,62	0,343
S30C70 (1)	8,02E-06	32,10	1,285	2,39	0,860
S50C50 (1)	5,68E-06	25,82	1,457	2,45	0,682
S70C30 (1)	4,26E-07	17,45	1,679	2,46	0,465

A condutividade hidráulica das cinzas foi a mesma encontrada em outros estudos, na mesma magnitude das cinzas leves (Tabela 7).

Tabela 7: Valores de K_{20} (cm/s), para cinzas de carvão mineral em diferentes trabalhos.

CONDUTIVIDADE HIDRAÚLICA – K (cm/s)							
Heineck [21]		Cruz [22]		Ubaldo [3]		Elias [10]	
CG	CL	CG	CL	CG	CL	CC	CL
$1,78 \times 10^{-4}$	$5,67 \times 10^{-5}$	$8,44 \times 10^{-5}$	$5,43 \times 10^{-5}$	$2,45 \times 10^{-4}$	$6,0 \times 10^{-5}$	$1,57 \times 10^{-5}$	$8,21 \times 10^{-5}$

CG – Cinza Grossa; CL - Cinza Leve; CC – Cinzas Compostas

Elias [1, 23] avaliou a condutividade hidráulica de misturas de cinza leve e bentonita. O referido autor utilizou elevados teores de bentonita na mistura (20% em massa), não conseguindo reduções significativas na permeabilidade hidráulica do material, uma vez que a cinza leve inibiu o inchamento da bentonita (argilomineral tipo 2:1). Ao contrário de Likianchuki [24], que estudou misturas de areia e bentonita com teores de bentonita de no máximo 7%, obtendo reduções significativas no valor do coeficiente de permeabilidade saturada, passando de $3,61 \times 10^{-5}$ cm/s para o solo puro, para $8,76 \times 10^{-8}$ cm/s para a mistura de solo com 7% de bentonita. Em contrapartida, o solo utilizado no presente trabalho possui como argilomineral predominante a caulinita (tipo 1:1), que não apresenta o mesmo potencial expansivo da bentonita, não sendo observado tal fenômeno e atingindo valores de condutividade hidráulica aceitável para aplicação proposta (Tabela 8)

Tabela 8: Valores de K_{20} (cm/s), para cinzas de carvão mineral em diferentes trabalhos.

CONDUTIVIDADE HIDRAÚLICA – K (cm/s)		
Likiantchuki [24]	Elias [1, 23]	Elias [10]
Solo + 7% de Bentonita	C80B20	S70C30
$8,76 \times 10^{-8}$	$1,2 \times 10^{-6}$	$4,26 \times 10^{-7}$

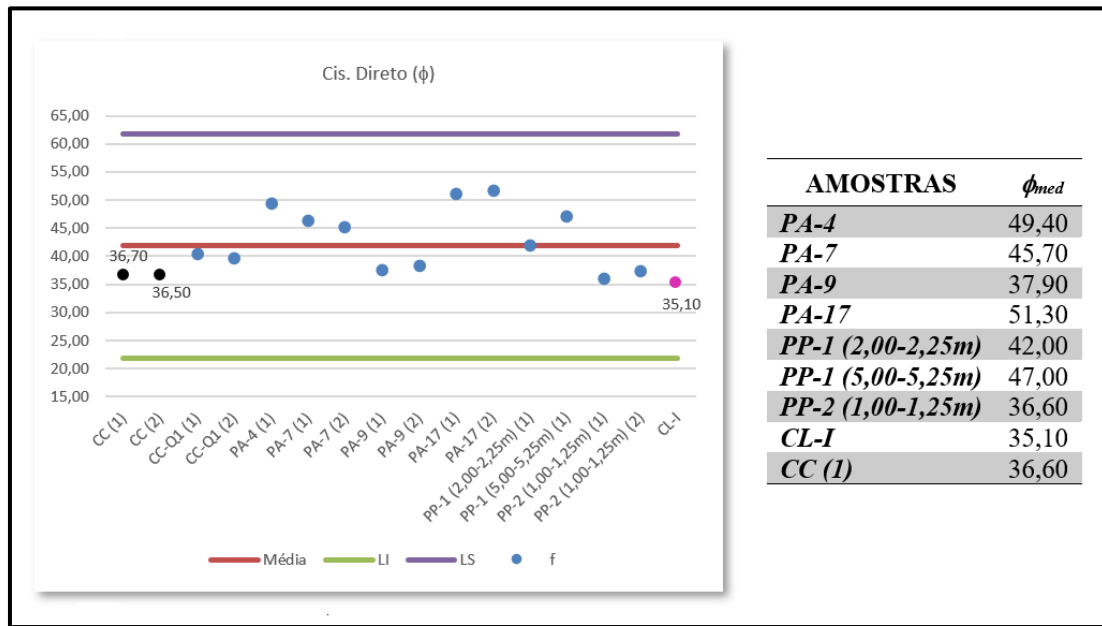
C80B20 – Mistura com 80% em massa de cinza leve e 20% em massa de bentonita;

