

COMPORTAMENTO GEOTÉCNICO DE AREIAS DESCARTADAS DE FUNDIÇÃO VISANDO APLICAÇÕES EM PAVIMENTOS

Amanda Reus¹; Marcelo Heidemann²; Larissa Xavier de Oliveira³; Helena Paula Nierwinski⁴; Eduardo Guerreiro Kuzer⁵

Resumo – A areia descartada de fundição (ADF) apresenta características interessantes para aplicação na engenharia civil, ao mesmo tempo em que atende os requisitos ambientais para a reutilização. A aplicação como material substituto em obras de infraestrutura é bastante atraente, devido a possibilidade de utilização de grandes volumes de material. Sendo assim, o presente trabalho estuda a viabilidade técnica da ADF em camadas estruturais de pavimentos. Foi realizada uma campanha experimental, que compreendeu ensaios de caracterização e comportamento geotécnico da ADF e o estudo com a incorporação de um solo residual de gnaiss em diferentes proporções. Os ensaios compreenderam análises em microscópio eletrônico e ensaios de compactação, Índice de Suporte Califórnia (CBR), resistência à compressão simples (RCS) e cisalhamento direto. Os corpos de prova foram ensaiados sob três energias de compactação: normal, intermediária e modificada. Os valores de CBR obtidos na ADF pura foram superiores aos medidos nas misturas ADF e solo. Além disso, a adição de solo residual de gnaiss aumentou a expansão. Sob cisalhamento direto foi possível identificar que a ADF possui picos de resistência que são relacionados com o comportamento dilatante de areias densas. A energia de compactação aumenta a resistência ao cisalhamento de pico, já para grandes deslocamentos as três energias de compactação resultam em comportamento similar.

Abstract – Waste Foundry Sand (WFS) presents interesting characteristics for civil engineering applications and comply with environmental requirements. Its application as alternate material in infrastructure constructions is quite attractive due to the possibility of giving destination to large amount of WFS, which has been stored in landfills. Therefore, this paper deals with the investigation of technical feasibility of WFS use in pavement structural layers. Experimental research was carried out, which included chemical and geotechnical characterization and geomechanical tests using WFS in pure condition and with incorporation of a gneiss residual soil. Experimental procedures include scanning electron microscopy, X-ray fluorescence, compaction tests, California Bearing Ratio, unconfined compression strength (UCS) and direct shear tests. The specimens submitted to the geomechanical tests were molded under 3 compaction energies: normal, intermediate and modified. The CBR values of pure WFS were higher than those measured in the WFS-soil mixtures. Furthermore, the addition of residual gneiss soil increased expansion. Under direct shear, it was possible to identify that the WFS has strength peaks that are related to dilatance. The compaction energy increases the peak shear strength, while for large displacements the three compaction energies result in similar behavior.

Palavras-Chave – Areia de fundição; comportamento geotécnico; infraestrutura.

¹ Eng^a Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, amandareus@hotmail.com

² Eng^o, Civil, D.Sc. Universidade Federal de Santa Catarina, marcelo.heidemann@ufsc.br

³ Estudante de Graduação, Universidade Federal de Santa Catarina, larissaxavierdeoliveira@gmail.com

⁴ Eng^a, Civil, D.Sc. Universidade Federal de Santa Catarina, helena.paula@ufsc.br

⁵ Estudante de Graduação, Universidade Federal de Santa Catarina, eduardosmek@gmail.com

1. INTRODUÇÃO

A indústria de fundição se destaca pela utilização de grande quantidade de areia, empregada como molde para conformação de peças. O molde é constituído por diferentes materiais e tem por objetivo obter características de trabalhabilidade da mistura que compõe a caixa de moldagem, composta com uma maior parcela de material granular refratário (usualmente areia silicosa) e um aglomerante mineral (argila e cimento) ou orgânico (óleos, farinha de cereais e resinas) (Klinsky, 2013).

O processo de fundição gera subprodutos que podem ser divididos em dois grupos: areias verdes de fundição e areias de macharia. Designa-se areia verde as areias que utilizam ligantes à base de argila. Quando adicionado ligantes orgânicos, são denominadas areias de macharia (Mariotto, 2000 *apud* Coutinho Neto, 2004).

