

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS HÍDRICOS
E SANEAMENTO



FRANCISCO AURELIANO ROCHA DE VASCONCELOS TEIXEIRA

**Caracterização dos resíduos de demolições em bairros de
Maceió/AL para reaproveitamento como agregado em camadas
do pavimento urbano**

Maceió – AL
2025

FRANCISCO AURELIANO ROCHA DE VASCONCELOS TEIXEIRA

**Caracterização dos resíduos de demolições em bairros de
Maceió/AL para reaproveitamento como agregado em camadas
do pavimento urbano**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento, Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Alagoas, como requisito para obtenção do título de Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Pinto Fernandes

Maceió – AL
2025

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico

Bibliotecária: Girlaine da Silva Santos – CRB-4 – 1127

- T266c Teixeira, Francisco Aureliano Rocha de Vasconcelos.
Caracterização dos resíduos de demolições em bairros de Maceió/AL para reaproveitamento como agregado em camadas do pavimento urbano / Francisco Aureliano Rocha de Vasconcelos Teixeira. – 2025.
165 f.: il.
- Orientador: Daniel Pinto Fernandes.
Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento) – Universidade Federal de Alagoas, Centro de Tecnologia. Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento. Maceió, 2025.
- Bibliografia: f. 109- 121.
Apêndices: f. 122- 165.
1. Agregado reciclado. 2. Resíduo de demolição - Maceió (AL). 3. Resíduos-Reaproveitamento. 4. Caracterização Geotécnica. 5. Pavimento urbano. I. Título.
- CDU: 628.4.043(813.5)

Dedico

Às famílias afetadas pelo fenômeno de
subsistência urbana em Maceió, que perderam
seus lares, histórias e raízes.

À Universidade Federal de Alagoas, pelo
compromisso com a ciência e a reconstrução
social, e a todos que acreditam na pesquisa
como ferramenta de transformação e memória
técnica diante de um evento histórico sem
precedentes no país.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, por me conceder saúde, sabedoria e forças para vencer cada etapa desta jornada.

À minha família, meu alicerce: ao meu pai Antão Gualberto e à minha mãe Cícera da Rocha, por todo amor, apoio e ensinamentos transmitidos com tanto carinho; as minhas irmãs e aos sobrinhos, por estarem sempre ao meu lado. À minha esposa Katarina, por sua paciência, incentivo e parceria constante, e à minha filha Maria Cecília, que é minha inspiração diária.

Às minhas raízes, dedico um agradecimento especial à minha querida vovó Maria Frutuosa, cuja vida, aos quase 96 anos, é um exemplo de força, simplicidade e amor incondicional.

Aos colegas de trabalho da UFAL/SINFRA, pela amizade, colaboração e incentivo em todos os momentos. Ao corpo técnico do laboratório de Geotécnica da UFAL e aos alunos de graduação que contribuíram nas etapas experimentais desta pesquisa, minha sincera gratidão pelo comprometimento e dedicação.

À FUNDEPES e à Braskem, pelo apoio financeiro por meio da bolsa de pesquisa, que viabilizou o desenvolvimento deste estudo.

Ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento da UFAL (PPGRHS), agradeço a todos os professores que contribuíram com minha formação, especialmente à secretaria Rossane, pelo suporte constante e acolhimento durante todo o curso.

Ao meu orientador, professor Dr. Daniel Fernandes, por sua orientação cuidadosa, conselhos técnicos e incentivo contínuo, fundamentais para a realização deste trabalho.

Aos professores Dr. Mariano Neto e ao Dr. César Barella (UFOP), agradeço pela disponibilidade, atenção e pelas valiosas contribuições como membros da banca examinadora.

A todos que, direta ou indiretamente, fizeram parte desta caminhada, deixo aqui minha mais profunda gratidão.

É necessário se espantar, se indignar e se contagiar, só assim é possível mudar a realidade.
(Nise da Silveira)

RESUMO

A exploração prolongada de sal-gema em cavernas subterrâneas em Maceió-AL resultou em afundamentos de solo, rachaduras em edificações e instabilidade na superfície, afetando os bairros do Mutange, Bom Parto, Pinheiro, Bebedouro e Farol, além da Laguna Mundaú. Isso levou à evacuação de mais de 40 mil pessoas e à realização de demolições em larga escala, gerando um grande volume de resíduos de demolição (RD). Diante desse cenário, torna-se essencial buscar alternativas sustentáveis para o reaproveitamento desses materiais, contribuindo para a redução de impactos ambientais, sociais e econômicos. Este estudo investiga a técnica de uso do agregado reciclado (AR), proveniente dessas demolições, como material para camadas de pavimentação urbana. Foram avaliadas três amostras: AR puro (100% RD), solo da encosta do Mutange (100% SM) e uma mistura de 85% AR com 15% SM. A pesquisa incluiu a caracterização física, mecânica, química, mineralógica e ambiental dos materiais, com ensaios laboratoriais de granulometria, limites de Atterberg, compactação, resistência ao cisalhamento direto, índice de suporte Califórnia (CBR), abrasão Los Angeles, difração de raios-X (DRX), microscopia eletrônica de varredura (MEV), além de análises de lixiviação e solubilização. Os resultados indicaram que o AR apresenta propriedades adequadas para uso em camadas de reforço do subleito e sub-base, embora sua aplicação em camadas de base exija melhorias granulométricas e estabilização. A análise ambiental demonstrou que os materiais avaliados não apresentam risco de contaminação, atendendo aos limites normativos. A abordagem proposta está alinhada com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) e os princípios da economia circular, promovendo uma gestão eficiente do RCD e incentivando práticas sustentáveis no setor da construção civil.

Palavras-Chave: Agregado Reciclado. Infraestrutura de Pavimentação. Sustentabilidade. Caracterização Geotécnica.

ABSTRACT

The prolonged extraction of rock salt in underground caverns in Maceió-AL has resulted in soil subsidence, cracks in buildings, and surface instability, affecting the neighborhoods of Mutange, Bom Parto, Pinheiro, Bebedouro, and Farol, as well as the Mundaú Lagoon. This situation led to the evacuation of more than 40,000 people and large-scale demolitions, generating a significant volume of demolition waste (DW). Given this scenario, it is essential to seek sustainable alternatives for reusing these materials, contributing to the reduction of environmental, social, and economic impacts. This study investigates the technical feasibility of using recycled aggregate (RA) from these demolitions as a material for urban pavement layers. Three samples were evaluated: pure RA (100% DW), soil from the Mutange hillside (100% SM), and a mixture of 85% RA with 15% SM. The research included the physical, mechanical, chemical, mineralogical, and environmental characterization of the materials, with laboratory tests on particle size distribution, Atterberg limits, compaction, direct shear strength, California Bearing Ratio (CBR), Los Angeles abrasion, X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM), and leaching and solubilization analyses. The results indicated that RA has suitable properties for use in subgrade reinforcement and sub-base layers, although its application in base layers requires granulometric improvements and stabilization. Environmental analysis demonstrated that the evaluated materials do not pose a contamination risk, meeting regulatory limits. The proposed approach aligns with the National Solid Waste Policy (PNRS) and the principles of the circular economy, promoting efficient DW management and encouraging sustainable practices in the construction sector.

Keywords: Recycled Aggregate. Pavement Infrastructure. Sustainability. Geotechnical Characterization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Classificação dos resíduos de construção	23
Figura 2 – Coleta de RCD por regiões no Brasil em 2021	27
Figura 3 – Fluxo Metodológico	33
Figura 4 – Mapa da área de estudo e bairros impactados pela subsidência.....	34
Figura 5 – Sequência do ensaio de granulometria do AR	40
Figura 6 – Ensaio de sedimentação com utilização de densímetro	41
Figura 7 – Agitador e sequência de peneiras utilizadas no ensaio granulométrico.....	42
Figura 8 – Fração do AR passante na peneira de malha #10.....	42
Figura 9 – Amostras do AR após peneiramentos	43
Figura 10 – Amostra superfície seca, amostra totalmente submersa e seca em estufa.....	44
Figura 11 – Aparelho de Casagrande	47
Figura 12 – Ensaio de limite de plasticidade.....	47
Figura 13 – Classificação de solo pela HRB-AASHTO	50
Figura 14 – AR Peneirado e Preparado para o Ensaio do Paquímetro	52
Figura 15 – Equipamento e cargas abrasivas do desgaste por abrasão Los Angeles	53
Figura 16 – Corpo e prova sendo compactado	54
Figura 17 – Corpos de prova imersos durante o ensaio de CBR.....	57
Figura 18 – Rompimento do corpo de prova na prensa de CBR.....	58
Figura 19 – Gráfico da curva de penetração do CBR.....	58
Figura 20 – Imóveis demolidos no ano de 2021.....	63
Figura 21 – Imóveis demolidos no ano de 2022.....	64
Figura 22 – Imóveis demolidos no ano de 2023.....	64
Figura 23 – Imóveis demolidos no ano de 2024.....	65
Figura 24 – Estrutura de camadas de pavimentos.	68
Figura 25 – Materiais indesejáveis presentes na amostra do RD.....	69
Figura 26 – Curvas Granulométricas das amostras de AR.....	69
Figura 27 – Frações de Pedregulho, Areia, Silte e Argila do RD.....	70
Figura 28 – Curvas Granulométricas das amostras do SM	72
Figura 29 – Curvas Granulométricas das amostras de AR-SM.....	74
Figura 30 – Frações de Pedregulho, Areia, Silte e Argila do AR-SM	74
Figura 31 – Limite de Liquidez e Limite de Plasticidade do RD	79
Figura 32 – Gráfico do LL da amostra 1 do SM	79

Figura 33 – Gráfico do LL da amostra 2 do SM	80
Figura 34 – Forma das partículas do RD.....	83
Figura 35 – Material antes do ensaio de abrasão, após o ensaio e o retido na peneira.....	84
Figura 36 – Curvas de compactação do AR	86
Figura 37 – Curvas de compactação do SM.....	86
Figura 38 – Curvas de compactação da mistura AR-SM	87
Figura 39 – Curvas Tensão x Deformação: Amostras AR.....	88
Figura 40 – Variações de altura durante o cisalhamento: Amostras AR.....	89
Figura 41 – Curvas Tensão x Deformação: Amostras SM.....	89
Figura 42 – Variações de altura durante o cisalhamento: Amostras SM.....	90
Figura 43 – Curvas Tensão x Deformação: Amostras AR-SM.....	90
Figura 44 – Variações de altura durante o cisalhamento: Amostras AR-SM.....	91
Figura 45 – Envoltórias de Resistência ao Cisalhamento.....	91
Figura 46 – Gráfico do CBR Energia Normal do AR	93
Figura 47 – Gráfico do CBR Energia Intermediária do AR.....	93
Figura 48 – Gráfico do CBR Energia Normal do SM	94
Figura 49 – Gráfico do CBR Energia Intermediária do SM.....	94
Figura 50 – Gráfico do CBR Energia Normal do AR-SM	95
Figura 51 – Gráfico do CBR Energia Intermediária do AR-SM.....	95
Figura 52 – MEV do AR, ampliação 200x, 1000x e 5000x.....	98
Figura 53 – MEV do SM, ampliação 500x, 1000x e 5000x.....	99
Figura 54 – MEV do AR-SM, ampliação 200x, 1000x e 5000x.....	99

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – População e domicílio dos bairros afetados pela subsidência em Maceió	35
Tabela 2 – Classificação do índice de plasticidade	48
Tabela 3 – Resumo da estimativa de área, massa e volume de demolição.....	67
Tabela 4 – Parâmetros granulométricos obtidos das amostras de AR.....	70
Tabela 5 – Comparação dos resultados com normas, especificações e estudos anteriores.	71
Tabela 6 – Resumo da Granulometria do SM, ABNT.	72
Tabela 7 – Parâmetros granulométricos das amostras do SM.	73
Tabela 8 – Parâmetros granulométricos das amostras de AR-SM.	75
Tabela 9 – Comparação dos resultados com normas, especificações e estudos anteriores.	75
Tabela 10 – Resultados da massa específica do AR.....	76
Tabela 11 – Massa específica retida na #4,8 mm das amostras de AR.	76
Tabela 12 – Massa específica dos passantes na #4,8 mm das amostras de AR.	77
Tabela 13 – Massa específica das amostras de SM.	77
Tabela 14 – Massa específica passantes #4,8 mm das amostras de AR-SM.....	77
Tabela 15 – Massa específica retidos #4,8 mm das amostras de AR-SM.....	78
Tabela 16 – Resumo da massa específica das amostras, AR, SM e AR-SM.	78
Tabela 17 – Dados do LL da amostra 1 de SM.	79
Tabela 18 – Dados do LP da amostra 1 de SM.	80
Tabela 19 – Dados do LL da amostra 2 de SM.	80
Tabela 20 – Dados do LP da amostra 2 de SM.	80
Tabela 21 – Graduação e os resultados do desgaste por abrasão do AR.....	84
Tabela 22 – Resumo do resultado de compactação das amostras	87
Tabela 23 – Parâmetros de resistência ao cisalhamento.....	92
Tabela 24 – Resumo do resultado do CBR e Expansão das Amostras.....	96
Tabela 25 – Identificação Mineralógica por DRX	97
Tabela 26 – Composição Química das Amostras.....	99
Tabela 27 – Relatório do Extrato do Ensaio de Lixiviado do AR.....	101
Tabela 28 – Relatório do Extrato do Ensaio de Solubilização do AR.....	102

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Ensaios de caracterização física e mecânica das amostras	39
Quadro 2 – Fatores e condições que influenciam no resultado de IG	49
Quadro 3 – Estudos considerados para estimativa da taxa de geração de RD.	65
Quadro 4 – Classificação IG e HRB-AASHTO das Amostras.	81

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Abrasão LA	Abrasão Los Angeles
ABRECON	Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública de Resíduos Especiais
AN	Agregado Natural
ANM	Agência Nacional de Mineração
AR	Agregado Reciclado
ARA	Agregado Reciclado de Alvenaria
ARC	Agregado Reciclado de Concreto
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CBR	<i>Califórnia Bearing Ratio</i>
CC	Coeficiente de Curvatura
CIMADEC	Centro Integrado de Monitoramento e Alerta de Desastres
CNT	Confederação Nacional do Transporte
CNU	Coeficiente de Não Uniformidade
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
CTEC	Centro de Tecnologia
DCM	Defesa Civil de Maceió
DNER	Departamento Nacional de Estradas e Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DNTM	Departamento Nacional de Produção Mineral
DRX	Difração de Raio-X
EAA	Espectrometria de Absorção Atômica
EC	Economia Circular
EDS/EDX	Espectroscopia de Energia Dispersiva
ES	Especificação de Serviço
HRB	<i>Bureau of Public Roads</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICDD	<i>International Center for Diffraction Data</i>
IG	Índice de Grupo
IP	Índice de Plasticidade
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
ME	Método de Ensaio
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
NBR	Norma Brasileira
PERS	Plano Estadual de Resíduos Sólidos
PIB	Produto Interno Bruto
PNRS	Plano Nacional de Resíduos Sólidos
RCC	Resíduo da Construção Civil
RCD	Resíduo de Construção e Demolição
RD	Resíduo de Demolição
RSU	Resíduo Sólidos Urbanos
SGB	Serviço Geológico do Brasil
SIG	Sistemas de Informação Geográfica
SM	Solo do Mutange

SUCS	Sistema Unificado de Classificação dos Solos
TDS	Sólidos Dissolvidos Totais
UE	União Europeia
UFAL	Universidade Federal de Alagoas

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	OBJETIVOS E METAS.....	21
1.1.1	Objetivo Geral	21
1.1.2	Objetivos Específicos.....	21
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	22
2.1	DESCRIÇÃO GERAL	22
2.2	FATOS HISTÓRICOS DE RECICLAGEM DE RCD.....	23
2.3	GERAÇÃO E RECICLAGEM DE RCD.....	24
2.3.1	Contexto Internacional	25
2.3.2	Contexto Nacional	26
2.4	SENSORIAMENTO REMOTO E SIG NA ESTIMATIVA E GESTÃO DE RCD ..	27
2.5	APLICAÇÕES DO RCD NA PAVIMENTAÇÃO	28
2.5.1	Normas Técnicas para Aplicação do RCD na Pavimentação.....	29
2.6	CARACTERIZAÇÃO DO RCD.....	30
3	METODOLOGIA	33
3.1	ÁREA DE ESTUDO	34
3.2	ESTIMATIVA DE MASSA E VOLUME DE RD.....	35
3.2.1	Determinação das Áreas de Demolição	35
3.2.2	Levantamento da Taxa de Geração de Resíduos.....	36
3.2.3	Cálculo da Massa e Volume de RD	37
3.3	COLETA, PREPARAÇÃO E ANÁLISE DA COMPOSIÇÃO DO RD.....	37
3.3.1	Coleta e Preparação das Amostras	37
3.3.1.1	Homogeneização e Quarteamento.....	38
3.3.1.2	Preparação das Amostras para Análises.....	38
3.3.2	Análise da Composição do RD	38
3.3.2.1	Separação e Categorização do RD	38
3.3.2.2	Classificação dos Materiais	39
3.3.3	Constituição das Amostras Experimentais	39
3.4	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E MECÂNICA	39
3.4.1	Granulometria por Sedimentação	40
3.4.1.1	Sedimentação.....	41

3.4.1.2	Peneiramento Grosso e Peneiramento Fino.....	41
3.4.2	Massa Específica.....	44
3.4.2.1	Grãos Retidos na Peneira 4,8 mm	45
3.4.2.2	Partículas Passantes na Peneira 4,8 mm.....	45
3.4.2.3	Massa Específica do Material Retido e Passante na Peneira de 4,8 mm.....	46
3.4.3	Absorção de Água.....	46
3.4.4	Limites de Atterberg	46
3.4.4.1	Limites de Liquidez (LL)	47
3.4.4.2	Limites de Plasticidade (LP)	47
3.4.4.3	Índice de Plasticidade (IP).....	48
3.4.5	Índice de Grupo (IG).....	48
3.4.6	Classificação HRB-AASHTO.....	49
3.4.6.1	Grupo A-1 – Solos Granulares de Alta Capacidade de Suporte.....	50
3.4.6.2	Grupo A-2– Solos de Transição entre Granulares e Finos.....	50
3.4.6.3	Grupo A-3– Solos Arenosos Finos.....	51
3.4.6.4	Grupo A-4– Solos Siltosos Plásticos Não ou Moderadamente Plásticos.....	51
3.4.6.5	Grupo A-5– Solos Silto-Diatomáceos e Micáceos.....	51
3.4.6.6	Grupo A-6– Solos Argilosos Plásticos.....	51
3.4.6.7	Grupo A-7– Solos Argilosos de Alta Plasticidade	52
3.4.7	Forma das Partículas e Índice de Forma do AR	52
3.4.8	Desgaste por Abrasão Los Angeles	52
3.4.9	Compactação Proctor Normal e Proctor Intermediário.....	53
3.4.9.1	Compactação com Energia Normal.....	54
3.4.9.2	Compactação com Energia Intermediária	55
3.4.10	Cisalhamento Direto.....	55
3.4.11	Índice de Suporte Califórnia (CBR)	56
3.4.11.1	Expansão	56
3.4.11.2	Penetração	57
3.4.11.3	Curva de Penetração e Cálculos do CBR	58
3.5	CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E MINERALÓGICA.....	59
3.5.1	Difração de Raio-X (DRX).....	59
3.5.2	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	60
3.6	CARACTERIZAÇÃO AMBIENTAL	60
3.6.1	Ensaio de Lixiviação.....	61

3.6.2	Ensaio de Solubilização.....	61
3.6.3	Classificação Ambiental dos Resíduos.....	62
4	RESULTADOS.....	63
4.1	ESTIMATIVA DE MASSA E VOLUME DO RD.....	63
4.1.1	Identificação das Áreas de Demolição	63
4.1.2	Taxa de Geração de RD	65
4.1.3	Cálculo da Massa e do Volume Total de RD	66
4.2	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E MECÂNICA DOS MATERIAIS	68
4.2.1	Composição do AR	68
4.2.2	Granulometria por Sedimentação	69
4.2.2.1	Resultados das Amostras AR	69
4.2.2.2	Resultados das Amostras SM	72
4.2.2.3	Resultados das Amostras da Mistura AR-SM.....	73
4.2.3	Massa Específica e Absorção de Água do AR.....	76
4.2.3.1	Massa Específica do SM e da Mistura AR-SM.....	77
4.2.4	Limites de Atterberg	78
4.2.4.1	Análise das Amostra de AR e AR-SM.....	78
4.2.4.2	Análise das Amostra de SM	79
4.2.5	Índice de Grupo (IG) e Classificação HRB-AASHTO.....	81
4.2.5.1	Resumo dos Resultados e Recomendações	82
4.2.6	Forma das Partículas e Índice de Forma do AR	82
4.2.7	Desgaste por Abrasão do AR.....	83
4.2.8	Ensaio de Compactação.....	85
4.2.9	Ensaio de Cisalhamento Direto	88
4.2.9.1	Análise das Amostras de AR.....	88
4.2.9.2	Análise das Amostras de SM	89
4.2.9.3	Análise das Amostras de AR-SM.....	90
4.2.9.4	Envoltória e Parâmetros de Resistência	91
4.2.10	Índice de Suporte Califórnia (CBR)	92
4.2.10.1	Análise do CBR e Expansão das Amostras de AR	92
4.2.10.2	Análise do CBR e Expansão das Amostras de SM	93
4.2.10.3	Análise do CBR e Expansão das Amostras de AR-SM	95
4.3	CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E MINERALÓGICA.....	96
4.3.1	Difração de Raios-X (DRX)	97

4.3.1.1	Principais Minerais Identificados	97
4.3.1.2	Difratogramas das Amostras	97
4.3.2	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	98
4.3.3	Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS)	99
4.3.3.1	Composição Química	99
4.3.4	Resumo da Análise Química e Mineralógica	100
4.4	CARACTERIZAÇÃO AMBIENTAL DO AGREGADO RECICLADO	100
4.4.1	Ensaio de Lixiviação.....	101
4.4.2	Ensaio de Solubilização.....	101
4.4.3	Classificação Ambiental.....	103
4.5	AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE TÉCNICA	103
4.5.1	Adequação Granulométrica	103
4.5.2	Resistência Mecânica	104
4.5.3	Durabilidade	104
4.5.4	Segurança Ambiental.....	105
5	CONCLUSÕES	106
5.1	PRINCIPAIS RESULTADOS	106
5.2	LIMITAÇÕES DO ESTUDO	107
5.3	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	107
5.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	107
	REFERÊNCIAS	108
	APÊNDICE A – Ensaio de Granulometria com Sedimentação	121
	APÊNDICE B – Ensaio de Forma das Partículas	131
	APÊNDICE C – Ensaio de Compactação	136
	APÊNDICE D – Ensaio de Cisalhamento Direto	140
	APÊNDICE E – Ensaio de CBR e Expansão Máxima.....	159
	APÊNDICE F – Ensaio Químicos e Mineralógicos	165

1 INTRODUÇÃO

A produção massiva de resíduos de construção civil e demolição (RCD) em centros urbanos de médio e grande porte tornou-se uma preocupação global, devido aos impactos ambientais, sociais e econômicos associados (Lederer *et al.*, 2020). Estudos indicam que a destinação inadequada desses resíduos pode levar à contaminação do solo, ao assoreamento de rios, ao aumento da poluição e à elevação dos custos de gestão pública (Gebremedhin; Tekile; Reddythota, 2023; Khan; Balunaini; Costa, 2024).

No Brasil, a Resolução nº 307/2002 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), representa um marco regulatório na gestão dos resíduos da construção civil (RCC), estabelecendo diretrizes para minimizar seus impactos ambientais. A normativa determina que os geradores de resíduos devam, prioritariamente, evitar sua produção e, caso isso não seja possível, seguir a hierarquia de redução, reutilização, reciclagem e disposição final adequada (Brasil, 2002). Como parte dessas diretrizes, os materiais devem ser encaminhados para locais específicos, como aterros de RCC, a fim de evitar descarte irregular.

A Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2022), estima que os RCC representem aproximadamente 59% do total de resíduos sólidos urbanos (RSU) no Brasil, com uma geração anual de 48,3 milhões de toneladas. Esses números evidenciam a necessidade de uma gestão eficiente, pois o descarte inadequado compromete significativamente a infraestrutura urbana e o meio ambiente (Alamin; Samara; Al-Tamimi, 2024).

No estado de Alagoas, conforme o Plano Estadual de Resíduos Sólidos (PERS), a geração diária de RCC é aproximadamente 2.819,85 toneladas. Com uma população de 3.120.494 habitantes, segundo o Censo Demográfico do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2010), a produção per capita é estimada em 0,9 kg/habitante/dia. A Região Metropolitana concentra 58,4% da geração, sendo Maceió a principal produtora (Alagoas, 2015).

Em Maceió, a geração diária de RCC atinge 817,6 toneladas, equivalente a aproximadamente 0,8 kg/habitante/dia. Desse total, 82% pertencem à Classe A, 15% à Classe B, e os 3% restantes incluem materiais das Classes C, D e outros. No entanto, Um dado cerca de 68% dos RCC da cidade são descartados de forma inadequada, resultando em impactos

ambientais negativos que comprometendo a qualidade de vida da população urbana (Ribeiro *et al.*, 2021).

Além do problema de descarte de resíduos, Maceió enfrenta um desafio geológico adicional, a subsidência do solo causada pela extração de sal-gema na região. Estudos do Serviço Geológico do Brasil (SGB-CPRM, 2019) indicam que o colapso estrutural do solo e o surgimento de rachaduras em edificações resultam da exploração prolongada desse mineral, iniciada na década de 1970. Esse processo comprometeu a estabilidade dos terrenos, especialmente nas áreas próximas à Laguna Mundaú, impactando diretamente cinco bairros da capital alagoana.

O relatório da Braskem (2025) estima que mais de 40 mil pessoas foram diretamente afetadas pelo fenômeno, sendo realocadas devido ao risco iminente de desabamento de imóveis nos bairros Pinheiro, Farol, Mutange, Bom Parto e Bebedouro. Essa evacuação compulsória gerou impactos psicológicos, sociais e econômicos significativos para a população (Fontana *et al.*, 2023).

As remoções dos imóveis resultam na produção de grande volume de resíduos, agravando a necessidade de um tratamento adequado (Han; Kalantari; Rajabifard, 2024). O descarte irregular dos RCD pode contribuir para enchentes, assoreamento de rios e córregos, proliferação de vetores de doenças e aumento dos custos públicos com fiscalização e transporte desses materiais (Cook; Velis; Black, 2022). Além disso, a falta de gestão adequada pode levar à desvalorização imobiliária e ao atraso no desenvolvimento urbano (Araújo; Pimentel, 2016; Jain; Singhal; Pandey, 2020).

A economia circular (EC) surge como uma alternativa viável para mitigar esses impactos, propondo um modelo baseado na redução, reutilização e reciclagem de materiais. No setor da construção civil, essa abordagem permite valorizar resíduos e reduzir a dependência de matéria-prima virgem, proporcionando benefícios ambientais e econômicos (Kabirifar *et al.*, 2020; Iodice *et al.*, 2021).

Em Maceió, a demolição de bairros inteiros está gerando um grande volume de RCD, tornando essencial a adoção de estratégias para o reaproveitamento desses materiais. A EC oferece uma solução técnica e ambientalmente viável, possibilitando a utilização de agregado reciclado na pavimentação urbana, reduzindo a necessidade de disposição em aterros e incentivando o mercado de materiais reciclados (Ângulo *et al.*, 2003; Papamichael *et al.*, 2023).

A estimativa da geração de RCD é um fator essencial para a gestão sustentável das áreas urbanas, especialmente em cenários de subsidência do solo (Song *et al.*, 2017). O sensoriamento remoto e os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) são ferramentas que permitem mapear, monitorar e quantificar os volumes de resíduos, possibilitando uma análise detalhada das áreas afetadas, contribuindo para a formulação de políticas públicas e tomadas de decisão mais acertivas (Yu *et al.*, 2019; Chen *et al.*, 2021; Ittyeipe; Thomas; Ramaswamy, 2023).

Pesquisas demonstram que resíduos de demolição, podem ser transformados em agregados reciclados, tornando-se uma alternativa viável para infraestrutura viária (Salehi *et al.*, 2021). No Brasil, onde apenas 12,4% da malha rodoviária é pavimentada, a utilização de agregado reciclado pode reduzir custos e impactos ambientais, além de melhorar a mobilidade urbana e a qualidade das vias (CNT, 2023).

A deficiência na infraestrutura viária representa um desafio significativo para o desenvolvimento urbano e econômico do Brasil, uma vez que o transporte rodoviário é o principal meio de circulação de cargas e passageiros do país (Miranda; Silva, 2023). Em áreas urbanas, essa carência é ainda mais evidente nas periferias e bairros de menor poder aquisitivo, onde grande parte da malha viária permanece não pavimentada, sendo composta predominantemente por estradas de terra ou cascalho, o que compromete a mobilidade e a qualidade de vida da população (Albuquerque Filho; Casagrande; Ribeiro, 2024).

A produção de agregados naturais, como areia e brita, para pavimentação exige a exploração intensiva de jazidas minerais, resultando em impactos ambientais expressivos, como emissão de poeira, poluição sonora e visual, além do assoreamento de recursos hídricos devido à extração de sedimentos (Agrela *et al.*, 2021). No Brasil, segundo a Agência Nacional de Mineração (ANM, 2019), os agregados minerais representam o segmento mais explorado da indústria extrativa, com uma produção de 548,43 milhões de toneladas. Aproximadamente 30% da demanda por pedras britadas são destinadas para pavimentação, correspondendo a cerca de 66 milhões de toneladas anuais (Ferreira; Fonseca Junior, 2009).

A utilização de agregado reciclado proveniente de resíduos de demolição surge como uma alternativa viável e ambientalmente responsável, reduzindo a necessidade de exploração de recursos naturais e fornecendo uma solução sustentável para a pavimentação urbana (Sejin-Garces *et al.*, 2024). Além de minimizar os impactos da extração mineral, essa prática contribui para aumentar a disponibilidade de vias pavimentadas, especialmente em trechos de

baixo volume de tráfego, onde a adoção de materiais reciclados pode representar uma alternativa econômica e eficiente (Llopis-Castelló *et al.*, 2022).

Diante deste cenário, excepcional de geração de RCD, esta pesquisa busca avaliar as estratégias técnicas e ambientais de reaproveitamento dos RCD na pavimentação urbana, alinhando-se aos princípios da EC e propondo soluções para reduzir os impactos ambientais e econômicos da destinação desses resíduos.

1.1 OBJETIVOS E METAS

1.1.1 Objetivo Geral

Viabilizar o reaproveitamento dos resíduos de demolição (RD) proveniente dos bairros afetados em Maceió como agregado reciclado (AR) em pavimentação urbana.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar as propriedades físicas, mecânicas, químicas, mineralógicas e ambientais do AR, SM e AR-SM;
- Estimar a disponibilidade de RD gerados com as demolições em Maceió;
- Analisar as propriedades físicas do solo da região do bairro Mutange e sua potencial aplicação em misturas com o AR;
- Investigar o comportamento mecânico do AR e das misturas AR-Solo;
- Comparar os resultados com agregados naturais (AN);
- Exemplificar o uso do AR em camadas de pavimentação.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta uma análise sobre a geração, reciclagem e aplicação do AR proveniente de RCD. Além disso, discute seu papel na promoção da sustentabilidade ambiental e no reaproveitamento na engenharia civil.

2.1 DESCRIÇÃO GERAL

De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2004), a NBR 10004:2004 define resíduos sólidos como o resultado de diversas atividades humanas, incluindo processos industriais, domésticos, hospitalares, comerciais e agrícolas, além dos resíduos gerados por serviços públicos e de varrição urbana. A norma também engloba os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, os resíduos gerados em equipamento e instalações de controle de poluição, bem com determinados líquidos que, devido às suas propriedades, não podem ser descartados diretamente no sistema público de esgoto ou em corpos d'água sem tratamento adequado.

A construção civil é um dos setores de maior impacto ambiental, contribuindo com aproximadamente 10% do produto interno bruto (PIB) do Brasil e gerando 15% dos empregos formais no país (Ângulo; Oliveira; Machado, 2022). No entanto, essa indústria é também uma das que mais consome recursos naturais e energia. Estudos indicam que sua cadeia produtiva utiliza entre 20% e 50% dos recursos naturais disponíveis, gerando uma quantidade significativa de resíduos ao longo do ciclo de vida das edificações (Benachio; Freitas; Tavares, 2020; Vasilca *et al.*, 2021; Nascimento; Moraes; Lopes, 2022).

Para minimizar esses impactos, o Brasil instituiu a Lei nº 12.305/2010, que estabelece a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). Esta legislação define princípios e diretrizes para a gestão integrada e ambientalmente adequada dos resíduos sólidos, incluindo os RCC. A PNRS promove uma responsabilidade compartilhada entre a sociedade, o setor empresarial e o poder público, incentivando práticas sustentáveis e redução da destinação concentrada de resíduos (Brasil, 2010).

A Resolução CONAMA nº 307/2002 classifica os RCD como aqueles provenientes de construções, reformas, reparos e demolições, além dos resíduos gerados na preparação e escavação de terrenos. Entre os materiais incluídos nessa categoria estão tijolos, concreto, madeira, vidro, plásticos, metais, telhas, gesso e fiações elétricas, frequentemente, chamados de entulho, calça ou metralha, dependendo da região (Brasil, 2002).

Os resíduos são classificados, conforme a NBR 15116 (ABNT, 2004) e a Resolução do CONAMA nº 307/2002, em quatro categorias, conforme demonstrado na Figura 1.

Figura 1 – Classificação dos resíduos de construção



Fonte: Elaborado pelo autor, com base na ABNT NBR 15116:2004.

A composição do RCD é influenciada por fatores, como tipo de construção, materiais predominantes na região, desenvolvimento econômico e técnicas construtivas empregadas. Grandes edificações geram resíduos diferenciados, o que pode impactar significativamente a quantidade e qualidade dos materiais recicláveis (Carneiro; Brum; Cassa, 2001; Wu; Yu; Poon, 2019).

A caracterização ambiental do RCD, conforme a NBR 10004:2004 (ABNT, 2004), é essencial para garantir um manejo adequado, visto que sua composição pode variar conforme sua origem e tipo de construção (Nandal *et al.*, 2022; Wichinheski; Fortes, 2022).

2.2 FATOS HISTÓRICOS DE RECICLAGEM DE RCD

O reaproveitamento de resíduos na construção civil remanescente à antiguidade, os fenícios, foram os pioneiros no uso de materiais reciclados em pavimentos, enquanto os romanos empregaram técnicas de britagem de alvenaria para produção de concreto (Hansen, 1992).

Na era moderna, a Segunda Guerra Mundial impulsionou a reciclagem de RCD. Na Alemanha, entre 196 a 1960, foram processados cerca de 600 milhões de metros cúbicos de entulho, resultando na construção de 175 mil unidades habitacionais (Levy; Helene, 2000; Leite, 2001). No Japão, a reciclagem de resíduos para pavimentação se intensificou na década de 1970, com aproximadamente 2/3 dos RCD sendo reaproveitados (Vásquez e Barra, 2000).

Na América Latina, a reciclagem de RCD desenvolveu-se mais lentamente, mas ganhou relevância na década de 1990, com a implantação das primeiras usinas de reciclagem de entulho no Brasil, principalmente em Belo Horizonte e São Paulo (Affonso, 2005). Apesar dos avanços na normatização e uso de AR, desafios como falta de incentivos financeiros e resistência do mercado ainda dificultam a expansão dessas práticas (Wintruff; Fernandes, 2023; Frantz Schneider; Aanestad; Carvalho, 2024).

No caso de Maceió, o afundamento do solo em 2018, causado pela exploração de salgema, levou à desocupação de 14,4 mil propriedades, gerando um volume significativo de RD e aumentando a necessidade de estudos sobre o reaproveitamento sustentável desses materiais (Lima; Gomes, 2022; Fontana *et al.*, 2023).

2.3 GERAÇÃO E RECICLAGEM DE RCD

A crescente preocupação com a sustentabilidade ambiental tem levado ao desenvolvimento de políticas públicas voltadas para a gestão de RSU (Mao *et al.*, 2024). A destinação concentrada de RCD pode gerar impactos negativos, como contaminação do solo, aumento da emissão de gases de efeito estufa e esgotamento da vida útil de aterros sanitários (Sondh *et al.*, 2022). Nesse contexto, as estratégias de reaproveitamento e reciclagem têm sido incentivadas como alternativas sustentáveis para minimizar esses impactos (Freitas; Pires; Benincá, 2023).

Desde a década de 1970, a gestão de resíduos sólidos tornou-se um tema prioritário para os grandes centros urbanos, impulsionada pelo aumento da geração de RCD e pela necessidade de minimizar seus impactos ambientais e sociais (Nieves; Ramos, 2023). A ausência de planejamento adequado para o descarte desses resíduos tem resultado em gestão ambiental e custos operacionais elevados para os municípios, exigindo soluções mais eficientes e sustentáveis (Pitakaso *et al.*, 2024).

Atualmente, as estratégias adotadas para o controle dos resíduos podem ser agrupadas em duas frentes principais: minimização da geração e reciclagem/reutilização. A minimização ocorre por meio da adoção de materiais sustentáveis e mudanças nos processos construtivos, enquanto a reciclagem envolve processos técnicos para a reinserção dos resíduos na cadeia produtiva (Fernandes, 2004; Khan; Balunaini; Costa, 2024).

Porém, barreiras técnicas e operacionais ainda limitam a reciclagem de RCD, como a heterogeneidade do material, dificuldades de triagem e desafios logísticos (Lund, 2000;

Masueiro, 2001). Apesar dessas dificuldades, a reciclagem de RCD é impulsionada por três fatores principais:

Ambiental – redução da remoção de recursos naturais e mitigação dos impactos;

Econômico – redução de custos de produção com reutilização de materiais reciclados;

Legal – regulamentação que incentivam a destinação adequada dos resíduos.

A reciclagem de RCD no Brasil ainda enfrenta desafios importantes, dentre os quais se destaca o elevado custo do transporte, que pode representar até 40% do custo total do processo, tornando o material reciclado menos competitivo em comparação aos AN. Outros aspectos são a ausência de incentivos fiscais e políticas públicas que obriguem ou incentivem a utilização de AR em obras públicas, e a resistência cultural e técnica do setor da construção civil à utilização desses materiais (Pereira *et al.*, 2015; Leal, 2021; Ângulo; Oliveira; Machado, 2022).

Para superar essas barreiras, torna-se necessário o fortalecimento das políticas de logística reversa, a adoção de medidas tributárias diferenciadas para materiais reciclados e a implementação de mecanismos que incentivam o mercado para agregados reciclados, criando assim condições mais desenvolvidas à adoção da EC no setor de construção civil (Mallick *et al.*, 2024).

2.3.1 Contexto Internacional

A gestão do RCD tem sido desenvolvida de maneira heterogênea em nível global, refletindo diferenças econômicas, sociais e políticas entre países.

A União Europeia (UE) gerou aproximadamente 900 milhões de toneladas de RCD em 2021, o que corresponde a mais de 35% do total de RSU produzidos no continente. A taxa média de reciclagem nos países da EU-27 é superior a 50%, com nações como a Holanda e Alemanha atingindo 95% e 87%, respectivamente. Em contrapartida, países como Portugal ainda enfrenta desafios consideráveis, com 76% dos RCD sendo destinados a aterros sanitários e apenas 9% reciclados (Moschen-Schimek; Kasper; Huber-Humer, 2023; Paulino *et al.*, 2023).

Na China, maior geradora mundial de RCD, são produzidos anualmente cerca de 2,36 bilhões de toneladas, contudo, apesar do avanço em políticas inovadoras para reciclagem, o país apresenta uma taxa média de reaproveitamento ainda relativamente baixa, entre 10% e

15%, valores inferiores aos padrões europeus e japoneses (Ma *et al.*, 2020; Zhang *et al.*, 2020; Huang *et al.*, 2022).

Nos Estados Unidos, a reciclagem dos RCD já ultrapassa a marca dos 70% (Akhtar; Sarmah, 2018). Kabirifar *et al.* (2020), apontam que a geração anual de RCD atingiu 534 milhões de toneladas, sendo 94,5% resultantes de atividades de demolições e apenas 5,5% provenientes de novas construções. Mais recentemente, Papamichael *et al.* (2023), destacam que esses resíduos representam 67% do total de RSU produzidos no país, contribuindo significativamente para problemas ambientais como a poluição do ar (23% das emissões), gases do efeito estufa e da contaminação dos recursos hídricos.

Em Hong Kong, o Departamento de Proteção Ambiental (EPD, 2023) revelou que, entre de 2018 e 2022, uma média anual de resíduos descartados em aterros foi de 6 milhões de toneladas, sendo que aproximadamente 25% eram provenientes de RCD. Destaca-se que em 2022, graças à implantação eficaz de centros de triagem pelo governo local, a taxa de reaproveitamento desses resíduos superou os 92%.

A Coreia do Sul, embora apresente taxas de reciclagem superiores a 90%, enfrenta desafios relacionados à falta de uma normatização específica para a aplicação de AR em estruturas de alto desempenho, limitando a aplicação ampla e técnica desses materiais na construção civil (Kim, 2021).

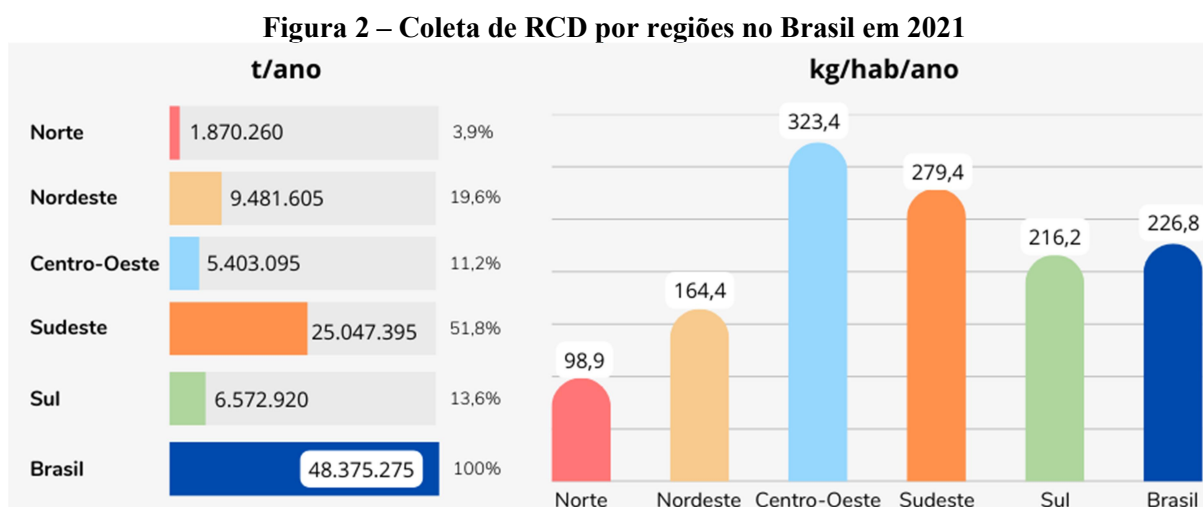
Essas diferenças nos índices de reciclagem internacionalmente demonstram claramente a importância das políticas públicas eficientes, dos incentivos econômicos e dos marcos regulatórios robustos para promover a reciclagem e reutilização de RCD em contextos diversos, envolvendo a sustentabilidade ambiental global.

2.3.2 Contexto Nacional

O Brasil ainda enfrenta diversos desafios na gestão e reciclagem de RCD. De acordo com o Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil, publicado pela ABRELPE (2022), o país gerou 82 milhões de toneladas de RSU no país em 2021, sendo que aproximadamente 48 milhões de toneladas eram RCD, representando cerca de 59% do total de RSU.

Entre as regiões brasileiras, o Nordeste se destaca com uma geração anual de 9,4 milhões de toneladas de RCD coletadas, o que equivale a 19,6% do total nacional, posicionando-se como a segunda região com maior geração, atrás apenas do Sudeste (ABRELPE, 2022). Contudo, em termos de geração per capita anual, a região Nordeste

registra 164,4 kg por habitante, ficando à frente apenas da região Norte, diminuindo desigualdades regionais importantes na geração de resíduos, conforme ilustrado na Figura 2.



Fonte: Elaborado pelo autor, adaptado de ABRELPE, 2022.

Segundo, a Pesquisa Setorial divulgada Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos Sólidos da Construção Civil e Demolição (ABRECON, 2022), estima-se que o Brasil produza aproximadamente 100 milhões de toneladas anuais de AR. No entanto, o país possui apenas 380 usinas de reciclagem operam no território nacional, muitas delas operando abaixo da sua capacidade total de processamento, limitando o potencial de reaproveitamento de RCD (Ângulo; Oliveira; Machado, 2022).

Apesar disso, a reciclagem de RCD no Brasil vem crescendo lentamente, impulsionada por normativas como a resolução CONAMA nº 307/2002, que estabelece diretrizes para a gestão dos resíduos, promovendo a separação, reutilização e reciclagem, além de estabelecer a responsabilidade compartilhada entre os atores envolvidos (Brasil, 2002).

No contexto do estado de Alagoas, estima-se uma geração anual próxima de 2 milhões de toneladas de RCD, evidenciando a necessidade urgente de investimentos em reciclagem e reutilização desses materiais, especialmente considerando os impactos ambientais e urbanos locais (Ângulo; Oliveira; Machado, 2022).

2.4 SENSORIAMENTO REMOTO E SIG NA ESTIMATIVA E GESTÃO DE RCD

O uso de SIGs e o sensoriamento remoto tem sido fundamental para a estimativa, monitoramento e gerenciamento de RCD em ambientes urbanos. Essas tecnologias permitem mapeamento das áreas com imagens de satélite, quantificação dos volumes de resíduos gerados e planejamento estratégico da destinação e reaproveitamento de materiais.

Estudos recentes demonstram que o sensoriamento remoto e o SIG são ferramentas eficientes para a identificação de espacial e criação de modelos preditivos na gestão de RCD. Rosa *et al.* (2024), utilizaram imagens de satélite de alta resolução, combinadas com análises geoespaciais, para mapear as áreas de risco associadas ao afundamento do solo em Maceió, identificando zonas de demolições com precisão. Santos e Coutinho (2023), demonstraram que uma integração de dados topográficos e geotécnicos por meio de SIG facilita a delimitação das áreas afetadas subsidência.

Além disso, Yu *et al.* (2019), destacam que o uso combinado de sensoriamento remoto e SIG permitem a entrega de dados em tempo real, como também a construção de modelos preditivos robustos que calculam variáveis como altura dos edifícios e os métodos de demolição. Ittyeipe; Thomas; Ramaswamy (2023), reforçam que a fusão de dados geoespaciais com ensaios laboratoriais aprimora a confiabilidade das estimativas de volume de resíduos, fornece subsídios técnicos essenciais para a formulação de políticas públicas e o desenvolvimento de estratégias de reciclagem eficientes.

Dessa forma, a integração dessas tecnologias representa uma solução eficaz para melhorar a gestão dos RD, reduzir os impactos ambientais e promover a sustentabilidade urbana.

2.5 APLICAÇÕES DO RCD NA PAVIMENTAÇÃO

A reutilização de materiais na construção não é um conceito recente. Os romanos já aplicavam técnicas de reciclagem, utilizando telhas e tijolos e cerâmicas moídas como pozolana na fabricação de concreto primitivo (Santos, 1975). No entanto, o uso estruturado e padronizado dos RCD na pavimentação urbana começou a ser mais amplamente estudado a partir do final do século XX, impulsionado pelo aumento da demanda por materiais naturais e pela necessidade de redução do impacto ambiental (Paschoalin Filho; Storopoli; Duarte, 2014; Leal, 2021).

A infraestrutura de pavimentação é composta por múltiplas camadas, projetada para suportar cargas de tráfego e distribuí-las de maneira uniforme ao solo. Essas camadas incluem revestimento, base, sub-base e reforço de subleito – esta última utilizada quando a capacidade de suporte do subleito apresenta CBR inferior a 2% (Kadela, 2016).

O uso de materiais reciclados na pavimentação tem demonstrado benefícios ambientais e econômicos, especialmente em camadas de base e sub-base, onde sua aplicação reduz a necessidade do uso de AN (Pereira; Vieira, 2022).

Conforme destacado por Motta (2005), o AR encontra aplicação em diversas funções, tais como camadas drenantes, envelopamento de galerias, lastro para assentamento de tubos ou guias, produção de concreto e argamassa para infraestrutura e alvenaria, além de uso em regularização e cascalhamento de ruas de terra e estabilização de solos expansíveis.

Estudos realizados no Reino Unido na década de 1990 demonstraram que o agregado reciclado de concreto (ARC) apresenta desempenho semelhante ao da brita calcária, enquanto o agregado reciclado de alvenaria (ARA) tem menor resistência, mas ainda dentro dos padrões aceitáveis para a camada de sub-base (Leite, 2007).

Nos Estados Unidos, os AR são regulamentados pela ASTM D 1241-07 (2014), permitindo sua aplicação na base e sub-base de pavimentos. Essa prática tem redução em até 30% os custos de produção (Leite, 2007).

Na União Europeia, há metas rigorosas de 70% de reutilização, reciclagem ou recuperação desses materiais. Mas grande parte dos resíduos ainda é utilizada predominantemente para *downcycling*, ou seja, transformação do concreto demolido em material de base para estradas (Zhang *et al.*, 2020).

Em Hong Kong, Barbudo *et al.* (2012) identificaram que a presença de materiais cerâmicos pode aumentar a absorção de água e reduzir a densidade aparente dos AR, mas ainda são viáveis para aplicação em sub-base.

2.5.1 Normas Técnicas para Aplicação do RCD na Pavimentação

De acordo com Orioli (2018), no Brasil ainda não há norma específica para dosagem de misturas com AR, no entanto, há diretrizes nacionais e internacionais que estabelecem curva granulométrica que garantem uma distribuição adequada das partículas, otimizando o desempenho mecânico do material.

A normatização do uso de RCD na pavimentação é essencial para garantir sua qualidade, segurança e desempenho mecânico. No Brasil, o uso de AR segue as diretrizes da ABNT, sendo regulamentada pela NBR 15115:2004 (ABNT, 2004), que define os procedimentos para a execução de camadas de pavimentação utilizando AR, e pela NBR 15116:2004 (ABNT, 2004), que estabelece requisitos para sua aplicação na pavimentação e na produção de concretos sem função estrutural.

Estudos indicam que misturas de AR podem atingir resistência mecânica compatível com agregados convencionais, tornando viável sua aplicação em vias urbana e na construção de ciclovias (Llopis-Castelló *et al.*, 2022; Sejin-Garces *et al.*, 2024).

2.6 CARACTERIZAÇÃO DO RCD

A caracterização do RCD é uma etapa crucial para garantir o reaproveitamento seguro e ambientalmente adequado desses materiais. Embora predominantemente inertes, os RCD podem conter elementos potencialmente contaminantes, representando riscos para a saúde pública e o meio ambiente caso não sejam específicos e gerenciados (Garzón *et al.*, 2022).

Segundo Leite *et al.* (2011), a absorção de água do RCD varia significativamente conforme a composição dos materiais originais, sendo especialmente elevada em materiais cerâmicos devido à sua alta porosidade. A forma dos grãos também está diretamente relacionada ao tipo de material, com resíduos cimentícios apresentando partículas predominantes cúbicas e resíduos cerâmicos exibindo partículas com predominância de formas lamelares. Esses autores destacam que a compactação, por exemplo, proctor modificado, influencia diretamente a granulometria do RCD, resultando na fragmentação das partículas e afetando positivamente a resistência mecânica e a capacidade de suporte do material.

Averos e Bizarreta-Ortega (2021) descobriram que a incorporação de resíduos finos de concreto em solos residuais melhorou consideravelmente as propriedades geotécnicas destes solos. Em particular, observaram aumento expressivo nos valores de CBR e redução significativa nas propriedades expansivas do solo, transformando um solo inicialmente inadequado para uso em subleitos em um material apto, conforme os critérios estabelecidos pelo manual de pavimentação do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT, 2006).

Estudos realizados por Pereira *et al.* (2015) revelaram que tanto AR finos quanto graúdos possuem propriedades comparáveis aos AN, especialmente em termos de resistência à pressão, módulo de resiliência e comportamento mecânico. Tais propriedades qualificam o AR como uma alternativa segura e tecnicamente viável para aplicações em camadas de base e sub-base de pavimentos rodoviários (Hopkins; Beckham e Sun, 2007).

Orioli (2018), identificou diferenças físicas relevantes entre AR provenientes de resíduos da mineração e AN. O estudo revelou maior concentração de água, menor densidade aparente e maior desgaste por abrasão Los Angeles em AR. Além disso, esses materiais

tiveram menor massa específica seca máxima e maior teor de umidade ideal nos ensaios de compactação, em comparação direta com misturas solo-AR e solo-NA. Verificou-se também que a inclusão de solo nas misturas com AR pode reduzir os valores de CBR, evidenciando a sua aplicação preferencial em pavimentos de baixo volume de tráfego.

Em pesquisa recente, Hidalgo *et al.* (2023) avaliaram misturas de solo com resíduos de tijolos e telhas cerâmicas, observando melhorias expressivas nas propriedades mecânicas do solo. Os autores constataram aumento progressivo na resistência e na rigidez dessas misturas, com elevação contínua dos valores de CBR até um teor de aproximadamente 40% de RCD. Para concentrações próximas de 60% de RCD, os valores de CBR se aproximam daqueles exigidos para sub-bases granulares, comprovando potencial econômico significativo, com redução de custo que podem atingir até 50% na execução das camadas estruturais.

Zhang *et al.* (2020) destacam, porém, a complexidade específica do RCD, enfatizando a necessidade de procedimentos rigorosos antes da aplicação desses materiais nas camadas estruturais de pavimentos. Esses autores afirmam que o teor de umidade e a granulometria têm papel fundamental no desempenho final das misturas recicladas, recomendando que os agregados reciclados sejam submetidos a processos de britagem critérios para produzir fracos entre 20 mm e 40 mm, o que favorecem a formação de estruturas densas e mecanicamente adequadas.

Assim, com base nas evidências descritas, fica claro que práticas como reutilização, redução e reciclagem dos RCD são alternativas técnicas viáveis e ambientalmente sustentáveis, alinhadas às diretrizes condicionais pela PNRS, que estimula a gestão ambientalmente responsável desses resíduos (Brasil, 2010).

A reciclagem do RCD oferece benefícios importantes à construção civil, contribuindo diretamente para a redução do descarte irregular e da exploração excessiva de recursos naturais. Além disso, a prática é totalmente alinhada aos princípios da EC, para permitir a reincorporação de resíduos aos ciclos produtivos, exercendo pressão sobre os recursos naturais não renováveis. A operação de usinas de reciclagem também promove a criação de empregos e fomenta o desenvolvimento socioeconômico local e regional (Paschoalin Filho; Frasson; Conti, 2019).

Nesse sentido, a reciclagem do RCD atende aos conceitos fundamentais da sustentabilidade e da EC, conforme definidos por Preston (2012) e Geissdoerfer *et al.* (2017). Estes conceitos enfatizam a necessidade de equilíbrio dinâmico entre as dimensões

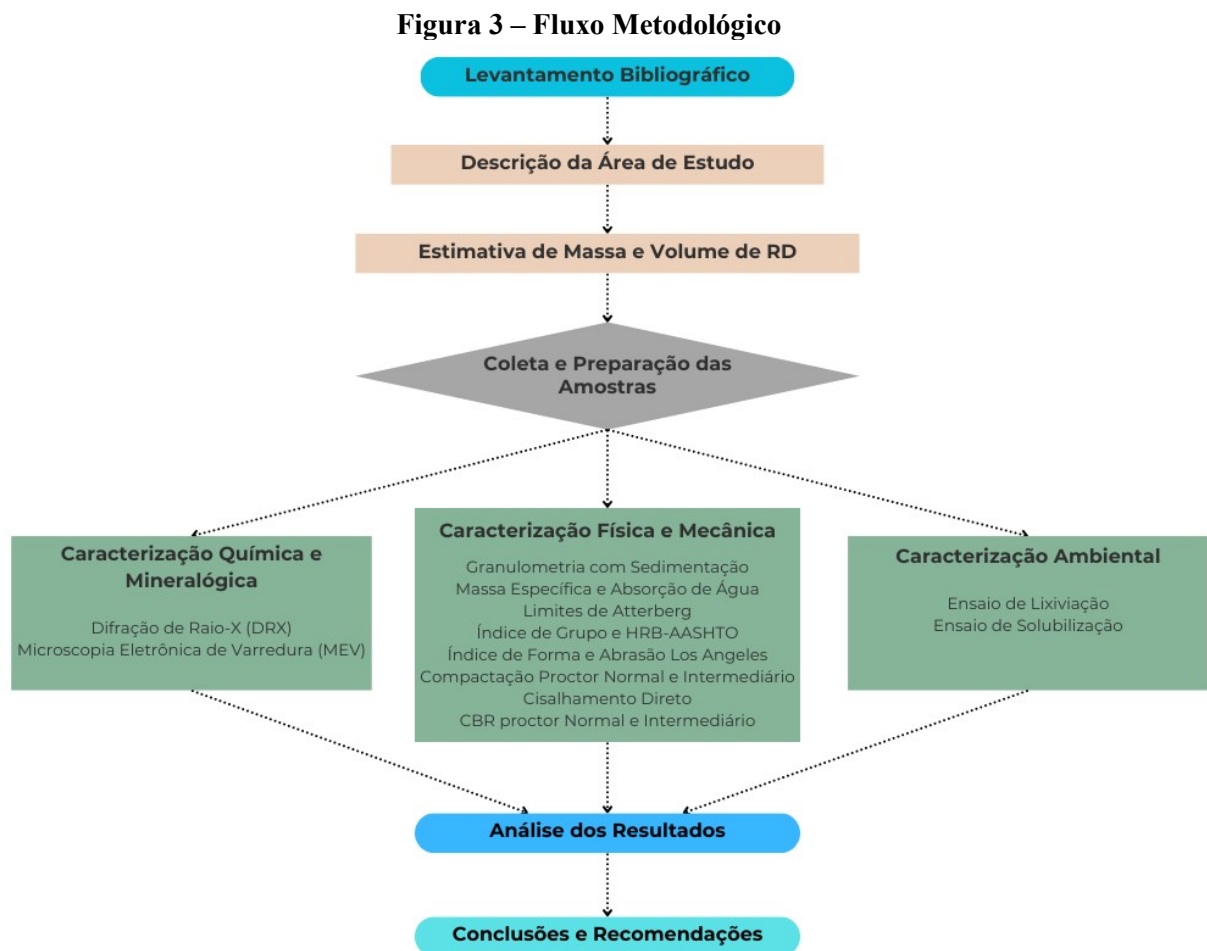
econômicas, ambientais e sociais, sendo que a gestão responsável do RCD não apenas impulsiona o crescimento econômico sustentável, mas também gera a inclusão social, empregos e contribui significativamente para a preservação ambiental pela redução na extração e utilização de recursos naturais virgens.