3.4 Cisalhamento direto

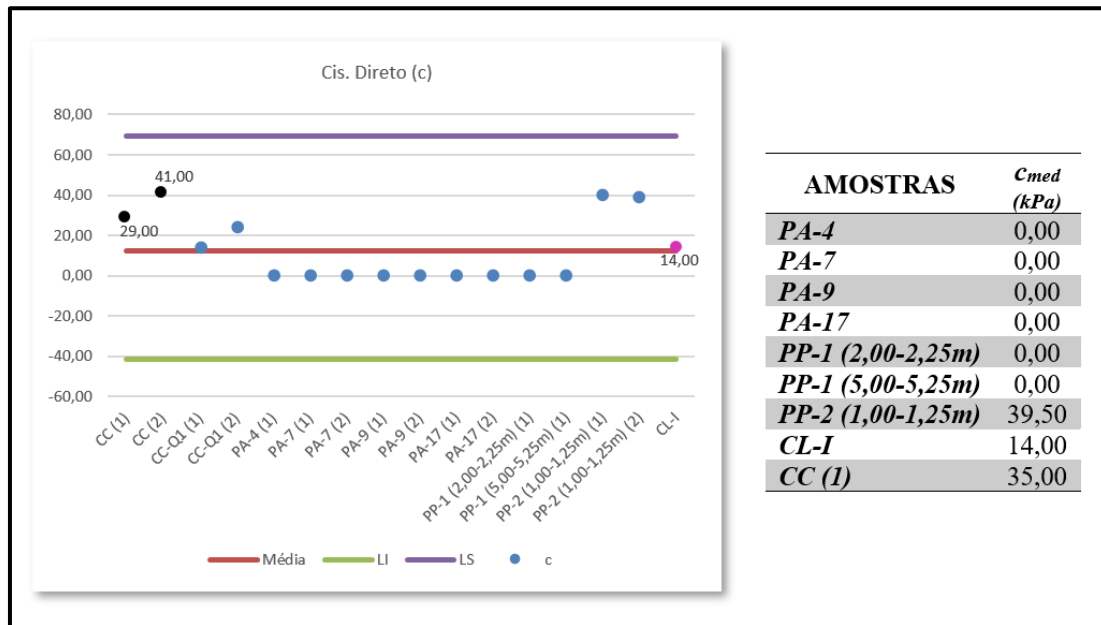
Os ensaios de cisalhamento direto retornaram, para a maioria das amostras individuais de cinzas analisadas, valores característicos de materiais granulares, algo já esperado pelas características texturais do material (Quadros 6 e 7). Todavia, para as cinzas compostas, cinzas leves e a amostra PP-2 (1,00-1,25m) observou-se valores de interceptos coesivos característicos de solos argilosos duros (Quadro 7)

Os valores de interceptos coesivos apresentados pelas amostras citadas, podem ter diversas origens. Tal comportamento pode ser creditado a heterogeneidade das amostras, ou devido a fatores como: a presença de contaminantes inorgânicos, matéria orgânica, interação entre partículas, fenômenos físico-químicos, que dentre outros motivos podem ter levado aos valores de interceptos coesivos encontrados. Além disso, há em algumas amostras, resíduos de dessulfuração, o que significa a presença de óxido de cálcio, que com a cinza (material pozolânico) pode levar a cimentação do material elevando também a coesão.