As areias de fundição são reaproveitadas diversas vezes no processo produtivo, no entanto, são o principal resíduo das fundições. A partir do momento que as propriedades da mistura são afetadas e não atendem às características para compor o molde, o material é disposto em aterros sanitários (Bonet, 2002). As areias de macharia usualmente são separadas das areias verdes e dispostas em aterros sanitários controlados, pois sua composição apresenta alto índice de fenóis. Por outro lado, as areias verdes (ADF) não possuem quantidades representativas de fenóis em sua composição e normalmente são classificadas de acordo com a NBR 10004 (ABNT, 2004) como resíduo de classe II A, não perigoso e não inerte.

A ADF é um dos resíduos sólidos industriais com maior volume de produção. No Brasil são gerados cerca de três milhões de toneladas por ano (ABIFA, 2019). De acordo com Collins e Ciesielski (1994), aproximadamente uma tonelada de areia de fundição é necessária para produzir uma tonelada de metal. Portanto, para o reaproveitamento deste resíduo é necessário aplicações que demandam alto volume de material, como por exemplo aterros rodoviários ou estrutura de contenção.

O presente trabalho discute a viabilidade técnica do uso da ADF em camadas estruturais de pavimentos a partir de resultados de ensaios de caracterização física e de comportamento geotécnico.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais utilizados neste estudo são a areia de fundição (ADF) e um solo residual de gnaiss. A ADF foi obtida em uma indústria de fundição de ferro localizada no município de Joinville/SC. O material tem coloração escura, textura arenosa e partículas finas aderidas a areia. O solo residual de gnaiss foi obtido de uma jazida também localizada em Joinville/SC, sendo um material usual em obras de aterro na região.

A campanha experimental para caracterização dos materiais empregados neste estudo é sumarizada na Tabela 1.

Os ensaios de compactação e CBR foram moldados em diferentes proporções e energias de compactação. Foram ensaiadas três composições: 100% ADF, 75% ADF + 25% Solo residual de gnaiss e 50% ADF + 50% Solo residual de gnaiss. Cada composição foi submetida a ensaios sob três energias de compactação: normal, intermediária e modificada.

Para o ensaio de resistência à compressão simples, os corpos de prova foram moldados nas umidades ótimas relativas às energias normal, intermediária e modificada. Foram estabelecidas 3 condições de rompimento: imediatamente após a moldagem, após 14 dias da moldagem mantido exposto ao ar e após 14 dias da moldagem mantido exposto ao ar e então imerso em água. Para cada condição moldou-se três corpos de prova, totalizando 27 corpos de provas moldados. No entanto, os 9 CPs que foram imersos em água por 4 horas após a cura de 14 dias se desintegraram, não sendo possível submeter ao ensaio.

Tabela 1. Ensaios geotécnicos executados

Ensaio	ADF	Solo residual	Norma
Análise granulométrica	X	X	NBR 7181 (ABNT, 2016)
Densidade real dos grãos	X	X	ME 093 (DNER, 1994)
Limite de Liquidez	-	X	NBR 6459 (ABNT, 2016)
Limite de Plasticidade	-	X	NBR 7180 (ABNT, 2016)
Índice de vazios máximo	X	-	NBR 16840 (ABNT, 2020)
Índice de vazios mínimo	X	-	NBR 16843 (ABNT, 2020)
Compactação Proctor	X	X	NBR 7182 (ABNT, 2016)
Índice de Suporte Califórnia - CBR	X	X	NBR 9895 (ABNT, 2016)
Resistência à Compressão Simples	X	-	NBR 12025 (ABNT, 2012)
Cisalhamento Direto	X	-	D 3080 (ASTM, 2011)

Os ensaios de resistência ao cisalhamento foram realizados em um equipamento do tipo cisalhamento direto, em CPs moldados nas três energias de compactação (normal, intermediária e modificada), nas umidades ótimas e densidades secas máximas (Figura 1).

