

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL DE INFRAESTRUTURA

AMANDA REUS

COMPORTAMENTO GEOTÉCNICO DE AREIAS DE FUNDIÇÃO VISANDO
APLICAÇÕES EM PAVIMENTOS

Joinville

2021

AMANDA REUS

COMPORTAMENTO GEOTÉCNICO DE AREIAS DE FUNDIÇÃO VISANDO
APLICAÇÕES EM PAVIMENTOS

Trabalho apresentado como requisito para obtenção do título de bacharel no Curso de Graduação em Engenharia Civil de Infraestrutura do Centro Tecnológico de Joinville da Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador: Dr. Marcelo Heidemann.

Joinville

2021

AMANDA REUS

COMPORTAMENTO GEOTÉCNICO DE AREIAS DE FUNDIÇÃO VISANDO
APLICAÇÕES EM PAVIMENTOS

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil de Infraestrutura, na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Joinville (SC), 06 de maio de 2021.

Banca Examinadora:

Dr. Marcelo Heidemann
Orientador/Presidente
Universidade Federal de Santa Catarina

Dra. Helena Paula Nierwinski
Membra da banca
Universidade Federal de Santa Catarina

Eng. Rodrigo Machado
Membro da banca
Arteris Litoral Sul

Eng. Danieli Veronezi
Membra da banca
Schulz S.A

Dedico este trabalho aos meus queridos pais.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me concedido força, sabedoria e persistência durante a realização deste projeto, e me permitido concluir uma etapa importante em minha vida.

Aos meus pais José e Ana e minha irmã Caroline, por todo o amor, dedicação, paciência e incentivo dedicados durante esses anos de estudo.

Ao meu namorado, Leonardo, por todo o apoio prestado durante o desenvolvimento deste projeto e por estar sempre ao meu lado me incentivando e transmitindo força e tranquilidade.

Aos meus queridos amigos que conheci na faculdade, Augusto, Bianca e Marcela, que ajudaram a tornar a rotina de estudos mais tênue e agradável.

Ao meu orientador professor Dr. Marcelo Heidemann, por toda a paciência, dedicação e sabedoria com que me auxiliou no decorrer do projeto.

A professora Dra. Helena Paula Nierwinski, por ter aceitado o convite para ser membra da banca e por sempre me auxiliar nos estudos e desenvolvimento de pesquisas durante a graduação.

Ao Eng. Rodrigo Machado, por ter aceitado o convite para ser membro da banca e por sempre compartilhar os conhecimentos profissionais.

A Eng. Danieli Veronezi, por ter aceitado o convite para ser membra da banca e por todo apoio no quesito ambiental para o desenvolvimento desta pesquisa.

A empresa fornecedora da areia de fundição, que disponibilizou além do material, ensaios laboratoriais e apoio para a pesquisa deste projeto.

A empresa Haas Engenharia, pelo fornecimento dos dados da obra do acesso ao Centro de Convenções e Exposições Expoville.

A empresa de mineração, que disponibilizou orçamentos de materiais.

“Só há duas maneiras de viver a vida: a primeira é vivê-la como se os milagres não existissem. A segunda é vivê-la como se tudo fosse um milagre” (Albert Einstein).

RESUMO

A geração de areia de fundição (ADF) no Brasil é significativa, sendo produzido mais de 3 milhões de toneladas por ano. Apesar da ADF possuir características interessantes para o emprego na construção civil e apresentar parâmetros que atendem os requisitos ambientais para a reutilização, a inexistência de normas específicas que instruem seu uso dificulta a aplicação. Dentre as possibilidades, está a utilização como substituto de outros agregados em grandes obras, sendo as de infraestrutura atraentes para o emprego da ADF, visto que, em sua maioria, demandam grandes volumes de material. Portanto, o presente trabalho estuda a viabilidade técnica e legal da utilização da ADF em camadas estruturais de pavimento. Para tal, foi realizada uma pesquisa 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 procedimentos experimentais compreendem a análise de fluorescência de raio-X, microscopia eletrônica de varredura, curvas de compactação, expansão, *California Bearing Ratio* (CBR), resistência a compressão simples (RCS), resistência ao cisalhamento e compressão confinada. Os corpos de prova submetidos aos ensaios geomecânicos foram moldados sob três esforços de compactação: normal, intermediário e modificado. A ADF possui cerca de 10% de finos, sendo o restante correspondente a partículas do tamanho de areia, sendo classificada como um material mal graduado. As partículas de quartzo, que compõem a maior parcela da ADF, possuem forma que varia de subangular a arredondada. 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+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 no esforço de compactação resultou em aumento do ângulo de atrito e resistência à compressão simples, ao passo que pouco reduziu sua compressibilidade. Com o ensaio de RCS foi possível verificar a relevância do fenômeno de sucção nas amostras após secas ao ar. Um comparativo de custos em relação a uma obra de pavimentação já executada demonstra que a utilização da ADF se mostra bastante vantajosa do ponto de vista econômico. Ainda, foi realizado o levantamento dos trâmites para obtenção dos critérios e documentos necessários junto aos órgãos responsáveis, visando homologar a utilização da ADF.

Palavras-chave: Areia de Fundição. Comportamento Geotécnico. Infraestrutura.

ABSTRACT

The generation of foundry sand (FS) in Brazil is meaningful, being produced more than 3 millions of tons per year. Although the FS has interesting features for been used in the construction industry and it has parameters which meet the environmental requirements for the reuse, the lack of information related to its geotechnical behavior makes its application difficult. Among the possibilities, it's the use of this subproduct as substitute of other products in big civil projects, being the infrastructure works attractive for the use of this subproduct, since, in the majority, they demand big volumes of materials. Therefore, the present project studies the technical and legal viability of the use of FS in structural layers of pavements. For such, it was performed an experimental research, which included characterization tests and geotechnical behavior of FS and the study with incorporation of a gnaiss residual soil in different proportions. The experimental procedures include the X-ray fluorescence analysis, scanning electron microscopy, compaction curves, expansion, California Bearing Ratio (CBR), unconfined compression resistance, shear resistance and confined compression resistance. The specimens submitted to the geomechanical tests were molded under 3 compaction forces: normal, intermediate and modified. The FS has around 10% of fines, being the remaining 90% sand-sized particles, classified as badly graduated. The quartz particles, which compose the biggest portion of FS, have a shape that can variate from subangular to subrounded. The results of CBR and expansion tests showed that it's more interesting the use of FS pure, with no addition of residual soil, since under intermediate and modified energy the analyzed values of CBR in FS were higher compared to the analyzed values in the blend of FS+soil. Furthermore, the addition of gnaiss residual soil increased the expansion, limiting parameter for the use of materials in the structural layers of pavements. Considering the pure FS, it was verified that the increase of compaction force resulted in an increase of friction angle and unconfined compression resistance, while compressibility was reduced just a little bit. Through the unconfined compression resistance analysis it was possible to verify the relevance of suction phenomenon in the samples after air drying. A cost comparison related to a pavement work already concluded showed that the use of FS is very advantageous from an economic point of view. A survey of the necessary protocols for the acquisition of criteria and documents with the responsible agencies was carried out, in order to homologate the use of FS.

Keywords: Foundry sand. Geotechnical Behavior. Infrastructure.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Vazamento do metal no molde.	19
Figura 2 - Distribuição setorial das vendas em 2019 (%).	21
Figura 3 - Partes de um molde de areia verde	22
Figura 4 - Estrutura de pavimento tipo (a) flexível (b) rígido	29
Figura 5 - Faixas granulométricas	32
Figura 6 - Modelos de curvas de compactação.....	34
Figura 7 - Curvas de compactação com diferentes energias	34
Figura 8 - Relação entre tensões normais e tensões cisalhantes máximas	37
Figura 9 – Conceito do ângulo de atrito	37
Figura 10 - Critérios de ruptura (a) de Coulomb e (b) de Mohr	38
Figura 11 - Critério de ruptura de Mohr-Coulomb.....	39
Figura 12 - Esquema do ensaio de cisalhamento direto	40
Figura 13 - Influência da compactação no comportamento tensão x deformação	41
Figura 14 - Possíveis planos de ruptura para solos fofos e densos.....	41
Figura 15 - Esquema da câmara de ensaio de compressão confinada	42
Figura 16 - Representação usual de resultados do ensaio de compressão confinada	43
Figura 17 - Efeito do esforço de compactação, período de cura e adição de cimento ou cal em (a) q_u e (b) CBR	45
Figura 18 - CBR das misturas solo areia em função do teor de ADF	46
Figura 19 - Expansão obtida no ensaio de CBR das misturas solo areia em função do teor de ADF	47
Figura 20 - ADF e solo residual de gnaiss.....	48
Figura 21 - Etapas do ensaio de determinação da densidade real dos grãos	53
Figura 22 - Etapas do ensaio de compactação	55
Figura 23 - Metodologia do ensaio de compactação	56
Figura 24 - Corpo de prova imerso em água	57
Figura 25 - Molde bipartido	58
Figura 26 - Metodologia do ensaio RCS	59
Figura 27 - Corpos de prova após a imersão em água.....	60
Figura 28 - (a) Corpos de prova e (b) ruptura do corpo de prova.....	61
Figura 29 - Moldagem do corpo de prova para o ensaio de cisalhamento direto.....	62
Figura 30 - Máquina de cisalhamento direto	62

Figura 31 - Preparação e ensaio de compressão confinada	63
Figura 32 - Distribuição granulométrica da ADF e do solo residual de gnaiss	65
Figura 33 - Frações granulométricas da ADF	66
Figura 34 - Carta de plasticidade	68
Figura 35 - Distribuição granulométrica das misturas	69
Figura 36 - Imagens do ensaio MEV da ADF (a) com aproximação de 40 vezes, (b) 65 vezes e (c) 350 vezes	72
Figura 37 - Intensidade <i>versus</i> ângulo de difração	73
Figura 38 - Ensaio de compactação com energia normal	74
Figura 39 - Ensaio de compactação com energia intermediária	74
Figura 40 - Ensaio de compactação com energia modificada	75
Figura 41 - Variação da expansão em função do teor de solo residual de gnaiss	77
Figura 42 – Curvas de CBR de corpos de prova compactados sob energia normal	78
Figura 43 - Curvas de CBR de corpos de prova compactados sob energia intermediária	79
Figura 44 - Curvas CBR de corpos de prova compactados sob energia modificada	80
Figura 45 – Variação da resistência a compressão simples nas diferentes condições de compactação e umidade	83
Figura 46 – Aspecto da superfície de ruptura do corpo de prova em compressão simples	84
Figura 47 - Curvas tensão <i>versus</i> deformação e curvas de deslocamento vertical <i>versus</i> deslocamento horizontal	85
Figura 48 - Envoltórias de resistência para amostra submetida a energia normal de compactação	86
Figura 49 - Envoltórias de resistência para amostra submetida a energia intermediária de compactação	87
Figura 50 - Envoltórias de resistência para amostra submetida a energia modificada de compactação	87
Figura 51 - MEV da superfície de ruptura de um corpo de prova submetido ao ensaio de cisalhamento direto	89
Figura 52 - Curvas obtidas no ensaio de compressão confinada	89
Figura 53 - Obtenção dos coeficientes λ e C_d	90
Figura 54 - Curvas σ_v' <i>versus</i> D	91
Figura 55 - Variação da altura do corpo de prova pelo tempo	92
Figura 56 - Trâmites para obtenção da AuA	93
Figura 57 - Novo requerimento	94

Figura 58 – Modalidades de licenciamento	95
Figura 59 - Pesquisa de atividades	95
Figura 60 - Parâmetro técnico	96
Figura 61 - Tipo de licença.....	96
Figura 62 - Gerar documentos	97
Figura 63 - Lista de documentos digitais a serem enviados	97
Figura 64 - Lista de documentos digitais a serem enviados	98
Figura 65 - Situação do acesso (a) antes e (b) depois das obras.....	99
Figura 66 - Local de contagem de tráfego	100
Figura 67 - Materiais do subleito.....	101
Figura 68 - Camadas do pavimento executado.....	102
Figura 69 - Etapas da pavimentação (a) subleito; (b) execução da camada de reforço do subleito; (c) execução da camada de sub-base; (d) execução da camada de base.....	102
Figura 70 - Localização dos fornecedores e destino.....	103
Figura 71 – Rachão.....	104

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Produção brasileira de fundidos (mil t/ano)	20
Tabela 2 - Resultados do ensaio de compactação.....	44
Tabela 3 - Resumo de parâmetros geotécnicos da ADF na literatura	47
Tabela 4 - Ensaio de caracterização física e química.....	49
Tabela 5 - Resultados dos ensaios de lixiviação e solubilização com ADF e os respectivos valores limites.....	50
Tabela 6 - Ensaio de massa bruta com ADF	51
Tabela 7 - Ensaio de comportamento geotécnico	55
Tabela 8 - Medidas de penetração no ensaio CBR.....	57
Tabela 9 - Índices físicos	65
Tabela 10 – Limites de Atterberg do solo residual de gnaiss	67
Tabela 11 - Composição química da ADF	71
Tabela 12 – Propriedades físicas das amostras com melhor desempenho na compactação.....	76
Tabela 13 - Deslocamento e expansão para as misturas submetidas a energia normal, intermediária e modificada	76
Tabela 14 - Resultados de CBR de corpos de prova compactados sob energia normal.....	78
Tabela 15 - Resultados de CBR em corpos de prova compactados sob energia intermediária	79
Tabela 16 - Resultados de CBR em corpos de prova compactados sob energia modificada ...	80
Tabela 17 – Comparativo com os parâmetros do DNIT para a sub-base	81
Tabela 18 - Resultados do ensaio de RCS.....	82
Tabela 19 - Ângulos de atrito e interceptos coesivos	88
Tabela 20 - Coeficientes de compressão e descompressão	91
Tabela 21 - Contagem de tráfego	100
Tabela 22 - Parâmetros obtidos para os solos do subleito.....	101
Tabela 23 - Informações das camadas executadas	101
Tabela 24 - Distâncias e custo de transporte	104
Tabela 25 - Comparativo de custo para a camada de reforço de subleito e sub-base	108

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABIFA – Associação Brasileira de Fundação
ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM – *American Society for Testing and Mater*
ADF – Areia de Fundação
AuA – Autorização Ambiental
CBR - *California Bearing Ratio*
CNU – Coeficiente de Não Uniformidade
CC – Coeficiente de Curvatura
CDF – Certificado de Destinação Final
DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte
IMA – Instituto de Meio Ambiente
IG – Índice de Grupo
IN – Instruções Normativas
IP – Índice de Plasticidade
ISC - Índice de Suporte Califórnia
LL – Limite de Liquidez
LP – Limite de Plasticidade
MCT – Miniatura Compactado Tropical
MTR – Manifesto de Transporte de Resíduos (MTR)
RCS – Resistência a Compressão Simples
UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

LISTA DE SÍMBOLOS

σ – Tensão normal total

σ' - Tensão normal efetiva

σ'_{vm} - Tensão de pré-adensamento

τ – Tensão cisalhante

u – Poropressão

w – Umidade

S_R – Saturação

γ_d - Densidade seca

γ_n - Densidade natural

γ_s - Densidade natural

q_u : Resistência a Compressão Simples

e – Índice de Vazios

G – Densidade Real dos Grãos

C_c – Coeficiente de compressibilidade

C_d – Coeficiente de descompressão

C_r – Coeficiente de recompressão

C_v – Coeficiente de permeabilidade

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	16
1.1.	OBJETIVOS	18
1.1.1.	Objetivo Geral.....	18
1.1.2.	Objetivos Específicos	18
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1.	INDÚSTRIA DE FUNDIÇÃO	19
2.2.	MOLDAGEM EM AREIA VERDE	21
2.3.	AREIA VERDE DE FUNDIÇÃO	23
2.4.	GERAÇÃO DO RESÍDUO DE AREIA DE FUNDIÇÃO	24
2.5.	REUTILIZAÇÃO DA AREIA DESCARTADA DE FUNDIÇÃO	25
2.5.1.	Panorama do estado de Santa Catarina	27
2.6.	CONCEITOS DE PAVIMENTAÇÃO.....	29
2.6.1.	Reforço do subleito	30
2.6.2.	Sub-base.....	30
2.6.3.	Base	31
2.7.	PROPRIEDADES MECÂNICAS DE INTERESSE PARA MATERIAIS EMPREGADOS NO PAVIMENTO	33
2.7.1.	Ensaio de compactação.....	33
2.7.2.	Expansão e CBR	35
2.7.3.	Resistência à compressão simples (RCS).....	36
2.7.4.	Resistência ao cisalhamento	36
2.7.5.	Compressão confinada	42
2.8.	APLICAÇÃO DA ADF EM CAMADAS ESTRUTURAIS DE PAVIMENTO.....	44
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	48
3.1.	CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA	49
3.1.1.	Ensaio de lixiviação e solubilização	49
3.1.2.	Análise granulométrica	51
3.1.3.	Densidade real dos grãos.....	52
3.1.4.	Limites de Atterberg.....	53
3.1.5.	Índice de vazios máximos e mínimos	54
3.2.	COMPORTAMENTO GEOTÉCNICO	54
3.2.1.	Ensaio de compactação.....	55

3.2.2. Expansão e CBR	56
3.2.3. Resistência à compressão simples.....	58
3.2.4. Resistência ao cisalhamento.....	61
3.2.5. Compressão confinada	63
3.3. LEGISLAÇÃO	63
3.4. ANÁLISE DE CUSTOS.....	64
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	65
4.1. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA	65
4.1.1. Classificação Unificada	66
4.1.2. Sistema rodoviário de classificação	70
4.1.3. Fluorescência de raio-X e MEV	70
4.2. COMPORTAMENTO GEOTÉCNICO	73
4.2.1. Ensaio de Compactação – Proctor	73
4.2.2. Índice de Suporte Califórnia (CBR) e Expansão	76
4.2.3. Resistência à Compressão Simples (RCS)	81
4.2.4. Cisalhamento Direto	84
4.2.5. Compressão confinada unidimensional	89
5. LICENÇAS AMBIENTAIS PARA UTILIZAÇÃO DA ADF	93
6. ANÁLISE DE CUSTOS.....	99
6.1. COMPARATIVO DE CUSTOS	106
7. CONCLUSÃO.....	109
7.1. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS.....	110
REFERÊNCIAS	111

1. INTRODUÇÃO

A construção civil é um setor que vem passando por grande desenvolvimento tecnológico nas últimas décadas. Houve aumento na demanda de recursos naturais utilizados no segmento, despertando o interesse por práticas de construção sustentáveis. O reaproveitamento de materiais é uma alternativa vantajosa, uma vez que colabora com a economia de recursos naturais e reduz a necessidade de aterros sanitários. A areia é um material muito utilizado na construção civil, com diversas aplicações, como na fabricação de concreto, em aterros, na pavimentação e em aplicações geotécnicas, portanto, a substituição dessa matéria-prima por outro material com características semelhantes, promoveria economia e diminuição da emissão de CO₂ (SIDDIQUE, 2018).

Nesse sentido a indústria de fundição também se destaca pelo emprego de grandes quantidades de areia, utilizada como molde para conformação de peças. O molde é composto por uma combinação de materiais cujo objetivo é alcançar características de trabalhabilidade da mistura que compõe a caixa de moldagem (CARNIN et al., 2010). As principais razões da utilização de areias em tais processos são: a disponibilidade, o baixo custo e a resistência a alta pressão e calor do metal fundido (GEDIK; LAV; LAV, 2018). Diferentemente da construção civil, em que a areia é normalmente incorporada aos produtos finais, na indústria da fundição as areias devem ser descartadas depois do uso.

Os subprodutos do processo de fundição podem ser divididos em dois grupos: areias verdes de fundição e areias de macharia. Designa-se areias verdes as que utilizam ligantes a base de argila, no entanto, quando se adiciona ligantes orgânicos, são chamadas de areias ligadas, resinadas ou de macharia (MARIOTTO, 2000 apud COUTINHO NETO, 2004). A moldagem em areia verde é um sistema heterogêneo constituído de um elemento granular refratário, em que geralmente se utiliza areia silicosa e um elemento aglomerante mineral (argila, cimento), ou orgânico (óleos, farinha de cereais, resinas) (KLINSKY, 2013).

As areias de fundição, apesar de serem reaproveitadas diversas vezes no processo produtivo, são o principal resíduo das fundições. Quando as propriedades são afetadas e não atendem às características para compor o molde, esse material necessita ser disposto em aterros sanitários (BONET, 2002). A composição das areias de macharia faz com que, usualmente, sejam separadas das areias verdes e dispostas em aterros sanitários controlados. Já as areias verdes (ADF) não contém fenóis em quantidades representativas, que assim são normalmente

classificadas de acordo com a NBR 10.004 (ABNT, 2004) como resíduo classe II A, portanto, não perigosos e não inertes.

Segundo o relatório da *Federal Highway Administration* (2004), dos seis a dez milhões de toneladas de ADF produzidos anualmente nos Estados Unidos, cerca de 15 a 28% são reutilizados e o restante é disposto em aterros sanitários. Ainda que seja uma parcela pequena, de acordo com a *United States Environmental Protection Agency* (US EPA, 2007), a reutilização de 28% da ADF representa conter a emissão de aproximadamente 20 mil toneladas de CO₂, além da economia de 200 bilhões de BTUs em energia. De acordo com Collins e Ciesielski (1994), cerca de uma tonelada de areia de fundição é necessária para produzir uma tonelada de metal, assim, para direcionar uma considerável parcela de ADF, se fazem necessárias aplicações que demandam alto volume desse material, como aterros rodoviários ou de estruturas de contenção.

A ADF representa um dos resíduos sólidos industriais com maior volume de produção. Somente no Brasil, são geradas cerca de três milhões de toneladas por ano (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE FUNDIÇÃO - ABIFA, 2019). Com cerca de 1200 fundições no país, que empregam diretamente 57 mil pessoas, a fundição movimenta uma grande rede de produção, sendo um importante segmento da economia do Brasil (ABIFA, 2019). A maior parcela é produzida no estado de São Paulo, mas Joinville/SC é responsável por 20% da produção nacional. Ainda conforme a ABIFA, indústrias ligadas à fundição geraram 27% do Produto Interno Bruto (PIB) de Joinville (2016), correspondendo a mais de 17 mil empregos, que representam 24% dos empregos da indústria joinvilense. Até o momento, o uso de ADF em obras é restrito a aplicações pontuais. Existem casos de aplicação já reportados no Rio Grande do Sul e Santa Catarina.

A utilização da ADF ainda é limitada, principalmente devido à existência de poucas normas específicas que instruem seu uso. No entanto, com a criação da Lei estadual nº 17.479, sancionada em 15 de janeiro de 2018, fica autorizada a utilização de ADF classificada como classe II, resíduos não perigosos, conforme NBR 10.004 (ABNT, 2004). Assim, a situação do estado de Santa Catarina se modifica quanto aos trâmites de utilização deste subproduto. A Lei estadual nº 17.479 prevê a aplicação da ADF em outros setores ou produtos, com o intuito de contribuir com o desenvolvimento sustentável. A utilização da ADF, na forma ambientalmente adequada, dá-se como assentamento de tubulações e de artefatos para pavimentação, base, sub-base, reforço de subleito para execução de estradas, rodovias, vias urbanas e para cobertura diária em aterro sanitário. Além disso, prevê a incorporação de ADF na produção de

argamassas, artefatos de concreto e misturas asfálticas. A destinação de ADF prevista na Lei estadual nº 17.479 dependerá da autorização a ser conferida por órgão ambiental competente.

A extração da areia usada para construção civil juntamente com o elevado descarte de areias de fundição em aterros, causam significativos impactos ambientais. É imprescindível o desenvolvimento de pesquisas acerca do comportamento e desempenho desses materiais em obras de infraestrutura, visando servir como referência para construtoras e projetistas, possibilitando, dessa forma, a incorporação da ADF como material de construção.

Considerando os fatos expostos, o presente trabalho visa identificar a viabilidade do uso da areia de fundição como material para execução de camadas estruturais de pavimentos, do ponto de vista técnico e legal. Para isto, será realizada uma pesquisa acerca dos trâmites legais necessários para a utilização da areia de fundição na construção civil, e uma campanha experimental de caracterização físico-química do material e ensaios para avaliação de seu comportamento geotécnico, visando o uso em obras de pavimentação.

1.1. OBJETIVOS

Para resolver a problemática do passivo ambiental gerado pelo subproduto das indústrias de fundição, propõe-se neste trabalho.

1.1.1. Objetivo Geral

Investigar a viabilidade do uso da areia de fundição como material para execução de camadas estruturais de pavimentos, do ponto de vista técnico e legal.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Determinar as propriedades físico-químicas das areias de fundição;
- Investigar o comportamento geotécnico da areia de fundição pura e misturada a um solo residual, por meio de ensaios laboratoriais;
- Verificar os trâmites e documentos necessários, junto aos órgãos responsáveis, para homologar a utilização da areia de fundição;
- Realizar a análise comparativa de custos em relação a uma obra de pavimentação já executada.

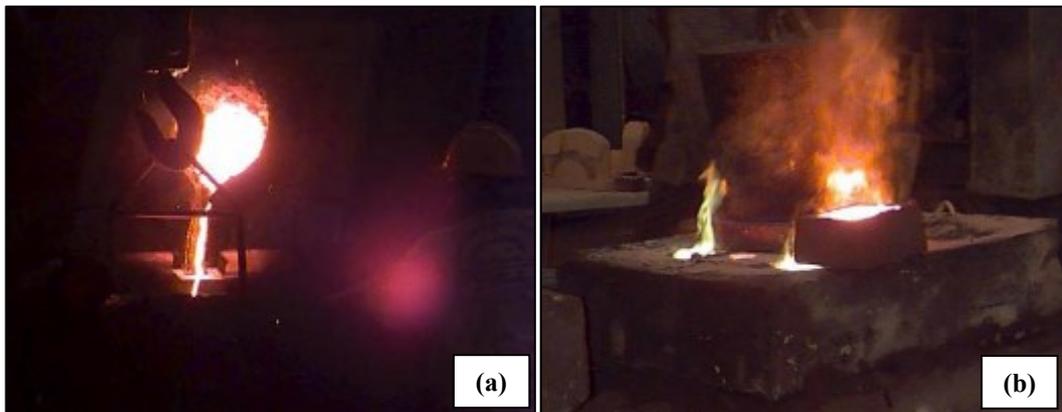
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo abordam-se os processos de fundição e destinação dos excedentes de sua produção, bem como a alternativa para a aplicação técnica e legal das areias de fundição em obras de pavimentação.

2.1. INDÚSTRIA DE FUNDIÇÃO

O processo de fundição tem por objetivo a obtenção de peças por meio do depósito de ligas fundidas, de metais ferrosos ou não ferrosos, em recipientes (moldes) que tem o formato desejado, onde o material é solidificado por resfriamento (ADEGAS, 2007). Os moldes necessitam suportar calor elevado sem alterações significativas nas propriedades (refratariedade) e apresentar a forma em negativo, correspondente ao produto que se pretende obter (COUTINHO NETO, 2004). A Figura 1 (a) apresenta o vazamento do metal no molde e a Figura 1 (b) o molde após o preenchimento.

Figura 1 - Vazamento do metal no molde.



Fonte: Coutinho Neto (2004, p. 9).

As fundições podem ser divididas em duas classes, a depender do metal utilizado, podendo ser classificadas como fundições ferrosas e não-ferrosas. Quando o metal fundido é o ferro ou aço, são classificadas como fundições ferrosas, já quando se trata da fusão de outros metais, como o alumínio, bronze e cobre, denomina-se fundições não-ferrosas (CHELSEA CENTER FOR RECYCLING AND ECONOMIC DEVELOPMENT, UNIVERSITY OF MASSACHUSETTS LOWELL, 2000). As fundições classificadas como ferrosas são as

principais geradoras de areia de fundição (ADF), sendo responsáveis por mais de 90% do total da produção (ALVES, 2012).

De acordo com a ABIFA (2020), a produção brasileira de fundidos aumentou pelo terceiro ano seguido, sendo de 2,28 milhões de toneladas no ano de 2019. O aumento foi de 8,8% em relação ao ano de 2016, 6,5% em relação a 2017 e 0,8% sobre 2018. O ferro fundido se destacou na produção, seguido do aço e dos metais não ferrosos, conforme demonstra a Tabela 1.

Tabela 1 - Produção brasileira de fundidos (mil t/ano)

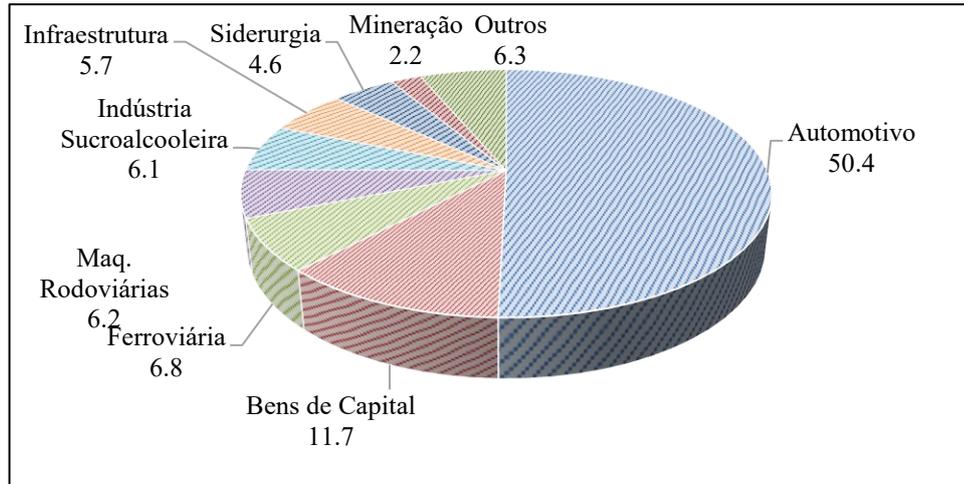
Ano	2019	2018	2017	2016
Ferro	1.838	1.829	1.778	1.774
Aço	259	243	187	164
Não ferrosos	192	199	183	165
Total	2.289	2.272	2.148	2.103

Fonte: Adaptado de ABIFA (2020, p. 1).

O Brasil ocupa a 9ª posição dentre os produtores mundiais de fundidos, com a produção de 2,28 milhões de toneladas no ano de 2018 e com 1200 indústrias de fundição no país (ABIFA, 2019). O segmento emprega aproximadamente 57 mil trabalhadores. No ano de 2018 as indústrias do país faturaram cerca de US\$ 8,4 bilhões (ABIFA, 2019). Já no ano de 2020, de acordo com dados levantados pela ABIFA (2020), a crise devido a pandemia do novo Coronavírus acarretou uma queda na produção brasileira de fundidos de 15,7% entre o mês de janeiro e maio, quando comparado com o mesmo período do ano de 2019.

Do total de fundidos produzidos no Brasil, cerca de 50,4% são destinados a indústria automotiva. As peças produzidas neste setor abastecem fabricantes de componentes automotores, autopeças e as próprias montadoras de automóveis. Outros segmentos que se destacam são as indústrias de bens de capital (11,7%) e ferroviária (6,8%) (ABIFA, 2020). A Figura 2 apresenta um gráfico que demonstra a proporção dos segmentos que o setor de fundição abastece.

Figura 2 - Distribuição setorial das vendas em 2019 (%)



Fonte: Adaptado de ABIFA (2020, p. 1).

A indústria de fundição é popularmente conhecida como um ramo altamente poluidor, muitas vezes por ser confundida com o setor siderúrgico, ou por conta do histórico de décadas anteriores, em que despejavam os poluentes na atmosfera por meio dos fornos de fusão. No entanto, nos dias de hoje, o principal problema deste segmento é a destinação dos resíduos sólidos (BONET, 2002). As fundições podem gerar até quarenta tipos de resíduos sólidos, como areias descartadas de fundição (ADF), poeira de filtros, escórias, lamas de depuração, finos de rebarbação e limpeza, dentre outros. Cerca de 86% dos resíduos gerados correspondem as areias descartadas de fundição (*CHELSEA CENTER FOR RECYCLING AND ECONOMIC DEVELOPMENT, UNIVERSITY OF MASSACHUSETTS LOWELL, 2000*).

2.2. MOLDAGEM EM AREIA VERDE

Os processos de fundição mais conhecidos são: moldagem em areia verde, areia silicato/CO₂, caixa à frio, Pep Set, cura à frio, moldagem em casca (Shell), caixa à quente, cera perdida (microfusão) e molde permanente. Estes processos podem ser utilizados de forma individual ou em combinação (ALVES, 2012). O processo que utiliza os moldes em areia verde é o método mais usual de fundição de metais ferrosos no Brasil. A elevada utilização deve-se por sua simplicidade tecnológica atrelado ao baixo custo (CASOTTI et al., 2011).

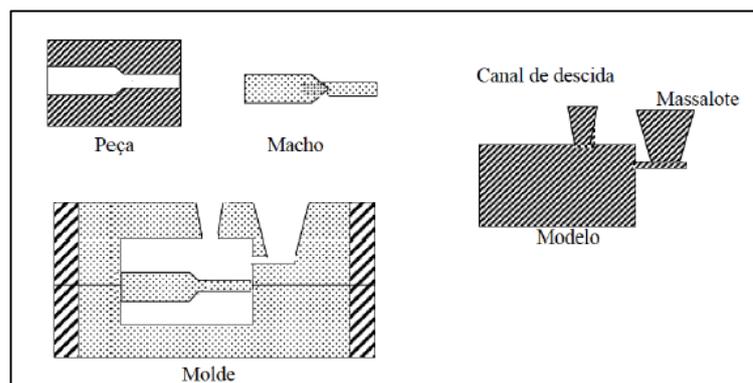
Segundo Klinsky (2013), as características relevantes para a aplicabilidade da ADF são: disponibilidade de recursos naturais, baixo custo de exploração, altamente refratária e quando misturada com argilas, ou outros aditivos, são facilmente associadas. Assim, este projeto é focado apenas no uso de ADF provenientes de moldagem em areias verdes, que

normalmente são classificadas de acordo com a ABNT NBR 10.004 (2004) como resíduo classe II A, portanto, não perigosos e não inertes.