3 METODOLOGIA

Este estudo se caracteriza como experimental e aplicado, fundamentando-se na estimativa da massa e volume de RD gerados nas áreas afetadas pela subsidência em Maceió e na análise laboratorial das propriedades do AR para aplicação em pavimentação.

A abordagem metodológica foi estruturada em cinco etapas principais: revisão bibliográfica, com levantamento teórico sobre RCD, sua caracterização e aplicação em pavimentação; delimitação da área de estudo, com identificação dos bairros impactados pela subsidência do solo; caracterização laboratorial dos materiais, análises físicas, mecânicas, químicas e ambientais do AR e do solo da região; e avaliação da opção técnica do AR, comparação dos resultados com agregados naturais e estudo do potencial de aplicação na infraestrutura viária.

A Figura 3 ilustra o fluxo adotado na pesquisa.

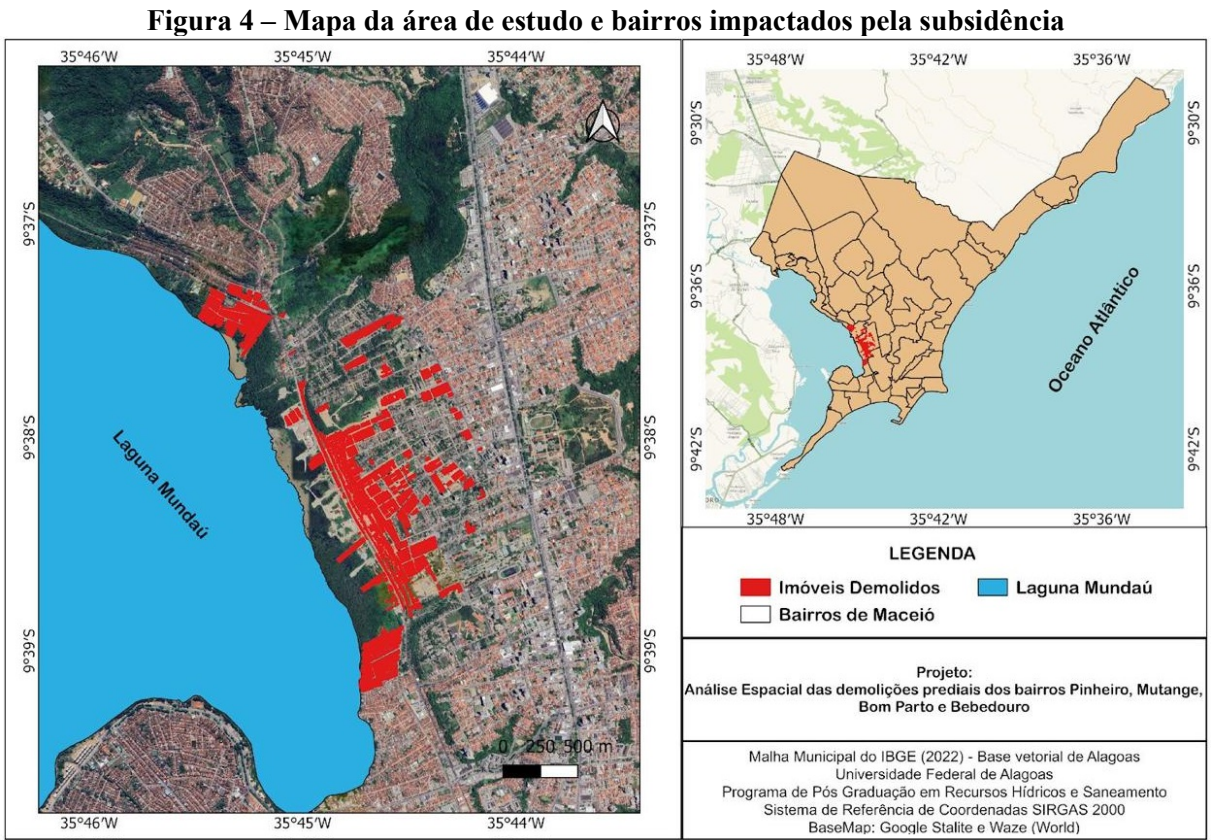


Fonte: Elaborado pelo autor.

3.1 ÁREA DE ESTUDO

A pesquisa foi realizada na cidade de Maceió, capital do Estado de Alagoas, localizada na região Nordeste do Brasil. A cidade apresenta um relevo caracterizado por faixa litorânea, encostas e plataforma do tabuleiro, influenciando a estabilidade geotécnica das áreas urbanas.

Os bairros Pinheiro, Mutange, Bebedouro, Bom Parto e Farol foram os mais afetados pela subsidência do solo, um fenômeno causado pela extração intensiva de sal-gema, iniciada na década de 1970. O processo gerou o colapso de cavidades subterrâneas, resultando em fissuras, instabilidade estrutural e evacuação emergencial de milhares de moradores (SGB-CPRM, 2019; Braskem, 2025). A Figura 4 apresenta a localização dos bairros afetados e das áreas de demolição.



Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados do SGB-CPRM (2019) e Braskem (2023).

De acordo com o Relatório Síntese (Temis; Braskem, 2023), as demolições ocorrem desde 2021, priorizando edificações em áreas de maior risco. Embora parte dos resíduos gerados estejam sendo reutilizados em obras de infraestrutura, na própria região, a maior parte ainda representa um desafio ambiental e logístico (Ribeiro *et al.*, 2021).

A população sofreu impactos sociais e econômicos, incluindo o deslocamento compulsório das residências, a desvalorização imobiliária das áreas afetadas e dificuldades na realocação em outras regiões do município.

A Tabela 1 apresenta a população residente nos bairros impactados antes do processo de evacuação. Segundo o Censo Demográfico do IBGE (2010), os bairros afetados abrigavam mais de 61 mil habitantes, representando 6,59% da população total de Maceió e 6,61% dos domicílios da cidade.

Tabela 1 – População e domicílio dos bairros afetados pela subsidência em Maceió

Bairro	Domicílios	% de Domicílios	População	% da População
Bebedouro	2.795	1,02%	10.103	1,08%
Bom Parto	3.773	1,38%	12.841	1,38%
Farol	5.021	1,83%	16.859	1,81%
Mutange	731	0,27%	2.632	0,28%
Pinheiro	5.792	2,11%	19.062	2,04%
Total dos Bairros Afetados	18.112	6,61%	61.497	6,59%
Maceió (Total)	273.893	100%	932.748	100%

Fonte: Elaborado pelo autor, adaptado de IBGE (2010).

A caracterização da área de estudo é fundamental para a compreensão da magnitude dos desafios locais. Além disso, esta caracterização fornece subsídios essenciais para embasar conhecimentos sobre metodologias empregadas na estimativa de RD, nas análises laboratoriais e no estudo da previsão técnica para o reaproveitamento sustentável de materiais.

3.2 ESTIMATIVA DE MASSA E VOLUME DE RD

A estimativa da quantidade de RD gerados nas áreas afetadas pela subsidência em Maceió é uma etapa crucial para o planejamento eficiente da gestão sustentável desses materiais. Neste estudo, foi proposta uma abordagem que combina o uso de imagens de satélite, análise geoespacial e revisão da literatura, a fim de determinar a taxa de geração de RD. Além disso, a massa específica dos resíduos, obtida a partir dos ensaios laboratoriais detalhados na seção de caracterização física e mecânica, será empregada no cálculo do volume total gerado.

3.2.1 Determinação das Áreas de Demolição

Para identificar e quantificar as áreas demolidas, foram utilizadas imagens do Google Earth, cobrindo o período de 2021 a 2023. As imagens, processadas no software QGIS 3.34 Prizren, foram vetorizadas para delimitar com precisão as áreas afetadas. A escolha do Google Earth se justifica por sua maior resolução espacial em comparação as imagens disponíveis em

satélites como o Sentinel-2, cuja resolução não foi suficiente para identificar com clareza as edificações demolidas durante o período analisado.

A metodologia combinou essas imagens com dados fornecidos pelo Centro Integrado de Monitoramento e Alerta de Desastres (CIMADEC) da Defesa Civil de Maceió (DCM, 2025), integrando informações de geoprocessamento e monitoramento geotécnico. Essa abordagem permitiu uma representação detalhada das áreas atingidas, essencial para a gestão dos resíduos gerados e para o planejamento de estratégias de reciclagem e destinação final (Vassileva *et al.*, 2021; Rosa *et al.*, 2024).

Os dados sobre os imóveis demolidos foram obtidos junto à DCM, mediante solicitação formal via e-mail, enviado em maio de 2024, sendo que a instituição forneceu arquivos em formato Shapefile, contendo as informações atualizadas das demolições realizadas. A partir desses arquivos, foi possível calcular o total de imóveis demolidos.

3.2.2 Levantamento da Taxa de Geração de Resíduos

Na determinação da taxa de geração de RD, foi realizada uma busca na literatura, com o objetivo de identificar estudos que abordam a previsão de geração de RD em contextos urbanos (Song *et al.*, 2017; Yu *et al.*, 2019). A busca foi conduzida nas bases de dados, *Scopus* e *Web of Science*, em maio de 2024, utilizando os seguintes termos: “*demolition waste*”; “*demolition waste*” AND “*geratio rate*”; “*demoliton waste*” AND “*demoliton rate*” e “*demolition waste*” AND “(*generation rate*” OR “*demoliton rate*)”. Foram considerando apenas estudos publicados nos últimos dez anos, com o intuito de alinhar os resultados aos com o Plano Estadual de Resíduos de Alagoas, estabelecido em 2015.

A partir da busca, foram identificados 54 artigos, dos quais 11 estudos foram selecionados com base em critérios de inclusão como a apresentação da taxa de geração de RD em t/m² ou kg/m² e a contextualização em cenários urbanos comparáveis. Os dados extraídos desses trabalhos incluíram a quantidade de resíduos gerados por metro quadrado de área demolida, bem como variáveis associadas, como o tipo de edificação, o método de demolição adotado e as condições socioeconômicas e tecnológicas locais.

A partir dessa revisão bibliográfica, foi calculada uma taxa média de geração de RD em toneladas por metro quadrado de área demolida, a qual servirá como referência para estimar a quantidade total de resíduos produzidos. Esse parâmetro também possibilita a elaboração de projeções futuras, contribuindo para uma gestão mais eficaz e sustentável dos resíduos na região.

3.2.3 Cálculo da Massa e Volume de RD

A partir dos dados obtidos nas etapas anteriores, a massa total de RD foi estimada pela seguinte *Equação 1*.

$$M_t = A * T_x \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

M_t é a massa total de RD, expressa em toneladas (t);

A é a área de demolição, expressa em metros quadrados (m²);

T_x é a taxa média de geração de RD, encontrada na literatura, expressa em toneladas por metro quadrado (t/m²).

Já o volume total de RD, foi calculado utilizando a *Equação 2*.

$$V_t = \frac{M_t}{\rho_s} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

V_t é o volume total de RD, expresso em metros cúbicos (m³);

M_t é a massa total de RD, expressa em toneladas (t);

ρ_s é a massa específica dos grãos contendo frações passadas e retida na peneira de 4,8 mm, expressa em gramas por centímetro cúbico (g/cm³).

Os resultados obtidos serão analisados conjuntamente para realizar projeções de planos futuros quanto à geração de resíduos, permitindo uma avaliação específica das estratégias de reaproveitamento. Esses dados são essenciais para subsidiar a aplicação técnica do AR na pavimentação e contribuir diretamente para a redução dos impactos ambientais relacionados ao descarte inadequado dos RD.

3.3 COLETA, PREPARAÇÃO E ANÁLISE DA COMPOSIÇÃO DO RD

3.3.1 Coleta e Preparação das Amostras

A coleta e a preparação das amostras foram realizadas em duas etapas distintas, considerando a ordem de coleta dos materiais. Essa abordagem garantiu uma caracterização individual adequada, essencial antes da formulação das misturas finais destinadas aos ensaios laboratoriais.

Inicialmente, recebeu-se o RD, proveniente das edificações demolidas na encosta do bairro do Mutange, decorrente da primeira fase de remoção das construções comprometidas

pela subsidiência. Essa operação foi conduzida pela empresa Braskem, sem a participação direta da Universidade Federal de Alagoas (UFAL). O material foi coletado em campo, homogeneizado, armazenado em sacos e transportado por meio de caçambas até a UFAL, onde foram armazenados no galpão próximo a Pró-Reitoria de Infraestrutura (PROINFRA). Posteriormente foram coletados 25 sacos e levados para o Laboratório de Geotecnia do Centro de Tecnologia (CTEC) da UFAL.

Posteriormente, foi recebido o solo natural do bairro Mutange (SM), coletado para fins de comparação e composição das misturas experimentais.

3.3.1.1 Homogeneização e Quarteamento

Para garantir uniformidade e representatividade das amostras, os materiais foram inicialmente espalhados sobre uma superfície limpa e submetidos à homogeneização manual. Posteriormente, aplicou-se o método do quarteamento, dividindo-se as amostras em quatro partes iguais e selecionando uma fração representativa para os ensaios laboratoriais subsequentes.

3.3.1.2 Preparação das Amostras para Análises

Antes dos ensaios, o SM foi submetido ao destorroamento manual e o RD passou por um peneiramento preliminar para remover partículas maiores que 76 mm. Após esse procedimento, os materiais foram organizados e identificados em conformidade com a NBR 6457:2024 (ABNT, 2024), garantindo uma preparação adequada para a realização dos ensaios laboratoriais.

3.3.2 Análise da Composição do RD

A análise da composição do RD seguiu rigorosamente os critérios definidos pela Resolução CONAMA nº 307/2002. O objetivo principal desta etapa foi identificar a fração predominante de materiais inertes e quantificar possíveis impurezas que poderiam comprometer o reaproveitamento do AR. A metodologia envolveu triagem manual detalhada e inspeção visual macroscópica.

3.3.2.1 Separação e Categorização do RD

Uma amostra representativa de 20 kg de RD foi distribuída uniformemente sobre uma superfície limpa, permitindo uma inspeção visual minuciosa e a separação manual dos materiais que compõem os resíduos.

3.3.2.2 Classificação dos Materiais

Durante a separação, os resíduos foram classificados segundo sua natureza física e composição química, com base na classificação exigida pela Resolução CONAMA nº 307/2002. O material majoritário, identificado como Classe A, compreende frações cimentícias (concreto e argamassa), brita, cerâmicos (tijolos e telhas), além de pisos e azulejos.

Materiais indesejáveis e contaminantes, como madeira, vidro, plástico, gesso, forros, tubulações, fiações elétricas, papéis, resíduos orgânicos e outros materiais classificados nas Classes B, C e D também foram identificados, quantificados e devidamente separados.

Cada fração identificada foi pesada individualmente, determinando suas proporções percentuais na composição total.

3.3.3 Constituição das Amostras Experimentais

Após essas etapas de coleta, preparação e classificação inicial, foram elaboradas as amostras experimentais para a realização dos ensaios laboratoriais. Para garantir resultados robustos e comparáveis, três tipos de amostras foram preparadas em duplicatas:

- Amostras compostas exclusivamente por AR (100% agregado reciclado);
- Amostras compostas exclusivamente por SM (100% solo natural do Mutange);
- Amostras compostas por mistura AR-SM, contendo 85% de AR e 15% de SM.

Essa abordagem permitiu avaliar individualmente as propriedades mecânicas e ambientais dos materiais AR e SM, além de analisar o desempenho da mistura AR-SM. O objetivo final foi identificar o potencial técnico de reaproveitamento de AR em camadas estruturais de pavimentos, especialmente em aplicações com baixo volume de tráfego.

3.4 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E MECÂNICA

A caracterização física e mecânica das amostras é uma etapa essencial para avaliar a viabilidade técnica do AR e do SM para aplicação em pavimentação. Os ensaios foram realizados conforme normativas da ABNT, descritas na Quadro 1.

Quadro 1 – Ensaios de caracterização física e mecânica das amostras

ENSAIO	NORMA ABNT	AR	SM	AR-SM
Granulometria c/ Sedimentação	NBR 7181:2018	✓	✓	✓
Massa Específica	NBR 6458:2017	✓	✓	✓
Absorção	NBR 6458:2017	✓	X	X
Limites de Atterberg	NBR 6459:2016	✓	✓	✓

	NBR 7180:2016			
Índice de Grupo		✓	✓	✓
Classificação HRB-ASSHTO	AASHTO M145:1991	✓	✓	✓
Índice de Forma	NBR 7809:2019	✓	X	X
Desgaste por Abrasão	NBR NM51:2001	✓	X	X
Compactação	NBR 7182:2016	✓	✓	✓
Cisalhamento Direto	NBR 7809:2019	✓	✓	✓
CBR	NBR 9895:2016	✓	✓	✓

✓ : Realizado

X : Não Realizado (ensaio não aplicável ao material)

Fonte: Autor, 2025

Os ensaios indicados como “Não Realizado” não foram aplicados ao as amostras de SM devido à limitação técnica de que o material deve apresentar fração significativa retida na peneira com abertura de 4,8 mm. Como o solo adotado neste estudo apresentou praticamente 100% de passante nessa peneira, os ensaios foram realizados apenas para o AR, que atende aos critérios granulométricos exigidos.

3.4.1 Granulometria por Sedimentação

A análise granulométrica permitiu determinar a distribuição granulométrica dos materiais, parâmetro essencial para prever seu comportamento em pavimentos. O ensaio foi realizado segundo a norma NBR 7181:2018 (ABNT, 2018), empregando métodos de peneiramento e sedimentação para classificar as frações granulométricas do AR, SM e da mistura AR-SM.

Inicialmente, uma amostra representativa de 10 kg foi separada para o ensaio granulométrico completo. O material retido na peneira 2,0 mm (peneira #10) foi utilizado para o peneiramento grosso, enquanto uma fração de 120 g da porção passante na peneira #10 foi reservada para o ensaio de sedimentação, Figura 8.

Figura 5 – Sequência do ensaio de granulometria do AR



Fonte: Autor, 2025.

3.4.1.1 Sedimentação

O ensaio de sedimentação, Figura 6, teve por objetivo determinar a distribuição das partículas finas, inferiores a 0,075 mm. A fração de 120 g previamente separada foi mantida em imersão durante 24 horas numa solução defloculante de hexametáfosfato de sódio. Após o período de repouso, a amostra foi dispersa mecanicamente por 15 minutos e, em seguida, transferida para uma proveta graduada de 1.000 mL com água destilada.

As leituras foram realizadas com auxílio de um densímetro, em intervalos padronizados de 30 segundo, 1 minuto, 2 minutos, 4 minutos, 8 minutos, 15 minutos, 30 minutos, 1 hora, 2 horas, 4 horas, 8 horas e 24 horas, permitindo identificar a distribuição das partículas finas ao longo do tempo.

Figura 6 – Ensaio de sedimentação com utilização de densímetro



Fonte: Autor, 2025.

3.4.1.2 Peneiramento Grosso e Peneiramento Fino

Para o peneiramento grosso, a fração retida na peneira de abertura de 2,0 mm foi lavada para remover finos aderidos e posteriormente seca em estufa a 110°C até massa constante. Em seguida, utilizando-se um agitador mecânico de peneiras, Figura 7, a amostra foi submetida ao peneiramento nas seguintes peneiras padrão: 50 mm, 38 mm, 25 mm, 19 mm, 9,5 mm e 4,8 mm. Após o processo, cada fração retida foi cuidadosamente pesada para posterior análise e elaboração das curvas granulométricas.

Figura 7 – Agitador e sequência de peneiras utilizadas no ensaio granulométrico



Fonte: Autor, 2025.

No peneiramento fino, a fração apresentada na Figura 8, de 120 g que passou pela peneira #10 de 2,0 mm, foi lavada sobre a peneira #200 de 0,075 mm para remover partículas muito fina. Após secagem, utilizou-se novamente o agitador mecânico, submetendo a amostra as peneiras com aberturas de 1,2 mm, 0,6 mm, 0,42 mm, 0,25 mm, 0,15 mm e 0,075 mm. Cada fração retida foi pesada, permitindo assim a caracterização precisa da granulometria o material fino.

Figura 8 – Fração do AR passante na peneira de malha #10



Fonte: Autor, 2025.

Os resultados obtidos foram expressos graficamente em curvas granulométricas, possibilitando uma comparação entre as distribuições granulométricas do AR, do SM e da mistura AR-SM. Na Figura 9, apresenta o material após o ensaio.

Figura 9 – Amostras do AR após peneiramentos



Fonte: Autor, 2025.

Na análise granulométrica foram avaliados parâmetros fundamentais para a classificação dos solos, como o diâmetro efetivo das partículas (D_{10}) que representa o diâmetro pelo qual 10% das partículas do solo possuem diâmetro menor que ele, sendo uma medida da finura do material. De forma semelhante, foram definidos o D_{30} (diâmetro correspondente a 30% passante) e D_{60} (diâmetro correspondente a 60% passante), permitindo uma compreensão mais detalhada da distribuição dos tamanhos das partículas.

Com esses parâmetros, calculam-se dois coeficientes importantes para a classificação granulométrica do solo:

Coefficiente de não uniformidade (CNU), também conhecido como coeficiente de uniformidade, determinado pela *Equação 3*.

$$CNU = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad \text{Equação 3}$$

Esse coeficiente indica a dispersão dos tamanhos das partículas. Valores de $CNU < 5$ caracterizam solos uniformes, com pouca variação de tamanho entre as partículas, $CNU > 15$, indicam solos desuniformes, com grande variação de tamanhos, e os valores entre 5 e 15 classificam o solo como medianamente uniforme.

E o coeficiente de curvatura (CC), calculado conforme a *Equação 4*.

$$CC = \frac{D_{30}^2}{D_{60} * D_{10}} \quad \text{Equação 4}$$

Esse coeficiente avalia o formato da curva granulométrica. Solos são considerados bem graduados, ou seja, apresentam boa distribuição entre partículas finas, médias e grossas, quando o valor do CC está entre 1 e 3. Valores superiores a 3 indicam solos mal graduados,

ou seja, com distribuição inadequada entre os tamanhos de grãos, o que pode comprometer seu desempenho em aplicações geotécnicas.

Além desses parâmetros, segundo a NBR 15115:2004 (ABNT, 2014), para que o AR seja considerado adequado para uso em pavimentação, a fração passante na peneira de 0,42 mm deve ser de, no máximo, 40%, e a dimensão máxima das partículas não deve ultrapassar 63,5 mm. Adicionalmente, o AR deve apresentar características de solo desuniforme e bem graduado para garantir melhor compactação e resistência mecânica, tornando-o apto à aplicação em camadas de infraestrutura rodoviária.

3.4.2 Massa Específica

A determinação da massa específica foi conduzida conforme a NBR 6458:2017 (ABNT, 2017), que especifica os métodos para determinar a massa específica dos grãos retidos e passantes na peneira de abertura de 4,8 mm.

Inicialmente, foram coletados 10 kg de amostras de AR, preparada de acordo com o disposto indicado na NBR 6457:2024 (ABNT, 2024), que passaram por peneiramento para separar as partículas menores que 4,8 mm. As partículas retidas no peneiramento foram lavadas para eliminar resíduos aderidos e, posteriormente, imersas em água destilada à temperatura ambiente por 24 horas para assegurar a saturação completa, conforme os procedimentos da norma, apresentada na Figura 10.

Figura 10 – Amostra superfície seca, amostra totalmente submersa e seca em estufa.



Fonte: Autor, 2025.

Após o período de imersão, o material foi removido da água e levemente seco com um tecido absorvente umedecido, de modo a retirar somente a água superficial. Este processo garante que os grãos sejam pesados em um estado saturado, mas sem água livre na superfície.

3.4.2.1 Grãos Retidos na Peneira 4,8 mm

A massa específica dos grãos retidos (ρ_{sr}), expressa em gramas por centímetros cúbicos (g/cm³), foi calculada utilizando a *Equação 5*.

$$\rho_{sr} = \frac{M_s}{M_s - M_i} * \rho_w \quad \text{Equação 5}$$

Onde:

M_s é a massa da amostra seca, expressa em gramas (g);

M_i é a massa da amostra totalmente imersa em água destilada, expressa em gramas (g);

ρ_w é a massa específica da água à temperatura do ensaio, expressa em gramas por centímetro cúbico (g/cm³).

3.4.2.2 Partículas Passantes na Peneira 4,8 mm

Para as partículas que passaram pela peneira de 4,8 mm, a massa específica foi determinada utilizando o método de picnômetro descrito no Anexo B da NBR 6458:2017 (ABNT, 2017). Na preparação da amostra para o ensaio, colhe cerca de 250 g da amostra preparada de acordo com a NBR 6457:2024 (ABNT, 2024). Este método inclui a dispersão da amostra em água destilada e a remoção de ar aderente por vácuo, garantindo a precisão da medida de volume e, conseqüentemente, da massa específica.

A massa específica dos grãos de solo passantes (ρ_{sp}), expressa em gramas por centímetro cúbico (g/cm³), foi calculada utilizando a *Equação 6*.

$$\rho_{sp} = \frac{M_1 * \left[\frac{100}{100 + w} \right]}{\left[\frac{M_1 * 100}{100 + w} \right] + M_3 - M_2} * \rho_{w(T)} \quad \text{Equação 6}$$

Onde:

M_1 é a massa do solo úmido, expressa em gramas (g);

M_2 é a massa do picnômetro + solo + água, à temperatura do ensaio, expressa em gramas (g);

M_3 é a massa do picnômetro cheio de água, à temperatura do ensaio, expressa em gramas (g);

w é a umidade inicial da amostra, expressa em gramas por gramas (g/g);

$\rho_{w(T)}$ é a massa específica da água à temperatura do ensaio, expressa em gramas por centímetro cúbico (g/cm³).

3.4.2.3 Massa Específica do Material Retido e Passante na Peneira de 4,8 mm

Por fim a massa específica combinada contendo frações retidas e passantes na peneira de 4,8 mm, foi calculada utilizando a *Equação 7*.

$$\rho_s = \frac{\rho_{sp} * \rho_{sr}}{\rho_{sp} * M_p + \rho_{sr} * M_r} * 100 \quad \text{Equação 7}$$

Onde:

ρ_s é a massa específica dos grãos do solo contendo frações passada e retida na peneira de 4,8 mm, expressa em gramas por centímetro cúbico (g/cm³);

ρ_{sp} é a massa específica dos grãos de solo que passam pela peneira de 4,8 mm, determinada de acordo com o Anexo B, expressa em gramas por centímetro cúbico (g/cm³);

ρ_{sr} é a massa específica dos grãos de pedregulho retidos na peneira de 4,8 mm, expressa em gramas por centímetro cúbico (g/cm³);

M_p é a porcentagem em massa, da fração da amostra que passa na peneira de 4,8 mm;

M_r é a porcentagem em massa, da fração da amostra retida na peneira de 4,8 mm.

3.4.3 Absorção de Água

A absorção dos grãos retidos na peneira de 4,8 mm, calculada utilizando a *Equação 8*.

$$A_a = \frac{M_{sat} - M_s}{M_s} * 100 \quad \text{Equação 8}$$

Onde:

A_a é a absorção da água, em porcentagem da massa de material seco;

M_s é a massa da amostra seca, expressa em gramas (g);

M_{sat} é a massa da amostra saturada, superfície seca, expressa em gramas (g).

3.4.4 Limites de Atterberg

A plasticidade do solo foi avaliada por meio dos ensaios de limite de liquidez e limite de plasticidade, conforme normas NBR 6459:2016 (ABNT, 2016) e NBR 7180:2016 (ABNT, 2016). Esses parâmetros são fundamentais a caracterização de solos finos, auxiliando na previsão do comportamento mecânico dos materiais em diferentes condições de umidade.

3.4.4.1 Limites de Liquidez (LL)

O ensaio de LL foi realizado utilizando o aparelho de Casagrande, ilustrado na Figura 11. Esse ensaio determina o teor de umidade no qual um sulco aberto na amostra de solo se une após 25 golpes consecutivos aplicados pelo dispositivo.

Figura 11 – Aparelho de Casagrande

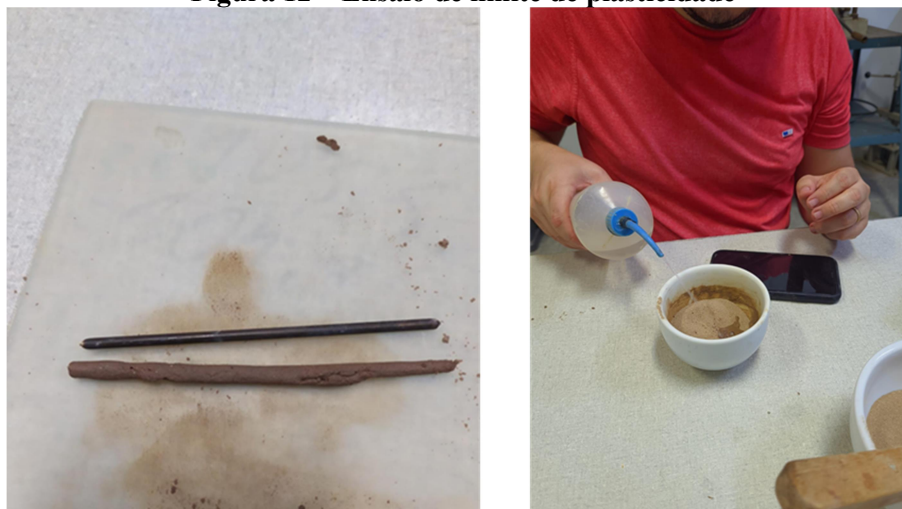


Fonte: Autor, 2025.

3.4.4.2 Limites de Plasticidade (LP)

O LP foi determinado por meio da rolagem manual. O solo foi moldado na forma de um cilindro e rolado sobre uma placa de vidro até atingir um diâmetro de 3 mm, momento em que se fragmentou. A Figura 12 apresenta a execução do ensaio.

Figura 12 – Ensaio de limite de plasticidade



Fonte: Autor, 2025.

3.4.4.3 Índice de Plasticidade (IP)

O IP foi calculado pela diferença entre o LL e o LP, conforme especificado na NBR 7180:2016 (ABNT, 2016), conforme *Equação 9*.

$$IP = -LP \quad \text{Equação 9}$$

O IP é expresso em porcentagem (%) e representa a quantidade máxima de água que pode ser adicionada ao solo, a partir do seu limite de plasticidade, sem que ele perca sua consistência plástica. Esse parâmetro é crucial para a avaliação da coesão e comportamento de solos finos.

Segundo Burmister (1949), o IP pode ser classificado quantitativamente conforme a Tabela 2.

Tabela 2 – Classificação do índice de plasticidade	
IP	DESCRIÇÃO
0	Não plástico
1 – 5	Ligeiramente plástico
5 – 10	Plasticidade baixa
10 – 20	Plasticidade média
20 – 40	Plasticidade alta
> 40	Plasticidade muito alta

Fonte: Elaborado pelo autor, adaptado de Burmister (1949).

O IP desempenha um papel fundamental na classificação de solos finos, sendo amplamente utilizado na construção de diagramas, como o gráfico de plasticidade de Casagrande. Atualmente, essa ferramenta é a base para o Sistema Unificado de Classificação do Solo (SUCS), amplamente adotado em projetos geotécnicos.

3.4.5 Índice de Grupo (IG)

O IG é um parâmetro utilizado para classificar apenas quanto à sua capacidade de suporte, sendo expresso por um número inteiro que varia de 0 a 20. Quanto menor o valor do IG, melhor será a qualidade do solo para uso como subleito em pavimentação. Assim, um solo com IG = 0 é considerado excelente, enquanto um solo IG = 20 é classificado como inadequado para aplicação em subleitos rodoviários (Senço, 2001).

O cálculo do IG é realizado por meio da Equação 10, levando em consideração os resultados da granulometria e dos limites de consistência do solo.

$$IG = 0,2. a + 0,005. a. c + 0,01. b. d \quad \text{Equação 10}$$

Onde,

a, b são coeficientes granulométricos, obtidos a partir da porcentagem de material passante na peneira #200;

c, d são coeficientes de plasticidade, determinados pelos valores do LL e do IP.

Adotando p como sendo o teor de silte + argila do solo, ou seja, a porcentagem que passa na peneira nº 200, vamos considerar as regras descritas no Quadro 2.

Quadro 2 – Fatores e condições que influenciam no resultado de IG

Fatores	Condição	Resultado
$a = p - 35$;	Se $p > 75\%$, adota-se 75; Se $p < 35\%$, adota-se 35.	a varia de 0 a 40.
$b = p - 15$;	Se $p > 55\%$, adota-se 55; Se $p < 15\%$, adota-se 15.	b varia de 0 a 40.
$c = LL - 40$;	Se $LL > 60\%$, adota-se 60; Se $LL < 40\%$, adota-se 40.	c varia de 0 a 20.
$d = IP - 10$;	Se $IP > 30$, adota-se 30; Se $IP < 10$, adota-se 10.	d varia de 0 a 20.

Fonte: Elaborado pelo autor, adaptado do manual de técnicas de pavimentação.

3.4.6 Classificação HRB-AASHTO

A classificação HRB-AASHTO M 145-91 (AASHTO, 1991) foi desenvolvida em 1945, a partir de uma revisão do sistema originalmente criada pelo *Bureau of Public Roads* (Escritório de Estradas Públicas dos Estados Unidos, então vinculado ao ministério da Agricultura). Esse sistema foi amplamente adotado e consolidado como um dos métodos mais utilizados mundialmente para a classificação de solos com finalidade rodoviária específica.

A classificação é baseada em parâmetros fundamentais da engenharia geotécnica, incluindo, granulometria: percentual de material passante na peneira #200; LL: determina a transição do solo entre os estados plásticos e líquidos; LP: indica o teor de umidade no qual o solo começa a se comportar plasticamente; e o IG: avalia a qualidade do solo como subleito rodoviário.

Embora os resultados obtidos sejam estimativos e empíricos, a classificação HRB-AASHTO, é amplamente aplicada, pois se correlaciona diretamente com a capacidade de suporte do solo auxiliando na previsão do comportamento mecânico do material, especialmente quando combinado com o CBR. A Figura 13 ilustra a estrutura da classificação de solos segundo o sistema HRB-AASHTO.

Figura 13 – Classificação de solo pela HRB-AASHTO

Classificação Geral	Materiais Granulares							Materiais Siltosos e Argilosos			
	(35% ou menos passando na peneira nº 200)							(mais de 35% passando na peneira nº 200)			
Grupo	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5 / A-7-6
Peneiração: % que passa: Peneira Nº 10 Peneira Nº 40 Peneira Nº 200 (p)	50 máx. 30 máx. 15 máx.	50 máx. 25 máx.	51 mín. 10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 mín.	36 mín.	36 mín.	36 mín.
Características da fração que passa na peneira nº 40: Limite de Ligidez - LL(%) Índice de Plasticidade - IP(%)	6 máx.		NP	40 máx. 10 máx.	41 máx. 10 máx.	40 máx. 11 mín.	41 máx. 11 mín.	40 máx. 10 máx.	41 máx. 10 máx.	40 máx. 11 mín.	41 máx. 11 mín.
Índice e Grupo - IG	0		0	0		4 máx.		8 máx.	12 máx.	16 máx.	20 máx.
Materiais que Predominam	Pedra Britada Pedregulho e Areia		Areia Fina	Areia, Areia Siltosa ou Areia Argilosa				Solos Siltosos		Solos Argilosos	
Comportamento Geral como Subleito	Excelente a Bom							Fraco a Pobre			

Fonte: Elaborado pelo autor, adaptado de DNIT (2006).

A classificação divide os solos em sete grupos principais (A-1 a A-7), além de subgrupos, que diferenciam as variações dentro de cada classe. Essa categorização permite determinar a adequação dos solos para aplicação em subleitos rodoviários.

As características dos solos de cada um dos grupos e subgrupos da classificação HRB-AASHTO, estão relacionadas à sua utilização em pavimentação.

3.4.6.1 Grupo A-1 – Solos Granulares de Alta Capacidade de Suporte

Os solos pertencentes ao Grupo A-1 são compostos predominantemente por fragmentos de pedra, pedregulho, areia grossa e fina, podendo conter algum aglutinante de solo não plástico ou fracamente plástico.

Subgrupo A-1-a – Materiais com maior teor de fragmentos de pedra ou pedregulho, podendo conter material fino bem graduado como aglutinante.

Subgrupo A-1-b – Materiais constituídos principalmente de areia grossa, com ou sem aglutinante de solo bem graduado.

Ideais para subleitos rodoviários, pois apresentam baixa plasticidade e alta resistência mecânica.

3.4.6.2 Grupo A-2– Solos de Transição entre Granulares e Finos

Os solos do Grupo A-2 representam uma categoria entre os solos granulares (A-1 e A-3) e os solos finos (A-4 a A-7). Esse grupo inclui materiais com até 35% de material passante na peneira #200, mas que não podem ser classificados como A-1 ou A-3 devido ao teor de finos ou à plasticidade elevada.

Subgrupos A-2-4 e A-2-5 – Incluem solos com até 35% passante na peneira #200, sendo parcialmente constituídos por frações semelhantes aos grupos A-4 e A-5, materiais silto-argilosos.

Subgrupos A-2-6 e A-2-7 – Incluem solos com características semelhantes aos grupos A-6 ou A-7, contendo uma fração argilosa mais expressiva.

Podem ser usados como subleitos, mas exigem avaliação criteriosa do comportamento mecânico.

3.4.6.3 Grupo A-3– Solos Arenosos Finos

Os solos do Grupo A-3 são predominantemente areias finas de praia ou deserto, com baixo teor de silte e argila. Também contém misturas de areias finas mal graduadas e pequenas quantidades de areias grossa e pedregulho depositada por correntes fluviais.

Possuem baixa coesão e resistência mecânica, sendo inadequadas para subleitos rodoviários de alto tráfego.

3.4.6.4 Grupo A-4– Solos Siltosos Plásticos Não ou Moderadamente Plásticos

Os solos classificados com A-4 são predominantemente siltosos, com pouca ou nenhuma plasticidade. Normalmente contêm mais de 5% passante na peneira #200 e podem incluir misturas de solos finos siltosos com até 64% de areia e pedregulho retidos.

Baixa capacidade de suporte, podendo apresentar problemas de compactação e drenagem.

3.4.6.5 Grupo A-5– Solos Silto-Diatomáceos e Micáceos

Os solos do Grupo A-5 são semelhantes aos do grupo A-4, mas apresentam características diatomáceas ou micáceas, com alto limite de liquidez e elevação.

Suscetíveis a variações volumétricas e baixa resistência, sendo pouco indicadas para subleitos.

3.4.6.6 Grupo A-6– Solos Argilosos Plásticos

Os solos do Grupo A-6 são predominantemente argilosos apresentando plasticidade elevada. Normalmente, mais de 75% do material passa na peneira #200 podendo conter até 64% de areia e pedregulho retidos. Esses solos sofrem variações volumétricas elevadas entre os estados secos e úmidos.

Baixa capacidade de suporte, exigindo tratamento para uso em pavimentação.

3.4.6.7 Grupo A-7– Solos Argilosos de Alta Plasticidade

Os solos do Grupo A-7 são semelhantes aos do grupo A-6, mas possuem um LL mais elevado, sendo altamente expansivos e sujeitos a variações volumétricas destacadas.

Se $IP \leq LL - 30$, será A-7-5; se $IP > LL - 30$, será A-7-6.

Subgrupo A-7-5 – Materiais com plasticidade moderado em relação ao LL.

Subgrupo A-7-6 – Materiais com e índice de plasticidade elevado, sujeitos a variações volumétricas extremas.

Requer estabilização para qualquer tipo de aplicação rodoviária.

3.4.7 Forma das Partículas e Índice de Forma do AR

O índice de forma dos grãos do AR foi determinado de acordo com a NBR 7809:2019 (ABNT, 2019), utilizando o paquímetro para calcular a relação entre comprimento (L) e espessura média (E) das partículas, Figura 14.

Figura 14 – AR Peneirado e Preparado para o Ensaio do Paquímetro



Fonte: Autor, 2025.

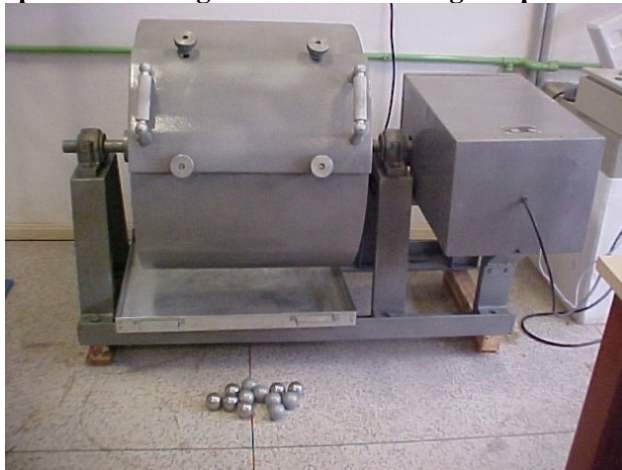
Esse ensaio foi fundamental para identificar a presença de partículas alongadas e lamelares, que podem comprometer a compactação e a resistência mecânica do material. Os grãos cúbicos apresentam melhor comportamento mecânico, favorecendo a compactação e a estabilidade estrutural, enquanto as partículas alongadas ou lamelares tendem a reduzir a resistência ao carregamento e dificultar a distribuição uniforme dos esforços.

3.4.8 Desgaste por Abrasão Los Angeles

O ensaio de abrasão Los Angeles foi realizado em conformidade com a NBR NM51:2001 (ABNT, 2001), com o objetivo de avaliar a resistência ao desgaste dos AR. A

Figura 15 apresenta o equipamento utilizado no ensaio, junto com as cargas abrasivas empregadas.

Figura 15 – Equipamento e cargas abrasivas do desgaste por abrasão Los Angeles



Fonte: Autor, 2025.

Para realização do ensaio, os corpos de prova foram submetidos a 500 rotações dentro de um tambor de aço, contendo esferas de ferro como carga abrasiva. A resistência ao desgaste foi quantificada por meio de perda de massa (%) dos agregados após o ensaio.

De acordo com os critérios técnicos, um valor de desgaste até 55% indica que o material apresenta desempenho adequado para aplicação em pavimentação.

3.4.9 Compactação Proctor Normal e Proctor Intermediário

O ensaio de compactação proctor foi realizado em conformidade com a NBR 7182:2016 (ABNT, 2016), que estabelece que cinco determinações da relação densidade seca-umidade são suficientes para a representação graficamente a curva de compactação do material. As preparações das amostras foram realizadas com os procedimentos descritos na NBR 6457:2024 (ABNT, 2024).

A energia de compactação aplicada varia de acordo com a função do aterro e do tipo de construção a ser realizada. Nos serviços onde a compactação pode ser complementada pelo tráfego, o controle é realizado com base na energia de compactação normal. Já em obras onde a pavimentação ocorre imediatamente após a terraplenagem, as densidades mais elevadas são desativadas, tornando necessário o uso de energias de compactação intermediária ou modificada.

Para esta pesquisa, foram adotadas as energias de compactação normal e intermediária, avaliando o comportamento dos materiais sob diferentes condições de adensamento.

Inicialmente, a amostra foi seca ao ar, destorroada, homogeneizada e quarteada, conforme os procedimentos estabelecidos pela NBR 7182:2016 (ABNT, 2016). Após a preparação, o material foi peneirado na malha de 19 mm para remover partículas de maior dimensão garantida à uniformidade do material utilizado no ensaio.

A umidade do solo foi ajustada progressivamente para permitir a obtenção de cinco pontos experimentais, abrangendo valores abaixo, próximos e acima da umidade ótima presumida.

3.4.9.1 Compactação com Energia Normal

Na compactação com energia normal, as amostras compostas exclusivamente por SM foram moldados em um cilindro pequeno, em três camadas, aplicando-se 26 golpes por camada, com um soquete 2,5 kg e altura de queda de 30,5 cm, conforme os parâmetros do ensaio Proctor normal. Por sua vez, as amostras contendo AR foram compactadas em um cilindro de maiores dimensões, utilizando cinco camadas, com 12 golpes por camadas, empregando-se um soquete de 4,54 kg e altura de queda de 45,7 cm. A Figura 16 ilustra o corpo de prova durante o processo de compactação.

Figura 16 – Corpo e prova sendo compactado



Fonte: Autor, 2025.

Durante a execução dos ensaios, cada camada foi escarificada antes da deposição da camada subsequente, garantindo a uniformidade da compactação. Após moldagem, o excesso de material foi removido e a superfície do corpo de prova foi nivelada com o auxílio de uma régua biselada.

3.4.9.2 Compactação com Energia Intermediária

Na compactação com energia intermediária, a metodologia adotada seguiu procedimentos semelhantes à compactação normal, com ajustes na quantidade de golpes por camada pra refletir a aplicação intermediária de energia. Para as amostras compostas exclusivamente por SM, utilizou-se o cilindro pequeno, com três camadas e aplicação de 21 golpes por camada, mantendo o soquete de 2,5 kg e altura de queda de 30,5 cm. Já para as amostras contendo AR, a compactação foi realizada no cilindro grande, em cinco camadas, com 26 golpes por camada, utilizando-se o soquete de 4,54 kg e a altura de queda de 45,7 cm.

Após compactação, o cilindro foi pesado para determinar a massa úmida do material compactado. Posteriormente as amostras foram retiradas do molde e duas porções foram separadas para a determinação do teor de umidade.

Os valores obtidos foram utilizados para a construção da curva de compactação, a partir de qual foram determinados a massa específica aparente seca máxima e a umidade ótima do material.

3.4.10 Cisalhamento Direto

O ensaio de cisalhamento direto foi conduzido com o objetivo de avaliar a resistência ao cisalhamento do AR, SM e da mistura AR-SM, bem como suas possíveis aplicações em camadas estruturais de pavimentação. Este ensaio é amplamente utilizado em engenharia geotécnica para determinar os parâmetros de resistência ao cisalhamento de materiais granulares e coesivos, sendo essencial para prever o comportamento mecânico dos solos em diferentes condições de carregamento (Pinto, 2006).

Durante o ensaio, os corpos de prova foram submetidos a diferentes níveis de tensão normal, estabelecidos em 50 kPa, 100 kPa, 150 kPa e 200 kPa, permitindo a obtenção da envoltória de resistência ao cisalhamento. A taxa de deslocamento foi ajustada para 0,02 mm/min, conforme recomendações técnicas para materiais de baixa permeabilidade, garantindo que o ensaio ocorra sob condições drenadas.

A partir dos resultados obtidos, foram determinados os parâmetros geotécnicos fundamentais para a caracterização da resistência ao cisalhamento do material, sendo elas:

Coesão (c') – Representa a resistência do solo ao cisalhamento na ausência de barreiras normais.

Ângulo de atrito interno (ϕ) – Indica a capacidade do material de resistência ao cisalhamento devido ao atrito entre partículas.

3.4.11 Índice de Suporte Califórnia (CBR)

O CBR é um dos ensaios mais utilizados na engenharia de pavimentos para avaliar a resistência mecânica de solos e agregados, auxiliando na definição de sua aplicabilidade em camadas estruturais de pavimentação. O ensaio foi realizado em conformidade com a NBR 9895:2016 (ABNT, 2016), que estabelece os procedimentos para determinação do CBR em laboratório.

O CBR é definido como a relação percentual entre a pressão necessária para penetrar um pistão padrão em uma amostra compactada de solo e a pressão necessária para produzir a mesma penetração em um material de referência, que exige 1.000 psi para 2,5 mm (0,1") de penetração ou 1.500 psi para 5,0 mm (0,2") de penetração (Senço, 2001).

O ensaio foi realizado utilizando um molde cilíndrico grande com base e colarinho, além de acessórios como prato-base perfurado, disco espaçador, prato perfurado com prensa central ajustável, soquete de 4,5 kg, extensômetro, prensa com anel dinamométrico, tanque de ensinamento, cápsulas para umidade, estufa, balança e peneira de 19 mm.

As amostras foram previamente secas ao ar, destorroadas e passadas na peneira de 19 mm para garantir a uniformidade da granulometria. Em seguida, foi determinada a umidade higroscópica, e água foi adicionada para ajustar o solo a uma umidade próxima à umidade ótima definida nos ensaios de compactação.

As amostras foram compactadas utilizando duas energias de compactação distintas:

Compactação com Energia Normal: Aplicação de 12 golpes por camada com soquete de 4,54 kg, caindo de 45,7 cm de altura, em cinco camadas.

Compactação com Energia Intermediária: Aplicação de 26 golpes por camada com soquete de 4,54 kg, caindo de 45,7 cm de altura, em cinco camadas.

Após a compactação, os corpos de prova foram preparados para os ensaios de expansão e penetração.

3.4.11.1 Expansão

A etapa inicial do ensaio consistiu na avaliação da expansão volumétrica do solo quando imerso em água. Para isso, o disco espaçador foi colocado no interior do molde

cilíndrico, sendo coberto com papel-filtro para evitar perda de material. Após a compactação, o disco espaçador foi substituído pelo prato perfurado com haste de expansão e pesos, permitindo a medição da expansão volumétrica do solo.

Os corpos de prova foram submersos em água por 96 horas em um tanque de imersão, garantindo a saturação do material tanto pelo topo quanto pela base. Durante esse período, foram realizadas leituras de deformação (expansão ou recalque) a cada 24 horas, com aproximação de 0,01 mm.

Após a saturação, os corpos de prova foram retirados do tanque, deixados em dessoramento livre por 15 minutos e posteriormente pesados para determinação da massa úmida. A Figura 17 apresenta os corpos de prova imersos durante o ensaio de expansão.

Figura 17 – Corpos de prova imersos durante o ensaio de CBR

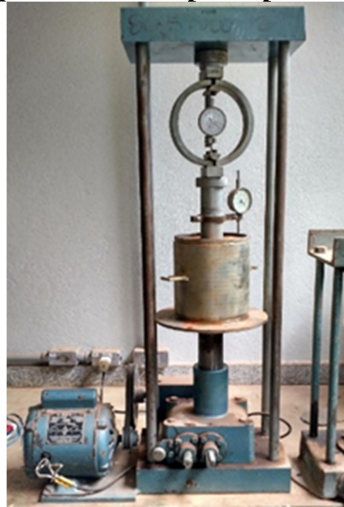


Fonte: Autor, 2025.

3.4.11.2 Penetração

Após a etapa de expansão, os corpos de prova foram instalados na prensa de carga para a realização do ensaio de penetração. O molde cilíndrico com corpo de prova e sobrecarga foi posicionado na máquina, e o pistão de penetração foi ajustado sobre a superfície do topo da amostra, com o extensômetro zerado. A Figura 18 ilustra a prensa utilizada no rompimento do CBR.

Figura 18 – Rompimento do corpo de prova na prensa de CBR



Fonte: Autor, 2025.

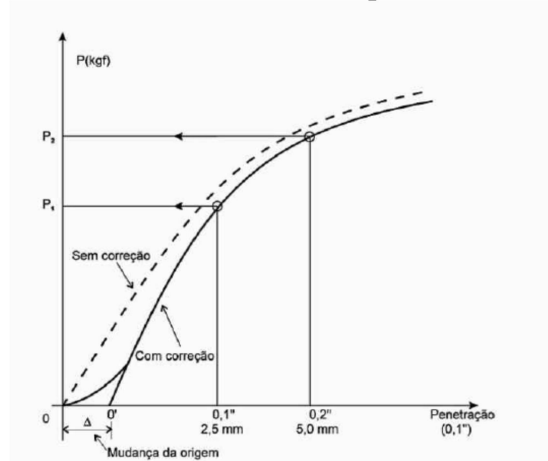
O carregamento foi aplicado a uma velocidade constante de 1,27 mm/min, registrando-se as leituras de carga e penetração a cada 30 segundos durante um período total de 10 minutos. Os valores de carga foram anotados para as seguintes penetrações: 0,63 mm, 1,25 mm, 2,5 mm, 5,0 mm, 7,5 mm, 10,0 mm e 12,5 mm.

3.4.11.3 Curva de Penetração e Cálculos do CBR

A partir dos valores de carga e penetração, foi traçada a curva de penetração, onde os valores de carga (kgf) foram plotados no eixo das ordenadas, e os valores de penetração (mm) no eixo das abscissas. Caso a curva apresentasse um ponto de inflexão, foi realizada uma retificação do gráfico, deslocando a origem até a interseção da reta ajustada com o eixo das abscissas.

Com os dados ajustados, foram determinadas as cargas correspondentes às penetrações de 2,5 mm e 5,0 mm. A Figura 19 ilustra a curva de saída obtida no ensaio.

Figura 19 – Gráfico da curva de penetração do CBR



Fonte: Autor, 2025.

O CBR foi calculado pela relação entre a pressão medida e a pressão padrão do material de referência, conforme a *Equação 11*.

$$CBR = \frac{Press\tilde{a}oCalculada}{Press\tilde{a}oPadr\tilde{a}o} * 100 \quad \text{Equa\~{c}\~{a}o 11}$$

Os valores obtidos foram comparados com materiais convencionais utilizados em camadas de pavimentos rodoviários, possibilitando a avaliação da previsão do uso do AR e do SM na infraestrutura viária. Para do índice final de CBR, é adotado a maior dos valores para as penetrações de 2,5 mm (0,1”) e 5,0 mm (0,2”), conforme a metodologia padronizada.

3.5 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E MINERALÓGICA

A caracterização química e mineralógica das amostras realizadas por meio da Difração de Raio-X (RDX) e da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). As análises foram conduzidas com o objetivo de identificar os principais minerais presente e avaliar a estabilidade química dos materiais estudados, AR, SM e mistura AR-SM. Para isso, as amostras foram enviadas ao o Laboratório de Química da UFAL, onde foram conduzidos os ensaios laboratoriais específicos.

3.5.1 Difração de Raio-X (DRX)

A técnica de DR, utilizada para identificar a composição cristalina das amostras, foi realizada por um difratômetro de raio-X modelo XRD 6000 da Shimadzu. As análises foram realizadas utilizando um tubo de raio-X com alvo de cobre (Cu), operando a 40 kV e 30 mA, com os seguintes procedimentos desenvolvidos:

- **Preparação das amostras:** As amostras foram previamente secas à temperatura ambiente, em seguida, peneiradas na malha #200, com abertura de 0,0075 mm, afim e garantir a uniformidade granulométrica. Após o peneiramento, o material foi submetido à fresagem leve e compactado em porta-amostras, buscando minimizar os efeitos de orientação preferencial dos cristais durante a análise.
- **Aquisição dos dados:** Os difratogramas foram obtidos por meio de varredura no intervalo 5° a 70° (2θ), com passo angular de 0,02° e velocidade de varredura de 2°/min, operando em modo contínuo. O tempo de aquisição foi ajustado para assegura a obtenção de um sinal confiável e resolução adequada para a identificação mineralógica.

A identificação dos minerais, por comparação dos picos obtidos com padrões do banco de dados do ICDD (*International Center for Diffraction Data*), permitiu uma determinação qualitativa dos minerais predominantes.

3.5.2 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A MEV foi utilizada para a análise morfológica das partículas, permitindo a observação da estrutura dos agregados, porosidade e interação entre os constituintes do material. Esse método se baseia na incidência de um feixe de elétrons de alta energia sobre a superfície da amostra, gerando imagens ampliadas que possibilitam uma avaliação detalhada da microestrutura e de possíveis contaminantes.

A análise química elementar foi realizada via Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS), acoplada ao MEV, envolvendo as seguintes etapas:

- Condições operacionais: Feixe de elétrons a 10 kV e 12 kV, com ampliação de 50x, 200x, 500x, 1000x, 5000x e 10000x, a fim de avaliar a estrutura superficial e a distribuição das partículas. As imagens foram registradas com uma sonda de elétrons de 3,0 nm, utilizando o detector de elétrons secundários.
- Aquisição dos espectros: os elementos detectados foram quantificados e comparados com padrões conhecidos, permitindo a identificação de óxidos principais.
- Distribuição química: os espectros de EDS foram usados para quantificar os principais constituintes das amostras, incluindo óxidos de silício (SiO₂), alumínio (Al₂O₃), ferro (Fe₂O₃), cálcio (CaO), titânio (TiO₂), entre outros e possíveis impurezas.