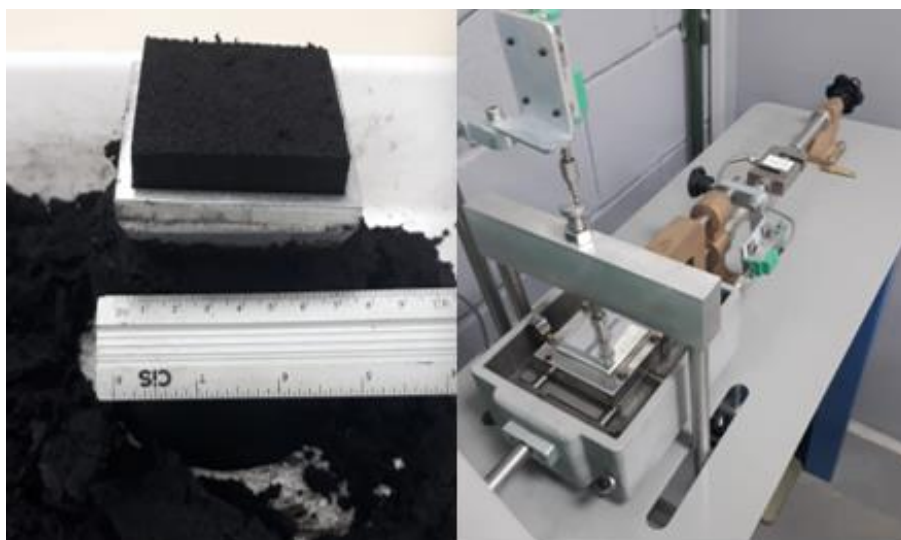


Figura 1. Ensaio de cisalhamento direto.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Caracterização química e física

O resultado do ensaio de fluorescência de raio-X forneceu as concentrações dos elementos químicos presentes na ADF, sendo os principais elementos apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Composição química da ADF.

Elementos	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	MgO	SO ₃	TiO ₂	CaO	Outros
Concentração (%)	89,3	4,04	1,52	0,52	0,46	0,37	0,23	0,20	3,36

Percebe-se que o dióxido de silício (SiO₂) é predominante, visto que cerca de 90% da ADF é composta por areia quartzosa natural. O óxido de ferro (Fe₂O₃) é possivelmente proveniente de sobras do processo de fundição. Os demais elementos ocorrem em função da adição de bentonita e pó de carvão, que são incluídos na mistura para compor a areia de moldagem.

As feições da ADF sob o microscópio podem ser observadas na Figura 2. Nestas verifica-se que o formato dos grãos varia entre circular e levemente angular. Partículas menores ocorrem

aderidas aos grãos de areia, formando grumos que são facilmente desfeitos durante a manipulação do material.

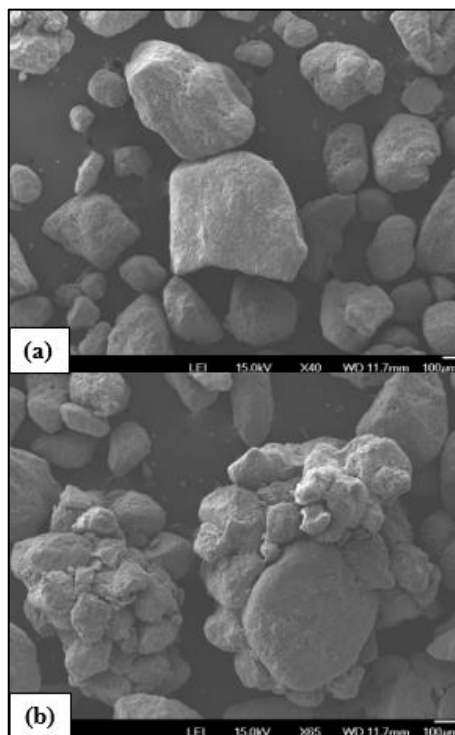


Figura 2. Aspecto da ADF em imagens de microscopia eletrônica.

A Tabela 3 apresenta os índices físicos obtidos para a ADF e para o solo residual de gnaiss. A curva granulométrica da ADF, do solo residual de gnaiss e das misturas (75/25 e 50/50), que foram obtidas por meio de peneiramento e sedimentação, são apresentadas na Figura 3.

