

PABLO AUGUSTO DOS SANTOS ROCHA

**Parâmetros de Interface:
Blocos, Geogrelha e Agregados Reciclados em
Muros de Solo Reforçado**

Dissertação de Mestrado
Departamento de Engenharia Civil

Belo Horizonte, dezembro de 2022

**PARÂMETROS DE INTERFACE: BLOCOS, GEOGRELHA E AGREGADOS
RECICLADOS EM MUROS DE SOLO REFORÇADO**

Dissertação de Mestrado

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientadora: Profa. Dra. Denise de Carvalho Urashima

R672p Rocha, Pablo Augusto dos Santos
Parâmetros de interface: blocos, geogrelha e agregados reciclados em
muros de solo reforçado / Pablo Augusto dos Santos Rocha. – 2022.
139 f. : il., gráfs, tabs., fotos.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia
de Civil.
Orientadora: Denise de Carvalho Urashima.
Bibliografia: f. 122-130.
Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de
Minas Gerais, Departamento de Engenharia Civil.

1. Concreto – Reaproveitamento – Teses. 2. Agregados (Materiais de
construção) – Teses. 3. Construção sustentável – Teses. 4. Geossintéticos –
Teses. 5. Blocos de concreto – Teses. I. Urashima, Denise de Carvalho.
II. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Departamento
de Engenharia Civil. III. Título.

CDD 624.1834

PABLO AUGUSTO DOS SANTOS ROCHA

**PARÂMETROS DE INTERFACE:
BLOCOS, GEOGRELHA E AGREGADOS RECICLADOS
EM MUROS DE SOLO REFORÇADO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Denise de Carvalho Urashima
Orientadora
Departamento de Engenharia Civil, CEFET-MG

Prof. Dr. Conrado de Souza Rodrigues
Departamento de Engenharia Civil, CEFET-MG

Prof. Dr. Eduardo de Souza Cândido
Departamento de Engenharia, UFLA-MG

Prof. Dr. Lucas Deleon Ferreira
Departamento de Engenharia Urbana da Escola de Minas, EM/UFOP-MG

Belo Horizonte, 19 de dezembro de 2022

DEDICATÓRIA

Ao meu pai e meu irmão, com dedicação amor e carinho.

Aos meus professores, pelas sábias palavras e paciência.

Aos meus colegas, pelo incentivo e companheirismo.

À Estela Mesquita Lasmar, pela confiança.

Muito obrigado.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer a Deus por ter me dado saúde para superar todos os desafios impostos não apenas pelo curso, mas também por todos os obstáculos da vida.

Em segundo, agradeço minha família, meu pai e meu irmão, e aos meus tios, pelo incentivo, conselhos e qualquer outra ajuda que tenham me dado durante estes anos.

À minha orientadora e professora Denise de Carvalho Urashima por seu compromisso comigo como seu orientado e pelo tempo despendido para a realização desta pesquisa. Serei eternamente grato por todo o ensinamento que me proporcionou durante esses anos.

Aos meus colegas de turma, pelas experiências compartilhadas mesmo que de modo remoto. Em especial, à professora Mag que como minha colega em algumas disciplinas, foi quem compartilhou as suas experiências como discente, sempre me atentando e colaborando para minha formação. Ao meu colega Engenheiro Civil Gustavo, com quem pude compartilhar experiências, ideias e práticas fundamentais para o desenvolvimento desta pesquisa; e não menos importante, ao meu amigo Pedro, com quem tive a honra de compartilhar discussões e momentos durante parte do desenvolvimento desta pesquisa.

Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil (PPGEC) do CEFET-MG, aos seus servidores e todos os professores que com muita dedicação e comprometimento proporcionaram o melhor trabalho para a realização deste curso, mesmo diante de uma situação tão crítica.

Ao CEFET-MG Unidade Varginha, que se tornou meu ambiente de trabalho e proporcionou-me todo o suporte técnico para a realização dos ensaios. Aos seus servidores que prezaram pela minha segurança durante o período da pandemia.

Às empresas HUESKER e ECOVIA pela doação de materiais imprescindíveis para a realização dos ensaios e da pesquisa.

Por fim, agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal do ensino superior (CAPES) e ao CEFET-MG pelo apoio financeiro e técnico, respectivamente.

RESUMO

O consumo não racional de recursos naturais e a geração de resíduos são alguns aspectos que comprometem valores de sustentabilidade da indústria da construção civil. A geração de resíduos da construção civil (RCC) pela indústria da construção civil (ICC) tem potencial impactante na sociedade e no meio ambiente. O uso de muros de solo reforçado como solução em infraestrutura urbana tem crescido nos últimos anos, pois atendem aspectos técnicos, arquitetônicos, econômicos, de prazo e de sustentabilidade. Para a execução de muros de solos reforçados podem ser empregados: solo para preenchimento, geossintéticos, blocos segmentais e agregados naturais (AN). Os geossintéticos são produtos fabricados a partir de polímeros, possuem diversas funções e são empregados em diferentes aplicações. Nos muros de solo reforçado, geossintéticos do tipo geogrelhas (GGR) são utilizadas como material de reforço. Os blocos segmentais são produzidos de concreto pré-moldado e podem ser utilizados no paramento do muro como elementos de ancoragem dos reforços e forma lateral da estrutura. Os AN são utilizados no preenchimento dos blocos segmentais, conferindo ao conjunto maior capacidade de ancoragem do reforço junto ao paramento, bem como auxiliando na drenagem da estrutura. Como alternativa de substituição dos AN, são empregados agregados reciclados de concreto (ARCO) como material de preenchimento de blocos segmentais em muros de solo reforçado. Para efeito da pesquisa os ARCO e AN na zona granulométrica de 9,5/25 mm foram submetidos a ensaios de caracterização física e ensaios de resistência de conexão sob tensões normais de 40 kN/m², 50 kN/m², 60 kN/m², 80 kN/m² e 100 kN/m², a fim de avaliar o desempenho dos elementos de interface. Os resultados dos ensaios de caracterização física apontaram que os ARCO sofreram alterações mais expressivas nos valores das propriedades quando submetidos aos ensaios de desempenho. No entanto, os valores de resistência de conexão dos ensaios com emprego de ARCO apresentaram aumento na média de 21%, 30%, 35% e 5,5% em relação aos ensaios com emprego de AN, quando submetidos às tensões normais de 40 kN/m², 50 kN/m², 60 kN/m² e 80 kN/m², respectivamente. Os resultados determinados nos ensaios de resistência de conexão apontaram o potencial de emprego de ARCO como material de preenchimento de blocos segmentais para muros de solo reforçado com elevação igual ou inferior a 5 metros.

Palavras-chaves: sustentabilidade; agregados reciclados de concreto; geogrelha; geossintéticos; blocos segmentais.

ABSTRACT

The Non-rational consumption of natural resources and waste production are some aspects that compromise sustainability values in the construction industry. The production of construction waste (CCW) by the construction industry (CCI) has a potential impact on society and the environment. The use of segmental retaining walls (SRW) as a solution in urban infrastructure has grown in recent years because they fulfill the technical, architectural, economic, periodic and sustainability aspects. For the execution of SRW, the following can be used: fill soil, geosynthetics, segmental blocks and natural aggregates (NA). Geosynthetics are products made of polymers, have various functions and are used in different applications. In SRW, geogrids (GG) - a geosynthetic product of sorts - are used as reinforcement material. Segmental blocks are produced from precast concrete and can be used at the face of the wall as anchoring elements for the reinforcement and lateral form of the structure. The NA are used in the filler of the segmental blocks, giving the assembly greater ability to anchor the reinforcement to the wall, as well as aid in the drainage of the structure. As an alternative to NA, recycled concrete aggregates (RCA) are used as filler material for the segmental blocks in SRW. For the purpose of this investigation, RCA and NA in the 9.5/25 mm particle size zone were subjected to physical characterization tests and connection strength tests under normal stresses of 40 kN/m², 50 kN/m², 60 kN/m², 80 kN/m² and 100 kN/m² in order to evaluate the performance of the interface elements. The results of the physical characterization tests indicated that RCA suffered more expressive changes in the values of the properties when submitted to the performance tests. However, the connection resistance values of the tests with RCA presented an average increase of 21%, 30%, 35% and 5.5% in relation to the tests with NA, when submitted to normal stresses of 40 kN/m², 50 kN/m², 60 kN/m² and 80 kN/m², respectively. The results determined in the connection strength tests pointed out the potential of using RCA as a segmental block filling material for SRW with a height of 5 meters or less.

Keywords: sustainability; recycled concrete aggregates; geogrid; geosynthetics; segmental blocks.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Os dezessete ODS.	23
Figura 2. Obra de drenagem de canal, Varginha, MG, 2021.....	28
Figura 3. Percentual de reserva medida de matéria-prima distribuída por região geográfica no ano de 2000.....	30
Figura 4. Extração de areia e rocha britada em 2019, por país.	31
Figura 5. Produção por tipos de agregados.	32
Figura 6. Histórico da produção de agregados.	32
Figura 7. Classificação dos resíduos sólidos quanto à origem segundo a PNRS.	34
Figura 8. Distribuição regional dos investimentos necessários aos RSU no Brasil.	35
Figura 9. Origem dos resíduos da construção civil em São Paulo.	36
Figura 10. Materiais produzidos pelas unidades de reciclagem de RCC no Brasil no ano de 2015.	37
Figura 11. Distribuição regional das unidades de manejo de RCC no Brasil no ano de 2015.	39
Figura 12. Usina de reciclagem de RCC, Varginha (MG).	39
Figura 13. Fabricação de blocos de concreto com agregados reciclados na usina URRCC de Varginha (MG).	40
Figura 14. Preço máximo, mínimo e médio dos agregados reciclados por estado brasileiro..	41
Figura 15. Principais canais de escoamento de materiais reciclados de RCC no Brasil.	42
Figura 16. Variação das propriedades dos geossintéticos ao longo do tempo.	50
Figura 17. Relação entre os impactos ambientais e as alturas das quatro estruturas de contenção.	53
Figura 18. Aspectos genéricos do sistema muros de contenção com paramento de blocos segmentais.	55
Figura 19. Execução de muro de solo reforçado.	56
Figura 20. Obra de construção de muro de solo reforçado com blocos segmentais na rodovia Tamoios.	57
Figura 21. Sistema de muros de solo reforçado com paramento de blocos segmentais na rodovia Tamoios.	57
Figura 22. Equipamento de ensaio de resistência de conexão.....	60
Figura 23. Modelos potenciais de ruptura em muros de solo reforçado.	62

Figura 24. Modos de ruptura na análise interna.	63
Figura 25. Modos de ruptura na análise de face.	63
Figura 26. Exemplos de unidades de blocos segmentais.	64
Figura 27. Direção correta de instalação do reforço.	65
Figura 28. Bloco segmentado modelo MW.	69
Figura 29. Amostra de geogrelha.	70
Figura 30. Agregados graúdos classificados na zona granulométrica de 9,5/25 mm.	70
Figura 31. Entulho de RCC no Campus VIII, CEFET-MG, Varginha, 2021.	71
Figura 32. Pedreira Santo Antônio, Varginha, MG.	71
Figura 33. Fluxograma das etapas da pesquisa.	72
Figura 34. Caçamba para armazenamento do RCC coletado.	73
Figura 35. Equipamento de britagem no instante de operação.	73
Figura 36. Equipamento para ensaio de resistência de conexão e desenho com dimensões. ..	76
Figura 37. Vista lateral do equipamento e seus três segmentos em detalhe.	78
Figura 38. Arranjo blocos-geogrelha e tubo da interface ar-água.	79
Figura 39. Vista superior do equipamento.	80
Figura 40. Compressor de ar utilizado como equipamento auxiliar.	80
Figura 41. Fluxograma dos procedimentos do ensaio de resistência de conexão.	82
Figura 42. Preparação de amostra de geogrelha.	83
Figura 43. Quarteamento da amostra de agregado natural.	83
Figura 44. Fixação da geogrelha na garra.	84
Figura 45. Chapas auxiliares de madeira.	84
Figura 46. Primeira camada de blocos.	85
Figura 47. Enchimento dos blocos.	85
Figura 48. Posicionamento da geogrelha.	86
Figura 49. Enchimento da segunda camada de blocos.	86
Figura 50. Colocação da bolsa sobre o conjunto blocos-geogrelha.	87
Figura 51. Segmento de confinamento com anteparo metálico instalado.	87
Figura 52. Quadro do sistema de leitura, aquisição e armazenamento de dados.	88
Figura 53. Acionamento do inversor de frequência.	88
Figura 54. Exibição no monitor de valores de força durante ensaio.	89
Figura 55. Curvas granulométricas por tipo de agregado.	90
Figura 56. Curvas granulométricas por tipo de agregado solicitado após ensaio de resistência de conexão.	91