3.6 CARACTERIZAÇÃO AMBIENTAL

A caracterização ambiental dos materiais foi realizada por meio de ensaios de lixiviação e solubilização, obedecendo aos critérios estabelecidos pelas normas NBR 10004:2004 (ABNT, 2004), NBR 10005:2004 (ABNT, 2004) e NBR 10006:2004 (ABNT, 2004), além das diretrizes da Resolução CONAMA 357/2005 (Brasil, 2005). Esses testes permitem avaliar a mobilidade e solubilidade de contaminantes, identificando possíveis impactos ambientais associados ao uso de materiais em aplicações geotécnicas e pavimentação.

Os ensaios foram conduzidos com amostras representativas dos resíduos testados, com o objetivo de verificar a presença de metais pesados e substâncias químicas nocivas, classificando-os quanto à sua periculosidade ambiental e exibindo para reutilização.

3.6.1 Ensaio de Lixiviação

O ensaio de lixiviação foi conduzido em conformidade com a NBR 10005:2004 (ABNT, 2004), que estabelece o procedimento para obtenção do extrato lixiviado de resíduos sólidos. Essa análise permitiu identificar a mobilidade de compostos químicos no material, simulando o contato da destruição com a água subterrânea. Segundo essa normativa, uma destruição é classificada como perigosa caso os valores de emissões presentes no lixiviado ultrapassem os limites estabelecidos na listagem nº 07 anexa à norma.

Para a realização do ensaio, foram coletadas 500 g do material triturado, passando na peneira de abertura de 9,5 mm, garantindo a representatividade da amostra. Em seguida, o material foi misturado em uma solução extratora composta por água deionizada e ácido acético, conforme especificado pela NBR 10005:2004. A mistura foi submetida a agitação contínua por 18 horas, a uma rotação de 30 rpm, em agitador mecânico, de modo a promover a mobilização dos contaminantes potencialmente presentes na amostra.

Após esse período, o líquido extraído foi filtrado e submetido a análises químicas, abrangendo a determinação da concentração de metais pesados (chumbo, cádmio, cobre e zinco), além da avaliação de parâmetros físico-químicos, como pH, condutividade elétrica e sólidos dissolvidos totais (TDS). A quantificação dos metais foi realizada pela Espectrometria de Absorção Atômica (EAA).

Os resultados obtidos foram comparados com os limites estabelecidos na legislação ambiental brasileira, em conformidade com a NBR 10004:2004 (ABNT, 2004), que orienta a classificação dos resíduos sólidos em três categorias: inerte, não inerte ou perigosa. Essa classificação permite determinar se o material apresenta risco ambiental e se pode ser utilizado com segurança em aplicações geotécnicas.

3.6.2 Ensaio de Solubilização

O ensaio de solubilização foi realizado em conformidade com a NBR 10006:2004 (ABNT, 2004), que define o procedimento para obtenção do extrato solubilizado de resíduos. Esta análise avaliou a solubilidade dos compostos químicos presentes na amostra, determinando o potencial de liberação de contaminantes em meio aquoso. De acordo com a

NBR 10004:2004 (ABNT, 2004), esse ensaio permite classificar os resíduos entre inertes (Classe II-B) e não inertes (Classe II-A).

Para a realização do ensaio, foram coletados 500 g do material, que foram homogeneizados e preparados para a remoção. A amostra foi misturada com água destilada na proporção de 1:20 (massa/volume) e mantida em mecânica por 5 horas, garantindo a dissolução dos possíveis contaminantes presentes sem desperdício.

Após esse processo, o filtrado foi submetido a análises químicas para a determinação de metais pesados chumbo (Pb), cádmio (Cd), cobre (Cu), cromo (Cr), ferro (Fe), manganês (Mn) e arsênio (As), além de parâmetros como pH, condutividade elétrica e TDS.

Os valores obtidos foram comparados com os limites estabelecidos na NBR 10004:2004 (ABNT, 2004), permitindo classificar os resíduos como inertes (Classe II-B) ou não inertes (Classe II-A). Os resíduos classificados como não inertes possuem maior potencial de impacto ambiental, exigindo medidas de controle para disposição ou reaproveitamento seguro.

3.6.3 Classificação Ambiental dos Resíduos

A partir dos resultados dos ensaios de lixiviação e solubilização, os materiais analisados foram classificados conforme a NBR 10004:2004 (ABNT, 2004), considerando os limites estabelecidos para metais pesados e substâncias químicas tóxicas. Essa classificação é essencial para determinar a previsão de reutilização de materiais em aplicações geotécnicas, como base para pavimentação, e sua disposição ambientalmente segura.

Os critérios de classificação são:

Resíduos Classe I (Perigosos): apresentados em concentrações acima dos limites estabelecidos, representando risco ambiental e necessitando de tratamento adequado antes da disposição final.

Resíduos Classe II-A (Não Inertes): possuem contaminantes em níveis detectáveis, porém abaixo dos limites de periculosidade, podendo exigir restrições para reutilização.

Resíduos Classe II-B (Inertes): apresentam concentrações de contaminantes insignificantes ou ausentes, sendo passíveis de reaproveitamento sem restrições ambientais.

A classificação correta do descarte permite diretrizes para sua gestão, reaproveitamento e descarte, minimizando impactos ambientais e promovendo uma EC.

4 RESULTADOS

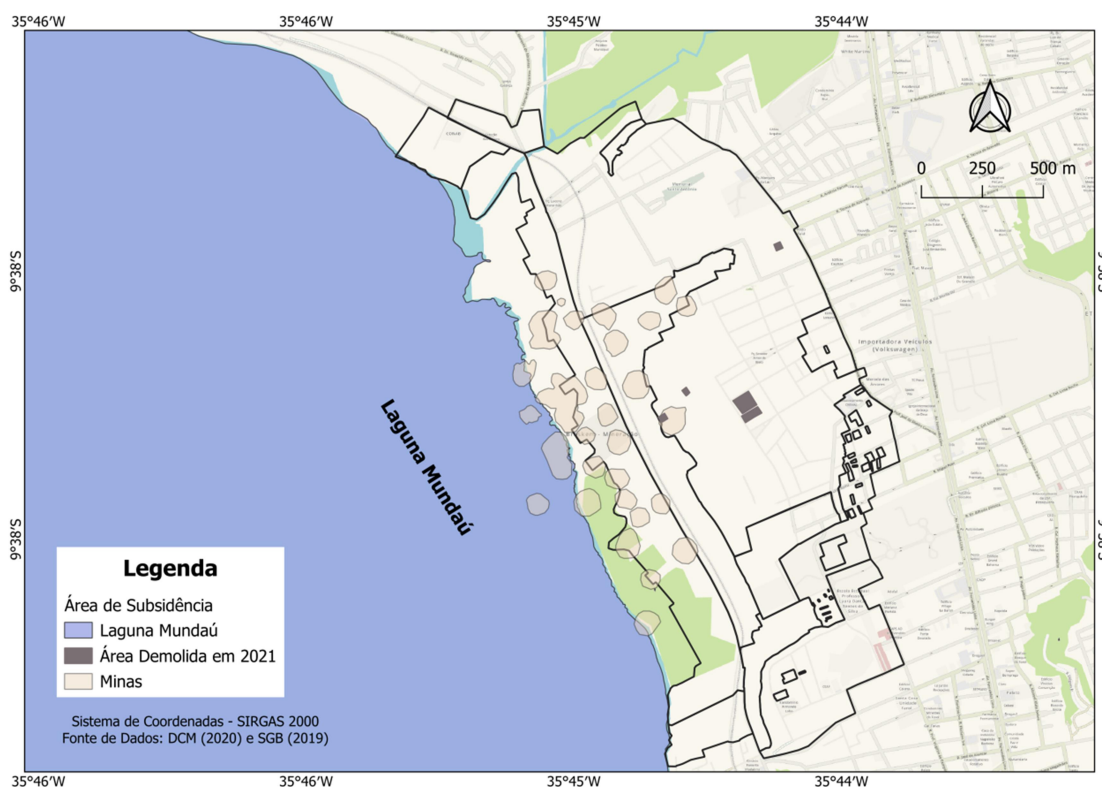
Os resultados obtidos neste estudo são apresentados a seguir, seguindo a estrutura metodológica previamente descrita. Inicialmente, detalha-se uma estimativa de massa e volume de RD gerados na área de estudo. Em seguida, são apresentados os resultados dos ensaios laboratoriais, contemplando a caracterização física, mecânica, química e ambiental do material, além da avaliação de sua viabilidade para aplicação em pavimentação.

4.1 ESTIMATIVA DE MASSA E VOLUME DO RD

4.1.1 Identificação das Áreas de Demolição

As imagens e os dados coletados revelam uma evolução significativa no número de imóveis demolidos entre o período estudado, onde em 2021, foram identificados cinco imóveis demolidos, totalizando uma área de 9.558,05 m², conforme ilustrados na Figura 20.

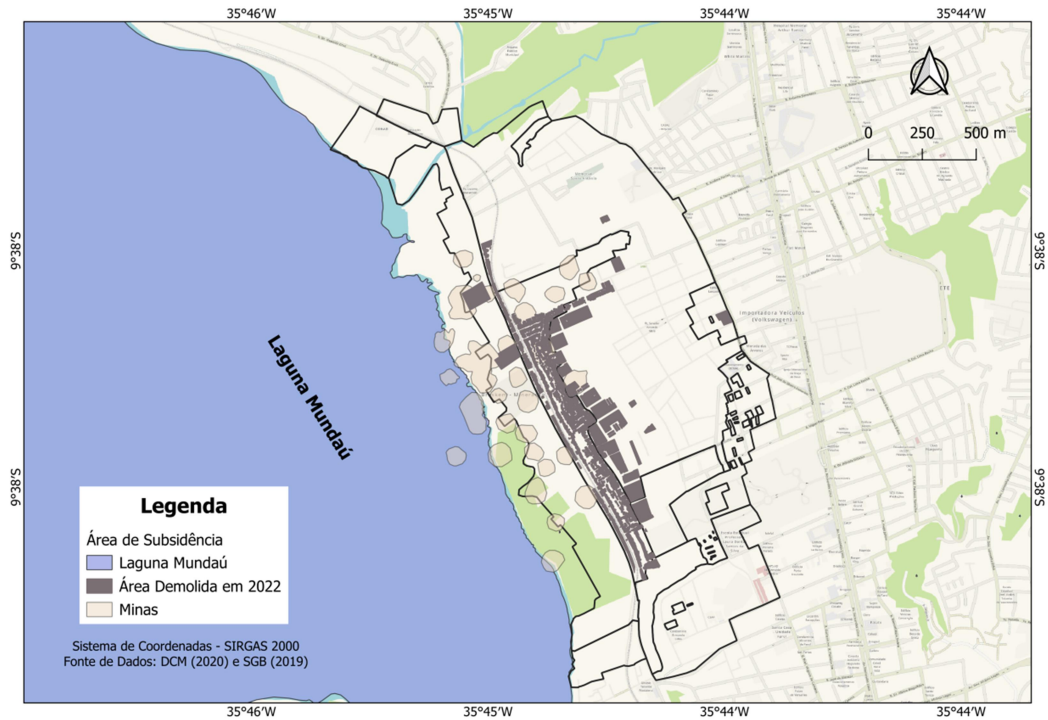
Figura 20 – Imóveis demolidos no ano de 2021.



Fonte: Autor, 2025.

Em 2022, foram registradas 2.409 demolições, totalizando uma área de 195.255,96 m², conforme demonstrado na Figura 21. Os resíduos gerados nessas demolições foram essenciais para a obtenção de amostras destinadas à caracterização e análise que sustentam os resultados do presente estudo.

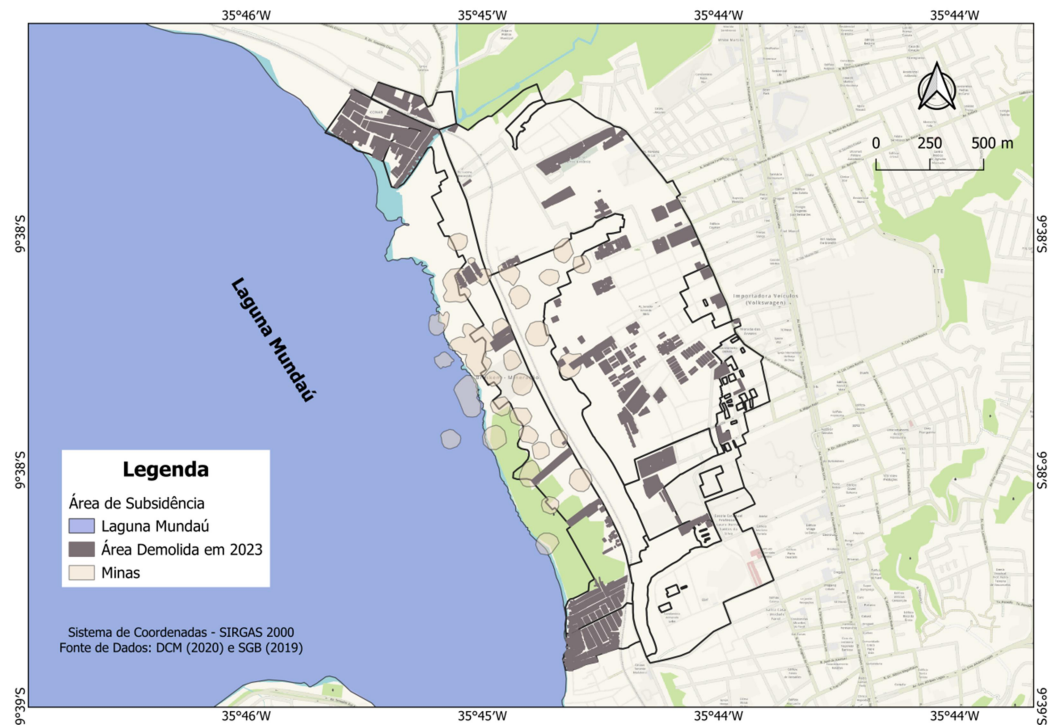
Figura 21 – Imóveis demolidos no ano de 2022.



Fonte: Autor, 2025.

Já em 2023, o número de imóveis demolidos cresceu significativamente, alcançando 4.933 edificações, abrangendo uma área de 299.487,73 m², conforme ilustrado na Figura 22.

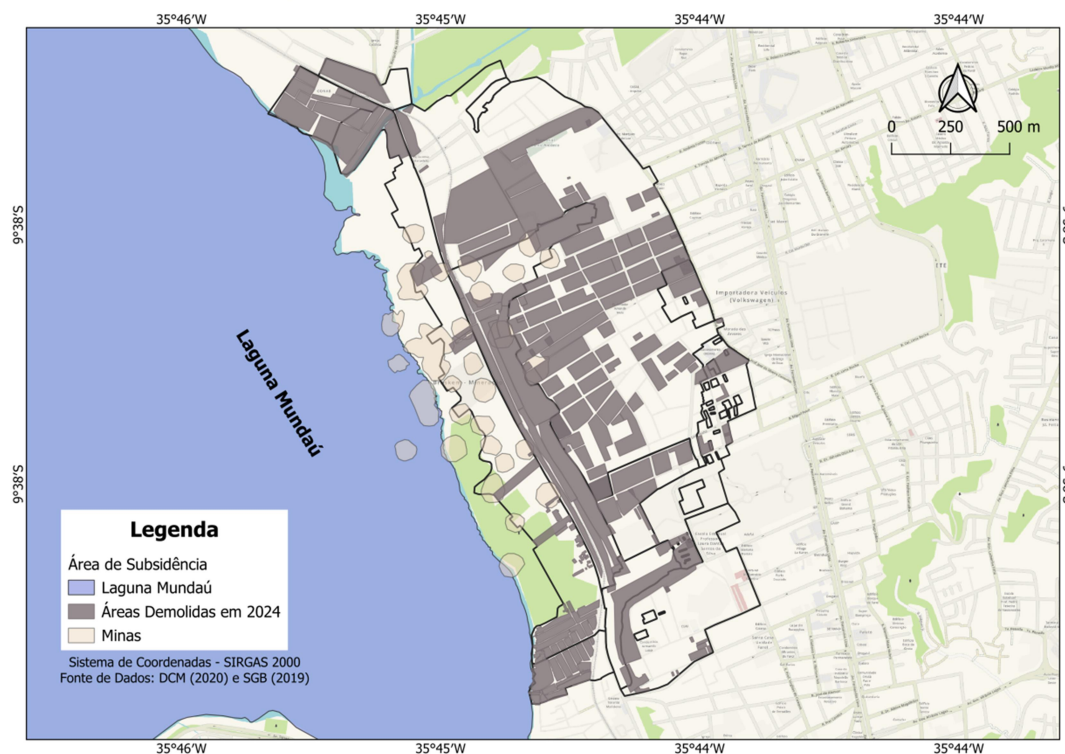
Figura 22 – Imóveis demolidos no ano de 2023.



Fonte: Autor, 2025.

Em 2024, foram identificados 2.254 imóveis demolidos, com uma área total de 140.325,55 m², conforme ilustrado na Figura 23.

Figura 23 – Imóveis demolidos no ano de 2024.



Fonte: Autor, 2025.

A expansão das áreas demolidas reflete a intensificação do processo de desocupação e evidencia a ampliação dos impactos urbanos provocados pela subsidência. Esse avanço progressivo ressalta a urgência de estratégias eficazes para controle dos resíduos e reaproveitamento sustentável dos materiais resultantes.

A condução das demolições de forma controlada e planejada é essencial para mitigar riscos estruturais e gerenciar os resíduos de maneira eficiente, conforme apontado por Chen *et al.* (2021).

4.1.2 Taxa de Geração de RD

A taxa de geração de resíduos de demolição foi estimada com base na revisão da literatura científica, resultando em uma média de 1,243 t/m³. O Quadro 3 apresenta os estudos utilizados para essa estimativa, abrangendo diferentes contextos urbanos internacionais.

Quadro 3 – Estudos considerados para estimativa da taxa de geração de RD.

Fonte	Descrição do Estudo	Taxa de RD (t/m ²)
(Wu <i>et al.</i> , 2015)	Gestão de resíduos de demolição em Nan Shan District, China, utilizando SIG para analisar a distribuição espacial e temporal dos RD.	1,475 (Residenciais)
		1,324 (Industriais)
		1,848 (Públicos)
(Mah; Fujiwara; Ho,	Análise da geração de RCD em projetos de	1,042

2016)	construção de grande altura na Malásia.	
(Zheng <i>et al.</i> , 2017)	Caracterização da geração e fluxos de RCD na China, com foco especial na demolição de edifícios.	1,360
(Song <i>et al.</i> , 2017)	Previsão da geração RCD na China.	1,010
(Islam <i>et al.</i> , 2019)	Investigação da geração de RCD em Dhaka, Bangladesh, em contexto de rápida urbanização e desenvolvimento econômico.	1,615
(Hoang <i>et al.</i> , 2020)	Quantificação das taxas de geração de RCD em diferentes tipos de obras em Hanói, Vietnã.	1,030
(Sun <i>et al.</i> , 2022)	Gestão de RCD na China, utilizando a teoria da dinâmica de sistemas e a avaliação do ciclo de vida.	1,008
(Cha, <i>et al.</i> , 2023a)	Desenvolvimento de um modelo de aprendizado de máquina para prever as taxas de geração de RD em áreas de reurbanização, na Coreia do Sul.	1,800
(Cha <i>et al.</i> , 2023b)	Previsão da taxa de geração de RD em áreas de reurbanização na Coreia do Sul, utilizando modelos de aprendizado de máquina, como Análise de Componentes Principais (PCA), K-Vizinhos Mais Próximos (KNN) e Árvore de Decisão, para desenvolver modelos de previsão.	0,987 (PCA) 0,993 (PCA+KMNN) 0,991 (PCA+AD)
(Cha <i>et al.</i> , 2023)	Gestão de RD de edifícios em contexto de crescimento urbano acelerado utilizando técnicas de aprendizado de máquina, como <i>Random Forest</i> (RF), <i>Gradient Boosting Machine</i> (GBM), <i>Extremely Randomized Trees</i> (ET) e <i>Extreme Gradient Boost</i> (XGBoost), para estimar a taxa de geração de RD.	1,169 (RF) 1,166 (GBM)
(Ittyeipe; Thomas; Ramaswamy, 2023)	Estimativa da taxa de geração de RD para estruturas de concreto armado em edifícios multi-andares demolidos na em Maradu, Ernakulam, Índia.	1,065

Fonte: Autor, 2025.

A taxa média de geração de resíduos, estimada em 1,243 t/m², mostrou-se consistente com os valores obtidos em cenários urbanos semelhantes, considerando padrões construtivos diversos, incluindo unidades residenciais unifamiliares e multifamiliares, além de prédios públicos e privados. Indicando uma padronização nas práticas de demolição e características similares aos resíduos gerados, o que reforça a aplicabilidade dos resultados deste estudo para outras regiões urbanas sujeitas a processos de instabilidade estrutural ou geológica.

4.1.3 Cálculo da Massa e do Volume Total de RD

Com base na taxa de geração de 1,243 t/m² e na massa específica de 2,523 g/cm³ (determinada nos ensaios laboratoriais descritos na seção 4.2.3), foi aplicada a *Equação 1* para calcular a massa total de RD, enquanto o volume total foi calculado pela *Equação 2*.

Os cálculos apontam uma massa total estimada de 1,3 milhão de toneladas e um volume aproximado de 515 mil m³ de resíduos a serem gerados até o fim do processo de demolições que seguem ocorrendo na região, conforme sintetizado na Tabela 3.

Estes valores são comparáveis aos encontrados no estudo de Ittyeipe, Thomas e Ramaswamy (2023), que analisaram demolições urbanas em grande escala e estimaram volumes semelhantes de resíduos.

Tabela 3 – Resumo da estimativa de área, massa e volume de demolição.

Ano	Imóveis Demolidos	Imóveis Demolidos (%)	Área (m ²)	Massa (toneladas)	Volume (m ³)
2021	5	0,03%	9.558,05	11.880,66	4.712,08
2022	2.049	14,13%	195.255,93	242.703,12	96.260,28
2023	4.933	34,02%	299.487,73	372.263,25	147.646,08
2024	2.254	15,54%	140.325,55	174.424,66	69.179,86
Futuro	5.259	36,27%	405.372,74	503.878,32	199.846,91
TOTAL	14.500	100%	1.050.000,00	1.305.150,00	517.645,21

Fonte: Autor, 2025.

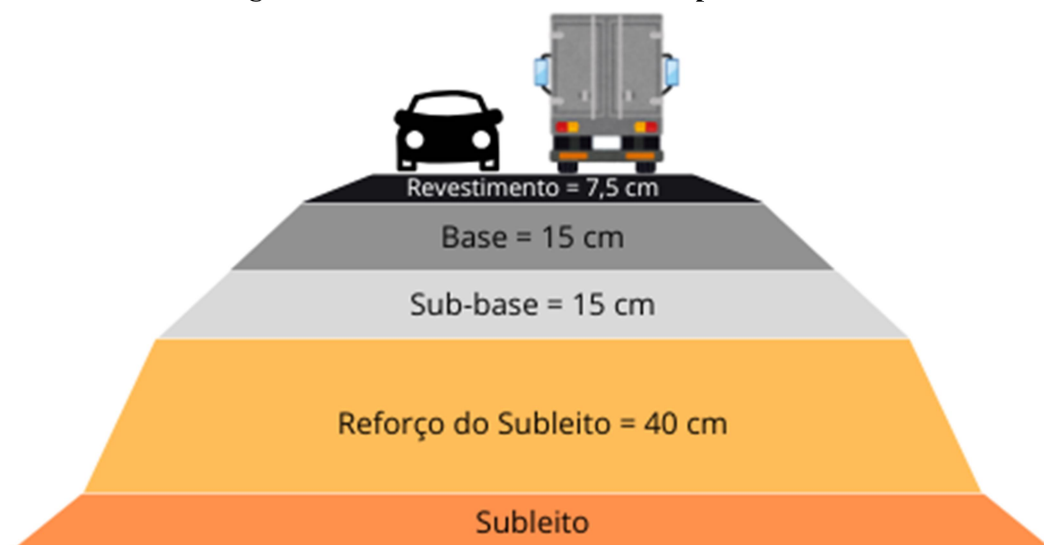
A projeção de massa e volume futuro baseia-se nos dados do relatório do SGB-CPRM (2019), que prevê a demolição de 14.500 imóveis afetados pela subsidência. Até dezembro de 2024, haviam sido demolidos 9.241 imóveis, equivalente a 63,73%, restando 5.259 edificações, o que corresponde a uma área adicional de 405.372,72 m².

Esses números destacam a dimensão do desafio para a gestão de RCD em Maceió, evidenciando a necessidade de estratégias eficazes para reciclagem e destinação final. Estudos, como o de Yu *et al.* (2019), apontam que a implementação de processos robustos de reciclagem pode reduzir consideravelmente o volume de resíduos destinados a aterros, reforçando a importância de políticas públicas bem estruturada para a gestão de resíduos.

O volume projetado de 517.645,21 m³ de RD evidencia um potencial expressivo para reaproveitamento desses materiais na construção de infraestrutura viária (Liu *et al.*, 2024).

Por exemplo, conforme perfil transversal ilustrado na Figura 24, ao utilizar o RD como material para uma camada de reforço de subleito, com 7 metros de largura e 0,4 metros de espessura, poderiam construir aproximadamente 129 km de rodovia (Athira; Kannan, 2023). No caso de ser utilizado na camada de sub-base com 15 cm de espessura, daria para executar aproximadamente 345 km de rodovia pavimentadas (Silva *et al.*, 2022).

Figura 24 – Estrutura de camadas de pavimentos.



Fonte: Autor, 2025.

A reutilização de resíduos reduz a necessidade da utilização de novos materiais e diminui o volume de resíduos destinados a aterros, promovendo uma abordagem mais sustentável e econômica.

4.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E MECÂNICA DOS MATERIAIS

Nesta seção serão apresentados os resultados das análises da composição do material presente no AR, a granulometria por sedimentação das amostras analisadas, a massa específica e absorção de água, os limites de Atterberg, a classificação das matérias pelo índice de grupo e pela HRB-AASTHO, forma das partículas e o desgaste por abrasão do AR, compactação para proctor normal e intermediário, bem como o comportamento por cisalhamento direto e o CBR das amostras.

4.2.1 Composição do AR

Após concluir o processo de separação e classificação visual do resíduo, conforme estabelecido pela Resolução CONAMA Nº 307/2002 (Brasil, 2002), identificamos distintos grupos de materiais. Entre eles, destacam-se os cimentícios (concreto e argamassa), brita, cerâmico (telha e tijolos), pisos e azulejos. Adicionalmente, identificamos a presença de resíduos indesejáveis, Classe B, tais como madeiras, vidros, plásticos, gessos, forros, tubulações, fiações elétricas e papéis. Essas observações corroboram com achados destacados em estudos anteriores (Leite *et al.*, 2011; Orioli, 2018; Zheng *et al.*, 2017).

A Figura 25 apresenta de maneira visual os materiais indesejáveis presente na amostra de AR provenientes das demolições realizadas nos bairros de Maceió/AL.

Figura 25 – Materiais indesejáveis presente na amostra do RD.



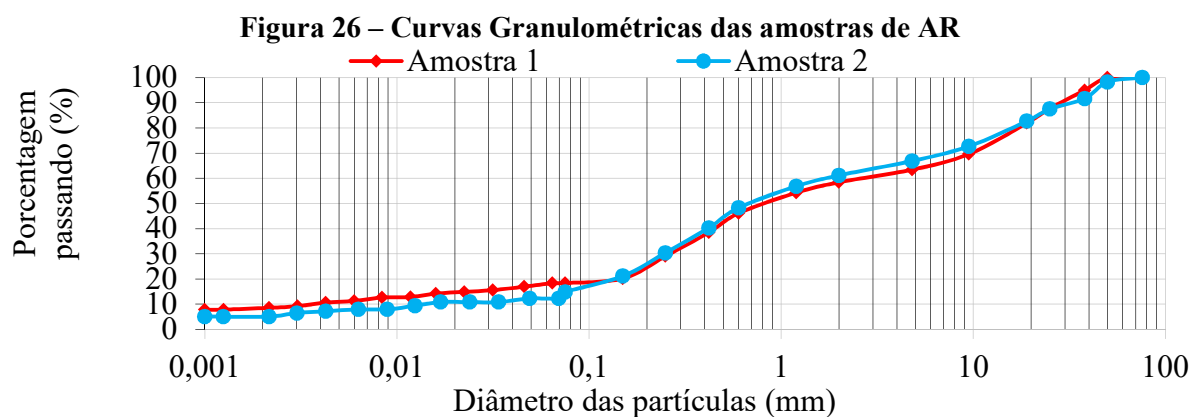
Fonte: Autor, 2025.

A proporção de matérias indesejáveis na amostra foi aproximadamente de 1,8% em relação à massa total, o que está em conformidade com a norma NBR 15115:2004 (ABNT, 2004). Essa norma estabelece um limite máximo de 3% em grupos distintos e um limite de 2% para material de mesmo grupo. Esses resultados estão alinhados com descobertas semelhantes encontrados em estudos anteriores, como os de Leite *et al* (2011); Orioli (2018) e Zhang *et al* (2020).

4.2.2 Granulometria por Sedimentação

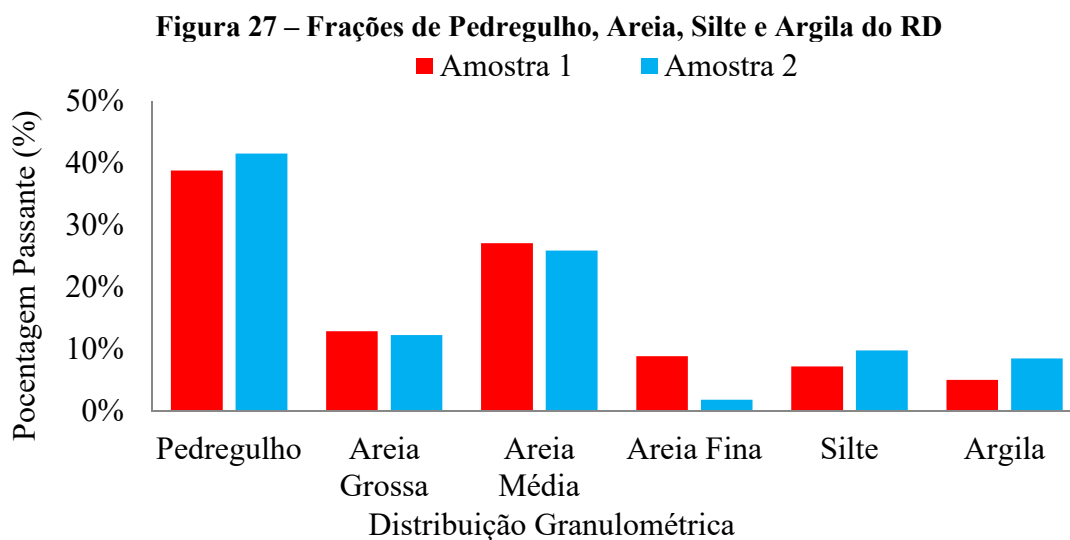
4.2.2.1 Resultados das Amostras AR

A análise granulométrica das amostras de AR foi conduzida a partir da interpretação das curvas granulométricas, permitindo a classificação do material quanto à distribuição de partículas. Essa classificação, conforme os critérios estabelecidos no Manual de Pavimentação do DNIT (2006), determina se o material é uniforme, bem graduado ou mal graduado, de com base no equilíbrio entre as frações grossas e finas. A Figura 26 apresenta as curvas granulométricas obtidas para o AR, revelando a distribuição das partículas nas amostras 1 e 2.



Fonte: Autor, 2025.

A análise da granulometria do AR proveniente das demolições em Maceió, ilustrada na Figura 27, indicou uma predominância de partículas grosseiras, como pedregulhos e areias, que representam, em média, 84,69% do total das amostras. Em contrapartida, a fração fina, composta por siltes e argilas, mostrou-se reduzida, com uma média de 15,31%.



Fonte: Autor, 2025.

Esses resultados são consistentes com estudos anteriores, como os de Leite *et al.* (2011), Barreto e Amorim (2020) e Llanes *et al.* (2022), que também observaram uma predominância de partículas grossas e uma baixa quantidade de finos em RD, o que caracteriza materiais mais granulares e menos coesivos.

Par a aprofundar a análise, a Tabela 4 apresenta os principais parâmetros granulométricos extraídos das amostras, como os diâmetros D_{10} , D_{30} , D_{60} , o CNC, o CC, a porcentagem passante na peneira de 0,42 mm e a dimensão máxima das partículas. A síntese completa dos ensaios de granulometria por sedimentação encontra-se disponível no Apêndice deste trabalho.

Tabela 4 – Parâmetros granulométricos obtidos das amostras de AR.

Parâmetros Granulométricos	Amostra 01	Amostra 02
D_{10}	0,0036	0,014
D_{30}	0,267	0,246
D_{60}	2,9	1,8
CC	6,8	2,4
CNU	805	128
% passante #0,42 mm	38,5%	40,3%
Dimensão Máxima das partículas	38 mm	50 mm

Fonte: Autor, 2025

A amostra 1 foi classificada como desuniforme pelo CNU e mal graduada pelo CC, sugerindo uma distribuição inadequada entre partículas finas e grossas, o que pode comprometer sua compactação e resistência mecânica. Já a amostra 2, também foi classificada como desuniforme pelo CNU, mas bem graduada pelo CC, indicando uma distribuição de partículas mais equilibrada e, potencialmente, melhor desempenho estrutural.

Para uma análise mais exemplificada, a Tabela 5 compara os resultados obtidos com os parâmetros técnicos estabelecidos pela NBR 15115:2024 (ABNT, 2004), a norma da Prefeitura de São Paulo, PMSP/SP ETS-001 (2003), e com estudos bibliográficos semelhantes.

Tabela 5 – Comparação dos resultados com normas, especificações e estudos anteriores.

Norma / Especificação	Característica	Porcentagem	CNU	CC
	Máxima dos Grãos (mm)	Passa na Peneira # 0,42 mm (%)		
NBR 15115:2004	63,5	$10 \leq a \leq 40$	≥ 10	Não consta
PMSP ETS-001:2003	50	$10 \leq a \leq 30$	≥ 10	$1 \leq a \leq 3$
LEITE (2007)	50	21,2	53	0,30
MOTTA (2005)	63,5	11	42	-
BEJA (2014)	50	17	50	0,58
Amostra 1	38	38,5	805	6,8
Amostra 2	50	40,3	128	2,4

Fonte: Autor, 2025

Dimensão máxima dos grãos, ambas as amostras se enquadram nos limites das normas analisadas. Porcentagem passante na peneira de 0,42 mm a amostra 1 atende às normas, enquanto a amostra 2 ficou ligeiramente acima dos limites estabelecidos pela NBR 15115:2024 (ABNT, 2024).

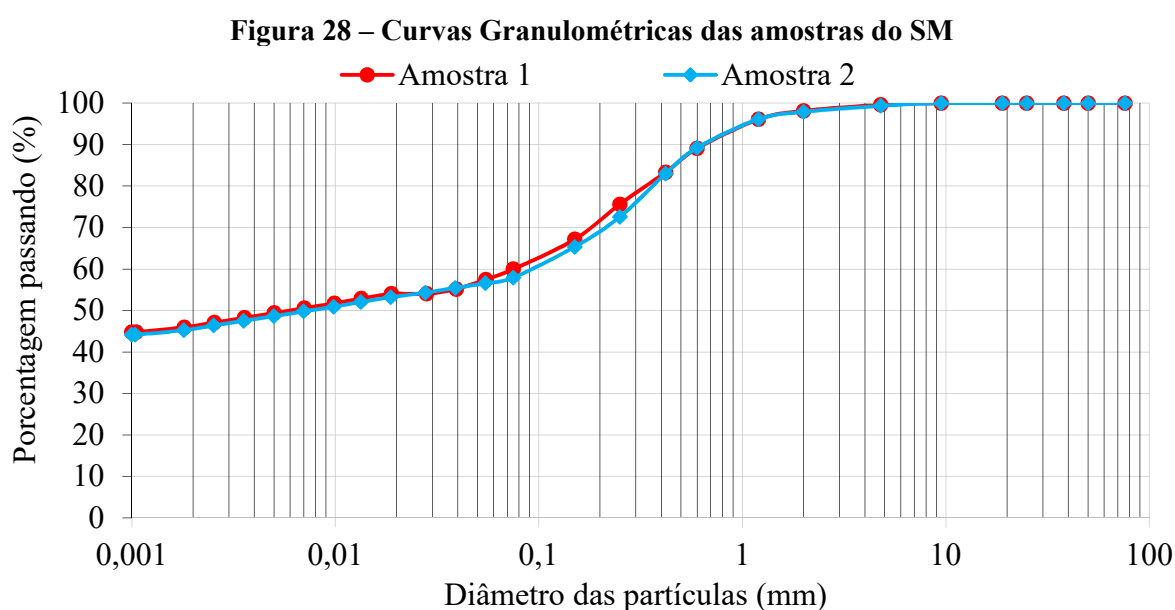
No CNU, apesar de ambas as amostras atenderem às normas, os valores obtidos ficam muito acima dos estudos anteriores, indicando uma granulometria altamente desuniforme. No CC a amostra 2 ficou dentro dos parâmetros da norma da prefeitura de São Paulo e apresentou desempenho próximo ao esperado nos estudos comparados, enquanto a amostra 1 foi classificada como mal graduada, ficando fora dos padrões técnicos recomendados.

Esses resultados indicam que, apesar da granulometria grosseira predominante e da desuniformidade das amostras, a amostra 2 apresentou melhor equilíbrio entre suas frações e maior compatibilidade com os requisitos normativos, sugerindo um maior potencial para aplicação em pavimentação, especialmente em camadas estruturais de baixo tráfego.

4.2.2.2 Resultados das Amostras SM

A análise granulométrica das amostras de Solo Natural do bairro do Mutange revelou uma predominância marcante de partículas finas, argila e silte, que, juntas, compõem em média 57% da massa total das amostras analisadas. Esse comportamento indica um solo com forte tendência a características coesivas, o que impacta diretamente seu desempenho mecânico e sua resposta à compactação e à drenagem.

A Figura 28 ilustra as curvas granulométricas das amostras analisadas, evidenciando a concentração acentuada de partículas finas.



Fonte: Autor, 2025.

A fração grosseira apresentou uma contribuição bastante limitada, com 2,0% de pedregulho e 41% de areia, distribuída entre areia grossa, média e fina, caracterizando o solo como predominantemente siltoso-argiloso, com baixa porcentagem de agregados maiores. A Tabela 6 apresenta a classificação das frações granulométricas para as duas amostras de SM.

Tabela 6 – Resumo da Granulometria do SM, ABNT.

Frações dos Grão	Amostra 1	Amostra 2
Pedregulho (>2,0 mm)	1,87%	2,11%
Areia Grossa (0,6 – 2 mm)	9,05%	8,64%
Areia Média (0,2 - 0,6 mm)	21,93%	23,9%
Areia Fina (0,06 - 0,2 mm)	9,67%	8,77%
Silte (0,002- 0,06 mm)	11,52%	11,33%
Argila (<0,002 mm)	45,94%	45,26%

Fonte: Autor, 2025

Solos com alta presença de frações finas tendem a ter maior plasticidade e menor permeabilidade, o que pode ser desvantajoso para pavimentação, especialmente em camadas estruturais que exigem boa drenagem e resistência ao cisalhamento.

Na avaliação dos parâmetros granulométricos, verificou-se que o solo não apresentou valores de D_{10} e D_{30} , impossibilitando o cálculo dos coeficientes CNU e CC. Isso ocorre porque a granulometria das amostras é dominada por partículas muito finas, o que impede a identificação dos pontos de controle necessários para o cálculo desses coeficientes.

A Tabela 7 resume os principais parâmetros extraídos da análise granulométrica.

Tabela 7 – Parâmetros granulométricos das amostras do SM.		
Parâmetros Granulométricos	Amostra 01	Amostra 02
D_{10}	-	-
D_{30}	-	-
D_{60}	0,075	0,096
CC	-	-
CNU	-	-
% passante #0,42 mm	83,34%	83,01%
Dimensão Máxima Característica	4,8 mm	4,8 mm

Fonte: Autor, 2025

A única medida disponível, o D_{60} , apresentou valores de 0,075 mm e 0,096 mm para as amostras 1 e 2, respectivamente, reforçando a predominância de frações muito finas. Mais de 83% da massa total passou pela peneira de 0,42 mm, um indicativo claro de que o solo possui características extremamente uniformes e mal graduadas, o que limita seu potencial para uso direto em camadas estruturais sem tratamento ou estabilização.

Solos uniformes e mal graduados geralmente apresentam baixa capacidade de suporte quando submetidos a cargas, como as provenientes do tráfego em pavimentos. Essa limitação é agravada pela presença predominante de partículas finas, como silte e argila, que tornam o material mais suscetível a deformações volumétricas e recalques, especialmente em condições de umidade elevada. Além disso, a elevada proporção de finos compromete a drenagem do solo, favorecendo o acúmulo de água e, conseqüentemente, a perda de resistência em situações de saturação.

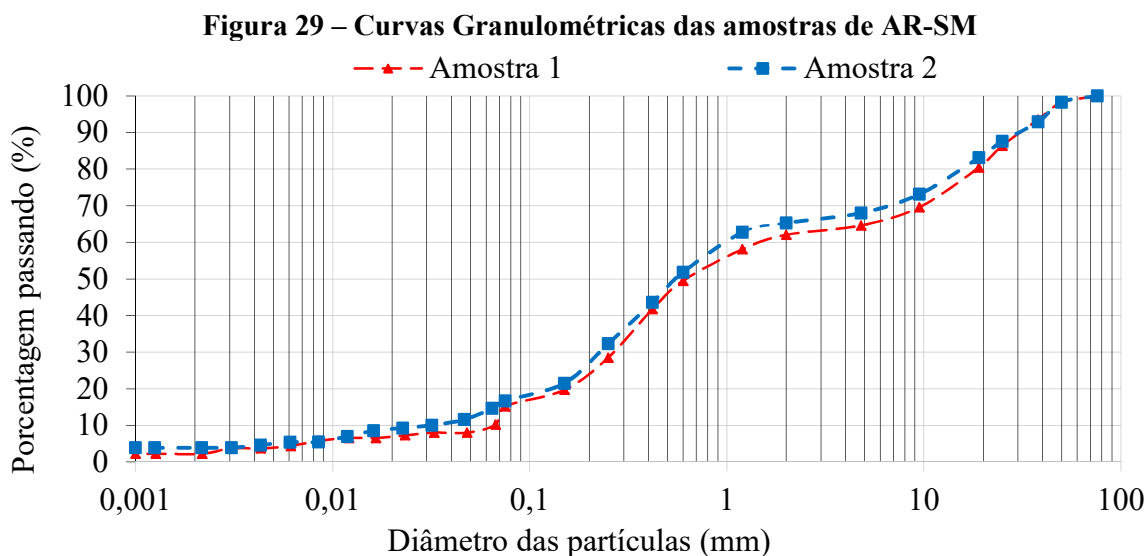
Para uso em pavimentação, esse solo exige tratamentos específicos, como estabilização química ou mistura com materiais de granulometria mais grosseira, como o AR, para melhorar sua capacidade de suporte e drenagem.

4.2.2.3 Resultados das Amostras da Mistura AR-SM

A análise da granulometria da mistura AR-SM, revelou características próximas às observadas na amostra composta por 100% de AR, mantendo a predominância de partículas

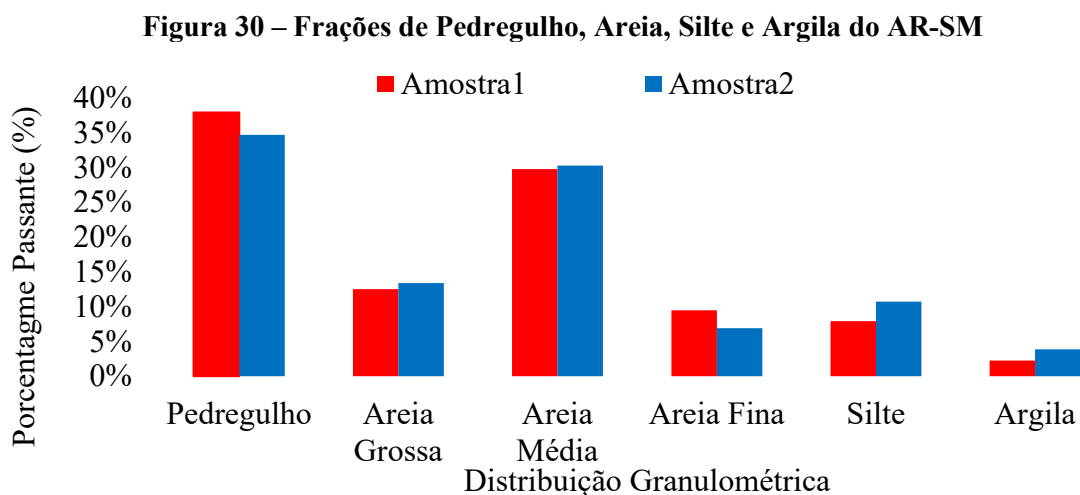
grosseiras, como pedregulhos e areias, que compuseram, em média, 85,6% do total das amostras. A fração fina, formada por siltes e argilas, mostrou-se reduzida, com média de 14,4%.

Esse comportamento reflete um material de natureza granular, com baixa plasticidade e menor coesão, características desejáveis para aplicação em camadas estruturais de pavimentos. A Figura 29 apresenta as curvas granulométricas obtidas para mistura AR-SM.



Fonte: Autor, 2025.

Na Figura 30, estão representadas as frações médias individuais da mistura, destacando 34,7% de pedregulho, 13,4% de areia grossa, 30,1% de areia média, 7,5% de areia fina, 9,6% de silte e 4,8% de argila. A predominância de partículas grosseiras e a baixa participação de finos reforçam a classificação do material como mais granular e menos coesivo, características que favorecem a compactação e a resistência ao cisalhamento, além de melhor permeabilidade.



Fonte: Autor, 2025.

A Tabela 8 apresenta os principais parâmetros granulométricos extraídos das três amostras de AR-SM, destacando os diâmetros D_{10} , D_{30} , D_{60} , os coeficientes CNU e CC, a porcentagem passante na peneira de 0,42 mm e a dimensão máxima das partículas.

Tabela 8 – Parâmetros granulométricos das amostras de AR-SM.

Parâmetros Granulométricos	Amostra 01	Amostra 2
D_{10}	0,064	0,0312
D_{30}	0,312	0,227
D_{60}	1,55	0,78
CC	1	2
CNU	24	25
% passante #0,42 mm	41,81%	43,62%
Dimensão Máxima das partículas	50 mm	50 mm

Fonte: Autor, 2025

Os resultados das amostras apresentaram uma melhora significativa nos parâmetros granulométricos, com valores de CNU e CC ajustados e distribuição mais uniforme, aproximando-se dos padrões normativos. Apesar da melhora, ambas ainda apresentaram porcentagem passante na peneira #0,42 mm ligeiramente acima do limite de 40%, estabelecido pela NBR 15115:2024 (ABNT, 2004), conforme apresentado na Tabela 9, onde pode-se comparar os resultados com normas, especificações e estudos anteriores.

Tabela 9 – Comparação dos resultados com normas, especificações e estudos anteriores.

Norma / Especificação	Característica	Porcentagem		
	Máxima dos Grãos (mm)	Passa na Peneira # 0,42 mm (%)	CNU	CC
NBR 15115:2004	63,5	$10 \leq a \leq 40$	≥ 10	Não consta
PMSP ETS-001:2003	50	$10 \leq a \leq 30$	≥ 10	$1 \leq a \leq 3$
Leite (2007)	50	21,2	53	0,30
Motta (2005)	63,5	11	42	-
Beja (2014)	50	17	50	0,58
Amostra 1 de AR-SM	50	41,81	24	1
Amostra 2 de AR-SM	50	43,62	25	2

Fonte: Autor, 2025

Dimensão máxima dos grãos, ambas as amostras de AR-SM se enquadraram nos limites das normas analisadas, 50 mm. Porcentagem passante na peneira de 0,42 mm, ambas apresentaram valores ligeiramente acima do limite estabelecidos pela NBR 15115:2024 (ABNT, 2024).

No CNU ambas as amostras se adequaram aos requisitos normativos, apresentando valores bem ajustados e melhores que a amostra composta 100% por AR. No coeficiente CC, as amostras 1 e 2 ficaram dentro do intervalo (1 a 3) recomendado pela PMSP/SP ETS-001:2003, indicando uma granulometria bem graduada.

Os resultados obtidos indicam que, apesar da granulometria grosseira predominante, as amostras 1 e 2 apresentaram melhor equilíbrio entre suas frações e maior compatibilidade com os requisitos normativos. A mistura AR-SM, quando bem dosada, demonstrou potencial técnico promissor, combinando a resistência e a permeabilidade do AR com a plasticidade e coesão moderada do SM, fatores essenciais para o desempenho em camadas de pavimentação.

4.2.3 Massa Específica e Absorção de Água do AR

Os resultados obtidos para a massa específica das frações separadas do AR revelaram valores de 2,473 g/cm³ para os grãos retidos (ρ_{sr}) na peneira de 4,8 mm e 2,617 g/cm³ para os grãos passantes (ρ_{sp}). A massa específica combinando do material, considerando a proporção entre as frações retidas e passantes, foi calculado pela *Equação 7*, resultando em 2,521 g/cm³, conforme apresentado na Tabela 10

Tabela 10 – Resultados da massa específica do AR

Tipo de Grão	Massa Específica (g/cm ³)	Porcentagem Retida e Passante na Peneira 4,8 mm
Retidos (ρ_{sr})	2,473	34,83%
Passantes (ρ_{sp})	2,617	65,17%
Combinado (ρ_s)	2,521	

Fonte: Autores, 2025.

Os valores obtidos se mostram compatíveis com a literatura. Song *et al.* (2017), em um estudo semelhantes em áreas urbanas, encontraram uma massa específica média de 2,6 g/cm³, enquanto Yu *et al.* (2019) indicaram 2,57 g/cm³ para resíduos de demolição de composição semelhante. A leve variação entre os resultados refletem diferenças regionais na composição do AR, mas mantém coerência com materiais de granulometria grosseira, caracterizados por baixa presença de frações finas.

Essa convergência entre os resultados e a literatura sugere que os AR de Maceió apresentem propriedades físicas comparáveis às de outros contextos urbanos.

Os dados referentes à massa das amostras em diferentes condições, saturada superfície seca, seca em estufa e submersa, estão apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 – Massa específica retida na #4,8 mm das amostras de AR.

Peso (g)	Descrição
$M_{sat} = 5.230$ g	Massa, ao ar, do agregado na condição saturada superfície seca;
$M_s = 4.640,0$ g	Massa, ao ar, do agregado seco em estufa;
$L = 2.770,2$ g	Leitura na balança correspondente ao agregado submerso.
27°C	Temperatura da água no momento do ensaio.

Fonte: Autor, 2025.

Com base nesses dados e utilizando a *Equação 8*, obtemos uma absorção de 12,72%. Esse valor está alinhado aos resultados encontrados por Leite *et al.* (2011), Orioli (2018) e Barreto e Amorim (2020), que obtiveram os valores de 9,74%, 8,05% e 12,2%, respectivamente. A variação entre os resultados é atribuída à composição heterogênea dos resíduos, com destaque para a presença significativa de fragmentos cerâmicos, conhecidos por apresentar elevada porosidade (Leite *et al.*, 2011; Orioli, 2018; Llanes *et al.*, 2022).

A Tabela 12 traz os dados do ensaio de massa específica dos grãos passados na peneira de abertura 4,8 mm, utilizados nos cálculos descritos anteriormente.

Tabela 12 – Massa específica dos passantes na #4,8 mm das amostras de AR.

	Amostra 1	Amostra 2
Massa do Picnômetro Vazio (g)	422,00	430,22
Massa do Picnômetro + Amostra (g)	471,46	479,24
Massa do Picnômetro + Amostra + Água (g)	650,28	669,64
Massa do Picnômetro + Água (g)	619,62	639,38
Massa Específica dos sólidos a Temperatura T (g/cm ³)	2,631	2,613
Média das Massas Específicas dos Sólidos (g/cm ³)	2,622	
Temperatura do Ensaio	27°C	Massa Específica = 2,617 g/cm ³
Fator de Correção	0,9965	

Fonte: Autor, 2025.

4.2.3.1 Massa Específica do SM e da Mistura AR-SM

A massa específica do SM foi calculada considerando 100% da fração passante na peneira 4,8 mm, uma vez que apenas 0,42% ficou retida. O valor obtido foi de 2,625 g/cm³, conforme Tabela 13.

Tabela 13 – Massa específica das amostras de SM.

	Amostra 1	Amostra 2
Massa do Picnômetro Vazio (g)	429,88	414,84
Massa do Picnômetro + Amostra (g)	479,00	464,98
Massa do Picnômetro + Amostra + Água (g)	629,16	670,08
Massa do Picnômetro + Água (g)	598,77	638,95
Massa Específica dos sólidos a Temperatura T (g/cm ³)	2,623	2,638
Média das Massas Específicas dos Sólidos (g/cm ³)	2,630	
Temperatura do Ensaio	28°C	Massa Específica = 2,625 g/cm ³
Fator de Correção	0,9963	

Fonte: Autor, 2025.

Para a mistura AR-SM, foi considerada a combinação das frações retidas e passantes na peneira 4,8 mm. A massa específica da fração passante, determinado pelo método do picnômetro, foi de 2,599 g/cm³, conforme a Tabela 14.

Tabela 14 – Massa específica passantes #4,8 mm das amostras de AR-SM.

	Amostra 1	Amostra 2
Massa do Picnômetro Vazio (g)	429,80	430,22

Massa do Picnometro + Amostra (g)	479,89	479,21
Massa do Picnometro + Amostra + Água (g)	650,25	649,97
Massa do Picnometro + Água (g)	619,32	619,88
Massa Específica dos sólidos a Temperatura T (g/cm ³)	2,614	2,592
Média das Massas Específicas dos Sólidos (g/cm ³)	2,603	
Temperatura do Ensaio	27°C	Massa Específica = 2,599 g/cm ³
Fator de Correção	0,9965	

Fonte: Autor, 2025.

A fração retida na peneira 4,8 mm, apresentou massa específica de 2,477 g/cm³, com uma absorção de água de 14,24%, um aumento em relação ao AR puro, conforme sintetiza os resultados da Tabela 15.

Tabela 15 – Massa específica retidos #4,8 mm das amostras de AR-SM.

Peso (g)	Descrição
$M_{sat} = 5262,59$ g	Massa, ao ar, do agregado na condição saturada superfície seca;
$M_s = 4606,60$ g	Massa, ao ar, do agregado seco em estufa;
$L = 2753,20$ g	Leitura na balança correspondente ao agregado submerso.
27°C	Temperatura da água no momento do ensaio.

Fonte: Autor, 2025.

A Tabela 16 apresenta o resumo com todos os resultados de massa específicas.

Tabela 16 – Resumo da massa específica das amostras, AR, SM e AR-SM.

Material	Massa Específica Retida (ρ_{sr}) g/cm ³	Massa Específica Passante (ρ_{sr}) g/cm ³	Massa Específica Combinada (ρ_{sr}) g/cm ³	Absorção de Água (%)	Temp. (°C)
AR	2,473	2,617	2,521	12,72	27
SM	-	2,625	2,625	-	28
AR-SM	2,477	2,599	2,517	14,24	27

Fonte: Autor, 2025.

Observou-se que a mistura AR-SM apresentou leve redução na massa específica combinada, de 2,521 g/cm³ para 2,517 g/cm³. A absorção de água aumentou de 12,72% no AR, para 14,24% na mistura, um acréscimo de 1,52%. Esse comportamento está associado à incorporação de SM, que possui frações mais finas e elevada porosidade, contribuindo para maior retenção de água e redução da densidade média da mistura.

4.2.4 Limites de Atterberg

4.2.4.1 Análise das Amostra de AR e AR-SM

Conforme ilustrado na Figura 31, não foi possível determinar os limites de liquidez (LL) e plasticidade (LP) para as amostras de AR e AR-SM, devido à natureza não plástica desses materiais. Consequentemente, o índice de plasticidade (IP) das amostras resultou em zero, indicando a ausência de comportamento coesivo.

Figura 31 – Limite de Liquidez e Limite de Plasticidade do RD

Fonte: Autor, 2025.

Essa característica é esperada para resíduos de demolição predominantemente compostos por frações de granulometria grossa (pedregulhos e areias), que não apresentam a capacidade de deformação plástica típica de solos argilosos.