Quadro 6: Ensaios de cisalhamento direto (cinzas individuais, leves e compostas) - ϕ_{med} .



Quadro 7: Ensaios de cisalhamento direto (cinzas individuais, leves e compostas) - c_{med} (kPa).



Os valores de coeficiente de atrito estão dentro de um intervalo de solos granulares medianamente compactos a muito compactos, mais uma vez o valor deste parâmetro para cinza composta (36,6) ficou próximo a média (41,85), distante desse menos que 1 desvio padrão ($\sigma = 5,71$), estando os valores dentro da faixa de materiais medianamente compactos a compactos.

Os valores de intercepto coesivo para as cinzas individuais analisadas apresentaram-se dentro do valor esperado, exceto para PP-2 (1,00-1,25m), CL-1 e Cinzas Compostas. Por este motivo a análise estatística retornou um desvio padrão de 16,50 kPa para este parâmetro, o que levou a média (12,56 kPa) para um valor mais distante do intercepto coesivo da cinza composta (35,00 kPa).

O ensaio de resistência ao cisalhamento do solo retornou os valores esperados para as características do material, uma areia argilosa. Para as misturas os ângulos de atrito apresentaram valores associado a proporção de cada material. A amostra S30C70 apresentou um resultado plausível sob a perspectiva de maior porcentagem de cinza composta, uma vez que se trata de um material não plástico, para o qual esperava-se encontrar intercepto coesivo mais baixo que o solo. Todavia, a mesma amostra de cinza composta apresentou

um valor de intercepto coesivo significativo, que não foi reproduzida na mistura. As misturas S50C50 e S70C30 apresentaram valores coerentes com a composição das mesmas (Tabela 9).

Com intuito de avaliar o comportamento da mistura com adição de cal a partir de uma perspectiva geotécnica, foi adicionada a melhor mistura S70C30 (para aplicação como barreira impermeabilizante) 5% de cal em massa. O que se observou, a partir dos ensaios de cisalhamento direto da mistura S70C30Ca5, foram ganhos significativos na resistência do material.

Tabela 9: Valores de ϕ e c para CC, solo e misturas.

AMOSTRAS	ϕ	c	ϕ_{med}	c_{med}
CC (1)	36,7	29	36,6	35
CC (2)	36,5	41		
Solo ASMOC	29,1	45	29,1	45
S30C70 (1)	39,4	0	38,9	0
S30C70 (2)	38,3	0		
S50C50 (1)	32,2	41	32,2	41
S70C30 (1)	30,0	17	29,8	33
S70C30 (2)	29,6	48		
S70C30Ca5 (1)	58,5	17	58,5	17

3.5 Compressão triaxial

Os ensaios triaxiais realizado no presente trabalho, foram feitos exclusivamente para cinza composta. O objetivo destes ensaios era ratificar os ensaios de cisalhamento direto realizados para as amostras que apresentaram valores até um certo ponto inesperados (Figura 5). Dessa forma optou-se por ensaios do tipo consolidado e drenado (CD).