Tabela 3. Índices físicos.

Material	G	e_{\max}	e_{\min}	LL	IP
ADF	2,62	0,85	0,56	-	-
Solo residual de gnaiss	2,73	-	-	33,8%	12,8%

Nota: G – densidade real dos grãos; e_{\max} – índice de vazios máximo; e_{\min} – índice de vazios mínimo; LL – limite de liquidez; IP – índice de plasticidade.

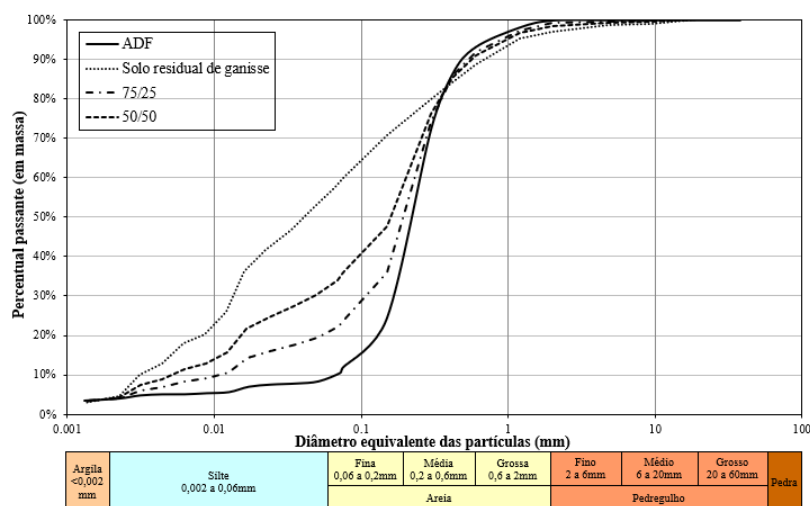


Figura 3. Distribuição granulométrica da ADF, solo residual de gnaiss e misturas.

Nota-se que a ADF possui predominância de partículas do tamanho de areia enquanto o solo residual de gnaiss é mais heterogêneo, possuindo predominantemente grãos do tamanho de silte e areia. As curvas das misturas encontram-se em uma região intermediária, sendo que o aumento do percentual de solo residual de gnaiss promove o deslocamento da curva para a esquerda, região dos finos. De qualquer forma, pode-se perceber que a areia se sobressai nas misturas devido à grande concentração na ADF.

A Tabela 4 apresenta as classificações dos materiais pelo método universal (ASTM D2487, 2017) e rodoviário (ASTM D3282, 2015). A ADF foi classificada como uma areia mal graduada pelo método unificado e pelo método rodoviário como A-2-4, sendo o IG igual a zero. O solo residual de gnaiss foi classificado pelo método unificado como uma argila de baixa compressibilidade (CL) e A-6 pelo método rodoviário, sendo o IG obtido igual a 8. Ainda, foi realizada a classificação unificada para as misturas dos materiais, com o intuito de averiguar o encaixe das partículas nas diferentes proporções da mistura. A mistura 75/25 constituiu um material mal graduado (SP), enquanto a mistura 50/50 um material bem graduado. Esta informação é interessante, pois um material bem graduado tende a apresentar um melhor encaixe entre as partículas, onde as de menor dimensão ocupam os vazios formados pelas de maior dimensão, podendo resultar em menor compressibilidade e maior resistência.

Tabela 4. Classificação pelo método unificado e rodoviário.

Material	CNU	CC	SUCS	HRB	IG
ADF	3,57	1,75	SP	A-2-4	0
Solo residual de gnaiss	-	-	CL	A-6	8
75/25	20,63	5,34	SP	-	-
50/50	41,90	2,20	SW	-	-

Nota: CNU – coeficiente de não uniformidade; CC – coeficiente de curvatura ângulo de atrito interno; SUCS – sistema universal de classificação de solos; HRB – Highway research board; IG – índice de grupo.

3.2. Comportamento geotécnico

A Figura 4 apresenta as curvas de compactação obtidas sob as diferentes energias de compactação.