4.2.4.2 Análise das Amostra de SM

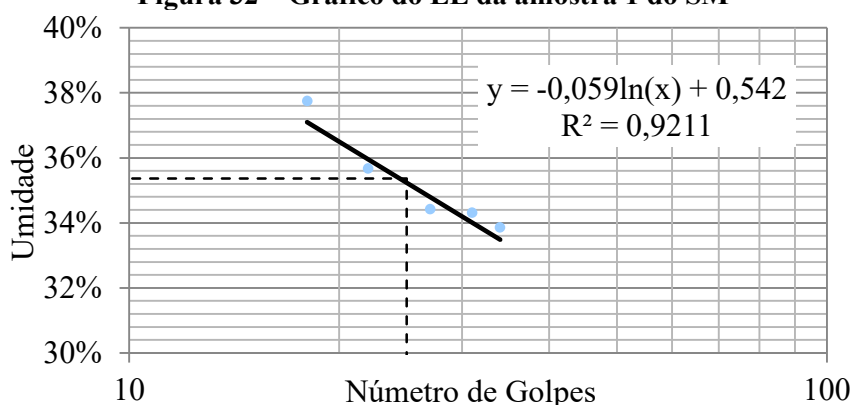
Diferentemente do AR e da mistura AR-SM, o SM apresentou comportamento plástico, permitindo a determinação dos limites Atterberg e do índice de plasticidade. Para a amostra 1, o LL foi determinado em 35,37%, conforme Tabela 17.

Tabela 17 – Dados do LL da amostra 1 de SM.

Cápsula	1	2	3	4	5
Peso da Cápsula (g)	90,50	85,79	90,50	84,71	96,78
Peso Bruto Úmido (g)	93,94	92,21	96,28	92,28	103,75
Peso Bruto Seco (g)	93,07	90,57	94,80	90,29	101,84
Umidade	33,85%	34,31%	34,42%	35,66%	37,75%
Nº de Golpes	34	31	27	22	18

Fonte: Autor, 2025.

A Figura 32 apresenta o gráfico do LL da amostra 1 do SM.

Figura 32 – Gráfico do LL da amostra 1 do SM

Fonte: Autor, 2025.

O LL da amostra 1 foi determinado em 26,69% conforme a Tabela 18.

Tabela 18 – Dados do LP da amostra 1 de SM.

Cápsula	6	7	8	9	10
Peso da Cápsula (g)	59,19	57,69	41,19	57,49	42,58
Peso Bruto Úmido (g)	60,85	59,4	42,9	58,92	44,47
Peso Bruto Seco (g)	60,51	59,04	42,54	58,61	44,05
Umidade	25,76%	26,67%	26,67%	27,68%	28,57%

Fonte: Autor, 2025.

Com os valores obtidos de LL = 35,37% e LP = 26,69%, o IP da amostra 1 do SM foi calculado em 8,7%, caracterizando o solo como material de baixa plasticidade.

A amostra 2 do SM também apresentou comportamento plástico, com LL = 34,42%, conforme Tabela 19.

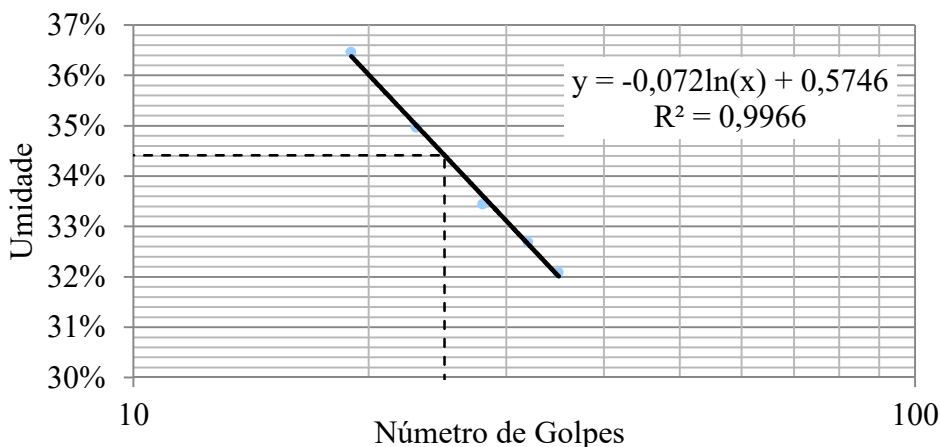
Tabela 19 – Dados do LL da amostra 2 de SM.

Cápsula	1	2	3	4	5
Peso da Cápsula (g)	59,19	57,46	57,49	60,20	58,72
Peso Bruto Úmido (g)	65,57	63,63	61,48	66,53	64,82
Peso Bruto Seco (g)	64,02	62,11	60,48	64,89	63,19
Umidade	32,09%	32,69%	33,44%	34,97%	36,47%
Nº de Golpes	35	32	28	23	19

Fonte: Autor, 2025.

A Figura 33 apresenta o gráfico do LL da amostra 2 do SM.

Figura 33 – Gráfico do LL da amostra 2 do SM



Fonte: Autor, 2025.

O LP da amostra 2 foi determinado em 26,44%, conforme a Tabela 20.

Tabela 20 – Dados do LP da amostra 2 de SM.

Cápsula	6	7	8	9	10	11
Peso da Cápsula (g)	58,26	57,68	41,18	41,82	42,58	41,65
Peso Bruto Úmido (g)	60,03	59,46	43,38	43,81	44,33	43,96
Peso Bruto Seco (g)	59,67	59,09	42,91	43,40	43,96	43,47
Umidade	25,53%	26,24%	27,17%	25,95%	26,81%	26,92%

Fonte: Autor, 2025.

O IP da amostra 2 foi determinado em 8,0%, resultando em uma média final de 8,35% para o SM, o que confirma sua classificação como solo de baixa plasticidade, de acordo com a classificação Burmister (1949) e o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS).

Por outro lado, as amostras de AR e AR-SM ficaram classificadas como material não plástico, com IP igual a zero, o que indica ausência de coesão significativa entre as partículas finas, uma característica típica de materiais predominantemente granulares, compostos por pedregulhos e areias.

4.2.5 Índice de Grupo (IG) e Classificação HRB-AASHTO

Com base nos resultados obtidos nas análises anteriores, foi possível calcular o IG das amostras e, posteriormente, classificá-las segundo o sistema HRB-AASHTO. O Quadro 4 apresenta a síntese desses resultados.

Quadro 4 – Classificação IG e HRB-AASHTO das Amostras.

AMOSTRAS	IG	HRB-AASHTO
AR: Amostra 1	0	A-2-4
AR: Amostra 2	0	A-2-4
SM: Amostra 1	5	A-4
SM: Amostra 1	4,45	A-4
AR-SM: Amostra 1	0	-
AR-SM: Amostra 2	0	-

Fonte: Autor, 2025.

Os resultados revelam diferenças importantes entre os materiais avaliados, destacando o desempenho individual de cada material. Para o AR, amostras 1 e 2, ambas foram classificadas como A-2-4, caracterizando o material como granular de boa qualidade, com presença moderada de silte e argila. O IG igual a zero reforça essa classificação indicando excelente desempenho para aplicação em pavimentação, especialmente em camadas de base e sub-base, onde a resistência a drenagem são essenciais. Esse comportamento é esperado, dado a predominância de partículas grossas, como pedregulho e areias, já observada nas análises granulométricas.

As amostras de SM foram classificadas como A-4, um tipo de solo predominantemente siltoso, com IG de 5 e 4,45, o que caracteriza material de baixa qualidade para pavimentação. Essa classificação reflete sua maior plasticidade e menor capacidade de suporte — fatores que comprometem o desempenho estrutural, tornando-o adequado, no máximo, para subleitos, e ainda assim, com restrições técnicas, principalmente em condições de umidade elevada.

Embora as misturas AR-SM tenham apresentado $IG = 0$, o que, teoricamente, indicaria bom desempenho para pavimentação, elas não se enquadraram em nenhuma das categorias específicas da classificação HRB-AASHTO. Esse comportamento sugere que, apesar do potencial técnico, a granulometria ou a composição química da mistura não atende plenamente aos critérios estruturais estabelecidos pelo método. É possível que a proporção entre AR e SM tenha influenciado na distribuição granulométrica final, impedindo a caracterização dentro das classes padronizadas.

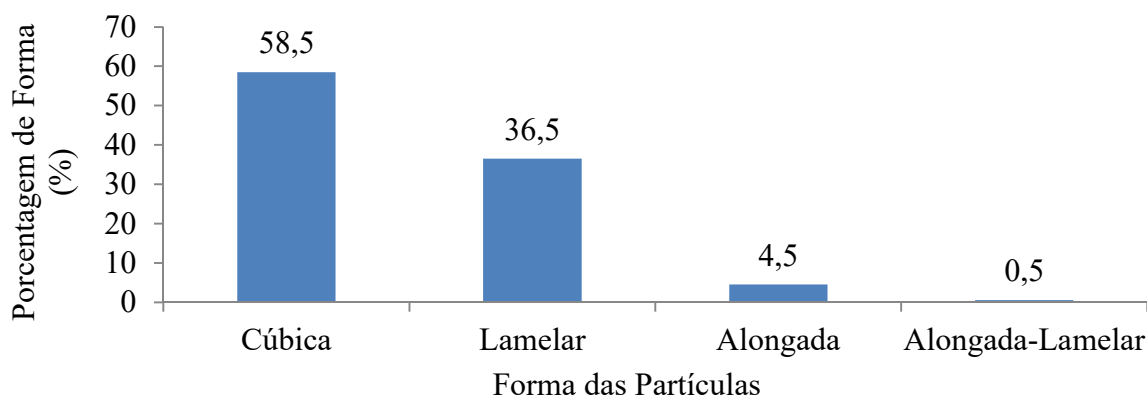
4.2.5.1 Resumo dos Resultados e Recomendações

- AR: Confirmou-se como material de excelente a bom desempenho para uso em pavimentação, especialmente em base e sub-base, conforme indicado pelo $IG = 0$ e pela classificação A-2-4.
- SM: Classificado como solo de baixa qualidade (A-4), recomenda-se a melhoria das propriedades mecânicas, por meio de estabilização química (cal ou cimento) ou ajustes granulométricos, para aumentar sua resistência e reduzir a plasticidade, tornando-o mais viável para camadas de suporte.
- AR-SM: Apesar do IG favorável (0), a mistura não foi classificada pelo sistema HRB-AASHTO, o que sinaliza a necessidade de ajustes. Sugere-se: revisão da proporção entre AR e SM, garantindo maior controle na distribuição das frações finas e grossas; e ajustes granulométricos para melhorar a distribuição das partículas, buscando um equilíbrio entre resistência mecânica e plasticidade.

Essa etapa destaca que, embora o material misto apresente potencial promissor, ele exige otimizações na composição para garantir desempenho adequado e classificação estruturada pelo sistema HRB-AASHTO.

4.2.6 Forma das Partículas e Índice de Forma do AR

A análise da morfologia das partículas de AR de Maceió, ilustrada na Figura 34, revelou uma predominância de partículas cúbicas, representando 58,5% do total. Essas partículas são reconhecidas por proporcionar melhor intertravamento e maior resistência mecânica em camadas de pavimentação, devido à sua geometria mais compacta e estável.

Figura 34 – Forma das partículas do RD

Fonte: Autor, 2025.

Grãos alongados e alongados-lamelares apresentaram uma participação reduzida, com 4,5% e 0,5%, respectivamente, o que é um comportamento positivo, uma vez que essas formas tendem a comprometer a compactação e a resistência ao cisalhamento da estrutura do pavimento. Esses resultados estão em consonância com os estudos de Leite (2007) e Barreto e Amorim (2020), que destacaram a predominância de formas cúbicas como uma característica vantajosa para a reutilização de RD em infraestruturas viárias.

Entretanto, a análise também identificou 36,5% de partículas lamelares, ultrapassando o limite máximo de 30% estabelecido pela NBR 15115:2004 (ABNT, 2004). Esse excesso de grãos lamelares pode influenciar negativamente a compactação e a resistência do material, exigindo maior controle sobre a composição do AR ou ajustes granulométricos para melhorar o desempenho mecânico da mistura. Esse comportamento foi igualmente observado por Leite *et al* (2011), evidenciando que a presença elevada de grãos lamelares é uma característica recorrente em resíduos de demolição.

Na determinação do Índice de Forma, calculou-se um comprimento médio das partículas de 43,44 mm e uma espessura média de 16,26 mm. O índice resultante foi de 2,67, valor que se enquadra nos limites normativos, sugerindo uma distribuição de formas aceitável para o uso em camadas estruturais de pavimentos.

Esses achados estão alinhados com as pesquisas de Leite *et al.* (2011), Orioli (2018) e Barreto e Amorim (2020), reforçando a compatibilidade do material para aplicação em infraestrutura rodoviária, apesar da elevada porcentagem de grãos lamelares.

4.2.7 Desgaste por Abrasão do AR

O ensaio de Desgaste por Abrasão Los Angeles foi conduzido para avaliar a resistência ao desgaste do AR, fator determinante para sua durabilidade em camadas de base e

sub-base de pavimentos. A Tabela 21 apresenta a graduação das amostras testadas, o número de esferas utilizadas em cada configuração, e os resultados obtidos após 500 rotações.

Tabela 21 – Graduação e os resultados do desgaste por abrasão do AR

Peneiras	Graduação A	Graduação B	Graduação C	Graduação D
#25 (g)	1250			
#19 (g)	1250			
#12,5 (g)	1250	2500		
#9,5 (g)	1250	2500		
#6,3 (g)			2500	
#4,8 (g)			2500	
#2,4 (g)				5000
TOTAL (g)		5000		
ESFERAS (und)	12	11	8	6
Rotações		500		
Retido na #1.7 (g)	1640	2470	2515	2750
Desgaste (%)	67,2	50,6	49,7	45,0

Fonte: Autor, 2025.

Os resultados indicam um desgaste médio de 53,13%, dentro do limite máximo de 55% estabelecido pela norma DNIT-ES 141 (DNIT, 2010), para materiais de base estabilizados granulometricamente. Esse desempenho se alinha com os achados de Orioli (2018), que também constatou valores semelhantes em resíduos de demolição aplicados em pavimentação.

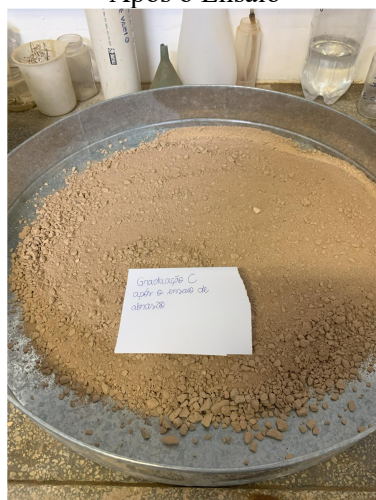
Na Figura 35, são apresentados os estágios do material AR submetido ao ensaio de desgaste por abrasão Los Angeles. A imagem ilustra o material em três momentos: antes do ensaio, após o ensaio e depois do peneiramento, destacando as partículas retidas na peneira de 1,7 mm, que representam a fração resistente do agregado após processo de desgaste.

Figura 35 – Material antes do ensaio de abrasão, após o ensaio e o retido na peneira

Antes do Ensaio



Após o Ensaio



Após o Peneiramento



Fonte: Autor, 2025.

Visualmente, observa-se uma redução significativa no tamanho e na integridade dos grãos após o ensaio. O material apresentou maior fragmentação e formação de finos, especialmente entre as frações menos resistentes, como cerâmicas e argamassas.

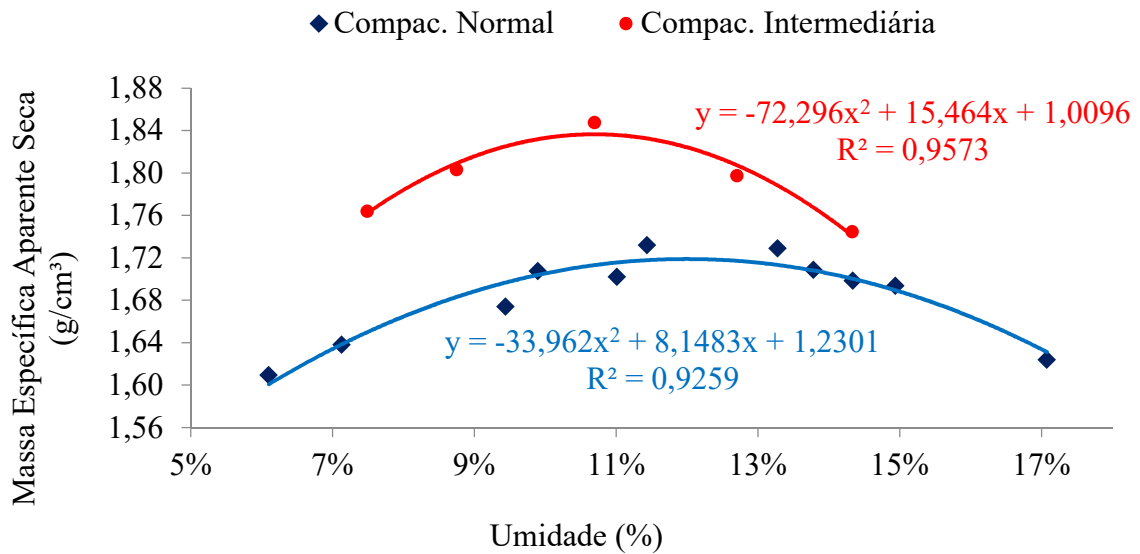
Além disso, os resultados do ensaio de abrasão indicam que o material apresenta tendência ao desgaste, principalmente devido à presença significativa de partículas cerâmicas e cimentícias, como fragmentos de tijolos, telhas e argamassas. Esses componentes são mais frágeis e suscetíveis à degradação mecânica quando comparados a agregados naturais, como pedra britada. Essa característica influencia diretamente no desempenho do material, reduzindo sua resistência ao atrito e ao impacto, e deve ser considerada na avaliação da durabilidade do AR para uso em camadas de pavimentação..

Os resultados ressaltam a importância do controle granulométrico na preparação do AR, maximizando a resistência ao desgaste e aumentando a durabilidade do material quando aplicado em pavimentos.

4.2.8 Ensaios de Compactação

Os ensaios de compactação foram realizados utilizando energia no proctor normal e intermediária, com o objetivo de determinar a umidade ótima e a massa específica seca máxima das amostras de AR, SM e mistura AR-SM. Os resultados revelaram comportamentos diferentes entre os materiais, influenciados pela granulometria e composição de cada um.

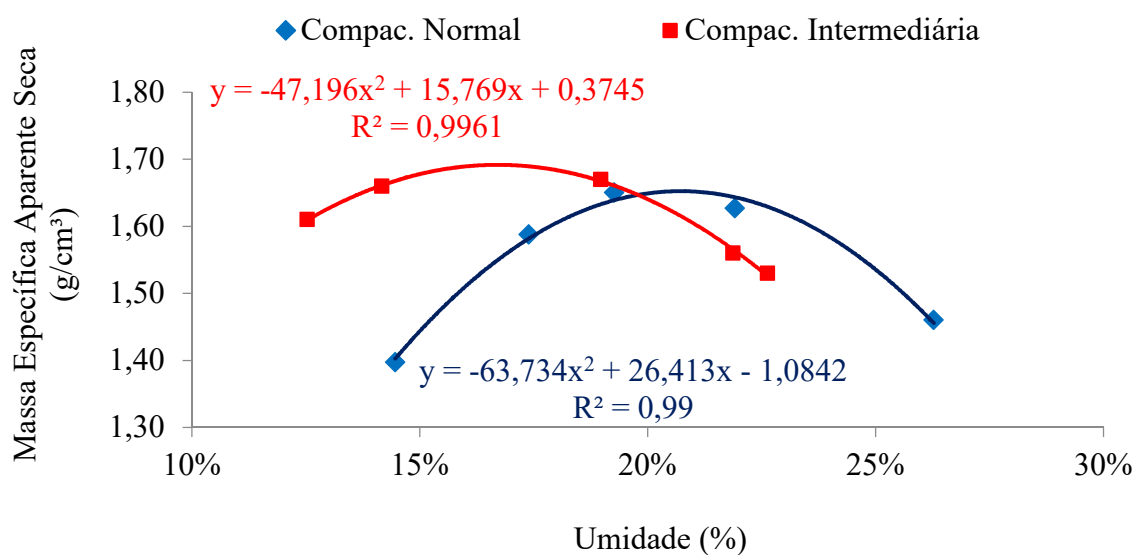
A Figura 36 apresenta as curvas de compactação do AR. Os resultados indicaram uma umidade ótima de 12,0% para energia normal e 10,69% para energia intermediária, com massa específica seca máxima de 1,719 g/cm³ e 1,836 g/cm³ respectivamente. A redução da umidade e o aumento da densidade são comportamentos esperados, uma vez que o aumento da energia de compactação promove maior reorganização das partículas, reduzindo os vazios e elevando a densidade.

Figura 36 – Curvas de compactação do AR

Fonte: Autor, 2025.

A Figura 37 exibe as curvas de compactação do SM, onde o solo apresentou uma umidade ótima de 20,52% para energia normal e 16,72% para energia intermediária, com massa específica seca máxima de 1,652 g/cm³ e 1,692 g/cm³ respectivamente.

A maior necessidade de umidade, associada à menor densidade, reflete o comportamento de solos siltosos-argilosos, que retêm mais água devido à presença de partículas finas e apresentam menor compactação efetiva.

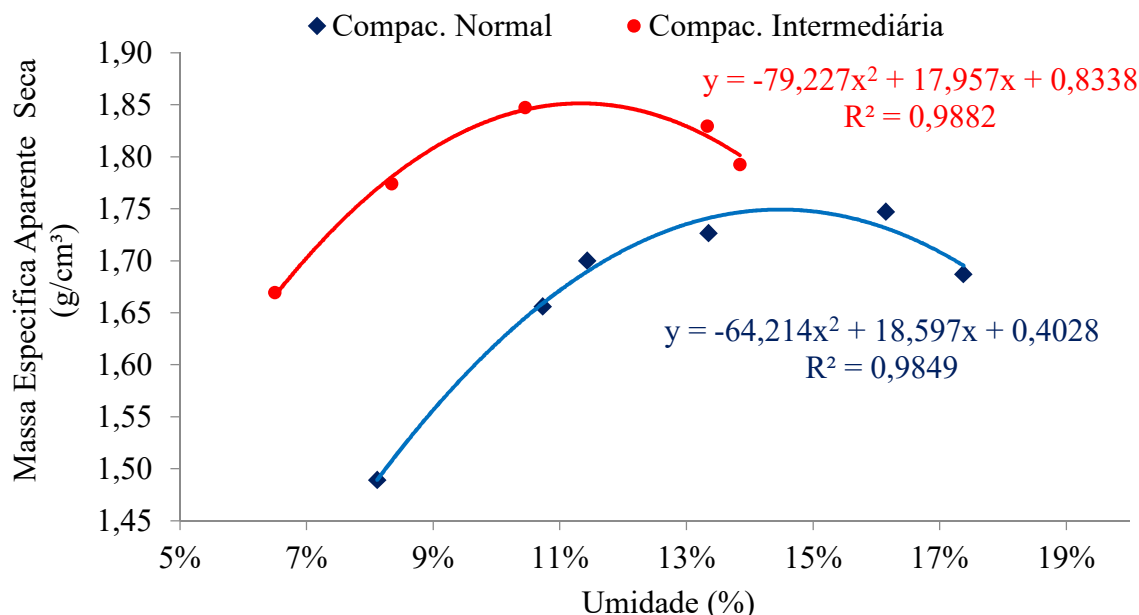
Figura 37 – Curvas de compactação do SM

Fonte: Autor, 2025.

A Figura 38 apresenta as curvas de compactação da mistura AR-SM. A mistura, composta por 85% AR e 15% SM, obtida em uma umidade ótima de 14,48% para a energia

normal e 11,33% para a energia aquecida, com massa específica seca máxima de 1,748 g/cm³ e 1,850 g/cm³, respectivamente.

Figura 38 – Curvas de compactação da mistura AR-SM



Fonte: Autor, 2025.

Os resultados mostram que a mistura teve desempenho intermediário entre o AR e o SM, apresentando maior densidade e menor umidade ótima em comparação ao SM puro. Isso deve à predominância de frações grossas do AR, que facilitam a compactação, equilibrando o efeito das frações finas do SM.

A Tabela 22 sintetiza os resultados dos ensaios de compactação para todas as amostras.

Tabela 22 – Resumo do resultado de compactação das amostras

Material	Energia Normal		Energia Intermediária	
	Umidade Ótima (%)	Massa Esp. Ap. Seca Máx. (g/cm³)	Umidade Ótima (%)	Massa Esp. Ap. Seca Máx. (g/cm³)
AR	12,00	1,719	10,69	1,836
SM	20,52	1,652	16,72	1,692
AR-SM	14,48	1,748	11,33	1,850

Fonte: Autor, 2025.

Os resultados evidenciam que energia de compactação influencia diretamente a densidade seca máxima e a umidade ótima, com o aumento da energia resultando em maior densidade e menor umidade, comportamento consistente em todas as amostras.

O AR apresentou melhor desempenho em termos de densidade seca e menor necessidade de umidade, demonstrando alta capacidade de compactação, característica típica de materiais granulares.

O SM apresenta maior umidade e obteve menor densidade seca, comportamento esperado para solos com predominância de frações finas e coesivas.

A mistura AR-SM apresentou melhoria significativa em relação ao SM puro, combinando a maior densidade do AR com um nível de elevação da umidade ótima, reflexo da inclusão de frações finas do SM, mas mantendo uma predominância granular do AR.

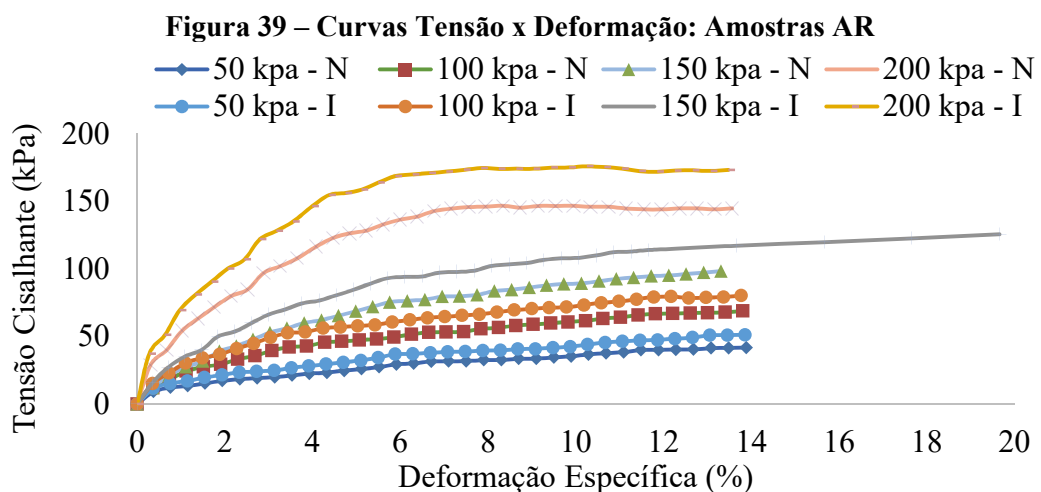
Em conclusão, a adição de SM ao AR modificou o comportamento da mistura, resultando em um material com maior densidade e melhor compactação que o SM isolado, mas com maior demanda de umidade em comparação ao AR puro. Esse comportamento indica que a mistura possui potencial técnico, mas ajustes adicionais na proporção ou granulometria podem ser necessários para melhorar seu desempenho em pavimentação.

4.2.9 Ensaio de Cisalhamento Direto

A fase de cisalhamento foi conduzida até deformação horizontal de 14%, equivalente ao deslocamento de 7 mm, exceto em alguns casos que apresentaram comportamento divergente, o que será discutido ao longo das curvas de tensão-deformação e deslocamento vertical x horizontal. Por fim, são apresentadas as curvas de envoltória e os parâmetros de resistência ao cisalhamento, coesão (c') e ângulo de atrito (ϕ), obtidos após ajuste linear.

4.2.9.1 Análise das Amostras de AR

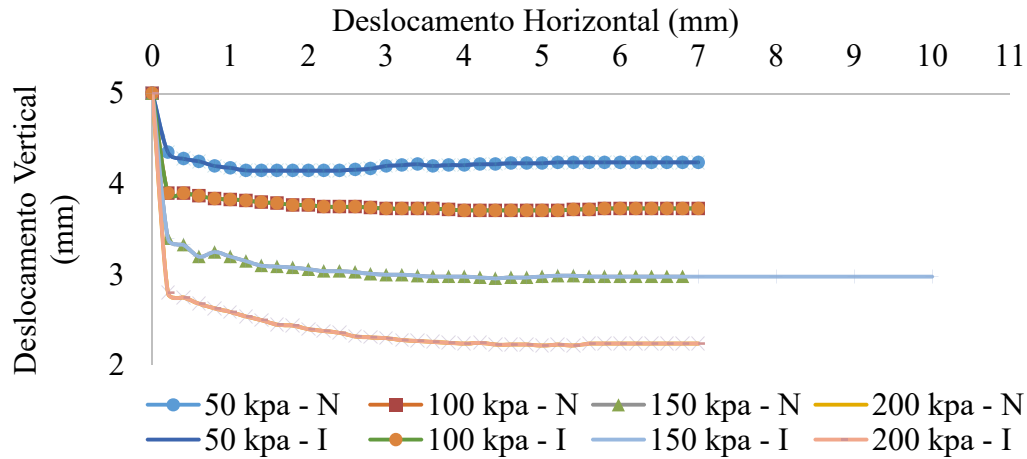
A Figura 39 apresenta as curvas tensão-deformação para as amostras de AR em diferentes níveis de tensão e energias de compactação. Observa-se que, para a tensão de 200 kPa, os corpos de prova (CPs) apresentaram um pico de tensão bem definido, seguido de uma leve queda, característica de um comportamento mais frágil. Já para tensões menores, os corpos de prova exibiram um comportamento dúctil, com patamares de tensão mais estáveis.



Fonte: Autor, 2025.

A Figura 40 ilustra a variação da altura dos corpos de prova durante o cisalhamento. Nota-se uma compressão inicial em praticamente todos os níveis de tensão, estabilizando-se após o deslocamento horizontal. Apenas nas tensões de 200 kPa, os corpos de prova mantiveram uma leve compressão até cerca de 3 mm de deslocamento, o que sugere uma maior acomodação inicial dos grãos grossos, seguida de comportamento mais estável.

Figura 40 – Variações de altura durante o cisalhamento: Amostras AR.

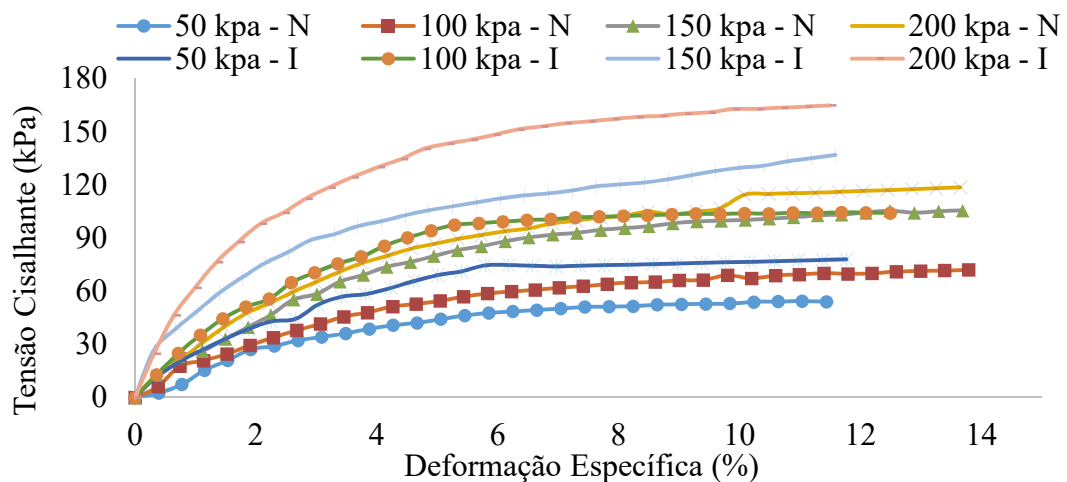


Fonte: Autor, 2025.

4.2.9.2 Análise das Amostras de SM

A Figura 41 apresenta as curvas tensão-deformação para as amostras de SM. Diferente do material reciclado, as amostras não apresentaram pico de tensão em nenhum nível de carga, mantendo um comportamento progressivamente plástico e sem ruptura definida. Esse comportamento era esperado, considerando a maior quantidade de partículas finas e o grau de compactação do solo.

Figura 41 – Curvas Tensão x Deformação: Amostras SM.

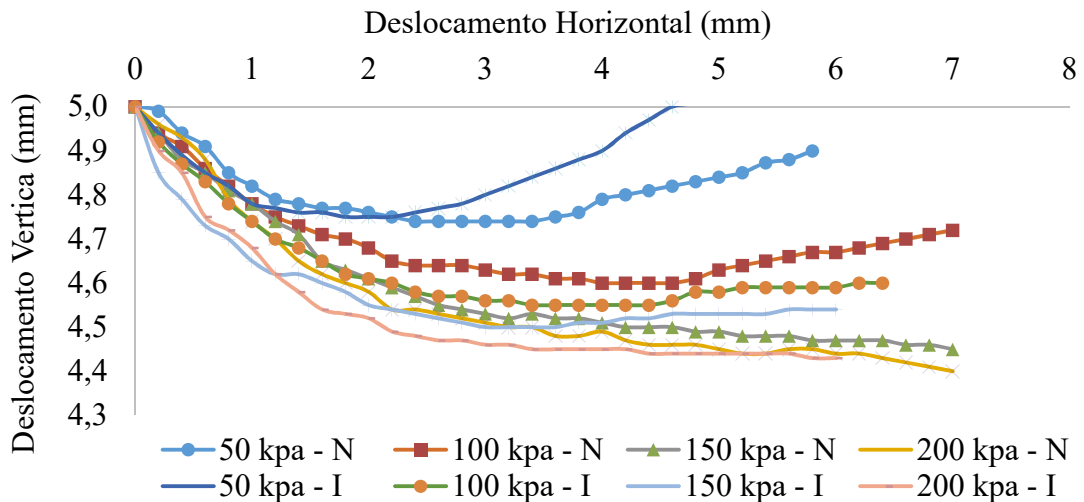


Fonte: Autor, 2025.

Na Figura 42, observa-se que todas as amostras de SM apresentaram compressão contínua até 2 mm de deslocamento horizontal, quando então o solo começou a cisalhar. Esse

comportamento reflete a estrutura menos resistente e mais deformável da matriz siltosa, com partículas finas se reorganizando durante o carregamento.

Figura 42 – Variações de altura durante o cisalhamento: Amostras SM.

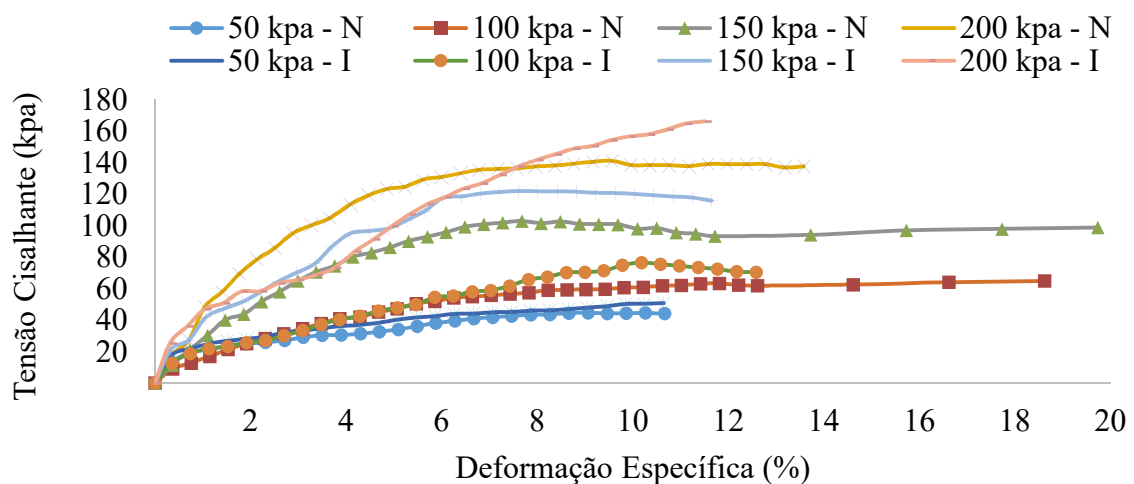


Fonte: Autor, 2025.

4.2.9.3 Análise das Amostras de AR-SM

A Figura 43 apresenta as curvas tensão-deformação para as amostras de AR-SM. O comportamento foi semelhante ao do AR puro, com a maioria das amostras exibindo pico de tensão, principalmente sob a tensão de 200 kPa com energia intermediária, onde o pico ocorreu por volta dos 12% de deformação. Esse resultado indica que a mistura manteve parte da resistência granular do AR, mas com leve aumento de coesão devido à presença do SM.

Figura 43 – Curvas Tensão x Deformação: Amostras AR-SM.

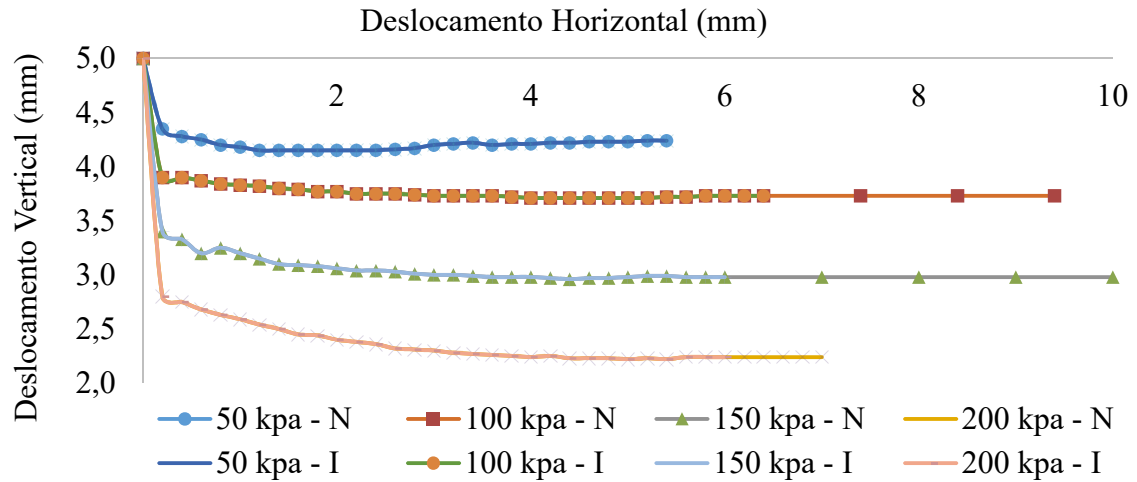


Fonte: Autor, 2025.

A Figura 44 apresenta o comportamento das variações de altura. Assim como nas amostras de AR, houve compressão inicial seguida de estabilização para praticamente todos os níveis de tensão. Isso sugere que a mistura herdou o comportamento mais estável do AR,

mas com maior capacidade de compactação inicial proporcionada pelo solo fino presente no SM.

Figura 44 – Variações de altura durante o cisalhamento: Amostras AR-SM.

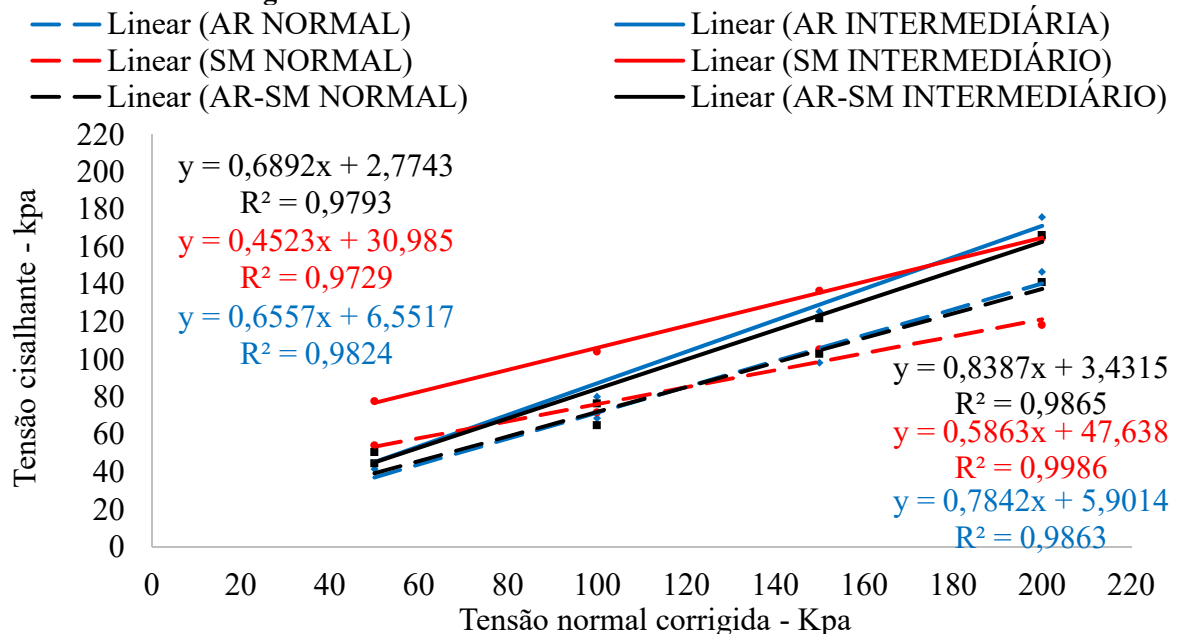


Fonte: Autor, 2025.

4.2.9.4 Envoltória e Parâmetros de Resistência

A Figura 45 apresenta as curvas de envoltória de resistência ao cisalhamento para os diferentes materiais. Nota-se que, com o aumento da deformação, o intercepto coesivo (c) das curvas diminui, indicando que a resistência inicial, mais influenciada pela coesão, dá lugar a um comportamento dominado pelo atrito interno (ϕ). Essa transição é visível pela redução do valor da coesão nas curvas correspondentes a maiores deslocamentos.

Figura 45 – Envoltórias de Resistência ao Cisalhamento.



Fonte: Autor, 2025.

Os parâmetros de resistência obtidos a partir do ajuste linear das envoltórias são apresentados na Tabela 23.

Tabela 23 – Parâmetros de resistência ao cisalhamento.

Amostra	Energia Normal		Energia Intermediária	
	Coesão (c')	Ângulo de Atrito (ϕ)	Coesão (c')	Ângulo de Atrito (ϕ)
AR	2,77 kpa	34,57°	3,43 kpa	39,96°
SM	30,98 kpa	24,32°	47,63 kpa	30,37°
AR-SM	6,55 kpa	33,22°	5,90 kpa	38,10°

Fonte: Autor, 2025.

As amostras de AR apresentaram baixo valor de coesão e elevado ângulo de atrito, comportamento típico de materiais granulares e pouco coesivos. A resistência aumentou com maior energia de compactação, indicando maior intertravamento entre partículas.

As amostras de SM mostraram alta coesão e baixo ângulo de atrito, devido à predominância de partículas finas, comportamento típico de solos siltosos. A maior energia de compactação aumentou a coesão, mas não elevou significativamente o ângulo de atrito.

A mistura AR-SM apresentou comportamento híbrido, com aumento da coesão em relação ao AR puro e um ângulo de atrito relativamente alto. A mistura manteve parte da resistência granular do AR, mas com maior coesão derivada do SM.

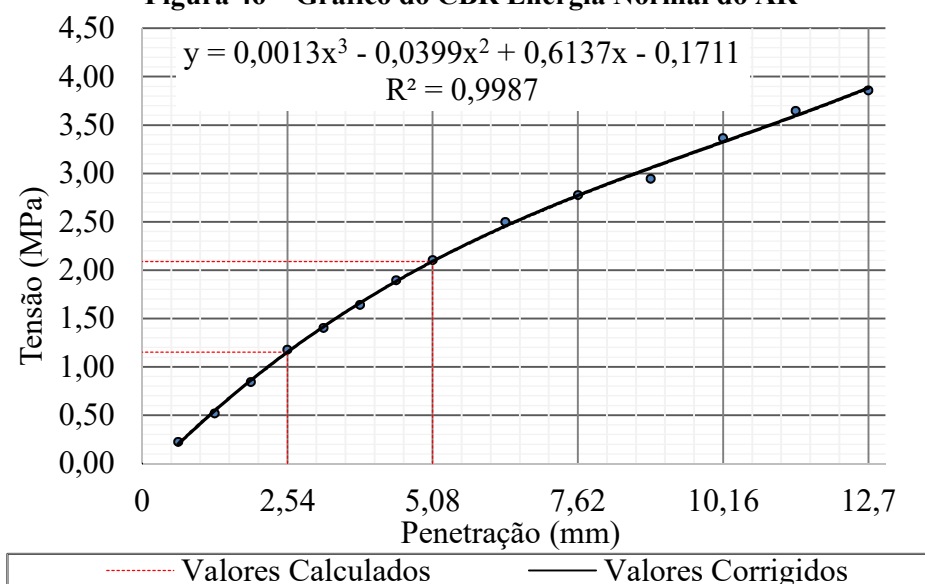
Esses resultados sugerem que a mistura tem potencial para aplicação em camadas estruturais, embora ajustes na proporção dos materiais possam otimizar o equilíbrio entre resistência e deformabilidade.

4.2.10 Índice de Suporte Califórnia (CBR)

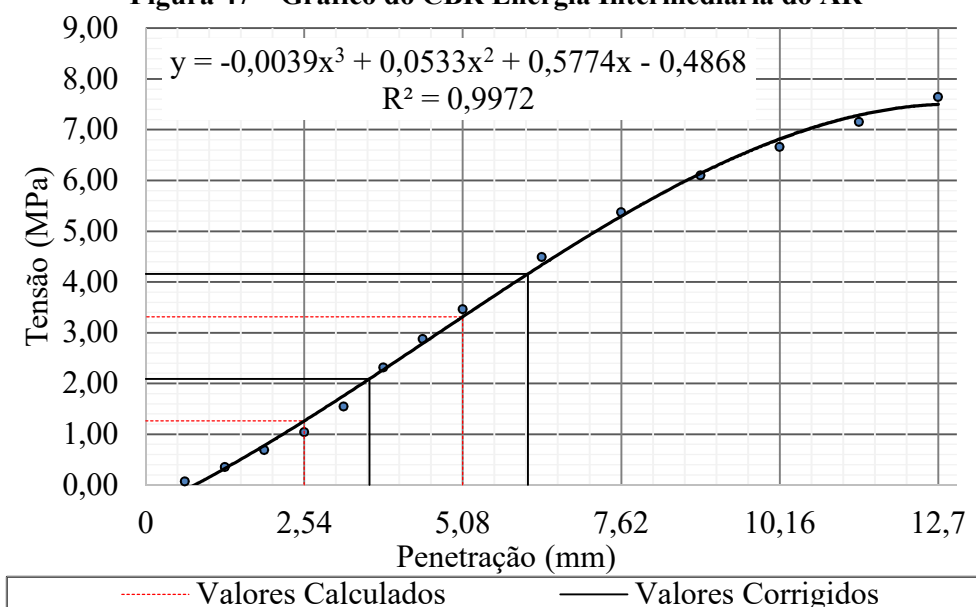
Os ensaios de carga x penetração foram conduzidos para determinar o CBR e a expansão máxima das amostras de AR, SM e AR-SM, compactadas com energia Proctor normal e intermediária. Os CPs foram submersos em água por 4 dias, com monitoramento diário da sua expansão. Os resultados obtidos são discutidos individualmente para cada material, seguidos de uma síntese comparativa para avaliação da aplicabilidade dos materiais em camadas de pavimentação.

4.2.10.1 Análise do CBR e Expansão das Amostras de AR

A Figura 46, apresenta a curva carga-penetração da amostra de AR, compactada com energia Proctor normal. O CBR obtido foi de 20,32%, com expansão máxima registrada no segundo dia, atingindo 0,035%, um valor bastante baixo, indicando boa estabilidade volumétrica do material.

Figura 46 – Gráfico do CBR Energia Normal do AR**Fonte: Autor, 2025.**

Já a Figura 47 apresenta o desempenho da amostra de AR compactada com energia intermediária, resultando em um CBR significativamente maior, de 40,20%, com expansão máxima de 0,026%, registrada ao final do quarto dia. Esse aumento no suporte é compatível com a maior densidade seca obtida na compactação intermediária, refletindo uma melhor intertravamento entre partículas.

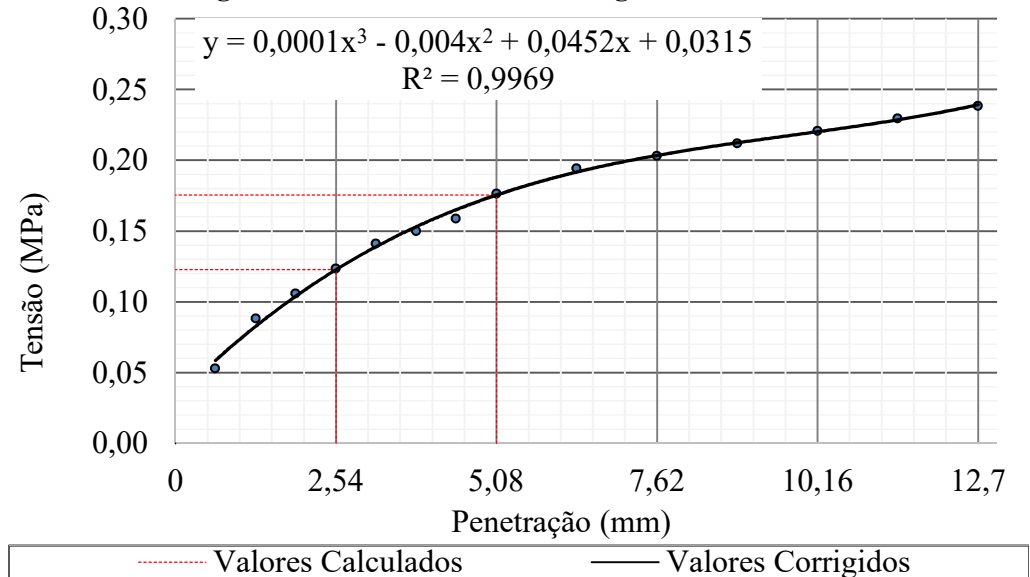
Figura 47 – Gráfico do CBR Energia Intermediária do AR**Fonte: Autor, 2025.**

4.2.10.2 Análise do CBR e Expansão das Amostras de SM

A Figura 48 apresenta os resultados da amostra de SM compactada com energia normal, revelando um CBR de apenas 1,8% e uma expansão máxima de 0,017% registrada no

segundo dia. O baixo valor de CBR era esperado, considerando uma alta fração de finos e uma baixa capacidade de suporte do solo siltoso.

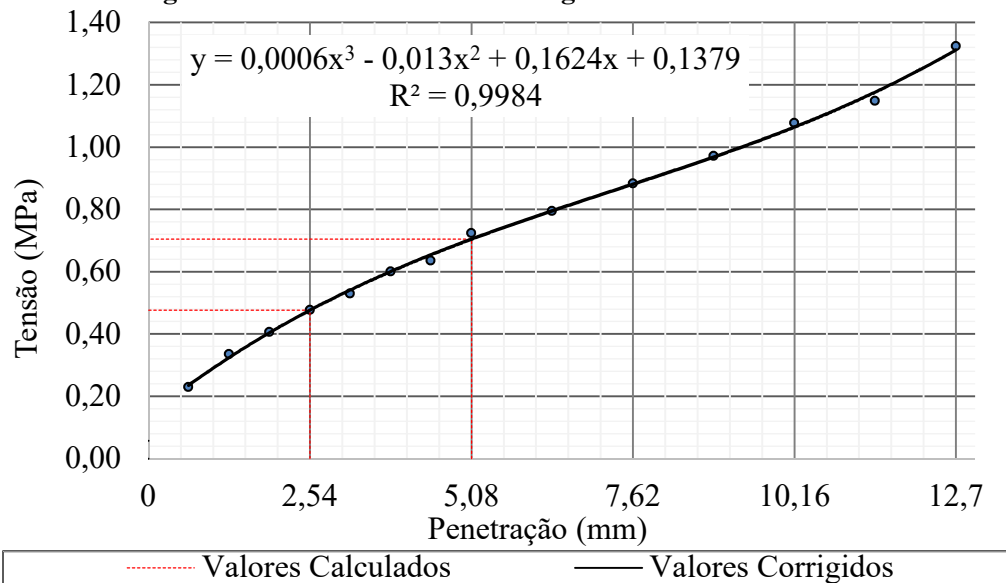
Figura 48 – Gráfico do CBR Energia Normal do SM



Fonte: Autor, 2025.

Na Figura 49 a amostra de SM compactada com energia intermediária apresentou uma leve melhoria no CBR, atingindo 7%, enquanto a expansão foi controlada, com 0,026% ao final do quarto dia. Ainda assim, os valores de suporte continuam muito abaixo dos limites recomendados para uso estrutural em pavimentação.

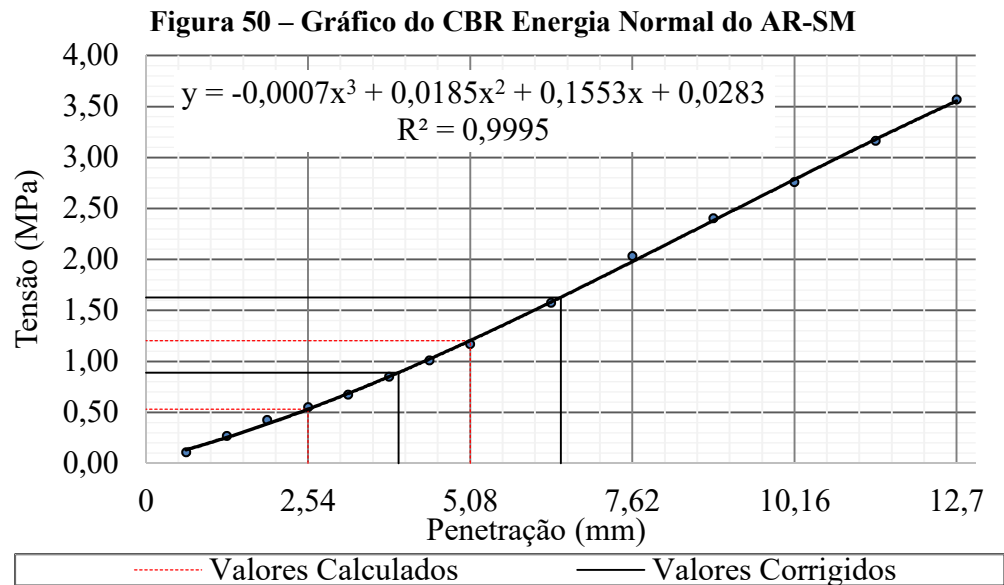
Figura 49 – Gráfico do CBR Energia Intermediária do SM



Fonte: Autor, 2025.

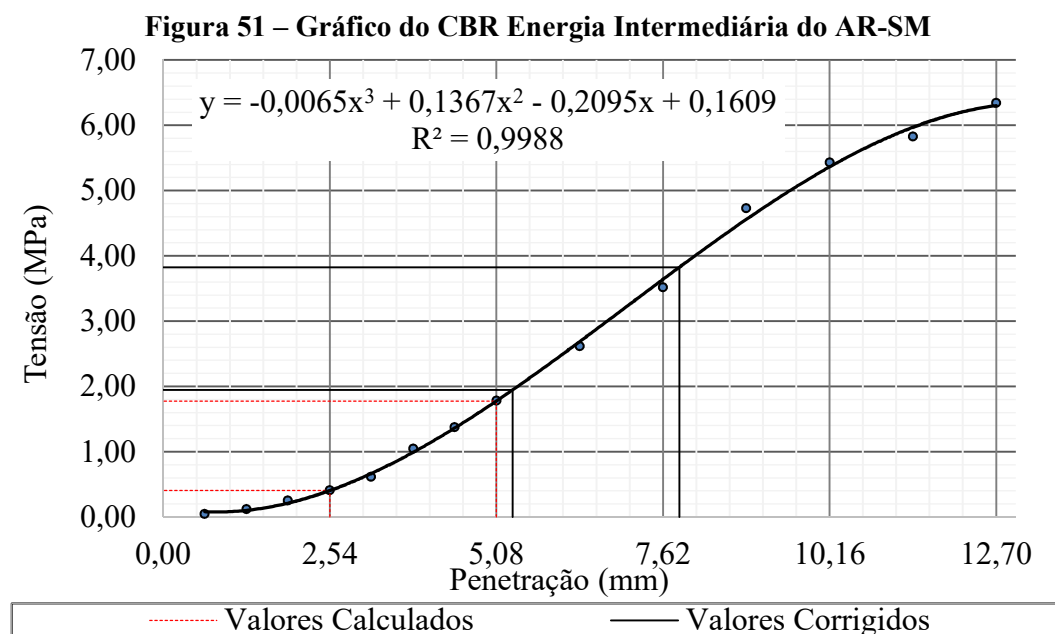
4.2.10.3 Análise do CBR e Expansão das Amostras de AR-SM

A Figura 50 apresenta o desempenho da mistura AR-SM compactada com energia normal. O CBR resultante foi de 15,72%, com expansão máxima de 0,018%, registrada no segundo dia. Nota-se uma redução no suporte em comparação ao AR puro, indicando que o SM diluiu parcialmente a capacidade resistente do agregado reciclado.



Fonte: Autor, 2025.

Por outro lado, na Figura 51, a compactação com energia intermediária elevou o CBR para 36,97%, com expansão controlada de 0,035% no terceiro dia. Apesar da melhoria significativa, o desempenho ainda ficou abaixo do AR puro, confirmando a influência negativa da adição de solo siltoso na resistência da mistura.