Figura 57. Ensaio de índice de forma.....	92
Figura 58. Etapas do ensaio de determinação da densidade e da absorção de água.....	93
Figura 59. Ensaio de determinação da massa unitária.....	93
Figura 60. Ensaio de determinação do material mais fino que passa pela peneira 75 μm por lavagem.....	95
Figura 61. Curvas de resistência de conexão com emprego de agregado natural (40kN/m ²). 97	
Figura 62. Curvas de resistência de conexão com emprego de agregado natural (50kN/m ²). 98	
Figura 63. Curvas de resistência de conexão com emprego de agregado natural (60kN/m ²). 98	
Figura 64. Curvas de resistência de conexão com emprego de agregado natural (80kN/m ²). 99	
Figura 65. Curvas de resistência de conexão com emprego de agregado natural (100kN/m ²).	99
Figura 66. Valores de resistência de conexão em função da carga normal aplicada (emprego de AN).	100
Figura 67. Curvas de resistência de conexão com emprego de agregado reciclado (40kN/m ²).	101
Figura 68. Curvas de resistência de conexão com emprego de agregado reciclado (50kN/m ²).	101
Figura 69. Curvas de resistência de conexão com emprego de agregado reciclado (60kN/m ²).	102
Figura 70. Curvas de resistência de conexão com emprego de agregado reciclado (80kN/m ²).	102
Figura 71. Curvas de resistência de conexão com emprego de agregado reciclado (100kN/m ²).	103
Figura 72. Valores de resistência de conexão em função da carga normal aplicada (emprego de ARCO).	103
Figura 73. Curvas granulométricas dos agregados antes e após os ensaios de resistência de conexão.....	104
Figura 74. Amostras de AN e ARCO antes e após os ensaios de resistência de conexão. ...	105
Figura 75. Curvas granulométricas dos agregados solicitados e zonas granulométricas do NCMA e FHWA.....	106
Figura 76. Diagrama de caixas de resistência de conexão para ambos os agregados.	111
Figura 77. Gráfico de diversos resultados de resistência de conexão.	113
Figura 78. Gráfico com valores resistência de conexão em função do polímero e do modelo do bloco.	114

Figura 79. Amostra de GGR após ensaio de resistência de conexão.	115
--	-----

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Principais funções desempenhadas por tipos de geossintéticos.	48
Quadro 2. Relação entre propriedades e principais funções dos geossintéticos.	49
Quadro 3. Dados dos ensaios de densidade e absorção de água.	131
Quadro 4. Dados dos ensaios de determinação de massa unitária.	131
Quadro 5. Gráficos plotados com os dados dos ensaios de resistência de conexão antes do tratamento.	132
Quadro 6. Amostras de GGR após ensaios de resistência de conexão sob tensão normal de 100 kN/m ²	134
Quadro 7. Amostras de GGR após ensaios de resistência de conexão sob tensão normal de 80 kN/m ²	135
Quadro 8. Amostras de GGR após ensaios de resistência de conexão sob tensão normal de 60 kN/m ²	136
Quadro 9. Amostras de GGR após ensaios de resistência de conexão sob tensão normal de 50 kN/m ²	137
Quadro 10. Amostras de GGR após ensaios de resistência de conexão sob tensão normal de 40 kN/m ²	138
Quadro 11. Valores de resistência de conexão diversos.	139

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Volume de reservas distribuídos por UF de matéria-prima para agregados naturais no ano 2000.	29
Tabela 2. Classe em que deve ser enquadrado os RCC segregados segundo a Resolução Conama nº 307/2002 (e suas alterações).	38
Tabela 3. Tipos de polímeros comumente utilizados na fabricação de produtos geossintéticos.	46
Tabela 4. Principais geossintéticos e os polímeros utilizados na fabricação.....	47
Tabela 5. Alturas dos muros correspondente a tensão normal e número de ensaios.....	75
Tabela 6. Valores médios de densidades e absorção de água por tipo de agregado.....	92
Tabela 7. Valores de massa unitária por tipo de agregado.	94
Tabela 8. Valores médios de material fino que passa pela peneira 75 µm.	95
Tabela 9. Valores de compactidade para os agregados natural e reciclado.....	96
Tabela 10. Resultados dos ensaios de abrasão Los Angeles.	96
Tabela 11. Valores de resistência de conexão para diferentes tensões normais.....	97
Tabela 12. Valores de resistência de conexão para diferentes tensões normais.....	100
Tabela 13. Propriedades físicas dos AN e AR antes e após os ensaios de resistência de conexão.	107
Tabela 14. Valores de resistência de conexão e medidas de dispersão para os AN e os ARCO.	110
Tabela 15. Valores médios de resistência média obtidos em estudos diversos.....	112
Tabela 16. Valores de força de tração de pico e resistência de conexão.	133

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AASHTO - *American Association of State Highway and Transportation Officials*
ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE - Associação Brasileira das Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
ACV - Avaliação do ciclo de vida
AGNU - Assembleia Geral das Nações Unidas
AMB - Anuário Mineral Brasileiro
AN - Agregados naturais
ANM - Agência Nacional de Mineração
ARCI - Agregado reciclado cimentício
ARCO - Agregados reciclados de concreto
ARM - Agregado reciclado misto
ASTM - *American Society for Testing and Materials*
BA - Bahia
CBIC - Câmara Brasileira da Indústria da Construção
CE - Ceará
CONAMA - Conselho Nacional de Meio Ambiente
COP27 - *27th Conference of the Parties to the United Nations Framework Convention on Climate Change*
CPE - polietileno clorado
DF - Distrito Federal
DNPM - Departamento Nacional e Produção Mineral
EFTA - *European Free Trade Association*
ES - Espírito Santo
FHWA - *Federal Highway Administration*
GBL - Geoblanket
GBR - Barreira geossintética
GBR-B - Barreira geossintética betuminosa ou geomembrana betuminosa
GBR-C - Barreira sintética argilosa ou forro geossintético argiloso
GBR-P - Barreira geossintética polimérica ou geomembrana
GCE - Geocélula
GCO - Geocomposto
GEE - Gases de efeito estufa

GGR - Geogrelha
GMA - Geomanta
GNT - Georrede
GO - Goiás
GSP - Geoespaçador
GST - Geotira
GTP - Produto correlato aos geotêxteis
GTX - Geotêxtil
GTX-K - Geotêxtil tricotado
GTX-NW - Geotêxtil não tecido
GTX-W - Geotêxtil tecido
ICC - Indústria da Construção Civil
ISO - *International Organization for Standardization*
LVDT - *Linear Variable Differential Transformers*
MA - Maranhão
MG - Minas Gerais
MMA - Ministério do Meio Ambiente
MOVIECO - Movimento Ecológico
MS - Mato Grosso
MS - Mato Grosso do Sul
MSE - *Mechanically Stabilised Earth*
MSEW - *Mechanically Stabilised Earth Wall*
MT - Mato Grosso
NBR - Norma brasileira
NCMA - *National Concrete Masonry Association*
NM - Norma Mercosul
ODS - Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
PA - Pará
PA - Poliamida
PB - Paraíba
PE - Pernambuco
PE - Poliéster
PEAD - Polietileno de alta de densidade
PEBD - Polietileno de baixa densidade

PEBDL - Polietileno de baixa densidade linear
PECS - Polietileno clorosulfondo
PEMBD - Polietileno de muito baixa densidade
PEMD - Polietileno de média densidade
PET - Polietileno
PI - Piauí
PIB - Produto Interno Bruto
Planares - Plano Nacional de Resíduos Sólidos
PMGRCC - Planos Municipais de Gestão Integrada de Resíduos da Construção Civil
PNRS - Política Nacional de Resíduos Sólidos
PP - Polipropileno
PR - Paraná
PS - Poliestireno
PVA - polivinílico
PVC - Policloreto de vinila ou vinil
RCA - *Recycled aggregate concrete*
RCC - Resíduos da construção civil
RJ - Rio de Janeiro
RN - Rio Grande do Norte
RO - Roraima
RS - Rio Grande do Sul
RSU - Resíduo Sólido Urbano
SC - Santa Catarina
SD - *Security Card*
SE - Sergipe
Sinduscon-MG - Sindicato da Indústria da Construção Civil no Estado de Minas Gerais
SISNAMA - Sistema Nacional do Meio Ambiente
SP - São Paulo
SRW - *Reinforced Segmental Retaining Wall*
TO - Tocantins
UE28 - *Union Européenne des Vingt-Huit*
UEPG - *Union Européenne des Producteurs des Granulats*
UF - Unidade Federativa
URRCC - Usina de Reciclagem de Resíduos da Construção Civil

LISTA DE SÍMBOLOS

%	– percentual
kt	– quilotonelada
mt	– milhões de toneladas
bt	– bilhões de toneladas
kg/hab/ano	– quilograma por habitante ao ano
R\$	– reais
m ³	– metro cúbico
R\$/m ²	– reais por metro quadrado
t/h	– tonelada por hora
m ²	– metro quadrado
x _{req}	– propriedade x requerida
x _{disp}	– propriedade x disponível
t	– tempo
t ₁	– instante inicial
t _{útil}	– tempo de vida útil
t _{rot}	– instante da ruptura
M _w	– escala de magnitude de momento (MMS)
m	– metro
tCO _{2e}	– tonelada de dióxido de carbono equivalente
GJ	– gigajoule
km	– quilômetro
T _{última}	– resistência última de conexão ou resistência de conexão (kN/m)
F _p	– força de ruptura ou de pico (kN)
C _g	– largura do corpo de prova ou da amostra (m)
kN/m	– quilonewton por metro
kN	– quilonewton
mm	– milímetros
I	– índice de forma
ρ _s	– densidade determinada na condição seca (g/cm ³)
ρ _{sss}	– densidade determinada na condição saturada de superfície seca (g/cm ³)
Abs	– teor de absorção de água (%)
ρ _{ap}	– massa unitária (kg/m ³)

m – teor de material fino (%)
 P – perda por resistência à abrasão (%)
 C – compacidade
 kN/m^2 - quilonewton por metro quadrado
 $\bar{x}$ - média amostral
 CV – coeficiente de variação
 S – desvio padrão
 cm – centímetros
 RPM – rotações por minuto
 V – *volt*
 Hz - *hertz*
 HP – *horse-power*
 PCM – pés cúbicos por minuto
 psi – *pound force per square inch* (lbf/in^2)
 mm/min – milímetros por minuto
 kg – quilograma
 DMC – diâmetro máximo característico (mm)
 MF – módulo de finura
 LS – limite superior
 LI – limite inferior
 μm – micrometros
 g - gramas
 R^2 - coeficiente de determinação

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	22
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	22
1.2	OBJETIVO GERAL E ESPECÍFICOS.....	25
1.2.1	Objetivo geral	25
1.2.2	Objetivos específicos.....	25
1.3	JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA	25
2	REVISÃO DA LITERATURA.....	28
2.1	PROBLEMÁTICA	28
2.2	RESÍDUOS SÓLIDOS E SUA TRATATIVA NO BRASIL	34
2.2.1	Custos envolvidos no manejo dos resíduos sólidos.....	35
2.2.2	Aspectos gerais dos resíduos sólidos gerados pela indústria da construção civil	35
2.2.3	Reciclagem e reutilização de resíduos da construção civil (RCC).....	37
2.3	AGREGADOS RECICLADOS DE RCC	44
2.4	GEOSSINTÉTICOS.....	45
2.4.1	Propriedades e funções dos geossintéticos	47
2.4.2	Sustentabilidade e aplicações geossintéticas	50
2.5	ESTRUTURAS DE SOLO REFORÇADO	53
2.5.1	Considerações iniciais	53
2.5.2	Elementos de reforço.....	57
2.5.3	Interação solo-reforço e bloco-reforço	59

2.5.4	Dimensionamento de muros de solo reforçado	61
2.5.5	Muros de solo reforçado com geossintéticos com paramento de blocos segmentais...	64
2.6	APLICAÇÃO DE RCC EM ESTRUTURAS DE CONTENÇÃO DE SOLO REFORÇADO COM GEOSSINTÉTICOS	65
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	69
3.1	MATERIAIS	69
3.2	MÉTODOS	72
3.3	EQUIPAMENTO	76
3.4	PROCEDIMENTOS DE ENSAIO.....	81
3.4.1	Agregados.....	81
3.4.2	Ensaio de resistência de conexão.....	81
4	RESULTADOS	90
4.1	AGREGADOS	90
4.1.1	Ensaio de determinação da composição granulométrica ABNT NBR NM 248 (2003)...	90
4.1.2	Ensaio de determinação do índice de forma pelo método do paquímetro ABNT NBR 7809 (2019)	91
4.1.3	Ensaio de determinação de densidade e da absorção de água ABNT NBR 16917 (2021)	92
4.1.4	Ensaio de determinação da massa unitária ABNT NBR 16972 (2021)	93
4.1.5	Ensaio de determinação do material fino que passa pela peneira de 75 µm por lavagem ABNT NBR 16973 (2021)	94
4.1.6	Determinação da compacidade dos agregados	95