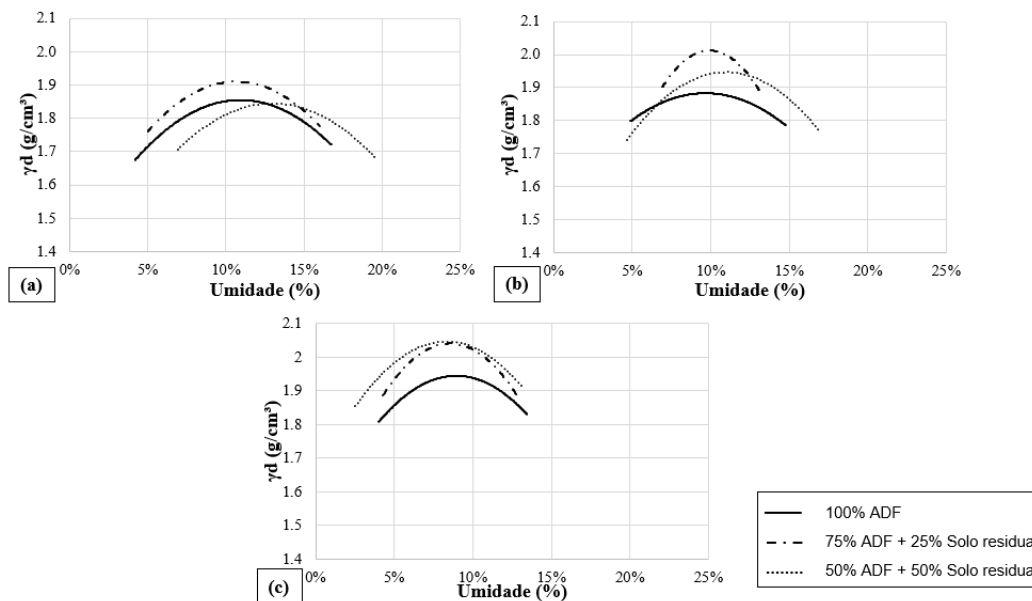


Figura 4. Curvas de compactação energia (a) normal, (b) intermediária e (c) modificada.

Pode-se perceber que a mistura de 75/25 atingiu valores de densidade seca máxima superiores às demais amostras (exceto sob energia modificada). Ainda, é interessante notar que as amostras ensaiadas com 100% ADF tiveram valores inferiores de densidade seca máxima. Um dos motivos é a composição granulométrica mal graduada. Com adição do solo residual de gnaíse, que possui partículas menores em relação a ADF, houve um melhor entrosamento entre os grãos, proporcionando melhor desempenho quando submetido a compactação. Percebe-se que com o aumento da energia, as misturas 75/25 e 50/50 atingiram maiores densidades quando comparadas com a amostra 100% ADF. O fato da mistura 50/50 ser classificada como bem graduada não se refletiu em densidades mais elevadas nas curvas de compactação. A distribuição granulométrica não é o único fator que influencia nas densidades atingidas.

A Figura 5 apresenta as curvas de expansão e CBR obtidas para as três composições ensaiadas.