Fonte: Autor, 2025.

A Tabela 24 apresenta o resumo dos valores de CBR e expansão máxima para cada amostra, em ambas as energias de compactação.

Tabela 24 – Resumo do resultado do CBR e Expansão das Amostras.

Amostra	Energia Normal		Energia Intermediária	
	CBR (%)	Expansão (%)	CBR (%)	Expansão (%)
AR	20,32	0,035	40,20	0,026
SM	1,80	0,017	7,00	0,026
AR-SM	15,72	0,018	36,96	0,035

Fonte: Autor, 2025.

Todas as amostras foram expandidas abaixo dos limites normativos de 1%, para solos em geral, e 0,5%, para materiais usados em sub-base e base, que da boa estabilidade volumétrica.

As amostras de AR apresentaram bom desempenho mecânico nos ensaios de CBR, com índice de 20,32% sob energia de compactação normal, atendendo ao critério mínimo de CBR $\geq 12\%$ exigido para aplicação em camadas de reforço do subleito, conforme a NBR 15115:2004 (ABNT, 2004). Quando compactado com energia intermediária, o AR alcançou um CBR de 40,20%, classificando-se como tecnicamente adequado para uso em camadas de sub-base, que exigem CBR $\geq 20\%$.

O solo natural apresentou baixo suporte em ambas as energias de compactação, ficando inadequado para uso em pavimentação sem tratamento. Ele só se enquadra para subleito, e ainda assim com restrições. Para melhorar seu desempenho, serão necessários tratamentos estabilizadores, como adição de cal ou cimento, ou misturas granulométricas para ganhar resistência.

A mistura AR-SM obteve desempenho intermediário entre o AR puro e o SM. Apesar da redução do CBR devido à presença do solo fino, a mistura ainda ficou apta para reforço de subleito e sub-base. Contudo, o desempenho inferior ao AR indica claramente que a proporção de SM deve ser reavaliada para melhorar a resistência final.

Nenhuma das amostras avaliadas atingiu o CBR $\geq 60\%$, exigido para camadas de base. Portanto, para essa aplicação, seria necessário tratamento do material reciclado, reclassificação granulométrica ou mistura com outros materiais de maior resistência.

4.3 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E MINERALÓGICA

A caracterização química e mineralógica das amostras foi realizada por meio de Difração de Raios-X (DRX), Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia

de Energia Dispersiva (EDS/EDX). Essas técnicas permitiram identificar os principais minerais presentes, bem como a morfologia e a composição química dos materiais analisados.

4.3.1 Difração de Raios-X (DRX)

Os difratogramas obtidos indicam a presença dos principais minerais constituintes do AR, do SM e da Mistura AR-SM. A comparação com os padrões do ICDD permitiu identificar as fases minerais predominantes.

4.3.1.1 Principais Minerais Identificados

No AR apresenta quartzo (SiO_2), calcita (CaCO_3) e feldspatos alcalinos (KAlSi_3O_8 - $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$), característicos de materiais cimentícios e cerâmicos reciclados.

No SM, há predominância de quartzo (SiO_2), caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) e hematita (Fe_2O_3), caracterizando um solo rico em sílica e alumínio. A presença significativa de óxidos de ferro, especialmente a hematita, é responsável pela coloração avermelhada do material. Já a elevada plasticidade é atribuída à presença de caulinita, um argilomineral que contribui para a coesão e retenção de água no solo.

A Tabela 25 apresenta a identificação mineralógica das amostras.

Tabela 25 – Identificação Mineralógica por DRX			
MINERAL	AR (%)	SM (%)	AR-SM (%)
Quartzo (SiO_2)	✓✓✓	✓✓✓	✓✓✓
Caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$)	-	✓✓	✓
Hematita (Fe_2O_3)	-	✓✓	✓
Calcita (CaCO_3)	✓✓	-	✓
Feldspatos (AlSi_3O_8)	✓✓	-	✓✓
✓✓✓ Predominante ✓✓ Presente ✓ Fraco - Ausente			

Fonte: Autor, 2025.

A mistura AR-SM reflete a composição combinada do AR e do SM, predominando quartzo e feldspatos, porém com menor proporção de argilominerais quando comparado ao SM puro. O SM é rico em argilominerais, enquanto o AR possui minerais cimentícios como calcita e feldspatos. A mistura AR-SM herda essas características, porém em menor quantidade.

4.3.1.2 Difratogramas das Amostras

Os difratogramas das amostras evidenciaram a estabilidade química dos materiais analisados, sem alterações estruturais significativas.

No difratograma do AR, verificou pico intenso em $26,6^\circ$, compatível com quartzo (SiO_2), característico de materiais arenosos e graníticos. Picos em $29,4^\circ$ e $47,5^\circ$, indicativos de calcita (CaCO_3), evidenciando a presença de resíduos cimentícios. Ainda, foram encontrados picos na faixa de 27° a 28° , associados a feldspatos (AlSi_3O_8), minerais que aumentam a resistência mecânica.

O difratograma do SM obteve picos em $19,8^\circ$, $26,7^\circ$, $35,0^\circ$ e $61,0^\circ$, evidenciando caulinita, illita e quartzo. Presença de illita ($\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$) em $8,8^\circ$ e $19,8^\circ$, mineral responsável por maior retenção de água e plasticidade. A menor intensidade do pico de quartzo em $26,6^\circ$ indica que o solo possui características predominantemente siltosas, com baixa granularidade, o que está em conformidade com seu comportamento mecânico observado nos ensaios.

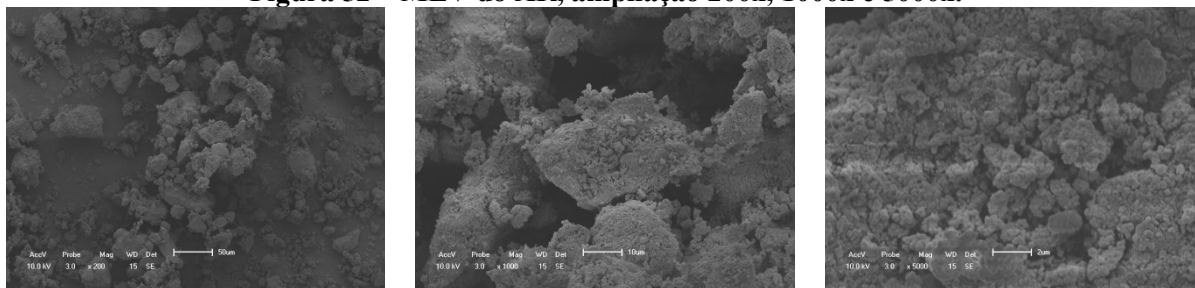
A predominância de quartzo e feldspatos no AR e na mistura AR-SM sugere boa resistência mecânica e baixa plasticidade, enquanto a maior presença de minerais argilosos no SM pode comprometer sua estabilidade estrutural.

4.3.2 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A análise por MEV revelou diferenças morfológicas significativas entre as amostras, destacando suas características texturais e estruturais.

No AR, verificou partículas angulares e irregulares, resultado da fragmentação de materiais de construção. Superfícies rugosas e porosas, favorecendo a absorção de água e impactando seu desempenho geotécnico. Presença de microfissuras e poros interconectados, possivelmente resultantes do processo de reciclagem, conforme Figura 52.

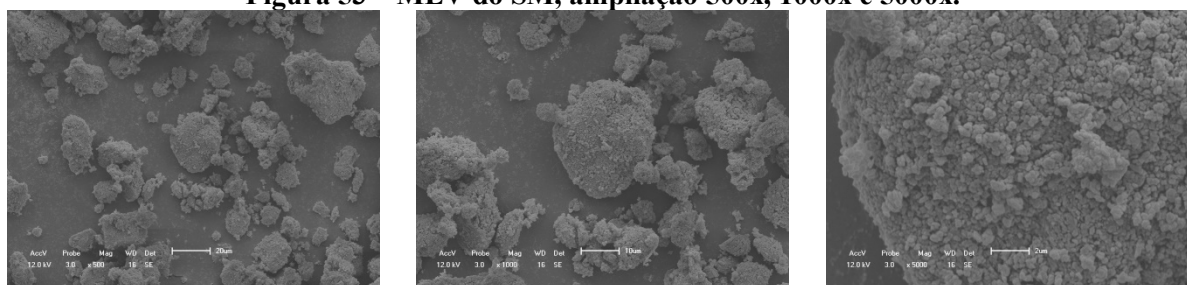
Figura 52 – MEV do AR, ampliação 200x, 1000x e 5000x.



Fonte: Autor, 2025.

No SM a estrutura composta majoritariamente por partículas finas, com textura lamelar típica de argilominerais. É visível a formação de aglomerados de partículas em algumas regiões, o que pode dificultar a compactação. Ainda, existe há presença de materiais cimentantes naturais, que podem contribuir para a coesão do solo, apresentado na Figura 53.

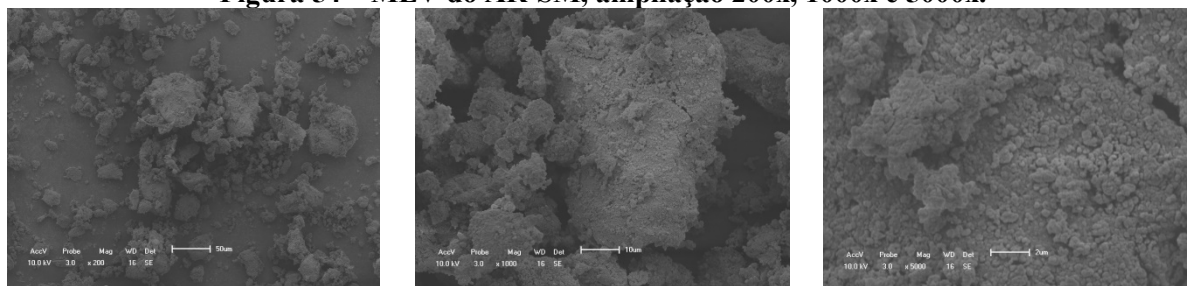
Figura 53 – MEV do SM, ampliação 500x, 1000x e 5000x.



Fonte: Autor, 2025.

Já na mistura AR-SM a estrutura heterogênea, mesclando características do AR e do SM. Partículas maiores revestidas por finos, evidenciando um possível efeito da hidratação do cimento residual. A porosidade é reduzida em relação ao AR puro, o que pode melhorar sua compactabilidade e desempenho mecânico, conforme Figura 54.

Figura 54 – MEV do AR-SM, ampliação 200x, 1000x e 5000x.



Fonte: Autor, 2025.

4.3.3 Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS)

A análise elementar realizada pela EDS confirmou a presença de Si, Al e Fe como os principais elementos nas amostras, sendo compatíveis com a presença de quartzo, caulinita e hematita.

4.3.3.1 Composição Química

No AR, principalmente composta de SiO_2 (43,00%), Al_2O_3 (32,24%), CaO (12,41%) e Fe_2O_3 (7,81%), refletindo sua origem em materiais cimentícios e cerâmicos. A presença de CaO sugere resíduos de concreto, o que pode influenciar na reatividade química do material.

O SM apresentou SiO_2 (43,08%), Al_2O_3 (41,47%) e Fe_2O_3 (12,02%), caracterizando um solo com alta plasticidade e presença de óxidos de ferro. Baixa concentração de CaO (0,82%), indicando que o solo não contém resíduos cimentícios significativos.

A Tabela 26 apresenta a composição química das amostras de AR, SM e AR-SM.

Tabela 26 – Composição Química das Amostras.

ELEMENTOS	AR (%)	SM (%)	AR-SM (%)
Dióxido de Silício (SiO_2)	43,00	43,08	42,56

Óxido de Alumínio (Al_2O_3)	32,24	41,47	35,12
Óxido de Ferro (FeO_3)	7,81	12,02	9,85
Óxido de Cálcio (CaO)	12,41	0,82	6,75
Óxido de Titânio (TiO_2)	1,34	1,89	1,58
Outros	3,20	0,72	2,14

Fonte: Autor, 2025.

A composição compartilhada entre AR e SM, predominando SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 . Menor teor de CaO em relação ao AR puro, reduzindo a influência dos resíduos cimentícios.

4.3.4 Resumo da Análise Química e Mineralógica

A caracterização química e mineralógica revelou:

AR: O material apresentou composição química compatível com sua origem em resíduos de construção e demolição, com predominância de dióxido de silício (SiO_2), seguido por óxidos de alumínio (Al_2O_3) e ferro (Fe_2O_3). O alto teor de óxido de cálcio ($\text{CaO} = 12,41\%$) indica a presença de fragmentos cimentícios, o que pode favorecer reações químicas e propriedades de estabilização.

SM: O solo revelou uma matriz rica em sílica ($\text{SiO}_2 = 43,08\%$) e alumina ($\text{Al}_2\text{O}_3 = 41,47\%$), com concentração elevada de óxidos de ferro ($\text{Fe}_2\text{O}_3 = 12,02\%$), evidenciando características lateríticas. O baixo teor de CaO ($0,82\%$) confirma a ausência de resíduos cimentícios e reforça o comportamento mais plástico do solo.

Mistura AR-SM: A composição química da mistura reflete a combinação das propriedades dos materiais individuais. A presença reduzida de CaO ($6,75\%$) em relação ao AR puro sugere menor contribuição cimentícia, enquanto os teores intermediários de Al_2O_3 e Fe_2O_3 indicam manutenção de certa plasticidade e retenção de água. A mistura apresenta um equilíbrio entre resistência mecânica e compatibilidade ambiental.

Portanto, a composição química do AR destaca seu potencial como material alternativo em camadas estruturais de pavimentação. Já o SM, com teores elevados de Al_2O_3 e Fe_2O_3 , exige cautela quanto à sua plasticidade e comportamento mecânico. A mistura AR-SM apresenta composição equilibrada, podendo ser ajustada conforme a demanda da aplicação geotécnica.

4.4 CARACTERIZAÇÃO AMBIENTAL DO AGREGADO RECICLADO

Os ensaios de lixiviação e solubilização foram realizados em conformidade com as normas ABNT NBR 10005:2004 (ABNT, 2004) e ABNT NBR 10006:2004 (ABNT, 2004), respectivamente, para avaliar a mobilidade de contaminantes e a solubilidade dos compostos

químicos nas amostras testadas. Os parâmetros obtidos foram comparados com os limites estabelecidos pela ABNT NBR 10004:2004 e pela Resolução CONAMA 357/2005 (Brasil, 2005), a fim de avaliar os resíduos quanto ao seu potencial de impacto ambiental.

4.4.1 Ensaio de Lixiviação

O ensaio de lixiviação foi realizado para determinar a mobilidade de metais pesados presentes no material e sua capacidade de contaminação do solo e da água subterrânea. A Tabela 27 apresenta os resultados obtidos para os metais pesquisados no extrato lixiviado das amostras 1 e 2, e os limites estabelecidos pela legislação ambiental.

Tabela 27 – Relatório do Extrato do Ensaio de Lixiviado do AR

PARÂMETROS	RESULTADOS		UND	ABNT NBR 10004 ANEXO F
	Amostra 1	Amostra 2		
Arsênio Total (As)	<0,00500	<0,00500	mg/L	Máx. 1,0
Bário (Ba)	0,6213	<0,53150	mg/L	Máx. 70,0
Cádmio (Cd)	<0,00100	<0,00100	mg/L	Máx. 0,5
Chumbo (Pb)	0,0155	0,0556	mg/L	Máx. 1,0
Fluoreto Total (F-)	0,83	0,68	mg/L	Máx. 150
Mercúrio (Hg)	<0,0002	<0,0002	mg/L	Máx. 0,1
pH - Potencial Hidrogeniônico (após Lixiviação)	5,43	4,74	U pH	s/Especificação
Prata (Ag)	<0,00500	<0,00500	mg/L	Máx. 5,0
Selênio (Se)	<0,00500	<0,00500	mg/L	Máx. 1,0
Solução de Extração	2,00	2,00	mL	s/Especificação
Tempo Total de Lixiviação	16,30	16,30	h	s/Especificação
Volume Líquidos Obtidos	2.000,00	2.000,00	mL	s/Especificação

Fonte: Autor, 2025.

Os valores obtidos demonstram que nenhum dos metais estudados ultrapassa os limites estabelecidos pela ABNT NBR 10004:2004 (ABNT, 2004), para classificação de resíduos perigosos. O pH das amostras após a lixiviação variou entre 4,74 e 5,43, caracterizando um ambiente levemente ácido, mas sem comprometimento ambiental significativo. Assim, as amostras podem ser caracterizadas como resíduos não perigosos, ou seja, não apresenta risco relevante de contaminação hídrica.

4.4.2 Ensaio de Solubilização

O ensaio de solubilização foi realizado para avaliar a liberação de metais e compostos solúveis em água. A Tabela 28 apresenta os resultados obtidos para os elementos específicos no extrato solubilizado das amostras.

Tabela 28 – Relatório do Extrato do Ensaio de Solubilização do AR

PARÂMETROS	RESULTADOS		UND	ABNT NBR 10004 ANEXO G
	Amostra 1	Amostra 2		
Alumínio	1,1629	0,2389	mg/L	Máx. 0,2
Arsênio	<0,0050	<0,0050	mg/L	Máx. 0,01
Bário	0,0168	0,0189	mg/L	Máx. 0,7
Cádmio	<0,0010	<0,0010	mg/L	Máx. 0,005
Chumbo	<0,0050	<0,0050	mg/L	Máx. 0,01
Cloreto	13,00	7,00	mg/L	Máx. 250
Cobre	0,0119	<0,0050	mg/L	Máx. 2,0
Correção de Água Solubilizado	4.487,03	4.492,73	mL	s/Especificação
Cromo Total	0,0468	<0,0050	mg/L	Máx. 0,05
Fenóis Totais	<0,00100	<0,00100	mg/L	Máx. 0,01
Ferro	<0,1173	0,0691	mg/L	Máx. 0,3
Fluoreto	<0,100	<0,100	mg/L	Máx. 1,5
Manganês	0,0061	<0,0050	mg/L	Máx. 0,1
Mercúrio	<0,00020	<0,00020	mg/L	Máx. 0,001
Nitrato (Expresso em N)	2,73	4,00	mg/L	Máx. 10,0
pH - Potencial Hidrogeniônico (após Solubilização)	10,10	9,43	U pH	s/Especificação
Prata	<0,0050	<0,0050	mg/L	Máx. 0,05
Selênio	<0,0050	<0,0050	mg/L	Máx. 0,01
Sódio	6,560	6,970	mg/L	Máx. 200
Solubilizado Obtenção do Extrato	4.500,00	4.500,00	mL	s/Especificação
Sulfato (Expresso em SO ₄)	69,20	118,85	mg/L	Máx. 250
Surfactantes	0,22	0,13	mg/L	Máx. 0,5
Tempo de Solubilização	7,00	7,00	dias	s/Especificação
Volume dos Líquidos Obtidos	4.500,00	4.500,00	mL	s/Especificação
Zinco	<0,0050	<0,0050	mg/L	Máx. 5,0

Fonte: Autor, 2025.

Os valores obtidos demonstram que a maioria dos elementos estão dentro dos limites estabelecidos, com exceção do alumínio, 1,1629 mg/L para amostra 1, e 0,2389 mg/L para amostra 2, que ultrapassa o limite de 0,2 mg/L recomendado pela NBR 10004:2004 para resíduos inertes. Esse resultado indica que o material pode conter resíduos aluminossilicatados, comuns em argilas lateríticas e concretos reciclados.

O pH do extrato solubilizado variou entre 9,43 e 10,10, situando-se na faixa típica de resíduos não perigosos, o que indica baixa acidez e um reduzido potencial de corrosividade. Os valores de nitrato e sulfato também foram comprovados dentro dos limites normativos, indicando que o material não apresenta riscos ambientais significativos em relação à dissolução de compostos inorgânicos.

4.4.3 Classificação Ambiental

Com base nos resultados dos ensaios de lixiviação e solubilização, a classificação das amostras foi realizada conforme os critérios estabelecidos pela NBR 10004:2004 (ABNT, 2004), resultando em:

Embora os ensaios de lixiviação tenham indicado que os metais pesados analisados (como Pb, Cd, As e Hg) estão dentro dos limites estabelecidos para resíduos não perigosos, os resultados do ensaio de solubilização revelaram que o teor de alumínio (Al) excedeu o valor máximo permitido de 0,2 mg/L. Foram registrados 1,1629 mg/L para a amostra 1 e 0,2389 mg/L para a amostra 2.

Dessa forma, o material não pode ser classificado como Classe II-B (inerte), devendo ser enquadrado como Classe II-A (não inerte), de acordo com a NBR 10004:2004. Essa classificação indica que o resíduo pode liberar substâncias em meio aquoso, exigindo cuidados específicos quanto à sua reutilização, principalmente em áreas suscetíveis à umidade.

Apesar disso, os demais parâmetros, como pH, nitrato, sulfato e metais pesados, permaneceram dentro dos limites normativos, sugerindo que o material não representa risco ambiental significativo sob condições controladas de uso. Para aplicações geotécnicas e de pavimentação, recomenda-se avaliar previamente as condições de exposição e, se necessário, adotar medidas de mitigação para evitar a mobilização de compostos solubilizáveis.

4.5 AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE TÉCNICA

A análise da viabilidade técnica do AR para uso em pavimentação foi estruturada a partir dos resultados obtidos nos ensaios de caracterização física, mecânica, química e ambiental. Cada critério foi avaliado com base nos limites estabelecidos por normas técnicas vigentes, buscando verificar se o material atende aos requisitos de desempenho exigidos para sua aplicação em camadas de subleito, sub-base ou base. A seguir, são discutidos os principais aspectos que influenciam sua adequação: granulometria, resistência mecânica, durabilidade e segurança ambiental.

4.5.1 Adequação Granulométrica

A análise granulométrica do AR demonstrou que sua distribuição de partículas atende, em grande parte, aos requisitos estabelecidos pela NBR 15115:2024 para agregados

reciclados. No entanto, foi observada uma leve discrepância na porcentagem passante na peneira #0,42 mm, que ultrapassou o limite de 40% previsto pela norma.

Os coeficientes CNU e CC indicam que o material apresenta uma granulometria bem graduada, o que favorece a compactação e a estabilidade mecânica. No entanto, ajustes na distribuição das frações finas podem ser necessários para melhorar o comportamento do AR quando utilizado isoladamente ou em misturas com solo natural.

4.5.2 Resistência Mecânica

A resistência mecânica do AR foi avaliada por meio dos ensaios de Índice de Suporte Califórnia (CBR) e cisalhamento direto.

O ensaio de CBR revelou que o AR atende aos requisitos mínimos para uso em camadas de reforço do subleito e em sub-base, especialmente quando compactado com energia distribuída, alcançando um CBR de 40,20%.

A mistura AR-SM apresentou um CBR menor que o AR puro, refletindo a influência da fração fina do SM na redução da resistência mecânica.

Os resultados do ensaio de cisalhamento direto indicaram que o AR possui um elevado ângulo de atrito ($39,96^\circ$) e baixa coesão (3,43 kPa) para energia intermediária, características típicas de materiais granulares. Isso confirma que o AR tem boa capacidade de suporte para pavimentação, desde que garantida a sua compactação.

4.5.3 Durabilidade

A durabilidade do AR foi comprovada com base no índice de abrasão Los Angeles e na estabilidade química.

O ensaio de abrasão revelou um desgaste médio de 53,13%, valor dentro do limite previsto pela norma DNIT-ES 141 (DNIT, 2010), que é de 55% para materiais destinados a bases estabilizadas.

Esse desempenho demonstra que o AR pode ser utilizado em pavimentação, embora seu desgaste seja superior ao de agregados naturais. A presença de partículas cerâmicas e cimentícias no AR pode influenciar essa característica.

A estabilidade química foi confirmada pelos ensaios de DRX e EDS, que indicaram a predominância de quartzo (SiO_2), feldspatos (AlSi_3O_8) e calcita (CaCO_3). Esses minerais

conferem resistência ao material, embora a presença de calcita possa indicar suscetibilidade química em ambientes agressivos.

4.5.4 Segurança Ambiental

A avaliação ambiental do AR foi realizada com base nos ensaios de lixiviação e solubilização, conforme as normas NBR 10005:2004 e NBR 10006:2004 (ABNT, 2004), e os resultados comparados com os limites definidos pela NBR 10004:2004 para classificação de resíduos sólidos.

Os ensaios de lixiviação indicaram que os metais pesados analisados (Pb, Cd, Zn, Cr, As, Hg, entre outros) estão dentro dos limites estabelecidos para resíduos não perigosos. Isso sugere baixa mobilidade de contaminantes em condições de contato com água subterrânea, não representando risco imediato de poluição ambiental.

Contudo, no ensaio de solubilização, foi detectado teor de alumínio (Al) superior ao limite máximo permitido pela NBR 10004:2004, que é de 0,2 mg/L. Os resultados apontaram 1,1629 mg/L para a amostra 1 e 0,2389 mg/L para a amostra 2, o que descaracteriza o material como Classe II-B (inerte).

Com isso, o AR deve ser classificado como Classe II-A (não inerte), indicando que o material possui potencial de liberar compostos em meio aquoso. Esse comportamento pode estar relacionado à presença de resíduos aluminossilicáticos, comuns em argilas lateríticas e materiais cimentícios reciclados, como concretos e argamassas.

Apesar dessa classificação, os demais parâmetros avaliados, como pH (9,43 a 10,10), nitrato e sulfato, permaneceram dentro dos limites normativos, apontando para uma baixa acidez e um reduzido potencial corrosivo. Isso reforça que, em condições controladas de uso, o AR pode ser utilizado em aplicações geotécnicas e de pavimentação, desde que sejam observadas medidas de controle e monitoramento ambiental em ambientes úmidos ou com risco de percolação.

5 CONCLUSÕES

A presente pesquisa analisou a técnica de uso do AR proveniente RD na pavimentação urbana, considerando suas propriedades físicas, mecânicas, químicas, mineralógicas e ambientais. Os ensaios laboratoriais realizados permitiram uma avaliação abrangente das potencialidades e limitações do material, possibilitando recomendações para sua aplicação.

5.1 PRINCIPAIS RESULTADOS

Os principais resultados do estudo podem ser resumidos da seguinte forma:

Adequação granulométrica: O AR apresentou uma distribuição granulométrica bem graduada, com predominância de partículas grossas e baixa fração de finos, favorecendo sua aplicação em camadas estruturais do pavimento. No entanto, a mistura AR-SM apresentou uma redução na qualidade granulométrica, exigindo ajustes para otimização do desempenho.

Resistência mecânica: Os ensaios de CBR demonstraram que o AR pode ser utilizado em camadas de sub-base e reforço do subleito, pois apresentou valores superiores aos mínimos exigidos pelas normas técnicas. O SM, por outro lado, apresentou baixa capacidade de suporte, sendo inadequado para aplicação estrutural sem estabilização. Já a mistura AR-SM teve seu desempenho prejudicado pela presença do solo argiloso, diminuindo sua resistência mecânica.

Durabilidade: O ensaio de abrasão Los Angeles revelou que o AR atende aos requisitos normativos, com valores de desgaste dentro dos limites aceitáveis para materiais granulares utilizados em pavimentação. Além disso, uma análise mineralógica indicou que o material possui boa estabilidade química, embora a presença de calcita possa torná-lo mais suscetível a ambientes agressivos.

Segurança ambiental: A análise ambiental indicou que o AR não se enquadra como resíduo inerte, sendo classificado como Classe II-A (não inerte) devido à concentração de alumínio acima do limite de 0,2 mg/L previsto pela NBR 10.004:2004 (ABNT,2004). Apesar disso, os ensaios de lixiviação e solubilização demonstraram que não há presença significativa de metais pesados como chumbo, cádmio e mercúrio. Assim, o AR pode ser utilizado em aplicações geotécnicas e rodoviárias, desde que com monitoramento e controle das condições de exposição, especialmente em área úmidas, onde a solubilidade de alumínio pode ser intensificada.

5.2 LIMITAÇÕES DO ESTUDO

Heterogeneidade do material: Como o AR é derivado de RD, sua composição pode variar significativamente, exigindo um controle rigoroso de qualidade para garantir um desempenho consistente.

Ausência de ensaios em escala real: Os testes laboratoriais fornecem informações fundamentais sobre o comportamento do material, mas os ensaios de campo são necessários para validar sua aplicação prática e durabilidade a longo prazo.

Influência da umidade e das condições climáticas: A absorção de água pelo AR pode afetar sua compactação e resistência mecânica, sendo necessária uma investigação mais detalhada sob diferentes condições climáticas.

5.3 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Estudos de dosagem e estabilização: Investigar técnicas de estabilização química, com cal ou cimento, para melhorar o desempenho mecânico das misturas AR-SM, tornando-as mais adequadas para uso estrutural em pavimentação.

Ensaio de desempenho em escala real: Realizar trechos experimentais utilizando AR em diferentes camadas do pavimento, avaliando seu comportamento ao longo do tempo e sua interação com condições de tráfego e clima.

Analisar a aplicação do AR com outros solos: Ampliar a investigação sobre o desempenho do AR quando combinado com diferentes tipos de solos da região.

Avaliação do impacto ambiental a longo prazo: Realizar estudos de longa duração para acompanhar possíveis liberações de alumínio ou outros elementos em campo.

5.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O uso do AR como alternativa sustentável para a pavimentação urbana é tecnicamente viável, especialmente em camadas de subleito e sub-base, contribuindo significativamente para a redução de resíduos e para a economia circular na construção civil. Entretanto, sua classificação como resíduo Classe II-A (não inerte), impõe critérios adicionais de monitoramento ambiental. A implantação dessa solução exige controle granulométrico, estabilização adequada e diretrizes normativas específicas, garantindo desempenho técnico e segurança ambiental no longo prazo.

REFERÊNCIAS

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY TRANSPORTATION OFFICIAL - AASHTO. **M 145-91**: Standard specification for classification of soils and soil-aggregate mixtures for highway construction purposes. Rev. Técnica 1991; ver. 2021. Washington, D. C.: AASHTO, 2021. 9 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM. **D1241-15**: Standard specification for materials for soil-aggregate subbase, base, and surface courses. West Conshohocken: ASTM International, 2015. 4 p. Disponível em: <http://compass.astm.org/download/D1241.32152.pdf>. Acesso em 7 de março de 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10004**: Resíduos sólidos - Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15115**: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Execução de camadas de pavimentação - Procedimentos. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15116**: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6457**: Preparo de Amostras de Solos. Rio de Janeiro, 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT 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. Rio de Janeiro, 2017. Disponível em: www.abnt.org.br.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6459**: Solo - Determinação do Limite de Liquidez. Rio de Janeiro, 2016.

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

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7809**: Agregado graúdo - Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro - Método de ensaio. Rio de Janeiro: p. 3, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9895: Solo - Índice de suporte Califórnia (ISC) - Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM51: Agregado Graúdo - Ensaio de Abrasão “Los Angeles”**. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2022**. São Paulo: Grappa Marketing, ABRELPE, 2022. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama-2022/>. Acesso em 07 de março de 2024.

AFFONSO, F. J. A. **Caracterização de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição (RCD) para uso em camadas drenantes de aterros de resíduos sólidos**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro em Ciências em Engenharia Civil: Rio de Janeiro, 2005.

AGRELA, F.; DÍAZ-LÓPEZ, J. L.; ROSALES, J.; CUENCA-MOYANO, G. M.; CANO, H.; CABRERA, M. Environmental assessment, mechanical behavior and new leaching impact proposal of mixed recycled aggregates to be used in road construction. **Journal of Cleaner Production**, v. 280, p. 124362, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124362>. Acesso em 20 de maio de 2023.

AKHTAR, A.; SARMAH, A. K. Construction and demolition waste generation and properties of recycled aggregate concrete: A global perspective. **Journal of Cleaner Production**, v. 186, p. 262–281, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.085>. Acesso em 18 de fevereiro de 2025.

ALAGOAS. **Plano Estadual de Resíduos Sólidos de Alagoas (PERS)**. Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Recursos Hídricos. FLORAM Engenharia e Meio Ambiente Ltda: Maceió, 2015.

ALAMIN, A.; SAMARA, F.; AL-TAMIMI, A. K. Environmental Risk Assessment of Sustainable Concrete Through the Chemical Composition of Metals and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons. **Sustainability**, v. 16, n. 21, p. 9237, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su16219237>. Acesso em 16 de fevereiro de 2025.

ALBUQUERQUE FILHO, L. H.; CASAGRANDE, M. D. T.; RIBEIRO, L. F. M. Proposed structural and functional evaluation of unpaved roads improved with geosynthetics, reclaimed asphalt pavement and Portland cement. **E3S Web of Conferences**, v. 544, art. 11003, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202454411003>. Acesso em 11 de fevereiro de 2025.

ÂNGULO, S. C.; OLIVEIRA, L.S.; MACHADO, L. **Pesquisa setorial ABRECON 2020: a reciclagem de resíduos de construção e demolição no Brasil**. São Paulo: Epusp, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/9786589190103>. Acesso em 12 de março de 2024.

ÂNGULO, S. C.; KAHN, H.; JOHN, V. M.; ULSEN, C. Metodologia de caracterização de resíduos de construção e Demolição. In: **Seminário Desenvolvimento sustentável e a reciclagem de resíduos na construção civil**. São Paulo: Anais, IBRACON, 2003. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/directbitstream/c11b9792-3fdd-4bdb-8e90-ea8e7df90a6d/Angulo.pdf>. Acesso em 12 de março de 2024.

ARAÚJO, K. K.; PIMENTEL, A. K. A Problemática do Descarte irregular dos resíduos sólidos urbanos nos bairros Vergel do Lago e Jatiúca em Maceió, Alagoas. **Revista Gestão e Sustentabilidade Ambiental**, v. 4, ed. especial 2, p. 626–668, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.19177/rgsa.v4e22015626-668>. Acesso em 13 de março de 2024.

AVEROS, S. D. R. O.; BIZARRETA-ORTEGA, J. C. Experimental Study on Stabilization Subgrade Soil Soft with Fine Concrete Residue. **ESPOCH Congresses: The Ecuadorian Journal of S.T.E.A.M.**, v. 1, n. 2, p. 1044-1052, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.18502/epoch.v1i2.9530>. Acesso em 7 de março de 2024.

BARBUDO, A.; AGRELA, F.; AYUSO, J.; JIMÉNEZ, J.R.; POON, C.S. Statistical analysis of recycled aggregates derived from different sources for sub-base applications. **Construction and Building Materials**, v. 28, n. 1, p. 129-138, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.07.035>. Acesso em 6 de março de 2024.

BARRETO, A. C.; AMORIM, E. F. Avaliação do desempenho técnico de diferentes misturas de solo com resíduos de construção (RCD) para uso em obras viárias. **Holos**, v. 36, n. 7, p. 1-20, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.15628/holos.2020.9696>. Acesso em 7 de março de 2024.

BEJA, I. A. **Agregado reciclado de construção e demolição com adição de aglomerantes hidráulicos como sub-base de pavimentos**. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo: São Paulo, 2014. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-16102014-151237>. Acesso em 15 março de 2024.

BENACHIO, G. L. F.; FREITAS, M. do C. D.; TAVARES, S. F. Circular economy in the construction industry: A systematic literature review. **Journal of Cleaner Production**, v. 260, p. 121046, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121046>. Acesso em 12 de fevereiro de 2025.

BRASIL. **Lei nº 12.305 de 2 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Diário Oficial da União: Brasília, 2010. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm. Acesso em 7 de março de 2024.

BRASIL. **Resolução CONAMA nº 357, de 17 de Março de 2005 (Retificada)**. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, 2005. Alterada pelas Resoluções CONAMA nº 393/2007, nº 397/2008, nº 410/2009 e nº 430/2011. Disponível em: https://www.icmbio.gov.br/cepsul/images/stories/legislacao/Resolucao/2005/res_conama_357_2005_classificacao_corpos_agua_rtfcd_altrd_res_393_2007_397_2008_410_2009_430_2011.pdf. Acesso em 6 de março de 2024.

BRASIL. **Resolução CONAMA nº. 307, de 5 de Julho de 2002**. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, 2002. Disponível em: https://conama.mma.gov.br/?id=305&option=com_sisconama&task=arquivo.download. Acesso em 7 de março de 2024.

BRASIL. Agência Nacional de Mineração. **Sumário Mineral 2017**. Coordenação: Marina Marques Dalla Costa, Karina Andrade Medeiros e Thiers Muniz Lima. Brasília: ANM, 2019. 201 p. Disponível em: https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/economia-mineral/publicacoes/sumario-mineral/sumariomineral_2017/@@download/file/sumario-mineral-2017-revisao3-05_12.pdf. Acesso em 12 de março de 2024.

BRASKEM. **Programa de Compensação Financeira e Apoio à Realocação - AS AÇÕES em Maceió - Janeiro**. Maceió: Braskem - Explica, 2025. Disponível em: <https://www.braskem.com.br/integra-explica>. Acesso em 10 de fevereiro de 2025.

BUI, T. D.; TSENG, J. W.; TSENG, M. L.; LIM, M. K. Opportunities and challenges for solid waste reuse and recycling in emerging economies: A hybrid analysis. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 177, p. 105968, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105968>. Acesso em 12 de fevereiro de 2025.

BURMISTER, D. M. Principles and Techniques of Soil Identification. Proceedings of the Twenty-Ninth Annual Meeting of the Highway Research Board, Washington, D.C., v. 29, p. 402–433, 1949. Disponível em: <https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/hrbproceedings/29/29-029.pdf>. Acesso em 7 de março de 2024.

CARNEIRO, A. P.; BRUM, I. A. S. de; CASSA, J. C. da S. **Reciclagem de entulho para produção de materiais de construção**. Salvador: EDUFBA; Caixa Econômica Federal, 2001.

CHA, G. W.; CHOI, S. H.; HONG, W. H.; PARK, C. W. Development of Machine Learning Model for Prediction of Demolition Waste Generation Rate of Buildings in Redevelopment Areas. **International Journal Of Environmental Research and Public Health**, v. 20, n. 2, p. 107–123, 2023a. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ijerph20010107>. Acesso em 14 de junho de 2024.

CHA, G. W.; CHOI, S. H.; HONG, W. H.; PARK, C. W. Developing a Prediction Model of Demolition-Waste Generation-Rate via Principal Component Analysis. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 20, n. 4, p. 3159–3174, 2023b. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ijerph20043159>. Acesso em 14 de junho de 2024.

CHA, G. W.; HONG, W. H.; CHOI, S. H.; KIM, Y. C. Developing an Optimal Ensemble Model to Estimate Building Demolition Waste Generation Rate. **Sustainability**, v. 15, n. 13, p. 10163–10182, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su151310163>. Acesso em 14 de junho de 2024.

CHEN, K.; WANG, J.; YU, B.; WU, H.; ZHANG, J. Critical evaluation of construction and demolition waste and associated environmental impacts: A scientometric analysis. **Journal of Cleaner Production**, v. 287, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125071>. Acesso em 14 de junho de 2024.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE - CNT. **Pesquisa CNT de Rodovias 2023**. Brasília: CNT: SEST SENAT: ITL, 2023. Disponível em: <https://static.poder360.com.br/2023/11/pesquisa-cnt-rodovia-2023.pdf>. Acesso em 12 de março de 2024.

COOK, E.; VELIS, C. A.; BLACK, L. Construction and demolition waste management: A systematic scoping review of risks to occupational and public health. **Frontiers in**

Sustainability, v. 3, art. 924926, 2022. Disponível em:
<https://doi.org/10.3389/frsus.2022.924926>. Acesso em 11 de fevereiro de 2025.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT.
DNIT 141/2010 - ES: Pavimentação – Base estabilizada granulometricamente -
 Especificação de serviço. Rio de Janeiro: DNIT, 2010. Disponível em:
https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/especificacao-de-servico-es/dnit_141_2022_es_.pdf. Acesso em 7 de março de 2024.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT.
Manual de pavimentação. 3. ed. p. 24. Publicação IPR-719. Rio de Janeiro: DNIT, 2006.
 Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-manuais/vigentes/ipr_719_manual_de_pavimentacao_versao_corrigida_errata_1.pdf.
 Acesso em 12 de março de 2024.

ENVIRONMENTAL PROTECTION DEPARTMENT - EPD. **Monitoring of Solid Waste in Hong Kong - Waste Statistics for 2022**. Hong Kong: EPD, 2023. Disponível em:
https://www.wastereduction.gov.hk/sites/default/files/resources_centre/waste_statistics/msw2022_eng.pdf. Acesso em 14 de março de 2024.

FERNANDES, C. da G. **Caracterização mecânica de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição para uso em pavimentação dos municípios do Rio de Janeiro e de Belo Horizonte**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

FERREIRA, G. E.; FONSECA JUNIOR, C. A. F. Mercado de Agregados no Brasil. *In*: **Manual de Agregados para Construção Civil**. 2a Ed. Cap. 2. CETEM, 2009. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/2043>. Acesso em 12 de março de 2024.

FONTANA, M. E.; LEVINO, N. de A.; GUARNIERI, P.; SALEHI, S. Using Group Decision-Making to assess the negative environmental, social and economic impacts of unstable rock salt mines in Maceio, Brazil. **The Extractive Industries and Society**, v. 16, p. 101360, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.exis.2023.101360>. Acesso em 7 de março de 2024.

FREITAS, M. F.; PIRES, M. de M.; BENINCÁ, D. Gestão de resíduos sólidos urbanos : uma revisão sistemática aplicada à realidade brasileira. **Revista Observatorio de La Economía Latinoamericana**, Curitiba, v. 21, n. 5, p. 2337–2359, 2023. Disponível em:
<https://ojs.observatoriolatinoamericano.com/ojs/index.php/olel/article/view/528/348>. Acesso em 12 de fevereiro de 2025.

GARZÓN, E.; MARTÍNEZ-MARTÍNEZ, S.; PÉREZ-VILLARREJO, L.; SÁNCHEZ-SOTO, P. J. Assessment of construction and demolition wastes (CDWs) as raw materials for the manufacture of low-strength concrete and bases and sub-bases of roads. **Materials Letters**, v. 320, p. 132343, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2022.132343>. Acesso em 7 de março de 2024.

GEBREMEDHIN, E. G.; TEKILE, A. K.; REDDYTHOTA, D. Identification of Suitable Solid Waste Disposal Site by Using GIS Based Multi Criteria: a Case Study of Adama Town, Ethiopia. **Geology, Ecology, and Landscapes**, 2023. Disponível em:

<https://doi.org/10.1080/24749508.2023.2245188>. Acesso em 16 de fevereiro de 2025.

GEISSDOERFER, M.; SAVAGET, P.; BOCKEN, N. M. P.; HULTINK, E. J. The Circular Economy – A new sustainability paradigm?. **Journal of Cleaner Production**, v. 143, p. 757–768, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048>. Acesso em 14 de março de 2024.

HAN, D.; KALANTARI, M.; RAJABIFARD, A. Improving the decision-making for sustainable demolition waste management by combining a BIM-based life cycle sustainability assessment framework and hybrid MCDA approach. **Waste Management and Research**, 2024. Disponível em <https://doi.org/10.1177/0734242X241291941>. Acesso em 16 de fevereiro de 2025.

HANSEN, T. C. (org.). **Recycling of Demolished Concrete and Masonry**. 1a ed., p. 336. Londres: CRC Press, 1992. Disponível em: <https://www.taylorfrancis.com/books/9781482267075>. Acesso em 14 de março de 2024.

HIDALGO, C.; CARVAJAL, G.; HINCAPIE, A.; MUÑOZ, F.; HERNÁNDEZ, M. Ground improvement by construction and demolition waste (CDW) soil mixture replacement. **Buildings**, v. 13, n. 3, art. 779, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/buildings13030779>. Acesso em 7 de março de 2024.

HOANG, N. H.; ISHIGAKI, T.; KUBOTA, R.; TONG, T. K.; NGUYEN, T. T.; NGUYEN, H. G.; YAMADA, M.; KAWAMOTO, K.. Waste generation, composition, and handling in building-related construction and demolition in Hanoi, Vietnam. **Waste Management**, v. 117, p. 32–41, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.08.006>. Acesso em 14 de junho de 2024.

HOPKINS, T. C.; BECKHAM, T. L.; SUN, C. **Resilient modulus of compacted crushed stone aggregate bases**. Lexington: Kentucky Transportation Center, University of Kentucky (Research Report KTC-05-27/SPR-229-01-1F). p. 89, 2007. Disponível em: http://www.ktc.uky.edu/Reports/KTC_07_22_SPR_326_06_1F.pdf. Acesso em 13 de fevereiro de 2025.

HUANG, S.; WANG, H.; AHMAD, W.; AHMAD, A.; VATIN, N. I.; MOHAMED, A. M.; DEIFALLA, A. F.; MEHMOOD, I. Plastic Waste Management Strategies and Their Environmental Aspects: A Scientometric Analysis and Comprehensive Review. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 19, n. 8, art. 4556, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ijerph19084556>. Acesso em 3 de setembro de 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Demográfico**. Brasília: IBGE, 2010. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/9662-censo-demografico-2010.html>. Acesso em 15 de dezembro de 2024.

IODICE, S.; GARBARINO, E.; CERRETA, M.; TONINI, D. Sustainability assessment of Construction and Demolition Waste management applied to an Italian case. **Waste Management**, v. 128, p. 83–98, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.04.031>. Acesso em 3 de setembro de 2024.

ISLAM, R.; NAZIFA, T. H.; YUNIARTO, A.; SHANAWAZ UDDIN, A. S. M.; SALMIATI,

S.; SHAHID, S. An empirical study of construction and demolition waste generation and implication of recycling. **Waste Management**, v. 95, p. 10–21, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.05.049>. Acesso em 14 de junho de 2024.

ITTYEIPPE, A. V.; THOMAS, A. V.; RAMASWAMY, K. P. C&D waste management in India: A case study on the estimation of demolition waste generation rate. **Materials Today: Proceedings**, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.02.410>. Acesso em 14 de junho de 2024.

JAIN, S.; SINGHAL, S.; PANDEY, S. Environmental life cycle assessment of construction and demolition waste recycling: A case of urban India. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 155, p. 104642, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104642>. Acesso em 10 de fevereiro de 2025.

KABIRIFAR, K.; MOJTAHEDI, M.; WANG, C.; TAM, V. W. Y. Construction and demolition waste management contributing factors coupled with reduce, reuse, and recycle strategies for effective waste management: A review. **Journal of Cleaner Production**, v. 263, p. 121265, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121265>. Acesso em 11 de fevereiro de 2025.

KADELA, M. Model of multiple-layer pavement structure-subsoil system. **Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences**, v. 64, n. 4, p. 751–762, 2016. Disponível em <https://doi.org/10.1515/bpasts-2016-0084>. Acesso em 13 de fevereiro de 2025.

KHAN, Z. A.; BALUNAINI, U.; COSTA, S. Environmental feasibility and implications in using recycled construction and demolition waste aggregates in road construction based on leaching and life cycle assessment – A state-of-the-art review. **Cleaner Materials**, v. 12, p. 100239, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.clema.2024.100239> Acesso em 11 de fevereiro de 2025.

KIM, J. Construction and demolition waste management in Korea: recycled aggregate and its application. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 23, p. 2223–2234, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10098-021-02177-x>. Acesso em 7 de março de 2024.

LEAL, A. P. Resíduos Da Construção Civil: Uma Revisão Sobre As Possibilidades De Aplicação. **Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação-REASE**, São Paulo, v. 7, n. 6, p. 459–483, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.51891/rease.v7i6.1385>. Acesso em 14 de fevereiro de 2025.

LEDERER, J.; GASSNER, A.; KLEEMANN, F.; FELLNER, J. Potentials for a circular economy of mineral construction materials and demolition waste in urban areas: a case study from Vienna. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 161, p. 104942, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104942>. Acesso em 3 de setembro de 2024.

LEITE, F. da C. **Comportamento mecânico de agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil em camadas de base e sub-base de pavimentos**. São Paulo: Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes, 2007. Disponível em: https://ietsp.com.br/static/media/media-files/2015/01/23/Dissertacao_de_Mestrado_Revisada_-_Fabiana_da_Concei%C3%A7%C3%A3o_Leite.pdf. Acesso em 8 de março de 2024.

LEITE, F. da C.; MOTTA, R. S.; VASCONCELOS, K. L.; BERNUCCI, L. Laboratory

evaluation of recycled construction and demolition waste for pavements. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 6, p. 2972–2979, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.105>. Acesso em 7 de março de 2024.

LEVY, S. M.; HELENE, P. R. L. Durability of concrete produced with mineral waste of civil construction industry. **In: CIB SYMPOSIUM IN CONSTRUCTION AND ENVIRONMENT: THEORY INTO PRACTICE**, 2000, São Paulo. Anais [...]. São Paulo: CIB/PCC-EPUSP, 2000. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/directbitstream/92f9795b-47a5-463c-9fe0-1a1cb9b99260/Helene-2000-durability.pdf>. Acesso em 14 de março de 2024.

LIMA, L. de C.; GOMES, M. T. U. SOLUÇÃO PACÍFICA DE CONFLITO: Uma análise sobre o Caso Pinheiro. **Universidade Positivo**, 2022. Disponível em: https://www.ajufe.org.br/images/2022/UP_-_artigo_científico.pdf. Acesso em 14 de março de 2024.

LIU, Z.; FENG, T.; ZHU, X.; GAO, J.; HU, K.; GUO, M.; GU, F.; LI, F. Bird's-eye view of recycled solid wastes in road engineering. **Journal of Road Engineering**, v. 4, n. 2, p. 93–150, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jreng.2024.05.002>. Acesso em 3 de setembro de 2024.

LLANES, M. C.; PÉREZ, M. R.; GONZÁLEZ, M. J. G.; RAYA, J. P. B. Construction and demolition waste as recycled aggregate for environmentally friendly concrete paving. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 29, n. 7, p. 9826–9840, 2022. Disponível em <https://doi.org/10.1007/s11356-021-15849-4>. Acesso em 7 de março de 2024.

LLOPIS-CASTELLÓ, D.; ALONSO-TROYANO, C.; ÁLVAREZ-TRONCOSO, P.; MARZÁ-BELTRÁN, A.; GARCÍA, A. Design of Sustainable Asphalt Mixtures for Bike Lanes Using RAP and Ceramic Waste as Substitutes for Natural Aggregates. **Sustainability**, v. 14, n. 23, art. 15777, 2022. Disponível em <https://doi.org/10.3390/su142315777>. Acesso em 14 de fevereiro de 2025.

LUND, H. F. **The McGraw-Hill recycling handbook**. New York: McGraw-Hill, 2000.

MA, M.; TAM, V. W. Y.; LE, K. N.; LI, W. Challenges in current construction and demolition waste recycling: A China study. **Waste Management**, v. 118, p. 610–625, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.09.030>. Acesso em 17 de fevereiro de 2025.

MAH, C. M.; FUJIWARA, T.; HO, C. S. Construction and demolition waste generation rates for high-rise buildings in Malaysia. **Waste Management and Research**, v. 34, n. 12, p. 1224–1230, 2016. Disponível em <https://doi.org/10.1177/0734242X16666944>. Acesso em 14 de junho de 2024.

MALLICK, P. K.; SALLING, K. B.; PIGOSSO, D. C. A.; McALOONE, T. Towards a circular economy: Development of a support tool for designing reverse logistics systems. **Journal of Environmental Management**, v. 351, p. 119819, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119819>. Acesso em 16 de fevereiro de 2025.

MAO, Q.; JIA, X.; LI, J.; WANG, T. Evaluating the impact of China's MSW sorting pilot policy on urban sustainable development: Empirical evidence from 95 cities. **PLOS ONE**, v. 19, n. 2, 2024. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0296819>. Acesso em 16 de fevereiro de 2025.

MASUEIRO, A. B. **Estabilização das escórias de aciaria elétrica com vistas a sua utilização como substituição ao cimento**. 2001. Tese (Doutorado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/170216>. Acesso em 7 de março de 2024.

MIRANDA, D. F. de; SILVA, A. L. F. e. Infraestrutura de transporte, desafio logístico e a importância do Arco Norte para a competitividade agrícola regional. **Cadernos CEPEC**, v. 12, n. 2, p. 63–73, 2023. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.18542/cepec.v12i2.15009>. Acesso em 14 de fevereiro de 2025.

MOSCHEN-SCHIMEK, J.; KASPER, T.; HUBER-HUMER, M. Critical review of the recovery rates of construction and demolition waste in the European Union – An analysis of influencing factors in selected EU countries. **Waste Management**, v. 167, p. 150–164, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.05.020>. Acesso em 17 de fevereiro de 2025.

MOTTA, R. dos S. **Estudo laboratorial de agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil para aplicação em pavimentação de baixo volume de tráfego**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/D.3.2005.tde-19072006-114729>. Acesso em 7 de março de 2024.

NANDAL, M.; SOOD, H.; GUPTA, P. K.; HAQ, M. Z. U. Morphological and physical characterization of construction and demolition waste. **Materials Today: Proceedings**, v. 74, p. 1-8, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.11.013>. Acesso em 7 de março de 2024.

NASCIMENTO, E. R. do; MORAIS, D. P. F. de; LOPES, S. C. Sustentabilidade na construção civil no Brasil: Uma revisão da literatura. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 14, p. e524111436611, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i14.36611>. Acesso em 12 de fevereiro de 2025.

NIEVES, A. J.; RAMOS, G. C. D. Advancing the Application of a Multidimensional Sustainable Urban Waste Management Model in a Circular Economy in Mexico City. **Sustainability**, v. 15, n. 17, art. 12678, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su151712678>. Acesso em 16 de fevereiro de 2025.

ORIOLI, M. A. **Uso de Agregado reciclado de resíduos de construção e demolição em misturas solo-agregado**. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes e Área de Concentração em Infraestrutura de Transportes - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/D.18.2018.tde-27092018-090352>. Acesso em 7 de março de 2024.

PAPAMICHAEL, I.; VOUKKALI, I.; LOIZIA, P.; ZORPAS, A. A. Construction and demolition waste framework of circular economy: A mini review. **Waste Management and Research**, v. 41, n. 12, p. 1728–1740, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/0734242X231190804>. Acesso em 10 de fevereiro de 2025.

PASCHOALIN FILHO, J. A.; FRASSON, S. A.; CONTI, D. D. M. Economia Circular:

estudo de casos múltiplos em usinas de reciclagem no manejo de resíduos da construção civil. **Desenvolvimento em Questão**, v. 17, n. 49, p. 136–157, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.21527/2237-6453.2019.49.136-157>. Acesso em 7 de março de 2024.

PASCHOALIN FILHO, J. A.; STOROPOLI, J. H.; DUARTE, E. B. L. Viabilidade econômica da utilização de resíduos de demolição reciclados na execução do contrapiso de um edifício localizado na zona leste da cidade de São Paulo. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental-REGET**, Santa Maria, v. 18, n. 2, p. 928–943, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/2236117013750>. Acesso em 14 de fevereiro de 2025.

PAULINO, R. S.; LAZARI, C. H.; MIRANDA, L. F. R.; VOGT, V. Atualização do cenário da reciclagem de resíduos de construção e demolição no Brasil: 2008-2020. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 23, n. 3, p. 83–97, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1678-86212023000300677>. Acesso em 8 de março de 2024.

PEREIRA, S. M.; GUSMÃO, A. D.; VILAR, O. M.; PALMEIRA, E. M.; SANTOS, E. C. G. Aplicação de Resíduos de Construção e Demolição Reciclados (RCD-R) em Obras Geotécnicas. *In: Congresso Brasileiro de Geossintéticos*. Anais. Brasília, 2015. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/356175296>. Acesso em 7 de março de 2024.

PEREIRA, P. M.; VIEIRA, C. S. A Literature Review on the Use of Recycled Construction and Demolition Materials in Unbound Pavement Applications. **Sustainability**, v. 14, n. 21, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su142113918>. Acesso em 18 de fevereiro de 2025.

PINTO, C. de S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos - Em 16 Aulas**. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

PITAKASO, R.; SRICHOK, T.; KHONJUN, S.; GOLINSKA-DAWSON, P.; GONWIRAT, S.; NANTHASAMROENG, N.; BOONMEE, C.; JIRASIRILERD, G.; LUESAK, P. Artificial Intelligence in enhancing sustainable practices for infectious municipal waste classification. **Waste Management**, v. 183, p. 87–100, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2024.05.002>. Acessado em 16 de fevereiro de 2025.

PRESTON, F. A Global Redesign? Shaping the Circular Economy. **Energy, Environment and Resource Governance**, p. 1–20, 2012. Disponível em: http://www.chathamhouse.org/sites/files/chathamhouse/public/Research/Energy, Environment and Development/bp0312_preston.pdf. Acesso em 14 de março de 2024.

REIS, G. S.; QUATTRONE, M.; AMBRÓS, W. M.; CAZACLIU, B. G.; SAMPAIO, C. H. Current applications of recycled aggregates from construction and demolition: A review. **Materials**, v. 14, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma14071700>. Acesso em 10 de fevereiro de 2025.

RIBEIRO, A. K. D. S. P.; MARQUES, S. K. J.; RIBEIRO, I. B. G.; MAIA, S. M. F. Quantificação e classificação dos resíduos procedentes da construção civil no município de Maceió - AL. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 10, n. 1, p. 363-384, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.19177/rgsa.v10e12021363-384>. Acesso em 12 de março de 2024.