As principais etapas do processo de moldagem em areia verde são: confecção do modelo da peça, confecção do molde, confecção do macho, fechamento do molde, fusão, vazamento, desmoldagem, corte de canais e massalotes, rebarbação e limpeza:

- a. **Modelos:** O modelo corresponde a uma reprodução da peça que será produzida, podendo ser confeccionado em madeira, metal, resinas ou outros materiais (CASOTTI et al., 2011);
- b. **Moldes:** A principal finalidade do molde é proporcionar o formato negativo da peça, uma vez que é o local no qual o fundido é despejado. A areia é o material base que compõe a caixa de moldagem. O modelo pode ser composto de duas partes, uma superior (caixa superior) e outra inferior (caixa inferior) que unidas têm o formato da peça (CASOTTI et al., 2011);
- c. **Machos, massalotes, respiros e canais de vazamento:** Os machos são fabricados quando a peça a ser fundida apresenta detalhes ou cavidades. Assim, coloca-se no interior dos moldes de areia os machos, que devem ser compatíveis com o metal e com o tamanho da peça. Diferente do molde, que é uma peça em areia que delimita a parte externa do produto, o macho é uma peça em areia que delimita as partes internas (vazios). O macho é removido da peça após o vazamento do metal, proporcionando a forma interna desejada. O massalote consiste em um reservatório de metal líquido utilizado para compensar a contração do metal. Ainda, se faz necessário a execução de respiros para a saída do ar e dos gases de combustão da resina de areia, e canais de vazamento, os quais conduzem o metal vazado ao interior do molde (CASOTTI et al., 2011). A Figura 3 apresenta as partes de um molde em areia verde.

Figura 3 - Partes de um molde de areia verde



Fonte: Martins e Almeida (2001, p. 2).

- d. **Fusão:** A fusão tem por objetivo obter o estado líquido do metal por meio da utilização de fornos de fusão (CARNIN, 2008);
- e. **Vazamento:** Consiste no preenchimento do molde com o metal fundido através do sistema de canais que compõe o molde (COUTINHO NETO, 2004). Os massalotes, canais de alimentação alargados, permitem que o metal escorra para a cavidade do molde (CARNIN, 2008). Esta etapa exige um controle rigoroso de temperatura, o metal deve estar entre 100 a 300°C acima da temperatura de solidificação do metal/liga (COUTINHO NETO, 2004);
- f. **Desmoldagem:** Após a solidificação e resfriamento do sistema, a peça é submetida ao processo de desmoldagem, podendo ser de forma manual ou mecânica, sendo então encaminhada para a etapa final, que consiste na limpeza e acabamento do produto (COUTINHO NETO, 2004);
- g. **Limpeza e rebarbação:** Após a desmoldagem, faz-se necessário alguns procedimentos para que as peças estejam prontas para o uso. A limpeza, corte de canais e rebarbas são importantes para finalização da peça (COUTINHO NETO, 2004).

2.3. AREIA VERDE DE FUNDIÇÃO

O material que compõe o molde é denominado areia de fundição, areia de moldagem ou areia verde. A caixa de moldagem é um sistema heterogêneo constituído por 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).

Designa-se areia verde as areias que utilizam ligantes à base de argila. No entanto, quando se adiciona ligantes orgânicos, são chamadas de areias ligadas, resinadas ou de macharia. Os ligantes mais empregados em areias de macharia são as resinas a base de álcool furfúrico e de fenol formaldeído (MARIOTTO, 2000 apud COUTINHO NETO, 2004). Ainda de acordo com Mariotto (2000) apud Coutinho Neto (2004), cerca de 80% dos produtos fundidos são produzidos utilizando areia aglomerada por meio da moldagem em areia verde. A areia aglomerada com argila (areia verde) é utilizada para a construção dos moldes que formam as partes externas da peça a ser fundida. Já para os machos, são utilizadas areias aglomeradas com resinas sintéticas (areias de macharia) (COUTINHO NETO, 2004).

As areias verdes de fundição são constituídas basicamente por areia, pó de carvão, bentonita e água, sendo cerca de 85% a 95% de areia, 7 a 10% de bentonita e 5% de carvão (AMERICAN FOUNDRUMEN'S SOCIETY, 2004 apud GUNEY et al., 2010). Maleabilidade,

compatibilidade, refratariedade, coesão, expansividade volumétrica, permeabilidade, perfeita desmoldagem e resistência a esforços mecânicos como compressão e tração são algumas propriedades que a mistura atribui à areia (CARNIN et al., 2010). A areia é o meio a granel que resiste à elevadas temperaturas, ao passo que a argila une os grãos de areia e a água acrescenta plasticidade a mistura. Os aditivos carbonáceos não permitem a queima da areia na superfície da fundição (SIDDIQUE et al., 2010). As areias denominadas de macharia são utilizadas para executar detalhes, que dificilmente poderiam ser feitos com areias verdes. Estas consistem em 93% a 99% de areia silicosa e 1 a 3% de ligante químico (CLEGG, 1991 apud BEELEY, 2001).

Vale ressaltar que o substantivo “verde” agregado à areia não está relacionado à cor, visto que são de coloração preta pela presença de material carbonáceo, nem à produção mais limpa, mas sim devido à adição de água à mistura, a qual fornece a resistência verde. Este termo consiste na capacidade de um material parcialmente curado ser manuseado - para a remoção do molde - sem sofrer distorções (SIDDIQUE et al., 2010).

2.4. GERAÇÃO DO RESÍDUO DE AREIA DE FUNDIÇÃO

A areia, após o uso repetido, perde características importantes devido à degradação pelo calor, o qual torna as partículas da areia muito finas para uso posterior (CWC, 1995). Assim, uma porção de areia é misturada com novos materiais com o intuito de manter as propriedades necessárias para a fundição, sendo o restante descartado do ciclo como subproduto (SINGH; SIDDIQUE, 2012). Os principais motivos do descarte são a perda de volume e descaracterização dos componentes da mistura. A composição das areias de macharia faz com que estas, usualmente, sejam separadas das areias verdes, e dispostas em aterros sanitários controlados (CARNIN et al., 2010).

Conforme apresentado anteriormente, após o processo de vazamento e resfriamento do metal ocorre a desmoldagem da peça. O material que compõe o molde retorna, por meio de correias transportadoras, ao início do processo para ser reutilizado, no entanto, se faz necessário um tratamento prévio antes da reutilização (LUVIZÃO, 2008). Ao final do processo a areia de fundição encontra-se na forma de torrões, necessitando, desta forma, ser submetida ao processo de destorroamento. O método mais utilizado para tal consiste em sujeitar os torrões a um equipamento vibratório composto de grades superpostas com malhas progressivamente menores. As colisões e a fricção entre o material promovem a desagregação progressiva. Para melhorar o rendimento do equipamento, caso os torrões possuam dimensões grandes, é indicado que sejam submetidos a uma operação prévia de britagem (SCHEUNEMANN, 2005).

As areias de fundição são submetidas à elevadas temperaturas durante o processo de fundição, portanto, alguns componentes da mistura acabam perdendo volume e propriedades coesivas, especialmente a bentonita, sendo necessário repor uma quantidade nova da mistura. Por consequência, a mesma quantidade da mistura inserida é retirada do sistema como subproduto, gerando o resíduo denominado como areia de fundição. A fração da areia a ser reutilizada no processo passa por ajuste de umidade antes de ser adicionada à nova quantidade de mistura. Usualmente, o material a ser reutilizado não passa por processo de regeneração. Por outro lado, os resíduos provenientes das areias de macharia necessitam passar pelo processo de regeneração após o destorroamento para serem reutilizados no processo de fundição (LUVIZÃO, 2008).

De acordo com Casotti et al. (2011) o consumo de areia no processo de fundição depende do tipo de peça produzida, podendo variar de 0,8 a 1 tonelada para cada tonelada de fundido. Cerca de 90% da areia é facilmente reutilizada no processo de produção, já o restante é contaminado e acaba perdendo propriedades ao longo do processo, sendo necessário ser descartada (CASOTTI et al., 2011).

De maneira geral, a maior parte da ADF é classificada como um resíduo não perigoso, Classe II A, de acordo com a NBR 10.004 (ABICHOU et al., 2004). No entanto, mesmo com boas propriedades de engenharia, são na maioria dos casos dispostas em aterros industriais ao invés de reaproveitadas (ABICHOU et al., 2004).

2.5. REUTILIZAÇÃO DA AREIA DESCARTADA DE FUNDIÇÃO

As areias de fundição geradas durante a desmoldagem de peças metálicas e de excedentes do processo são um grande passivo ambiental. As indústrias de fundição encontram problemas ambientais para a disposição deste resíduo por ser classificado como não inerte, e principalmente pelo grande volume de produção, tendo como consequência a necessidade de grandes áreas de aterros (SILVA, 2010).

O melhor panorama das atividades industriais seria a situação em que a transformação da matéria-prima em produto não gerasse resíduos - emissão zero – situação que ocorre em alguns segmentos, no entanto, em pequeno número. Como as tecnologias de emissão zero não contemplam grande parte dos processos produtivos, busca-se por redução dos resíduos gerados. Outra possibilidade é a recuperação e reciclagem dos resíduos para serem utilizados em outros processos ou produtos (BONET, 2002).

Com o intuito de diminuir os custos relacionados à disposição do resíduo de areia de fundição em aterros industriais, as fundições devem buscar um meio para viabilizar a utilização externa desse resíduo. Aplicações como na substituição de parte do agregado fino que compõe o concreto e em obras de pavimentação (BONET, 2002). De acordo com Regan et al. (1997) apud Bonet (2002), mais de 90% de toda a areia de fundição é disposta em aterros sanitários, processo que gera um custo elevado para as empresas. Desse modo, as fundições devem modificar o conceito quanto ao resíduo, buscando transformá-lo em produto.

A areia de fundição representa um dos resíduos sólidos industriais com maior volume de produção, onde apenas no Brasil são geradas cerca de três milhões de toneladas por ano (ABIFA, 2019). Portanto, o reaproveitamento desse resíduo é uma alternativa bastante vantajosa, pois colabora com a economia de recursos naturais e reduz a necessidade de aterros sanitários. Há diversos estudos e pesquisas desenvolvidos para reaproveitar a areia de fundição, uma vez que o resíduo apresenta boas propriedades mecânicas. O principal foco das pesquisas é na utilização na área de engenharia civil, especialmente no segmento da pavimentação.

São necessárias, para direcionar uma considerável parcela de areia de fundição, aplicações que demandem alto volume deste material. As camadas estruturais dos pavimentos demonstram uma boa alternativa para reaproveitamento da areia de fundição em quantidades maiores. Assim, Klinsky e Fabbri (2009), Santos (2015), Yazoghli et al. (2014), entre outros, desenvolveram pesquisas para analisar o reaproveitamento do resíduo em camadas estruturais de pavimentos. De modo geral, os autores demonstraram que a areia de fundição possui propriedades mecânicas adequadas para o emprego na pavimentação, sem riscos de contaminação ao meio ambiente.

A areia de fundição, geralmente, não passa por um tratamento prévio para ser disposta em aterros sanitários. Para a utilização externa, ela deve ser submetida a um tratamento para remoção de restos metálicos e possíveis torrões existentes na mistura. Com o intuito de analisar o efeito da reutilização no meio ambiente, é necessário um estudo ambiental antes da aplicação do resíduo no local, com o objetivo de comparar com os resultados ambientais após o reaproveitamento do material (KLINSKY, 2013).

A variação do metal ou liga, utilizado na moldagem, produz alterações na composição dos excedentes do processo, resultando em um maior ou menor teor de substâncias contaminantes. Essas mudanças podem influenciar na classificação dos resíduos de acordo com a NBR 10.004/2004, e devem ser avaliadas sistematicamente ou sempre que houver alterações no processo de fundição (KLINSKY, 2013).

No Brasil, os resíduos devem ser caracterizados de acordo com a norma NBR 10.004/2004, por meio dos ensaios de solubilização e lixiviação com os critérios impostos pela referida norma. Os resíduos são classificados em dois grupos: classe I (perigosos) e classe II, que é dividida em dois subgrupos, classe II A (não inertes) e classe II B (inertes). Dos resíduos gerados no processo de fundição, é importante diferenciar as areias de moldagem – foco desta pesquisa – das areias de macharia. As areias de moldagem são compostas basicamente por areia, bentonita e pó de carvão, não possuindo potencial de lixiviação de constituintes perigosos ou tóxicos, situação diferente das areias de macharia. Essas, por sua vez, contêm ligantes à base de resinas fenólicas que possuem toxicidade, sendo possível que afete a qualidade do solo e águas subterrâneas (*CHELSEA CENTER FOR RECYCLING AND ECONOMIC DEVELOPMENT, UNIVERSITY OF MASSACHUSETTS LOWELL, 2000*).

2.5.1. Panorama do estado de Santa Catarina

A utilização da ADF no estado de Santa Catarina é regulamentada pela Lei nº 17.479, de 15 de janeiro de 2018, e pelo Decreto nº 1.764, de 18 de outubro de 2018. A Lei prevê a utilização da ADF como insumo ou matéria-prima em processos industriais e obras, como na produção de concreto asfáltico, assentamento de tubulação e artefatos para pavimentação, nas camadas estruturais da pavimentação de estradas, rodovias e vias urbanas e para cobertura diária em aterro sanitário, sendo que as utilizações dependerão de Autorização Ambiental (AuA) específica, que será avaliada por órgão ambiental licenciador.

A legislação estabelece que a ADF seja livre de mistura com material estranho ao processo e seja classificada através da NBR 10.004 (ABNT, 2004), como resíduo de classe II, ou seja, não perigoso. Além disso, são estabelecidos critérios e procedimentos que devem ser adotados pelos geradores dos resíduos e pelo responsável pela utilização da ADF.

Conforme exposto no Decreto nº 1.764 do estado de Santa Catarina, publicado em 18 de outubro de 2018, os geradores do resíduo devem apresentar ao órgão ambiental competente os seguintes documentos para disponibilização da ADF para uso externo:

- Descrever as características técnicas das unidades do gerador, apresentando a descrição em forma de texto e fluxograma do processo produtivo;
- Apresentar os laudos técnicos de caracterização dos resíduos, com características físico-químicas e ecotoxicológicas. Sendo que sempre que houver mudanças no processo produtivo deverão realizar nova classificação;
- A ADF que não atenda os critérios de reutilização, deve ser disposta adequadamente;

- Apresentar o plano de gerenciamento de resíduos, conforme Lei Federal nº 12.305, de 2 de agosto de 2010;
- Os laboratórios responsáveis pelas análises da ADF devem ser reconhecidos pelo Instituto do Meio Ambiente (IMA) quanto aos parâmetros ambientais que fazem parte do estudo;
- A caracterização deve ser realizada com a ADF no local que antecede a destinação, sendo que em caso de resíduos provenientes de processos diferentes, cada um deve ser caracterizado de forma individual;
- A cada seis meses durante o primeiro ano – a partir da AuA -, deve ser realizado a caracterização dos resíduos, sendo que após este período devem ser amostrados anualmente.

O interessado pela utilização da ADF deverá apresentar ao órgão ambiental competente os seguintes documentos:

- Requerimento da AuA e coordenadas geográficas ou plantas da localização do empreendimento;
- Cópia do comprovante de quitação da taxa de licenciamento ambiental;
- Cópia do Cadastro Nacional de Pessoa Jurídica (CNPJ) ou Cadastro de Pessoa Física (CPF);
- Documento formal de aceite e recebimento entre a empresa geradora e a empresa destinadora final;
- Cópia da LAO vigente do destinador final, quando aplicável;
- Projeto de utilização de resíduos, onde as especificações podem ser consultadas na Instrução Normativa (IN) nº 76;
- Anotação de Responsabilidade Técnica (ART) ou de Fundação Técnica (AFT) dos profissionais habilitados para a elaboração do projeto no qual o resíduo será utilizado;
- No caso de utilização da ADF como matéria-prima na fabricação de produtos, deve ser apresentado descrição do processo de utilização.

Vale salientar que a IN nº 76 do IMA, possui detalhes dos documentos necessários para obtenção da AuA, bem como o modelo de requerimento, procuração e de declaração de compromisso de aceite e recebimento.

2.6. CONCEITOS DE PAVIMENTAÇÃO

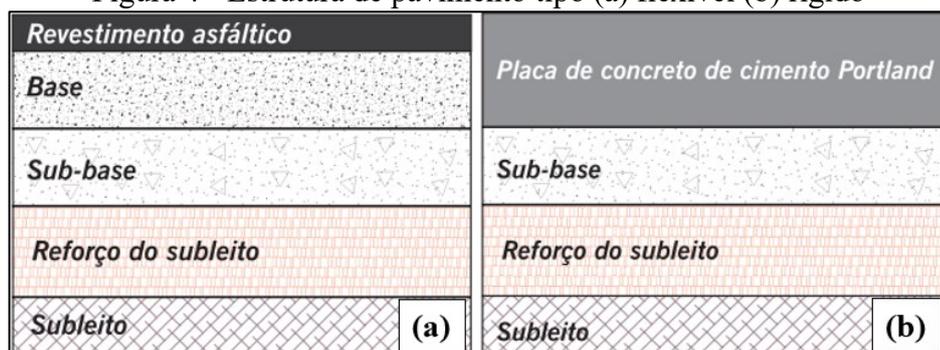
O pavimento consiste em uma estrutura composta por uma ou mais camadas assentes sobre um subleito. O comportamento estrutural está condicionado à interação, rigidez e espessura das camadas, bem como composição do subleito (BERNUCCI et al., 2008). De acordo com o Manual de Pavimentação do DNIT (2006), as estruturas de pavimento são diferenciadas de acordo com a rigidez do conjunto, sendo classificadas em flexíveis, semi-rígidos e rígidos.

Os pavimentos flexíveis possuem como característica a dissipação das tensões entre as camadas em parcelas aproximadamente equivalentes, sendo usualmente relacionados aos pavimentos asfálticos (DNIT, 2006). A Figura 4 (a) apresenta a estrutura de um pavimento flexível, composta superficialmente por uma camada asfáltica, sobre camadas de base, sub-base e reforço de subleito, onde são utilizados materiais granulares, solos ou misturas (BERNUCCI et al., 2008).

Caracteriza-se como pavimento semirrígido uma estrutura formada por uma base cimentada (mistura entre solo e aglutinante cimentício) e revestimento com uma camada asfáltica (DNIT, 2006).

As estruturas rígidas ou pavimentos rígidos, são usualmente relacionados aos revestimentos de concreto em cimento Portland. Caracterizam-se pela elevada rigidez do revestimento em relação às demais camadas, o qual, conseqüentemente, absorve maior parcela das tensões resultantes dos carregamentos (DNIT, 2006). A Figura 4 (b) apresenta a estrutura de um pavimento rígido, composto superficialmente por concreto de cimento Portland, sobre a camada de sub-base (material granular ou material estabilizado com cimento), apoiada sobre o subleito ou reforço de subleito, quando se apresenta baixa capacidade de suporte (BERNUCCI et al., 2008).

Figura 4 - Estrutura de pavimento tipo (a) flexível (b) rígido



Fonte: Bernucci et al. (2008, p. 337-338).

Nos próximos itens serão abordados os parâmetros estabelecidos pelas normas do DNIT, no que tange os materiais e critérios a serem considerados nas camadas estruturais do pavimento (reforço do subleito, sub-base e base).

2.6.1. Reforço do subleito

O reforço de subleito é responsável por resistir e distribuir esforços verticais, servido como camada complementar da sub-base. O reforço se faz necessário quando busca-se reduzir a espessura da camada de sub-base, devido à baixa capacidade de suporte do material que compõe o subleito. O subleito deverá estar devidamente compactado e regularizado para introdução da camada de reforço (SENÇO, 2007).

A norma DNIT 138/2010-ES estabelece os parâmetros dos materiais a serem empregados na camada de reforço do subleito, sendo usualmente utilizado solos ou mistura de solos. Após os ensaios de caracterização física e mecânica dos materiais, de acordo com a norma DNIT 138/2010-ES, estes devem apresentar as seguintes características para serem empregados na camada de sub-base:

- Os materiais devem possuir qualidade superior à do subleito;
- CBR maior ou igual aos indicados no projeto;
- Expansão $\leq 1\%$;
- IG deverá ser no máximo igual ao do subleito apresentado em projeto.

2.6.2. Sub-base

A sub-base corresponde a uma camada de pavimentação que age de forma complementar à camada de base e possui as mesmas funções desta, resistir aos esforços verticais e dissipar as energias às demais camadas subjacentes. Esta camada é introduzida acima da camada de subleito ou reforço de subleito e submetida à devida estabilização granulométrica, com o intuito de obter uma estrutura com propriedades adequadas quanto à estabilidade e durabilidade (SENÇO, 2007).

A norma DNIT 139/2010-ES estabelece os materiais e parâmetros que devem ser empregados na camada de sub-base. Sendo usualmente utilizados solos, mistura de solos, mistura de solos e materiais britados. Após os ensaios de caracterização física e mecânica dos

materiais, de acordo com a norma DNIT 139/2010-ES, estes devem apresentar as seguintes características para serem empregados na camada de sub-base:

- Índice de Grupo (IG) igual a zero;
- A fração retida na peneira n° 10 do ensaio de granulometria deve ser composta por partículas duras, isentas de fragmentos moles, material orgânico ou outras substâncias prejudiciais;
- $\text{CBR} \geq 20\%$;
- $\text{Expansão} \leq 1\%$;
- Os solos lateríticos podem apresentar Índice de Grupo diferente de zero e expansão $> 1\%$, no entanto, o ensaio de expansibilidade deve apresentar um valor inferior a 10%.

2.6.3. Base

A camada de base tem como finalidade resistir aos esforços verticais provenientes da passagem de veículos, dissipando as energias às demais camadas subjacentes (SENÇO, 2007).

A norma DNIT 141/2010-ES estabelece os materiais e parâmetros que devem ser empregados na camada de base. Sendo usualmente utilizado solos, mistura de solos, mistura de solos e materiais britados. Após os ensaios de caracterização física e mecânica dos materiais, de acordo com a norma DNIT 141/2010-ES, devem apresentar as seguintes características para serem empregados na camada de base:

- A composição granulométrica deve satisfazer uma das faixas apresentadas na Figura 5, que relaciona o Número N de tráfego calculado através da metodologia USACE.

Figura 5 - Faixas granulométricas

Tipos	Para $N > 5 \times 10^6$				Para $N < 5 \times 10^6$		Tolerâncias da faixa de projeto
	A	B	C	D	E	F	
	% em peso passando						
2"	100	100	-	-	-	-	± 7
1"	-	75-90	100	100	100	100	± 7
3/8"	30-65	40-75	50-85	60-100	-	-	± 7
N° 4	25-55	30-60	35-65	50-85	55-100	10-100	± 5
N° 10	15-40	20-45	25-50	40-70	40-100	55-100	± 5
N° 40	8-20	15-30	15-30	25-45	20-50	30-70	± 2
N° 200	2-8	5-15	5-15	10-25	6-20	8-25	± 2

Fonte: DNIT 141 (2010).

- A fração passante na peneira n° 40 deve apresentar limite de liquidez $\leq 25\%$ e índice de plasticidade $\leq 6\%$. Sendo que quando esses limites forem ultrapassados, o equivalente de areia deve ser maior que 30%;
- A porcentagem do material que passa na peneira n° 200 não deve ultrapassar 2/3 da porcentagem que passa na peneira n° 40;
- $CBR \geq 60\%$ para Número $N \leq 5 \cdot 10^6$ e expansão $\leq 0,5\%$;
- $CBR \geq 80\%$ para Número $N > 5 \cdot 10^6$ e expansão $\leq 0,5\%$;
- A fração retida na peneira n° 10 do ensaio de granulometria deve ser composta por partículas duras, isentas de fragmentos moles, material orgânico ou outras substâncias prejudiciais;
- Quando submetidos ao ensaio de abrasão Los Angeles (DNER-ME 035/98), não devem apresentar desgaste superior a 55%, sendo que se admitem valores superiores em caso de utilização anterior ter apresentado desempenho satisfatório.

2.7. PROPRIEDADES MECÂNICAS DE INTERESSE PARA MATERIAIS EMPREGADOS NO PAVIMENTO

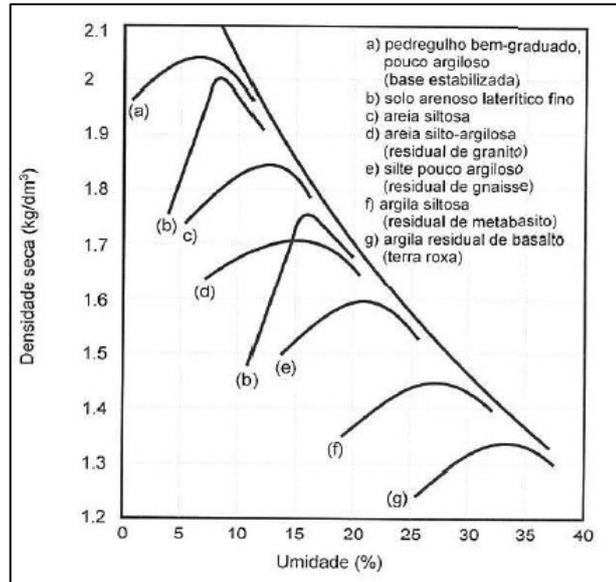
Atualmente o método de dimensionamento de pavimentos flexíveis mais utilizados no Brasil é o método do DNER, que se baseia no ensaio de CBR e expansão, o qual fornece um índice de resistência do material que se pretende aplicar no pavimento (DNIT, 2006). Para execução do ensaio CBR é necessário ter conhecimento da umidade ótima e massa específica seca máxima do material que será submetido ao ensaio, para tanto, se faz necessário o ensaio de compactação. Outros parâmetros importantes para prever o comportamento geotécnico de materiais que irão compor a estrutura de um pavimento são a resistência à compressão simples (RCS), resistência ao cisalhamento (τ) e as curvas obtidas através do ensaio de compressão confinada, a fim de analisar a deformabilidade e rigidez do solo frente à diferentes energias de compactação. Estes parâmetros e os ensaios para obtenção dos mesmos serão abordados nos próximos itens.

2.7.1. Ensaio de compactação

A compactação de um solo tem por objetivo o aumento de densidade por meio de equipamento mecânico, usualmente com utilização de rolo compactador, ou até mesmo soquetes manuais. O ato de compactar o solo aumenta o contato entre os grãos e torna o aterro mais homogêneo. A redução de índice de vazios faz com que diversas propriedades do solo sejam melhoradas, como a redução de futuros recalques, o aumento da rigidez e resistência do solo e redução da permeabilidade (PINTO, 2006).

Pinto (2006) apresenta algumas curvas de compactação típicas (Figura 6), onde os valores indicam uma ordem de grandeza, uma vez que há grande variação de resultados em amostras de mesma procedência.

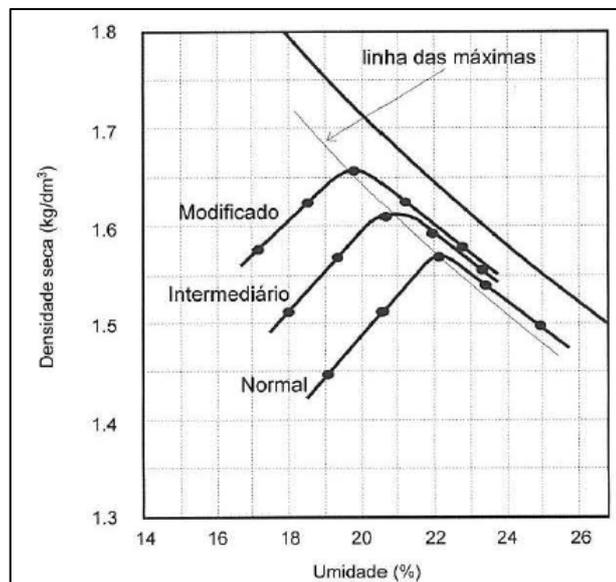
Figura 6 - Modelos de curvas de compactação



Fonte: Pinto (2006, p. 80).

Conforme exposto por Pinto (2006), o aumento da energia utilizada para compactação proporciona maiores densidades secas máximas e menores umidades ótimas. Sendo que o comportamento das curvas com o aumento da energia tende a se deslocar para à esquerda e para cima, conforme apresentado na Figura 7. Isto ocorre, pois, ao transferir maior energia à amostra, as partículas acabam se deslocando com maior facilidade, levando a um melhor arranjo (menor índice de vazios), diminuindo a necessidade de um agente lubrificante (água).

Figura 7 - Curvas de compactação com diferentes energias



Fonte: Pinto (2006, p. 83).

A determinação da energia que será aplicada em campo, leva em consideração o tráfego durante a vida útil do pavimento. Assim, com a definição da energia necessária para compactação do material, é escolhido o porte do maquinário para compactação e o número de passadas necessário. Os equipamentos devem ser escolhidos de acordo com o tipo de solo a ser compactado. Os rolos pé de carneiro são indicados para solos argilosos, pois atingem a parte inferior da camada, evitando a formação de uma placa superficial. Rolos pneumáticos são indicados para vários solos, sendo o peso e a pressão dos pneus regulados para cada situação. Já os rolos vibratórios são usualmente utilizados para solos granulares (PINTO, 2006).

2.7.2. Expansão e CBR

O dimensionamento de estruturas de pavimentos no Brasil, baseia-se principalmente em dois parâmetros mecânicos, obtidos através do ensaio *California Bearing Ratio* (CBR) ou Índice de Suporte Califórnia (ISC) e o Módulo de Resiliência (MR). Neste trabalho será abordado apenas o ensaio de CBR, técnica ainda predominantemente empregada para seleção de materiais para obras de pavimentação no Brasil.

O CBR consiste em uma das metodologias pioneiras utilizadas para avaliação do desempenho de materiais em obras de pavimentação e se fundamenta na determinação da resistência à penetração de um pistão em determinado material saturado e comparação da pressão necessária para produzir a mesma penetração numa brita padronizada (DNIT, 2006). Através de correlações empíricas relaciona-se a capacidade de suporte obtida no ensaio com o desempenho das estruturas, o que culminou em um método de dimensionamento de pavimento, em que dependendo do CBR do subleito é fixada uma espessura mínima necessária da estrutura para limitar tensões e evitar a ruptura (BERNUCCI et al., 2008).

De acordo com a NBR 9895 (ABNT, 2016), antes da execução da penetração para determinação da resistência, o corpo de prova é colocado em imersão por 96h para buscar a condição de saturação. Neste período é possível realizar aferições da expansão do material ensaiado por meio de extensômetro acoplado à estrutura.

Usualmente é definido que a expansão do subleito não ultrapasse 2%, caso isso ocorra, deve-se prever a troca do solo ou estabilização do mesmo. Outra opção seria a colocação de rachão para aumentar o suporte (BERNUCCI et al., 2008). É importante destacar que existe uma tendência de aumento do CBR com a diminuição da expansão axial, no entanto, pelo fato de não se ter uma boa correlação entre o comportamento citado, a expansão independe dos valores de CBR do solo, sendo utilizada como um fator limitante (BERNUCCI et al., 2008).

2.7.3. Resistência à compressão simples (RCS)

O ensaio RCS consiste na aplicação de uma carga axial crescente em um corpo de prova cilíndrico, com o intuito de determinar a resistência à compressão simples sem confinamento lateral. Com a finalização do ensaio, obtém-se a carga que levou à ruptura dos corpos de prova ensaiados e o ângulo da ruptura (BERNUCCI et al., 2008).

Usualmente, este ensaio possui grande aplicabilidade na estabilização de solos com agentes cimentantes, onde são avaliados a resistência do solo em função do percentual de material cimentante inserido (FOPPA, 2015). De acordo com Bernucci et al. (2008), este ensaio é importante para determinar algumas propriedades mecânicas de materiais de base, sub-base ou reforço de subleito. Quando se realiza a ruptura em corpos de provas submetidos à diferentes tempos de cura, é possível fazer o comparativo entre os valores obtidos e conseqüentemente entender o comportamento desse material quando aplicado em campo.

De acordo com Foppa (2015), existem dois modos de ruptura, a ruptura frágil e a dúctil. A ruptura frágil pode ser caracterizada pela queda brusca de resistência após ser atingido a tensão máxima, sendo os planos de rupturas bem definidos. Por outro lado, a ruptura dúctil, não apresenta queda brusca na resistência quando atingida a tensão máxima e não apresenta planos de rupturas bem definidos.

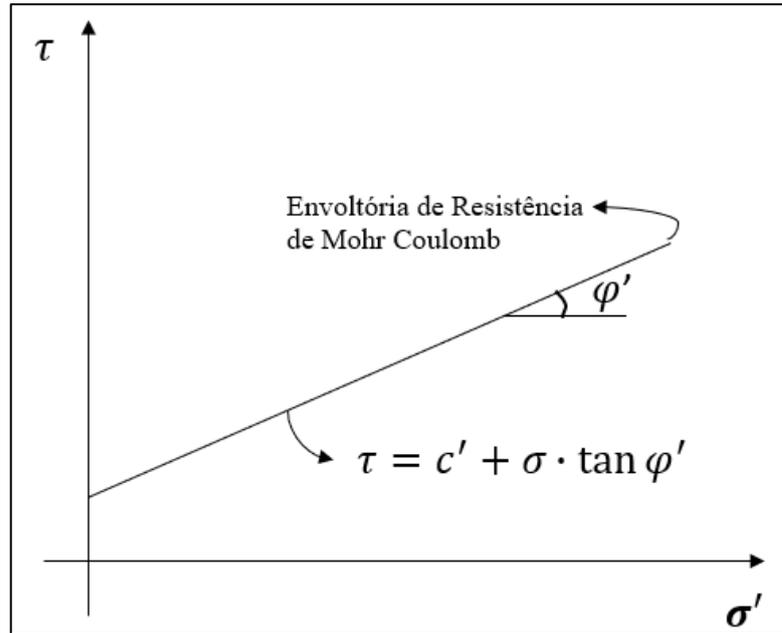
2.7.4. Resistência ao cisalhamento

É de grande relevância o conhecimento da resistência ao cisalhamento dos solos, visto que boa parte dos problemas geotécnicos estão relacionados a este fenômeno. A resistência ao cisalhamento define a capacidade dos solos de suportar cargas e conservar sua estabilidade, sendo que toda massa do solo se rompe quando essa resistência é ultrapassada (SENÇO, 2007).

A resistência ao cisalhamento dos solos é função das tensões normais efetivas, não das tensões totais, portanto, tem-se que: $\tau = f(\sigma')$. As tensões efetivas (σ') correspondem a resistência da parcela sólida do solo, sendo obtida pela diferença entre as tensões normais totais (σ) e poropressões (u) (PINTO, 2006).

O deslizamento entre os grãos do solo caracteriza o fenômeno de cisalhamento, sendo que os principais parâmetros que determinam uma maior ou menor resistência ao cisalhamento, de acordo com a teoria de Coulomb, são o atrito e a coesão, conforme expressa a equação: $\tau = \sigma' \cdot \tan \varphi' + c'$. A Figura 8 apresenta a relação entre as tensões normais e tensões cisalhantes em um ensaio de resistência ao cisalhamento em solo coesivo-friccional (CAPUTO, 1988).