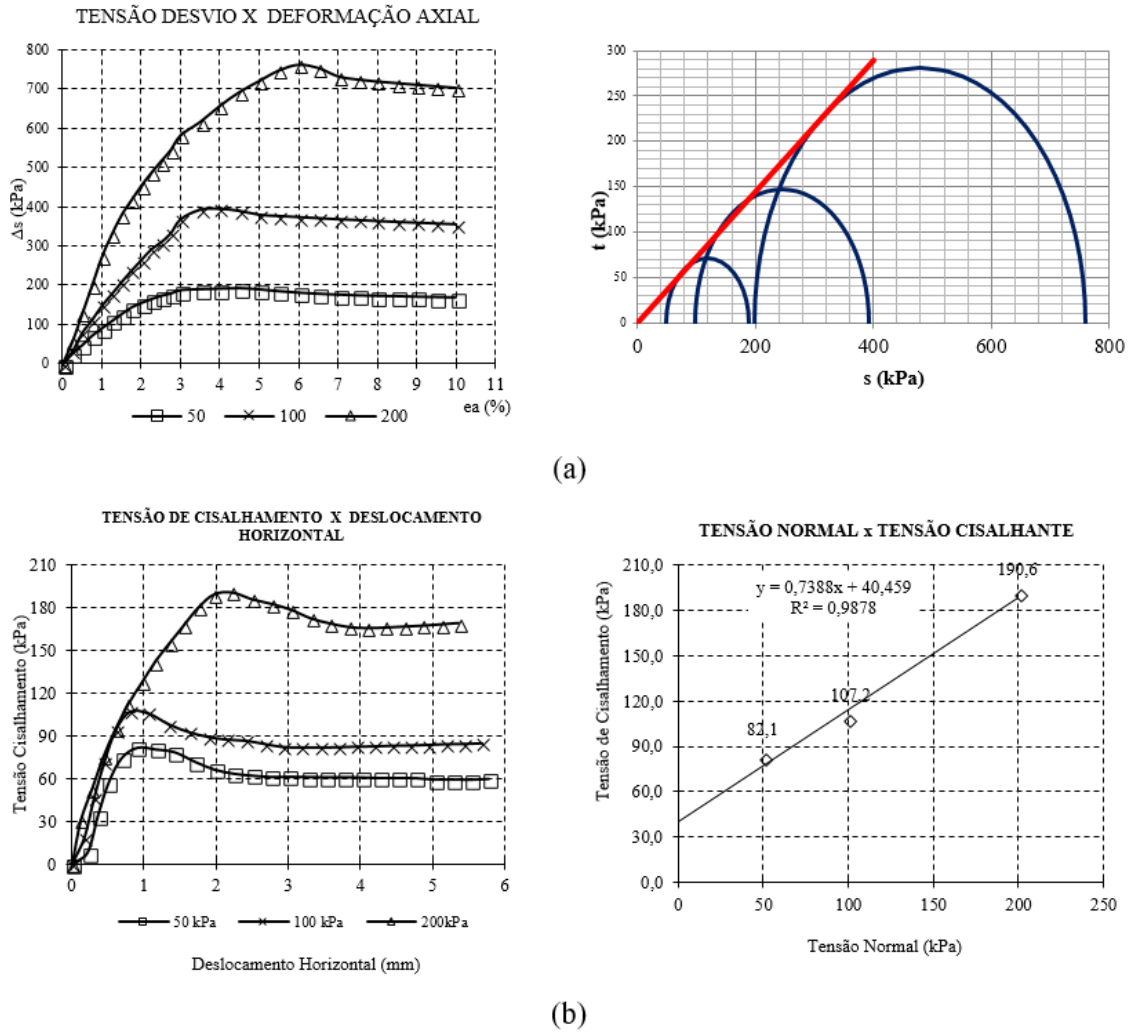


Figura 5: (a) Ensaio Triaxial - Curvas Tensão x Deformação e envoltórias de resistência para amostra de CC; (b) Ensaio de Cisalhamento Direto - Curvas Tensão x Deformação e envoltórias de resistência para amostra de CC

Os resultados dos ensaios de compressão triaxial apresentaram valores de ângulos de atrito próximos aos encontrados pelos ensaios de cisalhamento direto (Tabela 10). O valor do intercepto coesivo, no entanto, foi nulo, o que era esperado e que não se observou no ensaio de cisalhamento direto. Contudo, a partir de todas as análises realizadas, tanto das cinzas, como do solo e das misturas, aliados as características dos ensaios e dos materiais, não se deve desconsiderar os valores de intercepto coesivo encontrados nos ensaios de cisalhamento direto, uma vez que há ainda um outro aspecto importante a se considerar nas análises realizadas, o tempo de realização do ensaio, tanto para saturação como para o adensamento da amostra.