ROSA, A. G. F.; SILVA, W. D. O.; FONTANA, M. E.; LEVINO, N.; GUARNIERI, P. A GIS-based multi-criteria approach for identifying areas vulnerable to subsidence in the

world's largest ongoing urban socio-environmental mining disaster. **Extractive Industries and Society**, v. 19, p. 101500, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.exis.2024.101500>. Acesso em 3 de setembro de 2024.

SALEHI, S.; ARASHPOUR, M.; KODIKARA, J.; GUPPY, R. Sustainable pavement construction: A systematic literature review of environmental and economic analysis of recycled materials. **Journal of Cleaner Production**, v. 313, p. 127936, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127936>. Acesso em 11 de fevereiro de 2025.

SANTOS, P. S. **Tecnologia de argilas: Aplicações**. São Paulo: Edgard Blücher, 1975.

SANTOS, J. C. dos; COUTINHO, R. Q. Geological and geotechnical characterization of soils from the barreiras formation in a subarea of study in Maceio, Alagoas State, Brazil. **Geotechnical and Geological Engineering**, v. 41, n. 1, p. 107–133, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10706-022-02266-8>. Acesso em 3 de setembro de 2024.

SÃO PAULO, Prefeitura Municipal de São Paulo. **Especificação de Serviço: Camadas de reforço dos subleito, sub-base e base mista de pavimento com agregado reciclado de resíduos sólidos da construção civil**. PMSP ETS1: Publicado no Diário Oficial do Município de 20/03/2003, São Paulo, 2003.

SCHNEIDER, A. F.; AANESTAD, M.; CARVALHO, T. C. Exploring barriers in the transition toward an established e-waste management system in Brazil: a multiple-case study of the formal sector. **Environment, Development and Sustainability**, v. 26, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10668-024-05188-y>. Acesso em 16 de fevereiro de 2025.

SEJIN-GARCES, J. E.; AHUMADA-NAVARRO, G.; RONDÓN-QUINTANA, H. A.; REYES-LIZCANO, F. A. BASTIDAS-MARTÍNEZ, J. G.. Mechanical strength of an hot-mix asphalt using recycled concrete aggregate: mass and volume proportioning. **Road Materials and Pavement Design**, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/14680629.2024.2371338>. Acesso em 14 de fevereiro de 2025.

SENÇO, W. de. **Manual de Técnicas de Pavimentação**. v. II. São Paulo: Pini LTDA, 2001.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL - SGB-CPRM. **Estudos sobre a instabilidade do terreno nos bairros Pinheiro, Mutange e Bebedouro, Maceió (AL): volume I, relatório síntese dos resultados n. 1**. Brasília: CPRM, 2019. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/21133>. Acesso em 12 de março de 2024.

SONDH, S.; UPADHYAY, D. S.; PATEL, S.; PATEL, R. N. A strategic review on Municipal Solid Waste (living solid waste) management system focusing on policies, selection criteria and techniques for waste-to-value. **Journal of Cleaner Production**, v. 356, p. 131908, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131908>. Acesso em 12 de fevereiro de 2025.

SONG, Y.; WANG, Y.; LIU, F.; ZHANG, Y. Development of a hybrid model to predict construction and demolition waste: China as a case study. **Waste Management**, v. 59, p. 350–361, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2016.10.009>. Acesso em 14 de junho de 2024.

SUN, H.; LIU, H.; TIAN, J.; GUO, R.; XU, Q.; YAO, L.; HONG, W.; LI, H.; ZHU, C.

Modelling and Optimizing Resource Management and Environmental Benefit of Construction and Demolition Waste: A Case Study in China. **Buildings**, v. 12, n. 9, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/buildings12091361>. Acesso em 14 de junho de 2024.

TEMIS; BRASKEM. **RIMA - Relatório de Impacto Ambiental**. Maceió, 2023. Disponível em: <https://www2.ima.al.gov.br/app/uploads/2023/03/RIMA-Demolicao-e-outras-atividades-Braskem.pdf>. Acesso em 18 de fevereiro de 2025.

VASILCA, I.-S.; NEN, M.; CHIVU, O.; RADU, V.; SIMION, C.-P.; MARINESCU, N. The management of environmental resources in the construction sector: An empirical model. **Energies**, v. 14, n. 9, p. 1–19, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en14092489>. Acesso em 12 de fevereiro de 2025.

VÁSQUEZ, E.; BARRA, M. Recycling of aggregates in the construction industry. In: **CIB Symposium in Construction and Environment: Theory into Practice**. Anais [...]. São Paulo, 2000, p. 8.

VASSILEVA, M.; AL-HALBOUNI, D.; MOTAGH, M.; WALTER, T. R.; DAHM, T.; WETZEL, H.-U. A decade-long silent ground subsidence hazard culminating in a metropolitan disaster in Maceió, Brazil. **Scientific Reports**, v. 11, p. 7704, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-87033-0>. Acesso em 3 de setembro de 2024.

WICHINHESKI, T. S.; FORTES, F. C. A. Classificação e quantificação dos resíduos provenientes da construção de uma residência unifamiliar. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 8, n. 3, p. 22328–22344, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.34117/bjdv8n3-432>. Acesso em 14 de março de 2024.

WINTRUFF, N. C.; FERNANDES JÚNIOR, J. L. A review on life cycle assessment of pavements in Brazil: Evaluating environmental impacts and pavement performance integrating the international roughness index. **Sustainability**, v. 15, n. 19, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su151914373>. Acesso em 16 de fevereiro de 2025.

WU, H.; WANG, J.; DUAN, H.; OUYANG, L.; HUANG, W.; ZUO, J. An innovative approach to managing demolition waste via GIS: A case study in Shenzhen city, China. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 494–503, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.096>. Acesso em 14 junho de 2024.

WU, Z.; YU, A. T. W.; POON, C. S. An off-site snapshot methodology for estimating building construction waste composition - a case study of Hong Kong. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 77, p. 128–135, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2019.03.006>. Acesso em 12 de fevereiro de 2025.

YU, B.; WANG, J.; LI, J.; ZHANG, J.; LAI, Y.; XU, X. Prediction of large-scale demolition waste generation during urban renewal: A hybrid trilogy method. **Waste Management**, v. 89, p. 1–9, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.03.063>. Acesso em 14 de Junho de 2024.

ZHANG, J.; DING, L.; LI, F.; PENG, J. Recycled aggregates from construction and demolition wastes as alternative filling materials for highway subgrades in China. **Journal of Cleaner Production**, v. 255, p. 120223, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120223>. Acesso em 8 de março de 2024.

ZHANG, C.; HU, M.; YANG, X.; MIRANDA-XICOTENCATL, B.; SPRECHER, B.; DI MAIO, F.; ZHONG, X.; TUKKER, A. Upgrading construction and demolition waste management from downcycling to recycling in the Netherlands. **Journal of Cleaner Production**, v. 266, p. 121718, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121718>. Acesso em 18 de fevereiro de 2025.

ZHENG, L.; WU, H.; ZHANG, H.; DUAN, H.; WANG, J.; JIANG, W.; DONG, B.; LIU, G.; ZUO, J.; SONG, Q. Characterizing the generation and flows of construction and demolition waste in China. **Construction and Building Materials**, v. 136, p. 405–413, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.055>. Acesso em 14 de junho de 2024.

APÊNDICE A – Ensaio de Granulometria com Sedimentação

A1. Agregado Reciclado (AR) – Amostra 1

Peneiramento Grosso			
Peneira (mm)	Retido Parcial (g)	Mi-Retido Acumulado(g)	Qg-Material Passado (%)
50	170,39	170,39	98,28
38	653,27	823,66	91,66
25	409,34	1233,00	87,52
19	476,00	1709,00	82,70
9,5	988,20	2697,20	72,70
4,8	573,55	3270,75	66,89
2	565,61	3836,36	61,17

Peneiramento Fino			
Peneira (mm)	Retido Parcial (g)	Mi-Retido Acumulado(g)	Qg-Material Passado (%)
1,2	4,84	4,84	56,86
0,6	9,63	14,47	48,27
0,42	8,93	23,4	40,31
0,25	11,12	34,52	30,40
0,15	10,38	44,9	21,15
0,075	7,14	52,04	14,79

Granulometria por Sedimentação							
Tempo Decorr. (min)	Leitura Densimét. L	Temp. (°C)	Correção Temp. Ld	Viscosidade (10 ⁻⁶ gs/cm ²)	Diâmetro (mm)	Altura Queda (cm)	% da Amostra Total
0,25							
0,5	1,0150	27,5	1,00647	8,62	0,069	15,14	12,29
1	1,0150	27,5	1,00647	8,62	0,049	15,14	12,29
2	1,0140	27,5	1,00647	8,62	0,034	14,34	10,85
4	1,0140	27,5	1,00647	8,62	0,024	14,34	10,85
8	1,0140	27,5	1,00647	8,62	0,017	14,34	10,85
15	1,0130	27,5	1,00647	8,62	0,012	14,55	9,41
30	1,0120	27,0	1,00649	8,72	0,009	14,75	7,94
60	1,0120	27,0	1,00649	8,72	0,006	14,75	7,94
120	1,0115	27,0	1,00649	8,72	0,004	13,45	7,22
240	1,0110	27,0	1,00649	8,72	0,003	13,59	6,50
480	1,0100	27,0	1,00649	8,72	0,002	13,86	5,06
1440	1,0100	27,0	1,00649	8,72	0,001	13,86	5,06

Porcentagens Passantes e Retidas			
Diâmetro	ACUMULADO		ABNT
	% Passando	% Retido	
76	100,00	0,00	PEDREGULHO
50	98,28	1,72	
38	91,66	8,34	
25	87,52	12,48	
19	82,70	17,30	
9,5	72,70	27,30	
			38,83%

4,8	66,89	33,11	AREIA GROSSA	48,88%	12,90%
2	61,17	38,83			
1,2	56,86	43,14			
0,6	48,27	51,73			
0,42	40,31	59,69	AREIA MÉDIA	48,88%	27,12%
0,25	30,40	69,60			
0,15	21,15	78,85			
0,075	14,79	85,21			
0,069	12,29	87,71	AREIA FINA		8,86%
0,049	12,29	87,71			
0,034	10,85	89,15			
0,024	10,85	89,15			
0,017	10,85	89,15	SILTE	7,23%	
0,012	9,41	90,59			
0,009	7,94	92,06			
0,006	7,94	92,06			
0,004	7,22	92,78	ARGILA	5,06%	
0,003	6,50	93,50			
0,002	5,06	94,94			
0,00125	5,06	94,94			
0,00125	5,06	94,94			
0,00125	5,06	94,94			

A2. Agregado Reciclado (AR) – Amostra 2

Peneiramento Grosso			
Peneira (mm)	Retido Parcial (g)	Mi-Retido Acumulado(g)	Qg-Material Passado (%)
50	0	0	100,00
38	495,39	495,39	94,99
25	717,04	1212,43	87,74
19	574,61	1787,04	81,92
9,5	1213,32	3000,36	69,65
4,8	613,52	3613,88	63,44
2	495,65	4109,53	58,43

Peneiramento Fino			
Peneira (mm)	Retido Parcial (g)	Mi-Retido Acumulado(g)	Qg-Material Passado (%)
1,2	4,84	4,84	54,31
0,6	9,63	14,47	46,11
0,42	8,93	23,4	38,51
0,25	11,12	34,52	29,04
0,15	10,38	44,9	20,21
0,075	2,14	47,04	18,39

Granulometria por Sedimentação							
Tempo Decorr. (min)	Leitura Densimét. L	Temp. (°C)	Correção Temp. Ld	Viscosidade (10 ⁻⁶ gs/cm ²)	Diâmetro (mm)	Altura de Queda (cm)	% da Amostra Total
0,25							
0,5	1,0170	27,5	1,00368	8,62	0,064	13,0	18,33
1	1,0160	27,5	1,00368	8,62	0,046	13,3	16,96
2	1,0150	27,5	1,00368	8,62	0,032	12,5	15,58

4	1,0145	27,5	1,00368	8,62	0,022	12,6	14,89
8	1,0140	27,5	1,00368	8,62	0,016	12,8	14,21
15	1,0130	27,5	1,00368	8,62	0,012	13,0	12,83
30	1,0130	27,0	1,00380	8,72	0,008	13,0	12,67
60	1,0120	27,0	1,00380	8,72	0,006	13,3	11,29
120	1,0115	27,0	1,00380	8,72	0,004	13,5	10,60
240	1,0105	27,0	1,00380	8,72	0,003	13,7	9,23
480	1,0100	27,0	1,00380	8,72	0,002	13,9	8,54
1440	1,0095	27,0	1,00380	8,72	0,001	14,0	7,85

Porcentagens Passantes e Retidas:

Diâmetro	ACUMULADO		PARCIAL	ABNT			
	% Passando	% Retido	% Retido				
76	100,00	0,00	0,00				
50	100,00	0,00	0,00				
38	94,99	5,01	5,01				
25	87,74	12,26	7,25	PEDREGULHO	41,57%		
19	81,92	18,08	5,81				
9,5	69,65	30,35	12,27				
4,8	63,44	36,56	6,21				
2	58,43	41,57	5,01	AREIA GROSSA	12,32%		
1,2	54,31	45,69	4,12				
0,6	46,11	53,89	8,20				
0,42	38,51	61,49	7,60	AREIA MÉDIA	40,09%	25,90%	
0,25	29,04	70,96	9,47				
0,15	20,21	79,79	8,84				
0,075	18,39	81,61	1,82	AREIA FINA	1,87%		
0,064	18,33	81,67	0,05				
0,046	16,96	83,04	1,38				
0,032	15,58	84,42	1,38				
0,022	14,89	85,11	0,69				
0,016	14,21	85,79	0,69				
0,012	12,83	87,17	1,38	SILTE	9,80%		
0,008	12,67	87,33	0,17				
0,006	11,29	88,71	1,38				
0,004	10,60	89,40	0,69				
0,003	9,23	90,77	1,38				
0,002	8,54	91,46	0,69				
0,00125	7,85	92,15	0,69	ARGILA	8,54%		
0,00125	7,85	92,15	7,85				

A3. Solo do Mutange (SM) – Amostra 1

Peneiramento Grosso			
Peneira	Retido	Mi -Retido	Qg-Material
(mm)	Parcial (g)	acumulado(g)	Passado (%)
50	0,00	0,00	100,00
38	0,00	0,00	100,00
25	0,00	0,00	100,00
19	0,00	0,00	100,00
9,5	0,00	0,00	100,00
4,8	8,43	8,43	99,57

2	28,28	36,71	98,13
---	-------	-------	-------

Peneiramento Fino			
Peneira (mm)	Retido Parcial (g)	Mi -Retido acumulado(g)	Qg-Material Passado (%)
1,2	4,08	4,08	96,09
0,6	14,03	18,11	89,08
0,42	11,49	29,6	83,34
0,25	15,46	45,06	75,62
0,15	16,93	61,99	67,16
0,075	14,36	76,35	59,98

Granulometria por Sedimentação							
Tempo decorrido (min)	Leitura Densimét. L	Temperatura (°C)	Correção Temp. Ld	Viscosidade (10 ⁻⁶ gs/cm ²)	Diâmetro (mm)	Altura de Queda (cm)	% da Amotra total
0,25	1,0320	25,5	1,00654	9,02	0,077	8,95	58,64
0,5	1,0315	25,5	1,00654	9,02	0,055	9,09	57,49
1	1,0305	25,5	1,00654	9,02	0,039	9,36	55,18
2	1,0300	25,5	1,00654	9,02	0,028	9,49	54,03
4	1,0300	25,5	1,00654	9,02	0,019	8,55	54,03
8	1,0295	25,5	1,00654	9,02	0,013	8,69	52,88
15	1,0290	25,5	1,00654	9,02	0,010	8,82	51,73
30	1,0285	25,5	1,00654	9,02	0,007	8,96	50,57
60	1,0280	25,5	1,00654	9,02	0,005	9,09	49,42
120	1,0275	25,5	1,00654	9,02	0,004	9,23	48,27
240	1,0270	25,5	1,00654	9,02	0,003	9,36	47,12
480	1,0265	25,5	1,00654	9,02	0,002	9,50	45,97
1440	1,0260	25,5	1,00654	9,02	0,001	9,63	44,82

Porcentagens Passantes e Retidas:					
Diâmetro	ACUMULADO		PARCIAL		ABNT
	% Passando	% Retido	% Retido		
76	100,00	0,00	0,00		
50	100,00	0,00	0,00		
38	100,00	0,00	0,00		
25	100,00	0,00	0,00	PEDREGULHO	1,87%
19	100,00	0,00	0,00		
9,5	100,00	0,00	0,00		
4,8	99,57	0,43	0,43		
2	98,13	1,87	1,44	AREIA GROSSA	9,05%
1,2	96,09	3,91	2,04		
0,6	89,08	10,92	7,01		
0,42	83,34	16,66	5,74	AREIA MÉDIA	40,65% 21,93%
0,25	75,62	24,38	7,73		
0,15	67,16	32,84	8,46		
0,075	59,98	40,02	7,18	AREIA FINA	9,67%
0,055	57,49	42,51	2,49		
0,039	55,18	44,82	2,30		
0,028	54,03	45,97	1,15		
0,019	54,03	45,97	0,00	SILTE	11,52%
0,013	52,88	47,12	1,15		
0,010	51,73	48,27	1,15		

0,007	50,57	49,43	1,15		
0,005	49,42	50,58	1,15		
0,004	48,27	51,73	1,15		
0,003	47,12	52,88	1,15		
0,002	45,97	54,03	1,15		
0,00105	44,82	55,18	1,15		
0,00100	44,82	55,18	44,82	ARGILA	45,97%

A4. Solo do Mutange (SM) – Amostra 2

Peneiramento Grosso			
Peneira (mm)	Retido Parcial (g)	Mi -Retido acumulado(g)	Qg-Material Passado (%)
50	0,00	0,00	100,00
38	0,00	0,00	100,00
25	0,00	0,00	100,00
19	0,00	0,00	100,00
9,5	0,00	0,00	100,00
4,8	12,89	12,89	99,35
2	29,12	42,01	97,89

Peneiramento Fino			
Peneira (mm)	Retido Parcial (g)	Mi -Retido acumulado(g)	Qg-Material Passado (%)
1,2	3,53	3,53	96,16
0,6	14,04	17,57	89,26
0,42	12,70	30,27	83,01
0,25	21,27	51,54	72,56
0,15	14,65	66,19	65,36
0,075	15,09	81,28	57,94

Granulometria por Sedimentação							
Tempo decorrido (min)	Leitura Densimét. L	Temperatura (°C)	Correção Temp. Ld	Viscosidade (10 ⁻⁶ gs/cm ²)	Diâmetro (mm)	Altura de Queda (cm)	% da Amostra total
0,25	1,0320	26,0	1,00653	8,92	0,077	8,95	57,72
0,5	1,0315	26,0	1,00653	8,92	0,055	9,09	56,59
1	1,0310	26,0	1,00653	8,92	0,039	9,22	55,45
2	1,0305	26,0	1,00653	8,92	0,028	9,36	54,32
4	1,0300	26,0	1,00653	8,92	0,019	8,55	53,19
8	1,0295	26,0	1,00653	8,92	0,013	8,69	52,05
15	1,0290	26,0	1,00653	8,92	0,010	8,82	50,92
30	1,0285	26,0	1,00653	8,92	0,007	8,96	49,79
60	1,0280	26,0	1,00653	8,92	0,005	9,09	48,66
120	1,0275	26,0	1,00653	8,92	0,004	9,23	47,52
240	1,0270	26,0	1,00653	8,92	0,003	9,36	46,39
480	1,0265	26,0	1,00653	8,92	0,002	9,50	45,26
1440	1,0260	26,5	1,00651	8,82	0,001	9,63	44,17

Porcentagens Passantes e Retidas					
ACUMULADO			PARCIAL		
Diâmetro	% Passando	% Retido	% Retido	ABNT	
76	100,00	0,00	0,00	PEDREGULHO	2,11%

50	100,00	0,00	0,00			
38	100,00	0,00	0,00			
25	100,00	0,00	0,00			
19	100,00	0,00	0,00			
9,5	100,00	0,00	0,00			
4,8	99,35	0,65	0,65			
2	97,89	2,11	1,46	AREIA GROSSA		8,64%
1,2	96,16	3,84	1,74			
0,6	89,26	10,74	6,90			
0,42	83,01	16,99	6,24	AREIA MÉDIA	41,31%	23,90%
0,25	72,56	27,44	10,45			
0,15	65,36	34,64	7,20			
0,075	57,94	42,06	7,42	AREIA FINA		8,77%
0,055	56,59	43,41	1,36			
0,039	55,45	44,55	1,13			
0,028	54,32	45,68	1,13			
0,019	53,19	46,81	1,13			
0,013	52,05	47,95	1,13			
0,010	50,92	49,08	1,13	SILTE	11,33%	
0,007	49,79	50,21	1,13			
0,005	48,66	51,34	1,13			
0,004	47,52	52,48	1,13			
0,003	46,39	53,61	1,13			
0,002	45,26	54,74	1,13			
0,00104	44,17	55,83	1,09	ARGILA	45,26%	
0,00100	44,17	55,83	44,17			

A5. Mistura AR-SM (85-15) – Amostra 1

Peneiramento Grosso			
Peneira (mm)	Retido Parcial (g)	Mi -Retido acumulado(g)	Qg-Material Passado (%)
50	157,42	157,42	98,42
38	108,75	266,17	97,32
25	668,92	935,09	90,60
19	414,51	1349,6	86,43
9,5	909,22	2258,82	77,29
4,8	543,66	2802,48	71,82
2	307,7	3110,18	68,73

Peneiramento Fino			
Massa da amostra parcial úmida Mh=			
Peneira (mm)	Retido Parcial (g)	Mi -Retido acumulado(g)	Qg-Material Passado (%)
1,2	4,84	4,84	63,94
0,6	9,63	14,47	54,41
0,42	8,93	23,4	45,57
0,25	11,12	34,52	34,56
0,15	10,38	44,9	24,29
0,075	6,14	51,04	18,21

Granulometria por Sedimentação							
Tempo decorrido	Leitura Densimét.	Temperatura (°C)	Correção Temp.	Viscosidade	Diâmetro (mm)	Altura de Queda	% da Amostra total

(min)	L		Ld	(10 ⁻⁶ gs/cm ²)		(cm)	
0,25							
0,5	1,0150	27,5	1,00368	8,62	0,066	13,5	18,20
1	1,0145	27,5	1,00368	8,62	0,047	13,7	17,40
2	1,0135	27,5	1,00368	8,62	0,032	12,9	15,79
4	1,0130	27,5	1,00368	8,62	0,023	13,0	14,98
8	1,0125	27,5	1,00368	8,62	0,016	13,2	14,18
15	1,0115	27,5	1,00368	8,62	0,012	13,5	12,57
30	1,0115	27,5	1,00368	8,62	0,009	13,5	12,57
60	1,0105	27,5	1,00368	8,62	0,006	13,7	10,97
120	1,0100	28,5	1,00343	8,43	0,004	13,9	10,56
240	1,0090	28,5	1,00343	8,43	0,003	14,1	8,95
480	1,0085	28,5	1,00343	8,43	0,002	14,3	8,15
1440	1,0080	28,0	1,00355	8,52	0,001	14,4	7,15

Porcentagens Passantes e Retidas:

ACUMULADO		PARCIAL			
Diâmetro	% Passando	% Retido	% Retido	ABNT	
76	100,00	0,00	0,00		
50	98,42	1,58	1,58		
38	97,32	2,68	1,09		
25	90,60	9,40	6,73	PEDREGULHO	31,27%
19	86,43	13,57	4,17		
9,5	77,29	22,71	9,14		
4,8	71,82	28,18	5,47		
2	68,73	31,27	3,09	AREIA GROSSA	14,32%
1,2	63,94	36,06	4,79		
0,6	54,41	45,59	9,53		
0,42	45,57	54,43	8,84	AREIA MÉDIA	50,53% 30,12%
0,25	34,56	65,44	11,01		
0,15	24,29	75,71	10,27		
0,075	18,21	81,79	6,08	AREIA FINA	6,09%
0,066	18,20	81,80	0,02		
0,047	17,40	82,60	0,80		
0,032	15,79	84,21	1,61		
0,023	14,98	85,02	0,80		
0,016	14,18	85,82	0,80		
0,012	12,57	87,43	1,61	SILTE	10,05%
0,009	12,57	87,43	0,00		
0,006	10,97	89,03	1,61		
0,004	10,56	89,44	0,41		
0,003	8,95	91,05	1,61		
0,002	8,15	91,85	0,80		
0,00126	7,15	92,85	1,00	ARGILA	8,15%
0,00100	7,15	92,85	7,15		

A6. Mistura AR-SM (85-15) – Amostra 2

Peneiramento Grosso			
Peneira	Retido	Mi -Retido	Qg-Material
(mm)	Parcial (g)	acumulado(g)	Passado (%)
50	181,34	181,34	98,18
38	459,18	640,52	93,56

25	711,66	1352,18	86,41
19	591,62	1943,80	80,47
9,5	1077,77	3021,57	69,63
4,8	499,27	3520,84	64,62
2	255,25	3776,09	62,05

Peneiramento Fino			
Peneira (mm)	Retido Parcial (g)	Mi -Retido acumulado(g)	Qg-Material Passado (%)
1,2	4,40	4,401	58,12
0,6	9,63	14,031	49,51
0,42	8,62	22,651	41,81
0,25	14,86	37,511	28,53
0,15	9,87	47,381	19,71
0,075	5,09	52,471	15,17

Granulometria por Sedimentação							
Tempo decorrido (min)	Leitura Densimét. L	Temperatura (°C)	Correção Temp. Ld	Viscosidade (10 ⁻⁶ gs/cm ²)	Diâmetro (mm)	Altura de Queda (cm)	% da Amostra total
0,25							
0,5	1,0135	27,5	1,00647	8,62	0,067	14,0	10,20
1	1,0120	27,5	1,00647	8,62	0,048	14,4	8,02
2	1,0120	27,5	1,00647	8,62	0,033	13,3	8,02
4	1,0115	27,5	1,00647	8,62	0,023	13,5	7,30
8	1,0110	27,5	1,00647	8,62	0,017	13,6	6,57
15	1,0110	27,5	1,00647	8,62	0,012	13,6	6,57
30	1,0105	27,5	1,00647	8,62	0,009	13,7	5,85
60	1,0095	27,5	1,00647	8,62	0,006	14,0	4,40
120	1,0090	28,5	1,00643	8,43	0,004	14,1	3,73
240	1,0090	28,5	1,00643	8,43	0,003	14,1	3,73
480	1,0080	28,5	1,00643	8,43	0,002	14,4	2,28
1440	1,0080	28,0	1,00645	8,52	0,001	14,4	2,25

Porcentagens Passantes e Retidas:					
ACUMULADO		PARCIAL			
Diâmetro	% Passando	% Retido	% Retido	ABNT	
76	100,00	0,00	0,00		
50	98,18	1,82	1,82		
38	93,56	6,44	4,61		
25	86,41	13,59	7,15	PEDREGULHO	37,95%
19	80,47	19,53	5,95		
9,5	69,63	30,37	10,83		
4,8	64,62	35,38	5,02		
2	62,05	37,95	2,57		
1,2	58,12	41,88	3,93	AREIA GROSSA	12,54%
0,6	49,51	50,49	8,60		
0,42	41,81	58,19	7,70	AREIA MÉDIA	51,85%
0,25	28,53	71,47	13,28		29,80%
0,15	19,71	80,29	8,82		
0,075	15,17	84,83	4,55	AREIA FINA	9,52%
0,067	10,20	89,80	4,97		
0,048	8,02	91,98	2,18	SILTE	7,92%

0,033	8,02	91,98	0,00		
0,023	7,30	92,70	0,73		
0,017	6,57	93,43	0,73		
0,012	6,57	93,43	0,00		
0,009	5,85	94,15	0,73		
0,006	4,40	95,60	1,45		
0,004	3,73	96,27	0,67		
0,003	3,73	96,27	0,00		
0,002	2,28	97,72	1,45		
0,00126	2,25	97,75	0,03	ARGILA	2,28%
0,00100	2,25	97,75	2,25		

A7. Mistura AR-SM (85-15) – Amostra 3

Peneiramento Grosso			
Peneira (mm)	Retido Parcial (g)	Mi -Retido acumulado(g)	Qg-Material Passado (%)
50	170,87	170,87	98,28
38	532,50	703,37	92,93
25	533,48	1236,85	87,56
19	442,43	1679,28	83,11
9,5	989,39	2668,67	73,16
4,8	512,09	3180,76	68,01
2	272,27	3453,03	65,27

Peneiramento Fino			
Peneira (mm)	Retido Parcial (g)	Mi -Retido acumulado(g)	Qg-Material Passado (%)
1,2	2,67	2,67	62,76
0,6	11,59	14,26	51,86
0,42	8,76	23,02	43,62
0,25	11,99	35,01	32,34
0,15	11,48	46,49	21,55
0,075	5,13	51,62	16,72

Granulometria por Sedimentação							
Tempo decorrido (min)	Leitura Densimét. L	Temperatura (°C)	Correção Temp. Ld	Viscosidade (10 ⁻⁶ gs/cm ²)	Diâmetro (mm)	Altura de Queda (cm)	% da Amostra total
0,25							
0,5	1,0160	29,0	1,00641	8,34	0,064	13,3	14,65
1	1,0140	29,0	1,00641	8,34	0,046	13,8	11,59
2	1,0130	29,0	1,00641	8,34	0,032	13,0	10,06
4	1,0125	29,0	1,00641	8,34	0,023	13,2	9,30
8	1,0120	29,0	1,00641	8,34	0,016	13,3	8,54
15	1,0110	29,0	1,00641	8,34	0,012	13,6	7,01
30	1,0100	29,0	1,00641	8,34	0,008	13,9	5,48
60	1,0100	28,0	1,00645	8,52	0,006	13,9	5,42
120	1,0095	28,0	1,00645	8,52	0,004	14,0	4,66
240	1,0090	28,0	1,00645	8,52	0,003	14,1	3,89
480	1,0090	28,0	1,00645	8,52	0,002	14,1	3,89
1440	1,0090	28,0	1,00645	8,52	0,001	14,1	3,89

Porcentagens Passantes e Retidas:						
ACUMULADO			PARCIAL			
Diâmetro	% Passando	% Retido	% Retido	ABNT		
76	100,00	0,00	0,00	PEDREGULHO	34,73%	
50	98,28	1,72	1,72			
38	92,93	7,07	5,36			
25	87,56	12,44	5,37			
19	83,11	16,89	4,45			
9,5	73,16	26,84	9,95	AREIA GROSSA	13,41%	
4,8	68,01	31,99	5,15			
2	65,27	34,73	2,74			
1,2	62,76	37,24	2,51			
0,6	51,86	48,14	10,90			
0,42	43,62	56,38	8,24	AREIA MÉDIA	50,63%	30,32%
0,25	32,34	67,66	11,28			
0,15	21,55	78,45	10,80	AREIA FINA	6,90%	
0,075	16,72	83,28	4,83			
0,064	14,65	85,35	2,07			
0,046	11,59	88,41	3,05			
0,032	10,06	89,94	1,53			
0,023	9,30	90,70	0,76	SILTE	10,75%	
0,016	8,54	91,46	0,76			
0,012	7,01	92,99	1,53			
0,008	5,48	94,52	1,53			
0,006	5,42	94,58	0,06			
0,004	4,66	95,34	0,76			
0,003	3,89	96,11	0,76			
0,002	3,89	96,11	0,00			
0,00125	3,89	96,11	0,00	ARGILA	3,89%	
0,00100	3,89	96,11	3,89			

APÊNDICE B – Ensaio de Forma das Partículas

B1. Dados da realização do ensaio de forma e índice de forma das partículas de AR

Verificação da quantidade de grãos a analisar			
Peneiras	Retido (g)	(%) Retida	NBR 7809 Unidades
#37.5	1744	8,6%	50
#25	2365	11,7%	68
#19	1140	5,6%	33
#12.5	1730	8,5%	50
#9.5	790	3,9%	DESCARTE
FUNDO	12525	61,7%	-
AMOSTRA TOTAL	20294	100,00%	200

Classificação da Forma		
CLASSIFICAÇÃO	QTDA	%
CÚBICA	117	58,5%
LAMELAR	73	36,5%
ALONGADA	9	4,5%
ALONGADA-LAMELAR	1	0,5%
TOTAL	200	100,0%

Classificação dos Grãos Analisados pelo método do paquímetro							
Nº	COMP (a)	LARG (b)	ESP (c)	b/a	c/b	FORMA	Peneira
1	84,00	53,31	30,94	0,6	0,6	CÚBICA	
2	116,65	53,75	48,59	0,5	0,9	CÚBICA	
3	106,50	68,29	35,81	0,6	0,5	CÚBICA	
4	81,40	63,18	44,92	0,8	0,7	CÚBICA	
5	63,46	54,02	47,17	0,9	0,9	CÚBICA	
6	72,21	46,07	42,47	0,6	0,9	CÚBICA	
7	72,56	52,82	22,77	0,7	0,4	LAMELAR	
8	63,95	59,03	8,41	0,9	0,1	LAMELAR	
9	58,50	52,11	22,32	0,9	0,4	LAMELAR	
10	65,17	54,65	35,78	0,8	0,7	CÚBICA	
11	108,55	70,63	29,97	0,7	0,4	LAMELAR	
12	60,64	50,66	39,15	0,8	0,8	CÚBICA	
13	59,95	59,56	21,57	1,0	0,4	LAMELAR	
14	55,49	46,87	10,96	0,8	0,2	LAMELAR	
15	45,29	34,64	9,44	0,8	0,3	LAMELAR	
16	51,22	31,65	13,55	0,6	0,4	LAMELAR	
17	42,13	36,88	11,17	0,9	0,3	LAMELAR	
18	45,45	34,00	9,91	0,7	0,3	LAMELAR	
19	49,18	34,90	21,54	0,7	0,6	CÚBICA	
20	49,71	36,28	8,59	0,7	0,2	LAMELAR	
21	48,11	37,78	16,94	0,8	0,4	LAMELAR	
22	38,35	28,90	15,84	0,8	0,5	CÚBICA	

Amostras Retidas na
Peneira 37,5 mm

23	62,10	43,73	11,74	0,7	0,3	LAMELAR
24	66,67	37,40	24,28	0,6	0,6	CÚBICA
25	31,68	30,31	22,82	1,0	0,8	CÚBICA
26	33,19	29,14	18,08	0,9	0,6	CÚBICA
27	45,07	27,83	23,80	0,6	0,9	CÚBICA
28	51,34	37,65	22,92	0,7	0,6	CÚBICA
29	45,39	33,15	11,06	0,7	0,3	LAMELAR
30	65,26	33,62	6,45	0,5	0,2	LAMELAR
31	64,88	44,51	20,55	0,7	0,5	CÚBICA
32	44,55	43,84	12,20	1,0	0,3	LAMELAR
33	34,29	30,64	7,97	0,9	0,3	LAMELAR
34	38,07	40,25	24,67	1,1	0,6	CÚBICA
35	44,14	39,55	10,85	0,9	0,3	LAMELAR
36	55,52	36,98	8,46	0,7	0,2	LAMELAR
37	59,31	22,09	21,85	0,4	1,0	ALONGADA
38	45,50	33,33	9,59	0,7	0,3	LAMELAR
39	40,84	39,17	10,68	1,0	0,3	LAMELAR
40	39,74	30,72	15,36	0,8	0,5	CÚBICA
41	54,35	36,97	8,26	0,7	0,2	LAMELAR
42	42,85	34,32	7,03	0,8	0,2	LAMELAR
43	34,90	32,53	25,32	0,9	0,8	CÚBICA
44	35,15	29,00	18,43	0,8	0,6	CÚBICA
45	38,53	25,88	22,40	0,7	0,9	CÚBICA
46	46,96	39,42	12,25	0,8	0,3	LAMELAR
47	43,34	35,60	11,63	0,8	0,3	LAMELAR
48	63,68	25,27	21,33	0,4	0,8	ALONGADA
49	43,72	30,86	26,54	0,7	0,9	CÚBICA
50	35,05	34,98	8,70	1,0	0,2	LAMELAR
51	34,42	34,16	9,66	1,0	0,3	LAMELAR
52	54,90	52,40	28,00	1,0	0,5	CÚBICA
53	32,90	30,00	21,80	0,9	0,7	CÚBICA
54	42,20	35,20	10,50	0,8	0,3	LAMELAR
55	33,33	29,30	24,40	0,9	0,8	CÚBICA
56	45,50	38,80	24,70	0,9	0,6	CÚBICA
57	60,00	49,80	17,30	0,8	0,3	LAMELAR
58	38,80	35,70	21,80	0,9	0,6	CÚBICA
59	41,60	32,20	23,00	0,8	0,7	CÚBICA
60	42,90	34,50	11,90	0,8	0,3	LAMELAR
61	34,40	31,10	29,50	0,9	0,9	CÚBICA
62	46,80	32,70	12,70	0,7	0,4	LAMELAR
63	65,40	59,80	23,00	0,9	0,4	LAMELAR
64	46,10	32,20	12,60	0,7	0,4	LAMELAR
65	55,20	53,00	25,60	1,0	0,5	CÚBICA
66	42,25	33,06	9,01	0,8	0,3	LAMELAR
67	43,50	33,86	18,12	0,8	0,5	CÚBICA
68	100,30	71,04	13,18	0,7	0,2	LAMELAR

Amostras Retidas na
Peneira 25 mm

69	63,33	28,78	3,44	0,5	0,1	LAMELAR
70	38,00	29,70	21,70	0,8	0,7	CÚBICA
71	66,40	58,80	17,60	0,9	0,3	LAMELAR
72	53,70	27,40	17,00	0,5	0,6	CÚBICA
73	47,70	45,10	20,35	0,9	0,5	CÚBICA
74	41,95	37,50	18,40	0,9	0,5	CÚBICA
75	58,50	48,10	34,50	0,8	0,7	CÚBICA
76	50,20	35,50	14,10	0,7	0,4	LAMELAR
77	40,10	37,80	24,40	0,9	0,6	CÚBICA
78	40,20	28,20	12,70	0,7	0,5	CÚBICA
79	56,10	36,10	17,50	0,6	0,5	CÚBICA
80	38,40	32,60	23,00	0,8	0,7	CÚBICA
81	75,20	67,15	23,00	0,9	0,3	LAMELAR
82	54,10	47,40	32,20	0,9	0,7	CÚBICA
83	34,20	31,90	13,60	0,9	0,4	LAMELAR
84	53,30	38,20	26,70	0,7	0,7	CÚBICA
85	68,00	47,00	7,90	0,7	0,2	LAMELAR
86	65,30	62,80	10,25	1,0	0,2	LAMELAR
87	60,80	36,60	14,30	0,6	0,4	LAMELAR
88	46,20	41,60	26,20	0,9	0,6	CÚBICA
89	37,30	29,30	16,70	0,8	0,6	CÚBICA
90	72,20	36,50	32,60	0,5	0,9	CÚBICA
91	92,50	37,50	32,40	0,4	0,9	ALONGADA
92	59,80	45,90	34,90	0,8	0,8	CÚBICA
93	46,60	29,20	30,00	0,6	1,0	CÚBICA
94	49,25	36,60	27,60	0,7	0,8	CÚBICA
95*	29,10	26,70	11,20	0,9	0,4	LAMELAR
96	28,80	23,00	14,50	0,8	0,6	CÚBICA
97	39,90	21,40	14,00	0,5	0,7	CÚBICA
98	33,80	25,80	10,80	0,8	0,4	LAMELAR
99	34,90	20,70	14,10	0,6	0,7	CÚBICA
100	41,10	21,40	17,50	0,5	0,8	CÚBICA
101	29,20	28,10	17,20	1,0	0,6	CÚBICA
102	36,90	24,40	7,30	0,7	0,3	LAMELAR
103	47,50	25,60	14,50	0,5	0,6	CÚBICA
104	24,70	24,40	7,20	1,0	0,3	LAMELAR
105	38,70	25,40	16,30	0,7	0,6	CÚBICA
106	27,50	25,80	22,60	0,9	0,9	CÚBICA
107	26,30	26,20	18,80	1,0	0,7	CÚBICA
108	32,50	30,30	12,60	0,9	0,4	LAMELAR
109	32,30	29,40	9,40	0,9	0,3	LAMELAR
110	35,30	24,40	16,40	0,7	0,7	CÚBICA
111	24,30	23,50	12,30	1,0	0,5	CÚBICA
112	29,20	25,10	13,60	0,9	0,5	CÚBICA
113	27,40	25,80	15,50	0,9	0,6	CÚBICA
114	36,60	26,80	9,20	0,7	0,3	LAMELAR

115	30,30	25,40	6,80	0,8	0,3	LAMELAR	Amostras Retidas na Peneira 19 mm
116	47,80	24,10	7,20	0,5	0,3	LAMELAR	
117	37,80	23,00	16,20	0,6	0,7	CÚBICA	
118	50,52	37,95	11,77	0,8	0,3	LAMELAR	
119	46,28	19,21	11,84	0,4	0,6	ALONGADA	
120	52,85	23,16	11,00	0,4	0,5	ALONGADA	
121	75,71	30,14	11,31	0,4	0,4	ALONGADA-LAMELAR	
122	45,93	26,84	15,55	0,6	0,6	CÚBICA	
123	56,82	32,48	9,16	0,6	0,3	LAMELAR	
124	56,57	29,64	14,11	0,5	0,5	CÚBICA	
125	54,63	26,41	11,40	0,5	0,4	LAMELAR	
126	41,45	30,87	21,77	0,7	0,7	CÚBICA	
127	41,43	35,46	13,63	0,9	0,4	LAMELAR	
128	33,33	24,50	17,45	0,7	0,7	CÚBICA	
129	34,41	31,55	13,04	0,9	0,4	LAMELAR	
130	29,00	20,47	19,18	0,7	0,9	CÚBICA	
131	41,83	26,02	20,01	0,6	0,8	CÚBICA	
132	32,47	26,90	11,08	0,8	0,4	LAMELAR	
133	51,52	21,70	10,07	0,4	0,5	ALONGADA	
134	46,86	44,27	10,28	0,9	0,2	LAMELAR	Amostras Retidas na Peneira 12,5 mm
135	42,46	26,52	14,36	0,6	0,5	CÚBICA	
136	43,55	24,19	13,57	0,6	0,6	CÚBICA	
137	29,85	24,17	19,46	0,8	0,8	CÚBICA	
138	38,50	34,40	9,68	0,9	0,3	LAMELAR	
139	34,77	28,25	21,30	0,8	0,8	CÚBICA	
140	38,49	21,65	16,01	0,6	0,7	CÚBICA	
141	25,26	22,55	18,54	0,9	0,8	CÚBICA	
142	34,85	22,61	8,73	0,6	0,4	LAMELAR	
143	60,90	25,15	23,82	0,4	0,9	ALONGADA	
144	46,47	24,55	7,55	0,5	0,3	LAMELAR	
145	42,62	34,74	11,39	0,8	0,3	LAMELAR	
146	34,59	28,93	25,24	0,8	0,9	CÚBICA	
147	57,02	26,37	11,13	0,5	0,4	LAMELAR	
148	40,28	31,12	17,65	0,8	0,6	CÚBICA	
149	43,64	28,00	11,96	0,6	0,4	LAMELAR	
150	38,56	34,67	17,51	0,9	0,5	CÚBICA	
151	25,08	17,35	11,94	0,7	0,7	CÚBICA	
152	26,94	17,52	10,90	0,7	0,6	CÚBICA	
153	26,87	16,80	13,91	0,6	0,8	CÚBICA	
154	28,74	21,71	9,82	0,8	0,5	CÚBICA	
155	24,33	18,79	14,07	0,8	0,7	CÚBICA	
156	23,92	16,97	10,58	0,7	0,6	CÚBICA	
157	23,04	18,24	14,20	0,8	0,8	CÚBICA	
158	27,66	20,71	17,10	0,7	0,8	CÚBICA	
159	32,27	21,84	12,39	0,7	0,6	CÚBICA	
160	21,58	14,40	11,55	0,7	0,8	CÚBICA	

161	23,96	23,10	14,30	1,0	0,6	CÚBICA
162	21,30	17,84	11,60	0,8	0,7	CÚBICA
163	27,42	18,14	16,41	0,7	0,9	CÚBICA
164	24,23	19,93	7,83	0,8	0,4	LAMELAR
165	30,34	21,36	12,42	0,7	0,6	CÚBICA
166	36,15	16,35	8,59	0,5	0,5	CÚBICA
167	34,64	18,59	8,74	0,5	0,5	CÚBICA
168	22,66	20,79	13,03	0,9	0,6	CÚBICA
169	26,11	15,26	9,25	0,6	0,6	CÚBICA
170	36,83	20,31	14,26	0,6	0,7	CÚBICA
171	27,62	22,00	9,95	0,8	0,5	CÚBICA
172	19,09	18,11	14,50	0,9	0,8	CÚBICA
173	24,15	19,17	12,35	0,8	0,6	CÚBICA
174	25,73	16,20	15,65	0,6	1,0	CÚBICA
175	32,03	22,46	9,93	0,7	0,4	LAMELAR
176	26,12	21,57	12,49	0,8	0,6	CÚBICA
177	23,64	21,36	12,12	0,9	0,6	CÚBICA
178	26,13	14,87	12,62	0,6	0,8	CÚBICA
179	31,82	21,28	10,17	0,7	0,5	CÚBICA
180	19,57	18,48	9,16	0,9	0,5	CÚBICA
181	21,18	19,50	11,54	0,9	0,6	CÚBICA
182	23,86	18,43	11,76	0,8	0,6	CÚBICA
183	20,00	13,89	13,87	0,7	1,0	CÚBICA
184	28,13	17,31	13,07	0,6	0,8	CÚBICA
185	25,68	22,33	8,89	0,9	0,4	LAMELAR
186	34,79	18,02	13,64	0,5	0,8	CÚBICA
187	39,22	20,92	10,59	0,5	0,5	CÚBICA
188	27,40	23,18	8,60	0,8	0,4	LAMELAR
189	31,92	21,23	11,02	0,7	0,5	CÚBICA
190	40,56	21,99	8,60	0,5	0,4	LAMELAR
191	29,30	24,15	17,25	0,8	0,7	CÚBICA
192	40,47	21,08	8,42	0,5	0,4	LAMELAR
193	37,10	18,79	8,13	0,5	0,4	LAMELAR
194	37,83	21,85	10,58	0,6	0,5	CÚBICA
195	34,98	19,07	13,16	0,5	0,7	CÚBICA
196	25,92	19,70	9,23	0,8	0,5	CÚBICA
197	23,07	22,06	8,80	1,0	0,4	LAMELAR
198	36,37	19,64	11,80	0,5	0,6	CÚBICA
199	45,44	18,65	8,72	0,4	0,5	ALONGADA
200	54,80	14,42	13,41	0,3	0,9	ALONGADA

APÊNDICE C – Ensaio de Compactação

C1. Compactação do AR

Compactação Normal do AR

Peso do Cilindro + Solo Úmido (g):	7845,00	8005,00	8125,00	8270,00	8235,00	8150
Peso do Solo Úmido (g):	3670,00	3830,00	3950,00	4095,00	4060,00	3975,00
Massa Específica Aparente Úmida (g/cm³):	1,76	1,83	1,89	1,96	1,94	1,90
Cápsula:	11	13	15	17	19	21
Peso da Cápsula (g):	14,95	15,43	16,61	15,54	14,55	15,38
Peso da Cápsula + Solo Úmido (g):	121,48	109,96	125,91	125,36	108,98	129,080
Peso da Cápsula + Solo Seco (g):	114,28	101,77	114,64	112,86	97,1	112,440
Teor de Umidade (%):	7,25	9,49	11,50	12,84	14,39	17,14
Cápsula:	12	14	16	18	20	22
Peso da Cápsula (g):	15,22	15,51	15,94	14,51	15,42	27,68
Peso da Cápsula + Solo Úmido (g):	97,73	111,00	122,33	98,21	121,51	119,780
Peso da Cápsula + Solo Seco (g):	92,33	102,80	112,20	88,12	108,25	106,390
Teor de Umidade (%):	7,00	9,39	10,52	13,71	14,28	17,01
Cilindro:	3	3	3	3	3	3
Peso do Cilindro (g):	4175,00	4175,00	4175,00	4175,00	4175,00	4175,00
Volume do Cilindro (cm³):	2090,92	2090,92	2090,92	2090,92	2090,92	2090,92
Teor de Umidade Médio (%)	7,13	9,44	11,01	13,28	14,34	17,08
Massa Específica Aparente Seca (g/cm³):	1,638	1,674	1,702	1,729	1,698	1,624
Índice de Vazios	0,60	0,57	0,54	0,52	0,54	0,61
Porosidade (%)	37,51%	36,16%	35,10%	34,06%	35,23%	38,07%
Grau de Saturação (%)	31,13%	43,69%	53,39%	67,39%	69,12%	72,84%

Resumo do Ensaio

Massa Espec. Aparente Seca Máxima (g/cm³):	1,719	Umidade Ótima (%):	12,00
--	-------	--------------------	-------

Compactação Intermediária do AR

Peso do Cilindro + Solo Úmido (g):	8040,00	8175,00	8350,00	8310,00	8245,00
Peso do Solo Úmido (g):	3945,00	4080,00	4255,00	4215,00	4150,00
Massa Específica Aparente Úmida (g/cm³):	1,896	1,961	2,045	2,026	1,994
Cápsula:	23	25	27	29	31
Peso da Cápsula (g):	29,19	28,52	30,88	27,75	28,32
Peso da Cápsula + Solo Úmido (g):	84,80	84,22	94,80	92,77	95,93
Peso da Cápsula + Solo Seco (g):	80,68	79,57	88,95	85,83	87,84
Teor de Umidade (%):	8,00	9,11	10,07	11,95	13,59
Cápsula:	24	26	28	30	32
Peso da Cápsula (g):	27,37	28,77	31,19	29,20	28,83
Peso da Cápsula + Solo Úmido (g):	85,91	87,43	76,93	96,71	103,96
Peso da Cápsula + Solo Seco (g):	82,09	82,89	72,28	88,70	94,12
Teor de Umidade (%):	6,98	8,39	11,32	13,46	15,07
Cilindro:	6	6	6	6	6
Peso do Cilindro (g):	4095,00	4095,00	4095,00	4095,00	4095,00

Volume do Cilindro (cm³):	2080,75	2080,75	2080,75	2080,75	2080,75
Teor de Umidade Médio (%)	7,49	8,75	10,70	12,71	14,33
Massa Específica Aparente Seca (g/cm³):	1,764	1,803	1,847	1,797	1,744
Índice de Vazios	0,49	0,45	0,42	0,46	0,50
Porosidade (%)	32,73%	31,23%	29,54%	31,45%	33,47%
Grau de Saturação (%)	40,37%	50,51%	66,88%	72,61%	74,70%

Resumo do Ensaio

Massa Espec. Aparente Seca Máxima (g/cm³):	1,836	Umidade Ótima (%):	10,690
--	-------	--------------------	--------

C2. Compactação do SM

Compactação Normal do SM

Peso do Cilindro + Solo Úmido (g):	3655,00	3920,00	4025,00	4040,00	3900,00
Peso do Solo Úmido (g):	1605,00	1870,00	1975,00	1990,00	1850,00
Massa Específica Aparente Úmida (g/cm³):	1,600	1,864	1,968	1,983	1,844
Cápsula:	11	13	15	17	19
Peso da Cápsula (g):	27,03	30,53	19,12	28,51	13,38
Peso da Cápsula + Solo Úmido (g):	76,57	67,56	73,11	77,85	67,09
Peso da Cápsula + Solo Seco (g):	70,12	62,12	64,19	68,95	56,13
Teor de Umidade (%):	14,97	17,22	19,79	22,01	25,64
Cápsula:	12	14	16	18	20
Peso da Cápsula (g):	27,40	30,63	30,32	30,30	27,24
Peso da Cápsula + Solo Úmido (g):	74,69	83,71	90,46	82,61	76,94
Peso da Cápsula + Solo Seco (g):	68,90	75,78	80,97	73,24	66,40
Teor de Umidade (%):	13,95	17,56	18,74	21,82	26,92
Cilindro:	1	1	1	1	1
Peso do Cilindro (g):	2050,00	2050,00	2050,00	2050,00	2050,00
Volume do Cilindro (cm³):	1003,39	1003,39	1003,39	1003,39	1003,39
Teor de Umidade Médio (%)	14,46	17,39	19,26	21,91	26,28
Massa Específica Aparente Seca (g/cm³):	1,397	1,588	1,650	1,627	1,460
Índice de Vazios	0,88	0,66	0,59	0,62	0,80
Porosidade (%)	46,86%	39,64%	37,25%	38,15%	44,48%
Grau de Saturação (%)	43,12%	69,66%	85,35%	93,46%	86,25%

Resumo do Ensaio

Massa Espec. Aparente Seca Máxima (g/cm³):	1,676	Umidade Ótima (%):	20,00
--	-------	--------------------	-------

Compactação Intermediária do SM

Peso do Cilindro + Solo Úmido (g):	7980,00	8045,00	8160,00	8090,00	8085,00
Peso do Solo Úmido (g):	3800,00	3950,00	4150,00	4045,00	3915,00
Massa Específica Aparente Úmida (g/cm³):	1,810	1,901	1,984	1,906	1,879
Cápsula:	12	14	16	18	20
Peso da Cápsula (g):	16,76	16,14	30,04	15,46	28,34
Peso da Cápsula + Solo Úmido (g):	84,04	84,51	78,11	96,90	97,78
Peso da Cápsula + Solo Seco (g):	76,65	75,7	70,69	82,04	84,98

Teor de Umidade (%):	12,34	14,79	18,25	22,32	22,60
Cápsula:	13	15	17	19	21
Peso da Cápsula (g):	30,64	27,57	19,12	27,36	30,32
Peso da Cápsula + Solo Úmido (g):	97,03	78,26	95,39	94,80	93,22
Peso da Cápsula + Solo Seco (g):	89,54	72,21	82,84	82,90	81,60
Teor de Umidade (%):	12,72	13,55	19,70	21,43	22,66
Cilindro:	1	2	3	4	5
Peso do Cilindro (g):	4180,00	4095,00	4010,00	4045,00	4170,00
Volume do Cilindro (cm³):	2099,63	2077,71	2091,37	2121,69	2083,17
Teor de Umidade Médio (%)	12,53	14,17	18,97	21,87	22,63
Massa Específica Aparente Seca (g/cm³):	1,608	1,665	1,668	1,564	1,533
Índice de Vazios	0,64	0,58	0,58	0,68	0,72
Porosidade (%)	38,85%	36,69%	36,58%	40,52%	41,73%
Grau de Saturação (%)	51,87%	64,32%	86,51%	84,44%	83,11%

Resumo do Ensaio

Massa Espec. Aparente Seca Máxima (g/cm³):	1,709	Umidade Ótima (%):	16,67
--	-------	--------------------	-------

C3. Compactação do AR-SM

Compactação Normal do AR-SM

Peso do Cilindro + Solo Úmido (g):	7420,00	8005,00	7920,00	8225,00	8285,00	8310
Peso do Solo Úmido (g):	3320,00	3825,00	3905,00	4180,00	4185,00	4130,00
Massa Específica Aparente Úmida (g/cm³):	1,610	1,834	1,895	1,957	2,029	1,980
Cápsula:	1	3	5	7	9	11
Peso da Cápsula (g):	30,31	30,07	15,66	15,91	15,31	15,56
Peso da Cápsula + Solo Úmido (g):	77,26	98,94	72,94	73,22	85,64	72,660
Peso da Cápsula + Solo Seco (g):	73,76	92,65	67,17	66,41	75,48	63,800
Teor de Umidade (%):	8,06	10,05	11,20	13,49	16,89	18,37
Cápsula:	2	4	6	8	10	12
Peso da Cápsula (g):	27,22	30,33	15,46	15,44	14,95	15,19
Peso da Cápsula + Solo Úmido (g):	96,78	79,70	79,95	74,97	64,44	82,240
Peso da Cápsula + Solo Seco (g):	91,52	74,64	73,21	68,02	57,83	72,800
Teor de Umidade (%):	8,18	11,42	11,67	13,22	15,42	16,39
Cilindro:	1	2	3	4	1	2
Peso do Cilindro (g):	4100,00	4180,00	4015,00	4045,00	4100,00	4180,00
Volume do Cilindro (cm³):	2062,14	2085,77	2061,20	2135,96	2062,14	2085,77
Teor de Umidade Médio (%)	8,12	10,74	11,44	13,35	16,15	17,38
Massa Específica Aparente Seca (g/cm³):	1,489	1,656	1,700	1,726	1,747	1,687
Índice de Vazios	0,75	0,57	0,53	0,51	0,49	0,54
Porosidade (%)	42,80%	36,38%	34,69%	33,68%	32,88%	35,20%
Grau de Saturação (%)	28,25%	48,86%	56,05%	68,44%	85,82%	83,28%

Resumo do Ensaio

Massa Espec. Aparente Seca Máxima (g/cm³):	1,742	Umidade Ótima (%):	12,978
--	-------	--------------------	--------