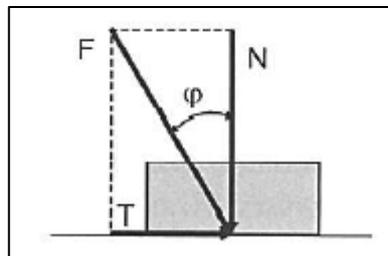
Figura 8 - Relação entre tensões normais e tensões cisalhantes máximas



Fonte: Adaptado de Pinto (2006).

A resistência por atrito de um solo pode ser definida como uma força tangencial necessária para mobilizar o deslizamento entre planos, sendo esta força proporcional à força normal ao plano. O ângulo de atrito (φ') condiz ao ângulo máximo formado entre a força normal e a resultante da normal com a cisalhante, sem que ocorra deslizamento entre as partículas do solo (VIECILI, 2003). O ângulo de atrito corresponde também à inclinação da reta apresentada na Figura 9, sendo que a tangente representa o coeficiente de atrito (PINTO, 2006).

Figura 9 – Conceito do ângulo de atrito



Fonte: Pinto (2006, p. 261).

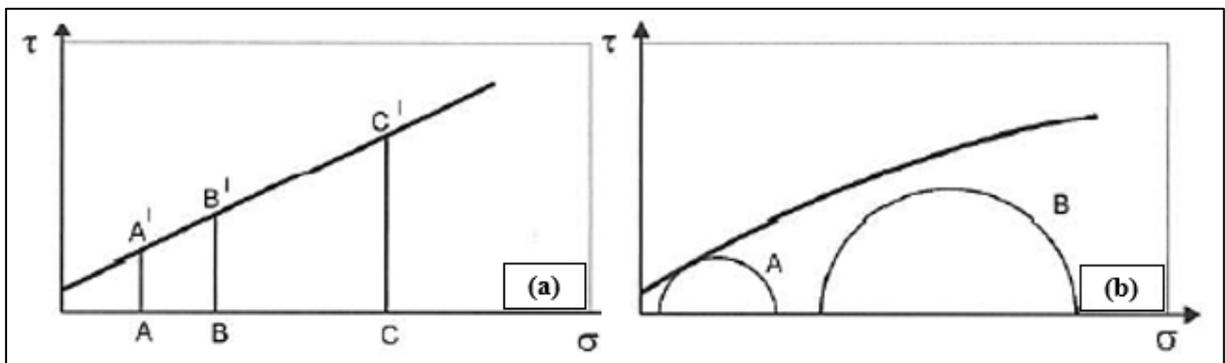
A coesão ou intercepto coesivo (c'), corresponde à parcela da resistência ao cisalhamento que não depende das tensões normais efetivas. Existem dois tipos de coesão, sendo determinadas como coesão verdadeira e aparente. A coesão verdadeira refere-se à atração química entre as partículas, que formam uma espécie de cimentação entre os grãos. Já a coesão

aparente é resultante da pressão capilar da água que se manifesta em solos úmidos, não saturados, sendo que quando o solo é completamente seco ou saturado essa parcela de coesão é nula (CAPUTO, 1988).

De acordo com Pinto (2006), o critério de Mohr é semelhante ao de Coulomb (Figura 10), uma vez que ambos se baseiam no estado de tensões do solo.

O critério de Mohr pode ser expresso como: não há ruptura enquanto o círculo representativo do estado de tensões se encontrar no interior de uma curva, que é a envoltória dos círculos relativos a estados de ruptura, observados experimentalmente para o material (PINTO, 2006, p. 263).

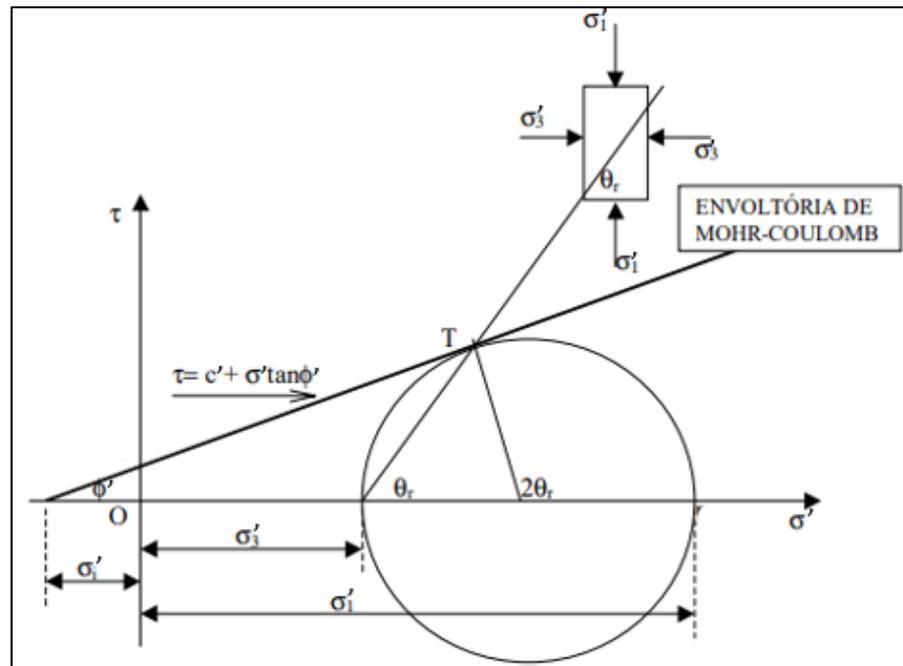
Figura 10 - Critérios de ruptura (a) de Coulomb e (b) de Mohr



Fonte: Adaptado de Pinto (2006, p. 263).

Pelo fato de envoltórias curvas serem de difícil aplicabilidade, as envoltórias de Mohr são usualmente representadas por retas. Assim, o critério utilizado para ambos os métodos fica semelhante e justifica a metodologia Mohr-Coulomb, normalmente utilizado na mecânica dos solos (PINTO, 2006). A Figura 11 representa os parâmetros do critério de ruptura Mohr-Coulomb.

Figura 11 - Critério de ruptura de Morh-Coulomb



Fonte: Adaptado de Bastos (s.d., p. 13).

onde:

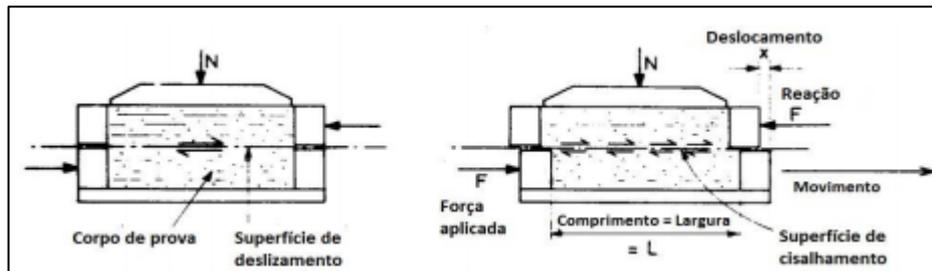
- c' : intercepto coesivo;
- φ' : ângulo de atrito interno;
- θ_r : ângulo formado com o plano de ruptura teórico;
- σ'_i : tensão normal inicial;
- σ'_1 : máxima tensão normal;
- σ'_3 : mínima tensão normal;
- τ : resistência ao cisalhamento do solo.

A resistência ao cisalhamento dos solos é usualmente determinada em laboratório. Existem diferentes técnicas e equipamentos para tal aferimento, sendo que os ensaios mais utilizados são: cisalhamento direto e triaxial. Ambos os ensaios consistem em submeter corpos de prova ao cisalhamento impondo diferentes tensões normais. Com os resultados obtidos, pode-se plotar as tensões de ruptura para cada tensão normal, obtendo-se a envoltória de ruptura e conseqüentemente o ângulo de atrito (φ') e coesão (c') do solo (GERSCOVICH, 2010). Neste trabalho será abordado o ensaio de cisalhamento direto, visto ser o método utilizado na pesquisa.

O ensaio de cisalhamento direto consiste na imposição de um plano de ruptura, coincidente com a separação da caixa de cisalhamento, em um corpo de prova. Para execução

do ensaio, é moldada uma amostra do material e colocada dentro de uma caixa de cisalhamento bipartida horizontalmente (GERSCOVICH, 2010). O ensaio caracteriza-se pela aplicação de uma força horizontal crescente que faz com que uma porção de solo deslize sobre a outra, ao passo que uma força constante, normal ao plano de ruptura, é aplicada ao conjunto (SOUZA, 2015).

Figura 12 - Esquema do ensaio de cisalhamento direto

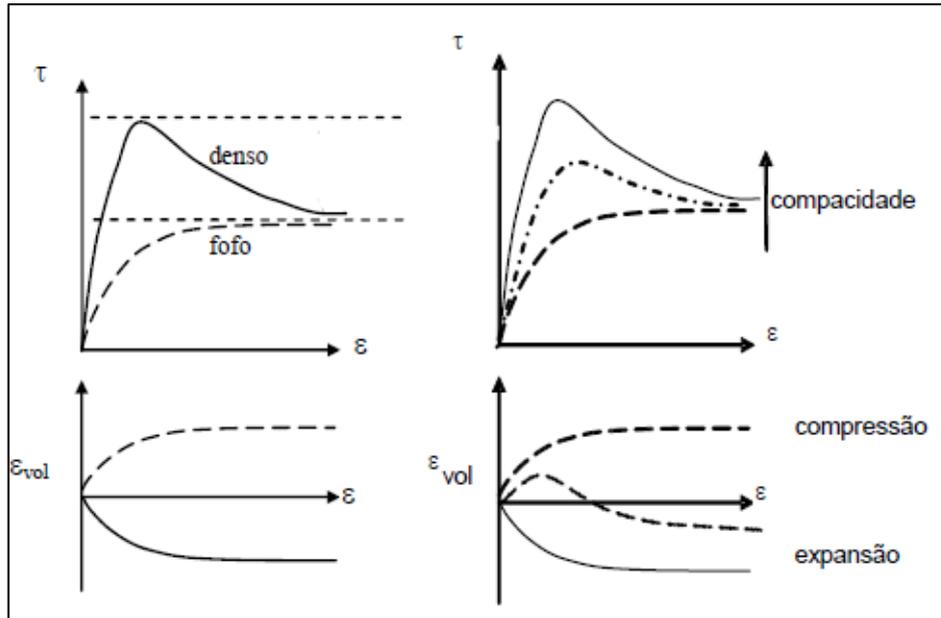


Fonte: Head (1994) apud Souza (2015, p. 15).

Durante o ensaio de cisalhamento, são medidos o deslocamento horizontal e a força cisalhante aplicada, para que a curva tensão por deslocamento seja obtida. Ainda, as deformações axiais também são aferidas, permitindo a verificação das variações volumétricas do solo durante o ensaio (HEAD, 1994). A velocidade do ensaio deve assegurar uma condição drenada de carregamento, sendo assim, a velocidade depende do coeficiente de adensamento (c_v), o qual indica as características de permeabilidade e compressibilidade do solo. Em areias, foi verificado que bons resultados foram obtidos com uma velocidade entre 0,15 mm e 2 mm por minuto (LAMBE, 1951 apud GERSCOVICH, 2010).

A Figura 13 apresenta modelos de resultados variando de acordo com a compacidade do material. Pode-se perceber que em solos fofos, há uma redução volumétrica com o cisalhamento, por outro lado, nos solos densos é possível verificar um estágio de compressão e expansão, fenômeno conhecido como dilatância (GERSCOVICH, 2010).

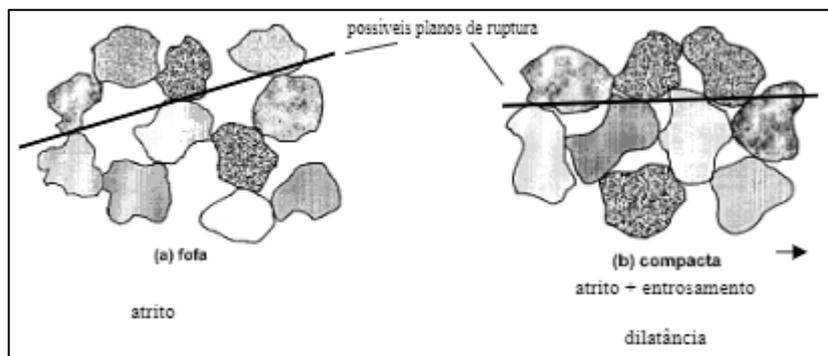
Figura 13 - Influência da compactidade no comportamento tensão x deformação



Fonte: GERSCOVICH (2010, p. 20).

O pico de resistência e a dilatância de solos densos podem ser explicados pelo imbricamento dos grãos. Este entrosamento representa um componente adicional de resistência, sendo que para ocorrer o cisalhamento é necessário que os grãos se desencaixem, fazendo com que ocorra um aumento de volume (dilatância) e deslizamento das partículas (GERSCOVICH, 2010). A Figura 14 apresenta possíveis planos de ruptura para solos fofos e densos.

Figura 14 - Possíveis planos de ruptura para solos fofos e densos



Fonte: BASTOS (s.d., p. 25)

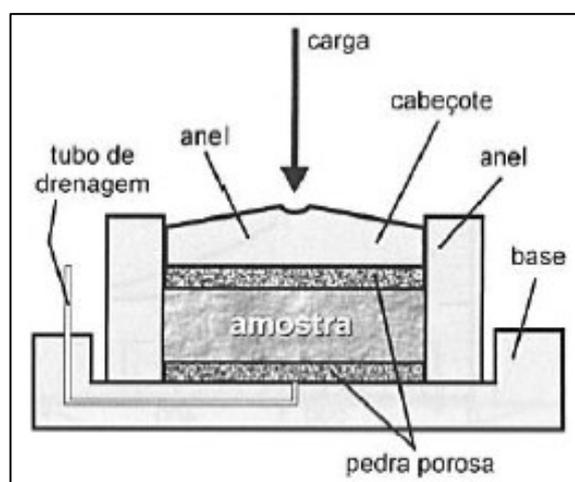
2.7.5. Compressão confinada

O ensaio de compressão confinada consiste em submeter a amostra a um carregamento vertical crescente com deformação radial nula. Este ensaio é usualmente utilizado no estudo de solos moles compressíveis, sendo que neste caso é denominado como ensaio de adensamento (HEIDEMANN, 2015). O ensaio permite a obtenção de alguns parâmetros como: tensão de pré-adensamento (σ'_{vm}), coeficiente de recompressão (C_r), compressão (C_c), descompressão (C_d) e adensamento (C_v). Vale salientar que estes parâmetros são obtidos para solos suscetíveis ao processo de adensamento propriamente dito (CAPUTO, 1988).

Em solos com partículas do tamanho de areia e pedregulho, o processo de compressão é bem diferente de solos com granulação fina. As deformações ocorrem de maneira muito rápida, sendo consideradas apenas como um ajuste de posição das partículas do solo (CAPUTO, 1988). Sendo assim, os parâmetros obtidos através do ensaio são ditos virtuais. Estes parâmetros não são recomendados para utilização em projeto ou para auxiliar em modelos de cálculo, servindo apenas como indicativo do comportamento do material quanto à deformabilidade (HEIDEMANN, 2015).

Após a moldagem do corpo de prova, o conjunto é levado à prensa para aplicação das cargas axiais (Figura 15). O carregamento é realizado em etapas e são aferidas as deformações em diferentes intervalos de tempo. Com os resultados do ensaio, é possível representar a variação de altura do corpo de prova em relação às tensões verticais atuantes. A forma convencional para apresentar os resultados é através das curvas de índice de vazios em função da tensão aplicada (PINTO, 2006).

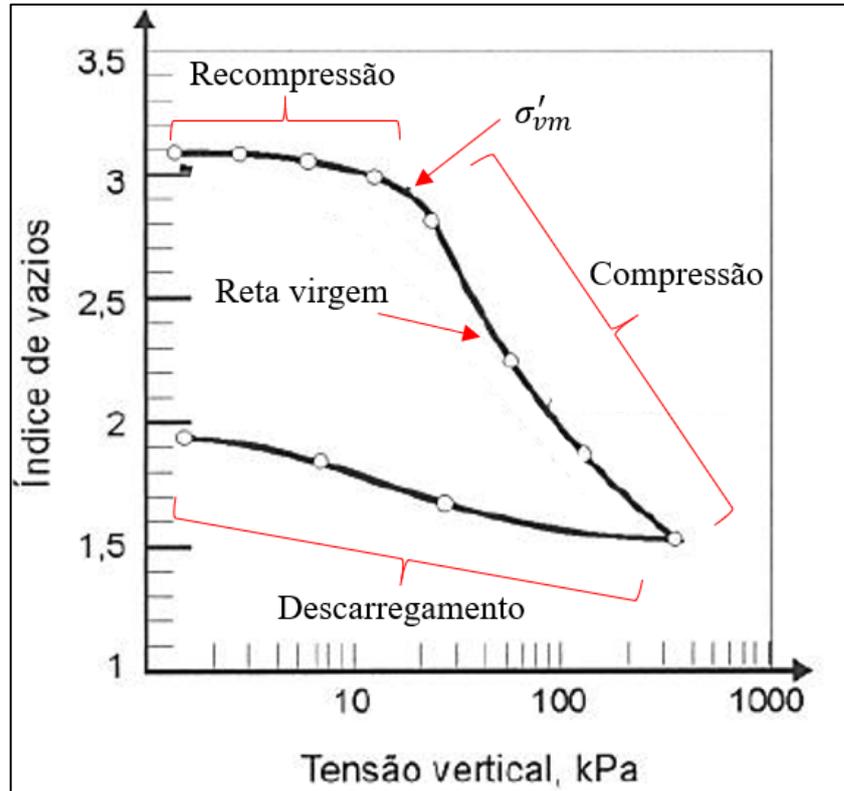
Figura 15 - Esquema da câmara de ensaio de compressão confinada



Fonte: Pinto (2006, p. 185).

A Figura 16 apresenta um resultado do ensaio de compressão confinada com a indicação dos trechos que a compõe para os cálculos dos coeficientes angulares.

Figura 16 - Representação usual de resultados do ensaio de compressão confinada



Fonte: Adaptado de Pinto (2006, p. 230).

Com os dados dos ensaios de compressão confinada também é possível determinar a variação volumétrica relativa (ε), o coeficiente de variação volumétrica (m_v), coeficiente de compressibilidade (a_v) e o módulo de compressão edométrico (D) (PINTO, 2006). Abaixo seguem as definições dos parâmetros de acordo com Pinto (2006):

- ε : expressa a variação volumétrica em relação à altura inicial do corpo de prova, podendo ser calculada através da Equação (1);

$$\varepsilon = \frac{h_f - h_i}{h_i} \quad (1)$$

- m_v : define a variação volumétrica específica do solo, podendo ser calculado através da Equação (2);

$$m_v = \frac{\varepsilon_f - \varepsilon_i}{\sigma_f - \sigma_i} \quad (2)$$

- a_v : indica a compressibilidade de um solo, podendo ser calculado através da Equação (3);

$$a_v = \frac{1 + e_i}{m_v} \quad (3)$$

- D : é inverso ao coeficiente de variação volumétrica, sendo assim, aumenta à medida que o índice de vazios diminui, podendo ser calculado através da Equação (4).

$$D = \frac{1}{m_v} \quad (4)$$

2.8. APLICAÇÃO DA ADF EM CAMADAS ESTRUTURAIS DE PAVIMENTO

A ADF possui propriedades de engenharia interessantes para aplicação em camadas de sub-base, promovendo uma alternativa econômica e sustentável (KLEVEN et al., 2000). Guney et al (2005) testaram a ADF com adições de outros materiais para compor a sub-base de rodovias. Foram feitas adições com cimento, cal e brita graduada, sendo que o estudo incluiu testes de RCS e CBR, bem com análises de microscopia eletrônica de varredura (MEV). Foram realizados ensaios de compactação na energia normal e modificada, para a ADF, misturas e materiais de referência de base e sub-base usualmente utilizados na Turquia. A Tabela 2 apresenta os valores obtidos no ensaio de compactação para a ADF e os materiais de referência.

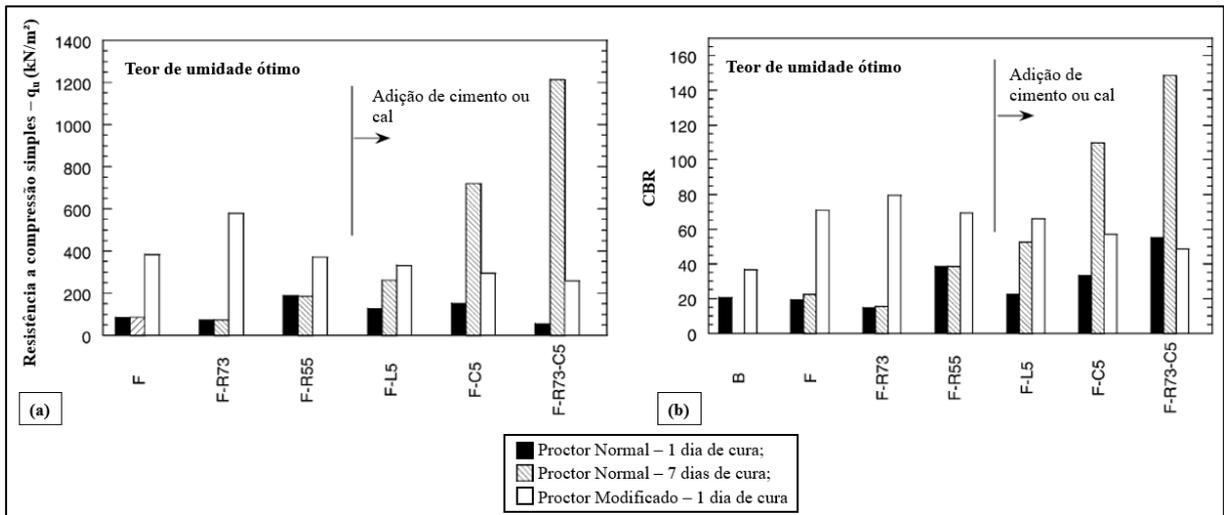
Tabela 2 - Resultados do ensaio de compactação

Material	Energia	$\gamma_{d,máx}$ (g/cm ³)	Wótima (%)
ADF	Normal	1,70	12,3
ADF	Modificada	1,88	9,0
Referência sub-base	Normal	2,22	8,3
Referência sub-base	Modificada	2,32	6,5
Referência base	Normal	2,08	7,0
Referência base	Modificada	2,19	6,0

Fonte: Adaptado de Guney et al. (2005, p. 935).

Ainda, Guney et al. (2005) avaliaram os efeitos das energias de compactação na resistência à compressão simples (q_u) e CBR, conforme apresentado na Figura 17 (a) e (b), respectivamente.

Figura 17 - Efeito do esforço de compactação, período de cura e adição de cimento ou cal em (a) q_u e (b) CBR



Fonte: Adaptado de Guney et al. (2005, p. 937). (F - ADF; B - material de referência da sub-base; R 55 e R73 - amostras com 55% e 73% de brita graduada, respectivamente; L5 e C5 - amostras com 5% de cal e cimento, respectivamente).

Os resultados obtidos provaram que nos testes de RCS, as misturas a base de ADF, dependem expressivamente da energia de compactação em que as amostras foram moldadas, uma vez que resultados favoráveis foram obtidos com maior esforço de compactação. Neste estudo, ainda foi concluído que a espessura da sub-base foi inferior quando utilizada a ADF no lugar de materiais de referência. Portanto, Guney et al. (2005) concluíram que a ADF atende os limites geomecânicos e pode ser utilizada com segurança na engenharia, tornando-se uma alternativa econômica para compor o material de sub-base de rodovias.

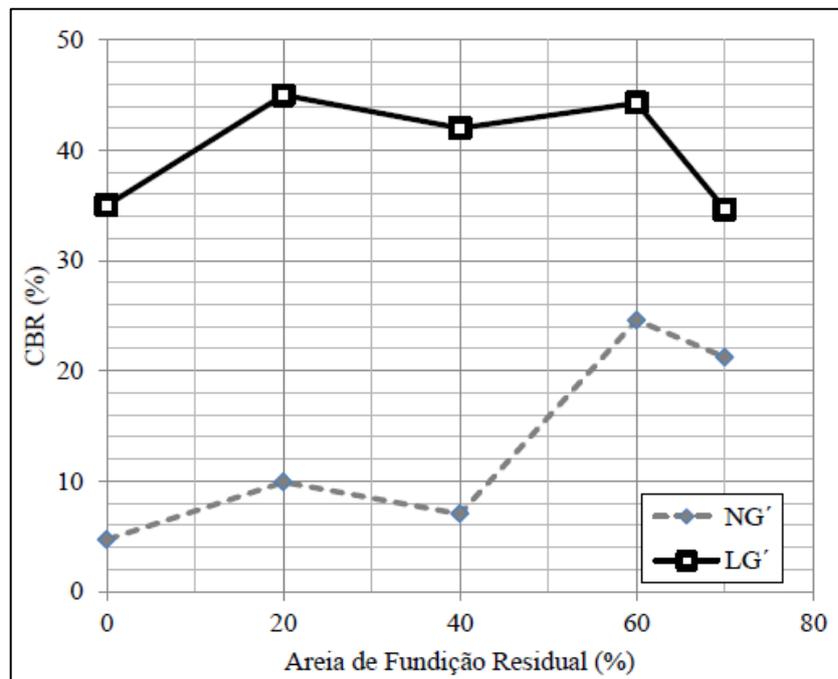
Kleven et al. (2000) conduziram um estudo sobre 13 diferentes tipos de ADF e uma amostra de areia natural, tendo como objetivo a aplicação da ADF nas camadas de sub-base. Foi realizada uma campanha experimental nas amostras, com determinação de CBR, resistência à compressão (q_u) e MR. Foi concluído que a maior parte das amostras investigadas no estudo, possuía MR maiores do que os típicos materiais granulares usualmente utilizados como sub-base de rodovias. No entanto, os autores alertam quanto ao percentual de finos nas amostras e a importância da análise da ADF que será reutilizada, uma vez que os finos promovem alterações no comportamento do material.

Klinsky (2013) avaliou a reutilização da ADF associada a solos e agentes estabilizantes em camadas de base e sub-base de pavimentos com baixo volume de tráfego. O autor concluiu que solos lateríticos argilosos, classificados como LG' (classificação MCT), com adição de 60%

a 70% em massa de ADF atenderam aos requisitos determinados pelo Manual de Normas de Pavimentação do DER-SP (1991) para serem utilizados como camadas de base de pavimentos. Além disso, o solo com 20% de ADF ou mais e misturas entre solos não lateríticos argilosos, classificado como NG', com 60% e 70% de ADF, podem ser utilizados na construção de sub-base de pavimentos.

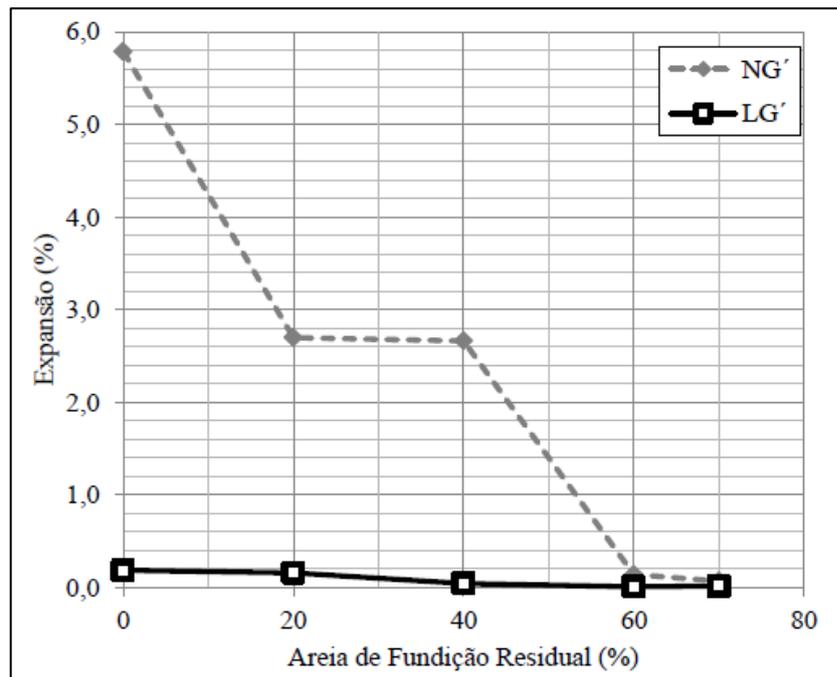
A Figura 18 e a Figura 19 apresentam os resultados de CBR e expansão obtidos em diferentes percentuais de ADF testados na pesquisa de Klinsky (2013). Pode-se perceber que a adição de ADF influenciou mais expressivamente nos resultados do NG', onde quanto maior o teor de ADF maiores valores de CBR e menores os níveis de expansão.

Figura 18 - CBR das misturas solo areia em função do teor de ADF



Fonte: Klinsky (2013, p. 120).

Figura 19 - Expansão obtida no ensaio de CBR das misturas solo areia em função do teor de ADF



Fonte: Klinsky (2013, p. 121).

Heidemann et al. (2021) estudaram a influência da umidade na sucção matricial da ADF, medidas através da técnica do papel filtro. Foram obtidos níveis de sucção de 100 a 200 kPa para amostras no teor de umidade ótima sob energia normal de compactação. Com teores de umidade abaixo de 5% os níveis de sucção atingiram valores superiores a 50.000 kPa. Já quando o material foi saturado a sucção tendeu a zero.

Um resumo com alguns parâmetros geotécnicos da ADF encontrados na literatura é apresentado na Tabela 3. Vale salientar que os valores são referentes a ensaios executados em corpos de prova compactados sob energia normal.

Tabela 3 - Resumo de parâmetros geotécnicos da ADF na literatura

Autor (a)	% finos	G	Wótima (%)	$\gamma_{d,máx}$ (g/cm ³)	φ' (°)	c' (kPa)
Goodhue et al. (2001)	2,4 - 19	2,51 - 2,73	9,6 - 15,0	1,72 - 1,88	39 - 43	17 - 28
Kumar et al. (2014)	12	2,62	16,0	1,67	31,1	8,6
Yin et al. (2018)	10,8	2,53 - 2,57	12,0	1,82	-	-

Fonte: Autora (2021).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A definição de método para Aragão e Mendes Neta (2017) consiste em etapas sequenciais para investigação de uma verdade acerca de um determinado tema, tendo em vista alguma intenção. Logo, este capítulo aborda as etapas elencadas para se obter os objetivos do estudo. Os procedimentos relacionados podem ser divididos de acordo com sua finalidade. Dessa forma, foram estabelecidas quatro vertentes que embasam a pesquisa: caracterização físico-química, comportamento geotécnico, legislação e análise de custos. Aspectos ligados à legislação serão apresentados no capítulo 5 e a análise de custos no capítulo 6.

Os materiais utilizados nesta pesquisa são a areia de fundição (ADF), proveniente de uma indústria de fundição de ferro localizada no município de Joinville/SC. Este material tem coloração escura e textura arenosa, com finos aderidos às partículas de areia. O outro material ensaiado foi o solo residual de gnaiss extraído de uma jazida interna ao Perini Business Park. Este material costuma ser empregado como material de empréstimo em obras internas ao condomínio. A Figura 20 apresenta os materiais utilizados na pesquisa, sendo a ADF apresentada do lado esquerdo e o solo residual de gnaiss do lado direito.

Figura 20 - ADF e solo residual de gnaiss



Fonte: Autora (2020).

A caracterização dos solos estudados, em sua maioria, foi realizada no Laboratório de Mecânica dos solos da UFSC, campus Joinville. Os ensaios realizados serão descritos a seguir, bem como as respectivas normas que foram seguidas para preparação das amostras e execução dos experimentos.

3.1. CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA

As características físico-químicas da areia de fundição e do solo residual de gnaiss são imprescindíveis para sustentar e compreender qualquer hipótese sobre seu comportamento. Portanto, foi realizada uma campanha experimental para caracterizar os materiais. Os ensaios previstos estão descritos na Tabela 4, de acordo com sua finalidade e norma vigente.

Tabela 4 - Ensaios de caracterização física e química

Material	Ensaio	Norma
ADF	Lixiviação	NBR 10005 (ABNT, 2004)
ADF	Solubilização	NBR 10006 (ABNT, 2004)
ADF e solo residual de gnaiss	Análise granulométrica	NBR 7181 (ABNT, 2016)
ADF e solo residual de gnaiss	Densidade real dos grãos	ME 093 (DNER, 1994)
Solo residual de gnaiss	Limites de Liquidez	NBR 6459 (ABNT, 2016)
Solo residual de gnaiss	Limites de Plasticidade	NBR 7180 (ABNT, 2016)
ADF	Índice de vazios máximo	NBR 16840 (ABNT, 2020)
ADF	Índice de vazios mínimo	NBR 16843 (ABNT, 2020)
ADF	Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	-
ADF	Fluorescência de raio-X	-

Fonte: Autora (2021).

3.1.1. Ensaios de lixiviação e solubilização

Os ensaios de lixiviação são baseados na norma NBR 10005 (ABNT, 2004) e tem por objetivo determinar a capacidade de transferência de substâncias orgânicas e inorgânicas presentes no resíduo sólido, por meio de dissolução no meio extrator. Já os ensaios de solubilização são baseados na norma NBR 10006 (ABNT, 2004) e tem por objetivo obter o extrato solubilizado de resíduos sólidos, visando diferenciar os resíduos classificados na NBR 10004 (ABNT, 2004) como classe II A e classe II B.

A empresa fornecedora de ADF disponibilizou os dados dos testes de lixiviação e solubilização da ADF. Na Tabela 5 são apresentados os valores obtidos nos ensaios e os valores limites estabelecidos na NBR 10004 (ABNT, 2004).