Apesar da permeabilidade relativamente alta do material, para garantir uma completa saturação e adensamento da amostra e por uma questão do procedimento prático do ensaio, optou-se por esperar um mínimo de 8 horas de saturação e 16 horas de adensamento, nos ensaios de cisalhamento direto. Nos ensaios triaxiais, com a aplicação das contrapressões, o tempo, tanto para saturação quanto para o adensamento era de 4 horas para cada. Acredita-se que o maior tempo para as etapas citadas no ensaio de cisalhamento direto pode ter influência sobre a coesão, uma vez que mais partículas podem ser hidratadas, mais reações de natureza diversas podem ser processadas, como a cimentação, reações pozolânicas, além de mudanças mais significativas na textura e estrutura do material, entre outros aspectos, que podem ter contribuído diretamente para os valores de intercepto coesivo encontrados. Deve-se destacar que as amostras que apresentaram intercepto coesivo não nulo continham em suas composições elevados teores de CaO, superiores a 30%, o que pode ter contribuído para os valores obtidos [10].

Tabela 10: Valores de ϕ e c obtidos pelo ensaio triaxial e cisalhamento direto para duas amostras de CC.

ENSAIOS DE RESISTÊNCIA				
AMOSTRA	Triaxial		Cisalhamento Direto	
	ϕ	c (kPa)	ϕ	c (kPa)
CC (1)	35,7	0	36,7	29
CC (2)	35,9	0	36,5	41

4. CONCLUSÕES

O presente estudo permitiu uma caracterização geotécnica de cinzas oriundas da queima do carvão mineral nas UTE's Porto Pecém I e II. Os parâmetros analisados em amostras de cinzas coletadas em diferentes pontos da bacia de armazenamento, apresentaram variações significativas, principalmente os de compactação. Somado a isso algumas amostras mostraram-se ambientalmente inadequadas para o uso proposto, sendo classificados, segundo a NBR 10004/2004 [25], como resíduo Classe I. Por estas razões, optou-se por caracterizar uma amostra correspondente a mistura de todas as amostras individuais de cinzas (exceto as amostras de cinzas leves), com o intuito de obter parâmetros mais representativos. Como na bacia de armazenamento eram depositados diferentes tipos de resíduos, mostrou-se interessante realizar análise estatísticas com os dados obtidos. Tais artifícios mostram resultados positivos, uma vez que os valores médios obtidos pelas análises estáticas se mostraram próximos dos valores obtidos para cinza composta.

A partir da amostra de cinza composta foi possível obter parâmetros geotécnicos médios (compactação, resistência, permeabilidade, etc.) mais consistentes e representativos, além de diminuir a periculosidade do resíduo, que foi classificado como um material classe II-A, conforme estabelece a NBR 10004/2004 [25].

Os ensaios de permeabilidade indicaram que a aplicação das cinzas compostas de forma isolada não era viável tecnicamente como material impermeabilizante, pois não apresentava permeabilidade adequada. O uso de misturas de cinzas e solo, em diferentes proporções, mostrou que a mistura S70C30 (70% de solo e 30% de cinza), reuniu as características necessárias para aplicação como material para camadas impermeabilizantes de aterros sanitários (*liner*), tendo esta condutividade hidráulica na ordem 10^{-7} cm/s.

O material apresentou ainda, resistência ao cisalhamento satisfatória para o emprego como barreira impermeabilizante. Deve-se ressaltar que a adição de 5% de cal resultou em ganhos significativos de resistência.

5. AGRADECIMENTOS

As empresas Energia Pecém e Eneva, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), ao Laboratório de Mecânica do Solos e Pavimentação (LMSP) e a Universidade Federal do Ceará (UFC).