4.1.7	Ensaio de abrasão <i>Los Angeles</i> ABNT NBR 16974 (2022)	96
4.2	ENSAIO DE RESISTÊNCIA DE CONEXÃO	96
4.2.1	Resultados dos ensaios com emprego de agregados naturais.....	96
4.2.2	Resultados dos ensaios com emprego de agregados reciclado de concreto	100
5	DISCUSSÕES	104
5.1	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA.....	104
5.2	ENSAIOS DE RESISTÊNCIA DE CONEXÃO	109
6	CONCLUSÃO.....	117
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	120
	REFERÊNCIAS	122
	APÊNDICE A – DADOS DE ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS	131
	APÊNDICE B – GRÁFICOS DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA DE CONEXÃO	132
	APÊNDICE C – VALORES DE FORÇA DE TRAÇÃO DE PICO E DE RESISTÊNCIA DE CONEXÃO.....	133
	APÊNDICE D – AMOSTRAS DE GEOGRELHAS APÓS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA DE CONEXÃO	134
	ANEXO A – VALORES DE RESISTÊNCIA DE CONEXÃO POR DIVERSOS AUTORES	139

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Nos últimos anos, o aumento crescente das cidades, associado à urbanização desordenada, ao desenvolvimento da indústria e do mercado de consumo, vem gerando constantes transformações dos espaços e ecossistemas. Consequentemente, tem-se significativos impactos negativos em níveis sociais, econômicos e ambientais que apresentam-se como desafios aos governos e à coletividade (RAUBER, 2011).

A necessidade do ser humano de modelar a superfície terrestre para atender suas necessidades o tornou gradualmente um agente capaz de interferir na dinâmica do Planeta e consequentemente transformar o espaço físico-geológico. Na década de 1980, tal comportamento já era investigado e foi denominado *Era do Antropoceno*, por caracterizar uma “era geológica” na qual o homem é o principal agente transformador. Entre as atuações antrópicas, está o maior consumo de recursos naturais, bem como o aumento significativo do volume de resíduos (LANGER; NAGALLI, 2017).

Com a intensificação da ação humana no Planeta Terra, problemas como a falta de água tratada, potável e higiênica, o volumoso consumo de água na produção de alimentos e o aumento da geração de gases de efeito estufa (GEE), representam uma ameaça ao desenvolvimento sustentável. Desde meados do século XX, a atividade humana é responsável pelo aquecimento global e suas consequências, tal como o aumento da magnitude e variabilidade de eventos extremos no Planeta.

Em 1992, ocorreu a Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e o Desenvolvimento, que estabeleceu a primeira carta de intenções para promover de forma globalizada um novo padrão de desenvolvimento para o século XXI. Em 2015, a Assembleia Geral das Nações Unidas (AGNU) adotou o documento “Transformando Nosso Mundo: a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável”, que tem como pilares o crescimento econômico, inclusão social, e a proteção ambiental. Assim, foram propostos dezessete Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), que compõem o núcleo da agenda e deverão ser alcançados até 2030. Dois dos dezessete ODS podem ser desafiadores para a ICC, o ODS onze, que diz respeito às Cidades e Comunidades Sustentáveis e o ODS doze, que diz respeito ao Consumo e Produção Responsáveis. O ODS onze aborda em suas metas assuntos relacionados à urbanização, tais como a mobilidade urbana, saneamento e gestão de resíduos. As metas estipuladas para o ODS doze, visam alcançar uma gestão sustentável e o uso eficiente de recursos energéticos e naturais, bem como reduzir a geração de resíduos, por meio de práticas

como prevenção, redução, reciclagem e reuso (PLATAFORMA AGENDA 2030, 2021). A **Figura 1** ilustra os dezessete ODS.

Figura 1. Os dezessete ODS.



Fonte: Adaptado de PLATAFORMA AGENDA 2030 (2021).

A intensificação das atividades desenvolvidas na Indústria da Construção Civil (ICC) é um dos motivos que justificam a responsabilização do setor por parte significativa do consumo de matérias-primas e pela geração de resíduos da construção civil (RCC), ambas corriqueiras no setor e que acarretam em impactos ambientais em níveis significativos. A ICC tem atuação relevante na degradação do meio ambiente, especificamente quanto ao consumo de recursos naturais, os valores estão em torno 20% a 50% em comparação com outros consumos pela sociedade (PAZ; LAFAYETTE, 2016; SANTOS; PALMEIRA, 2011). Sendo o setor da construção civil o ramo da economia que mais consome agregados naturais advindos da lavra de jazidas de areia, rochas e cascalho (DONATO *et al.*, 2017; JOHN; AGOPYAN, 2000; JOHN; ANGULO, 2003; MACENA; LEME, 2017).

Grande parte dos resíduos de construção e demolição não pode ser contabilizada nos levantamentos quantitativos, já que é comum não haver registro que comprove a quantificação na fonte geradora. A carência de dados pode acometer ainda mais na gestão dos RCC, isto é, o controle da quantidade de material consumido e resíduo gerado é tido como premissa para se obter uma gestão eficiente na ICC (LAGE *et al.*, 2010).

O aumento da demanda por materiais naturais promove uma economia dinâmica de tal modo que a extração se torna uma atividade de impactos significativos e conflitantes, ou seja,

ascensão econômica por meio da comercialização do produto. Entretanto, a exploração de jazidas quando ocorre de modo não racional pode acarretar na escassez prematura de agregados naturais para ICC e demais setores da indústria. O aspecto conflitante das atividades que envolvem a extração de recursos naturais, especificamente mineração, deve ser mediado pelo poder público, visando promover o acesso e uso racional dos recursos minerais, vislumbrando aspectos socioeconômicos (GALAN, 2020).

Parte dos resíduos gerados pela ICC pode ter potencial impactante na sociedade e no meio ambiente, sendo este agravado pelo não cumprimento das legislações vigentes para a destinação adequada, implicando em práticas contrárias para mitigar os impactos gerados pela extração de agregados naturais concomitante ao descarte inapropriado dos RCC, fatores que afrontam o desenvolvimento sustentável e a gestão eficiente da ICC (LIU; GONG; WANG, 2021).

No Brasil, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), sancionada pela Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010 e que foi regulamentada pelo Decreto nº 7.404, de 23 de dezembro de 2010, é composta por um conjunto de atributos jurídicos e administrativos que define ao Distrito Federal e aos municípios a gestão integrada dos resíduos gerados nos respectivos territórios, bem como não isenta os geradores pela competência de prover tratamento ambientalmente correto aos resíduos sólidos sob suas responsabilidades (BRASIL, 2010b). Ainda se tratando da PNRS, em seu Art.7º, são descritos os objetivos, dentre os quais a reciclagem e o incentivo à indústria de reciclagem com intenção de fomentar o uso de matérias-primas e insumos derivados de materiais recicláveis e reciclados são relevantes para mitigar problemas relacionados à escassez de recursos naturais e à geração de resíduos.

Diante da breve contextualização, a ICC vem buscando meios de inserir os RCC a partir de práticas como a reciclagem ou a reutilização em suas distintas atividades, tal como o uso de resíduos em argamassas e concretos, ou até mesmo como material de base para obras de infraestrutura de pavimentação e em algumas aplicações de obras de engenharia geotécnica.

As estruturas de contenção de solo reforçado com geossintéticos compõem um conjunto bastante diversificado de obras de infraestrutura, sendo corrente seu emprego em encostas de rodovia e cabeceiras de viaduto. Dessas estruturas, os muros de solo reforçado com paramento de blocos segmentais têm sido empregados como uma das soluções de problemas de engenharia geotécnica que demandam aspectos estruturais, estéticos, adequação geométrica, facilidade construtiva, prazo e economia, e por tais razões o emprego destes sistemas vêm aumentando nos últimos anos (BATHURST; SIMAC, 1994; GOULART; PORTELINHA; AVESANI NETO, 2017).

Diante do exposto, pesquisas buscam sugestões que promovam o emprego de soluções de engenharia que visem ao atendimento de requisitos técnicos de projetos e que incorporem às técnicas construtivas, o uso de materiais não convencionais. Assim a proposta da pesquisa tem como hipótese expandir as possibilidades de aplicação dos RCC, ou seja, o uso destes como material de preenchimento de paramentos de muros de solo reforçado.

1.2 OBJETIVO GERAL E ESPECÍFICOS

1.2.1 Objetivo geral

Avaliar o potencial de aplicação de agregados reciclados de concreto (ARCO) como componente substituto de agregados naturais (AN) utilizados como material de preenchimento de blocos segmentais empregados no paramento de muros de solo reforçado com geogrelhas.

1.2.2 Objetivos específicos

- i. Caracterizar os agregados natural e reciclado de concreto conforme prescrições normativas aplicadas à referida tipologia construtiva;
- ii. Avaliar por meio de ensaio de resistência de conexão em laboratório, o comportamento da interface, considerando os elementos de conexão, reforço e paramento;
- iii. Caracterizar os agregados natural e reciclado de concreto, após ensaios de resistência de conexão; e
- iv. Analisar estatisticamente os resultados obtidos.

1.3 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA

O uso de agregados reciclados de RCC tem sido investigado em diversos estudos (ASSUNÇÃO; CARVALHO; BARATA, 2007; SANTOS; PALMEIRA, 2011), inclusive como material de preenchimento em elementos do paramento em obras geotécnicas (BHUIYAN; ALI; SALMAN, 2015; WEN *et al.*, 2016). Para que os RCC sejam potencialmente recicláveis, esses deverão atender condutas legais, tais como legislações, resoluções, instruções normativas, prescrições de normas técnicas e ensaios padronizados que viabilizem o uso do material reciclado, bem como, apresentar características semelhantes a do material a ser substituído de modo que assegure o desempenho satisfatório quanto a aplicação pretendida.

Ressalta-se ainda que os muros de solo reforçado são utilizados em diversas obras geotécnicas, em decorrência de atenderem as demandas de projeto, bem como ao aspecto custo-

benefício. Koerner e Soong (2001) e Avesani Neto, Hayashida e Pereira (2013), por meio de análise comparativa entre técnica versus custo, apontaram que a aplicação de geossintéticos como elemento de reforço é a menos onerosa em relação a outras técnicas convencionais. Urashima e Martins (2004) abordam sobre a necessidade de ensaios que comprovem o desempenho técnico dos materiais utilizados como reforço e como paramento, e ensaios que avaliem os parâmetros da interface de conexão entre esses elementos, especificamente, blocos, geogrelha e agregados. A ABNT NBR 16920-1 (2021) descreve a importância do paramento em garantir a estabilidade local, evitar a erosão da face e dar um acabamento estético adequado. A verificação da conexão entre reforço e paramento, faz necessária para evitar falhas locais (COLLIN, 2001).

O emprego de materiais geossintéticos em obras de engenharia contribui para o desenvolvimento sustentável por apresentar aspectos relativos à substituição de recursos de matéria-prima de fontes esgotáveis, apresentar-se como alternativa de material viável em projetos mais complexos; atender demandas antes não possíveis; possuir custos competitivos em relação aos materiais convencionais; e ter uma quantidade total de emissões de GEE menor que as demais soluções alternativas (CHRISTOPHER, 2014; DIXON; FOWMES; FROST, 2017; KOERNER, 2012; TOUZE, 2021).

O potencial de reciclagem dos resíduos está intimamente ligado à avaliação de suas características e propriedades físicas, químicas e mecânicas, bem como, do seu comportamento com o meio ao qual foi empregado. Uma maior quantidade de informações e conhecimento a respeito do emprego de resíduos favorece a estruturação de uma cadeia de reciclagem. A ampliação do uso de RCC em obras geotécnicas se dará com normas e procedimentos para aplicações onde os materiais possam desempenhar funções com segurança, tal como é para a produção de concreto estrutural em que os agregados reciclados são utilizados para compor a dosagem do produto.

O agravamento das mudanças climáticas, percebidas por meio de eventos extremos na dinâmica da atmosfera, compõem uma parte das questões que colocam a humanidade frente a problemática ambiental contemporânea, ou seja, impasses sistêmicos e complexos no sentido das interações entre os sistemas naturais e antrópicos, com consequências cumulativas e vão para além das fronteiras nacionais (COP27, 2022).