Tabela 5 - Resultados dos ensaios de lixiviação e solubilização com ADF e os respectivos valores limites

Elementos	Ensaio de lixiviação		Ensaio de Solubilização	
	Concentração (mg/L)	Valores limites (mg/L)	Concentração (mg/L)	Valores limites (mg/L)
Alumínio	-	-	154	0,2
Arsênio	< 0,01	0,01	< 0,01	0,01
Bário	1,65	70,0	1,15	0,7
Cádmio	< 0,001	0,5	< 0,001	0,005
Chumbo	0,0430	1,0	0,0570	0,01
Cianeto	-	-	< 0,05	0,07
Cloreto	-	-	43,9	250,0
Cobre	-	-	0,126	2,0
Cromo	0,0680	5,0	0,130	0,05
Fenóis totais	-	-	0,40	0,01
Ferro	-	-	99,0	0,3
Fluoreto	< 0,1	150,0	< 0,1	1,5
Manganês	-	-	1,05	0,1
Mercúrio	0,00039	0,1	0,00030	0,001
Piridina	< 2,5	5,0	-	-
Prata	< 0,01	5,0	< 0,01	0,05
Selênio	< 0,008	1,0	< 0,008	0,01
Sódio	-	-	143	200,0
Sulfato	-	-	140	250,0
Surfactante	-	-	< 0,1	0,5
Zinco	-	-	0,569	5,0

Fonte: Relatório interno da empresa fornecedora da ADF.

Pode-se perceber que os parâmetros do lixiviado satisfazem os limites permitidos. Por outro lado, alguns parâmetros do solubilizado ultrapassam os máximos permitidos, nos elementos: alumínio, bário, chumbo, cromo, índice de fenóis, ferro e manganês, o que não permite o material ser denominado como inerte.

Ainda, foram fornecidos os parâmetros para massa bruta, conforme apresentado na Tabela 6, e comparados com os valores limites estabelecidos na NBR 10004 (ABNT, 2004).

Tabela 6 - Ensaio de massa bruta com ADF

Parâmetros	Unidade	Resultados analíticos	Valores limites NBR 10004
pH (suspensão 1:1)	-	7,01	2,0 – 12,5
Sulfeto (como H ₂ S)	mg/kg	< 1	500
Porcentagem de Sólidos	%p/p	97,8	-
Cianeto (como HCN)	mg/kg	< 1	250

Fonte: Relatório interno da empresa fornecedora da ADF.

Os valores de pH da mistura do material com água na proporção de 1:1 em peso, devem produzir uma solução que apresente um pH entre 2,0 e 12,5, para o material não ser considerado corrosivo. Conforme exposto na Tabela 6, o pH da solução com ADF foi de 7,01, portanto, é considerado um solo não corrosivo. Ainda, são avaliadas questões de reatividade, onde o solo deve apresentar uma concentração inferior a 250 mg/kg de íon CN⁻ ou S²⁻ e inferior a 500 mg/kg de H₂S para ser considerado não reativo. Limites estes respeitados pela ADF.

Para classificação de um resíduo sólido, deve-se analisar as seguintes situações:

- Um resíduo é classificado como Classe I (Perigoso), quando um ou mais parâmetros do lixiviado e/ou massa bruta apresentarem valores acima do máximo permitido pela NBR 10004 (ABNT, 2004);
- Um resíduo é classificado como Classe II A (Não Inerte), quando um ou mais parâmetros do solubilizado estiverem acima dos valores máximos permitidos pela NBR 10004 (ABNT, 2004);
- Um resíduo é classificado como Classe II B (Inerte) quando todos os parâmetros, tanto massa bruta quanto dos ensaios de solubilização e lixiviação estiverem abaixo dos valores máximos permitidos pela NBR 10004 (ABNT, 2004).

Em vista do exposto, a ADF deste estudo é classificada como Classe II A, resíduo não perigoso e não inerte.

3.1.2. Análise granulométrica

O ensaio de análise granulométrica tem como objetivo a determinação da distribuição granulométrica do solo, que consiste em quantificar o tamanho das partículas e suas respectivas porcentagens de ocorrência. Sendo que para os materiais granulares (areias e pedregulhos) a

distribuição granulométrica é obtida por meio de peneiramento, enquanto para frações mais finas (siltes e argilas) é necessário além do peneiramento a sedimentação do material.

A norma NBR 7181 (ABNT, 2016) apresenta a metodologia para execução do ensaio de análise granulométrica, sendo o solo retido na peneira de 2 mm submetido ao peneiramento grosso, e o solo passante na referida peneira é tratado como solo fino e submetido ao ensaio de sedimentação e peneiramento fino. Os resultados de todos os ensaios compõem a curva granulométrica do material. Vale salientar que a análise granulométrica por peneiramento, usualmente é limitada à peneira de 0,075 mm. Sendo que quando se tem interesse em investigar frações passantes na peneira 0,075mm, deve-se recorrer ao ensaio de sedimentação.

No presente trabalho foi realizado o peneiramento grosso e sedimentação com peneiramento fino para compor a curva granulométrica da ADF e do solo residual de gnaïsse, sendo a sedimentação realizada com defloculante (solução de hexametáfosfato de sódio). Os ensaios foram realizados conforme preconiza a norma NBR 7181 (ABNT, 2016).

3.1.3. Densidade real dos grãos

A densidade real grãos foi determinada por meio do método do picnômetro. Para execução do ensaio, foi seguido a norma rodoviária ME 093 (DNER, 2010), que apresenta os requisitos, aparelhagem e cálculos para a determinação da densidade real dos grãos, sendo que para a retirada total do ar da amostra, o picnômetro foi submetido a aquecimento.

O ensaio foi realizado com a ADF e com o solo residual de gnaïsse. A Figura 21 apresenta as etapas do ensaio com a ADF.

Figura 21 - Etapas do ensaio de determinação da densidade real dos grãos



Fonte: Autora (2020).

3.1.4. Limites de Atterberg

A fração fina do solo tem grande importância na determinação de seu comportamento do ponto de vista da engenharia. O conhecimento dos limites de Atterberg, complementa as informações obtidas por meio da distribuição granulométrica, permitindo um melhor entendimento do desempenho do material.

Os limites baseiam-se na análise do comportamento de um solo argiloso com a variação do teor de umidade. Sendo que quando muito úmido, possui comportamento de um líquido, por outro lado, com a perda de água fica plástico e por fim quebradiço. O limite de liquidez (LL) e o limite de plasticidade (LP) dos solos, correspondem ao teor de umidade nas mudanças de estado do material. Já o índice de plasticidade (IP) corresponde a faixa de valores que o solo se apresenta no estado plástico, que é calculado pela diferença entre o LL e o LP (PINTO, 2006).

A execução dos ensaios seguiu as normas NBR 7180 (ABNT, 2016) para obtenção do LP e NBR 6459 (ABNT, 2016) para LL. Este ensaio foi executado apenas com o solo residual de gnaiss, visto que a ADF possui comportamento de material não plástico ($IP=0$).

3.1.5. Índice de vazios máximos e mínimos

Para a determinação do índice de vazios máximo da ADF foi utilizado o método A da NBR 16840 (ABNT, 2020), no qual utilizou-se um funil para depositar a ADF em um cilindro Proctor com volume de 1000 cm³. Já para determinação do índice de vazios mínimo baseou-se no método B.1 da NBR 16843 (ABNT, 2020), onde a ADF foi seca em estufa e utilizou-se uma mesa vibratória de peneiramento juntamente com aplicação de uma pressão de 13,8±0,1 kPa para execução do ensaio. Foram feitas três determinações para cada ensaio, que respeitaram as diferenças inferiores a 1,5%.

Com a finalização do ensaio tem-se a massa da ADF e o volume do cilindro utilizado, portanto, pode-se obter a massa aparente seca mínima (ensaio de $e_{m\acute{a}x}$) e massa aparente seca máxima (ensaio de $e_{m\acute{i}n}$). Desta forma, pode-se obter o índice de vazios máximo e mínimo através das equações (5) e (6), respectivamente.

$$e_{m\acute{a}x} = \frac{\rho_s}{\rho_{d,m\acute{i}n}} - 1 \quad (5)$$

$$e_{m\acute{i}n} = \frac{\rho_s}{\rho_{d,m\acute{a}x}} - 1 \quad (6)$$

3.2. COMPORTAMENTO GEOTÉCNICO

O comportamento geotécnico compreende propriedades fundamentais para o emprego seguro do material. Considerando o objetivo desse trabalho, busca-se por meio destes ensaios avaliar a capacidade dos materiais de fornecer suporte adequado às camadas componentes de um pavimento. A Tabela 7 apresenta os ensaios propostos e as respectivas normas vigentes. Os ensaios de Compactação e CBR foram executados em amostras de ADF pura e com misturas entre ADF e solo residual de gnaïsse, nas proporções de 75% ADF + 25% solo residual de gnaïsse e 50% ADF + 50% solo residual de gnaïsse, a fim de verificar os efeitos das adições ao comportamento do produto final.

Tabela 7 - Ensaio de comportamento geotécnico

Material	Ensaio	Norma
ADF e Mistura	Compactação	NBR 7182 (ABNT, 2016)
ADF e Mistura	Expansão e CBR	NBR 9895 (ABNT, 2016)
ADF	Resistência a Compressão Simples	NBR 12024 (ABNT, 2012) NBR 12025 (ABNT, 2012)
ADF	Resistência ao Cisalhamento	D 3080 (ASTM, 2011)
ADF	Compressão Confinada	D 2435 (ASTM, 2011)

Fonte: Autora (2021).

3.2.1. Ensaio de compactação

Primeiramente, os materiais foram previamente secos ao ar e destorroados. Aferiu-se a umidade inicial, correspondente à umidade higroscópica, e iniciou-se a adição de água até cerca de 5% de umidade abaixo da umidade ótima esperada. Após a completa homogeneização do material, colocou-se uma certa quantidade dentro do cilindro e aplicou-se os golpes, sendo que a quantidade de camadas, tamanho do cilindro e soquete e número de golpes necessários, variou de acordo com a energia ensaiada.

O ensaio foi realizado com reuso de material, ou seja, o material utilizado na determinação do primeiro par de valores (umidade e densidade seca), foi destorroado após a finalização do primeiro ensaio e utilizado novamente para determinação dos pontos seguintes, com incrementos sucessivos de água a mesma amostra. A Figura 22 apresenta as etapas do ensaio.

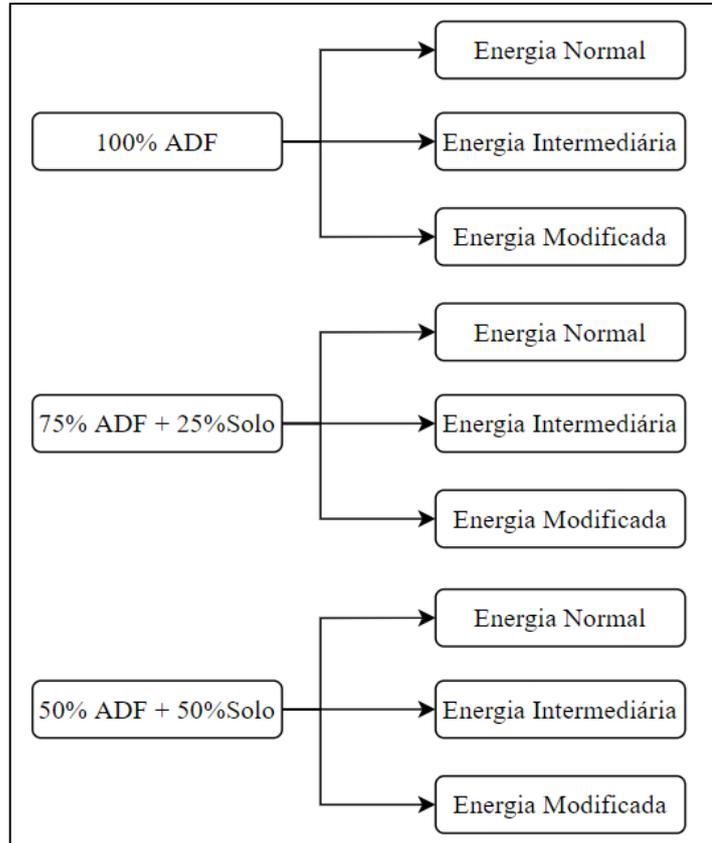
Figura 22 - Etapas do ensaio de compactação



Fonte: Autora (2020).

Para o estudo em questão, foram realizados 9 ensaios de compactação, variando o material e energia aplicada. A Figura 23 apresenta um fluxograma com a metodologia do ensaio de compactação.

Figura 23 - Metodologia do ensaio de compactação



Fonte: Autora (2021).

A partir do conhecimento da umidade ótima dos materiais, foi possível dar sequência aos demais ensaios.

3.2.2. Expansão e CBR

Para determinar o CBR e expansão dos materiais, seguiu-se as orientações preconizadas na NBR 9895 (ABNT, 2016). Sendo utilizadas para moldagem dos corpos de prova as umidades ótimas encontradas no ensaio de compactação apresentado no item 3.3.5. A Figura 24 apresenta a estrutura montada e imersa em água.

Figura 24 - Corpo de prova imerso em água



Fonte: Autora (2020).

Os corpos de prova compactados sob diferentes energias foram submetidos à imersão por 96 horas, período no qual mediu-se a expansão. Os corpos de provas foram posteriormente retirados da imersão, mantidos por 15 minutos em posição horizontal para escoamento do excesso de água e levados a prensa mecânica para realização do ensaio CBR. Durante a penetração foram anotadas as leituras do anel dinamométrico nas penetrações determinadas na norma NBR 9895 (ABNT, 2016), conforme apresentado na Tabela 8.

Tabela 8 - Medidas de penetração no ensaio CBR

Tempo (min)	Penetração (mm)
0,5	0,63
1,0	1,27
1,5	1,90
2,0	2,54
2,5	3,17
3,0	3,81
3,5	4,44
4,0	5,08
5,0	6,35
6,0	7,62
7,0	8,89
8,0	10,16
9,0	11,43
10,0	12,70

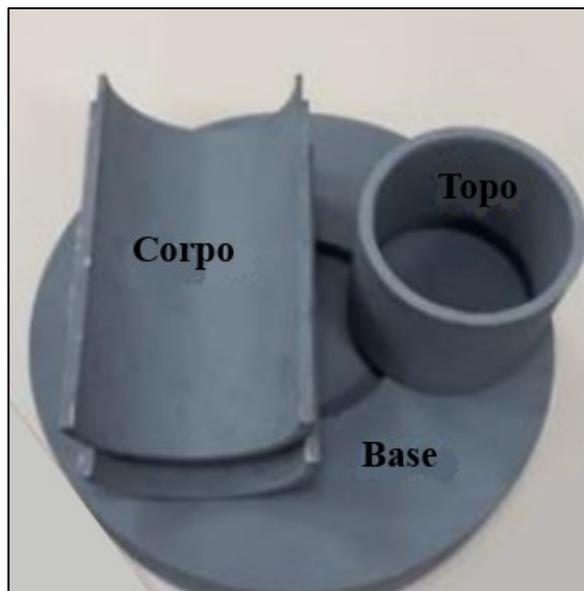
Fonte: Adaptado da NBR 9895 (ABNT, 2016, p. 5)

3.2.3. Resistência à compressão simples

A execução do ensaio foi baseada nas diretrizes da norma NBR 12024 (ABNT, 2012), que estabelece a metodologia de moldagem e cura de corpos de prova. Já para as instruções de rompimento dos corpos de prova, foi utilizada a norma NBR 12025 (ABNT, 2012).

Para a preparação dos corpos de prova, foi utilizado um molde bipartido, conforme apresentado na Figura 25. Este molde é composto por três partes, base, corpo e topo. A base, tem por objetivo fixar o corpo durante a moldagem. O corpo do molde, é dividido em duas partes iguais para facilitar a desmoldagem dos corpos de prova e possui dimensões de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura. O topo permite garantir o encaixe entre as duas partes do corpo durante a moldagem dos corpos de prova e o acondicionamento do volume total de solo a ser utilizado.

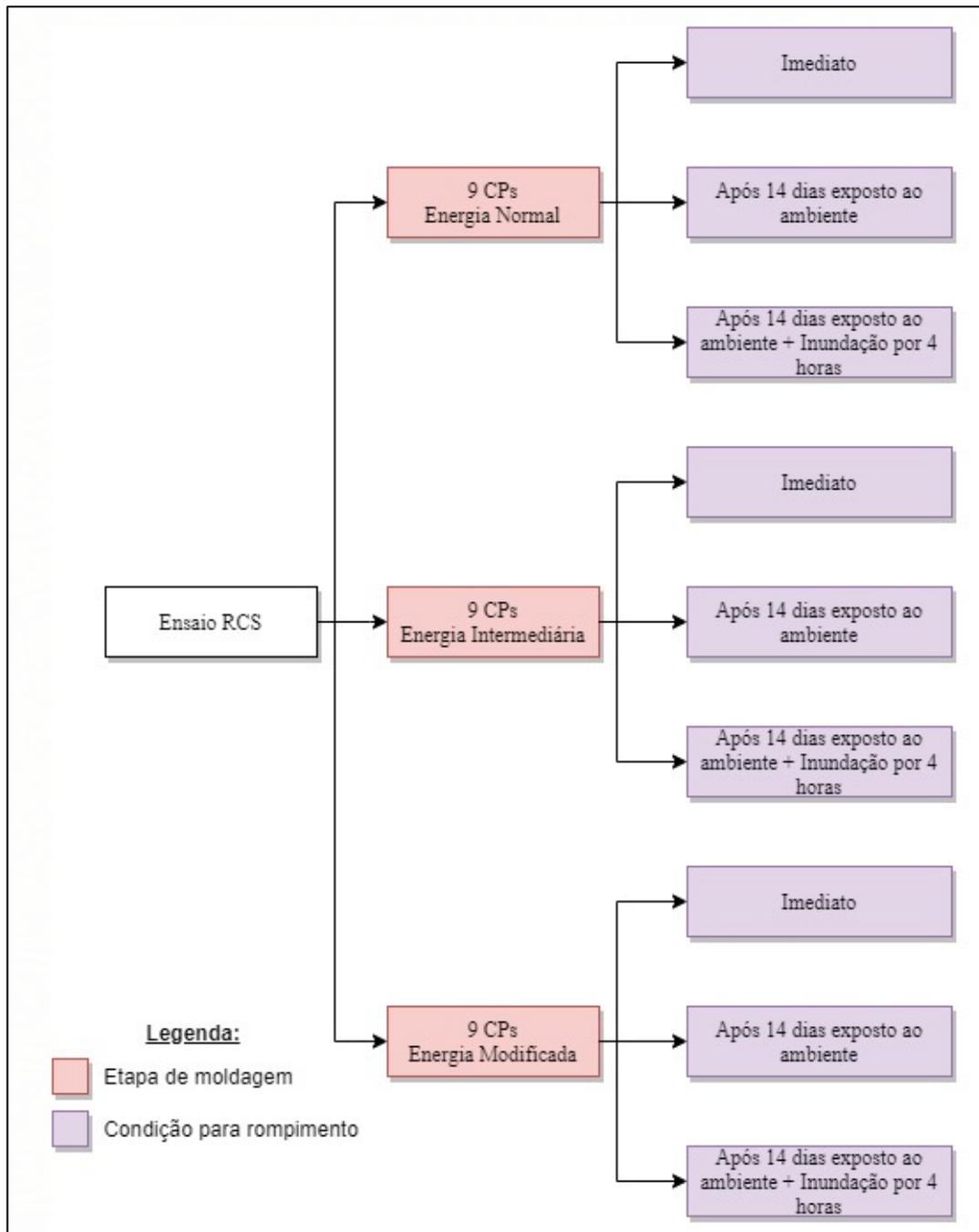
Figura 25 - Molde bipartido



Fonte: Autora (2020).

Os corpos de prova foram moldados nas umidades ótimas obtidas nos ensaios de compactação sob energia normal, intermediária e modificada. A ruptura dos corpos de prova foi feita: a) imediatamente após a moldagem, b) após 14 dias da moldagem mantido exposto ao ar, e, c) após 14 dias da moldagem mantido exposto ao ar e então imerso em água. Para cada condição utilizou-se três corpos de prova, totalizando, portanto, 27 corpos de prova moldados. A Figura 26 apresenta um fluxograma com a metodologia utilizada no ensaio RCS.

Figura 26 - Metodologia do ensaio RCS



Fonte: Autora (2021).

Com o intuito de garantir o peso específico seco na moldagem, realizou-se o cálculo do volume do molde e do peso de mistura, na umidade ótima, necessário para cada corpo de prova. Após os cálculos, foi separado uma quantidade de ADF e adicionado água aos poucos para atingir a umidade ótima, sendo misturada até a completa homogeneização. Para uma melhor compactação, dividiu-se o material preparado para um corpo de prova em três porções

iguais. Assim, iniciou-se o processo de compactação manual com o auxílio de uma prensa hidráulica.

Depois de cada processo de moldagem, três amostras da mistura eram retiradas para verificar o teor de umidade. Foram considerados aceitáveis, variações de $\pm 0,5\%$ da umidade ótima, $\pm 0,2\text{cm}$ de altura e diâmetro e $\pm 0,1\%$ de variação do peso total esperado para o corpo de prova. Os corpos de prova foram pesados em uma balança de precisão de $0,01\text{g}$ e as dimensões foram obtidas com o auxílio de um paquímetro.

Os 9 CPs submetidos à imersão em água por 4 horas, após a cura de 14 dias, se desintegraram, conforme mostra a Figura 27.

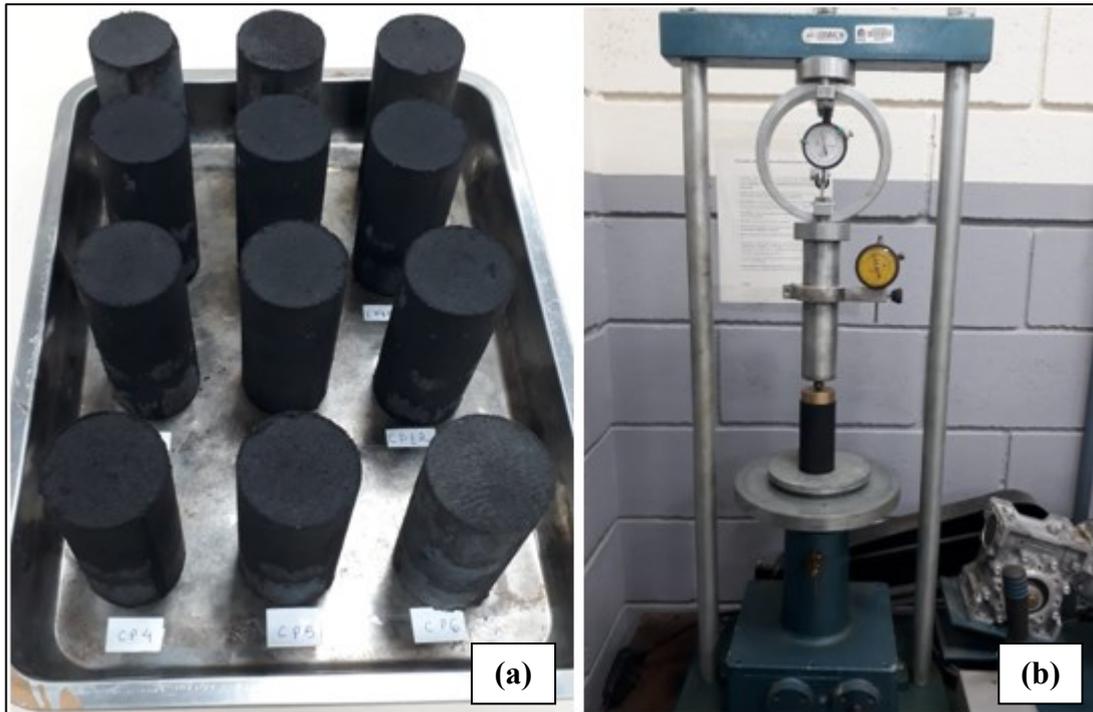
Figura 27 - Corpos de prova após a imersão em água



Fonte: Autora (2020).

Portanto, foram ensaiadas as condições de rompimento imediato (logo após a moldagem) e após 14 dias da moldagem e secos ao ar sem posterior imersão. A ruptura dos corpos de prova foi realizada com uma prensa mecânica, com velocidade de 1 mm/min , até o seu rompimento. Tomou-se como critério de parada do ensaio a indicação clara de ruptura (perda generalizada da resistência). A Figura 28 (a) apresenta modelos de corpos de provas e Figura 28 (b) a ruptura do corpo de prova.

Figura 28 - (a) Corpos de prova e (b) ruptura do corpo de prova



Fonte: Autora (2020).

3.2.4. Resistência ao cisalhamento

Os corpos de prova submetidos ao ensaio de cisalhamento direto, foram moldadas a partir de amostras compactadas em cilindros maiores. Foram realizados os ensaios com corpos de prova moldados nas três energias de compactação (normal, intermediária e modificada), nas umidades ótimas e densidades secas máximas. Após a compactação, pesou-se a amostra para verificar se a densidade seca máxima havia sido alcançada e em seguida iniciou-se a moldagem do corpo de prova quadrado com dimensões de 6,0 x 6,0 x 2,0 cm (Figura 29).

Figura 29 - Moldagem do corpo de prova para o ensaio de cisalhamento direto



Fonte: Autora (2020).

Os ensaios de cisalhamento direto foram executados de acordo com norma D 3080 (ASTM, 2011). Foram realizados por meio da máquina de cisalhamento direto, que contém um sistema totalmente automatizado (Figura 30). Os ensaios foram realizados logo após a moldagem dos corpos de prova, sendo inicialmente saturados e consolidados. Uma velocidade de cisalhamento de 0,05 mm/min foi utilizada nos ensaios, com base em parâmetros obtidos em ensaios edométricos. Foram aplicadas tensões efetivas normais de 25, 50, 100 e 200 kPa para cada ensaio.

Figura 30 - Máquina de cisalhamento direto



Fonte: Autora (2020).

3.2.5. Compressão confinada

Os corpos de prova submetidos ao ensaio de compressão confinada, foram moldados a partir de amostras compactadas de ADF em cilindros maiores, foram testadas as três energias de compactação (normal, intermediária e modificada). Após a compactação, pesou-se a amostra para verificar se a densidade seca máxima havia sido alcançada e em seguida iniciou-se a moldagem do corpo de prova com diâmetro de 5 cm e altura de 2 cm.

Os três ensaios de compressão confinada foram executados de acordo com as diretrizes da D 2435 (ASTM, 2011). As cargas foram transmitidas em estágios e eram dobradas a cada 24 horas. A altura do corpo de prova foi monitorada durante todos os estágios de carregamento, nos períodos determinados pela norma. Com a finalização das etapas de carregamento, iniciou-se o descarregamento em períodos reduzidos, utilizando como referência a estabilização das deformações.

Figura 31 - Preparação e ensaio de compressão confinada



Fonte: Autora (2020).

3.3. LEGISLAÇÃO

No item 2.5.1 deste trabalho foram apresentados os trâmites para obtenção da AuA pelos geradores da ADF e para os interessados em sua reutilização no estado de Santa Catarina. Nesta vertente do trabalho buscou-se alguns critérios e informações importantes para obtenção da licença ambiental, que foram analisados e pesquisados junto a uma empresa geradora de ADF.

3.4. ANÁLISE DE CUSTOS

Nesta vertente do trabalho foi realizado um estudo de caso com uma obra de pavimentação já executada. A empresa Haas Engenharia forneceu o projeto *as built* da obra de implantação de acesso ao Centro Comercial Expoville, localizado às margens da BR-101/SC, km 038+690m, sentido Norte, no município de Joinville/SC.

Com as informações do *as built*, análises referentes ao empolamento e contrações dos materiais e pesquisas referentes aos valores do transporte de materiais, foi possível determinar os custos relacionados a utilização da ADF, bem como realizar o comparativo com o custo da obra já executada.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Por meio dos ensaios apresentados na metodologia, obtiveram-se dados para avaliar o desempenho da ADF nas camadas estruturais de um pavimento.

4.1. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

A Tabela 9 apresenta os valores de densidade real dos grãos (G) obtidas para a ADF e para o solo residual de gnaiss, bem como índice de vazios máximos ($e_{máx}$) e mínimos ($e_{mín}$) para a ADF.

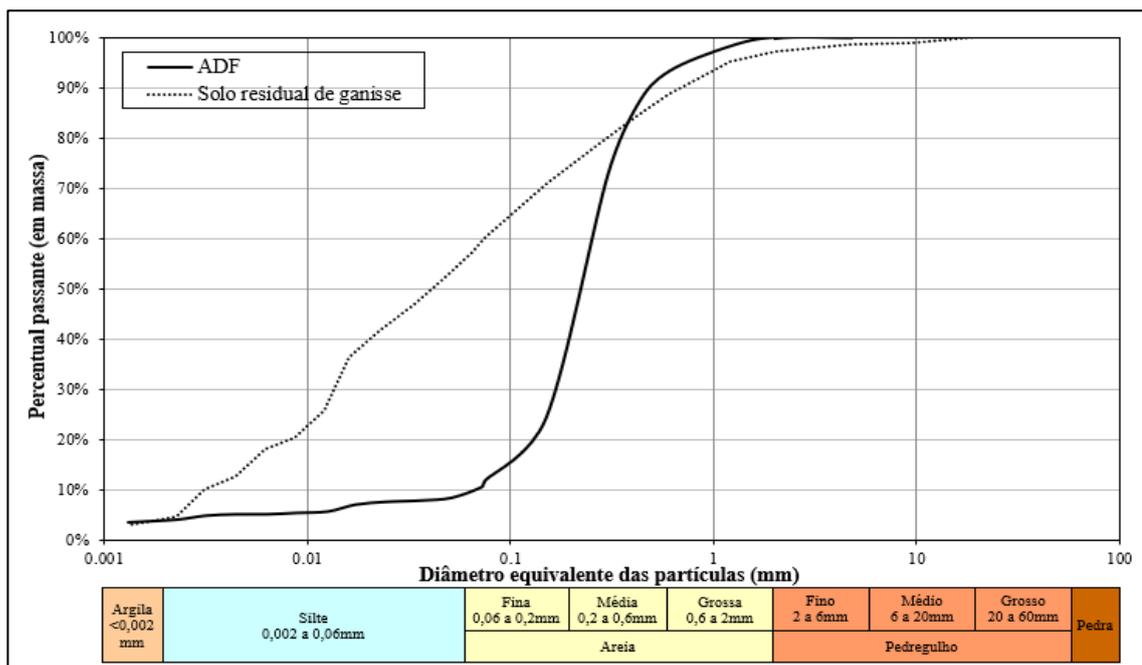
Tabela 9 - Índices físicos

Material	W higroscópica	G	$e_{máx}$	$e_{mín}$
ADF	2,00%	2,62	0,85	0,56
Solo residual de gnaiss	19,00%	2,73	-	-

Fonte: Autora (2021).

As curvas granulométricas da ADF e do solo residual de gnaiss, obtidas por meio de peneiramento e sedimentação, conforme preconizado na norma NBR 7181 (ABNT, 2016), estão apresentadas na Figura 32.

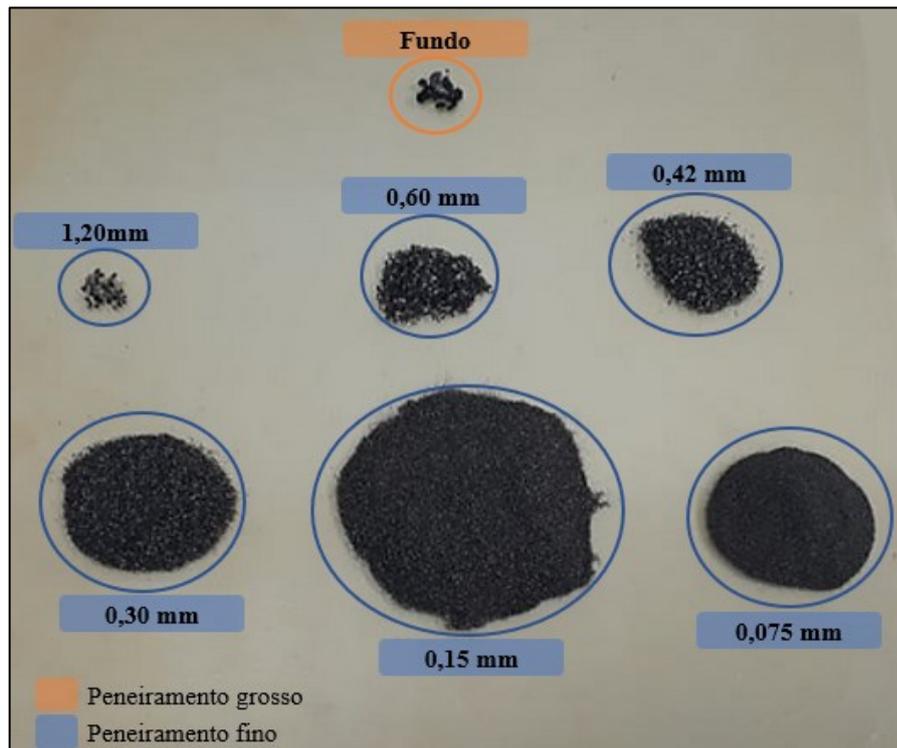
Figura 32 - Distribuição granulométrica da ADF e do solo residual de gnaiss



Fonte: Autora (2021).

Analisando a curva granulométrica da ADF pode-se constatar a predominância de partículas do tamanho de areia, cerca de 90% da amostra total. Sendo aproximadamente 30% areia fina, 54% areia média e 6% areia grossa. Os outros 10% podem ser caracterizados como partículas do tamanho de silte (6%) e argila (4%). A Figura 33 apresenta as frações granulométricas obtidas no peneiramento.

Figura 33 - Frações granulométricas da ADF



Fonte: Autora (2020).

A curva granulométrica do solo residual de gnaiss apresenta predominância de partículas finas, correspondendo a 56% da amostra total, sendo 52% de partículas do tamanho de silte e 4% de argila. Cerca de 41% da amostra corresponde a partículas do tamanho de areia, sendo 18% areia fina, 14% areia média e 9% areia grossa. Os outros 3% podem ser caracterizados como pedregulho, sendo 2% pedregulho fino e 1% pedregulho grosso.

4.1.1. Classificação Unificada

Os solos granulares podem ser bem graduados ou mal graduados. Para esta determinação, aferiu-se a uniformidade dos materiais por meio do coeficiente de não

uniformidade (CNU) e a distribuição granulométrica através do coeficiente de curvatura (CC). As Equações (7) e (8) apresentam as formulações para a definição destes coeficientes.

$$CNU = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (7)$$

$$CC = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \cdot D_{60}} \quad (8)$$

Onde:

- D_{10} : diâmetro abaixo do qual situam-se 10% em peso das partículas;
- D_{30} : diâmetro abaixo do qual situam-se 30% em peso das partículas;
- D_{60} : diâmetro abaixo do qual situam-se 60% em peso das partículas.