Compactação Intermediária do AR-SM

Peso do Cilindro + Solo Úmido (g):	7880,00	7955,00	8275,00	8385,00	8455,00
Peso do Solo Úmido (g):	3700,00	3855,00	4260,00	4340,00	4240,00
Massa Específica Aparente Úmida (g/cm³):	1,778	1,922	2,040	2,073	2,041
Cápsula:	1	3	5	7	9
Peso da Cápsula (g):	26,97	28,70	31,15	12,46	14,93
Peso da Cápsula + Solo Úmido (g):	102,47	88,90	87,54	87,57	71,32
Peso da Cápsula + Solo Seco (g):	98,1	84,34	82,73	78,87	64,66
Teor de Umidade (%):	6,14	8,20	9,33	13,10	13,39
Cápsula:	2	4	6	8	10
Peso da Cápsula (g):	29,32	28,82	27,52	12,92	15,20
Peso da Cápsula + Solo Úmido (g):	106,41	92,03	68,47	69,60	72,76
Peso da Cápsula + Solo Seco (g):	101,46	87,08	64,22	62,83	65,56
Teor de Umidade (%):	6,86	8,50	11,58	13,56	14,30
Cilindro:	1	2	3	4	5
Peso do Cilindro (g):	4180,00	4100,00	4015,00	4045,00	4215,00
Volume do Cilindro (cm³):	2080,91	2005,27	2087,73	2093,15	2077,66
Teor de Umidade Médio (%)	6,50	8,35	10,45	13,33	13,84
Massa Específica Aparente Seca (g/cm³):	1,670	1,774	1,847	1,830	1,793
Índice de Vazios	0,56	0,47	0,41	0,42	0,45
Porosidade (%)	35,87%	31,84%	29,03%	29,72%	31,14%
Grau de Saturação (%)	30,27%	46,51%	66,51%	82,07%	79,70%

Resumo do Ensaio

Massa Espec. Aparente Seca Máxima (g/cm³):	1,883	Umidade Ótima (%):	11,764
--	-------	--------------------	--------

APÊNDICE D – Ensaio de Cisalhamento Direto

D1. Cisalhamento Amostras de AR

50 kPa Energia Normal - AR									
Lado (cm)	5,00	Altura (cm)	2,00	Área (cm ²)	25	Volume (cm ³)	50	Tensão Normal	50,00
Vertical (mm)	Volume (cm ³)	Variação Volume (%)	Horizontal (mm)	Deform. Específica (%)	Área corrigida (cm ²)	Anel	Carga (kgf)	Tensão Cisalhante (Kgf/cm ²)	Tensão Normal Corrigida (Kgf/cm ²)
5,00	50,00	0,0%	0,00	0,00	25,00	0,00	0,000	0,000	0,500
4,35	48,38	-3,3%	0,20	0,37	24,98	15,00	2,273	0,091	0,501
4,28	48,20	-3,6%	0,40	0,76	24,90	20,00	3,030	0,122	0,502
4,25	48,13	-3,8%	0,60	1,16	24,81	22,00	3,333	0,134	0,504
4,20	48,00	-4,0%	0,80	1,55	24,73	25,00	3,788	0,153	0,506
4,18	47,95	-4,1%	1,00	1,94	24,64	28,00	4,242	0,172	0,507
4,15	47,88	-4,3%	1,20	2,34	24,55	30,00	4,545	0,185	0,509
4,15	47,88	-4,3%	1,40	2,74	24,46	31,00	4,697	0,192	0,511
4,15	47,88	-4,3%	1,60	3,14	24,36	32,00	4,848	0,199	0,513
4,15	47,88	-4,3%	1,80	3,53	24,27	34,00	5,151	0,212	0,515
4,15	47,88	-4,3%	2,00	3,93	24,18	36,00	5,454	0,226	0,517
4,15	47,88	-4,3%	2,20	4,33	24,09	37,00	5,606	0,233	0,519
4,15	47,88	-4,3%	2,40	4,72	24,00	39,00	5,909	0,246	0,521
4,16	47,90	-4,2%	2,60	5,12	23,91	41,00	6,212	0,260	0,523
4,17	47,93	-4,2%	2,80	5,51	23,82	43,00	6,515	0,274	0,525
4,20	48,00	-4,0%	3,00	5,91	23,73	46,00	6,969	0,294	0,527
4,21	48,03	-4,0%	3,20	6,31	23,64	47,00	7,121	0,301	0,529
4,22	48,05	-3,9%	3,40	6,70	23,55	49,00	7,424	0,315	0,531
4,20	48,00	-4,0%	3,60	7,10	23,45	49,00	7,424	0,317	0,533
4,21	48,03	-4,0%	3,80	7,50	23,35	49,00	7,424	0,318	0,535
4,21	48,03	-4,0%	4,00	7,90	23,25	50,00	7,575	0,326	0,538
4,22	48,05	-3,9%	4,20	8,30	23,15	50,00	7,575	0,327	0,540
4,22	48,05	-3,9%	4,40	8,70	23,06	51,00	7,727	0,335	0,542
4,23	48,08	-3,8%	4,60	9,10	22,96	51,00	7,727	0,337	0,545
4,23	48,08	-3,8%	4,80	9,50	22,86	52,00	7,878	0,345	0,547
4,23	48,08	-3,8%	5,00	9,89	22,77	53,00	8,030	0,353	0,549
4,24	48,10	-3,8%	5,20	10,29	22,68	55,00	8,333	0,367	0,551
4,24	48,10	-3,8%	5,40	10,69	22,58	56,00	8,484	0,376	0,554
4,24	48,10	-3,8%	5,60	11,09	22,49	57,00	8,636	0,384	0,556
4,24	48,10	-3,8%	5,80	11,48	22,40	59,00	8,939	0,399	0,558
4,24	48,10	-3,8%	6,00	11,88	22,30	59,00	8,939	0,401	0,561
4,24	48,10	-3,8%	6,20	12,28	22,20	59,00	8,939	0,403	0,563
4,24	48,10	-3,8%	6,40	12,68	22,10	59,00	8,939	0,405	0,566
4,24	48,10	-3,8%	6,60	13,08	22,00	60,00	9,090	0,413	0,568
4,24	48,10	-3,8%	6,80	13,48	21,90	60,00	9,090	0,415	0,571
4,24	48,10	-3,8%	7,00	13,88	21,80	60,00	9,090	0,417	0,573

100 kPa Energia Normal - AR									
Lado (cm)	5,00	Altura (cm)	2,00	Área (cm ²)	25	Volume (cm ³)	50	Tensão Normal	100,00
Vertical (mm)	Volume (cm ³)	Variação Volume (%)	Horizontal (mm)	Deform. Específica (%)	Área corrigida (cm ²)	Anel	Carga (kgf)	Tensão Cisalhante (Kgf/cm ²)	Tensão Normal Corrigida (Kgf/cm ²)
5,000	50,00	0,0%	0,00	0,00	25,00	0,00	0,000	0,000	1,000

3,900	47,25	-5,5%	0,20	0,36	25,00	20,00	3,030	0,121	1,000
3,900	47,25	-5,5%	0,40	0,74	24,95	30,00	4,545	0,182	1,002
3,870	47,18	-5,7%	0,60	1,12	24,90	40,00	6,060	0,243	1,004
3,840	47,10	-5,8%	0,80	1,51	24,83	45,00	6,818	0,275	1,007
3,830	47,08	-5,8%	1,00	1,90	24,74	48,00	7,272	0,294	1,011
3,820	47,05	-5,9%	1,20	2,29	24,67	54,00	8,181	0,332	1,013
3,800	47,00	-6,0%	1,40	2,68	24,59	58,00	8,787	0,357	1,017
3,790	46,98	-6,1%	1,60	3,07	24,52	64,00	9,696	0,395	1,020
3,770	46,93	-6,2%	1,80	3,46	24,44	68,00	10,302	0,422	1,023
3,770	46,93	-6,2%	2,00	3,86	24,35	69,00	10,454	0,429	1,027
3,750	46,88	-6,3%	2,20	4,27	24,22	73,00	11,060	0,457	1,032
3,750	46,88	-6,3%	2,40	4,66	24,14	74,00	11,211	0,464	1,036
3,750	46,88	-6,3%	2,60	5,06	24,05	75,00	11,363	0,473	1,040
3,740	46,85	-6,3%	2,80	5,45	23,97	76,00	11,514	0,480	1,043
3,730	46,83	-6,3%	3,00	5,85	23,87	78,00	11,817	0,495	1,047
3,730	46,83	-6,3%	3,20	6,25	23,78	81,00	12,272	0,516	1,052
3,730	46,83	-6,3%	3,40	6,65	23,68	83,00	12,575	0,531	1,056
3,730	46,83	-6,3%	3,60	7,04	23,59	83,00	12,575	0,533	1,060
3,720	46,80	-6,4%	3,80	7,44	23,51	83,00	12,575	0,535	1,064
3,710	46,78	-6,5%	4,00	7,83	23,42	86,00	13,029	0,556	1,068
3,710	46,78	-6,5%	4,20	8,23	23,32	87,00	13,181	0,565	1,072
3,710	46,78	-6,5%	4,40	8,63	23,22	89,00	13,484	0,581	1,077
3,710	46,78	-6,5%	4,60	9,03	23,13	90,00	13,635	0,589	1,081
3,710	46,78	-6,5%	4,80	9,43	23,04	91,00	13,787	0,599	1,085
3,710	46,78	-6,5%	5,00	9,82	22,95	92,00	13,938	0,607	1,090
3,710	46,78	-6,5%	5,20	10,22	22,85	93,00	14,090	0,617	1,094
3,720	46,80	-6,4%	5,40	10,62	22,76	95,00	14,393	0,632	1,099
3,720	46,80	-6,4%	5,60	11,02	22,66	96,00	14,544	0,642	1,103
3,730	46,83	-6,3%	5,80	11,41	22,57	98,00	14,847	0,658	1,108
3,730	46,83	-6,3%	6,00	11,81	22,48	99,00	14,999	0,667	1,112
3,730	46,83	-6,3%	6,20	12,21	22,38	99,00	14,999	0,670	1,117
3,730	46,83	-6,3%	6,40	12,60	22,29	99,00	14,999	0,673	1,122
3,730	46,83	-6,3%	6,60	13,00	22,20	99,00	14,999	0,676	1,126
3,730	46,83	-6,3%	6,80	13,40	22,10	99,00	14,999	0,679	1,131
3,730	46,83	-6,3%	7,00	13,80	22,00	100,00	15,150	0,689	1,137

150 kPa Energia Normal - AR

Lado (cm)	5,00	Altura (cm)	2,00	Área (cm²)	25	VOLUME (cm³)	50	Tensão Normal	150,00
Vertical (mm)	VOLUME (cm³)	Variação VOLUME (%)	Horizontal (mm)	Deform. Específica (%)	Área corrigida (cm²)	Anel	Carga (kgf)	Tensão Cisalhante (Kgf/cm²)	Tensão Normal Corrigida (Kgf/cm²)
5,000	50,00	0,0%	0,00	0,00	25,00	0,00	0,000	0,000	1,500
3,400	46,00	-8,0%	0,20	0,36	25,00	20,00	3,030	0,121	1,500
3,330	45,83	-8,3%	0,40	0,73	24,98	35,00	5,303	0,212	1,502
3,200	45,50	-9,0%	0,60	1,11	24,93	45,00	6,818	0,274	1,505
3,250	45,63	-8,8%	0,80	1,50	24,86	52,00	7,878	0,317	1,508
3,200	45,50	-9,0%	1,00	1,87	24,82	64,00	9,696	0,391	1,511
3,150	45,38	-9,3%	1,20	2,26	24,75	70,00	10,605	0,428	1,515
3,100	45,25	-9,5%	1,40	2,64	24,69	78,00	11,817	0,479	1,519
3,090	45,23	-9,6%	1,60	3,03	24,63	86,00	13,029	0,529	1,523
3,080	45,20	-9,6%	1,80	3,42	24,56	91,00	13,787	0,561	1,527
3,060	45,15	-9,7%	2,00	3,81	24,49	97,00	14,696	0,600	1,532
3,040	45,10	-9,8%	2,20	4,20	24,40	100,00	15,150	0,621	1,537

3,040	45,10	-9,8%	2,40	4,59	24,33	105,00	15,908	0,654	1,542
3,030	45,08	-9,8%	2,60	4,98	24,25	110,00	16,665	0,687	1,546
3,010	45,03	-10,0%	2,80	5,37	24,18	115,00	17,423	0,721	1,551
3,000	45,00	-10,0%	3,00	5,76	24,10	120,00	18,180	0,754	1,556
3,000	45,00	-10,0%	3,20	6,16	24,01	121,00	18,332	0,764	1,562
2,990	44,98	-10,1%	3,40	6,56	23,91	122,00	18,483	0,773	1,568
2,980	44,95	-10,1%	3,60	6,95	23,83	125,00	18,938	0,795	1,574
2,980	44,95	-10,1%	3,80	7,35	23,73	125,00	18,938	0,798	1,581
2,980	44,95	-10,1%	4,00	7,75	23,63	126,00	19,089	0,808	1,587
2,970	44,93	-10,2%	4,20	8,14	23,55	130,00	19,695	0,836	1,592
2,960	44,90	-10,2%	4,40	8,54	23,46	131,00	19,847	0,846	1,599
2,970	44,93	-10,2%	4,60	8,93	23,37	133,00	20,150	0,862	1,605
2,970	44,93	-10,2%	4,80	9,33	23,28	135,00	20,453	0,879	1,611
2,980	44,95	-10,1%	5,00	9,73	23,18	136,00	20,604	0,889	1,618
2,990	44,98	-10,1%	5,20	10,13	23,08	136,00	20,604	0,893	1,625
2,990	44,98	-10,1%	5,40	10,52	22,99	138,00	20,907	0,909	1,631
2,980	44,95	-10,1%	5,60	10,92	22,90	140,00	21,210	0,926	1,638
2,980	44,95	-10,1%	5,80	11,32	22,81	141,00	21,362	0,937	1,644
2,980	44,95	-10,1%	6,00	11,72	22,71	142,00	21,513	0,947	1,651
2,980	44,95	-10,1%	6,20	12,12	22,61	142,00	21,513	0,951	1,659
2,980	44,95	-10,1%	6,40	12,51	22,52	143,00	21,665	0,962	1,666
2,980	44,95	-10,1%	6,60	12,91	22,42	144,00	21,816	0,973	1,673
2,980	44,95	-10,1%	6,80	13,31	22,33	145,00	21,968	0,984	1,680

200 kPa Energia Normal - AR

Lado (cm)	5,00	Altura (cm)	2,00	Área (cm ²)	25	Volume (cm ³)	50	Tensão Normal	200,00
Vertical (mm)	Volume (cm ³)	Variação Volume (%)	Horizontal (mm)	Deform. Específica (%)	Área corrigida (cm ²)	Anel	Carga (kgf)	Tensão Cisalhante (Kgf/cm ²)	Tensão Normal Corrigida (Kgf/cm ²)
5,000	50,00	0,0%	0,00	0,00	25,00	0,00	0,000	0,000	2,000
2,800	44,50	-11,0%	0,20	0,30	25,14	48,00	7,272	0,289	1,989
2,750	44,38	-11,3%	0,40	0,67	25,13	66,00	9,999	0,398	1,990
2,680	44,20	-11,6%	0,60	1,02	25,15	90,00	13,635	0,542	1,988
2,630	44,08	-11,9%	0,80	1,39	25,13	105,00	15,908	0,633	1,990
2,590	43,98	-12,1%	1,00	1,76	25,10	119,00	18,029	0,718	1,992
2,540	43,85	-12,3%	1,20	2,14	25,06	132,00	19,998	0,798	1,995
2,500	43,75	-12,5%	1,40	2,52	25,00	140,00	21,210	0,848	2,000
2,450	43,63	-12,8%	1,60	2,88	25,00	160,00	24,240	0,970	2,000
2,440	43,60	-12,8%	1,80	3,26	24,94	168,00	25,452	1,021	2,005
2,400	43,50	-13,0%	2,00	3,65	24,89	177,00	26,816	1,078	2,009
2,380	43,45	-13,1%	2,20	4,08	24,70	190,00	28,785	1,165	2,024
2,360	43,40	-13,2%	2,40	4,46	24,64	200,00	30,300	1,230	2,029
2,320	43,30	-13,4%	2,60	4,85	24,59	205,00	31,058	1,263	2,034
2,310	43,28	-13,5%	2,80	5,22	24,55	208,00	31,512	1,284	2,037
2,300	43,25	-13,5%	3,00	5,60	24,50	215,00	32,573	1,329	2,041
2,280	43,20	-13,6%	3,20	5,99	24,43	220,00	33,330	1,365	2,047
2,270	43,18	-13,7%	3,40	6,38	24,34	223,00	33,785	1,388	2,054
2,260	43,15	-13,7%	3,60	6,77	24,28	229,00	34,694	1,429	2,060
2,250	43,13	-13,8%	3,80	7,16	24,20	231,00	34,997	1,446	2,066
2,240	43,10	-13,8%	4,00	7,55	24,12	232,00	35,148	1,458	2,073
2,250	43,13	-13,8%	4,20	7,94	24,05	232,00	35,148	1,462	2,079
2,230	43,08	-13,9%	4,40	8,34	23,96	232,00	35,148	1,467	2,087
2,230	43,08	-13,9%	4,60	8,74	23,86	229,00	34,694	1,454	2,096

2,230	43,08	-13,9%	4,80	9,14	23,76	230,00	34,845	1,467	2,104
2,220	43,05	-13,9%	5,00	9,54	23,66	229,00	34,694	1,466	2,113
2,230	43,08	-13,9%	5,20	9,94	23,55	228,00	34,542	1,467	2,124
2,220	43,05	-13,9%	5,40	10,34	23,45	226,00	34,239	1,460	2,132
2,240	43,10	-13,8%	5,60	10,74	23,35	225,00	34,088	1,460	2,142
2,240	43,10	-13,8%	5,80	11,14	23,24	222,00	33,633	1,447	2,151
2,240	43,10	-13,8%	6,00	11,55	23,13	220,00	33,330	1,441	2,162
2,240	43,10	-13,8%	6,20	11,95	23,03	219,00	33,179	1,441	2,172
2,240	43,10	-13,8%	6,40	12,36	22,91	219,00	33,179	1,448	2,182
2,240	43,10	-13,8%	6,60	12,76	22,80	218,00	33,027	1,449	2,193
2,240	43,10	-13,8%	6,80	13,16	22,70	216,00	32,724	1,442	2,203
2,240	43,10	-13,8%	7,00	13,56	22,60	216,00	32,724	1,448	2,213

50 kPa Energia Intermediário - AR

Lado (cm)	5,00	Altura (cm)	2,00	Área (cm ²)	25	Volume (cm ³)	50	Tensão Normal	50,00
Vertical (mm)	Volume (cm ³)	Variação Volume (%)	Horizontal (mm)	Deform. Específica (%)	Área corrigida (cm ²)	Anel	Carga (kgf)	Tensão Cisalhante (Kgf/cm ²)	Tensão Normal Corrigida (Kgf/cm ²)
5,00	50,00	0,0%	0,00	0,00	25,00	0,00	0,000	0,000	0,500
4,35	48,38	-3,3%	0,20	0,36	25,00	19,00	2,879	0,115	0,500
4,28	48,20	-3,6%	0,40	0,75	24,93	25,00	3,788	0,152	0,502
4,25	48,13	-3,8%	0,60	1,14	24,84	28,00	4,242	0,171	0,503
4,20	48,00	-4,0%	0,80	1,54	24,76	32,00	4,848	0,196	0,505
4,18	47,95	-4,1%	1,00	1,93	24,68	35,00	5,303	0,215	0,507
4,15	47,88	-4,3%	1,20	2,32	24,59	38,00	5,757	0,234	0,508
4,15	47,88	-4,3%	1,40	2,72	24,50	39,00	5,909	0,241	0,510
4,15	47,88	-4,3%	1,60	3,12	24,40	40,00	6,060	0,248	0,512
4,15	47,88	-4,3%	1,80	3,51	24,32	43,00	6,515	0,268	0,514
4,15	47,88	-4,3%	2,00	3,91	24,23	45,00	6,818	0,281	0,516
4,15	47,88	-4,3%	2,20	4,31	24,14	47,00	7,121	0,295	0,518
4,15	47,88	-4,3%	2,40	4,70	24,05	49,00	7,424	0,309	0,520
4,16	47,90	-4,2%	2,60	5,10	23,96	51,00	7,727	0,323	0,522
4,17	47,93	-4,2%	2,80	5,49	23,87	54,00	8,181	0,343	0,524
4,20	48,00	-4,0%	3,00	5,88	23,79	58,00	8,787	0,369	0,525
4,21	48,03	-4,0%	3,20	6,28	23,69	58,00	8,787	0,371	0,528
4,22	48,05	-3,9%	3,40	6,68	23,60	59,00	8,939	0,379	0,530
4,20	48,00	-4,0%	3,60	7,08	23,50	60,00	9,090	0,387	0,532
4,21	48,03	-4,0%	3,80	7,48	23,40	60,00	9,090	0,388	0,534
4,21	48,03	-4,0%	4,00	7,88	23,31	61,00	9,242	0,397	0,536
4,22	48,05	-3,9%	4,20	8,28	23,21	61,00	9,242	0,398	0,539
4,22	48,05	-3,9%	4,40	8,68	23,11	62,00	9,393	0,406	0,541
4,23	48,08	-3,8%	4,60	9,08	23,01	62,00	9,393	0,408	0,543
4,23	48,08	-3,8%	4,80	9,47	22,92	63,00	9,545	0,417	0,545
4,23	48,08	-3,8%	5,00	9,87	22,82	64,00	9,696	0,425	0,548
4,24	48,10	-3,8%	5,20	10,27	22,73	66,00	9,999	0,440	0,550
4,24	48,10	-3,8%	5,40	10,66	22,64	68,00	10,302	0,455	0,552
4,24	48,10	-3,8%	5,60	11,06	22,55	69,00	10,454	0,464	0,554
4,24	48,10	-3,8%	5,80	11,46	22,45	70,00	10,605	0,472	0,557
4,24	48,10	-3,8%	6,00	11,86	22,35	70,00	10,605	0,474	0,559
4,24	48,10	-3,8%	6,20	12,26	22,26	71,00	10,757	0,483	0,562
4,24	48,10	-3,8%	6,40	12,66	22,16	72,00	10,908	0,492	0,564
4,24	48,10	-3,8%	6,60	13,05	22,07	74,00	11,211	0,508	0,566
4,24	48,10	-3,8%	6,80	13,45	21,97	74,00	11,211	0,510	0,569

4,24	48,10	-3,8%	7,00	13,85	21,87	74,00	11,211	0,513	0,572
------	-------	-------	------	-------	-------	-------	--------	-------	-------

100 kPa Energia Intermediário - AR

Lado (cm)	5,00	Altura (cm)	2,00	Área (cm²)	25	Volume (cm³)	50	Tensão Normal	100,00
Vertical (mm)	Volume (cm³)	Variação Volume (%)	Horizontal (mm)	Deform. Específica (%)	Área corrigida (cm²)	Anel	Carga (kgf)	Tensão Cisalhante (Kgf/cm²)	Tensão Normal Corrigida (Kgf/cm²)
5,000	50,00	0,0%	0,00	0,00	25,00	0,00	0,000	0,000	1,000
3,900	47,25	-5,5%	0,20	0,35	25,03	25,00	3,788	0,151	0,999
3,900	47,25	-5,5%	0,40	0,72	24,99	38,00	5,757	0,230	1,000
3,870	47,18	-5,7%	0,60	1,10	24,95	50,00	7,575	0,304	1,002
3,840	47,10	-5,8%	0,80	1,49	24,88	56,00	8,484	0,341	1,005
3,830	47,08	-5,8%	1,00	1,88	24,80	60,00	9,090	0,367	1,008
3,820	47,05	-5,9%	1,20	2,27	24,74	67,00	10,151	0,410	1,011
3,800	47,00	-6,0%	1,40	2,65	24,67	73,00	11,060	0,448	1,014
3,790	46,98	-6,1%	1,60	3,04	24,60	80,00	12,120	0,493	1,016
3,770	46,93	-6,2%	1,80	3,43	24,53	85,00	12,878	0,525	1,019
3,770	46,93	-6,2%	2,00	3,83	24,43	86,00	13,029	0,533	1,023
3,750	46,88	-6,3%	2,20	4,24	24,30	90,00	13,635	0,561	1,029
3,750	46,88	-6,3%	2,40	4,63	24,23	91,00	13,787	0,569	1,032
3,750	46,88	-6,3%	2,60	5,03	24,13	92,00	13,938	0,578	1,036
3,740	46,85	-6,3%	2,80	5,42	24,05	93,00	14,090	0,586	1,040
3,730	46,83	-6,3%	3,00	5,82	23,96	96,00	14,544	0,607	1,044
3,730	46,83	-6,3%	3,20	6,22	23,86	98,00	14,847	0,622	1,048
3,730	46,83	-6,3%	3,40	6,61	23,77	100,00	15,150	0,637	1,052
3,730	46,83	-6,3%	3,60	7,01	23,68	101,00	15,302	0,646	1,056
3,720	46,80	-6,4%	3,80	7,40	23,59	102,00	15,453	0,655	1,060
3,710	46,78	-6,5%	4,00	7,80	23,50	103,00	15,605	0,664	1,064
3,710	46,78	-6,5%	4,20	8,20	23,41	105,00	15,908	0,680	1,068
3,710	46,78	-6,5%	4,40	8,60	23,31	107,00	16,211	0,695	1,073
3,710	46,78	-6,5%	4,60	8,99	23,22	108,00	16,362	0,705	1,077
3,710	46,78	-6,5%	4,80	9,39	23,13	109,00	16,514	0,714	1,081
3,710	46,78	-6,5%	5,00	9,79	23,04	109,00	16,514	0,717	1,085
3,710	46,78	-6,5%	5,20	10,18	22,94	111,00	16,817	0,733	1,090
3,720	46,80	-6,4%	5,40	10,58	22,85	113,00	17,120	0,749	1,094
3,720	46,80	-6,4%	5,60	10,98	22,75	114,00	17,271	0,759	1,099
3,730	46,83	-6,3%	5,80	11,38	22,66	116,00	17,574	0,776	1,104
3,730	46,83	-6,3%	6,00	11,77	22,57	118,00	17,877	0,792	1,108
3,730	46,83	-6,3%	6,20	12,17	22,47	118,00	17,877	0,796	1,113
3,730	46,83	-6,3%	6,40	12,57	22,38	116,00	17,574	0,785	1,117
3,730	46,83	-6,3%	6,60	12,96	22,29	116,00	17,574	0,788	1,122
3,730	46,83	-6,3%	6,80	13,36	22,19	116,00	17,574	0,792	1,127
3,730	46,83	-6,3%	7,00	13,77	22,08	117,00	17,726	0,803	1,132

150 kPa Energia Intermediário - AR

Lado (cm)	5,00	Altura (cm)	2,00	Área (cm²)	25	Volume (cm³)	50	Tensão Normal	150,00
Vertical (mm)	Volume (cm³)	Variação Volume (%)	Horizontal (mm)	Deform. Específica (%)	Área corrigida (cm²)	Anel	Carga (kgf)	Tensão Cisalhante (Kgf/cm²)	Tensão Normal Corrigida (Kgf/cm²)
5,000	50,00	0,0%	0,00	0,00	25,00	0,00	0,000	0,000	1,500
3,400	46,00	-8,0%	0,20	0,35	25,03	26,00	3,939	0,157	1,498
3,330	45,83	-8,3%	0,40	0,71	25,03	45,00	6,818	0,272	1,499

3,200	45,50	-9,0%	0,60	1,08	24,99	58,00	8,787	0,352	1,501
3,250	45,63	-8,8%	0,80	1,47	24,93	66,00	9,999	0,401	1,504
3,200	45,50	-9,0%	1,00	1,84	24,91	82,00	12,423	0,499	1,505
3,150	45,38	-9,3%	1,20	2,22	24,84	88,00	13,332	0,537	1,510
3,100	45,25	-9,5%	1,40	2,60	24,79	98,00	14,847	0,599	1,513
3,090	45,23	-9,6%	1,60	2,98	24,74	108,00	16,362	0,661	1,516
3,080	45,20	-9,6%	1,80	3,37	24,67	114,00	17,271	0,700	1,520
3,060	45,15	-9,7%	2,00	3,76	24,61	121,00	18,332	0,745	1,524
3,040	45,10	-9,8%	2,20	4,15	24,52	124,00	18,786	0,766	1,529
3,040	45,10	-9,8%	2,40	4,54	24,45	130,00	19,695	0,806	1,534
3,030	45,08	-9,8%	2,60	4,93	24,38	136,00	20,604	0,845	1,538
3,010	45,03	-10,0%	2,80	5,31	24,32	143,00	21,665	0,891	1,542
3,000	45,00	-10,0%	3,00	5,70	24,25	149,00	22,574	0,931	1,547
3,000	45,00	-10,0%	3,20	6,10	24,15	150,00	22,725	0,941	1,553
2,990	44,98	-10,1%	3,40	6,50	24,05	150,00	22,725	0,945	1,559
2,980	44,95	-10,1%	3,60	6,89	23,97	154,00	23,331	0,973	1,564
2,980	44,95	-10,1%	3,80	7,29	23,87	154,00	23,331	0,977	1,571
2,980	44,95	-10,1%	4,00	7,69	23,78	155,00	23,483	0,988	1,577
2,970	44,93	-10,2%	4,20	8,08	23,70	160,00	24,240	1,023	1,582
2,960	44,90	-10,2%	4,40	8,48	23,61	161,00	24,392	1,033	1,589
2,970	44,93	-10,2%	4,60	8,88	23,51	162,00	24,543	1,044	1,595
2,970	44,93	-10,2%	4,80	9,27	23,43	165,00	24,998	1,067	1,601
2,980	44,95	-10,1%	5,00	9,67	23,33	166,00	25,149	1,078	1,607
2,990	44,98	-10,1%	5,20	10,07	23,23	166,00	25,149	1,083	1,614
2,990	44,98	-10,1%	5,40	10,46	23,14	168,00	25,452	1,100	1,621
2,980	44,95	-10,1%	5,60	10,86	23,06	171,00	25,907	1,124	1,627
2,980	44,95	-10,1%	5,80	11,26	22,96	171,00	25,907	1,129	1,634
2,980	44,95	-10,1%	6,00	11,66	22,86	172,00	26,058	1,140	1,640
2,980	44,95	-10,1%	7,00	13,65	22,37	173,00	26,210	1,172	1,677
2,980	44,95	-10,1%	8,00	15,65	21,87	173,00	26,210	1,199	1,715
2,980	44,95	-10,1%	9,00	17,65	21,37	173,00	26,210	1,227	1,755
2,980	44,95	-10,1%	10,00	19,65	20,87	173,00	26,210	1,256	1,797

200 kPa Energia Intermediário - AR

Lado (cm)	5,00	Altura (cm)	2,00	Área (cm²)	25	Volume (cm³)	50	Tensão Normal	200,00
Vertical (mm)	Volume (cm³)	Varição Volume (%)	Horizontal (mm)	Deform. Específica (%)	Área corrigida (cm²)	Anel	Carga (kgf)	Tensão Cisalhante (Kgf/cm²)	Tensão Normal Corrigida (Kgf/cm²)
5,000	50,00	0,0%	0,00	0,00	25,00	0,00	0,000	0,000	2,000
2,800	44,50	-11,0%	0,20	0,28	25,21	62,00	9,393	0,373	1,983
2,750	44,38	-11,3%	0,40	0,63	25,23	85,00	12,878	0,511	1,982
2,680	44,20	-11,6%	0,60	0,97	25,28	116,00	17,574	0,695	1,978
2,630	44,08	-11,9%	0,80	1,33	25,28	135,00	20,453	0,809	1,978
2,590	43,98	-12,1%	1,00	1,70	25,26	151,00	22,877	0,906	1,980
2,540	43,85	-12,3%	1,20	2,07	25,24	167,00	25,301	1,003	1,981
2,500	43,75	-12,5%	1,40	2,44	25,19	178,00	26,967	1,071	1,985
2,450	43,63	-12,8%	1,60	2,79	25,22	203,00	30,755	1,220	1,983
2,440	43,60	-12,8%	1,80	3,17	25,17	213,00	32,270	1,282	1,987
2,400	43,50	-13,0%	2,00	3,55	25,12	224,00	33,936	1,351	1,990
2,380	43,45	-13,1%	2,20	3,99	24,92	241,00	36,512	1,465	2,007
2,360	43,40	-13,2%	2,40	4,37	24,87	254,00	38,481	1,548	2,011
2,320	43,30	-13,4%	2,60	4,75	24,82	256,00	38,784	1,563	2,015
2,310	43,28	-13,5%	2,80	5,12	24,81	260,00	39,390	1,588	2,016

2,300	43,25	-13,5%	3,00	5,49	24,77	268,00	40,602	1,639	2,019
2,280	43,20	-13,6%	3,20	5,89	24,68	275,00	41,663	1,688	2,026
2,270	43,18	-13,7%	3,40	6,28	24,60	276,00	41,814	1,700	2,033
2,260	43,15	-13,7%	3,60	6,66	24,54	277,00	41,966	1,710	2,037
2,250	43,13	-13,8%	3,80	7,05	24,48	278,00	42,117	1,721	2,043
2,240	43,10	-13,8%	4,00	7,45	24,38	279,00	42,269	1,734	2,051
2,250	43,13	-13,8%	4,20	7,85	24,29	280,00	42,420	1,747	2,059
2,230	43,08	-13,9%	4,40	8,24	24,19	278,00	42,117	1,741	2,067
2,230	43,08	-13,9%	4,60	8,64	24,10	277,00	41,966	1,742	2,075
2,230	43,08	-13,9%	4,80	9,04	24,00	276,00	41,814	1,742	2,083
2,220	43,05	-13,9%	5,00	9,44	23,89	276,00	41,814	1,750	2,093
2,230	43,08	-13,9%	5,20	9,85	23,79	275,00	41,663	1,752	2,102
2,220	43,05	-13,9%	5,40	10,25	23,68	275,00	41,663	1,759	2,111
2,240	43,10	-13,8%	5,60	10,65	23,58	273,00	41,360	1,754	2,120
2,240	43,10	-13,8%	5,80	11,05	23,48	270,00	40,905	1,742	2,130
2,240	43,10	-13,8%	6,00	11,45	23,38	266,00	40,299	1,724	2,139
2,240	43,10	-13,8%	6,20	11,85	23,27	264,00	39,996	1,719	2,149
2,240	43,10	-13,8%	6,40	12,26	23,15	264,00	39,996	1,728	2,160
2,240	43,10	-13,8%	6,60	12,67	23,03	263,00	39,845	1,730	2,171
2,240	43,10	-13,8%	6,80	13,07	22,92	261,00	39,542	1,725	2,182
2,240	43,10	-13,8%	7,00	13,47	22,82	261,00	39,542	1,733	2,191

D2. Cisalhamento Amostras de SM

50 kPa Energia Normal – SM									
Lado (cm)	5,00	Altura (cm)	2,00	Área (cm²)	25	Volume (cm³)	50	Tensão Normal	50,00
Vertical (mm)	Volume (cm³)	Variação Volume (%)	Horizontal (mm)	Deform. Específica (%)	Área corrigida (cm²)	Anel	Carga (kgf)	Tensão Cisalhante (Kgf/cm²)	Tensão Normal Corrigida (Kgf/cm²)
5,00	50,00	0,0%	0,00	0,00	25,00	0,00	0,000	0,000	0,500
4,99	49,98	0,0%	0,20	0,39	24,92	4,00	0,606	0,024	0,502
4,94	49,85	-0,3%	0,40	0,78	24,86	12,00	1,818	0,073	0,503
4,91	49,78	-0,5%	0,60	1,15	24,83	25,00	3,788	0,153	0,504
4,85	49,63	-0,8%	0,80	1,53	24,77	34,00	5,151	0,208	0,505
4,82	49,55	-0,9%	1,00	1,91	24,72	44,00	6,666	0,270	0,506
4,79	49,48	-1,1%	1,20	2,31	24,64	47,00	7,121	0,289	0,507
4,78	49,45	-1,1%	1,40	2,70	24,56	52,00	7,878	0,321	0,509
4,77	49,43	-1,2%	1,60	3,09	24,48	55,00	8,333	0,340	0,511
4,77	49,43	-1,2%	1,80	3,48	24,39	58,00	8,787	0,360	0,513
4,76	49,40	-1,2%	2,00	3,88	24,31	62,00	9,393	0,386	0,514
4,75	49,38	-1,3%	2,20	4,27	24,23	65,00	9,848	0,407	0,516
4,74	49,35	-1,3%	2,40	4,67	24,14	67,00	10,151	0,421	0,518
4,74	49,35	-1,3%	2,60	5,06	24,05	70,00	10,605	0,441	0,520
4,74	49,35	-1,3%	2,80	5,45	23,97	73,00	11,060	0,461	0,522
4,74	49,35	-1,3%	3,00	5,85	23,88	75,00	11,363	0,476	0,524
4,74	49,35	-1,3%	3,20	6,25	23,78	76,00	11,514	0,484	0,526
4,74	49,35	-1,3%	3,40	6,65	23,69	77,00	11,666	0,493	0,528
4,75	49,38	-1,3%	3,60	7,04	23,59	78,00	11,817	0,501	0,530
4,76	49,40	-1,2%	3,80	7,44	23,50	79,00	11,969	0,509	0,532
4,79	49,48	-1,1%	4,00	7,84	23,40	79,00	11,969	0,512	0,534
4,80	49,50	-1,0%	4,20	8,24	23,30	79,00	11,969	0,514	0,537
4,81	49,53	-1,0%	4,40	8,64	23,20	80,00	12,120	0,522	0,539
4,82	49,55	-0,9%	4,60	9,04	23,10	80,00	12,120	0,525	0,541

4,83	49,58	-0,8%	4,80	9,44	23,00	80,00	12,120	0,527	0,543
4,84	49,60	-0,8%	5,00	9,84	22,90	80,00	12,120	0,529	0,546
4,85	49,63	-0,8%	5,20	10,24	22,81	81,00	12,272	0,538	0,548
4,87	49,68	-0,6%	5,40	10,64	22,71	81,00	12,272	0,540	0,551
4,88	49,70	-0,6%	5,60	11,04	22,61	81,00	12,272	0,543	0,553
4,90	49,75	-0,5%	5,80	11,44	22,50	80,00	12,120	0,539	0,556

100 kPa Energia Normal – SM

Lado (cm)	5,00	Altura (cm)	2,00	Área (cm²)	25	Volume (cm³)	50	Tensão Normal	100,00
Vertical (mm)	Volume (cm³)	Variação Volume (%)	Horizontal (mm)	Deform. Específica (%)	Área corrigida (cm²)	Anel	Carga (kgf)	Tensão Cisalhante (Kgf/cm²)	Tensão Normal Corrigida (Kgf/cm²)
5,000	50,00	0,0%	0,00	0,00	25,00	0,00	0,000	0,000	1,000
4,940	49,85	-0,3%	0,20	0,38	24,95	10,00	1,515	0,061	1,002
4,910	49,78	-0,5%	0,40	0,74	24,95	29,00	4,394	0,176	1,002
4,860	49,65	-0,7%	0,60	1,13	24,87	34,00	5,151	0,207	1,005
4,820	49,55	-0,9%	0,80	1,52	24,80	40,00	6,060	0,244	1,008
4,780	49,45	-1,1%	1,00	1,90	24,74	48,00	7,272	0,294	1,011
4,750	49,38	-1,3%	1,20	2,29	24,68	55,00	8,333	0,338	1,013
4,730	49,33	-1,3%	1,40	2,68	24,61	61,50	9,317	0,379	1,016
4,710	49,28	-1,5%	1,60	3,07	24,54	67,00	10,151	0,414	1,019
4,700	49,25	-1,5%	1,80	3,45	24,47	73,50	11,135	0,455	1,022
4,680	49,20	-1,6%	2,00	3,85	24,39	77,00	11,666	0,478	1,025
4,650	49,13	-1,8%	2,20	4,27	24,24	82,00	12,423	0,513	1,032
4,640	49,10	-1,8%	2,40	4,65	24,17	84,00	12,726	0,527	1,034
4,640	49,10	-1,8%	2,60	5,05	24,09	86,50	13,105	0,544	1,038
4,640	49,10	-1,8%	2,80	5,44	24,01	90,00	13,635	0,568	1,041
4,630	49,08	-1,8%	3,00	5,83	23,92	92,50	14,014	0,586	1,045
4,620	49,05	-1,9%	3,20	6,23	23,83	94,00	14,241	0,598	1,049
4,620	49,05	-1,9%	3,40	6,62	23,75	95,00	14,393	0,606	1,053
4,610	49,03	-2,0%	3,60	7,02	23,66	96,50	14,620	0,618	1,057
4,610	49,03	-2,0%	3,80	7,41	23,57	97,50	14,771	0,627	1,061
4,600	49,00	-2,0%	4,00	7,81	23,48	99,00	14,999	0,639	1,065
4,600	49,00	-2,0%	4,20	8,21	23,38	100,00	15,150	0,648	1,069
4,600	49,00	-2,0%	4,40	8,61	23,29	100,00	15,150	0,651	1,074
4,600	49,00	-2,0%	4,60	9,00	23,20	101,00	15,302	0,660	1,078
4,610	49,03	-2,0%	4,80	9,40	23,10	101,00	15,302	0,662	1,082
4,630	49,08	-1,8%	5,00	9,80	23,00	104,50	15,832	0,688	1,087
4,640	49,10	-1,8%	5,20	10,20	22,91	101,50	15,377	0,671	1,091
4,650	49,13	-1,8%	5,40	10,60	22,81	103,50	15,680	0,688	1,096
4,660	49,15	-1,7%	5,60	10,99	22,72	104,00	15,756	0,693	1,100
4,670	49,18	-1,7%	5,80	11,40	22,61	104,50	15,832	0,700	1,106
4,670	49,18	-1,7%	6,00	11,79	22,52	103,50	15,680	0,696	1,110
4,680	49,20	-1,6%	6,20	12,19	22,42	103,50	15,680	0,699	1,115
4,690	49,23	-1,6%	6,40	12,59	22,32	104,50	15,832	0,709	1,120
4,700	49,25	-1,5%	6,60	12,99	22,22	104,50	15,832	0,713	1,125
4,710	49,28	-1,5%	6,80	13,39	22,12	104,50	15,832	0,716	1,130
4,720	49,30	-1,4%	7,00	13,79	22,02	104,50	15,832	0,719	1,135

150 kPa Energia Normal – SM

Lado (cm)	5,00	Altura (cm)	2,00	Área (cm²)	25	Volume (cm³)	50	Tensão Normal	150,00
Vertical (mm)	Volume (cm³)	Variação Volume	Horizontal (mm)	Deform. Específica	Área corrigida	Anel	Carga (kgf)	Tensão Cisalhante	Tensão Normal

		(%)		(%)	(cm ²)			(Kgf/cm ²)	Corrigida (Kgf/cm ²)
5,000	50,00	0,0%	0,00	0,00	25,00	0,00	0,000	0,000	1,500
4,940	49,85	-0,3%	0,20	0,36	25,01	21,00	3,182	0,127	1,500
4,880	49,70	-0,6%	0,40	0,72	24,99	38,00	5,757	0,230	1,501
4,850	49,63	-0,8%	0,60	1,11	24,92	43,00	6,515	0,261	1,505
4,810	49,53	-1,0%	0,80	1,49	24,87	54,00	8,181	0,329	1,508
4,780	49,45	-1,1%	1,00	1,87	24,83	65,00	9,848	0,397	1,511
4,740	49,35	-1,3%	1,20	2,25	24,78	76,00	11,514	0,465	1,513
4,710	49,28	-1,5%	1,40	2,62	24,75	90,00	13,635	0,551	1,515
4,650	49,13	-1,8%	1,60	3,01	24,68	95,00	14,393	0,583	1,520
4,630	49,08	-1,8%	1,80	3,39	24,63	106,00	16,059	0,652	1,523
4,610	49,03	-2,0%	2,00	3,78	24,56	112,00	16,968	0,691	1,527
4,590	48,98	-2,1%	2,20	4,16	24,50	119,00	18,029	0,736	1,531
4,570	48,93	-2,2%	2,40	4,55	24,42	123,00	18,635	0,763	1,536
4,550	48,88	-2,3%	2,60	4,94	24,34	128,00	19,392	0,797	1,541
4,540	48,85	-2,3%	2,80	5,33	24,27	133,00	20,150	0,830	1,545
4,530	48,83	-2,3%	3,00	5,73	24,18	136,00	20,604	0,852	1,551
4,520	48,80	-2,4%	3,20	6,12	24,10	140,00	21,210	0,880	1,556
4,530	48,83	-2,3%	3,40	6,51	24,02	143,00	21,665	0,902	1,562
4,520	48,80	-2,4%	3,60	6,91	23,93	145,00	21,968	0,918	1,567
4,520	48,80	-2,4%	3,80	7,31	23,83	146,00	22,119	0,928	1,574
4,510	48,78	-2,5%	4,00	7,70	23,74	148,00	22,422	0,944	1,580
4,500	48,75	-2,5%	4,20	8,10	23,65	149,00	22,574	0,955	1,586
4,500	48,75	-2,5%	4,40	8,50	23,55	150,00	22,725	0,965	1,592
4,500	48,75	-2,5%	4,60	8,90	23,46	152,00	23,028	0,982	1,598
4,490	48,73	-2,6%	4,80	9,29	23,37	153,00	23,180	0,992	1,605
4,490	48,73	-2,6%	5,00	9,69	23,27	153,00	23,180	0,996	1,612
4,480	48,70	-2,6%	5,20	10,09	23,17	153,00	23,180	1,001	1,619
4,480	48,70	-2,6%	5,40	10,49	23,07	153,50	23,255	1,008	1,626
4,480	48,70	-2,6%	5,60	10,89	22,97	154,00	23,331	1,016	1,633
4,470	48,68	-2,7%	5,80	11,29	22,88	155,00	23,483	1,027	1,639
4,470	48,68	-2,7%	6,00	11,69	22,78	155,00	23,483	1,031	1,647
4,470	48,68	-2,7%	6,20	12,09	22,68	156,00	23,634	1,042	1,653
4,470	48,68	-2,7%	6,40	12,49	22,59	157,00	23,786	1,053	1,660
4,460	48,65	-2,7%	6,60	12,89	22,47	154,50	23,407	1,042	1,669
4,460	48,65	-2,7%	6,80	13,29	22,38	155,00	23,483	1,049	1,676
4,450	48,63	-2,8%	7,00	13,69	22,28	155,00	23,483	1,054	1,684

200 kPa Energia Normal – SM

Lado (cm)	5,00	Altura (cm)	2,00	Área (cm ²)	25	Volume (cm ³)	50	Tensão Normal	200,00
Vertical (mm)	Volume (cm ³)	Variação Volume (%)	Horizontal (mm)	Deform. Específica (%)	Área corrigida (cm ²)	Anel	Carga (kgf)	Tensão Cisalhante (Kgf/cm ²)	Tensão Normal Corrigida (Kgf/cm ²)
5,000	50,00	0,0%	0,00	0,00	25,00	0,00	0,000	0,000	2,000
4,960	49,90	-0,2%	0,20	0,36	25,01	21,00	3,182	0,127	2,000
4,930	49,83	-0,3%	0,40	0,73	24,97	34,00	5,151	0,206	2,002
4,880	49,70	-0,6%	0,60	1,10	24,95	50,00	7,575	0,304	2,004
4,790	49,48	-1,1%	0,80	1,47	24,93	65,00	9,848	0,395	2,006
4,740	49,35	-1,3%	1,00	1,84	24,89	78,00	11,817	0,475	2,009
4,700	49,25	-1,5%	1,20	2,23	24,84	87,00	13,181	0,531	2,013
4,650	49,13	-1,8%	1,40	2,61	24,79	97,00	14,696	0,593	2,017
4,620	49,05	-1,9%	1,60	2,99	24,73	106,00	16,059	0,649	2,022
4,600	49,00	-2,0%	1,80	3,37	24,68	115,00	17,423	0,706	2,026

4,580	48,95	-2,1%	2,00	3,75	24,62	123,00	18,635	0,757	2,031
4,540	48,85	-2,3%	2,20	4,19	24,43	129,00	19,544	0,800	2,047
4,540	48,85	-2,3%	2,40	4,57	24,38	135,00	20,453	0,839	2,051
4,530	48,83	-2,3%	2,60	4,95	24,32	139,00	21,059	0,866	2,056
4,520	48,80	-2,4%	2,80	5,34	24,25	143,00	21,665	0,894	2,062
4,510	48,78	-2,5%	3,00	5,73	24,18	146,00	22,119	0,915	2,068
4,500	48,75	-2,5%	3,20	6,12	24,10	149,00	22,574	0,937	2,075
4,500	48,75	-2,5%	3,40	6,51	24,02	151,00	22,877	0,953	2,082
4,480	48,70	-2,6%	3,60	6,91	23,93	155,00	23,483	0,981	2,089
4,480	48,70	-2,6%	3,80	7,30	23,85	157,00	23,786	0,998	2,097
4,490	48,73	-2,6%	4,00	7,70	23,76	159,00	24,089	1,014	2,105
4,470	48,68	-2,7%	4,20	8,09	23,68	160,00	24,240	1,024	2,112
4,460	48,65	-2,7%	4,40	8,49	23,59	163,00	24,695	1,047	2,120
4,460	48,65	-2,7%	4,60	8,88	23,50	160,00	24,240	1,032	2,128
4,460	48,65	-2,7%	4,80	9,28	23,40	162,00	24,543	1,049	2,137
4,450	48,63	-2,8%	5,00	9,67	23,32	164,00	24,846	1,066	2,145
4,440	48,60	-2,8%	5,20	10,08	23,20	175,00	26,513	1,143	2,155
4,440	48,60	-2,8%	5,40	10,48	23,11	175,00	26,513	1,147	2,164
4,450	48,63	-2,8%	5,60	10,87	23,02	175,00	26,513	1,152	2,172
4,450	48,63	-2,8%	5,80	11,25	22,98	175,00	26,513	1,154	2,176
4,440	48,60	-2,8%	6,00	11,65	22,88	175,00	26,513	1,159	2,186
4,440	48,60	-2,8%	6,20	12,05	22,78	175,00	26,513	1,164	2,195
4,430	48,58	-2,8%	6,40	12,45	22,68	175,00	26,513	1,169	2,205
4,420	48,55	-2,9%	6,60	12,85	22,58	175,00	26,513	1,174	2,215
4,410	48,53	-3,0%	6,80	13,25	22,48	175,00	26,513	1,180	2,225
4,400	48,50	-3,0%	7,00	13,65	22,38	175,00	26,513	1,185	2,235

50 kPa Energia Intermediário – SM

Lado (cm)	5,00	Altura (cm)	2,00	Área (cm²)	25	Volume (cm³)	50	Tensão Normal	50,00
Vertical (mm)	Volume (cm³)	Variação Volume (%)	Horizontal (mm)	Deform. Específica (%)	Área corrigida (cm²)	Anel	Carga (kgf)	Tensão Cisalhante (Kgf/cm²)	Tensão Normal Corrigida (Kgf/cm²)
5,000	50,00	0,0%	0,00	0,00	25,00	0,00	0,000	0,000	0,500
4,940	49,85	-0,3%	0,20	0,36	25,00	19,00	2,879	0,115	0,500
4,890	49,73	-0,5%	0,40	0,73	24,97	33,00	5,000	0,200	0,501
4,850	49,63	-0,8%	0,60	1,11	24,92	44,00	6,666	0,267	0,502
4,820	49,55	-0,9%	0,80	1,49	24,87	54,00	8,181	0,329	0,503
4,780	49,45	-1,1%	1,00	1,87	24,82	63,00	9,545	0,385	0,504
4,770	49,43	-1,2%	1,20	2,26	24,75	70,00	10,605	0,428	0,505
4,760	49,40	-1,2%	1,40	2,66	24,66	72,00	10,908	0,442	0,507
4,760	49,40	-1,2%	1,60	3,03	24,63	85,00	12,878	0,523	0,508
4,750	49,38	-1,3%	1,80	3,42	24,56	92,00	13,938	0,568	0,509
4,750	49,38	-1,3%	2,00	3,81	24,47	94,00	14,241	0,582	0,511
4,750	49,38	-1,3%	2,20	4,23	24,33	99,00	14,999	0,617	0,514
4,760	49,40	-1,2%	2,40	4,62	24,26	105,00	15,908	0,656	0,515
4,770	49,43	-1,2%	2,60	5,01	24,17	110,00	16,665	0,689	0,517
4,780	49,45	-1,1%	2,80	5,40	24,10	113,00	17,120	0,711	0,519
4,800	49,50	-1,0%	3,00	5,79	24,03	118,00	17,877	0,744	0,520
4,820	49,55	-0,9%	3,20	6,18	23,95	118,00	17,877	0,746	0,522
4,840	49,60	-0,8%	3,40	6,57	23,87	117,00	17,726	0,743	0,524
4,860	49,65	-0,7%	3,60	6,96	23,79	116,00	17,574	0,739	0,525
4,880	49,70	-0,6%	3,80	7,36	23,69	116,00	17,574	0,742	0,528
4,900	49,75	-0,5%	4,00	7,77	23,59	116,00	17,574	0,745	0,530
4,940	49,85	-0,3%	4,20	8,17	23,48	116,00	17,574	0,748	0,532

4,970	49,93	-0,2%	4,40	8,57	23,38	116,00	17,574	0,752	0,535
5,000	50,00	0,0%	4,60	8,97	23,28	116,00	17,574	0,755	0,537
5,010	50,03	0,0%	4,80	9,37	23,18	116,00	17,574	0,758	0,539
5,040	50,10	0,2%	5,00	9,77	23,08	116,00	17,574	0,761	0,542
5,050	50,13	0,3%	5,20	10,17	22,98	116,00	17,574	0,765	0,544
5,070	50,18	0,3%	5,40	10,57	22,88	116,00	17,574	0,768	0,546
5,090	50,23	0,5%	5,60	10,97	22,78	116,00	17,574	0,771	0,549
5,110	50,28	0,5%	5,80	11,37	22,68	116,00	17,574	0,775	0,551
5,120	50,30	0,6%	6,00	11,77	22,58	116,00	17,574	0,778	0,554

100 kPa Energia Intermediário – SM

Lado (cm)	5,00	Altura (cm)	2,00	Área (cm²)	25	Volume (cm³)	50	Tensão Normal	100,00
Vertical (mm)	Volume (cm³)	Variação Volume (%)	Horizontal (mm)	Deform. Específica (%)	Área corrigida (cm²)	Anel	Carga (kgf)	Tensão Cisalhante (Kgf/cm²)	Tensão Normal Corrigida (Kgf/cm²)
5,000	50,00	0,0%	0,00	0,00	25,00	0,00	0,000	0,000	1,000
4,920	49,80	-0,4%	0,20	0,36	25,01	21,00	3,182	0,127	1,000
4,870	49,68	-0,7%	0,40	0,72	25,01	41,00	6,212	0,248	1,000
4,830	49,58	-0,8%	0,60	1,08	24,99	58,00	8,787	0,352	1,000
4,780	49,45	-1,1%	0,80	1,45	24,97	73,00	11,060	0,443	1,001
4,740	49,35	-1,3%	1,00	1,83	24,92	84,00	12,726	0,511	1,003
4,700	49,25	-1,5%	1,20	2,22	24,86	91,00	13,787	0,555	1,006
4,680	49,20	-1,6%	1,40	2,59	24,83	106,00	16,059	0,647	1,007
4,650	49,13	-1,8%	1,60	2,97	24,78	115,00	17,423	0,703	1,009
4,620	49,05	-1,9%	1,80	3,35	24,72	123,00	18,635	0,754	1,012
4,610	49,03	-2,0%	2,00	3,74	24,65	129,00	19,544	0,793	1,014
4,600	49,00	-2,0%	2,20	4,12	24,48	138,00	20,907	0,854	1,021
4,580	48,95	-2,1%	2,40	4,51	24,42	145,00	21,968	0,900	1,024
4,570	48,93	-2,2%	2,60	4,90	24,35	151,00	22,877	0,940	1,027
4,570	48,93	-2,2%	2,80	5,29	24,29	156,00	23,634	0,973	1,029
4,560	48,90	-2,2%	3,00	5,69	24,23	157,00	23,786	0,982	1,032
4,560	48,90	-2,2%	3,20	6,08	24,16	158,00	23,937	0,991	1,035
4,550	48,88	-2,3%	3,40	6,48	24,08	159,00	24,089	1,000	1,038
4,550	48,88	-2,3%	3,60	6,88	23,99	159,00	24,089	1,004	1,042
4,550	48,88	-2,3%	3,80	7,28	23,89	160,00	24,240	1,015	1,046
4,550	48,88	-2,3%	4,00	7,68	23,80	160,00	24,240	1,019	1,051
4,550	48,88	-2,3%	4,20	8,08	23,70	160,00	24,240	1,023	1,055
4,550	48,88	-2,3%	4,40	8,48	23,60	160,00	24,240	1,027	1,059
4,560	48,90	-2,2%	4,60	8,88	23,50	160,00	24,240	1,031	1,064
4,580	48,95	-2,1%	4,80	9,28	23,40	160,00	24,240	1,036	1,068
4,580	48,95	-2,1%	5,00	9,68	23,30	159,00	24,089	1,034	1,073
4,590	48,98	-2,1%	5,20	10,08	23,20	159,00	24,089	1,038	1,078
4,590	48,98	-2,1%	5,40	10,48	23,10	158,00	23,937	1,036	1,082
4,590	48,98	-2,1%	5,60	10,88	23,00	158,00	23,937	1,041	1,087
4,590	48,98	-2,1%	5,80	11,29	22,90	157,00	23,786	1,039	1,092
4,590	48,98	-2,1%	6,00	11,69	22,79	157,00	23,786	1,044	1,097
4,600	49,00	-2,0%	6,20	12,09	22,69	156,00	23,634	1,042	1,102
4,600	49,00	-2,0%	6,40	12,49	22,59	155,00	23,483	1,040	1,107