As mudanças climáticas causam a intensificação dos eventos climáticos extremos, bem como as incertezas sobre o regime de chuvas e secas, e de outros eventos de ordem natural. A imprevisibilidade da ocorrência traz maior insegurança, principalmente para populações mais vulneráveis, visto que a ocupação urbana desta parcela da sociedade é quase sempre irregular,

de modo a buscar áreas mais propensas às catástrofes, tal como topo de encostas e áreas de baixo revelo próximas às margens de cursos hídricos. Diante disso, o monitoramento dessas áreas e a tomada de ações que visam garantir a segurança da população se torna imprescindível, uma vez que envolve a garantia de vidas humanas, do patrimônio e da harmonia do homem com o meio ambiente.

Alinhada aos ODS e ações que visam mitigar ou prevenir catástrofes oriundas da ocorrência de eventos climáticos, especificamente no que tange aos movimentos de terra e deslizamentos de encostas, as soluções de contenção do tipo muros de solo reforçado permitem atribuir às cidades características de cidades resilientes, garantindo segurança à população e ao patrimônio, bem como configurando o aspecto sustentável quanto ao menor uso de produtos cimentícios. Investigar os mecanismos que podem causar alterações no comportamento dessas estruturas é um modo de tornar tais soluções alternativas com maior visibilidade de mercado, diminuindo a insegurança e a resistência do seu emprego frente as soluções em contenção convencionais.

Ressalta-se que a prática da reciclagem de RCC promove a conservação de recursos naturais, tais como os agregados virgens, reduz o consumo de espaço destinado à deposição de resíduos inertes em aterros, economiza energia e reduz a emissão de GEE na atmosfera (MAMIROV; HU; CAVALLINE, 2022), bem como acarreta na geração direta de empregos.

A necessidade de buscar novas hipóteses de aplicação despertou o interesse desta pesquisa, que visa contribuir para a prática da reciclagem, bem como reinserir os RCC como insumo alternativo em soluções de engenharia com o intuito de reafirmar e ampliar o potencial uso dos resíduos e dos geossintéticos, bem como integralizar os aspectos de sustentabilidade de modo holístico com o emprego de solução alternativa para questões relacionadas à segurança dos assentamentos humanos nas cidades.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 PROBLEMÁTICA

O crescimento exponencial da ICC vivenciado nas últimas décadas, principalmente nos países em desenvolvimento, se dá, sobretudo, em razão da grande demanda apresentada pelo mercado imobiliário e de infraestrutura. Tal crescimento é o reflexo do aumento da população nos centros urbanos. Desta correlação pode-se inferir que a construção civil é um dos segmentos industriais mais importantes, atuando como indutor de desenvolvimento econômico e social em qualquer país (ASLAM; HUANG; CUI, 2020; VIEIRA; NOGUEIRA, 2018).

Os agregados naturais, especificamente areias e britas, são utilizados na ICC na execução de concretos e argamassas cimentícias, de drenos, filtros, lastros de ferrovias, fabricação de gabiões, fabricação de artefatos pré-moldados, muros de contenção, bases e sub-bases de pisos e pavimentação. A extração dos recursos minerais e a produção de agregados naturais ocorre em função das demandas geradas pelo crescimento populacional e urbano (LA SERNA; REZENDE, 2013). Neste contexto, o volume de extração de recursos minerais e produção bruta/beneficiada de agregados naturais é diretamente influenciado pela urbanização e demandas de interesse social, tal como o saneamento, moradia, entre outras. A **Figura 2** ilustra uma obra de drenagem de canal na cidade de Varginha, MG, no ano 2021, que exemplifica o consumo de agregados naturais.

Figura 2. Obra de drenagem de canal, Varginha, MG, 2021.



Fonte: Do autor.

A publicação mais recente do Anuário Mineral Brasileiro (AMB) do Departamento Nacional de Produção Mineral¹ (DNPM) (BRASIL, 2010a), que disponibiliza dados

¹ O Departamento Nacional de Produção Mineral foi extinto pela Lei nº 13.575 de 26 de dezembro de 2017 e para assumir as suas atribuições, essa lei, criou a Agência Nacional de Mineração (ANM), instituição em atividade nos tempos atuais.

quantitativos relacionados à lavra de diversos recursos no ano de 2009, não disponibilizou os dados referentes às reservas de agregados naturais comumente utilizados na ICC, tal como areia e rocha britada/cascalho. O fato é que, os dados relacionados às reservas de agregados naturais (areia e rocha britada/cascalho) tiveram sua última divulgação publicada há cerca de duas décadas, no AMB de 2001, no qual, o valor das quantidades faz referência às reservas medidas no ano anterior à referida publicação (BRASIL, 2001). Na **Tabela 1** são indicadas as quantidades e o referido percentual de distribuição de reservas de areia e cascalho, e pedras britadas disponibilizados no AMB de 2001.

Tabela 1. Volume de reservas distribuídos por UF de matéria-prima para agregados naturais no ano 2000.

Substância	UF	Quant. de reserva medida (m³)	%
Areia e cascalho	SP	419.971.493	59,70%
	RS	61.721.041	8,77%
	PR	46.871.292	6,66%
	SC	41.530.391	5,90%
	Outros ¹	133.400.008*	18,96%
	Total	703.494.225	100,00%
Pedras britadas	SP	1.634.954.127	23,16%
	AL	1.568.876.180	22,22%
	MG	1.043.052.877	14,77%
	PR	400.404.237	5,67%
	Outros ²	2.413.457.866*	34,18%
	Total	7.060.745.287	100,00%

¹ MG, MS, PA, GO, BA, ES, DF, RJ, CE, PB e SE.

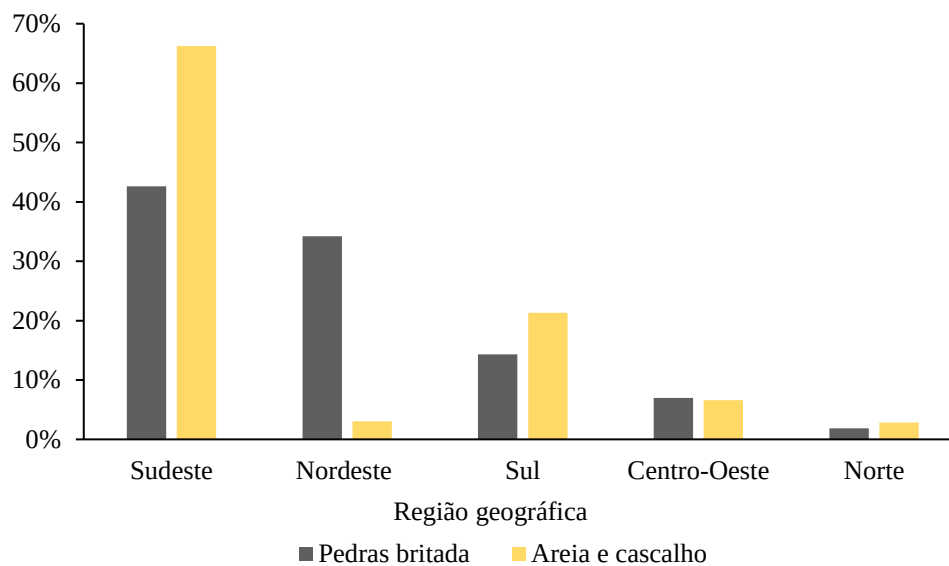
² RS, RJ, GO, SC, PB, CE, BA, MS, TO, PE, PA, ES, RN, SE, MT, MA, PI e RO.

* Valores acumulados de quantidades individuais que representam menos de 5% do total.

Fonte: Adaptado de AMB (BRASIL, 2001).

Se tratando dos dados disponibilizados na publicação do AMB (BRASIL, 2001), observa-se a concentração de maior parte das reservas na região Sudeste do país, como ilustrado na **Figura 3** e com destaque para o estado de São Paulo, conforme apresentado na **Tabela 1**.

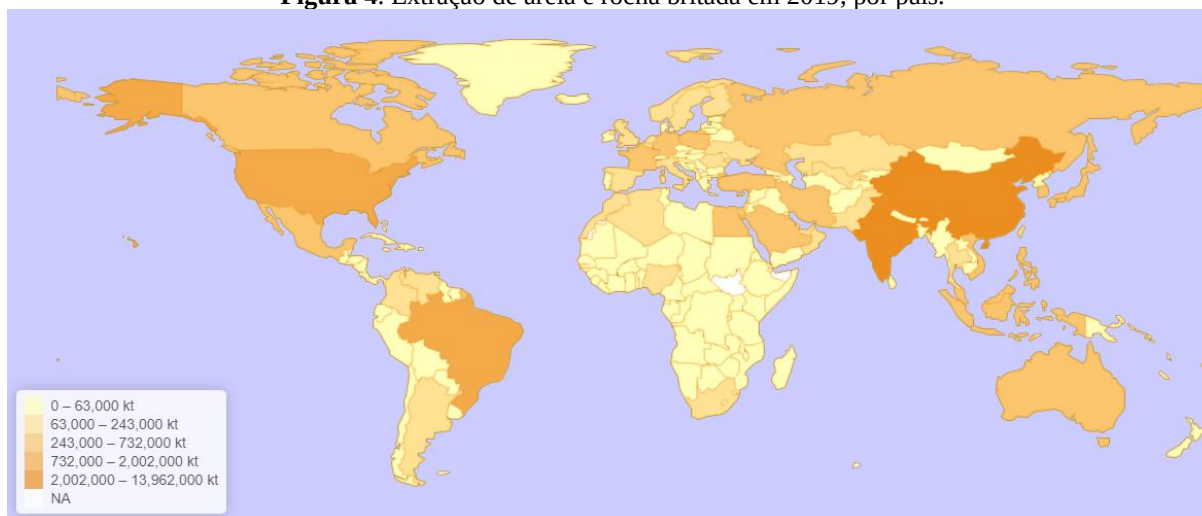
Figura 3. Percentual de reserva medida de matéria-prima distribuída por região geográfica no ano de 2000.



Fonte: Do autor.

A partir do ano 2000, houve um aumento de investimentos por parte das mineradoras para a melhoria da estrutura de produção. Em 2009, a parcela de quantidade bruta correspondia a 2,33% da quantidade beneficiada, enquanto que no ano de 2000, a mesma parcela correspondia a cerca 95,94%, demonstrando que o direcionamento do investimento financeiro surtiu como efeito o volume da produção e que a indústria de agregados passou a fornecer efetivamente seus produtos beneficiados para outros setores que utilizam agregados para compor seu produto ou serviço (BRASIL, 2010a).

No entanto, segundo dados disponibilizados pela *Vienna University of Economics and Business* (WU Vienna), no ano de 2019, no Brasil foram extraídos cerca de 731,5 Mt de areia e rocha britada destinadas as atividades da construção civil (WU Vienna, 2022). A **Figura 4** ilustra a extração de areia e rocha britada no mundo, destaque para a China, Índia e Estados Unidos, países responsáveis pela extração das maiores quantidades desses agregados no ano de 2019.

Figura 4. Extração de areia e rocha britada em 2019, por país.

Fonte: Adaptado de WU Vienna (2022).