Por definição, as areias são consideradas bem graduadas quando:

$$CNU > 6 \text{ e } 1 < CC < 3$$

Obteve-se os seguintes valores para a ADF em estado puro:

$$CNU = 3,57$$

$$CC = 1,75$$

Portanto, conclui-se que a ADF é um material mal graduado, pois o CNU foi inferior a 6, sendo classificada pelo sistema unificado como SP, areia mal graduada. De acordo com Pinto (2006), quanto maior o CNU, mais bem graduada é a areia, sendo que areias com CNU menores que 2 são conhecidas como areias uniformes. Por outro lado, o CC avalia concentrações elevadas de grãos mais grossos na composição, sendo que para se obter uma curva granulométrica suave, sem descontinuidades, o CC deve estar entre 1 e 3.

Para os solos onde a granulação fina é predominante, os métodos de classificação levam em consideração os limites de liquidez e plasticidade (LL e LP). A Tabela 10 apresenta os valores obtidos para o solo residual de gnaiss ensaiado. A ADF pura apresenta plasticidade nula.

Tabela 10 – Limites de Atterberg do solo residual de gnaiss

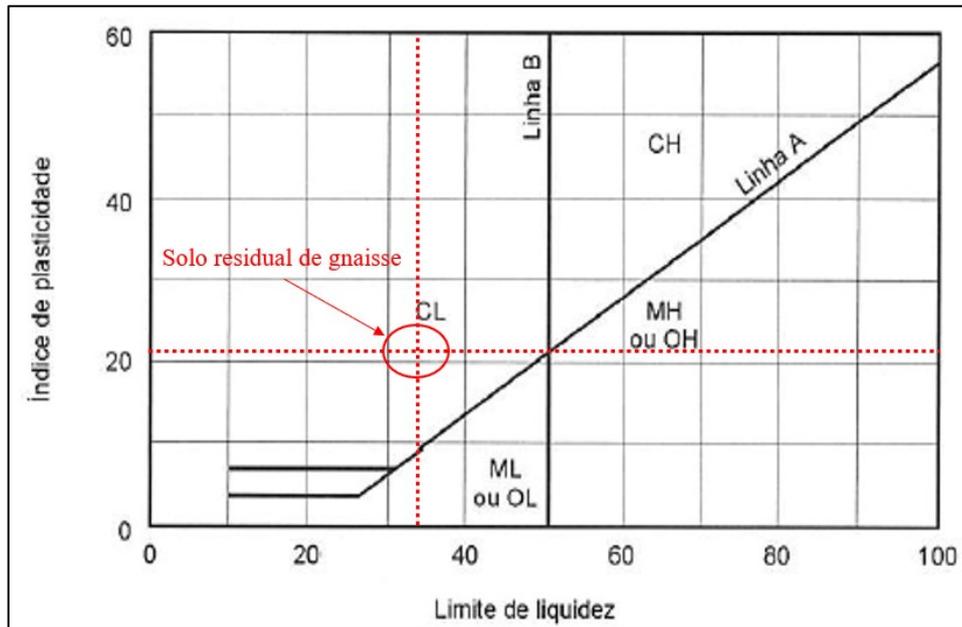
LL	LP	IP
34%	21%	13%

Fonte: Autora (2021).

Na Figura 34 é apresentada a carta de plasticidade proposta por Casagrande, onde os solos de comportamento argiloso estão compreendidos acima da “Linha A” e solos orgânicos e siltosos estão localizados abaixo da referida linha. A Equação (9) representa a reta da “Linha A”.

$$IP = 0,73 \cdot (LL - 20) \quad (9)$$

Figura 34 - Carta de plasticidade

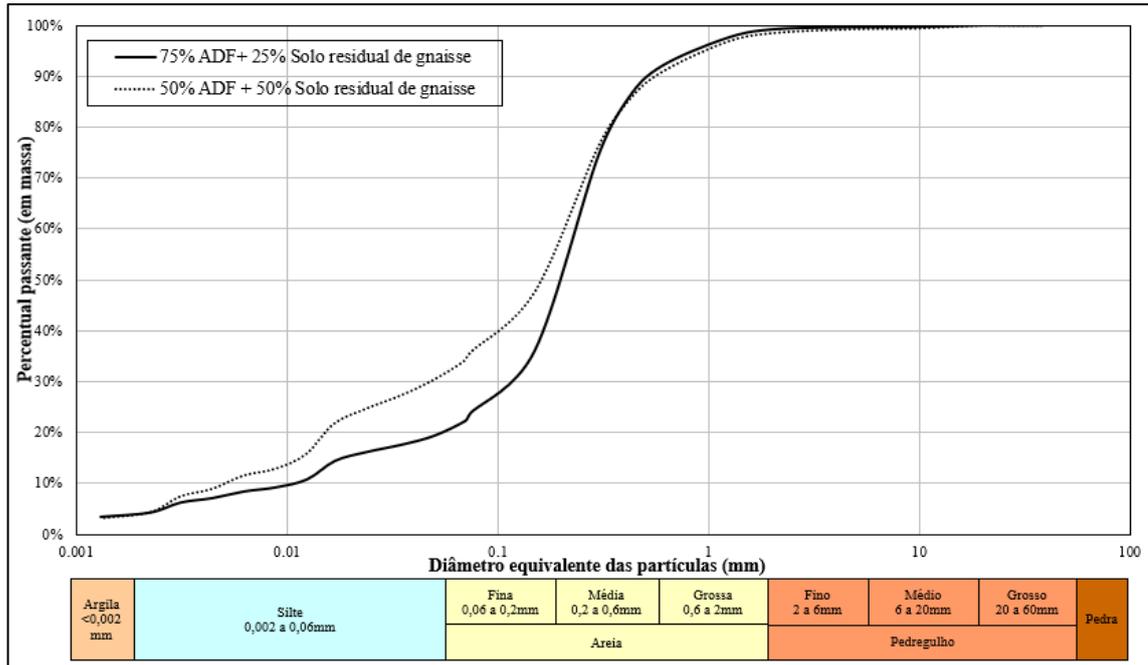


Fonte: Adaptado de Pinto (2006, p. 68).

A classificação unificada para o solo residual de gnaise ensaiado é “CL”, através da terminologia do sistema unificado, “C” significa *clay* ou argila, e a classificação secundária “L”, designa a argila como de baixa compressibilidade.

Com o intuito de melhor entender o comportamento das misturas entre ADF e solo residual de gnaise, foram traçadas as curvas granulométricas (Figura 35) para as composições de 75% ADF + 25% solo residual de gnaise e 50% ADF + 50% solo residual de gnaise.

Figura 35 - Distribuição granulométrica das misturas



Fonte: Autora (2021).

Em ambas as curvas granulométricas obteve-se uma mistura com granulação grosseira, uma vez que a porcentagem passante na peneira nº 200 (0,075mm), foi inferior a 50. Ainda, observa-se que a maior fração está compreendida em partículas do tamanho de areia, sendo cerca de 78% na amostra 75/25 e 67% na amostra 50/50.

Obteve-se os seguintes valores de CNU e CC para a mistura 75/25:

$$CNU = 20,63$$

$$CC = 5,34$$

Obteve-se os seguintes valores de CNU e CC para a mistura 50/50:

$$CNU = 41,90$$

$$CC = 2,20$$

Portanto, conclui-se que a mistura de 75% ADF + 25% solo residual de gnaise, constitui um material mal graduado (SP), enquanto a mistura de 50% ADF + 50% solo residual de gnaise é caracterizada como bem graduada (SW). 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.

4.1.2. Sistema rodoviário de classificação

A classificação dos solos por meio do sistema rodoviário difere inicialmente do sistema unificado, uma vez que são considerados solos de granulação grosseira os que possuem menos de 35% de material passante na peneira de 0,075mm, não os 50% considerado no método unificado (PINTO, 2006). Os solos finos são classificados em função do índice de plasticidade, da mesma forma que os solos grosseiros do tipo A-2. Obteve-se a classificação da ADF como A-2-4 e do solo residual de gnaiss como A6.

A norma D 3282 (ASTM, 2015) estabelece a formulação para obtenção do índice de grupo (IG), conforme apresentado na Equação (10).

$$IG = (F - 35) \cdot [0,2 + 0,005 \cdot (LL - 40)] + [0,01(F - 15) \cdot (IP - 10)] \quad (10)$$

onde:

- F: porcentagem passante na peneira de 0,075mm;
- LL: limite de liquidez;
- IP: índice de plasticidade.

Para a ADF tem-se que o IG é igual a zero, uma vez que a norma D 3282 (ASTM, 2015) estabelece que quando o material é não plástico e não é possível determinar o limite de liquidez, adota-se o IG igual a zero. Já para o solo residual de gnaiss obteve-se um IG de 8. O valor de IG pode ser considerado como inversamente proporcional à qualidade de um material de subleito, ou seja, quanto maior o valor de IG pior são as condições de suporte do material.

Portanto, conclui-se que por meio do sistema rodoviário, a ADF é classificada como A2-4 (0) e o solo residual de gnaiss como A6 (8).

4.1.3. Fluorescência de raio-X e MEV

A caracterização química da ADF foi realizada por meio da análise de espectrômetro de fluorescência de raio-X. Através deste ensaio, foi possível determinar os elementos químicos presentes no material. Além disso, foram feitas imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) dos grãos da ADF.

O ensaio de espectrômetro de fluorescência de raio-X foi realizado no Laboratório de Caracterização de Materiais da Universidade de São Paulo (USP). Os principais compostos químicos da ADF em estudo estão apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 - Composição química da ADF

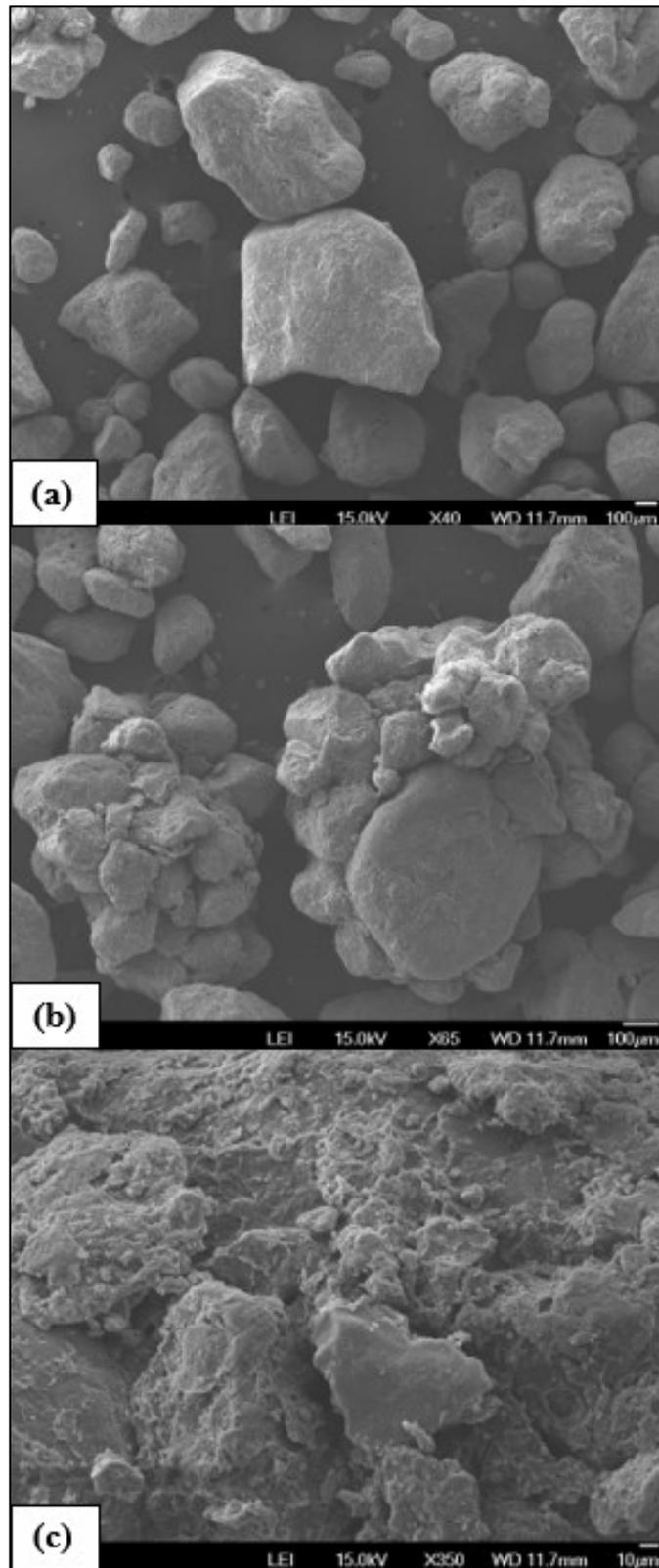
Composto	Concentração (%)
SiO₂	89,3
Al₂O₃	4,04
Fe₂O₃	1,52
Na₂O	0,52
MgO	0,46
SO₃	0,37
TiO₂	0,23
CaO	0,20
Outros	3,36

Fonte: Autora (2021).

Como cerca de 90% da ADF é composta por areia de quartzo natural, percebe-se que SiO₂ é o composto predominante. Sendo o composto Fe₂O₃ possivelmente proveniente de sobras do processo de fundição. Os demais compostos são devido à adição de bentonita e pó de carvão, que são incluídos na mistura para compor a caixa de moldagem das peças de fundição.

O MEV foi executado na Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC) e possibilitou a análise da forma das partículas da ADF. Pode-se perceber que o formato dos grãos varia de subangular a arredondado (Figura 36 (a)). Ainda é possível visualizar na Figura 36 (b) a formação dos grupos de grãos arenosos e na Figura 36 (c) pode-se perceber que as partículas finas se aderem à superfície dos grãos de areia.

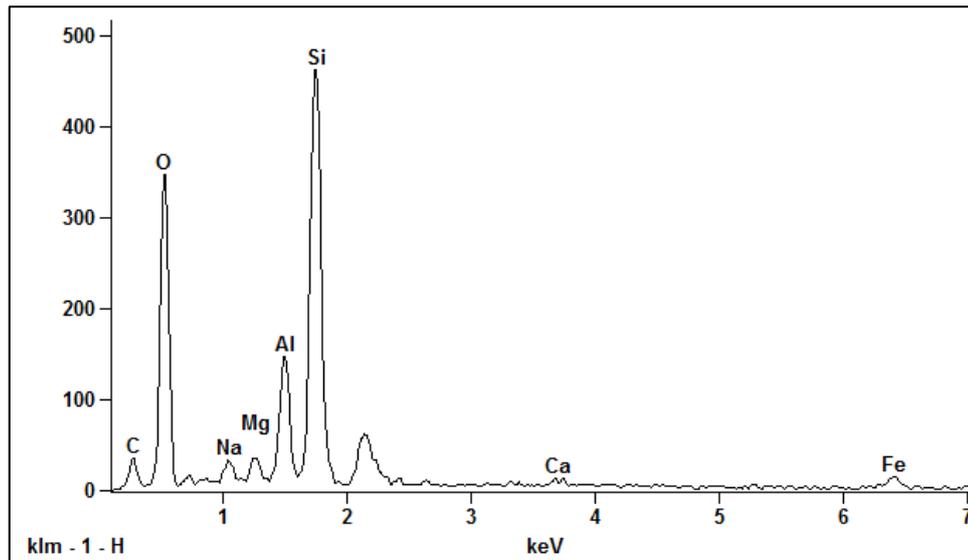
Figura 36 - Imagens do ensaio MEV da ADF (a) com aproximação de 40 vezes, (b) 65 vezes e (c) 350 vezes



Fonte: Autora (2021).

Ainda, a partir da técnica de espectroscopia por energia dispersiva associada às análises em MEV é possível consolidar as proporções dos elementos identificados na ADF em estudo, conforme concentrações obtidas no ensaio de espectrômetro de fluorescência de raio-X. O diagrama de intensidade *versus* ângulo de difração é apresentado na Figura 37.

Figura 37 - Intensidade *versus* ângulo de difração



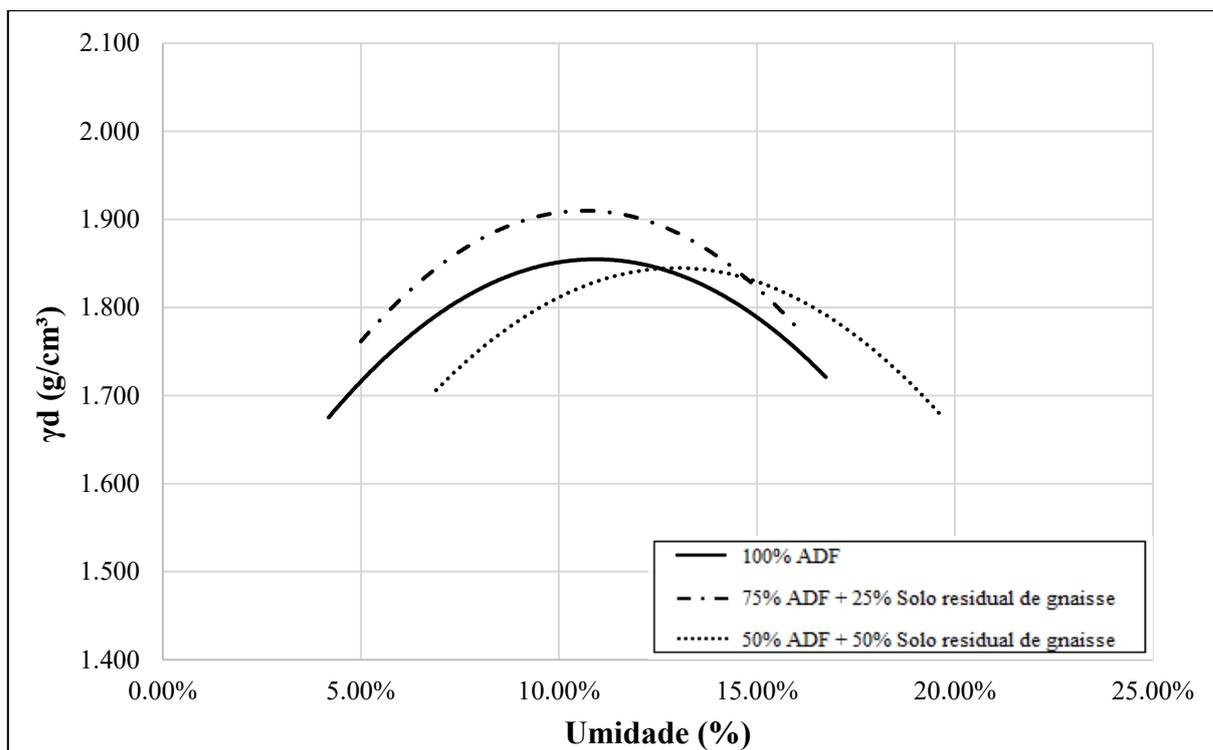
Fonte: Autora (2021).

4.2. COMPORTAMENTO GEOTÉCNICO

4.2.1. Ensaio de Compactação – Proctor

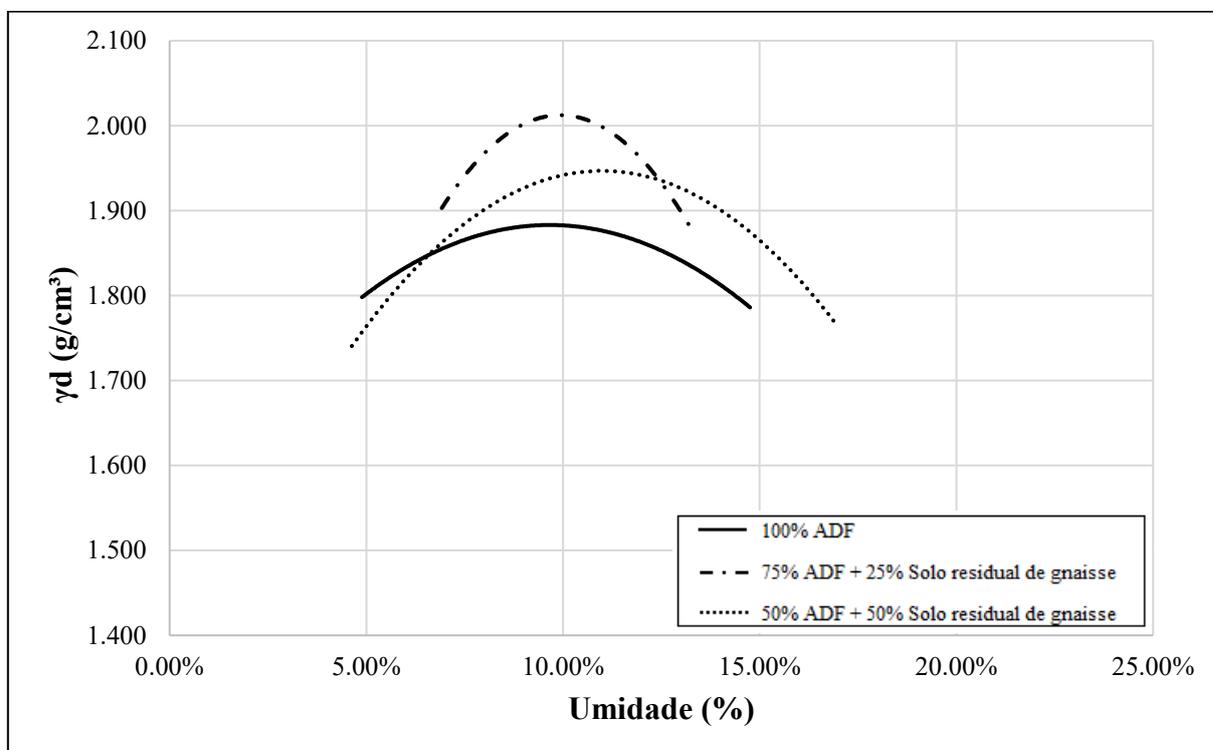
Foram realizados nove ensaios de compactação, conforme especificação apresentada no item 3.2.1. As Figuras 38, 39 e 40 apresentam as curvas de compactação, onde os resultados foram separados por energia, com o intuito de verificar o desempenho dos diferentes materiais submetidos à mesma energia de compactação.

Figura 38 - Ensaio de compactação com energia normal



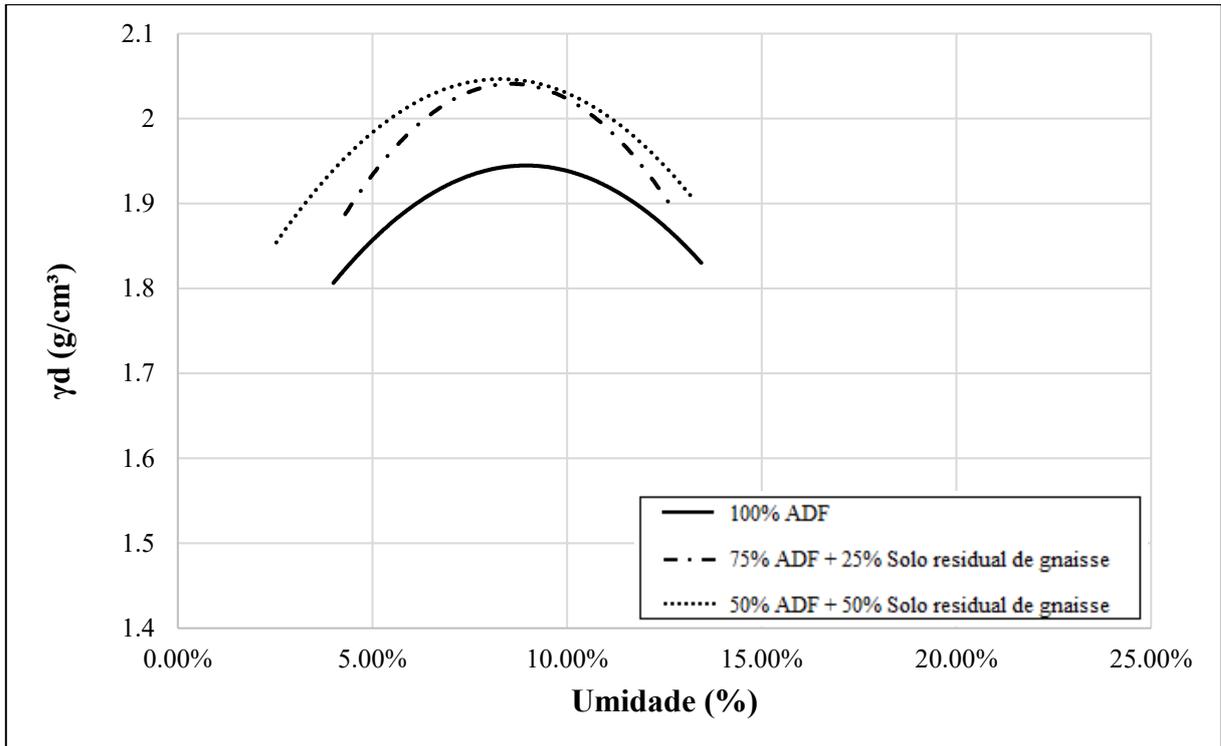
Fonte: Autora (2021).

Figura 39 - Ensaio de compactação com energia intermediária



Fonte: Autora (2021).

Figura 40 - Ensaio de compactação com energia modificada



Fonte: Autora (2021).

Pode-se perceber que a mistura de 75% ADF e 25% solo residual de gnaiss proporcionou 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 pode estar relacionado com a composição granulométrica, uma vez que com adição do solo residual de gnaiss, que possui partículas menores em relação à ADF, houve um melhor entrosamento entre os grãos, proporcionando melhor desempenho quanto submetido à compactação.

O acréscimo de finos acarreta um maior número de partículas que necessitam de lubrificação. Portanto, uma maior energia de compactação ou um maior teor de umidade se tornam mais importantes para um bom desempenho do material misturado frente à compactação, visto que a quantidade de finos a serem lubrificados e deslocados é maior. De fato, 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.

A Tabela 12 apresenta as propriedades físicas das amostras que tiveram melhor desempenho no ensaio de compactação e que foram testadas nos demais ensaios desta pesquisa.

Tabela 12 – Propriedades físicas das amostras com melhor desempenho na compactação

Material	Energia	γ_n (g/cm ³)	W _{ótima} (%)	$\gamma_{d,máx}$ (g/cm ³)	e	η (%)
100% ADF	Normal	2,115	11,00	1,850	0,41	29,12
	Intermediária	2,103	9,90	1,870	0,40	28,35
	Modificada	2,117	9,00	1,942	0,34	25,59
75% ADF + 25% Solo	Normal	2,092	10,40	1,910	0,38	27,65
	Intermediária	2,219	10,00	2,000	0,32	24,24
	Modificada	2,221	8,50	2,048	0,29	22,42
50% ADF + 50% Solo	Normal	2,082	12,71	1,847	0,45	30,82
	Intermediária	2,202	11,00	1,943	0,37	27,23
	Modificada	2,232	8,40	2,044	0,31	23,45

Fonte: Autora (2021).

4.2.2. Índice de Suporte Califórnia (CBR) e Expansão

A Tabela 13 apresenta os resultados de descolamento (mm) e expansão (%) obtidos em cada ensaio após a etapa de imersão.

Tabela 13 - Deslocamento e expansão para as misturas submetidas a energia normal, intermediária e modificada

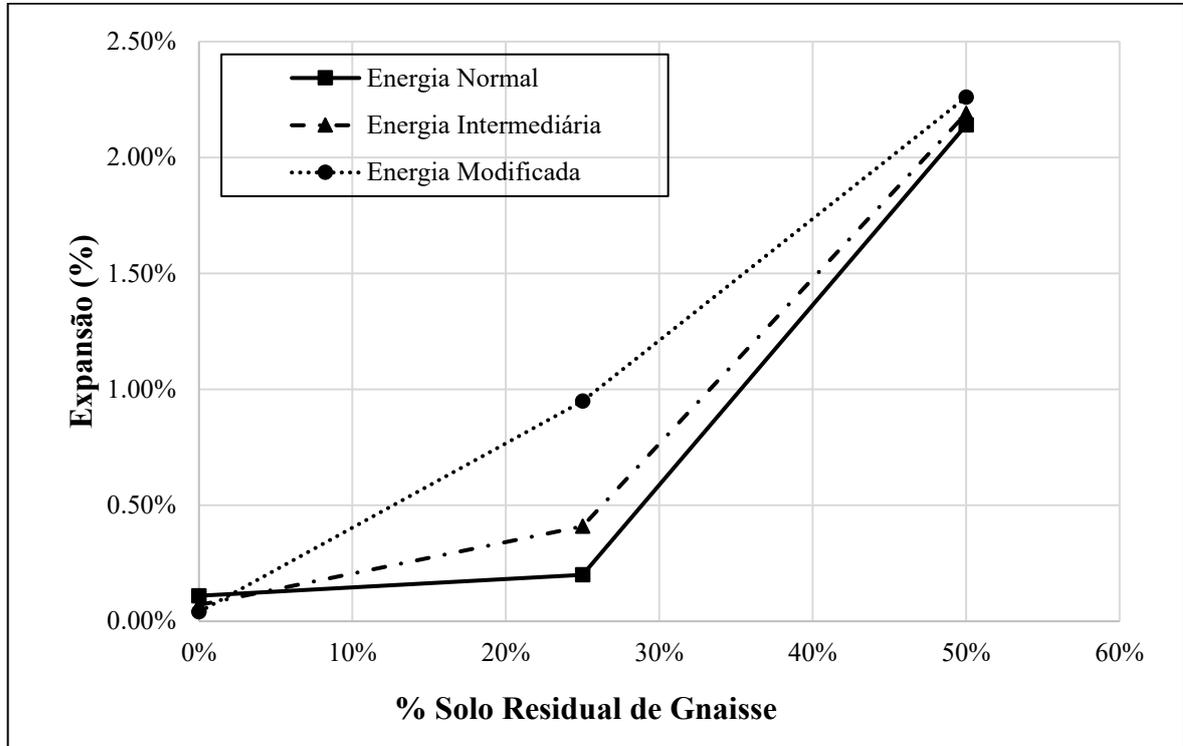
Material	Leituras	Normal	Intermediária	Modificada
100% ADF	Deslocamento (mm)	0,122	0,085	0,04
	Expansão (%)	0,11	0,07	0,04
75% ADF + 25% Solo	Deslocamento (mm)	0,261	0,266	1,083
	Expansão (%)	0,20	0,41	0,95
50% ADF + 50% Solo	Deslocamento (mm)	2,589	2,501	1,35
	Expansão (%)	2,14	2,19	2,26

Fonte: Autora (2021).

Pode-se perceber que a adição do solo residual de gnaissé causou aumento na expansão do material, uma vez que a expansão está relacionada aos fatores intrínsecos do material e à natureza e arranjo das partículas. O solo residual de gnaissé é composto por um maior percentual de finos, além da presença de micas, as quais são identificáveis em uma análise tátil-visual. A presença de micas explica o aumento da expansão com o aumento do percentual do

solo residual de gnaiss à mistura (Figura 41). A presença de argilo-minerais expansivos não foi investigada.

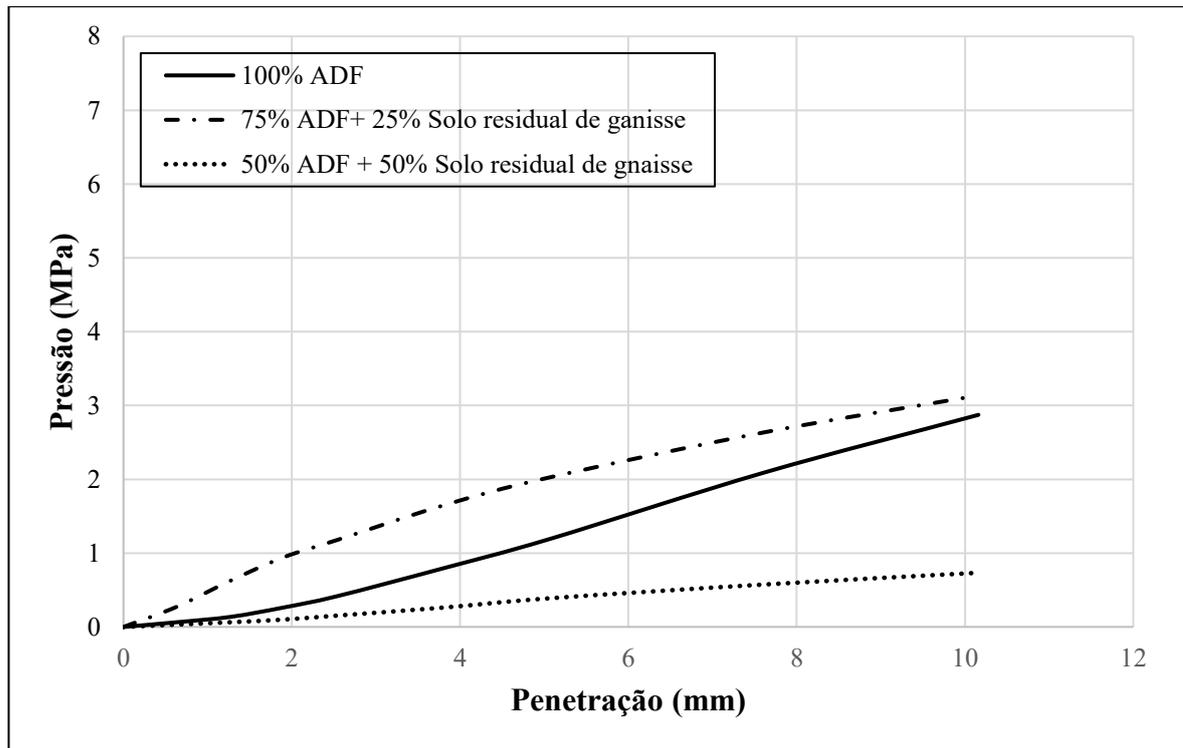
Figura 41 - Variação da expansão em função do teor de solo residual de gnaiss



Fonte: Autora (2021).

As Figuras 42, 43 e 44 apresentam as curvas de CBR e nas Tabelas 14, 15 e 16 são apresentados os resultados obtidos bem como as correções efetuadas devido a flexões iniciais presentes nas curvas de CBR.