150 kPa Energia Intermediário – SM

Lado (cm)	5,00	Altura (cm)	2,00	Área (cm²)	25	Volume (cm³)	50	Tensão Normal	150,00
Vertical (mm)	Volume (cm³)	Variação Volume	Horizontal (mm)	Deform. Específica	Área corrigida	Anel	Carga (kgf)	Tensão Cisalhante	Tensão Normal

		(%)		(%)	(cm ²)			(Kgf/cm ²)	Corrigida (Kgf/cm ²)
5,000	50,00	0,0%	0,00	0,00	25,00	0,00	0,000	0,000	1,500
4,850	49,63	-0,8%	0,20	0,31	25,12	44,00	6,666	0,265	1,493
4,790	49,48	-1,1%	0,40	0,67	25,12	64,00	9,696	0,386	1,493
4,730	49,33	-1,3%	0,60	1,04	25,11	81,00	12,272	0,489	1,494
4,700	49,25	-1,5%	0,80	1,40	25,09	98,00	14,847	0,592	1,495
4,650	49,13	-1,8%	1,00	1,78	25,06	112,00	16,968	0,677	1,496
4,620	49,05	-1,9%	1,20	2,15	25,03	125,00	18,938	0,757	1,499
4,620	49,05	-1,9%	1,40	2,53	24,98	135,00	20,453	0,819	1,502
4,600	49,00	-2,0%	1,60	2,91	24,93	146,00	22,119	0,887	1,504
4,580	48,95	-2,1%	1,80	3,30	24,86	151,00	22,877	0,920	1,509
4,550	48,88	-2,3%	2,00	3,68	24,79	158,00	23,937	0,966	1,513
4,540	48,85	-2,3%	2,20	4,08	24,71	162,00	24,543	0,993	1,518
4,530	48,83	-2,3%	2,40	4,47	24,64	167,00	25,301	1,027	1,522
4,520	48,80	-2,4%	2,60	4,86	24,56	171,00	25,907	1,055	1,527
4,510	48,78	-2,5%	2,80	5,25	24,47	174,00	26,361	1,077	1,532
4,500	48,75	-2,5%	3,00	5,65	24,39	177,00	26,816	1,100	1,538
4,500	48,75	-2,5%	3,20	6,04	24,30	180,00	27,270	1,122	1,543
4,500	48,75	-2,5%	3,40	6,44	24,21	182,00	27,573	1,139	1,549
4,500	48,75	-2,5%	3,60	6,83	24,12	183,00	27,725	1,150	1,555
4,510	48,78	-2,5%	3,80	7,23	24,03	185,00	28,028	1,167	1,561
4,510	48,78	-2,5%	4,00	7,62	23,94	188,00	28,482	1,190	1,566
4,520	48,80	-2,4%	4,20	8,02	23,85	189,00	28,634	1,201	1,573
4,520	48,80	-2,4%	4,40	8,42	23,75	190,00	28,785	1,212	1,579
4,530	48,83	-2,3%	4,60	8,82	23,66	192,00	29,088	1,229	1,585
4,530	48,83	-2,3%	4,80	9,21	23,58	195,00	29,543	1,253	1,591
4,530	48,83	-2,3%	5,00	9,60	23,49	198,00	29,997	1,277	1,596
4,530	48,83	-2,3%	5,20	10,00	23,40	200,00	30,300	1,295	1,603
4,530	48,83	-2,3%	5,40	10,40	23,31	201,00	30,452	1,307	1,609
4,540	48,85	-2,3%	5,60	10,79	23,22	204,00	30,906	1,331	1,615
4,540	48,85	-2,3%	5,80	11,19	23,13	206,00	31,209	1,349	1,621
4,540	48,85	-2,3%	6,00	11,58	23,04	208,00	31,512	1,368	1,628

200 kPa Energia Intermediário – SM

Lado (cm)	5,00	Altura (cm)	2,00	Área (cm ²)	25	Volume (cm ³)	50	Tensão Normal	200,00
Vertical (mm)	Volume (cm ³)	Variação Volume (%)	Horizontal (mm)	Deform. Específica (%)	Área corrigida (cm ²)	Anel	Carga (kgf)	Tensão Cisalhante (Kgf/cm ²)	Tensão Normal Corrigida (Kgf/cm ²)
5,000	50,00	0,0%	0,00	0,00	25,00	0,00	0,000	0,000	2,000
4,900	49,75	-0,5%	0,20	0,32	25,11	41,00	6,212	0,247	1,992
4,850	49,63	-0,8%	0,40	0,65	25,19	77,00	11,666	0,463	1,985
4,750	49,38	-1,3%	0,60	0,99	25,22	103,00	15,605	0,619	1,983
4,720	49,30	-1,4%	0,80	1,35	25,24	127,00	19,241	0,762	1,981
4,680	49,20	-1,6%	1,00	1,71	25,23	146,00	22,119	0,877	1,982
4,620	49,05	-1,9%	1,20	2,07	25,22	163,00	24,695	0,979	1,983
4,580	48,95	-2,1%	1,40	2,45	25,17	173,00	26,210	1,042	1,987
4,540	48,85	-2,3%	1,60	2,83	25,13	186,00	28,179	1,121	1,990
4,530	48,83	-2,3%	1,80	3,21	25,08	196,00	29,694	1,184	1,994
4,520	48,80	-2,4%	2,00	3,59	25,03	205,00	31,058	1,241	1,998
4,490	48,73	-2,6%	2,20	4,03	24,83	213,00	32,270	1,300	2,014
4,480	48,70	-2,6%	2,40	4,41	24,78	220,00	33,330	1,345	2,018
4,470	48,68	-2,7%	2,60	4,79	24,73	229,00	34,694	1,403	2,022
4,470	48,68	-2,7%	2,80	5,17	24,67	233,00	35,300	1,431	2,027

4,460	48,65	-2,7%	3,00	5,56	24,60	236,00	35,754	1,453	2,033
4,460	48,65	-2,7%	3,20	5,94	24,55	240,00	36,360	1,481	2,037
4,450	48,63	-2,8%	3,40	6,33	24,47	244,00	36,966	1,511	2,044
4,450	48,63	-2,8%	3,60	6,73	24,38	246,00	37,269	1,529	2,051
4,450	48,63	-2,8%	3,80	7,12	24,30	248,00	37,572	1,546	2,058
4,450	48,63	-2,8%	4,00	7,51	24,22	249,00	37,724	1,558	2,064
4,450	48,63	-2,8%	4,20	7,91	24,13	250,00	37,875	1,570	2,072
4,440	48,60	-2,8%	4,40	8,30	24,04	251,00	38,027	1,582	2,080
4,440	48,60	-2,8%	4,60	8,70	23,95	251,00	38,027	1,588	2,088
4,440	48,60	-2,8%	4,80	9,10	23,85	252,00	38,178	1,601	2,096
4,440	48,60	-2,8%	5,00	9,50	23,76	252,00	38,178	1,607	2,105
4,440	48,60	-2,8%	5,20	9,90	23,66	254,00	38,481	1,627	2,114
4,440	48,60	-2,8%	5,40	10,30	23,56	253,00	38,330	1,627	2,122
4,440	48,60	-2,8%	5,60	10,70	23,46	253,00	38,330	1,634	2,131
4,430	48,58	-2,8%	5,80	11,09	23,37	253,00	38,330	1,640	2,139
4,430	48,58	-2,8%	6,00	11,49	23,27	253,00	38,330	1,648	2,149

D3. Cisalhamento Amostras de AR-SM

50 kPa Energia Normal – AR-SM									
Lado (cm)	5,00	Altura (cm)	2,00	Área (cm²)	25	Volume (cm³)	50	Tensão Normal	50,00
Vertical (mm)	Volume (cm³)	Variação Volume (%)	Horizontal (mm)	Deform. Específica (%)	Área corrigida (cm²)	Anel	Carga (kgf)	Tensão Cisalhante (Kgf/cm²)	Tensão Normal Corrigida (Kgf/cm²)
5,00	50,00	0,0%	0,00	0,00	25,00	0,00	0,000	0,000	0,500
4,35	48,38	-3,3%	0,20	0,36	25,01	22,00	3,333	0,133	0,500
4,28	48,20	-3,6%	0,40	0,74	24,96	32,00	4,848	0,194	0,501
4,25	48,13	-3,8%	0,60	1,13	24,88	35,00	5,303	0,213	0,503
4,20	48,00	-4,0%	0,80	1,52	24,80	39,00	5,909	0,238	0,504
4,18	47,95	-4,1%	1,00	1,92	24,71	41,00	6,212	0,251	0,506
4,15	47,88	-4,3%	1,20	2,32	24,61	42,00	6,363	0,259	0,508
4,15	47,88	-4,3%	1,40	2,71	24,52	44,00	6,666	0,272	0,510
4,15	47,88	-4,3%	1,60	3,11	24,44	47,00	7,121	0,291	0,512
4,15	47,88	-4,3%	1,80	3,50	24,35	49,00	7,424	0,305	0,513
4,15	47,88	-4,3%	2,00	3,90	24,25	49,00	7,424	0,306	0,516
4,15	47,88	-4,3%	2,20	4,30	24,15	50,00	7,575	0,314	0,518
4,15	47,88	-4,3%	2,40	4,70	24,06	52,00	7,878	0,327	0,520
4,16	47,90	-4,2%	2,60	5,09	23,97	54,00	8,181	0,341	0,521
4,17	47,93	-4,2%	2,80	5,49	23,89	57,00	8,636	0,362	0,523
4,20	48,00	-4,0%	3,00	5,88	23,80	60,00	9,090	0,382	0,525
4,21	48,03	-4,0%	3,20	6,28	23,71	62,00	9,393	0,396	0,527
4,22	48,05	-3,9%	3,40	6,67	23,62	64,00	9,696	0,410	0,529
4,20	48,00	-4,0%	3,60	7,07	23,53	65,00	9,848	0,419	0,531
4,21	48,03	-4,0%	3,80	7,47	23,43	66,00	9,999	0,427	0,534
4,21	48,03	-4,0%	4,00	7,87	23,34	67,00	10,151	0,435	0,536
4,22	48,05	-3,9%	4,20	8,27	23,24	67,00	10,151	0,437	0,538
4,22	48,05	-3,9%	4,40	8,66	23,14	68,00	10,302	0,445	0,540
4,23	48,08	-3,8%	4,60	9,06	23,04	68,00	10,302	0,447	0,543
4,23	48,08	-3,8%	4,80	9,47	22,94	67,00	10,151	0,443	0,545
4,23	48,08	-3,8%	5,00	9,87	22,84	67,00	10,151	0,445	0,547
4,24	48,10	-3,8%	5,20	10,27	22,74	67,00	10,151	0,446	0,550
4,24	48,10	-3,8%	5,40	10,67	22,63	66,00	9,999	0,442	0,552

100 kPa Energia Normal – AR-SM

Lado (cm)	5,00	Altura (cm)	2,00	Área (cm ²)	25	Volume (cm ³)	50	Tensão Normal	100,00
Vertical (mm)	Volume (cm ³)	Variação Volume (%)	Horizontal (mm)	Deform. Específica (%)	Área corrigida (cm ²)	Anel	Carga (kgf)	Tensão Cisalhante (Kgf/cm ²)	Tensão Normal Corrigida (Kgf/cm ²)
5,000	50,00	0,0%	0,00	0,00	25,00	0,00	0,000	0,000	1,000
3,900	47,25	-5,5%	0,20	0,37	24,98	15,00	2,273	0,091	1,001
3,900	47,25	-5,5%	0,40	0,76	24,91	21,00	3,182	0,128	1,004
3,870	47,18	-5,7%	0,60	1,14	24,84	28,00	4,242	0,171	1,006
3,840	47,10	-5,8%	0,80	1,53	24,78	35,00	5,303	0,214	1,009
3,830	47,08	-5,8%	1,00	1,92	24,71	41,00	6,212	0,251	1,012
3,820	47,05	-5,9%	1,20	2,31	24,63	46,00	6,969	0,283	1,015
3,800	47,00	-6,0%	1,40	2,70	24,56	51,00	7,727	0,315	1,018
3,790	46,98	-6,1%	1,60	3,09	24,48	56,00	8,484	0,347	1,021
3,770	46,93	-6,2%	1,80	3,48	24,41	61,00	9,242	0,379	1,024
3,770	46,93	-6,2%	2,00	3,87	24,33	66,00	9,999	0,411	1,028
3,750	46,88	-6,3%	2,20	4,29	24,18	67,00	10,151	0,420	1,034
3,750	46,88	-6,3%	2,40	4,68	24,11	72,00	10,908	0,453	1,037
3,750	46,88	-6,3%	2,60	5,07	24,03	75,00	11,363	0,473	1,040
3,740	46,85	-6,3%	2,80	5,47	23,94	80,00	12,120	0,506	1,044
3,730	46,83	-6,3%	3,00	5,86	23,86	82,00	12,423	0,521	1,048
3,730	46,83	-6,3%	3,20	6,25	23,78	85,00	12,878	0,542	1,052
3,730	46,83	-6,3%	3,40	6,64	23,70	86,00	13,029	0,550	1,055
3,730	46,83	-6,3%	3,60	7,04	23,61	87,00	13,181	0,558	1,059
3,720	46,80	-6,4%	3,80	7,43	23,53	88,00	13,332	0,567	1,063
3,710	46,78	-6,5%	4,00	7,83	23,43	89,00	13,484	0,575	1,067
3,710	46,78	-6,5%	4,20	8,23	23,34	91,00	13,787	0,591	1,071
3,710	46,78	-6,5%	4,40	8,62	23,24	91,00	13,787	0,593	1,076
3,710	46,78	-6,5%	4,60	9,02	23,15	91,00	13,787	0,596	1,080
3,710	46,78	-6,5%	4,80	9,42	23,06	91,00	13,787	0,598	1,084
3,710	46,78	-6,5%	5,00	9,82	22,96	92,00	13,938	0,607	1,089
3,710	46,78	-6,5%	5,20	10,22	22,86	92,00	13,938	0,610	1,094
3,720	46,80	-6,4%	5,40	10,62	22,76	93,00	14,090	0,619	1,099
3,720	46,80	-6,4%	5,60	11,02	22,66	93,00	14,090	0,622	1,103
3,730	46,83	-6,3%	5,80	11,42	22,56	94,00	14,241	0,631	1,108
3,730	46,83	-6,3%	6,00	11,81	22,47	94,00	14,241	0,634	1,113
3,730	46,83	-6,3%	6,20	12,21	22,37	92,00	13,938	0,623	1,118
3,730	46,83	-6,3%	6,40	12,61	22,27	91,00	13,787	0,619	1,123
3,730	46,83	-6,3%	7,40	14,61	21,77	90,00	13,635	0,626	1,148
3,730	46,83	-6,3%	8,40	16,62	21,26	90,00	13,635	0,641	1,176
3,730	46,83	-6,3%	9,40	18,62	20,76	89,00	13,484	0,650	1,205

150 kPa Energia Normal – AR-SM

Lado (cm)	5,00	Altura (cm)	2,00	Área (cm ²)	25	Volume (cm ³)	50	Tensão Normal	150,00
Vertical (mm)	Volume (cm ³)	Variação Volume (%)	Horizontal (mm)	Deform. Específica (%)	Área corrigida (cm ²)	Anel	Carga (kgf)	Tensão Cisalhante (Kgf/cm ²)	Tensão Normal Corrigida (Kgf/cm ²)
5,000	50,00	0,0%	0,00	0,00	25,00	0,00	0,000	0,000	1,500
3,400	46,00	-8,0%	0,20	0,36	25,00	19,00	2,879	0,115	1,500
3,330	45,83	-8,3%	0,40	0,73	24,98	35,00	5,303	0,212	1,502
3,200	45,50	-9,0%	0,60	1,10	24,95	50,00	7,575	0,304	1,503
3,250	45,63	-8,8%	0,80	1,47	24,93	66,00	9,999	0,401	1,504

3,200	45,50	-9,0%	1,00	1,86	24,86	72,00	10,908	0,439	1,508
3,150	45,38	-9,3%	1,20	2,23	24,83	85,00	12,878	0,519	1,511
3,100	45,25	-9,5%	1,40	2,61	24,78	95,00	14,393	0,581	1,514
3,090	45,23	-9,6%	1,60	2,99	24,73	106,00	16,059	0,649	1,516
3,080	45,20	-9,6%	1,80	3,37	24,68	115,00	17,423	0,706	1,520
3,060	45,15	-9,7%	2,00	3,76	24,61	121,00	18,332	0,745	1,524
3,040	45,10	-9,8%	2,20	4,14	24,55	130,00	19,695	0,802	1,527
3,040	45,10	-9,8%	2,40	4,53	24,47	134,00	20,301	0,830	1,532
3,030	45,08	-9,8%	2,60	4,92	24,40	139,00	21,059	0,863	1,537
3,010	45,03	-10,0%	2,80	5,31	24,33	145,00	21,968	0,903	1,542
3,000	45,00	-10,0%	3,00	5,70	24,25	149,00	22,574	0,931	1,547
3,000	45,00	-10,0%	3,20	6,09	24,17	153,00	23,180	0,959	1,552
2,990	44,98	-10,1%	3,40	6,48	24,09	158,00	23,937	0,994	1,557
2,980	44,95	-10,1%	3,60	6,88	24,00	160,00	24,240	1,010	1,563
2,980	44,95	-10,1%	3,80	7,28	23,91	161,00	24,392	1,020	1,569
2,980	44,95	-10,1%	4,00	7,68	23,81	162,00	24,543	1,031	1,575
2,970	44,93	-10,2%	4,20	8,08	23,70	159,00	24,089	1,017	1,583
2,960	44,90	-10,2%	4,40	8,48	23,60	160,00	24,240	1,027	1,589
2,970	44,93	-10,2%	4,60	8,89	23,49	157,00	23,786	1,013	1,597
2,970	44,93	-10,2%	4,80	9,29	23,38	156,00	23,634	1,011	1,604
2,980	44,95	-10,1%	5,00	9,69	23,28	155,00	23,483	1,009	1,611
2,990	44,98	-10,1%	5,20	10,10	23,15	150,00	22,725	0,982	1,620
2,990	44,98	-10,1%	5,40	10,50	23,05	150,00	22,725	0,986	1,627
2,980	44,95	-10,1%	5,60	10,91	22,93	145,00	21,968	0,958	1,636
2,980	44,95	-10,1%	5,80	11,31	22,82	143,00	21,665	0,950	1,644
2,980	44,95	-10,1%	6,00	11,72	22,70	140,00	21,210	0,934	1,652
2,980	44,95	-10,1%	7,00	13,72	22,19	138,00	20,907	0,942	1,690
2,980	44,95	-10,1%	8,00	15,72	21,70	139,00	21,059	0,971	1,729
2,980	44,95	-10,1%	9,00	17,73	21,19	137,00	20,756	0,980	1,770
2,980	44,95	-10,1%	10,00	19,73	20,68	135,00	20,453	0,989	1,814

200 kPa Energia Normal – AR-SM

Lado (cm)	5,00	Altura (cm)	2,00	Área (cm ²)	25	Volume (cm ³)	50	Tensão Normal	200,00
Vertical (mm)	Volume (cm ³)	Variação Volume (%)	Horizontal (mm)	Deform. Específica (%)	Área corrigida (cm ²)	Anel	Carga (kgf)	Tensão Cisalhante (Kgf/cm ²)	Tensão Normal Corrigida (Kgf/cm ²)
5,000	50,00	0,0%	0,00	0,00	25,00	0,00	0,000	0,000	2,000
2,800	44,50	-11,0%	0,20	0,34	25,05	29,00	4,394	0,175	1,996
2,750	44,38	-11,3%	0,40	0,71	25,03	45,00	6,818	0,272	1,998
2,680	44,20	-11,6%	0,60	1,04	25,10	80,00	12,120	0,483	1,992
2,630	44,08	-11,9%	0,80	1,41	25,08	96,00	14,544	0,580	1,994
2,590	43,98	-12,1%	1,00	1,77	25,08	115,00	17,423	0,695	1,994
2,540	43,85	-12,3%	1,20	2,14	25,05	130,00	19,695	0,786	1,996
2,500	43,75	-12,5%	1,40	2,52	25,01	142,00	21,513	0,860	1,999
2,450	43,63	-12,8%	1,60	2,89	24,99	157,00	23,786	0,952	2,001
2,440	43,60	-12,8%	1,80	3,27	24,93	165,00	24,998	1,003	2,006
2,400	43,50	-13,0%	2,00	3,66	24,86	172,00	26,058	1,048	2,011
2,380	43,45	-13,1%	2,20	4,09	24,69	185,00	28,028	1,135	2,026
2,360	43,40	-13,2%	2,40	4,47	24,63	194,00	29,391	1,194	2,030
2,320	43,30	-13,4%	2,60	4,86	24,56	200,00	30,300	1,234	2,036
2,310	43,28	-13,5%	2,80	5,23	24,53	202,00	30,603	1,248	2,039
2,300	43,25	-13,5%	3,00	5,61	24,47	209,00	31,664	1,294	2,043
2,280	43,20	-13,6%	3,20	6,00	24,40	211,00	31,967	1,310	2,049

2,270	43,18	-13,7%	3,40	6,40	24,31	214,00	32,421	1,334	2,057
2,260	43,15	-13,7%	3,60	6,78	24,25	217,00	32,876	1,356	2,062
2,250	43,13	-13,8%	3,80	7,18	24,16	217,00	32,876	1,361	2,070
2,240	43,10	-13,8%	4,00	7,57	24,07	217,00	32,876	1,366	2,077
2,250	43,13	-13,8%	4,20	7,97	23,99	218,00	33,027	1,377	2,085
2,230	43,08	-13,9%	4,40	8,37	23,89	218,00	33,027	1,383	2,093
2,230	43,08	-13,9%	4,60	8,77	23,79	219,00	33,179	1,395	2,102
2,230	43,08	-13,9%	4,80	9,16	23,69	220,00	33,330	1,407	2,111
2,220	43,05	-13,9%	5,00	9,56	23,59	220,00	33,330	1,413	2,120
2,230	43,08	-13,9%	5,20	9,96	23,50	215,00	32,573	1,386	2,128
2,220	43,05	-13,9%	5,40	10,36	23,40	214,00	32,421	1,386	2,137
2,240	43,10	-13,8%	5,60	10,76	23,30	213,00	32,270	1,385	2,146
2,240	43,10	-13,8%	5,80	11,17	23,18	211,00	31,967	1,379	2,157
2,240	43,10	-13,8%	6,00	11,57	23,07	212,00	32,118	1,392	2,167
2,240	43,10	-13,8%	6,20	11,97	22,97	211,00	31,967	1,392	2,177
2,240	43,10	-13,8%	6,40	12,38	22,86	210,00	31,815	1,392	2,188
2,240	43,10	-13,8%	6,60	12,78	22,76	209,00	31,664	1,391	2,197
2,240	43,10	-13,8%	6,80	13,18	22,66	205,00	31,058	1,371	2,207
2,240	43,10	-13,8%	7,00	13,58	22,55	205,00	31,058	1,377	2,217

50 kPa Energia Intermediário – AR-SM

Lado (cm)	5,00	Altura (cm)	2,00	Área (cm²)	25	Volume (cm³)	50	Tensão Normal	50,00
Vertical (mm)	Volume (cm³)	Variação Volume (%)	Horizontal (mm)	Deform. Específica (%)	Área corrigida (cm²)	Anel	Carga (kgf)	Tensão Cisalhante (Kgf/cm²)	Tensão Normal Corrigida (Kgf/cm²)
5,00	50,00	0,0%	0,00	0,00	25,00	0,00	0,000	0,000	0,500
4,35	48,38	-3,3%	0,20	0,34	25,05	29,00	4,394	0,175	0,499
4,28	48,20	-3,6%	0,40	0,73	24,98	36,00	5,454	0,218	0,500
4,25	48,13	-3,8%	0,60	1,12	24,91	41,00	6,212	0,249	0,502
4,20	48,00	-4,0%	0,80	1,51	24,82	44,00	6,666	0,269	0,504
4,18	47,95	-4,1%	1,00	1,91	24,73	46,00	6,969	0,282	0,505
4,15	47,88	-4,3%	1,20	2,30	24,64	48,00	7,272	0,295	0,507
4,15	47,88	-4,3%	1,40	2,70	24,56	52,00	7,878	0,321	0,509
4,15	47,88	-4,3%	1,60	3,09	24,47	54,00	8,181	0,334	0,511
4,15	47,88	-4,3%	1,80	3,49	24,38	56,00	8,484	0,348	0,513
4,15	47,88	-4,3%	2,00	3,88	24,29	58,00	8,787	0,362	0,515
4,15	47,88	-4,3%	2,20	4,28	24,20	59,00	8,939	0,369	0,517
4,15	47,88	-4,3%	2,40	4,68	24,11	61,00	9,242	0,383	0,519
4,16	47,90	-4,2%	2,60	5,07	24,02	64,00	9,696	0,404	0,520
4,17	47,93	-4,2%	2,80	5,47	23,93	66,00	9,999	0,418	0,522
4,20	48,00	-4,0%	3,00	5,87	23,84	67,00	10,151	0,426	0,524
4,21	48,03	-4,0%	3,20	6,26	23,75	69,00	10,454	0,440	0,526
4,22	48,05	-3,9%	3,40	6,66	23,65	69,00	10,454	0,442	0,529
4,20	48,00	-4,0%	3,60	7,06	23,55	70,00	10,605	0,450	0,531
4,21	48,03	-4,0%	3,80	7,46	23,45	70,00	10,605	0,452	0,533
4,21	48,03	-4,0%	4,00	7,86	23,36	71,00	10,757	0,461	0,535
4,22	48,05	-3,9%	4,20	8,26	23,26	71,00	10,757	0,463	0,538
4,22	48,05	-3,9%	4,40	8,66	23,16	72,00	10,908	0,471	0,540
4,23	48,08	-3,8%	4,60	9,05	23,07	73,00	11,060	0,479	0,542
4,23	48,08	-3,8%	4,80	9,45	22,97	74,00	11,211	0,488	0,544
4,23	48,08	-3,8%	5,00	9,85	22,88	76,00	11,514	0,503	0,546
4,24	48,10	-3,8%	5,20	10,25	22,78	76,00	11,514	0,505	0,549
4,24	48,10	-3,8%	5,40	10,65	22,68	76,00	11,514	0,508	0,551

100 kPa Energia Intermediário – AR-SM

Lado (cm)	5,00	Altura (cm)	2,00	Área (cm ²)	25	Volume (cm ³)	50	Tensão Normal	100,00
Vertical (mm)	Volume (cm ³)	Variação Volume (%)	Horizontal (mm)	Deform. Específica (%)	Área corrigida (cm ²)	Anel	Carga (kgf)	Tensão Cisalhante (Kgf/cm ²)	Tensão Normal Corrigida (Kgf/cm ²)
5,000	50,00	0,0%	0,00	0,00	25,00	0,00	0,000	0,000	1,000
3,900	47,25	-5,5%	0,20	0,36	25,01	21,00	3,182	0,127	1,000
3,900	47,25	-5,5%	0,40	0,74	24,96	31,00	4,697	0,188	1,002
3,870	47,18	-5,7%	0,60	1,13	24,88	36,00	5,454	0,219	1,005
3,840	47,10	-5,8%	0,80	1,52	24,79	38,00	5,757	0,232	1,008
3,830	47,08	-5,8%	1,00	1,92	24,71	42,00	6,363	0,258	1,012
3,820	47,05	-5,9%	1,20	2,31	24,62	44,00	6,666	0,271	1,015
3,800	47,00	-6,0%	1,40	2,70	24,55	49,00	7,424	0,302	1,019
3,790	46,98	-6,1%	1,60	3,09	24,47	54,00	8,181	0,334	1,022
3,770	46,93	-6,2%	1,80	3,48	24,40	60,00	9,090	0,373	1,025
3,770	46,93	-6,2%	2,00	3,87	24,33	65,00	9,848	0,405	1,028
3,750	46,88	-6,3%	2,20	4,29	24,17	68,00	10,302	0,426	1,034
3,750	46,88	-6,3%	2,40	4,68	24,10	73,00	11,060	0,459	1,037
3,750	46,88	-6,3%	2,60	5,07	24,03	76,00	11,514	0,479	1,041
3,740	46,85	-6,3%	2,80	5,46	23,94	79,00	11,969	0,500	1,044
3,730	46,83	-6,3%	3,00	5,85	23,87	86,00	13,029	0,546	1,048
3,730	46,83	-6,3%	3,20	6,25	23,78	87,00	13,181	0,554	1,051
3,730	46,83	-6,3%	3,40	6,64	23,70	91,00	13,787	0,582	1,055
3,730	46,83	-6,3%	3,60	7,03	23,63	92,00	13,938	0,590	1,058
3,720	46,80	-6,4%	3,80	7,43	23,54	96,00	14,544	0,618	1,062
3,710	46,78	-6,5%	4,00	7,82	23,46	102,00	15,453	0,659	1,066
3,710	46,78	-6,5%	4,20	8,22	23,36	104,00	15,756	0,674	1,070
3,710	46,78	-6,5%	4,40	8,61	23,28	108,00	16,362	0,703	1,074
3,710	46,78	-6,5%	4,60	9,00	23,21	108,00	16,362	0,705	1,077
3,710	46,78	-6,5%	4,80	9,39	23,12	109,00	16,514	0,714	1,081
3,710	46,78	-6,5%	5,00	9,78	23,04	114,00	17,271	0,750	1,085
3,710	46,78	-6,5%	5,20	10,18	22,94	116,00	17,574	0,766	1,090
3,720	46,80	-6,4%	5,40	10,58	22,85	114,00	17,271	0,756	1,094
3,720	46,80	-6,4%	5,60	10,97	22,77	112,00	16,968	0,745	1,098
3,730	46,83	-6,3%	5,80	11,37	22,68	110,00	16,665	0,735	1,102
3,730	46,83	-6,3%	6,00	11,77	22,57	108,00	16,362	0,725	1,108
3,730	46,83	-6,3%	6,20	12,18	22,46	105,00	15,908	0,708	1,113
3,730	46,83	-6,3%	6,40	12,58	22,35	104,00	15,756	0,705	1,119

150 kPa Energia Intermediário – AR-SM

Lado (cm)	5,00	Altura (cm)	2,00	Área (cm ²)	25	Volume (cm ³)	50	Tensão Normal	150,00
Vertical (mm)	Volume (cm ³)	Variação Volume (%)	Horizontal (mm)	Deform. Específica (%)	Área corrigida (cm ²)	Anel	Carga (kgf)	Tensão Cisalhante (Kgf/cm ²)	Tensão Normal Corrigida (Kgf/cm ²)
5,000	50,00	0,0%	0,00	0,00	25,00	0,00	0,000	0,000	1,500
3,400	46,00	-8,0%	0,20	0,33	25,08	35,00	5,303	0,211	1,496
3,330	45,83	-8,3%	0,40	0,71	25,03	45,00	6,818	0,272	1,499
3,200	45,50	-9,0%	0,60	1,06	25,05	69,00	10,454	0,417	1,497
3,250	45,63	-8,8%	0,80	1,44	24,99	78,00	11,817	0,473	1,501
3,200	45,50	-9,0%	1,00	1,83	24,93	85,00	12,878	0,517	1,505
3,150	45,38	-9,3%	1,20	2,21	24,88	95,00	14,393	0,579	1,508

3,100	45,25	-9,5%	1,40	2,59	24,83	106,00	16,059	0,647	1,510
3,090	45,23	-9,6%	1,60	2,97	24,78	115,00	17,423	0,703	1,514
3,080	45,20	-9,6%	1,80	3,35	24,72	124,00	18,786	0,760	1,517
3,060	45,15	-9,7%	2,00	3,72	24,71	142,00	21,513	0,871	1,518
3,040	45,10	-9,8%	2,20	4,09	24,68	155,00	23,483	0,952	1,520
3,040	45,10	-9,8%	2,40	4,49	24,59	157,00	23,786	0,967	1,525
3,030	45,08	-9,8%	2,60	4,88	24,50	159,00	24,089	0,983	1,531
3,010	45,03	-10,0%	2,80	5,27	24,44	167,00	25,301	1,035	1,535
3,000	45,00	-10,0%	3,00	5,65	24,38	176,00	26,664	1,094	1,538
3,000	45,00	-10,0%	3,20	6,02	24,35	189,00	28,634	1,176	1,540
2,990	44,98	-10,1%	3,40	6,42	24,25	190,00	28,785	1,187	1,546
2,980	44,95	-10,1%	3,60	6,82	24,16	192,00	29,088	1,204	1,552
2,980	44,95	-10,1%	3,80	7,21	24,07	193,00	29,240	1,215	1,558
2,980	44,95	-10,1%	4,00	7,61	23,97	193,00	29,240	1,220	1,565
2,970	44,93	-10,2%	4,20	8,02	23,86	192,00	29,088	1,219	1,572
2,960	44,90	-10,2%	4,40	8,42	23,76	191,00	28,937	1,218	1,579
2,970	44,93	-10,2%	4,60	8,82	23,65	190,00	28,785	1,217	1,586
2,970	44,93	-10,2%	4,80	9,22	23,54	188,00	28,482	1,210	1,593
2,980	44,95	-10,1%	5,00	9,63	23,44	187,00	28,331	1,209	1,600
2,990	44,98	-10,1%	5,20	10,03	23,33	185,00	28,028	1,202	1,608
2,990	44,98	-10,1%	5,40	10,43	23,22	183,00	27,725	1,194	1,615
2,980	44,95	-10,1%	5,60	10,84	23,11	181,00	27,422	1,187	1,623
2,980	44,95	-10,1%	5,80	11,24	23,00	179,00	27,119	1,179	1,631
2,980	44,95	-10,1%	6,00	11,65	22,88	175,00	26,513	1,159	1,639

200 kPa Energia Intermediário – AR-SM

Lado (cm)	5,00	Altura (cm)	2,00	Área (cm²)	25	Volume (cm³)	50	Tensão Normal	200,00
Vertical (mm)	Volume (cm³)	Variação Volume (%)	Horizontal (mm)	Deform. Específica (%)	Área corrigida (cm²)	Anel	Carga (kgf)	Tensão Cisalhante (Kgf/cm²)	Tensão Normal Corrigida (Kgf/cm²)
5,000	50,00	0,0%	0,00	0,00	25,00	0,00	0,000	0,000	2,000
2,800	44,50	-11,0%	0,20	0,32	25,11	42,00	6,363	0,253	1,991
2,750	44,38	-11,3%	0,40	0,68	25,10	60,00	9,090	0,362	1,992
2,680	44,20	-11,6%	0,60	1,04	25,09	78,00	11,817	0,471	1,993
2,630	44,08	-11,9%	0,80	1,43	25,02	84,00	12,726	0,509	1,998
2,590	43,98	-12,1%	1,00	1,81	24,98	96,00	14,544	0,582	2,002
2,540	43,85	-12,3%	1,20	2,21	24,88	96,00	14,544	0,585	2,010
2,500	43,75	-12,5%	1,40	2,59	24,82	104,00	15,756	0,635	2,015
2,450	43,63	-12,8%	1,60	2,99	24,74	107,00	16,211	0,655	2,021
2,440	43,60	-12,8%	1,80	3,38	24,66	112,00	16,968	0,688	2,028
2,400	43,50	-13,0%	2,00	3,76	24,60	119,00	18,029	0,733	2,033
2,380	43,45	-13,1%	2,20	4,19	24,44	135,00	20,453	0,837	2,046
2,360	43,40	-13,2%	2,40	4,58	24,36	147,00	22,271	0,914	2,053
2,320	43,30	-13,4%	2,60	4,96	24,30	160,00	24,240	0,998	2,058
2,310	43,28	-13,5%	2,80	5,33	24,28	172,00	26,058	1,073	2,060
2,300	43,25	-13,5%	3,00	5,71	24,24	182,00	27,573	1,138	2,063
2,280	43,20	-13,6%	3,20	6,08	24,20	189,00	28,634	1,183	2,066
2,270	43,18	-13,7%	3,40	6,46	24,16	197,00	29,846	1,235	2,070
2,260	43,15	-13,7%	3,60	6,84	24,11	202,00	30,603	1,269	2,074
2,250	43,13	-13,8%	3,80	7,22	24,05	210,00	31,815	1,323	2,079
2,240	43,10	-13,8%	4,00	7,61	23,99	218,00	33,027	1,377	2,085
2,250	43,13	-13,8%	4,20	8,00	23,91	224,00	33,936	1,419	2,091
2,230	43,08	-13,9%	4,40	8,38	23,85	229,00	34,694	1,455	2,096

2,230	43,08	-13,9%	4,60	8,76	23,79	234,00	35,451	1,490	2,102
2,230	43,08	-13,9%	4,80	9,15	23,72	236,00	35,754	1,507	2,108
2,220	43,05	-13,9%	5,00	9,54	23,65	241,00	36,512	1,544	2,115
2,230	43,08	-13,9%	5,20	9,93	23,57	244,00	36,966	1,568	2,121
2,220	43,05	-13,9%	5,40	10,33	23,48	245,00	37,118	1,581	2,129
2,240	43,10	-13,8%	5,60	10,72	23,41	249,00	37,724	1,612	2,136
2,240	43,10	-13,8%	5,80	11,11	23,32	254,00	38,481	1,650	2,144
2,240	43,10	-13,8%	6,00	11,51	23,23	255,00	38,633	1,663	2,153

APÊNDICE E – Ensaio de CBR e Expansão Máxima

E1. CBR e Expansão Máxima – Amostra AR

CBR Energia Normal – AR

IDENTIFICAÇÃO										
Procedência	AMOSTRA AR									
Solicitante	BRASKEM		Localização		área de demolição			Profundidade (cm)		
MOLDAGEM DO CORPO DE PROVA										
Molde nº	h (cm) =	11,5	Ø (cm) =	15,21	Vol.cilindro (cm³)	2089,52	P cilindro (g)	4175	Peso bruto úmido (g)	8120
Densidade seca máxima (g/cm³)		1,719		umidade ótima		12,00%		Densidade úmida de moldagem (g/cm³)		1,888
Densidade aparente seca (g/cm³)		1,700		Variação entre calculado e ensaiado		-1,10%		umidade de moldagem		11,07%
								Variação entre calculado e ensaiado		-7,74%
DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE DE MOLDAGEM										
Cap	Pbu	Pbs	Pcap	Pag	Pss	Umidade	Média		Fator de correção	
4	88,09	81,52	26,16	6,57	55,36	11,9%	11,07%		0,90035	
99	88,05	81,31	15,67	6,74	65,64	10,3%				
EXPANSÃO										
Tempo (dias)	Data	Hora	leitura do Extensômetro (mm)		Diferença de leitura (mm)		Altura do CP (mm)		expansão (%)	
Início	27/4/2023		5,000		0,000		115,000		0,000%	
1	28/4/2023		5,030		0,030		115,030		0,026%	
2	29/4/2023		5,040		0,040		115,040		0,035%	
3	30/4/2023		5,040		0,040		115,040		0,035%	
4	1/5/2023		5,040		0,040		115,040		0,035%	

Penetração x Tensão

Tempo (min)	Penetração (mm)	Leitura (µm)	Carga (N)	Pressão (MPa)
0,50	0,63	16,00	440,58	0,22
1,00	1,27	37,00	1018,83	0,52
1,50	1,90	60,00	1652,16	0,84
2,00	2,54	84,00	2313,02	1,18
2,50	3,17	100,00	2753,60	1,40
3,00	3,81	117,00	3221,71	1,64
3,50	4,44	135,00	3717,36	1,89
4,00	5,08	150,00	4130,40	2,10
5,00	6,35	178,00	4901,41	2,50
6,00	7,62	198,00	5452,13	2,78
7,00	8,89	210,00	5782,56	2,95
8,00	10,16	240,00	6608,64	3,37
9,00	11,43	260,00	7159,36	3,65
10,00	12,70	275,00	7572,40	3,86

Coefficiente de correção da curva	0,00
Constante do anel (N/µm)	27,536
Área do pistão (mm²)	1963,50

Penetração (mm)	Pressão (MPa)			CBR (%)
	Calculada	Corrigida	Padrão	
2,54	1,178	1,178	6,90	17,07
5,08	2,104	2,104	10,35	20,32

CBR Energia Intermediário – AR

IDENTIFICAÇÃO										
Procedência	AMOSTRA AR									
Solicitante	BRASKEM		Localização		Área de demolição			Profundidade (cm)		
MOLDAGEM DO CORPO DE PROVA										
Molde nº	h (cm) =	11,5	Ø (cm) =	15,21	Vol.cilindro (cm³)	2089,52	P cilindro (g)	4175	Peso bruto úmido (g)	8405
Densidade seca máxima (g/cm³)		1,836		umidade ótima		10,69%		Densidade úmida de moldagem (g/cm³)		2,024
Densidade aparente seca (g/cm³)		1,828		Variação entre calculado e ensaiado		-0,43%		umidade de moldagem		10,76%
								Variação entre calculado e ensaiado		0,61%
DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE DE MOLDAGEM										
Cap	Pbu	Pbs	Pcap	Pag	Pss	Umidade	Média		Fator de correção	
1	92,6	86,22	28,53	6,38	57,69	11,1%	10,76%		0,90287	
119	110,72	101,65	14,92	9,07	86,73	10,5%				
EXPANSÃO										
Tempo (dias)	Data	Hora	leitura do Extensômetro (mm)		Diferença de leitura (mm)		Altura do CP (mm)		expansão (%)	
Início	11/7/2023		5,000		0,000		115,000		0,000%	
1	12/7/2023		5,020		0,020		115,020		0,017%	
2	13/7/2023		5,020		0,020		115,020		0,017%	
3	14/7/2023		5,020		0,020		115,020		0,017%	
4	15/7/2023		5,030		0,030		115,030		0,026%	

Penetração x Tensão

Tempo (min)	Penetração (mm)	Leitura (µm)	Carga (N)	Pressão (MPa)
0,50	0,63	5,00	137,68	0,07
1,00	1,27	25,00	688,40	0,35
1,50	1,9	49,00	1349,26	0,69
2,00	2,54	74,00	2037,66	1,04
2,50	3,17	110,00	3028,96	1,54
3,00	3,81	165,00	4543,44	2,31
3,50	4,44	205,00	5644,88	2,87
4,00	5,08	247,00	6801,39	3,46
5,00	6,35	320,00	8811,52	4,49
6,00	7,62	383,00	10546,29	5,37
7,00	8,89	435,00	11978,16	6,10
8,00	10,16	475,00	13079,60	6,66
9,00	11,43	510,00	14043,36	7,15
10,00	12,7	545,00	15007,12	7,64

Coeficiente de correção da curva	1,05
Constante do anel (N/µm)	27,536
Área do pistão (mm²)	1963,50

Penetração (mm)	Pressão (MPa)			CBR (%)
	Calculada	Corrigida	Padrão	
2,54	1,038	2,091	6,90	30,31
5,08	3,464	4,160	10,35	40,20

E2. CBR e Expansão Máxima – Amostra SM

CBR Energia Normal – SM

IDENTIFICAÇÃO											
Procedência	AMOSTRA SM										
Solicitante	BRASKEM		Localização		área de demolição			Profundidade (cm)			
MOLDAGEM DO CORPO DE PROVA											
Molde n°	h (cm) =	11,5	Ø (cm) =	15,21	Vol.cilindro (cm³)	2087,25	P cilindro (g)	4035	Peso bruto úmido (g)	8175	
Densidade seca máxima (g/cm³)		1,652		umidade ótima		20,72%	Densidade úmida de moldagem (g/cm³)			1,983	
Densidade aparente seca (g/cm³)		1,641		Variação entre calculado e ensaiado		-0,69%	umidade de moldagem		20,89%	Variação entre calculado e ensaiado	0,80%
DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE DE MOLDAGEM											
Cap	Pbu	Pbs	Pcap	Pag	Pss	Umidade	Média		Fator de correção		
4	75,05	67,24	30,06	7,81	37,18	21,0%	20,89%		0,82722		
99	74,75	67,06	30,03	7,69	37,03	20,8%					
EXPANSÃO											
Tempo (dias)	Data	Hora	leitura do Extensômetro (mm)	Diferença de leitura (mm)		Altura do CP (mm)		expansão (%)			
Início	27/04/2023		5,000	0,000		115,000		0,000%			
1	28/04/2023		5,010	0,010		115,010		0,009%			
2	29/04/2023		5,020	0,020		115,020		0,017%			
3	30/04/2023		5,020	0,020		115,020		0,017%			
4	01/05/2023		5,020	0,020		115,020		0,017%			

Penetração x Tensão

Tempo (min)	Penetração (mm)	Leitura (µm)	Carga (N)	Pressão (MPa)
0,50	0,63	3,00	104,01	0,05
1,00	1,27	5,00	173,35	0,09
1,50	1,90	6,00	208,02	0,11
2,00	2,54	7,00	242,69	0,12
2,50	3,17	8,00	277,36	0,14
3,00	3,81	8,50	294,70	0,15
3,50	4,44	9,00	312,03	0,16
4,00	5,08	10,00	346,70	0,18
5,00	6,35	11,00	381,37	0,19
6,00	7,62	11,50	398,71	0,20
7,00	8,89	12,00	416,04	0,21
8,00	10,16	12,50	433,38	0,22
9,00	11,43	13,00	450,71	0,23
10,00	12,7	13,50	468,05	0,24

Coeficiente de correção da curva	0,00
Costante do anel (N/µm)	34,67
Área do pistão (mm²)	1963,50

Penetração (mm)	Pressão (MPa)			CBR (%)
	Calculada	Corrigida	Padrão	
2,54	0,124	0,124	6,90	1,79
5,08	0,177	0,177	10,35	1,71

CBR Energia Intermediário – SM

IDENTIFICAÇÃO												
Procedência	AMOSTRA SM											
Solicitante	BRASKEM		Localização		área de demolição			Profundidade (cm)				
MOLDAGEM DO CORPO DE PROVA												
Molde nº	h (cm) =	11,55	Ø (cm) =	15,17	Vol.cilindro (cm³)	2087,58	P cilindro (g)	4010	Peso bruto úmido (g)	8165		
Densidade seca máxima (g/cm³)		1,692		umidade ótima		16,72%		Densidade úmida de moldagem (g/cm³)		1,990		
Densidade aparente seca (g/cm³)		1,701		Variação entre calculado e ensaiado		0,54%		umidade de moldagem		17,02%	Variação entre calculado e ensaiado	1,79%
DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE DE MOLDAGEM												
Cap	Pbu	Pbs	Pcap	Pag	Pss	Umidade	Média		Fator de correção			
75	91,4	82,3	28,44	9,1	53,86	16,9%	17,02%		0,85459			
24	79,2	71,7	27,93	7,5	43,77	17,1%						
EXPANSÃO												
Tempo (dias)	Data	Hora	leitura do Extensômetro (mm)		Diferença de leitura (mm)		Altura do CP (mm)		expansão (%)			
Início	11/07/2023		5,000		0,000		115,500		0,000%			
1	12/07/2023		5,020		0,020		115,520		0,017%			
2	13/07/2023		5,020		0,020		115,520		0,017%			
3	14/07/2023		5,020		0,020		115,520		0,017%			
4	15/07/2023		5,030		0,030		115,530		0,026%			

Penetração x Tensão

Tempo (min)	Penetração (mm)	Leitura (µm)	Carga (N)	Pressão (MPa)
0,50	0,63	13,00	450,71	0,23
1,00	1,27	19,00	658,73	0,34
1,50	1,9	23,00	797,41	0,41
2,00	2,54	27,00	936,09	0,48
2,50	3,17	30,00	1040,10	0,53
3,00	3,81	34,00	1178,78	0,60
3,50	4,44	36,00	1248,12	0,64
4,00	5,08	41,00	1421,47	0,72
5,00	6,35	45,00	1560,15	0,79
6,00	7,62	50,00	1733,50	0,88
7,00	8,89	55,00	1906,85	0,97
8,00	10,16	61,00	2114,87	1,08
9,00	11,43	65,00	2253,55	1,15
10,00	12,7	75,00	2600,25	1,32

Coefficiente de correção da curva	0,00
Costante do anel (N/µm)	34,67
Área do pistão (mm²)	1963,50

Penetração (mm)	Pressão (MPa)			CBR (%)
	Calculada	Corrigida	Padrão	
2,54	0,477	0,477	6,90	6,91
5,08	0,724	0,724	10,35	6,99

E3. CBR e Expansão Máxima – Amostra AR-SM

CBR Energia Normal – AR-SM

IDENTIFICAÇÃO												
Procedência	AR-SM (85%-15%)											
Solicitante	BRASKEM		Localização		área de demolição			Profundidade (cm)				
MOLDAGEM DO CORPO DE PROVA												
Molde nº	h (cm) =	11,395	Ø (cm) =	15,205	Vol.cilindro (cm³)	2069,08	P cilindro (g)	4170	Peso bruto úmido (g)	8330		
Densidade seca máxima (g/cm³)		1,748		umidade ótima		14,48%		Densidade úmida de moldagem (g/cm³)		2,011		
Densidade aparente seca (g/cm³)		1,763		Variação entre calculado e ensaiado		0,87%		umidade de moldagem		14,05%	Variação entre calculado e ensaiado	-2,91%
DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE DE MOLDAGEM												
Cap	Pbu	Pbs	Pcap	Pag	Pss	Umidade	Média		Fator de correção			
134	85,7	77,12	15,31	8,58	61,81	13,9%	14,05%		0,87677			
119	105,41	94,14	14,93	11,27	79,21	14,2%						
EXPANSÃO												
Tempo (dias)	Data	Hora	leitura do Extensômetro (mm)		Diferença de leitura (mm)		Altura do CP (mm)		expansão (%)			
Início	12/1/2023		5,000		0,000		113,950		0,000%			
1			5,010		0,010		113,960		0,009%			
2			5,020		0,020		113,970		0,018%			
3			5,020		0,020		113,970		0,018%			
4			5,020		0,020		113,970		0,018%			

Penetração x Tensão

Tempo (min)	Penetração (mm)	Leitura (µm)	Carga (N)	Pressão (MPa)
0,50	0,63	6,00	208,02	0,11
1,00	1,27	15,00	520,05	0,26
1,50	1,90	24,00	832,08	0,42
2,00	2,54	31,00	1074,77	0,55
2,50	3,17	38,00	1317,46	0,67
3,00	3,81	48,00	1664,16	0,85
3,50	4,44	57,00	1976,19	1,01
4,00	5,08	66,00	2288,22	1,17
5,00	6,35	89,00	3085,63	1,57
6,00	7,62	115,00	3987,05	2,03
7,00	8,89	136,00	4715,12	2,40
8,00	10,16	156,00	5408,52	2,75
9,00	11,43	179,00	6205,93	3,16
10,00	12,7	202,00	7003,34	3,57

Coeficiente de correção da curva	1,42
Constante do anel (N/µm)	34,67
Área do pistão (mm²)	1963,50

Penetração (mm)	Pressão (MPa)			CBR (%)
	Calculada	Corrigida	Padrão	
2,54	0,547	0,890	6,90	12,90
5,08	1,165	1,627	10,35	15,72

CBR Energia Intermediário – AR-SM

IDENTIFICAÇÃO												
Procedência	AR-SM (85%-15%)											
Solicitante	BRASKEM		Localização		área de demolição			Profundidade (cm)				
MOLDAGEM DO CORPO DE PROVA												
Molde nº	h (cm) =	11,5	Ø (cm) =	15,21	Vol.cilindro (cm³)	2089,52	P cilindro (g)	4175	Peso bruto úmido (g)	8405		
Densidade seca máxima (g/cm³)			1.850		umidade ótima		11,33%	Densidade úmida de moldagem (g/cm³)		2,024		
Densidade aparente seca (g/cm³)			1.828		Variação entre calculado e ensaiado		-1,19%	umidade de moldagem		10,76%	Variação entre calculado e ensaiado	-5,04%
DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE DE MOLDAGEM												
Cap	Pbu	Pbs	Pcap	Pag	Pss	Umidade	Média		Fator de correção			
1	92,6	86,22	28,53	6,38	57,69	11,1%	10,76%		0,90287			
119	110,72	101,65	14,92	9,07	86,73	10,5%						
EXPANSÃO												
Tempo (dias)	Data	Hora	leitura do Extensômetro (mm)		Diferença de leitura (mm)		Altura do CP (mm)		expansão (%)			
Início	11/7/2023		5,000		0,000		115,000		0,000%			
1	12/7/2023		5,020		0,020		115,020		0,017%			
2	13/7/2023		5,030		0,030		115,030		0,026%			
3	14/7/2023		5,040		0,040		115,040		0,035%			
4	15/7/2023		5,040		0,040		115,040		0,035%			

Penetração x Tensão

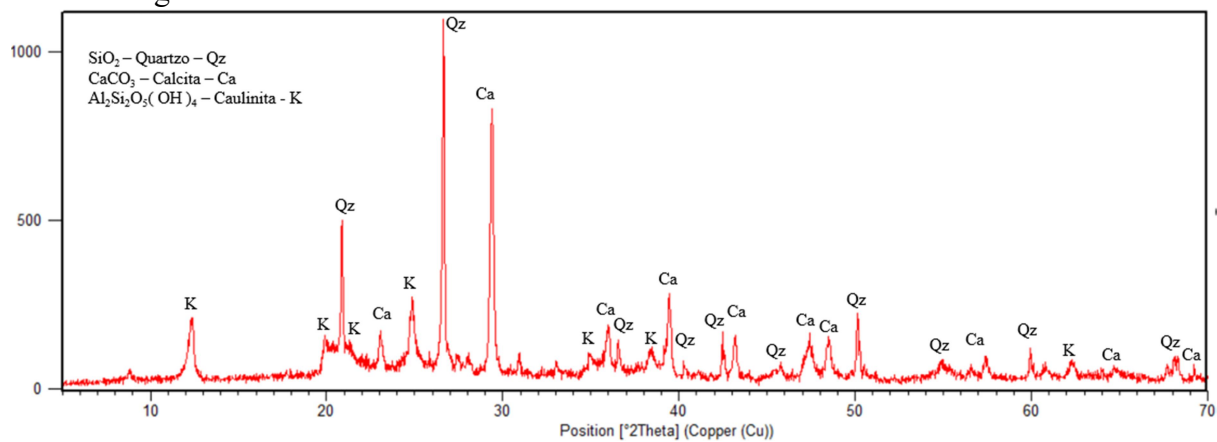
Tempo (min)	Penetração (mm)	Leitura (µm)	Carga (N)	Pressão (MPa)
0,50	0,63	4,00	86,35	0,04
1,00	1,27	11,00	237,47	0,12
1,50	1,90	23,00	496,52	0,25
2,00	2,54	37,00	798,76	0,41
2,50	3,17	56,00	1208,93	0,62
3,00	3,81	95,00	2050,86	1,04
3,50	4,44	125,00	2698,50	1,37
4,00	5,08	162,00	3497,26	1,78
5,00	6,35	238,00	5137,94	2,62
6,00	7,62	320,00	6908,16	3,52
7,00	8,89	430,00	9282,84	4,73
8,00	10,16	494,00	10664,47	5,43
9,00	11,43	530,00	11441,64	5,83
10,00	12,70	577,00	12456,28	6,34

Coefficiente de correção da curva	2,79
Costante do anel (N/µm)	21,59
Área do pistão (mm²)	1963,50

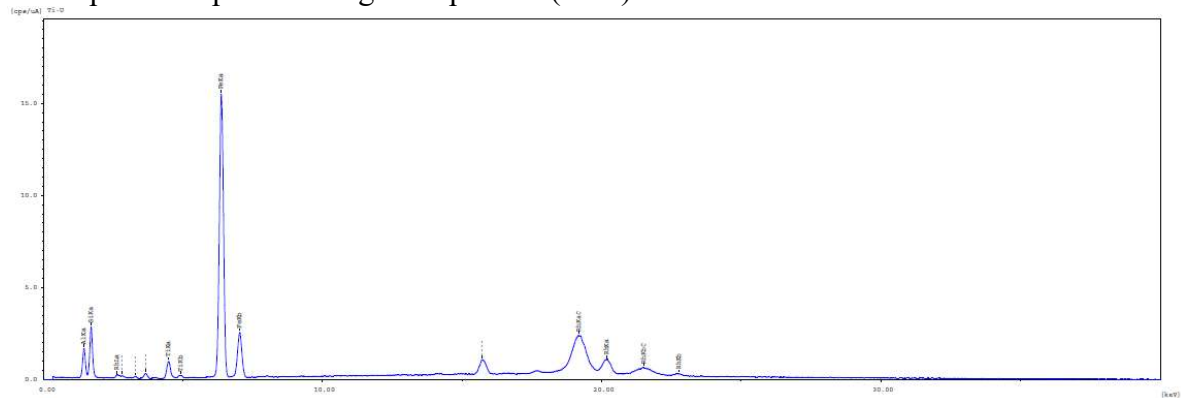
Penetração (mm)	Pressão (MPa)			CBR (%)
	Calculada	Corrigida	Padrão	
2,54	0,407	1,947	6,90	28,22
5,08	1,781	3,825	10,35	36,96

APÊNDICE F – Ensaios Químicos e Mineralógicos

F1. Difratoograma de Raio-X - Amostras de AR



F2. Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS) – Amostras SM



F3. Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS) – Amostras AR-SM