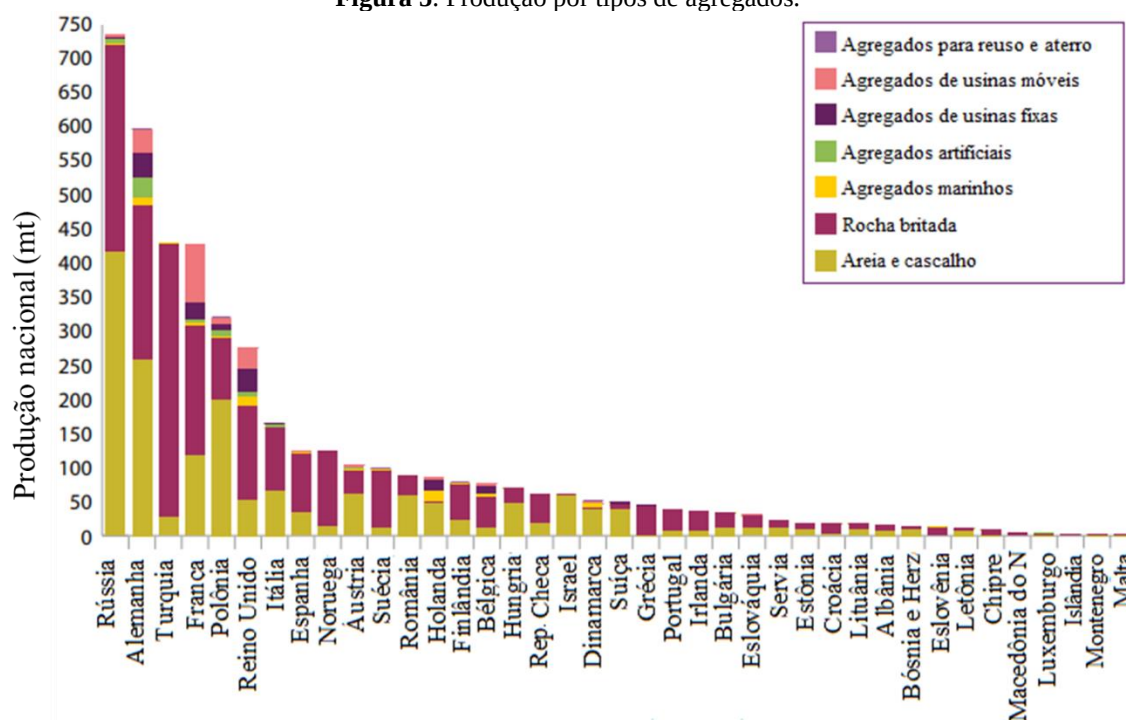
O alto valor do consumo de matéria-prima na indústria da construção torna-se um dos principais fatores que acarretam em poluição e danos ambientais, além do esgotamento dos recursos naturais e minerais, podendo-se alcançar níveis em torno de 50% pela demanda por recursos naturais (KWAN *et al.*, 2012; MALTA; SILVA; GONÇALVES, 2013). Segundo Bessa, Mello e Lourenço (2019), a extração de agregados naturais causa impactos de ordem ambiental, pela modificação da paisagem, bem como econômicos, pelos custos de transportes.

O principal consumidor de agregados naturais, é a construção civil, a qual consome da produção bruta 68,96% de areia e 40,71% de brita e da produção beneficiada 96,54% e 63,73% respectivamente, com destaque para o estado de São Paulo como maior consumidor de areia de produção bruta (23,01%) e beneficiada (70,83%), e de brita de produção beneficiada (42,01%) (BRASIL, 2010a).

Segundo a *Union Européenne des Producteurs de Granulats* (UEPG), organização que promove os interesses dos membros da indústria de agregados na Europa, a produção de areia e cascalho, e rochas britadas em 2018, foi de 1,19 bilhões de toneladas e 1,43 bilhões de toneladas, respectivamente (UEPG, 2021). A maior parte da produção europeia é de agregados naturais, com enfoque na produção de areia e cascalho, e rocha britada. A **Figura 5** apresenta a produção por tipo de agregado nos países que compõem a UE28² e EFTA³ em 2018.

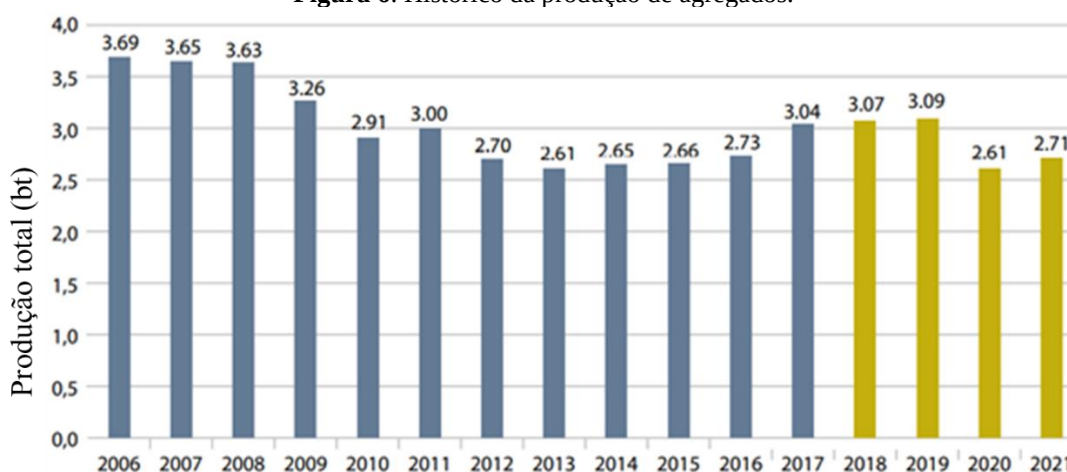
²*Union Européenne des vingt-huit* – Membros da União Européia: Áustria, Bélgica, Bulgária, Croácia, Chipre, República Tcheca, Dinamarca, Estônia, Finlândia, França, Alemanha, Grécia, Hungria, Irlanda, Itália, Letônia, Lituânia, Luxemburgo, Malta, Holanda, Polônia, Portugal, Romênia, Eslováquia, Eslovênia, Espanha, Suécia e Reino Unido.

³*European Free Trade Association*: Associação Europeia de Livre Comércio composta por Islândia, Noruega, Suíça e Liechtenstein.

Figura 5. Produção por tipos de agregados.

Fonte: Adaptado de UEPG (2021).

A **Figura 6** apresenta o histórico da produção total de agregados a partir de 2006 e a estimativa a partir do ano de 2018 na Europa. O decréscimo da produção de agregados durante os anos de 2009 a 2017, foi influenciado pela crise na Zona do Euro que iniciou no final de 2009 e se estendeu até a retomada das atividades em crescimento a partir do ano de 2017.

Figura 6. Histórico da produção de agregados.

Fonte: Adaptado de UEPG (2021).

Concomitante ao alto consumo de agregados naturais, há também a geração de RCC. Os resíduos originados durante os processos construtivos de edificações e obras de infraestrutura, são indesejáveis e, muitas das vezes, inevitáveis. A ausência de planejamento de projetos por

parte de gestores e interessados, que visam o gerenciamento durante os estágios do ciclo de vida de um empreendimento, é uma possível razão pela qual são geradas volumosas quantidades de resíduos de construção. Como consequência, uma série de incômodos é evidenciada com a presença desses resíduos e surgem necessidades que envolvem o manejo correto do material gerado, desde a sua coleta até a escolha para sua destinação (AKHTAR; SARMAH, 2018).

Dados da Câmara Brasileira da Indústria da Construção (CBIC) indicaram que a ICC contribuiu com 5,2% do Produto Interno Bruto (PIB) e gerou 8,5% de empregos em todo território nacional no ano de 2016 (BRASIL, 2020). Tal crescimento vem acompanhado de um aumento significativo na geração de resíduos sólidos provenientes das mais diversas atividades e em todas as etapas da cadeia produtiva da construção (ARAÚJO; MARTINS; FERREIRA, 2019). Dentro deste contexto, a PNRS prevê o tratamento dos resíduos gerados a partir de atividades de construção, reforma, reparos e demolição, e até mesmo do material resultante de obras de terraplanagem e escavação (BRASIL, 2010b). Os resíduos inertes mais comuns, provenientes de obras de construção e demolição, são concretos, asfalto, areia, tijolos, rochas, entulho e solo. Já os resíduos não inertes mais comuns são madeira, metal, plástico e outros materiais orgânicos. Os resíduos não inertes necessitam de descarte especial em instalações apropriadas, o que acarreta altos custos (CHENG; MA, 2013).

A PNRS, em seu Artigo 9º, aborda diretamente que, na gestão e gerenciamento dos resíduos sólidos contemplados na Lei nº 12.305, deve-se atentar para a ordem de prioridade do manejo de resíduos: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos (BRASIL, 2010b). Entretanto, segundo dados publicados pela Associação Brasileira das Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE), no ano de 2020, foram coletados cerca de 47 milhões de toneladas de resíduos da construção, enquanto, no ano de 2010, foram cerca de 33 milhões de toneladas, evidenciando um aumento da geração *per capita* de 174,3 kg/hab/ano para 221,2 kg/hab/ano (ABRELPE, 2021).

A falta de manejo adequado dos resíduos da construção representa ameaça ao meio ambiente, uma vez que, dependendo da natureza dos constituintes que compõem o volume destinado ao descarte, esses podem ser classificados como perigosos (BRASIL, 2020). Somado a isto, a ausência ou omissão de dados quantitativos que expressem valores volumétricos reais dos resíduos gerados pode vir a agravar os impactos ao meio ambiente (CARVALHO; SCHEER, 2015). Ademais, a falta de informações dos volumes gerados pode ser um obstáculo para diagnosticar os problemas relacionados a origem dos resíduos e, consequentemente, para o gerenciamento eficaz dos mesmos (CHENG; MA, 2013).

2.2 RESÍDUOS SÓLIDOS E SUA TRATATIVA NO BRASIL

Dentre a origem dos resíduos sólidos, estes podem ser classificados em onze tipos, como apresentado na **Figura 7**, tais como: domiciliares e de limpeza, resíduos sólidos urbanos, resíduos de estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços, serviços públicos de saneamento básico, resíduos industriais e de serviços de saúde, resíduos agrossilvopastoris e de serviços de transportes, além de resíduos de mineração e da construção civil.

Figura 7. Classificação dos resíduos sólidos quanto à origem segundo a PNRS.



Fonte: MOVIECO (2013).

Quanto à periculosidade dos resíduos, os mesmos podem ser classificados como perigosos ou não perigosos. Para tanto, se pode tomar como base de classificação lei, regulamento ou norma técnica, sendo que, para este último, tem-se a norma ABNT NBR 10004 (2004), que classifica os resíduos sólidos quanto aos seus potenciais contaminantes ao meio ambiente e à saúde pública, para que possam ser gerenciados adequadamente e reinseridos na cadeia produtiva dos serviços da ICC.

Referente à construção civil, o Artigo 13º da PNRS, Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, destaca os resíduos da construção como: “[...] os gerados nas construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, incluídos os resultantes da preparação e escavação de

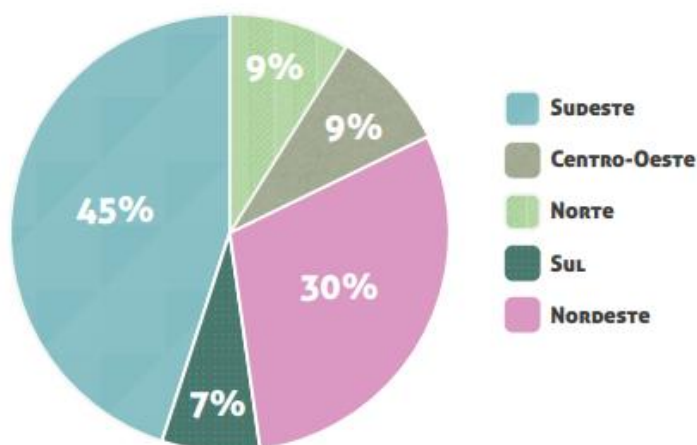
terrenos para obras civis [...]” (BRASIL, 2010b, Art. 13, inciso I, alínea h).

Considerando os resíduos gerados pela cadeia produtiva da construção civil, os eminentes impactos oriundos de sua disposição inadequada e a possível reutilização e reciclagem destes resíduos, a PNRS é aplicada como instrumento normativo para a gestão integrada desses e a sua contribuição na sustentabilidade da ICC.

2.2.1 Custos envolvidos no manejo dos resíduos sólidos

A ABRELPE publicou um estudo sobre “Estimativas dos custos para viabilizar a universalização da destinação adequada de resíduos sólidos no Brasil” (ABRELPE, 2015), no qual estimou-se que, para o país atender as diretrizes da PNRS até o ano de 2031, será preciso investir cerca de R\$ 11,6 bilhões no setor de infraestrutura (média de R\$ 700 milhões anuais) para contemplar a completa destinação adequada dos resíduos sólidos gerados, além do somatório de R\$ 15,59 bilhões/ano ainda necessários para o custeio de operação e manutenção de estruturas para disposição que deverão ser construídas. A **Figura 8** ilustra a distribuição percentual destes investimentos necessários por regiões brasileiras. A mesma pesquisa apontou que a política pública brasileira investe apenas uma média de 2,2% do Produto Interno Bruto (PIB) nos setores de infraestrutura e saneamento.

Figura 8. Distribuição regional dos investimentos necessários aos RSU no Brasil.