Figura 42 – Curvas de CBR de corpos de prova compactados sob energia normal



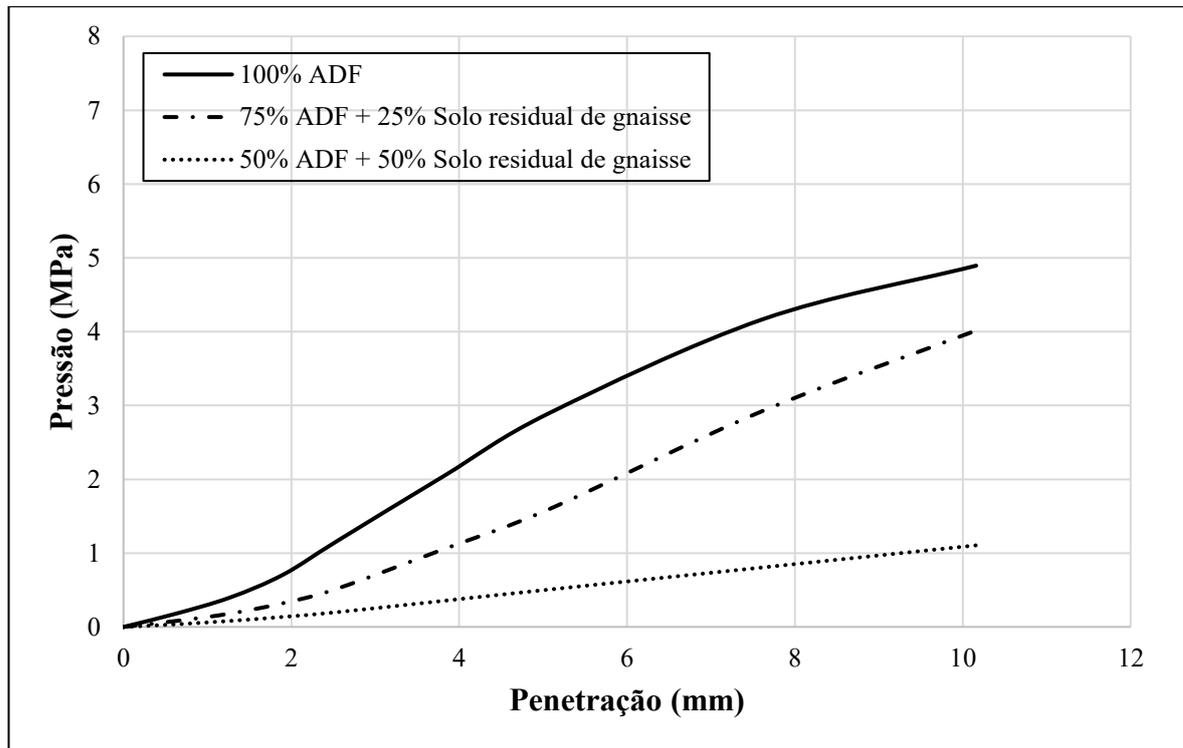
Fonte: Autora (2021).

Tabela 14 - Resultados de CBR de corpos de prova compactados sob energia normal

Material	Energia Normal						
	CBR 1	CBR 2	P1 corrigido	P2 corrigido	CBR 1 corrigido	CBR 2 corrigido	CBR
100% ADF	6,04	11,56	0,8	1,6	11,59	15,46	15,5
75% ADF + 25% Solo	17,08	19,62	1,23	2,1	17,83	20,29	20,3
50% ADF + 50% Solo	2,23	3,77	0,24	0,46	3,48	4,44	4,4

Fonte: Autora (2021).

Figura 43 - Curvas de CBR de corpos de prova compactados sob energia intermediária



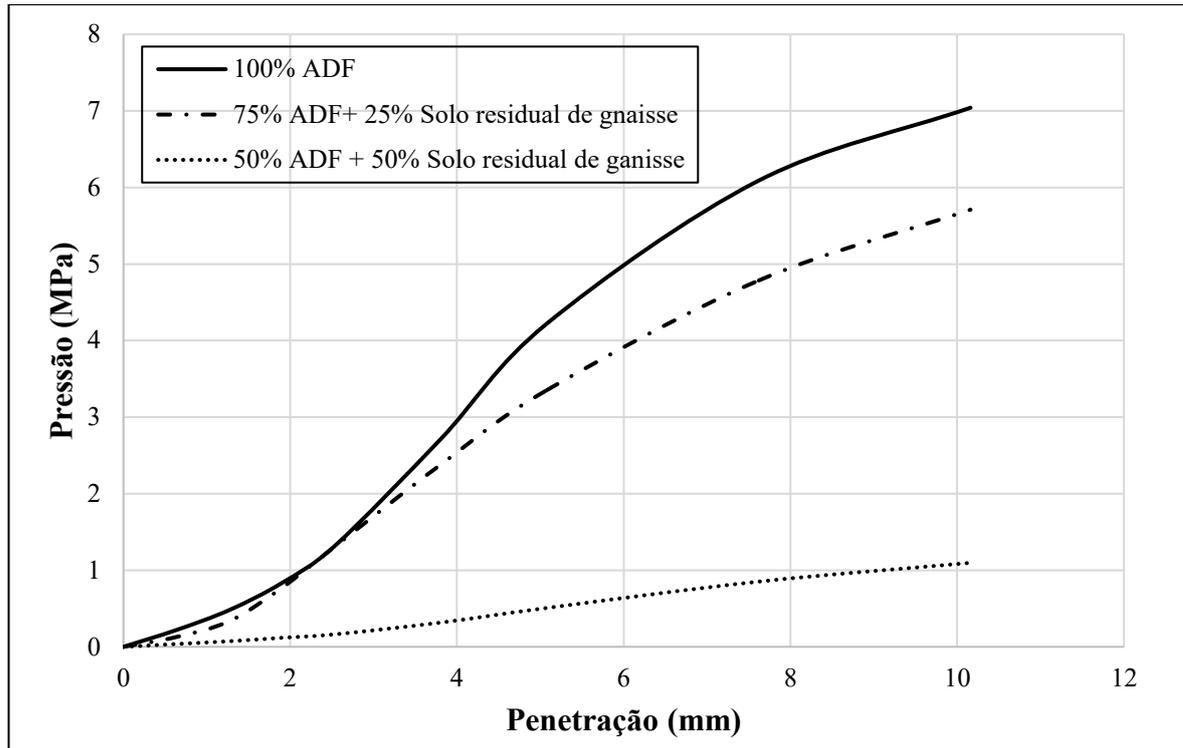
Fonte: Autora (2021).

Tabela 15 - Resultados de CBR em corpos de prova compactados sob energia intermediária

Material	Energia Intermediária						
	CBR 1	CBR 2	P1 corrigido	P2 corrigido	CBR 1 corrigido	CBR 2 corrigido	CBR
100% ADF	16,81	28,02	1,68	3,4	24,35	32,85	32,9
75% ADF + 25% Solo	7,49	15,46	1,2	2,5	17,39	24,15	24,2
50% ADF + 50% Solo	2,89	4,90	0,16	0,33	2,32	3,19	4,9

Fonte: Autora (2021).

Figura 44 - Curvas CBR de corpos de prova compactados sob energia modificada



Fonte: Autora (2021).

Tabela 16 - Resultados de CBR em corpos de prova compactados sob energia modificada

Material	Energia Modificada						
	CBR 1	CBR 2	P1 corrigido	P2 corrigido	CBR 1 corrigido	CBR 2 corrigido	CBR
100% ADF	19,18	40,81	3,0	5,4	43,48	52,17	52,2
75% ADF + 25% Solo	19,05	32,40	2,0	3,9	28,99	37,68	37,7
50% ADF + 50% Solo	2,36	4,90	0,35	0,71	5,07	6,86	6,9

Fonte: Autora (2021).

Pode-se perceber que 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.

Mediante os resultados obtidos, pode-se perceber que em todas as energias é possível a aplicação de pelo menos uma das amostras ensaiadas nas camadas estruturais do pavimento. Ainda, é notório que o desempenho da ADF sem adição do solo residual de gnaiss apresentou-se superior ao das misturas sob energia intermediária e modificada. A Tabela 17 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.

Tabela 17 – Comparativo com os parâmetros do DNIT para a sub-base

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

Fonte: Autora (2021).

Vale salientar que outro parâmetro estabelecido pelo DNIT refere-se ao IG do material aplicado na camada de sub-base, que deve ser igual a zero. Não foram realizados ensaios para determinar o LL e LP das misturas de 75/25 e 50/50. No entanto, realizou-se o cálculo do IG com os valores de LL e LP obtidos para o solo residual de gnaiss, sendo que foram obtidos valores negativos. Portanto, as misturas 75/25 e 50/50 são viáveis para aplicação na pavimentação quanto ao IG.

Em vista do melhor desempenho da ADF sem adição do solo residual de gnaiss, é mais viável sua aplicação quando comparado com as possibilidades de mistura com o solo residual de gnaiss estudado, uma vez que estará sendo reutilizado um maior volume de um passivo ambiental, além de diminuir os custos da obra.

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.

Para utilização na camada de base, são necessárias verificações específicas, visto ser uma camada mais solicitada. Portanto, deve ser analisado o tráfego de veículos no local onde pretende-se utilizá-la.

4.2.3. Resistência à Compressão Simples (RCS)

O objetivo do ensaio RCS é determinar a resistência à compressão simples sem confinamento lateral. Encontrou-se o valor da pressão correspondente à carga que levou à ruptura dos corpos de prova ensaiados conforme item 3.3.7. A Tabela 18 apresenta os resultados médios obtidos nos ensaios RCS.

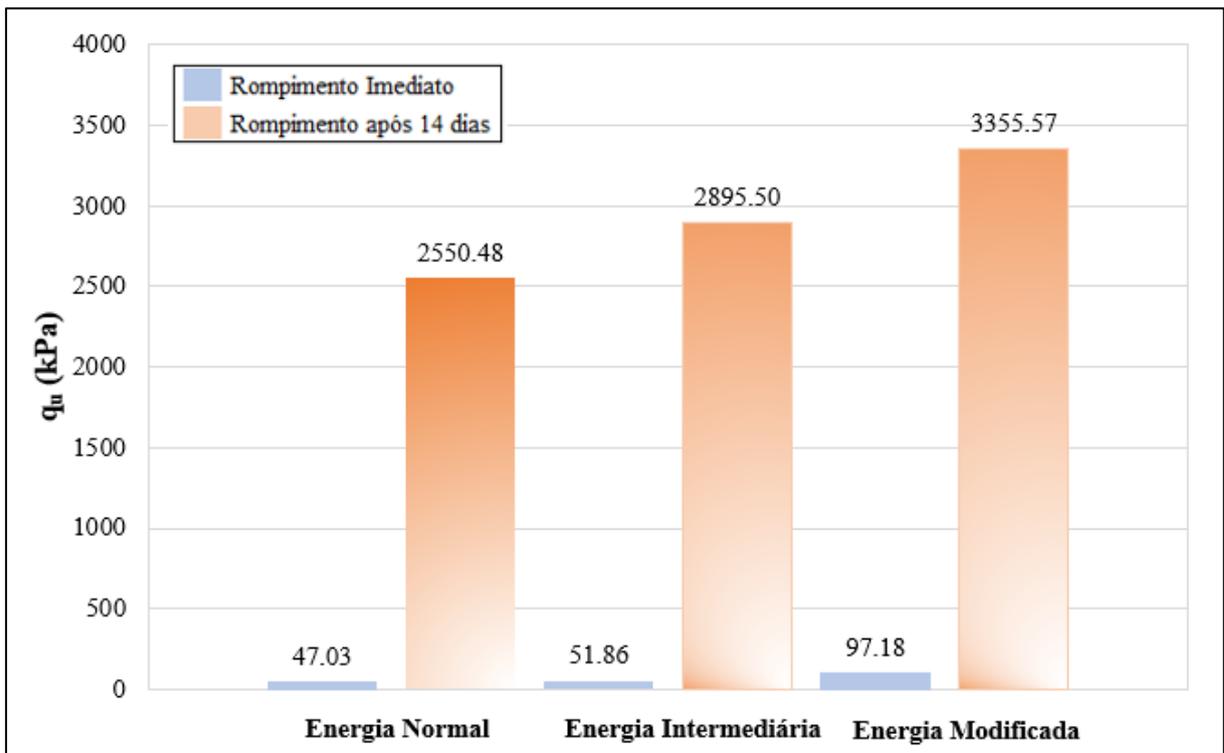
Tabela 18 - Resultados do ensaio de RCS

Corpo de Prova	Rompimento	γ_d (g/cm³)	q_u (kPa)
Energia Normal			
1			
2	Imediato		47,03
3			
4		1,85	
5	Após 14 dias		2550,48
6			
Energia Intermediária			
7			
8	Imediato		51,86
9			
10		1,85	
11	Após 14 dias		2895,50
12			
Energia Modificada			
13			
14	Imediato		97,18
15			
16		1,87	
17	Após 14 dias		3355,57
18			

Fonte: Autora (2021).

Pode-se perceber que a resistência à compressão aumenta com o aumento do nível de energia utilizada para moldagem dos corpos de prova. Ainda, é notório o elevado aumento na resistência com a secagem do material. Com o intuito de deixar os resultados de forma mais clara, elaborou-se o gráfico de barras apresentado na Figura 45.

Figura 45 – Variação da resistência a compressão simples nas diferentes condições de compactação e umidade



Fonte: Autora (2021).

As amostras submetidas à compressão nas úmidas ótimas, ou seja, imediatamente após a moldagem, obtiveram valores RCS variando de 47 a 97 kPa nas diferentes energias de compactação. Já as amostras ensaiadas após 14 dias de secagem, apresentaram um aumento expressivo no RCS, com valores variando de 2550 a 3356 kPa.

A secagem dos corpos de prova promoveu um aumento de 54 vezes o valor de RCS na energia normal de compactação, 56 vezes na energia intermediária e 35 vezes na energia modificada. Estes resultados podem ser explicados pelo fenômeno de sucção matricial. De acordo com Villar (2002), a sucção dos solos pode ser definida como uma quantidade energética para avaliar sua capacidade de reter água. A sucção matricial está relacionada à pressão negativa da água intersticial, devido aos efeitos da capilaridade e das forças de adsorção, variando de acordo com as partículas e o arranjo estrutural.

Portanto, entende-se que a sucção matricial atua confinando a amostra internamente, já que os meniscos promovem ligações entre as partículas. Os resultados dos ensaios de RCS servem de alerta para a influência da sucção, condicionada pelo teor de umidade, sobre as ADF. Ensaios em campo ou laboratório em que a saturação do material não é garantida podem causar superestimativas da resistência e rigidez do material.

Vale salientar que em areias virgens os meniscos também podem oferecer certa estabilidade, mas os valores de RCS tendem a ser mais baixos. De acordo com os estudos de Heidemann et al. (2021), a inclinação das curvas de sucção da ADF são mais acentuadas quando comparada a curvas para solos siltosos e arenosos apresentadas por Fredlund e Xing (1994), o que indica que na ADF as sucções são mais sensíveis a mudanças de grau de saturação do que em materiais de referência, provavelmente devido ao melhor arranjo de partículas com poros menores.

Em todos os ensaios de compressão simples, observou-se um modo de ruptura frágil, com formação de um plano de ruptura bem definido. Em geral o ângulo formado entre o plano de ruptura e o plano onde atua a tensão principal foi de aproximadamente 20° (Figura 46).

Figura 46 – Aspecto da superfície de ruptura do corpo de prova em compressão simples

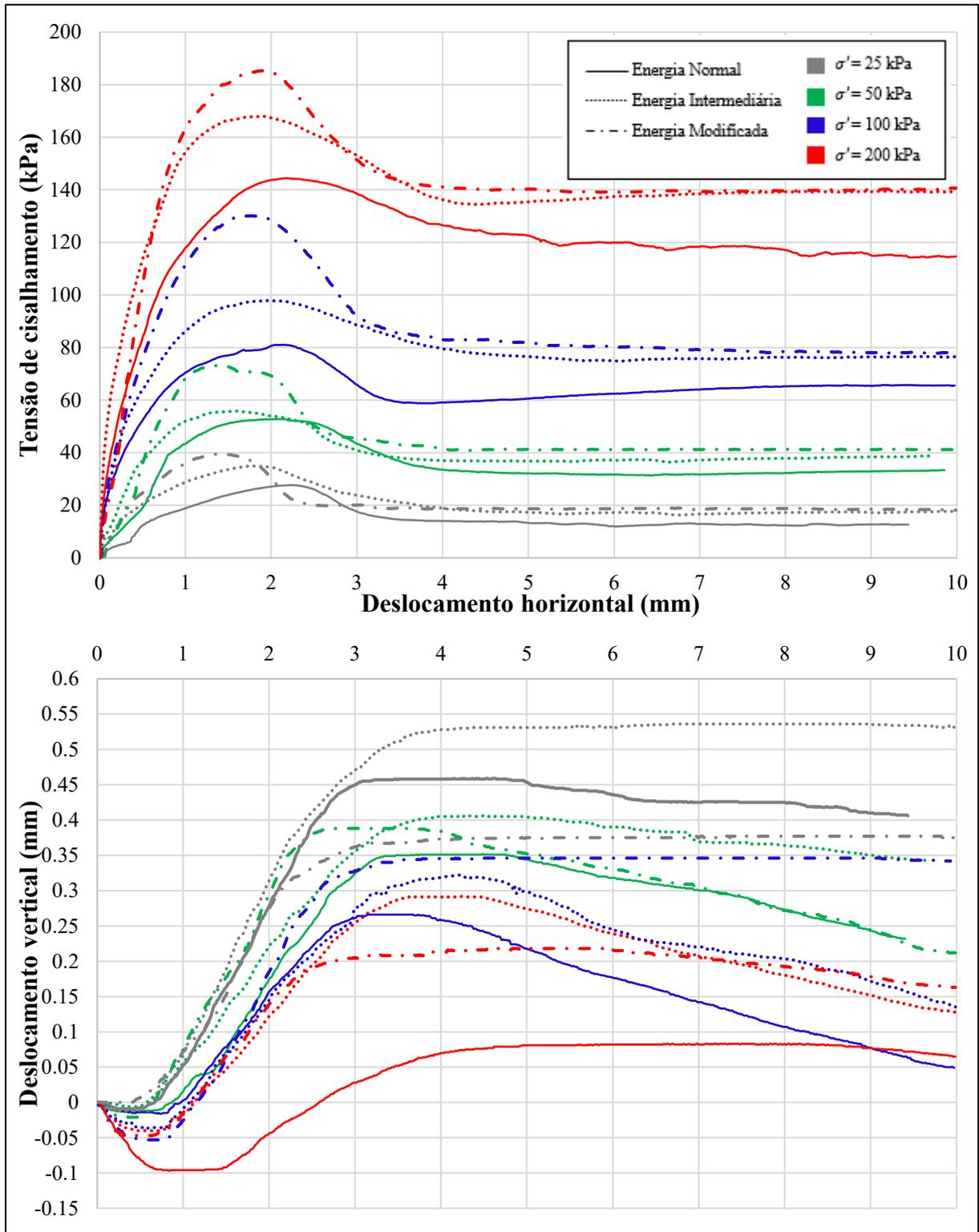


Fonte: Autora (2020).

4.2.4. Cisalhamento Direto

A Figura 47 apresenta os resultados dos ensaios de cisalhamento direto realizados em corpos de provas submetidos à diferentes energias de compactação, sendo testados imediatamente após a moldagem (etapa de consolidação).

Figura 47 - Curvas tensão *versus* deformação e curvas de deslocamento vertical *versus* deslocamento horizontal



Fonte: Autora (2021).

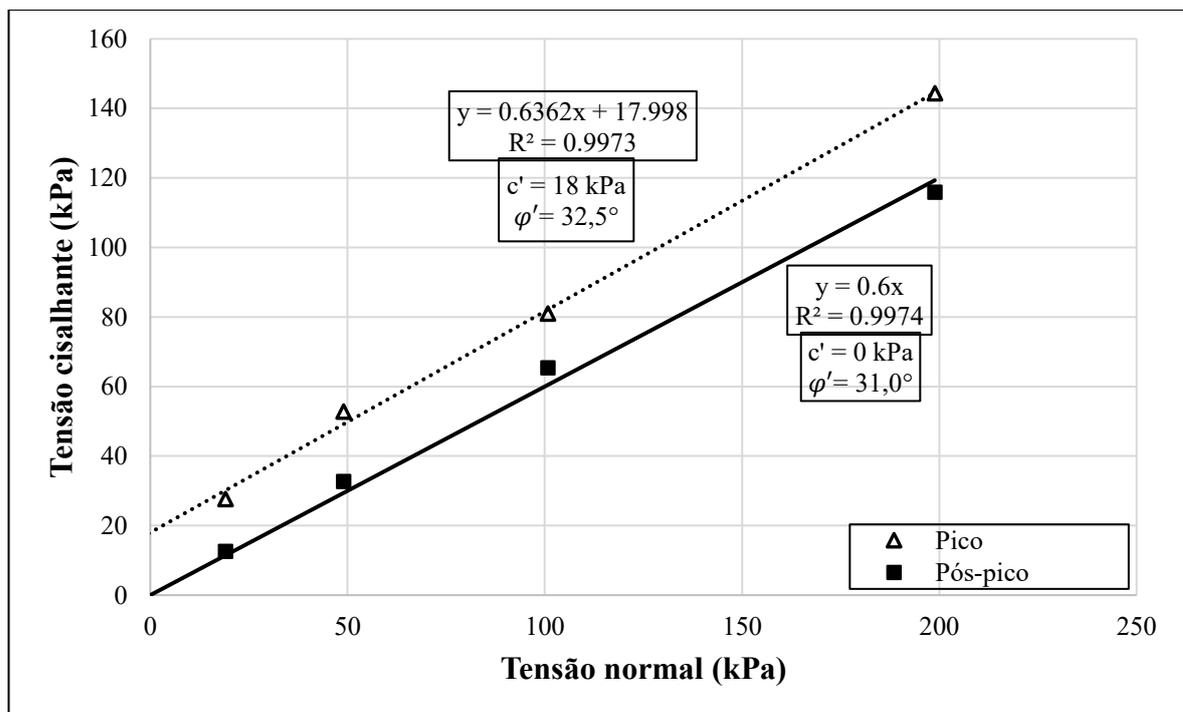
Pode-se perceber que todas as amostras apresentaram picos de resistência ao cisalhamento atrelados à expansão dos corpos de prova. É notório que a resistência aumenta e

os picos ficam mais expressivos com o aumento da energia de compactação utilizada para moldagem das amostras.

Os picos de resistência não estão relacionados à coesão do solo, mas sim ao fenômeno de dilatância, abordado no item 2.7.5 deste trabalho. Através da curva de deformação vertical *versus* deformação horizontal, percebe-se que as deformações são inicialmente contrativas, mas passam a ser dilatantes à medida que se mobiliza a tensão cisalhante. Devido ao confinamento da amostra, as partículas tendem a se encaixar melhor no estágio inicial do ensaio. No entanto, para que ocorra o cisalhamento do solo, os grãos precisam se desencaixar, fazendo-se necessário valores adicionais de tensão cisalhante, que origina os picos de resistência para desorganização do arranjo dos grãos. Em geral, a máxima taxa de dilatação coincide com o pico de resistência. O comportamento dos corpos de prova ensaiados apresentou fragilidade, sendo que após o pico a tensão cisalhante cai expressivamente.

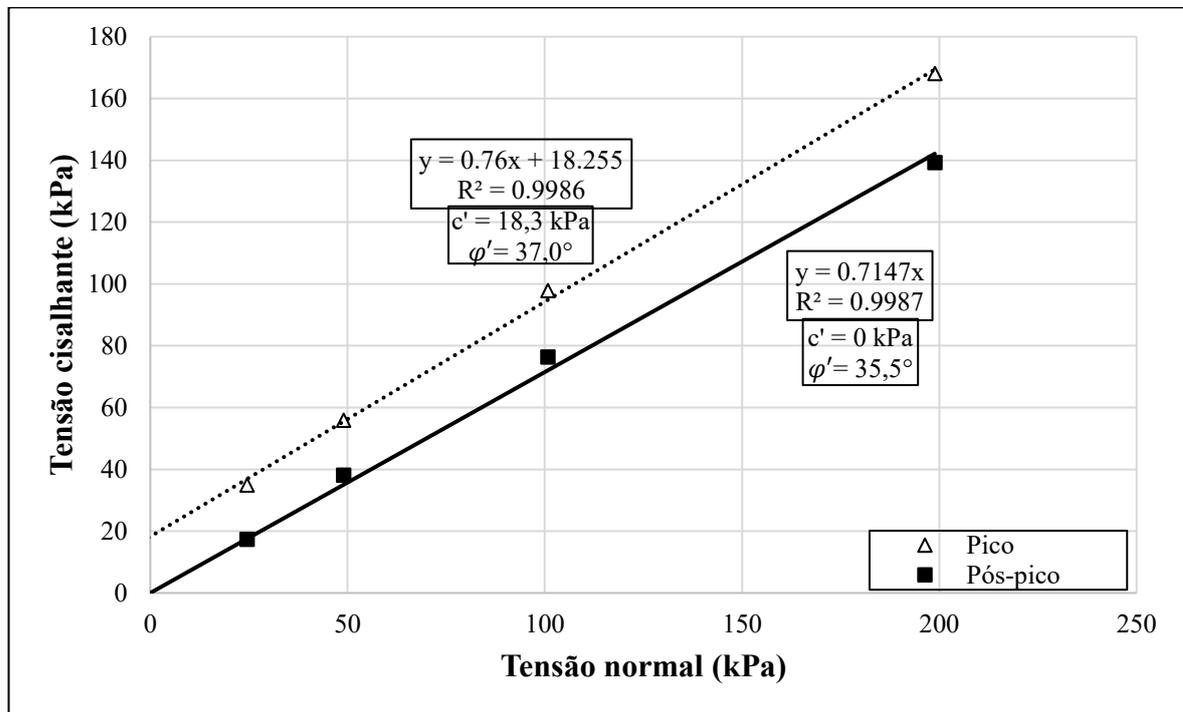
As Figuras 48, 49 e 50 apresentam as envoltórias de resistência ao cisalhamento em condições de pico e pós-pico nas três energias de compactação ensaiadas. A resistência ao cisalhamento de pós-pico foi determinada através da média das tensões de cisalhamento com deslocamentos horizontais entre 8 e 10 mm.

Figura 48 - Envoltórias de resistência para amostra submetida a energia normal de compactação



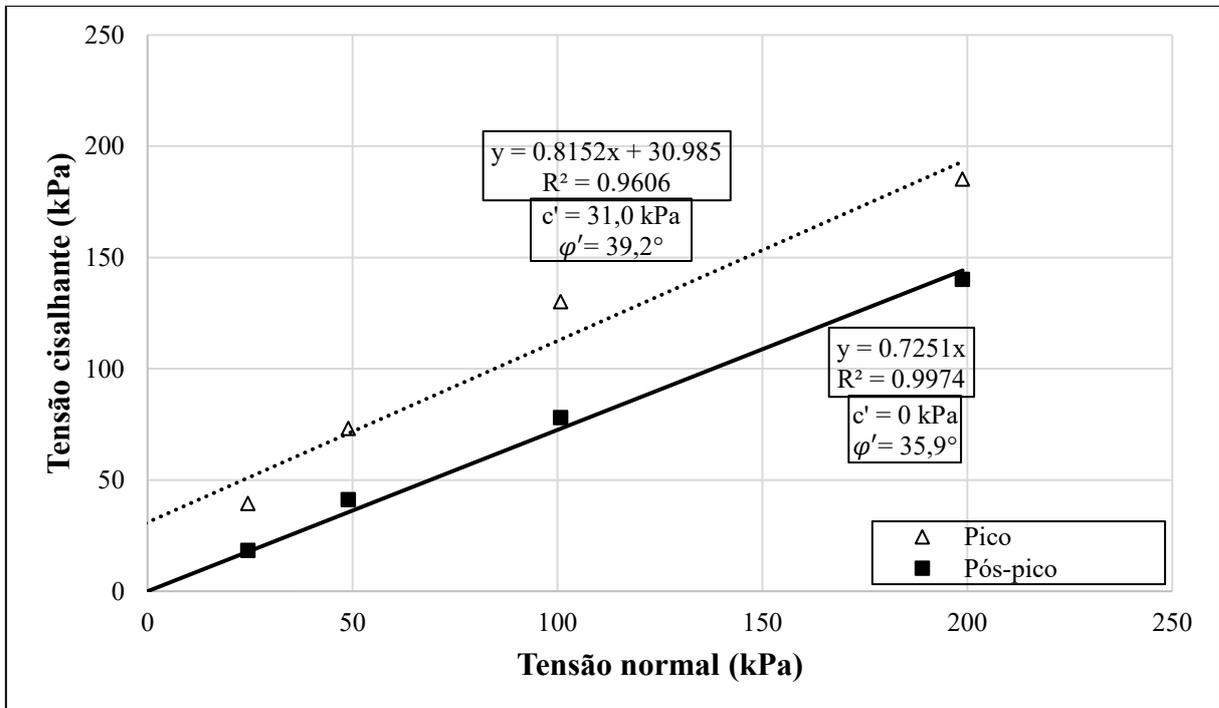
Fonte: Autora (2021).

Figura 49 - Envoltórias de resistência para amostra submetida a energia intermediária de compactação



Fonte: Autora (2021).

Figura 50 - Envoltórias de resistência para amostra submetida a energia modificada de compactação



Fonte: Autora (2021).

Pode-se perceber que nas envoltórias de pico, existe a presença de um intercepto coesivo. Esta situação ocorre devido à quantidade de energia mobilizada para que aconteça o cisalhamento, que é representada pelos picos nas curvas de tensão *versus* deslocamento horizontal. Não se constitui coesão verdadeira, portanto.

O ângulo de atrito e o intercepto coesivo aumentam com a energia de compactação. Nas condições de pico, o ângulo de atrito variou de 32,5° a 39,2°, e o intercepto coesivo entre 18 e 31 kPa. Já nas condições de pós-pico o ângulo de atrito variou de 31° a 35,9° e os resultados não apresentaram intercepto coesivo. Além disso, pode-se perceber que o aumento no ângulo de atrito da energia intermediária para modificada não foi expressivo nas condições de pós-pico. Com o intuito de facilitar a visualização dos resultados, a Tabela 19 apresenta os valores de ângulo de atrito e intercepto coesivo obtidos nos ensaios.

Tabela 19 - Ângulos de atrito e interceptos coesivos

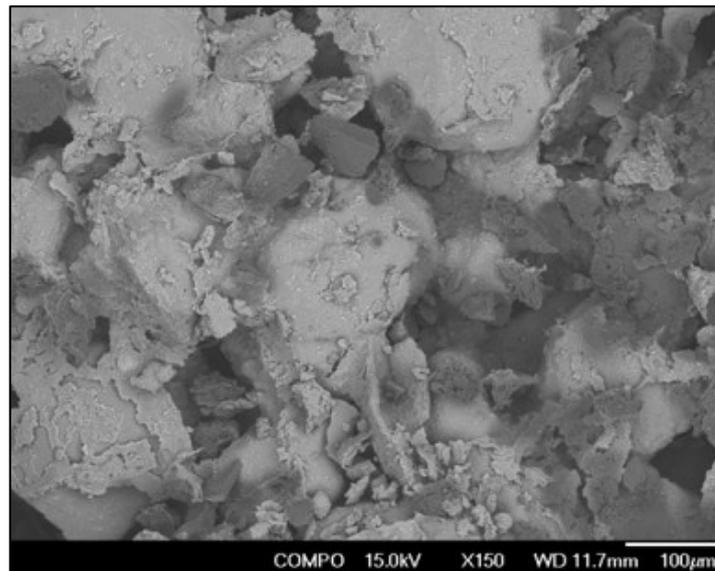
Energia	Condição	ϕ' (°)	c' (kPa)
Normal	Pico	32,5	18,0
	Pós-pico	31,0	0,0
Intermediária	Pico	37,0	18,3
	Pós-pico	35,0	0,0
Modificada	Pico	39,2	31,0
	Pós-pico	35,9	0,0

Fonte: Autora (2021).

Para a aplicação da ADF em projetos de pavimentação, deve-se considerar que, apesar de um melhor comportamento geotécnico obtido com maiores energias de compactação, há uma considerável redução do ângulo de atrito nas situações de pós-pico. Por outro lado, na energia normal de compactação essa diminuição das tensões cisalhantes mobilizadas para deslocamentos além do pico é muito menos significativa.

Foram realizadas imagens por MEV da superfície do cisalhamento obtida com energia normal de compactação e tensão normal efetiva de 200 kPa (Figura 51). O resultado mostra uma superfície de ruptura áspera e evidencia a presença de finos aderidos aos grãos de areia. De acordo com Thevanayagam et al. (2002), percentuais de finos superiores a 15% tendem a reduzir o ângulo de atrito das areias, sendo que valores inferiores não costumam apresentar variações. Conforme apresentado no item 4.1, o percentual de finos na amostra da ADF é cerca de 10% da amostra total.

Figura 51 - MEV da superfície de ruptura de um corpo de prova submetido ao ensaio de cisalhamento direto

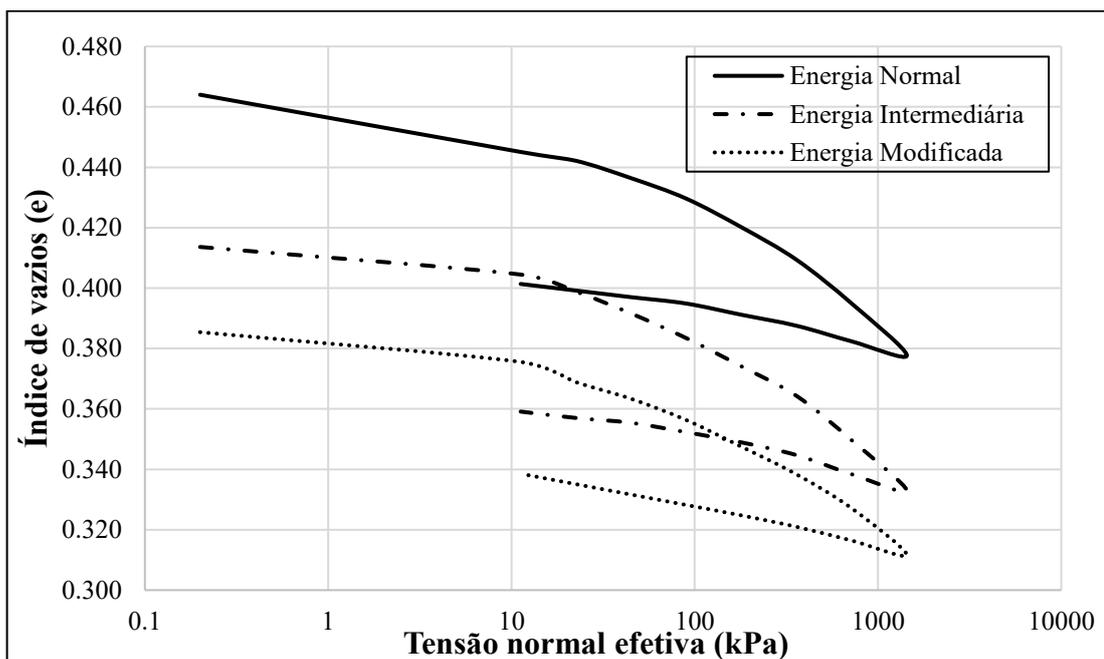


Fonte: Autora (2021).