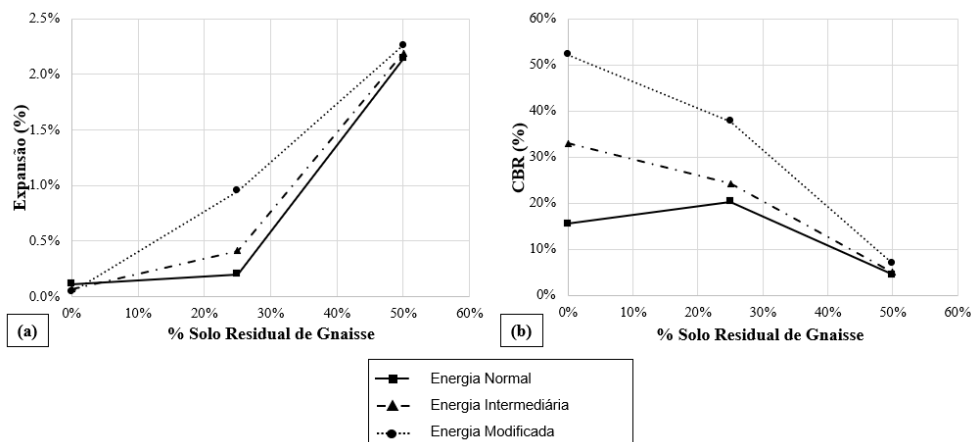


Figura 5. Resultados do ensaio de (a) expansão e (b) CBR

Pode-se perceber que a adição do solo residual de gnaíse causou aumento na expansão do material, já que o solo residual de gnaíse é composto por um maior percentual de finos, além da presença de micas, as quais são identificáveis em uma análise tátil-visual. Os valores de CBR são

claramente influenciados pela energia de compactação utilizada, onde os maiores valores de CBR foram obtidos na energia modificada de compactação. O desempenho da ADF sem adição do solo residual de gnaiss apresentou-se superior ao das misturas compactadas sob energia intermediária e modificada.

Sob todas as energias é possível a aplicação de pelo menos uma das composições ensaiadas na estrutura de pavimentos. A Tabela 5 apresenta um comparativo entre os valores obtidos nos ensaios e os valores mínimos de CBR e expansão determinados pela norma DNIT 139/2010-ES para materiais de sub-base estabilizados granulometricamente.

Tabela 5. Comparativo com os parâmetros do DNIT para sub-base

Material	Energia	Camada para emprego	CBR (%)	Expansão (%)	DNIT (2010)	
					CBR	Expansão
75% ADF + 25% Solo	Normal	Sub-base	20,3	0,20	≥20%	≤ 1%
100% ADF	Intermediária		32,9	0,07		
75% ADF + 25% Solo	Intermediária		24,2	0,41		
100% ADF	Modificada		52,2	0,04		
75% ADF + 25% Solo	Modificada		37,7	0,95		

Nesse sentido, se mostra mais interessante a utilização da ADF pura, visto que apresentou um melhor comportamento comparado com as incorporações do solo residual de gnaiss estudado. Além disso, propicia a utilização de maior volume de ADF, diminuindo os custos da obra e de disposição do resíduo. É possível também a aplicação da ADF em camadas de reforço de subleito, sendo exigido um CBR superior ao solo do subleito e uma expansão menor ou igual a 1%, parâmetros alcançados com a ADF ou com alguma das misturas apresentadas nesta pesquisa.

Os resultados relativos à resistência à compressão simples da ADF compactada estão apresentados na Figura 6.

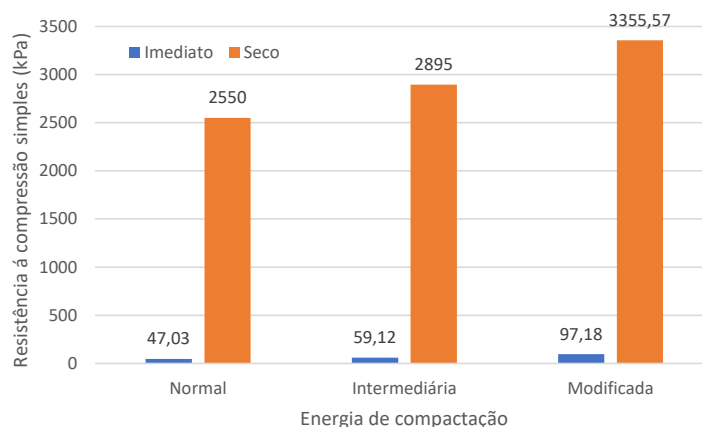


Figura 6. Variação da resistência a compressão simples nas diferentes condições de compactação e umidade

Pode-se perceber que a resistência à compressão aumenta com o aumento do nível de energia utilizada para moldagem dos corpos de prova. Ainda, foi possível verificar o elevado aumento na resistência com a secagem do material. Estes resultados podem ser explicados pelo fenômeno de sucção matricial, que atua confinando a amostra internamente, já que os meniscos promovem ligações entre as partículas. Isso serve de alerta para a influência da sucção sobre a ADF, que é condicionada pelo teor de umidade. Portanto, ensaios em campo ou laboratório em que a saturação do material não é garantida podem causar superestimativas da resistência e rigidez do material.