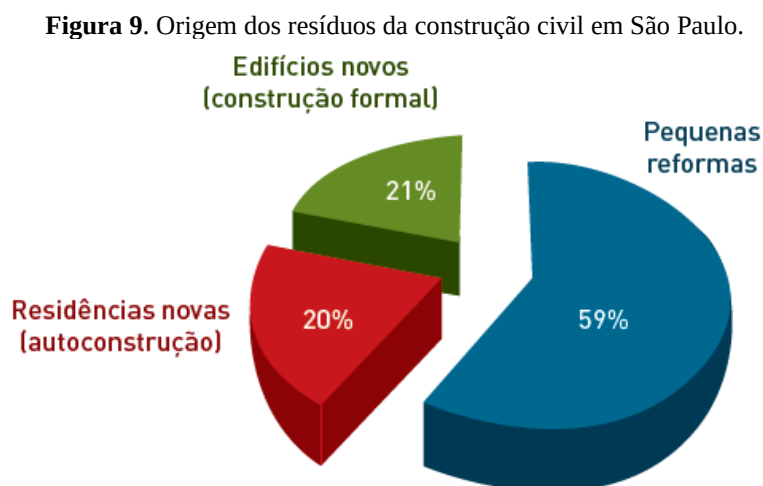
Fonte: ABRELPE (2015)

2.2.2 Aspectos gerais dos resíduos sólidos gerados pela indústria da construção civil

No Brasil e no mundo, os RCC são considerados um dos principais problemas nas áreas urbanas em razão de sua geração e descarte inadequados, causando eminentes impactos ambientais, sociais e econômicos. Tais resíduos apresentam alto potencial poluidor se

descartados no meio ambiente, podendo ocasionar o aterramento de nascentes e corpos d'água, danos à paisagem, entupimento de canais de drenagem, obstrução de galerias de águas pluviais, poluição visual, obstrução de vias de tráfego, proliferação de vetores nocivos à saúde, dentre outros (CHEN *et al.*, 2017; SADATI; KHAYAT, 2016).

Os RCC são gerados desde a fase de construção, em decorrência das perdas geradas no processo construtivo, fase de manutenção e reformas, como correção de patologias, reformas de edificações, descarte de componentes que tenham degradado e atingido sua vida útil, até a fase de demolição, conforme exemplificado na Figura 9, além daqueles originados em decorrência de catástrofes naturais. Segundo o Sinduscon-MG (2014), os resíduos da construção civil gerados em Belo Horizonte representam, em média, 34% dos resíduos sólidos destinados diariamente para os equipamentos públicos de disposição final.



Fonte: Sinduscon-MG (2014).

A norma ABNT NBR 10004 (2004) classifica os RCC como resíduos sólidos não perigosos e inertes (Classe IIB). Além disso, o Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA), órgão consultivo e deliberativo do Sistema Nacional do Meio Ambiente (SISNAMA) do Ministério do Meio Ambiente (MMA), publicou a Resolução nº 307 (BRASIL, 2002), alterada pela Resolução nº 469 (BRASIL, 2015), que trata diretamente de diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos RCC. Contempla a classificação destes resíduos em quatro tipos, atribui responsabilidades ao poder público e aos geradores no que tange a destinação final, além da imposição aos geradores da obrigatoriedade de reduzir, reutilizar e reciclar, nos casos em que, prioritariamente, não se puder evitar a sua geração.

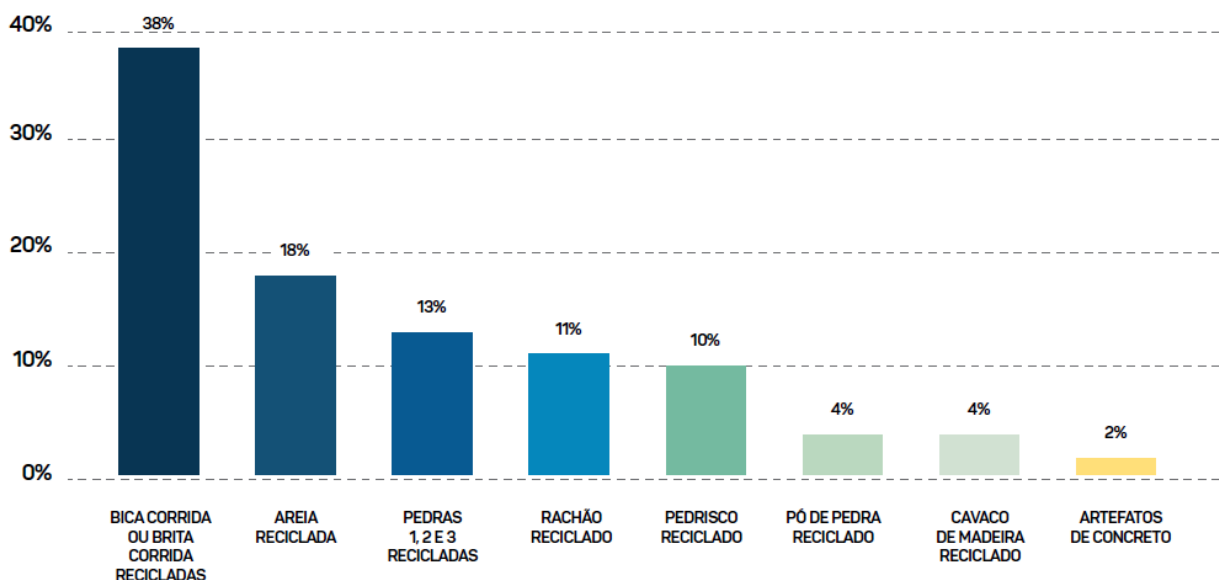
Por último, com a publicação da Lei nº 12.305/2010 (BRASIL, 2010b), os municípios brasileiros precisam elaborar o Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos,

incluindo, nesta temática, os planos municipais de gestão de resíduos da construção civil (PMGRCC). Por exemplo, pesquisa realizada por Fernandes e Silva Filho (2017) apresenta uma listagem de municípios brasileiros que apresentam um plano de gestão de resíduos da construção civil a partir de dados coletados entre 2009 a 2013 e a sumarização das principais práticas adotadas para o gerenciamento de tais resíduos, como a reserva e reinserção.

2.2.3 Reciclagem e reutilização de resíduos da construção civil (RCC)

Pesquisa realizada por Miranda *et al.* (2016) a partir do levantamento entre usinas de reciclagem de RCC no Brasil reportou que os resíduos que chegam às usinas no Brasil para reprocessamento são passíveis de reciclagem e reutilização como agregados reciclados, uma vez que 50% são resíduos mistos (cimentícios e cerâmicos), 19% são predominantemente cinzas (concreto, argamassa e cimento), 11% são de composição cerâmica (cerâmica, telhas de barro e congêneres) e 1% de origem predominantemente concreto. Além disso, a **Figura 10** apresenta um quantitativo quanto aos materiais reciclados produzidos em usinas de reciclagem no Brasil para o ano de 2015 (BRASIL, 2020).

Figura 10. Materiais produzidos pelas unidades de reciclagem de RCC no Brasil no ano de 2015.



Fonte: Brasil (2020).

A reciclagem e reutilização desses resíduos, além de mitigar inúmeros impactos sociais, ambientais e econômicos, acarretam na diminuição da demanda por agregados naturais e contribui para preservação de recursos naturais (BUDKE; CARDOSO; VALE, 2011; OSSA;

GARCÍA; BOTERO, 2016). A **Tabela 2** apresenta um quadro com a classificação dos resíduos da construção civil e a sua destinação final.

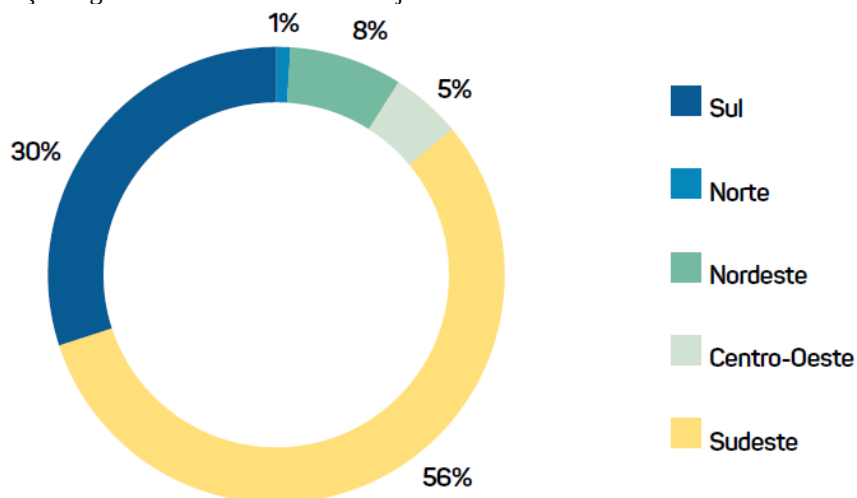
Tabela 2. Classe em que deve ser enquadrado os RCC segregados segundo a Resolução Conama nº 307/2002 (e suas alterações).

Classe	Resíduos/composição	Destinação
A	Resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como os de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de terraplanagem; de reformas e reparos de edificações: componentes cerâmicos, argamassa e concreto; e de processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto.	Deverão ser reutilizados ou reciclados na forma de agregados ou encaminhados a aterro de resíduos classe A de reservação de material para usos futuros.
B	Resíduos reutilizáveis ou recicláveis como para outras destinações, tais como: plásticos, papel/papelão, metais, vidros, madeiras, gesso e outros.	Deverão ser preferencialmente segregados na obra e encaminhados posteriormente para área de armazenamento ou central de resíduos temporário, de modo a permitir a sua reutilização ou reciclagem futura.
C	Resíduos reutilizáveis os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem ou recuperação.	Deverão ser acondicionados e armazenados de forma adequada para posterior, transporte e destinação final em conformidade com as normas técnicas e legislações ambientais específicas.
D	Resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como tintas, solventes, óleos e outros ou aqueles contaminados ou prejudiciais à saúde oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros, bem como telhas e demais objetos e materiais que contenham amianto ou outros produtos nocivos à saúde.	Deverão ser acondicionados e armazenados de formas e em local adequado para posterior coleta, transporte e destinação ambiental adequada em conformidade com as normas técnicas e legislações ambientais específicas.

Fonte: Adaptado de Sinduscon-MG (2014).

Aos resíduos com potencial de reciclagem ou reuso, uma das principais condicionantes é a destinação adequada desses a usinas de reciclagem de entulhos, adequadamente separados por tipos e classes, viabilizando a sua segregação na usina e, assim, o seu reprocessamento. A **Figura 11** apresenta o panorama de distribuição de unidades de manejo de RCC no Brasil para o ano de 2015, compreende-se neste quantitativo área de reciclagem de RCC, área de transbordo e triagem de RCC e volumosos, aterro de RCC (inertes), unidade de transbordo de RCC, unidade de triagem de RCC (galpão ou usina), dentre outros. No caso da região Sudeste (56% das unidades de manejo), destacam-se os estados de São Paulo e Minas Gerais com maiores números de unidades de manejo para estes resíduos para os dados supracitados de 2015 (BRASIL, 2020).

Figura 11. Distribuição regional das unidades de manejo de RCC no Brasil no ano de 2015.



Fonte: Brasil (2020).

A **Figura 12** exemplifica a usina de reciclagem de resíduos da construção civil (URRCC) da cidade de Varginha, ECOVIA - Reciclagem de Resíduos da Construção Civil, em operação desde 2016 e sendo a única usina de reciclagem de entulhos localizada no Sul de Minas Gerais. A usina realiza a triagem dos resíduos manualmente para a destinação ao processo, separando-se os resíduos de Classe A e, dentre eles, os resíduos cimentícios e cerâmicos visando a moagem destes separadamente. Esta prática é particularmente adotada na usina como meio de aumentar a aceitação destes materiais reciclados para a sua reutilização na construção civil sem fins estruturais, além da destinação dos agregados moídos de maior composição cimentícia para a fabricação de blocos de concretos reciclados na própria usina, conforme ilustra a **Figura 13**.

Figura 12. Usina de reciclagem de RCC, Varginha (MG).



(a) Recebimento e triagem dos resíduos na usina.



(b) Vista panorâmica.



(c) Detalhes britador de resíduos.



(d) Esteiras transportadoras.



(e) Peneiras para classificação granulométrica.

Fonte: Do autor

Figura 13. Fabricação de blocos de concreto com agregados reciclados na usina URRCC de Varginha (MG).



(a) Equipamento de moldagem e prensagem dos blocos.



(b) Blocos de concreto produzidos com agregados reciclados.