4.2.5. Compressão confinada unidimensional

O ensaio de compressão confinada unidimensional foi realizado com a ADF nas três energias de compactação (normal, intermediária e modificada). A Figura 52 apresenta as curvas de tensão normal *versus* índice de vazios obtidas para os três ensaios.

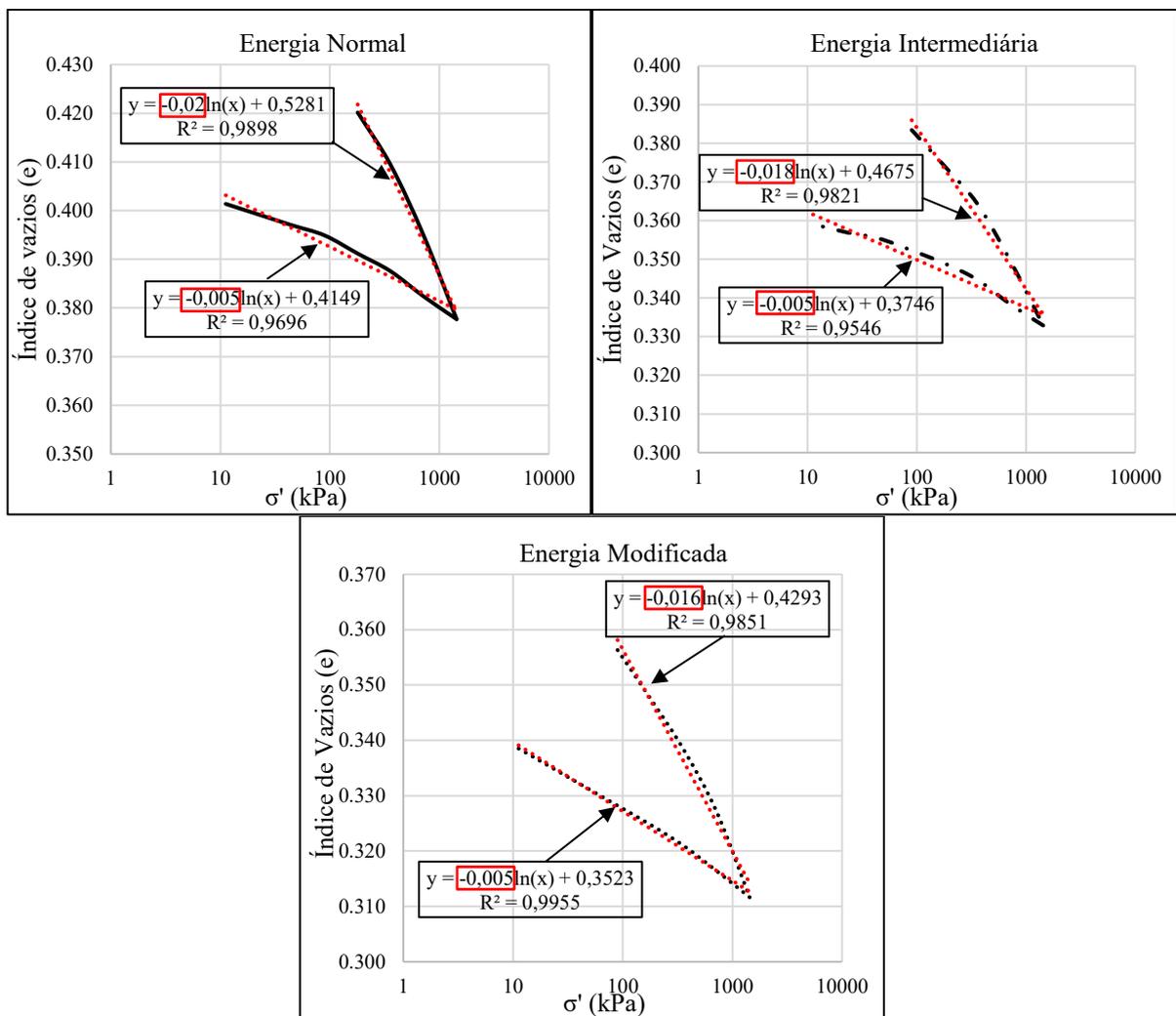
Figura 52 - Curvas obtidas no ensaio de compressão confinada



Fonte: Autora (2021).

Em análise às curvas apresentadas na Figura 52, pode-se perceber que a energia aplicada aos corpos de prova pouco influencia na compressibilidade da ADF, uma vez que as curvas são quase que paralelas entre si. As curvas apresentadas na Figura 53 indicam os coeficientes angulares, os quais foram obtidos por meio de regressão linear. Pode-se perceber que os valores do coeficiente de compressão no ramo virgem (λ) tem uma leve diminuição com o aumento da energia, ao passo que o coeficiente de descompressão (C_d) se mantém igual nas três energias ensaiadas.

Figura 53 - Obtenção dos coeficientes λ e C_d



Fonte: Autora (2021).

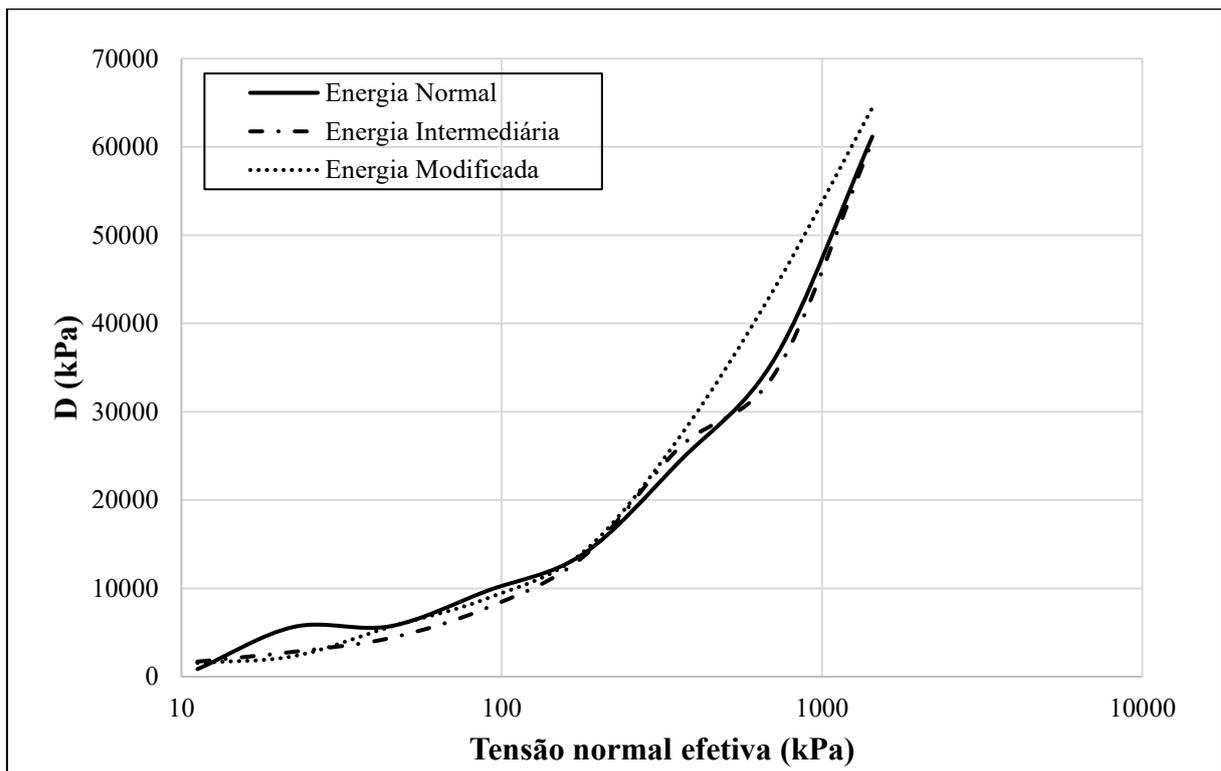
Com o intuito de organizar as informações, a Tabela 20 apresenta um resumo com os valores dos coeficientes obtidos para cada energia.

Tabela 20 - Coeficientes de compressão e descompressão

Energia	λ	C_d
Normal	0,020	0,005
Intermediária	0,018	0,005
Modificada	0,016	0,005

Fonte: Autora (2021)

O módulo edométrico (D) permite quantificar a rigidez das amostras submetidas ao ensaio de compressão confinada. Os valores foram determinados para cada etapa de carregamento, por meio da razão $\Delta\sigma_v'/\Delta\varepsilon_v$. A Figura 54 mostra as curvas σ_v' versus D obtida para cada ensaio.

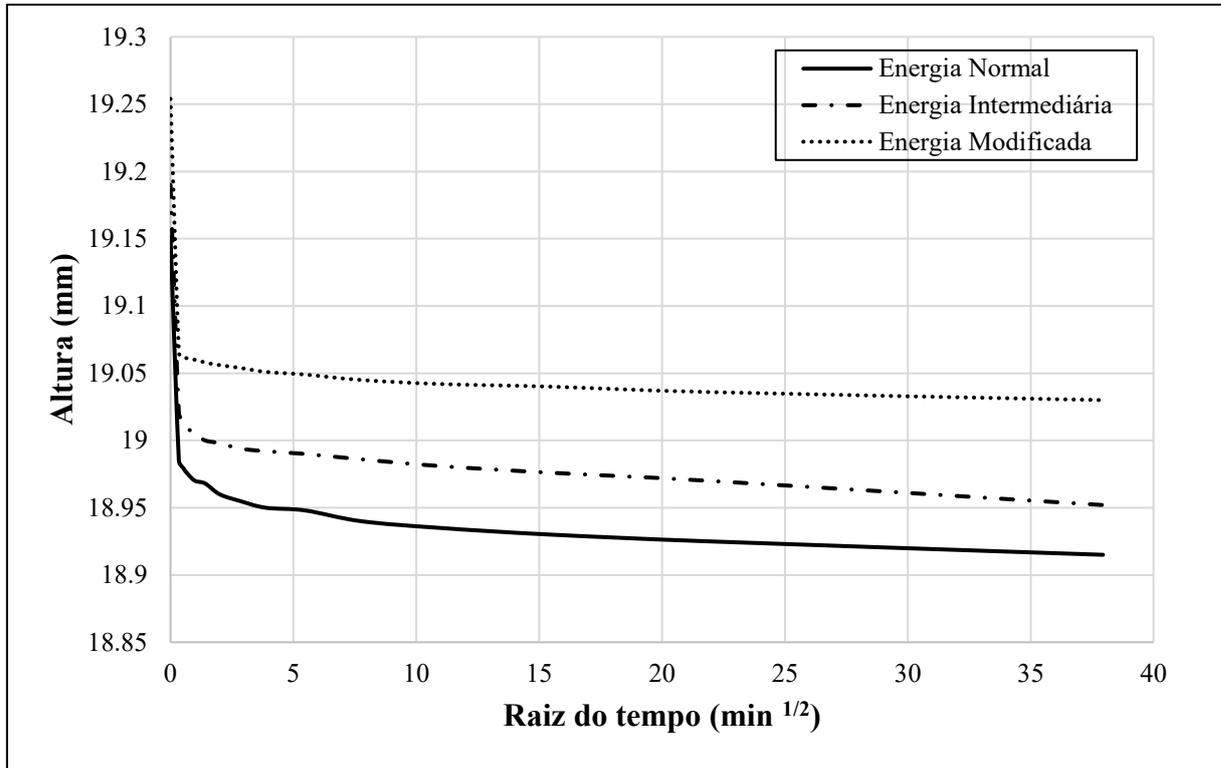
Figura 54 - Curvas σ_v' versus D

Fonte: Autora (2021).

Em análise às curvas apresentadas na Figura 54, pode-se perceber que a rigidez cresce à medida que aumenta a tensão normal efetiva, não apresentando indícios de quebra de grãos ou colapso nas amostras ensaiadas. Além disso, percebe-se que a energia de compactação possui pouca influência na rigidez da ADF.

A fim de verificar o comportamento de variação de altura dos CPs ao longo do tempo, plotou-se a raiz do tempo *versus* altura dos CPs para um mesmo estágio de carga (1500 kPa) (Figura 55).

Figura 55 - Variação da altura do corpo de prova pelo tempo



Fonte: Autora (2021).

Observa-se que as deformações ocorrem expressivamente nos primeiros 30 minutos da aplicação da carga, após este período as variações de alturas são bem menos expressivas. Além disso, com o aumento da energia houve uma menor deformação dos CPs.

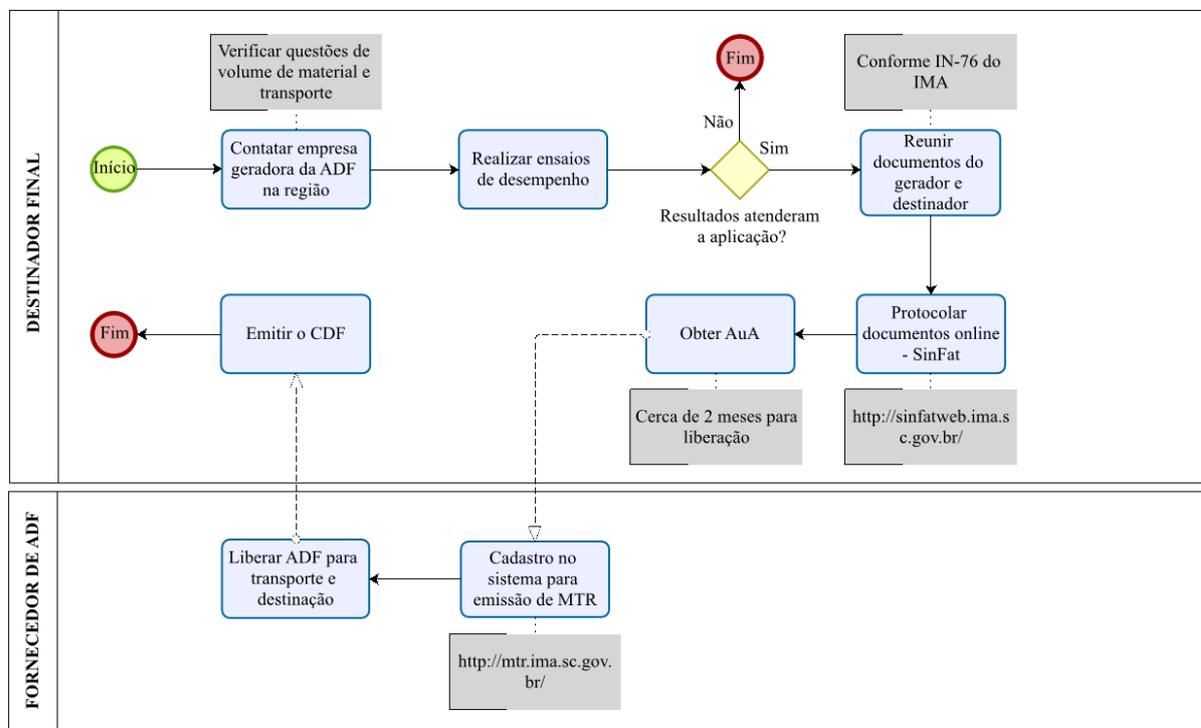
5. LICENÇAS AMBIENTAIS PARA UTILIZAÇÃO DA ADF

No item 2.5.1 deste trabalho foram apresentados os trâmites para obtenção da AuA pelos geradores da ADF e para os interessados em sua reutilização no estado de Santa Catarina. Neste capítulo serão apresentados alguns critérios e informações importantes para obtenção da licença, que foram analisados e pesquisados junto a uma empresa geradora de ADF.

Em reuniões realizadas junto aos colaboradores da empresa fornecedora de ADF, foi informado que os ensaios de massa bruta, solubilizado, lixiviado e laudos ecotoxicológicos, que são exigidos para obtenção da AuA, são realizados a cada seis meses em todos os pontos geradores. Esta informação é de grande relevância, visto que facilita e agiliza o processo para a obtenção da AuA.

Muitas vezes este resíduo não é utilizado por falta de conhecimento e pré-conceitos relacionados ao tema. Este trabalho teve justamente o intuito de unir a parte técnica com a legal para dar suporte completo à efetiva utilização deste material. Para tanto, foi elaborado um fluxograma que contém o passo a passo para obtenção da AuA (Figura 56).

Figura 56 - Trâmites para obtenção da AuA



Fonte: Autora (2021).

Primeiramente o requerente deve entrar em contato com uma empresa geradora de ADF na região, onde serão alinhadas questões referentes à aplicação, volume de material necessário e transporte. O custo com o licenciamento ambiental, na categoria de AuA é de R\$64,81 (valor referente ao ano deste trabalho). Sendo os demais custos definidos mediante a negociação dos interessados.

A depender da aplicação desejada para a ADF, pode-se optar por realizar alguns ensaios de desempenho a fim de verificar se os parâmetros atendem ao uso. Caso o resultado seja positivo, devem juntar os documentos conforme IN-76 do IMA, também apresentado neste trabalho no item 2.5.1.

O protocolo ocorre de maneira online através do Software de Licenciamento Ambiental *Web* (SinFAT *Web*), que pode ser acessado através do seguinte link: <http://sinfatweb.ima.sc.gov.br/>. Neste portal o empreendedor pode efetuar solicitações de formalização de caracterização de empreendimentos (FCEI), atualização de dados cadastrais, visualizar documentos já enviados e acompanhar pedidos de licenciamento. Qualquer pessoa que tenha um CPF ou CNPJ e um empreendimento que necessite de uma caracterização poderá utilizar o sistema. A seguir serão apresentados o passo a passo que o requerente deverá se basear para obtenção da AuA:

- a) Fazer um cadastro no portal e registrar o empreendimento;

Há um manual que apresenta os detalhes para esta etapa, o qual pode ser acessado através do seguinte link: https://consultas.ima.sc.gov.br/midia/manual_sf_web_v_1.1.pdf;

- b) Após o cadastro do empreendimento deve ir em “novo requerimento” e “selecionar” o empreendimento cadastrado, conforme indicado na Figura 57;

Figura 57 - Novo requerimento

Dados Empreendedor

Novo Requerimento

Meus Dados

Meus Empreendimentos

Meus Pedidos

Documentos Emitidos

Enviar Documentos Digitais

Cadastro de empreendimento - Etapa 1 de 5

⚡ Caso já tenha um empreendimento cadastrado, e queira fazer um novo requerimento nesse mesmo empreendimento, use a lista de e requerimento em um empreendimento que não está cadastrado ainda, clique no botão "Novo empreendimento" abaixo.

Quando um licenciamento, ou deseje fazer um

Novo empreendimento

Pesquisar Empreendimento

Número do Processo do Empreendimento:

Número do FCEI:

Pesquisar

Relação dos empreendimentos cadastrados

CPF/CNPJ	Razão Social	Endereço	Opções
			Selecionar

Fonte: Autora (2021).

- c) Selecionar o tipo de requerimento – licenciamento ambiental, conforme apresentado na Figura 58;

Figura 58 – Modalidades de licenciamento

Selecione o tipo de requerimento que deseja do IMA.

Empreendimento

Licenciamento Ambiental >

Exploração florestal >

Queima Controlada >

Manifestação sobre localização do imóvel >

Levantamento, Manejo, Monitoramento e Salvamento de Fauna >

Atividade não licenciável >

Reconhecimento de laboratório >

Certidão de Anuência - Rios públicos >

Fonte: Autora (2021).

- d) Incluir o código do CONSEMA 98/2017 referente a atividade – 71.60.10, conforme apresentado na Figura 59;

Figura 59 - Pesquisa de atividades

Pesquisa de atividade

Atividades CONSEMA

Código Consema:
71.60.10 Utilizar pontos como descrito na Resolução CONSEMA. Ex. 01.01.01

Descrição:

Pesquisar

Foi encontrada 1 atividade

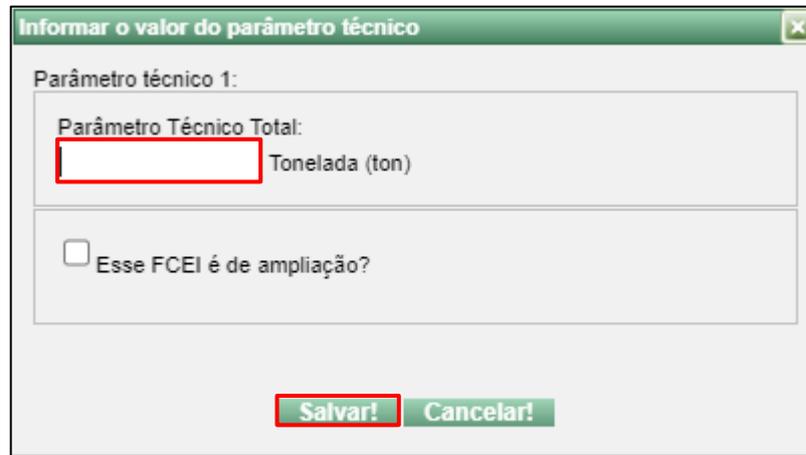
Lista de Atividades

Cod. Consema	Descrição	Tipologia
71.60.10	UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS CLASSES I, IIA OU IIB COMO INSUMOS NA AGRICULTURA, SILVICULTURA OU EM PROCESSOS INDUSTRIAIS OU CONSTRUTIVOS	ATIVIDADES DIVERSAS - RSI

Fonte: Autora (2021).

- e) Informar o parâmetro técnico – quantidade de material a ser utilizado, conforme apresentado na Figura 60;

Figura 60 - Parâmetro técnico



Informar o valor do parâmetro técnico

Parâmetro técnico 1:

Parâmetro Técnico Total:
[] Tonelada (ton)

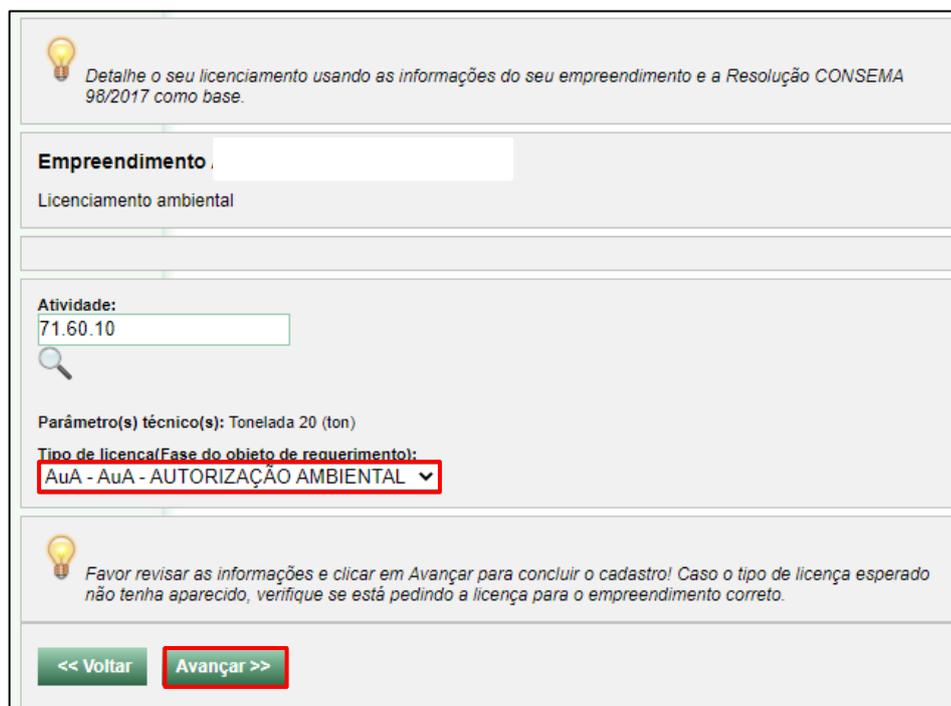
Esse FCEI é de ampliação?

Salvar! Cancelar!

Fonte: Autora (2021).

- f) Escolher o tipo de licença para a atividade – AuA, conforme apresentado na Figura 61;

Figura 61 - Tipo de licença



 *Detalhe o seu licenciamento usando as informações do seu empreendimento e a Resolução CONSEMA 98/2017 como base.*

Empreendimento []
Licenciamento ambiental

Atividade:
71.60.10



Parâmetro(s) técnico(s): Tonelada 20 (ton)

Tipo de licença (Fase do objeto de requerimento):
AuA - AuA - AUTORIZAÇÃO AMBIENTAL ▾

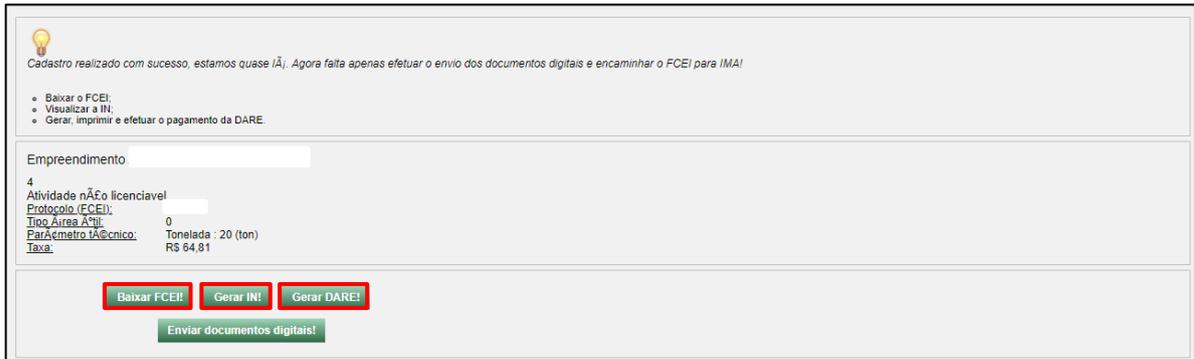
 *Favor revisar as informações e clicar em Avançar para concluir o cadastro! Caso o tipo de licença esperado não tenha aparecido, verifique se está pedindo a licença para o empreendimento correto.*

<< Voltar Avançar >>

Fonte: Autora (2021).

- g) Gerar os documentos: formulário de caracterização do empreendimento (FCEI), IN n° 76 e o documento de arrecadação de receitas estaduais (DARE), conforme apresentado na Figura 62;

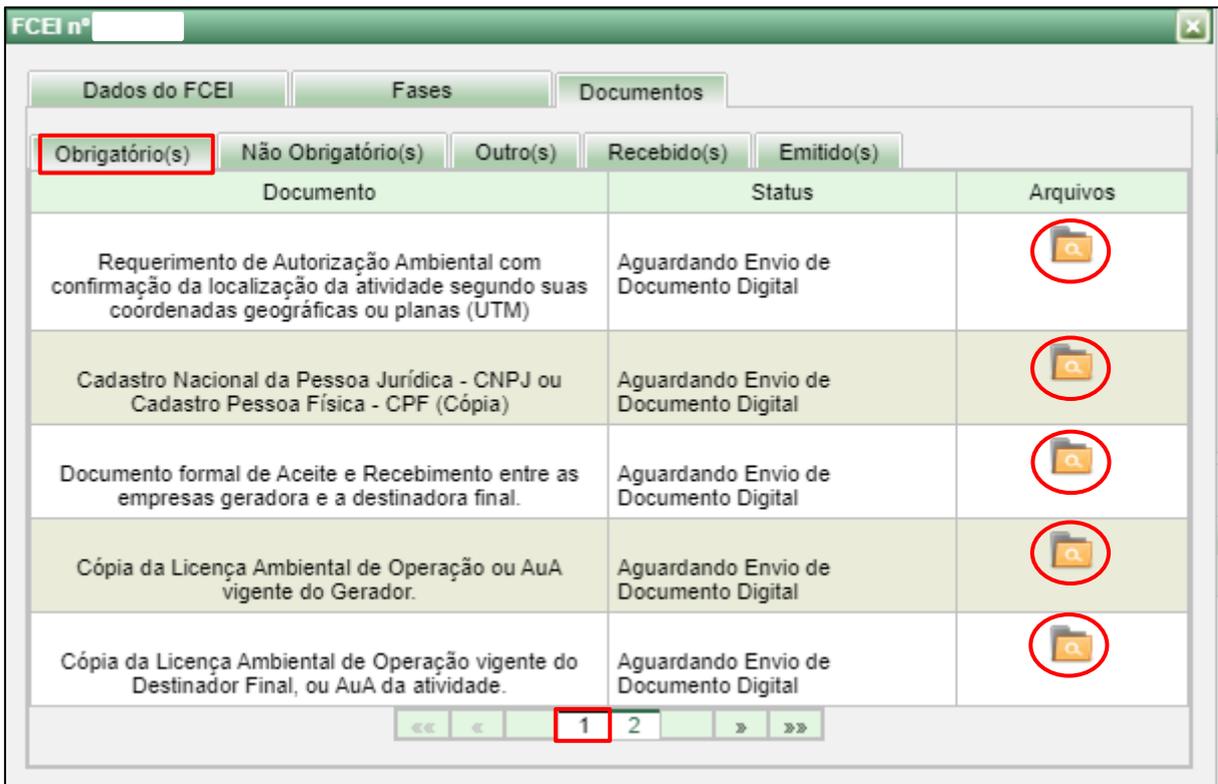
Figura 62 - Gerar documentos



Fonte: Autora (2021).

- h) Anexar todos os documentos, conforme apresentado na Figura 63 e Figura 64;

Figura 63 - Lista de documentos digitais a serem enviados



Fonte: Autora (2021).

Figura 64 - Lista de documentos digitais a serem enviados

FCEI nº		
Dados do FCEI	Fases	Documentos
Obrigatório(s)	Não Obrigatório(s)	Outro(s)
Recebido(s)	Emitido(s)	
Documento	Status	Arquivos
Projeto de Utilização do Resíduo com descrição do processo de utilização e obtenção do produto final, ou Resolução do órgão competente (CONSEMA, CONAMA, MAPA) ou Lei Estadual que regulamente a utilização do resíduo no processo pretendido.	Aguardando Envio de Documento Digital	

«« « 1 2 » »»

Fonte: Autora (2021).

- i) Aguardar o retorno da AuA (cerca de 2 meses). Sendo que o status pode ser acompanhado através do SinFAT.

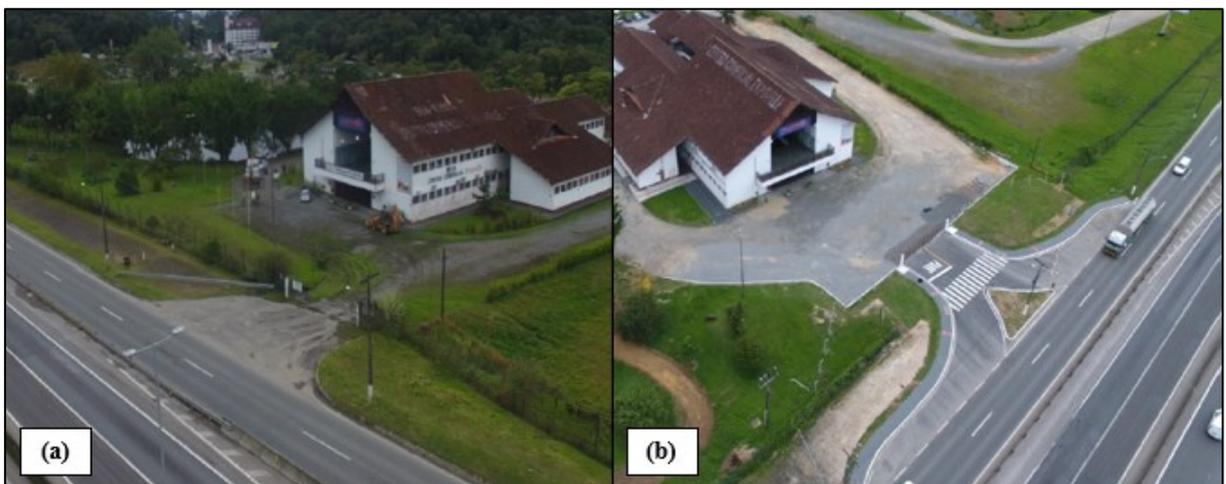
Após a obtenção da AuA o gerador da ADF deve elaborar o Manifesto de Transporte de Resíduos (MTR) para o controle de transporte da ADF, de modo a atender a Lei nº 15.251, de 3 de agosto de 2010, a portaria nº 21 de 25 de janeiro de 2019 possui maiores informações para emissão do MTR. Além do MTR, a Lei solicita o Certificado de Destinação Final (CDF), onde os destinadores devem atestar a efetiva destinação dos resíduos recebidos. Ainda, estabelece que os geradores, destinadores e transportadores de resíduos industriais ficam obrigados a apresentar anualmente, ao órgão ambiental competente, uma declaração formal contendo as quantidades de resíduos gerados, armazenados, transportados e destinados. Os modelos dos três documentos encontram-se anexos a referida Lei.

6. ANÁLISE DE CUSTOS

A empresa Haas Engenharia forneceu o projeto *as built* da obra de implantação de acesso ao Centro Comercial Expoville, localizado às margens da BR-101/SC, km 038+690m, sentido Norte, no município de Joinville/SC.

A obra compreendeu a execução de drenagem, estrutura do pavimento contemplando o emboque de entrada e saída de veículos, implantação de passeios e adequação da sinalização viária. A Figura 65 apresenta os registros antes e após a finalização da obra.

Figura 65 - Situação do acesso (a) antes e (b) depois das obras



Fonte: Adaptado do relatório *as built* fornecido pela empresa Haas Engenharia (2021).

Para o dimensionamento do pavimento flexível utilizou-se o método de dimensionamento do DNER. Primeiramente, foi realizado uma contagem de tráfego de 16 horas em 3 dias de operação do empreendimento. O ponto de contagem está apresentado na Figura 66 e os dados da contagem de tráfego estão apresentados na Tabela 21.

Figura 66 - Local de contagem de tráfego



Fonte: Adaptado de Google Earth (2019).