Os resultados obtidos no ensaio de cisalhamento direto estão apresentados na Figura 7.

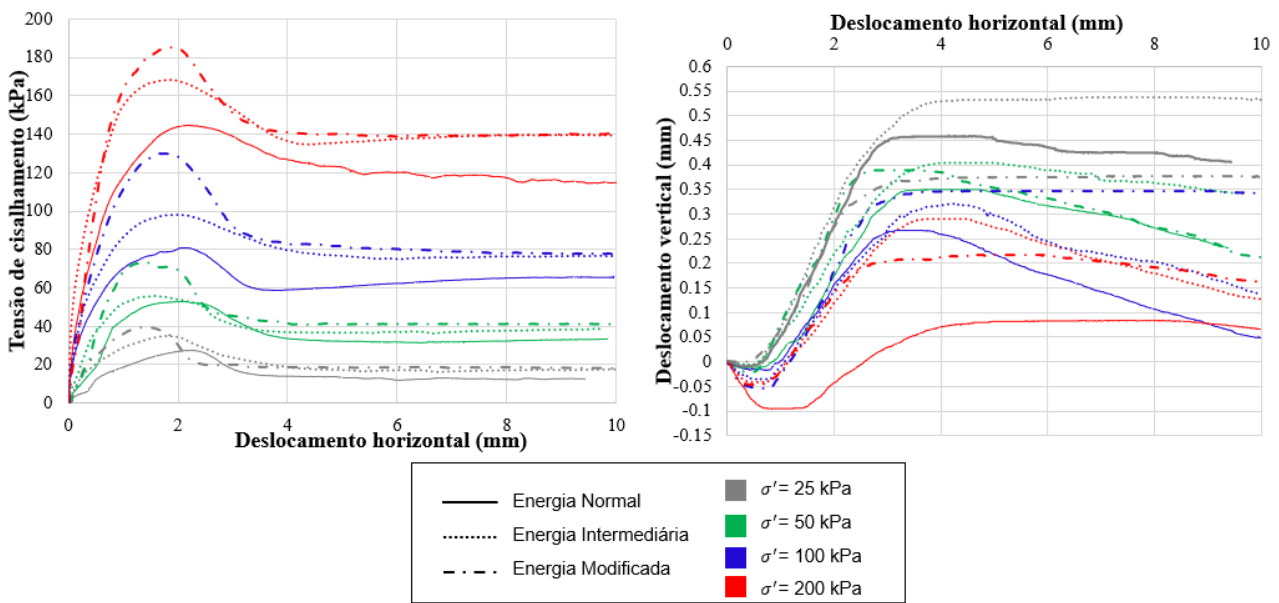


Figura 7. Curvas tensão *versus* deformação e curvas de deslocamento vertical *versus* horizontal

Conforme esperado, já que a compactação conduz a baixos níveis de porosidade, a ADF compactada possui comportamento que pode ser comparado ao de areias densas. Todos os CPs apresentaram picos de resistência ao cisalhamento atrelados à dilatação do material. Estes picos decorrem de uma energia adicional necessária para desencaixar os grãos de solo (que devido à compactação encontravam-se sob baixa porosidade) e permitir o cisalhamento do corpo de prova. Esse desencaixe produz um aumento da altura dos corpos de prova.

A Tabela 6 apresenta o ângulo de atrito (ϕ') e intercepto coesivo (c') obtidos a partir das envoltórias de resistência ao cisalhamento nas condições de pico e pós-pico para as três energias de compactação.

Tabela 6. Ângulos de atrito e interceptos coesivos

Energia	Condição	ϕ' (°)	c' (kPa)
Normal	Pico	32,5	18,0
	Pós-pico	31,0	0,0
Intermediária	Pico	37,0	18,3
	Pós-pico	35,0	0,0
Modificada	Pico	39,2	31,0
	Pós-pico	35,9	0,0

Nota: ϕ' – ângulo de atrito interno; c' – intercepto coesivo.