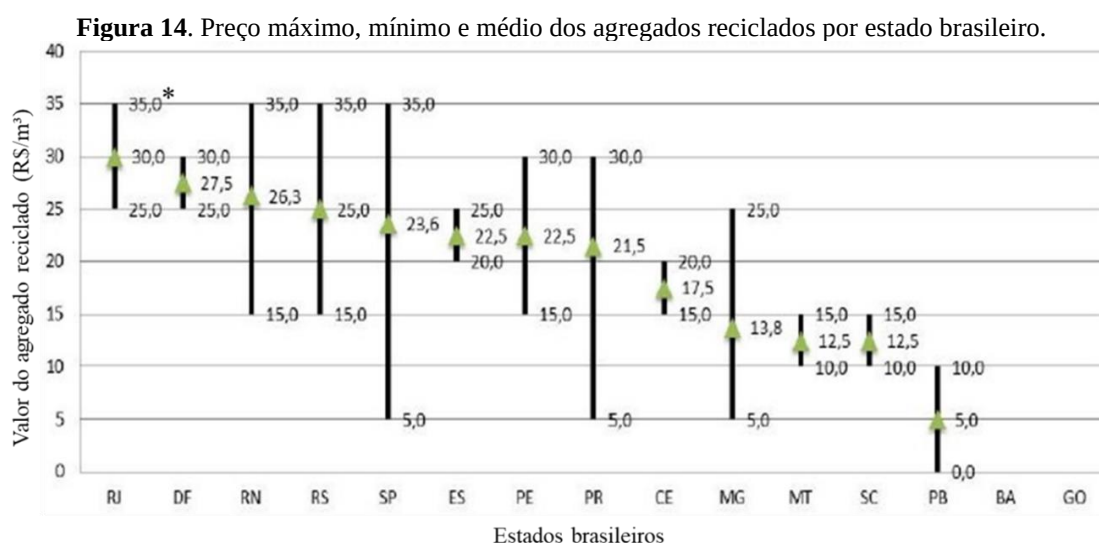
Fonte: Do autor.

Em termos normativos, a ABNT NBR 15116 (2021) trata da reutilização destes materiais reciclados de Classe “A” em aplicações destinadas a concretos de cimento Portland, artefatos pré-fabricados e argamassas com função estrutural, desde classificados como agregados reciclado de concreto (ARCO), salvo algumas limitações quanto ao percentual máximo de

substituição de agregados naturais e quanto à sua exposição ao ambiente. A referida norma ainda descreve outros requisitos para o uso de agregados reciclados na fabricação de argamassa e concretos de cimento Portland.

Além disso, distintas pesquisas vêm sendo realizadas nos últimos anos com a reutilização de agregados reciclados oriundos de usinas de reciclagem, buscando-se a otimização de dosagens que atendam a requisitos de resistência e durabilidade, em conjunto aos benefícios de sustentabilidade a este setor econômico que, de fato, gera grandes volumes de resíduos sólidos ao longo da sua cadeia produtiva. Por exemplo, pesquisas sobre o emprego de areia reciclada em dosagem de argamassas para revestimentos (ASSUNÇÃO; CARVALHO; BARATA, 2007; FARIAS FILHO *et al.*, 2011; MALTA; SILVA; GONÇALVES, 2013; MENEZES *et al.*, 2009) e a reutilização de agregados reciclados em dosagens de concretos para fins estruturais (ARTONI *et al.*, 2017; GONZALEZ-COROMINAS; ETXEBERRIA; FERNANDEZ, 2017; MEDINA; ROJAS; FRÍAS, 2013; WANG; LIU; ZHANG, 2016).

No Brasil, em um estudo realizado por Miranda *et al.*, (2016), em torno de 66% das usinas pesquisadas cobram menos que R\$30,00/m³ de agregado reciclado e 32% das usinas comercializam por menos de R\$20,00/m³, como apresentado na **Figura 14**, o que denota a relação entre a viabilidade financeira e a ambiental. Outro exemplo é referente aos custos de comercialização atribuídos aos agregados obtidos na usina de reciclagem de entulhos da cidade de Varginha (MG) no ano de 2019, que apresentaram o valor de R\$34,00/m³ para areia média e R\$50,00/m³ para brita nº1. Ou seja, tais custos estão em consonância aos apresentados por Miranda *et al.* (2016), considerando a diferença temporal de três anos.

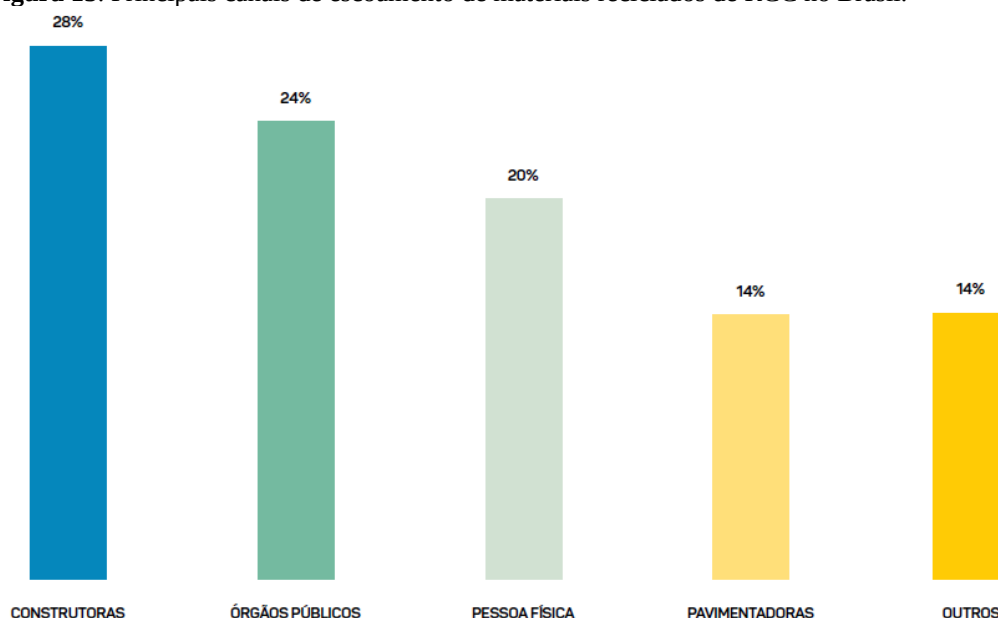


*Preços máximo, médio e mínimo do agregado reciclado.

Fonte: Adaptado de Miranda *et al.* (2016).

Apesar dos custos competitivos supracitados, no Brasil ainda tem-se uma dificuldade para a comercialização de tais agregados que, segundo Miranda *et al.* (2016), as principais causas estão associadas à inexistência de legislação que incentive o consumo de tais materiais, a existência de elevadas cargas tributárias e, ainda, a falta de conhecimento do mercado sobre as características e aplicabilidades de tais materiais. O Plano Nacional de Resíduos Sólidos (Planares) (BRASIL, 2020), documento estratégico que por meio de diretrizes e metas orienta os Estados na elaboração dos Planos de Resíduos Sólidos em consonância com os objetivos da PNRS, apresentou uma sumarização acerca dos principais compradores de RCC no Brasil, apresentado na **Figura 15**.

Figura 15. Principais canais de escoamento de materiais reciclados de RCC no Brasil.



Fonte: Brasil (2020).

Além disso, é importante reportar que os custos referentes à viabilidade de reprocessamento e reciclagem dos RCC também devem pautar custos referentes ao transporte entre as usinas de beneficiamento e os possíveis pontos de reutilização. Neste cenário, almeja-se o aumento de URRCC, agregando-se vantagens para o reprocessamento e maiores volumes de reutilização a custos competitivos aos agregados convencionais. Assim sendo, deve-se colocar em prática planos de gestão de tais resíduos em maior número de municípios brasileiros em consonância às regulamentações e leis publicadas nesta temática para o seu cumprimento, destacando-se a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) e a Resolução Conama nº 307 (BRASIL, 2020).

Silva e Silva (2016) realizaram um estudo de caso sobre o custo da destinação e tratamento dos RCC na cidade de Ituiutaba (MG), localizada no Triângulo Mineiro, gerados por obras públicas e privadas e cuja coleta e deposição são realizadas por empresas licenciadas. Tais autores, apesar de reportarem dificuldades para obtenção de custos efetivos da geração e destinação, pois o depósito destes resíduos é realizado no aterro sanitário da cidade, foi estimado o custo de oportunidade, e não o seu custo efetivo, considerando a destinação de tais resíduos para uma usina de reciclagem seria em torno de R\$3.840,00 por tonelada de resíduos.

Cardoso, Galatto e Guadagnin (2014) publicaram resultados de estimativa para implantação de URRCC na cidade de Criciúma (SC), considerando-se capacidade de operação para a usina de 25 t/h, a partir de levantamento de dados prévios para estimativa de geração de RCC na cidade durante 10 anos seguintes, bem como a estimativa de reciclagem de 80%, o que daria uma receita bruta anual de R\$ 702.635,94. Os custos de implantação, operação e manutenção foram estimados em R\$ 1.213.521,09, sendo que este custo não contemplou aquisição ou aluguel de terreno para implantação da usina de reciclagem. Os autores consideraram que, neste caso, a compra de terreno corresponderia a um acréscimo de 25,63% dos custos de implantação e, para aluguel de um terreno de 7.250 m², corresponderia a R\$30.450,00 anuais. Como conclusão principal, Cardoso, Galatto e Guadagnin (2014) indicaram que o retorno do investimento ocorreria a partir do oitavo ano de operação da usina de reciclagem e com aumento da rentabilidade para os anos seguintes.

Em contrapartida, Evangelista, Costa e Zanta (2010) apresentaram como alternativa, a implantação de centrais de reciclagem de RCC em canteiros de obra, considerando as etapas de implantação, produção e de uso do agregado reciclado *in loco*, em um empreendimento na cidade de Salvador. Segundo os autores, o ganho econômico da reciclagem, foi de R\$ 43,82/m³ de agregado reciclado e devido o tipo de obra de grande porte (condomínio residencial vertical de alto padrão com 18 torres) o investimento para implantação foi significativo, em torno de R\$ 15.686,90. Os autores relataram que seriam necessários aproximadamente 4 meses e duas semanas de produção na central para recuperar o investimento realizado, e que o retorno econômico para os meses posteriores à quitação foi estimado em R\$ 7.011,27/mês. Por fim, a decisão assertiva por parte dos gestores do empreendimento da implantação da central, gerou uma redução de 312 m³ de consumo de agregado natural e 377 m³ de entulho não foram descartados em aterros controlados ou clandestinos.

2.3 AGREGADOS RECICLADOS DE RCC

Angulo (2000) define os agregados reciclados de RCC como aqueles oriundos da reciclagem de resíduos gerados ao longo das diversas atividades da cadeia produtiva da ICC, os quais podem ser classificados conforme as fases constituintes. Para os agregados reciclados de RCC cuja composição é definida sob uma única fase não-metálica, são classificados como agregados reciclados homogêneos, tais como os agregados reciclados de concreto e os agregados reciclados de cerâmica. Já aqueles em que há a presença de mais de uma fase, são classificados como agregados reciclados mistos, em decorrência da presença de diversas fases constituintes, tais como argamassa, cerâmica, solo, materiais betuminosos, madeira, plástico, entre outros, porém, com predominância de fases inorgânicas não-metálica.

Segundo a Resolução nº 307 do CONAMA, os agregados reciclados se enquadram como resíduos da construção na Classe “A”, na qual, é considerada os resíduos oriundos de atividades triviais da ICC, tais como construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infraestrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem, além de oriundos de processos de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (BRASIL, 2002).

A ABNT NBR 15116 (2021) define os agregados reciclados como materiais granulares oriundos de beneficiamento de resíduos de construção gerados por atividades triviais da ICC e os dividem em três subcategorias: agregado reciclado cimentício (ARCI), agregado reciclado de concreto (ARCO) e agregado misto (ARM). Entende-se por ARCI, os agregados reciclados constituídos predominantemente por materiais cimentícios diversos; por ARCO, os que possuem em sua composição a predominância de resíduos de concreto e por ARM, os que são constituídos por mistura de materiais cimentícios e materiais cerâmicos. No entanto, tal norma tem como objetivo principal definir os requisitos e métodos de ensaio para sistematizar a fabricação de argamassas, artefatos pré-fabricados e concreto de cimento Portland que utilizam agregados reciclados em suas composições.

Entre a aplicação de materiais reciclados de RCC, principalmente como agregado reciclado substituto de agregados naturais, tal como componente para a fabricação de argamassas (CARASEK *et al.*, 2018) e concretos (ETXEBERRIA; GONZALEZ-COROMINAS, 2018) ou na composição de aterros de subleito de pavimentação. O uso como material de preenchimento de estruturas de contenção reforçadas com geossintéticos tem fomentado diversos estudos (CARDOSO *et al.*, 2016; FLEURY *et al.*, 2019; SANTOS; PALMEIRA; BATHURST, 2013; SOLEIMANBEIGI *et al.*, 2019; TOUAHAMIA; SIVAKUMAR; MCKELVEY, 2012).