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] BARROS, K.S. *Estudo de cinzas volantes de uma termelétrica da região metropolitana de Fortaleza-CE para aplicação em camadas granulares de pavimentos*. Dissertação de M.Sc., Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, DET/UFC, Fortaleza, CE, Brasil, 2015.
- [2] VASCONCELOS, S.D. *Avaliação das cinzas de carvão mineral produzidas em usina termelétrica para construção de camadas de pavimentos*. Dissertação M.Sc. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, DET/UFC, Fortaleza, CE, Brasil, 2018.
- [3] UBALDO, M.O. *Uso de cinzas de carvão da composição de uma cobertura de rejeitos de mineração*. Dissertação M.Sc. COOPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2005.
- [4] MENDOÇA, R.M.G. *Estudo da difusão de oxigênio em materiais de cobertura*. Tese D.Sc. COOPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2007.
- [5] SOUZA, H.P. *Uso de cinzas de carvão mineral da termelétrica do Pecém como material de cobertura seca de depósitos de resíduos*. Dissertação M.Sc., DEHA/UFC, Fortaleza, CE, Brasil, 2018.
- [6] ELIAS, D.S. *Aproveitamento de resíduos sólidos - Estudo experimental de misturas de solo e cinza volante de carvão mineral*. TCC (Graduação) – DEHA/UFC, Fortaleza, CE, Brasil, 2015.
- [7] MARQUES, M.A.P. *Síntese de zeólitas a partir de cinza de carvão com tratamento hidrotérmico alcalino*. TCC (2017). DEQUI/UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil, 2017.
- [8] MALLMANN, J.E.C., ZWONOK, O.O. "Uso de cinzas volante e de fundo em concreto compactado com rolo (ccr)". In: *Anais do Congresso Brasileiro de Carvão Mineral, IV*, pp. 220-234, Gramado, RS, 2013.

- [9] SIQUEIRA, J.S. *Reciclagem de resíduos a partir de cinzas de carvão mineral: Produção de argamassas*. Dissertação M.Sc.. UFPA, Belém, PA, Brasil, 2011.
- [10] ELIAS, D.S. *Caracterização de cinzas de carvão mineral e sua aplicação como barreira impermeabilizante*. Dissertação M.Sc. DEHA-UFC, Fortaleza, CE, 2018.
- [11] BOSCOV, M.E.G., *Geotecnia Ambiental*, 3. ed., São Paulo, Oficina de Textos, 2008.
- [12] ANÔNIMO (2016), NBR 6457: *Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização*. Rio de Janeiro: ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [13] ANÔNIMO (1994), DNER-ME 093/94: *Determinação da densidade real dos grãos*. Rio de Janeiro: DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem.
- [14] ANÔNIMO (2016), NBR 7181: *Solo - Análise granulométrica*. Rio de Janeiro: ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [15] ANÔNIMO (2016), NBR 6459: *Solo - Determinação do limite de liquidez*. Rio de Janeiro: ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [16] ANÔNIMO (2016), NBR 7180: *Solo - Determinação do limite de plasticidade*. Rio de Janeiro: ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [17] ANÔNIMO (2016), NBR 7182: *Solo - Ensaio de compactação*. Rio de Janeiro: ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [18] ANÔNIMO (2016), NBR 14545: *Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável*. Rio de Janeiro: ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [19] ANÔNIMO (2011), D3080: *Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions*, Philadelphia: ASTM - American Society for Testing and Materials.
- [20] ANÔNIMO (2011), D7181: *Method for Consolidated Drained Triaxial Compression Test for Soils*, Philadelphia: ASTM - American Society for Testing and Materials.
- [21] HEINEICK, K.S. *Estudo do comportamento hidráulico e mecânico de materiais geotécnicos para barreiras horizontais impermeáveis*. Tese D.Sc. UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil, 2002.
- [22] CRUZ, R.C. *Condutividade hidráulica em solos contaminadas encapsulados*. Dissertação M.Sc., UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil, 2004.
- [23] ELIAS, D.S., SOARES, A.B., SOUZA, H.P. "Aproveitamento de resíduos sólidos - Estudo experimental de misturas de solo e cinza volante de carvão mineral". In: *Anais do Congresso Brasileiro de Carvão Mineral*, V, Criciúma, SC, 2017. doi:10.20906/CPS/CBCM2017-0009
- [24] LUKIANTCHUKI, J.A. *Influência do teor de bentonita na condutividade hidráulica e a resistência ao cisalhamento de um solo arenoso utilizado como barreira selante*. Dissertação M.Sc., EESC/USP, São Carlos, SP, Brasil, 2007.
- [25] ANÔNIMO (2016), NBR 10004: *Resíduos sólidos - Classificação*. Rio de Janeiro: ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ORCID

Deyvid de Souza Elias	https://orcid.org/0000-0002-2239-4843
Anderson Borghetti Soares	https://orcid.org/0000-0003-0708-3702
Henrique Petisco de Sousa	https://orcid.org/0000-0002-1625-2531