Tabela 21 - Contagem de tráfego

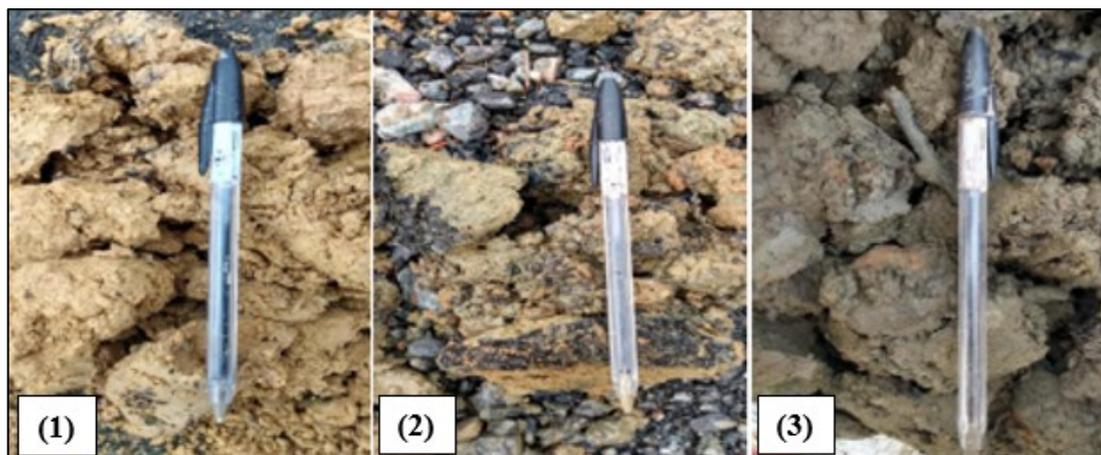
Dia	Veículos Leves		Ônibus	Caminhões	Caminhões reboque	Especiais	Total
	Moto	Carro	Convencional 2C	2C	2S2	6 eixos	
							
11/03/19	39	316	27	0	0	0	382
12/03/19	31	308	25	0	0	0	364
13/03/19	28	312	25	0	0	0	365

Fonte: Adaptado de relatório *as built* fornecido pela empresa Haas Engenharia (2021).

Para a determinação do número de operações do eixo padrão (N) foi considerado um horizonte de projeto de 10 anos e uma taxa de crescimento anual de 3%. Obteve-se, assim, um número N de $9,48 \times 10^4$.

Foram realizados ensaios no solo do subleito em três pontos, sendo encontrado um material com característica argilosa. A Figura 67 apresenta as amostras retiradas nos três pontos de coleta.

Figura 67 - Materiais do subleito



Fonte: Adaptado do relatório *as built* fornecido pela empresa Haas Engenharia (2021).

Para o correto dimensionamento da estrutura do pavimento, foi realizado ensaio de compactação, expansão e CBR com o solo extraído nos três pontos de coleta, sendo os resultados apresentados na Tabela 22.

Tabela 22 - Parâmetros obtidos para os solos do subleito

Amostra	$\gamma_{d,máx}$ (g/cm ³)	W _{ótima} (%)	Expansão (%)	CBR (%)
01	1,261	37,5	1,25	5,0
02	1,525	22,7	1,35	6,7
03	1,450	26,2	0,68	8,5

Fonte: Adaptado do relatório *as built* fornecido pela empresa Haas Engenharia (2021).

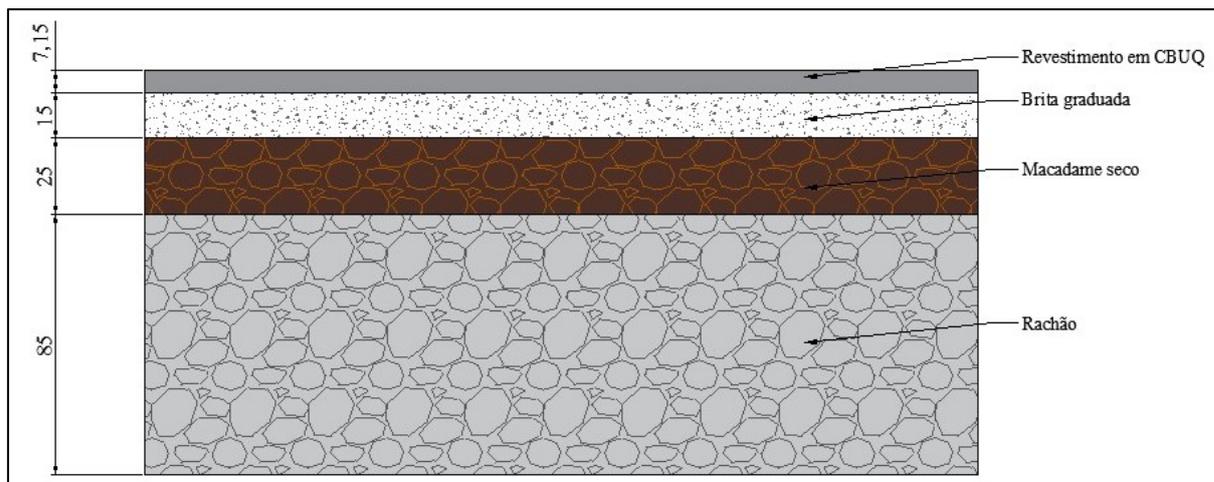
Com a definição do número N e considerando a condição mais crítica do solo do subleito (CBR de 5,0%), pode-se dimensionar as camadas do pavimento. A estrutura do pavimento obtida e os materiais aplicados em cada camada estão apresentados na Tabela 23 e Figura 68, já as etapas da pavimentação estão apresentadas na Figura 69.

Tabela 23 - Informações das camadas executadas

Camada	Material	Espessura (cm)	Volume solto (m ³)
Revestimento	CBUQ	7,15	-
Base	Brita graduada	15,0	77,70
Sub-base	Macadame seco	25,0	129,50
Reforço do subleito	Rachão	85,0	440,30

Fonte: Adaptado do relatório *as built* fornecido pela empresa Haas Engenharia (2021).

Figura 68 - Camadas do pavimento executado



Fonte: Autora (2021).

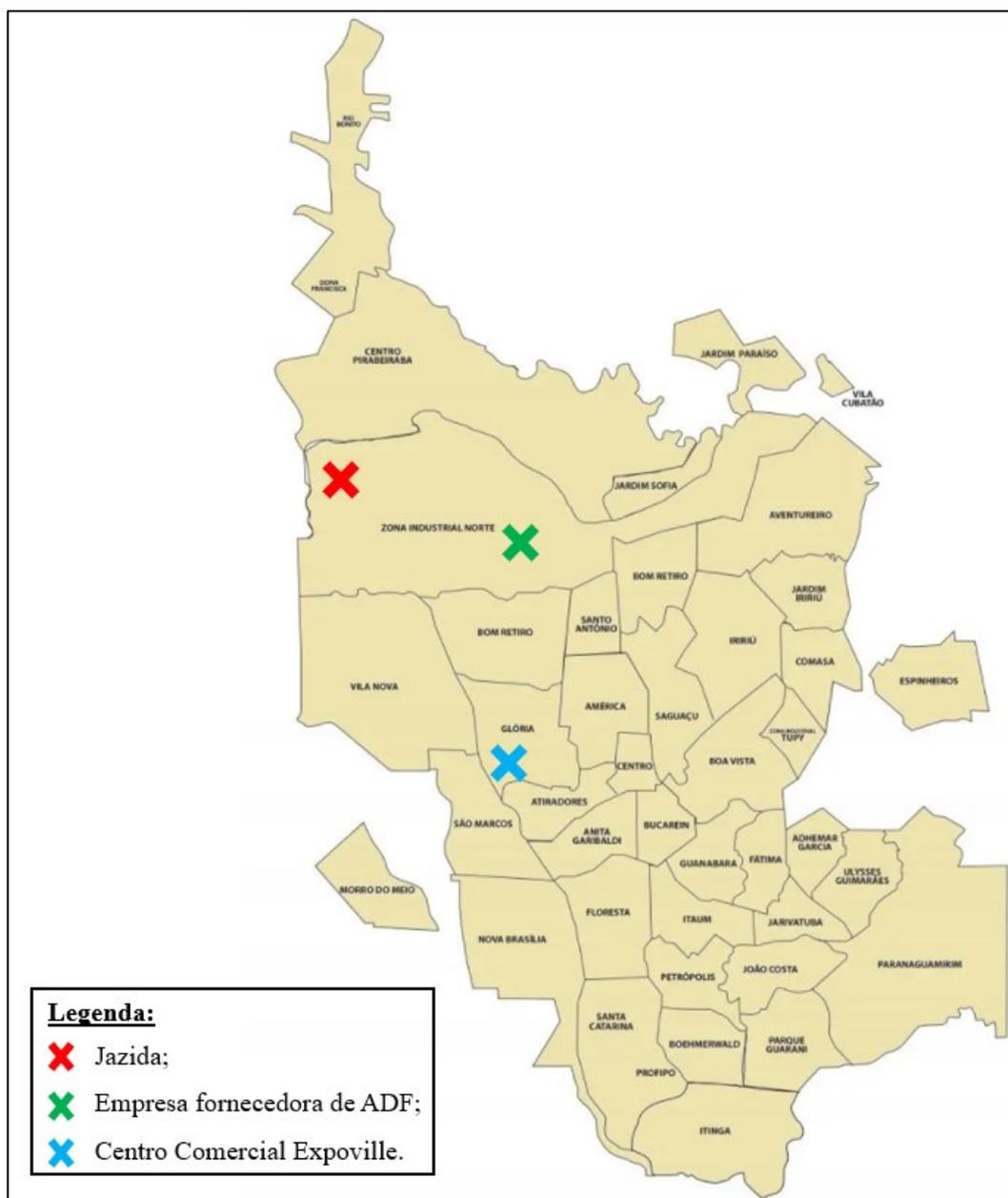
Figura 69 - Etapas da pavimentação (a) subleito; (b) execução da camada de reforço do subleito; (c) execução da camada de sub-base; (d) execução da camada de base



Fonte: Adaptado do relatório *as built* fornecido pela empresa Haas Engenharia (2021).

Com o intuito de realizar o comparativo entre os materiais utilizados na obra em questão com a ADF, fez-se o levantamento de custos relacionados aos materiais para cada situação. Sendo que o custo atribuído a utilização da ADF seria referente ao transporte do material e taxa para a obtenção da AuA. A Figura 70 apresenta a localização dos fornecedores dos materiais e do destino.

Figura 70 - Localização dos fornecedores e destino



Fonte: Autora (2021).

As distâncias entre os fornecedores dos materiais e o local de destino, bem como os valores por m³ ou tonelada de material transportado estão apresentados na Tabela 24. Vale

salientar que os valores de transporte do material proveniente da jazida são inferiores, visto não ser o produto do fornecedor. Por outro lado, quando se transporta ADF é necessário contratar uma empresa especializada no ramo de transporte, o que torna o valor mais elevado.

Tabela 24 - Distâncias e custo de transporte

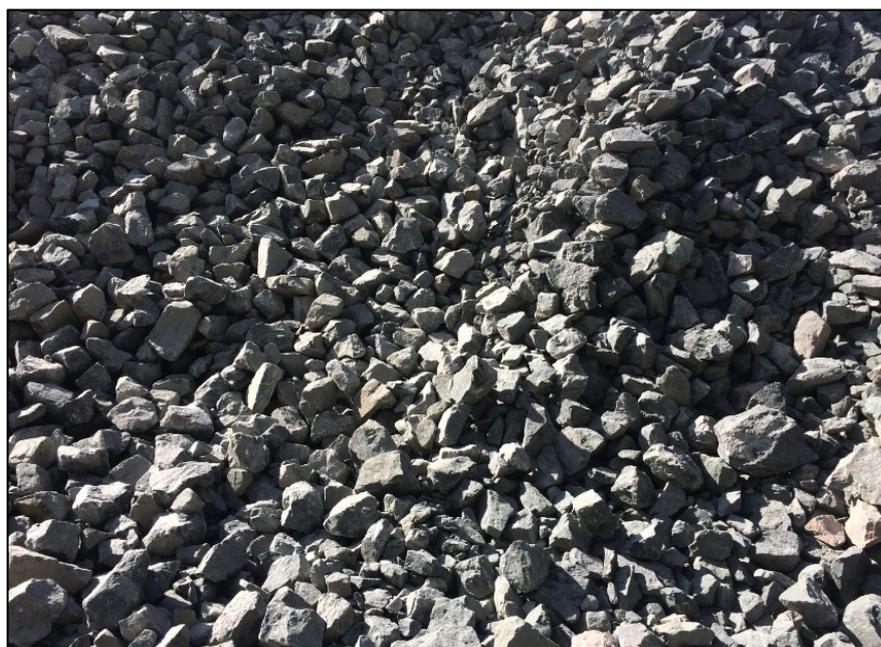
Fornecedor	Distância	Caminhão	Capacidade	Custo transporte
Jazida	10,0 km	Basculante	10 a 13 m ³	11,36 R\$/m ³
Empresa fornecedora de ADF	9,1 km	Basculante	5 a 6 ton	26,00 R\$/ton
		Roll on 625	15 a 18 ton	24,00 R\$/ton

Fonte: Autora (2021).

Conforme verificado no item 4.2.2 deste trabalho, a ADF estudada possui os parâmetros necessários para ser utilizada como material de sub-base de pavimentos flexíveis. Sendo que é possível também a aplicação da ADF em camadas de reforço de subleito, que exige um CBR superior ao solo do subleito e uma expansão menor ou igual a 1%.

A fim de realizar um comparativo de custos, foi orçado o valor do rachão (Figura 71) com uma empresa de mineração localizada na zona industrial norte de Joinville. O valor cobrado é de 47,00 R\$/m³.

Figura 71 – Rachão



Fonte: Autora (2021).

Para utilização da ADF na camada de reforço de subleito, as condições da aplicação de 100% ADF com energia normal de compactação atenderiam os parâmetros normativos. Visto que se obteve para estas condições um CBR de 15,5% e expansão de 0,11%, sendo o CBR maior que o do subleito (5,0%) e expansão menor que 1%.

Já para a utilização da ADF na camada de sub-base, as condições da aplicação de 100% ADF com energia intermediária de compactação atenderiam os parâmetros. Visto que se obteve um CBR de 32,9% e expansão de 0,07%, enquanto a norma DNIT 139/2010-ES solicita um $CBR \geq 20\%$ e expansão $\leq 1\%$.

Para realizar o comparativo volumétrico entre os materiais utilizados na obra e a ADF, é necessário considerar o empolamento e contração. De acordo com Mattos (2006), sempre que o solo ou rocha é retirado de sua posição original, ocorre uma mudança no posicionamento dos grãos, promovendo um aumento no volume de vazios, fenômeno físico denominado de empolamento. O empolamento varia com o tipo de solo ou rocha, grau de coesão do material e umidade do solo. De maneira geral, pode-se considerar que o empolamento é proporcional a quantidade de finos presente no material.

O empolamento não pode ser desconsiderado nos orçamentos. Sendo bastante importante no dimensionamento de frotas de equipamento, principalmente relacionado ao transporte (MATTOS, 2006). A Equação (11) apresenta o empolamento em termos volumétricos.

$$E = \frac{V_s}{V_c} - 1 \quad (11)$$

onde:

- E= empolamento (%);
- V_s = volume solto;
- V_c = volume medido no corte.

O oposto do empolamento é a contração, uma vez que o solo ocupa um menor volume quando submetido à compactação. Este valor também é expresso em porcentagem e deve ser considerado para execução de aterros (MATTOS, 2006). A Equação (12) apresenta a contração em termos volumétricos e a Equação (13) em termos de massa específica.

$$C = \frac{V_A}{V_c} \quad (12)$$

$$C = \frac{\gamma_c}{\gamma_A} \quad (13)$$

onde:

- C = contração (%);
- V_A = volume compactado;
- V_c = volume medido no corte;
- γ_c = massa específica no corte (*in situ*);
- γ_A = massa específica do material compactado.

6.1. COMPARATIVO DE CUSTOS

Neste item será apresentado um memorial de cálculo para obtenção do volume solto de ADF equivalente ao volume solto de rachão utilizado nas camadas de reforço do subleito e sub-base, bem como os custos envolvendo cada material.

a) Empolamento e contração para o rachão.

Segundo Matto (2006), o valor de empolamento e contração para uma rocha detonada, é de 50% e 90%, respectivamente.

b) Volume *in situ* do rachão.

Para camada de reforço de subleito:

$$V_c = \frac{V_s}{1 + E} = \frac{440,30}{1 + 0,5} = 293,53m^3$$

Para camada de sub-base:

$$V_c = \frac{V_s}{1 + E} = \frac{129,50}{1 + 0,5} = 86,33m^3$$

c) Volume de aterro do rachão.

Para camada de reforço do subleito:

$$V_A = V_c \cdot C = 293,53 \cdot 0,90 = 264,18m^3$$

Para camada de sub-base:

$$V_A = V_c \cdot C = 86,33 \cdot 0,90 = 77,70m^3$$

d) Volume de aterro da ADF.

Considerou-se o volume de aterro obtido para o rachão como o volume de aterro da ADF, sendo $264,18m^3$ para o reforço de subleito e $77,70m^3$ para a sub-base.

e) Massa específica *in situ* da ADF.

A Equação (14) refere-se à obtenção da massa específica *in situ*.

$$\gamma = \frac{\gamma_s \cdot (1 + w)}{1 + e} \quad (14)$$

onde:

- γ_s = massa específica aparente seca;
- w = umidade higroscópica;
- e = índice de vazios.

Tendo em vista que a ADF é um material de reuso e encontra-se no estado solto, considerou-se o índice de vazios máximo.

$$\gamma = \frac{2,62 \cdot (1 + 0,02)}{1 + 0,85} = 1,445 \text{ g/cm}^3$$

f) Massa específica da ADF compactada.

Conforme exposto no item 4.2.1 deste trabalho, obteve-se uma densidade específica seca máxima do material compactado na energia normal de 1,850 g/cm³ e de 1,870 g/cm³ para energia intermediária.

g) Contração da ADF.

Para energia normal:

$$C = \frac{1,445}{1,850} = 0,78$$

Para energia intermediária:

$$C = \frac{1,445}{1,870} = 0,77$$

h) Volume medido no corte da ADF.

Para camada de reforço de subleito:

$$V_c = \frac{V_A}{C} = \frac{264,18}{0,78} = 338,69 \text{ m}^3$$

Para camada de sub-base:

$$V_c = \frac{V_A}{C} = \frac{77,70}{0,77} = 100,91 \text{ m}^3$$

i) Volume de aterro ADF.

Como a ADF é um material de reuso, considerou-se o volume de corte igual ao volume solto, portanto V_C é igual a V_S .

Para camada de reforço de subleito:

$$V_S = 338,69m^3$$

Para camada de sub-base:

$$V_S = 100,91m^3$$

j) Volumes transportados.

Para camada de reforço de subleito:

$$V_{S\ ADF} = 338,69m^3$$

$$V_{S\ Rachão} = 440,30\ m^3$$

Para camada de sub-base:

$$V_{S\ ADF} = 100,91m^3$$

$$V_{S\ Rachão} = 129,50\ m^3$$

k) Comparativo de custos.

Conforme já mencionado anteriormente, os valores referentes a utilização da ADF estão relacionados ao transporte e emissão da AuA. Visando um menor custo de transporte, considerou-se a opção do caminhão Roll on 625, sendo o valor de 24 R\$/ton para a ADF. Além disso, é cobrado uma taxa para emissão da AuA de R\$ 64,81, irrisória frente ao valor do transporte e por isso desconsiderada no comparativo apresentado na Tabela 25.

Tabela 25 - Comparativo de custo para a camada de reforço de subleito e sub-base

Material	Un	Transporte (R\$/un)	Custo (R\$/un)	Qtd (un)		Valor (R\$)		Total (R\$)
				RS	SB	RS	SB	
ADF	ton	24,00	0	489,25	145,77	11.742,38	3.498,48	15.240,53
Rachão	m ³	11,36	47,00	440,30	129,50	25.695,91	7.557,62	33.253,53

Fonte: Autora (2021). (Un: unidade; Qtd: quantidade; RS: reforço de subleito; SB: sub-base).

Nota-se que a diferença entre o custo proporciona uma economia de 54%. No entanto, esse percentual pode ser ainda maior em casos de negociação do transporte com a empresa geradora da ADF, tendo em vista que o transporte seria realizado de qualquer forma para um aterro.

7. CONCLUSÃO

A ADF estudada foi classificada com um material mal graduado com grãos uniformes e com forma das partículas variando de subangular à arredondada. O percentual de finos na amostra é de cerca de 10%, sendo o restante correspondente a partículas do tamanho de areia.

As curvas de compactação em energia normal, intermediária e modificada mostraram que as amostras ensaiadas com 100% ADF tiveram valores inferiores de densidade seca máxima, sendo a mistura de 75% ADF e 25% solo residual de gnaiss as amostras que proporcionaram valores de densidade seca máxima superiores (exceto sob energia modificada). Um dos motivos pode estar relacionado com a composição granulométrica, onde a adição do solo residual de gnaiss permitiu um melhor preenchimento dos vazios com as partículas de menor diâmetro.

A capacidade de carga da ADF é fortemente influenciada pela energia de compactação, onde os maiores valores de CBR foram obtidos na energia modificada. Ainda, foi verificado que a ADF pura apresentou um melhor desempenho sob energia intermediária e modificada comparado às outras misturas. Outra vantagem da utilização da ADF pura refere-se à expansão, onde os percentuais obtidos foram irrisórios. Além disso, com os ensaios foi possível concluir que a ADF pura atende aos parâmetros para ser utilizada como material de reforço de subleito e sub-base de pavimentos.

Foi observado uma expressiva influência da energia de compactação e teor de umidade na resistência à compressão. Obtiveram-se valores de RCS na umidade ótima variando de 47 a 97 kPa para as diferentes energias. Já os corpos de provas ensaiados nas condições secas apresentaram um aumento na resistência, com valores variando de 2550 a 3356 kPa. Estes resultados alertam para a influência da sucção na ADF, o que pode ocasionar superestimativas de resistência e rigidez do material.

Os ensaios de cisalhamento direto revelaram que a ADF apresenta picos de força que são relacionadas com o comportamento dilatativo de areias densas. A energia de compactação aumenta a resistência ao cisalhamento de pico, já para grandes deslocamentos as três energias de compactação possuem comportamento bastante similar. Pode-se perceber que o ângulo de atrito e o intercepto coesivo aumentam com a energia de compactação, onde em condições de pico o ângulo de atrito variou de 32,5 a 39,2° e o intercepto coesivo de 18 a 31 kPa. Para as condições de pós-pico o intercepto coesivo é nulo e o ângulo de atrito variou de 31 a 35,9°.

O comportamento da ADF nos ensaios de compressão confinada demonstrou que a energia de compactação pouco influencia na compressibilidade e rigidez da ADF. Sendo que as deformações ocorrem expressivamente nos primeiros 30 minutos.

Os resultados deste estudo mostram que a ADF pode ser utilizada em camadas de pavimento, uma vez que atente aos parâmetros normativos. No entanto, é necessário ter um bom controle de compactação em campo, visto ser de grande relevância para a resistência do material. Sendo que energias de compactação baixas podem levar a um material com comportamento não interessante para a engenharia.

Foi possível concluir que a ADF possui viabilidade ambiental para aplicação, sendo que o método para a obtenção da AuA pode ser considerado simples. Quanto ao comparativo de custos em relação a uma obra de pavimentação já executada, a utilização da ADF se mostrou bastante vantajosa do ponto de vista econômico. Sendo que a situação mais crítica, onde o requerente seria o responsável pelos custos do transporte, promoveu uma economia de 54% em relação aos custos de materiais e transporte relacionados a obra em questão, considerando a substituição por ADF das camadas de reforço de subleito e sub-base.

7.1. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Tendo em vista o surgimento de um novo método de dimensionamento de pavimentos, método Medina, que considera como um dos principais parâmetros o Módulo de Resiliência (MR) dos materiais, sugere-se a realização de ensaios na ADF onde seja possível analisar o emprego deste subproduto nas camadas estruturais de um pavimento pelo novo método de dimensionamento.

REFERÊNCIAS

ABICHOU, T.; BENSON, C. H.; EDIL, T. B. Beneficial use of foundry by-products in highway construction. **Geotechnical Engineering for Transportation Projects**, ASCE, v. 1, p. 715–722, jul. 2004.

ADEGAS, R. G. **Perfil ambiental dos processos de fundição ferrosa que utilizam areias no estado do Rio Grande do Sul**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais)—Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

ALVES, B. S. Q. **Estudo da viabilidade ambiental da reutilização das areias descartadas de fundição**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) — Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D2435**. Standard test methods for one-dimensional consolidation properties of soils using incremental loading. 15 p. West Conshohocken: ASTM, 2011.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D3080**. Direct shear test of soils under consolidated drained conditions. 9 p. West Conshohocken: ASTM, 2011.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D3282**. Standar practice for classification of soils and soil-aggregate mixtures for highway construction purposes. 6 p. West Conshohocken: ASTM, 2015.

ARAGÃO, José Wellington Marinho; MENDES NETA, Maria Adelina Hayne. **Metodologia Científica**. Salvador: Universidade Federal da Bahia, Faculdade de Educação, Superintendência de Educação a Distância, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE FUNDIÇÃO. **Produção de fundidos mantém crescimento de 2,6% no ano**. 2019. Disponível em: <https://www.abifa.org.br/producao-de-fundidos-mantem-crescimento-de-26-no-ano/>. Acesso em: 15 out. 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE FUNDIÇÃO. **Produção de fundidos tem novo incremento em 2019**. 2020. Disponível em: <https://www.abifa.org.br/producao-de-fundidos-tem-novo-incremento-em-2019/>. Acesso em: 21 out. 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 6502**. Rochas e solos. 18 p. Rio de Janeiro: ABNT, 1995.

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 10004**. Resíduos sólidos – classificação. 71 p. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10005**. Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. 16 p. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10006**. Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. 3 p. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12024**. Solo-cimento – moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos - procedimento. 6 p. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

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 12957**. Geossintéticos – determinação das características de atrito. 12 p. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6458**. Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm – determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. 14 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.

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.

BASTOS, C. **Resistência ao cisalhamento dos solos**. [s. d.]. Apostila (Disciplina de Mecânica dos Solos) - Curso de Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, [s. d.].

BEELEY, P. R. **Foundry technology**. 2. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2001. 719 p.

BERNUCCI, L. B. et al. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: ABEDA, 2008.

BONET, I. I. **Valorização do resíduo de areia de fundição (RAF): incorporação nas massas asfálticas do tipo CBUQ**. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações: fundamentos**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC S.A., 1988.

CARNIN, R. L. P. et al. Desenvolvimento de peças de concreto (Paver) contendo areia descartada de fundição para pavimento intertravado. **Revista Pavimentação**, p. 56-67, out./nov./dez. 2010. Disponível em: <https://bityli.com/HA53V>. Acesso em: 30 nov. 2020.

CARNIN, R. L. P. **Reaproveitamento do resíduo de areia verde de fundição como agregado em misturas asfálticas**. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Setor de Ciências Exatas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

CASOTTI, B. P. et al. Indústria de fundição: situação atual e perspectivas. **BNDES Setorial**, n. 33, p. 121–162, mar. 2011.

CHELSEA CENTER FOR RECYCLING AND ECONOMIC DEVELOPMENT, UNIVERSITY OF MASSACHUSETTS LOWELL. **Characterization of foundry sand waste**. Chelsea, Massachusetts, 2000. 71 p.

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**. 2004. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) — Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

CRUZ, R. C. **Influência de parâmetros fundamentais na rigidez, resistência e dilatação de uma areia artificialmente cimentada**. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **ME 093**. Solos – determinação da densidade real dos grãos. 4 p. Rio de Janeiro: DNER, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA. **Manual de pavimentação**. 3 ed. Rio de Janeiro, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **ES 138**. Pavimentação: reforço de sub-leito. 7 p. Rio de Janeiro: DNIT, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **ES 139**. Pavimentação: sub-base estabilizada granulometricamente. 8 p. Rio de Janeiro: DNIT, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **ES 141**. Pavimentação: base estabilizada granulometricamente. 9 p. Rio de Janeiro: DNIT, 2010.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – EPA. **Foundry Sands Recycling**. 2007. Disponível em: <https://bityli.com/HUvj2>. Acesso em: 20 jun. 2020.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. **Foundry sand facts for civil engineers**. Washington, D. C., 2004. Disponível em: <https://www.fhwa.dot.gov/pavement/pubs/013791.pdf>. Acesso em: 19 nov. 2020.

FOPPA, D. **Análise de variáveis-chave no controle da resistência mecânica de solos artificialmente cimentados**. 2005. Dissertação (Pós-graduação em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

FREDLUND, D. G.; XING, A. Equations for the soil-water characteristic curve. **Canadian Geotechnical Journal**, n. 31, p. 521–532, mar. 1994.

GEDIK, A.; LAV, A. H.; LAV, M. A. Investigation of alternative ways for recycling waste foundry sand: an extensive review to present benefits. **Canadian Journal of Civil Engineering**, n. 45, p. 423–434, jan. 2018.

GERSCOVICH, D. M. S. **Resistência ao cisalhamento**. Trabalho Acadêmico (Graduação em Engenharia Civil) – Apostila da disciplina de Estruturas e Fundações, Curso de Engenharia Civil, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010 (mimeo).

GOODHUE, M. J. et al. Interaction of foundry sands with geosynthetics. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, n. 127, p. 353-362, out. 2001.

GUNEY, Y. et al. Geoenvironmental behavior of foundry sand amended mixtures for highway subbases. **Waste Management, Elsevier**, n. 26, p. 932-945, aug. 2005.

GUNEY, Y. et al. Re-usage of waste foundry sand in high-strength concrete. **Waste Management, Elsevier**, n. 30, p. 1705–1713, mar. 2010.

HEAD, K. H. **Manual of soil laboratory testing: permeability, shear strength and compressibility tests**. Nova York: John Wiley & Sons Inc., 1994.

HEIDEMANN, M. **Estudo dos solos de uma encosta instável em São José – SC: intemperismo e comportamento geotécnico**. 2015. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

HEIDEMANN, M. et al. Geotechnical behavior of a compacted waste foundry sand. **Construction and Building Materials, Elsevier**, n. 227, jan. 2021.

KLEVEN, J. R. et al. Evolution of excess foundry system sands for use as subbase material. **Transportation Research Record**, n. 1433, p. 40–48, jan. 2000.

KLINSKY, L. M. G. **Avaliação do reaproveitamento de areia de fundição residual em camadas de pavimentos**. 2013. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

KLINSKY, L. M. G.; FABBRI, G. T. P. Reaproveitamento de areia de fundição como material de base e sub-base de pavimentos flexíveis. **Transportes, ANPET**, v. 17, n. 2, p. 36–45, dez. 2009.

- KUMAR, A. et al. Compaction and sub-grade characteristics of clayey soil mixed with foundry sand fly ash and tile waste. **IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering**, p. 1–5, jan. 2014.
- LUVIZÃO, R. R. **Estudo da viabilidade para reaproveitamento do resíduo de areia verde de fundição intemperizado em concreto asfáltico usinado a quente**. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais)—Centro de Ciências Tecnológicas, Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2008.
- MARTINS, A.; ALMEIDA, D. A. de. **Gestão da produção em empresas de fundição**. 2001. Disponível em: <https://cutt.ly/3hnwYf3>. Acesso em: 15 out. 2020.
- MATTOS, A. D. **Como preparar orçamentos de obras**. 3. ed. São Paulo: Pini, 2006.
- PARTRIDGE, B. K. et al. Field demonstration of highway embankment construction using waste foundry sand. **Transportation Research Record**, n. 99, p. 98–105, jan. 1999.
- PINTO, C. S. **Curso básico de mecânica dos solos**. 3. ed. São Paulo: Oficina de textos, 2006.
- SANTOS, L.C. **Estudo da estabilização de um solo expansivo através da incorporação de areia verde de fundição residual**. 2015. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia de Infraestrutura) - Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2015.
- SCHEUNEMANN, R. **Regeneração de areia de fundição através de tratamento químico via processo Fenton**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) —Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.
- SENÇO, W. **Manual de técnicas de pavimentação**. 2. ed. São Paulo: Pini, 2007.
- SIDDIQUE, R.; CACHIM, P. **Waste and supplementary cementitious materials in concrete**. Sawston: Woodhead Publishing, 2018. 640 p.
- SIDDIQUE, R.; KAUR, G.; RAJOR, A. Waste foundry sand and its leachate characteristics. **Resources, Conservation and Recycling, Elsevier**, n. 54, p. 1027–1036, abr. 2010.
- SILVA, K. D. **Reutilização do resíduo de areia de fundição no Brasil e no mundo: o contexto do estado de minas gerais**. 2010. Monografia (Especialização em Tecnologia Ambiental) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.
- SINGH, G.; SIDDIQUE, R. Effect of waste foundry sand (WFS) as partial replacement of sand on the strength, ultrasonic pulse velocity and permeability of concrete. **Construction and Building Materials, Elsevier**, n. 26, p. 416–422, jul. 2012.
- SOLEIMANBEIGI, A.; EDIL, T. B. Compressibility of recycled materials for use as highway embankment fill. **Geotech Geoenvironmental Eng.**, n. 141, p. 1–14, mai. 2015.
- SOUZA, R.C. **Estudo do efeito de partículas flutuantes nos parâmetros de resistência ao cisalhamento de solos granulares artificiais**. 2015. Trabalho de

conclusão de curso (Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

SPINELLI, L. F. **Comportamento de fundações superficiais em solos cimentados**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, 1999.

THEVANAYAGAM, S. et al. Undrained fragility of clean sands, silty sands and sandy silts. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, n. 128, p. 849-859, out. 2002.

VIECILI, C. **Determinação dos parâmetros de resistência do solo de Ijuí a partir do ensaio de cisalhamento direto**. 2003. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Tecnologia, Universidade Federal do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2003.

VILLAR, L. F. **Estudo do adensamento e ressecamento de resíduos de mineração e processamento de bauxita**. 2002. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

YAGHOUBI, E. et al. Shear strength properties and stress-strain behavior of waste foundry sand. **Construction and Building Materials, Elsevier**, n. 249, 118761, dez. 2019.

YAZOGHLI, O. et al. Recycling foundry sand in road construction-field assessment. **Construction and Building Materials**, v. 61, p. 69–78, jun. 2014.

YIN, J. et al. Creep response of compacted waste foundry sands for use as roadway embankment fill. **J. Geotech. Geoenviron. Eng.**, n. 144, p. 1–13, jan. 2018.