Pode-se perceber que a energia de compactação aumenta o ângulo de atrito e o intercepto coesivo. No entanto, para a aplicação da ADF em projetos de pavimentação, deve ser considerado que, apesar de se obter um melhor comportamento com maiores energias de compactação, há redução do ângulo de atrito nas situações de pós-pico. Sob energia normal, a diminuição das tensões cisalhantes mobilizadas para deslocamentos além do pico é muito menos significativa.

4. CONCLUSÕES

A ADF estudada possui cerca de 10% de finos, sendo o restante correspondente a partículas do tamanho de areia, classificada como material mal graduado com grãos uniformes.

Os resultados de CBR e expansão mostraram que é mais interessante a utilização da ADF pura, sem incorporação de solo residual, uma vez que sob energia intermediária e modificada os valores de CBR obtidos na ADF pura foram superiores aos medidos nas misturas ADF e solo. Além disso, a adição de solo residual de gnaiss aumentou a expansão, parâmetro limitante para utilização de materiais nas camadas estruturais do pavimento.

Considerando a ADF em estado puro, verificou-se que o aumento na energia de compactação resultou em aumento do ângulo de atrito e resistência à compressão simples. Com o ensaio de RCS foi possível verificar a relevância do fenômeno de sucção nas amostras após secas ao ar.

Com o ensaio de cisalhamento direto foi possível identificar que a ADF possui picos de resistência que são relacionados com o comportamento dilatante de areias densas, o qual advém da compactação. A energia de compactação aumenta a resistência ao cisalhamento de pico. Para grandes deslocamentos as três energias de compactação conduzem a comportamentos bastante similares.

Por fim, os resultados deste trabalho indicaram que a ADF pode ser utilizada para a construção de camadas de pavimento, pois atende aos parâmetros normativos, embora energias de compactação baixas (tipicamente a energia normal) não são interessantes, tendo em vista o CBR relativamente baixo.

Fica ainda um alerta quanto à necessidade de um bom controle de compactação em campo, pois a compactação influencia severamente a resistência do material e a capacidade de suporte.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS. D2487-17. *Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)*. West Conshohocken: ASTM Int., 2017.

AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS. D3080. *Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions*, 9 p. West Conshohocken: ASTM Int., 2017.

AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS. D3282-15. *Standard Practice for Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes*. West Conshohocken: ASTM Int., 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE FUNDIÇÃO – ABIFA (2019). Disponível em: abifa.org.br.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10004. *Resíduos sólidos – classificação*. 71 p. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12025. *Solo-cimento – ensaio de compressão simples de corpos de prova cilíndricos – método de ensaio*. 2 p. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16840. *Solo – determinação do índice de vazios máximo de solos não coesivos*. 12 p. Rio de Janeiro: 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16843. *Solo – determinação do índice de vazios mínimo de solos não coesivos*. 26 p. Rio de Janeiro: 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6459. *Solo – determinação do limite de liquidez*. 5 p. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7180. *Solo – determinação do limite de plasticidade*. 3 p. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7181. *Análise granulométrica*. 12 p. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7182. *Solo - ensaio de compactação*. 10 p. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9895. *Solo - índice de suporte Califórnia - método de ensaio*. 14 p. Rio de Janeiro: 2017.
- BONET, I. I. *Valorização do resíduo de areia de fundição (RAF): incorporação nas massas asfálticas do tipo CBUQ*. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.
- COLLINS, R. J. CIESIELSKI, S. K. *Recycling and use of waste materials and by-products in highway construction*. Washington: National Academy Press, 1994.
- COUTINHO NETO, B. *Avaliação do reaproveitamento de areia de fundição como agregado em misturas asfálticas densas*. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) — Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER-ME 093. *Solos - determinação da densidade real*. 4 p. Rio de Janeiro: DNER, 1994.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 139/2010 - ES. *Pavimentação – Sub-base estabilizada granulometricamente - Especificação de serviço*. 8 p. Rio de Janeiro: DNIT, 2010.
- KLINSKY, L. M. G. *Avaliação do reaproveitamento de areia de fundição residual em camadas de pavimentos*. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.