2.4 GEOSSINTÉTICOS

O significado da palavra geossintético pode ser explicado por seu prefixo “geo” e seu sufixo “sintético”. No prefixo, o termo utilizado faz referência ao emprego final do material, destinado à melhoria de estruturas que envolvem o uso de solo ou rocha, e o sufixo é utilizado para se referir à origem do material, neste caso, materiais sintéticos fabricados pelo ser humano. A palavra geossintético, representa uma ampla gama de diversos produtos, fabricados a partir de materiais poliméricos que ao serem empregados em conjunto com solo ou rocha, e qualquer outro material em obras de engenharia, possibilitam a melhoria das propriedades do solo e o desempenho das estruturas (SHUKLA, 2016a). Para Bueno (2004), os geossintéticos além de serem compostos por polímeros, também possuem em sua composição, em menor escala, aditivos que são utilizados no processo de fabricação com o intuito de melhorar o processo fabril ou alterar propriedades dos polímeros básicos.

Definição semelhante para geossintético é apresentada na ABNT NBR ISO 10318-1 (p.2, 2021), para a qual o uso genérico do termo faz descrição de “ um produto em que ao menos um de seus componentes é produzido a partir de um polímero sintético ou natural, sob a forma de manta, tira ou estrutura tridimensional, utilizado em contato com o solo ou outros materiais, em aplicações da engenharia geotécnica e civil”. Lopes, Barroso e Neves (2020), também apresentam uma definição semelhante à descrita na referida norma, em que o termo geossintético se refere a um material constituído por pelo menos um elemento polimérico de origem sintética na forma de tela, tira ou estrutura tridimensional, empregados em obras de engenharia civil e geotécnica.

Palmeira (2018) descreve os materiais geossintéticos como produtos oriundos de polímeros manufaturados ou naturais, empregados em obras geotécnicas ou de proteção ambiental como solução de diversos problemas de engenharia, inclusive àqueles que requerem elevada vida útil de projeto e inclui aspectos relacionados a durabilidade desses materiais.

Os principais polímeros utilizados na fabricação de geossintéticos são apresentados na **Tabela 3**.

Tabela 3. Tipos de polímeros comumente utilizados na fabricação de produtos geossintéticos.

Tipo de polímeros	Abreviações
Polipropileno	PP
Poliéster	PE
Polietileno de baixa densidade	PEBD
Polietileno de muito baixa densidade	PEMBD
Polietileno de baixa densidade linear	PEBDL
Polietileno de média densidade	PEMD
Polietileno de alta densidade	PEAD
Polietileno clorado	CPE
Polietileno clorossulfonado	PECS
Policloreto de vinila ou vinil	PVC
Poliamida	PA
Poliestireno	PS

Fonte: Adaptado e traduzido de Shukla (2016a).

Os polímeros em forma de grãos são submetidos à ação de temperatura e pressão, resultando em estruturas lineares ou planas. Os produtos de geossintéticos são produzidos a partir do entrelaçamento, ou ligação química, térmica ou mecânica dessas estruturas (LOPES; BARROSO, 2020a).

Segundo a ABNT NBR ISO 10318-1 (2021), os geossintéticos podem ser classificados em três grupos: geotêxteis (GTX) e produtos correlatos aos geotêxteis (GTP); barreiras geossintéticas (GBR) e geocompostos (GCO). O primeiro grupo é composto por geotêxtil não tecido (GTX-NW), geotêxtil tricotado (GTX-K), geotêxtil tecido (GTX-W) e os produtos correlatos, empregados em contato com o solo ou outro material que não se enquadram na definição de geotêxtil, tal como a geogrelha (GGRR), georrede (GNT), geomanta (GMA), geocélula (GCE), geotira (GST), geoespaçador (GSP) e o geoblanket (GBL). O segundo grupo é composto por barreira geossintética polimérica (GBR-P) ou geomembrana, barreira sintética argilosa (GBR-C) ou forro geossintético argiloso e barreira geossintética betuminosa (GBR-B) ou geomembrana betuminosa. Por fim, o terceiro grupo é composto por geocompostos (GCO), definição utilizada para designar produto geossintético fabricado ou montado que tenha ao menos um produto geossintético como seu componente.

As geogrelhas (GGRR), objeto de estudo desta pesquisa, segundo a ABNT NBR ISO 10318-1 (2021) são estruturas planas, fabricadas a partir de polímeros, constituídas por uma malha aberta de tiras perpendiculares, resistentes a esforços de tração, que se cruzam e se

conectam por processos de extrusão, solda ou *interlooping* ou entrelaçamento, e suas aberturas possuem maiores dimensões que os elementos constituintes.

A Tabela 4 apresenta os principais geossintéticos e os polímeros mais comuns utilizados na produção segundo Shukla (2016a).

Tabela 4. Principais geossintéticos e os polímeros utilizados na fabricação.

Geossintéticos	Polímeros utilizados na fabricação
Geotêxteis	PP, PET, PE, PA
Geogrelhas	PET, PP, PEAD
Georredes	PEMD, PEAD
Geomembranas	PEAD, PEBDL, PEMBD, PVC, CPE, PECS, PP
Geospumas	PS
Geotubos	PEAD, PVC, PP

Fonte: Adaptado de Shukla (2016a).

2.4.1 Propriedades e funções dos geossintéticos

As propriedades dos geossintéticos podem variar conforme a finalidade e a função desejada em uma determinada aplicação. Contudo, devido à natureza dos polímeros, em condições de serviço, o seu desempenho é dependente de alguns fatores, tais como temperatura do ambiente e a intensidade, duração e taxa dos carregamentos. Portanto, as propriedades devem ser avaliadas considerando a influência desses fatores e outros mais (SHUKLA, 2016b; PALMEIRA, 2018).

O conhecimento das propriedades dos geossintéticos é fundamental para garantir o bom desempenho do material. Definidas as propriedades do material, é possível realizar o dimensionamento da estrutura. Segundo Lopes e Barroso (2020b), para o dimensionamento é necessário determinar os valores requeridos para cada propriedade em razão da função do emprego do geossintético. As autoras destacam que as propriedades dos geossintéticos podem ser, inicialmente, determinadas por ensaios de laboratório normatizados, o que normalmente é fornecido como especificações técnicas pelo fabricante e são denominadas como valores índices.

Além desses ensaios que visam fornecer valores índices para as propriedades dos geossintéticos, outros visam fornecer propriedades de desempenho. Os resultados obtidos nos

primeiros ensaios são utilizados como referência para comparação entre produtos, atestar o controle de qualidade do fabricante e para aceitação do material na obra, e os resultados dos segundos ensaios, servem para fornecer valores de propriedades aproximados aos encontrados quando o material é submetido às condições de serviço em campo (PALMEIRA, 2018).

Segundo Shukla (2016b), as propriedades físicas básicas de um geossintético são a gravidade específica, massa por unidade de área, espessura e rigidez. O autor cita que para geogrelhas e georredes, propriedades físicas tal como tipo de estrutura, tipo de junção, tamanho e forma da abertura, dimensões das tiras entre outras, são fundamentais a conhecer. Quanto às propriedades mecânicas, o autor cita a compressibilidade, resistência à tração, propriedades de sobrevivência (resistência ao rasgo, resistência a perfuração estática, punção estática, força de ruptura e resistência à fadiga) e propriedades relacionadas à interação solo-geossintético. O autor também descreve as propriedades hidráulicas tal como a porosidade, porcentagem de área aberta e a permeabilidade.

Lopes e Barroso (2020b) definem como as principais funções dos geossintéticos: a separação, filtração, drenagem, reforço, barreira de fluxo, proteção, controle de erosão e estabilização. Um mesmo geossintético pode executar uma ou mais funções, conforme a necessidade do projeto. O **Quadro 1** ilustra as principais funções desempenhadas por tipo de geossintético.

Quadro 1. Principais funções desempenhadas por tipos de geossintéticos.

Geossintético	Principais funções							
	Separação	Reforço	Filtro	Dreno	Barreira	Proteção	Controle de erosão	Estabilização
Geotêxtil	X	X	X	X		X	X	
Geogrelha		X						X
Geomembrana					X			
Geossintético bentonítico					X	X		
Geocompósito drenante			X	X				
Geocélula		X				X	X	X
Georrede				X				

Fonte: Lopes e Barroso (2020b).

A ABNT NBR ISO 10318-1 (2021) descreve os termos relativos às funções de drenagem, filtração, proteção, reforço, separação, controle de erosão superficial, barreira e alívio de tensões. Na parte 2 da referida norma, ABNT NBR 10318-2 (2021), é possível identificar símbolos gráficos e pictogramas relativos aos produtos, funções e aplicações de geossintéticos.

Lopes e Barroso (2020b) apresentam a relação entre algumas propriedades e algumas funções dos geossintéticos. Essa relação é apresentada no **Quadro 2**.

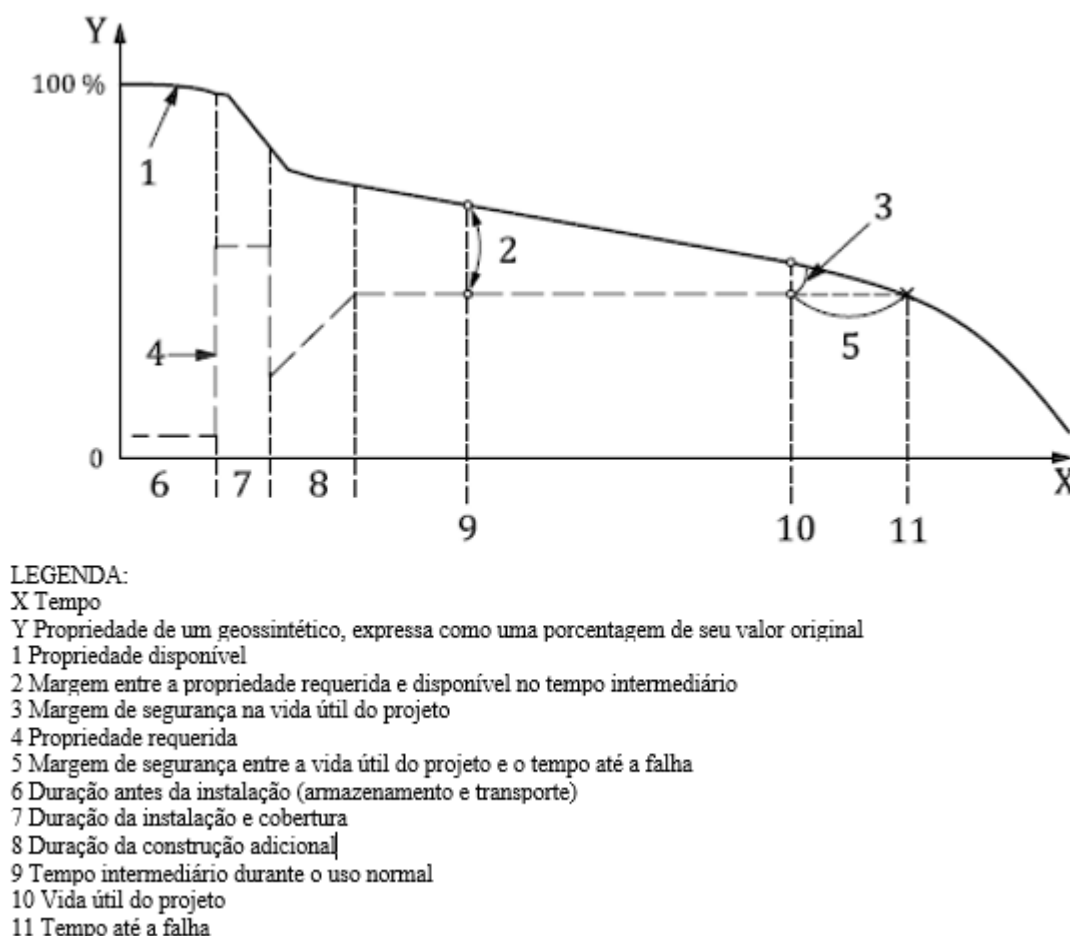
Quadro 2. Relação entre propriedades e principais funções dos geossintéticos.

Propriedades	Funções					
	Filtro	Dreno	Reforço	Separação	Barreira	Proteção
Resistência à tração	X	X	X	X	X	X
Deformação para a carga máxima		X	X		X	X
Resistência ao punçonnemento (estático)			X	X	X	X
Resistência a perfuração dinâmica	X	X	X		X	X
Permeabilidade normal ao plano	X					
Dimensão dos poros	X					
Permeabilidade no plano		X				

Fonte: Lopes e Barroso (2020b).

Para Shukla (2016b) e Lopes e Barroso (2020b), ao iniciar projetos que empregam geossintéticos, a avaliação da criticidade e da severidade das condições específicas do projeto é fundamental. Ambos relatam que tal avaliação possibilita a escolha e a determinação das propriedades que assegurem o bom desempenho do produto durante a vida útil do projeto. Segundo os mesmos, durante o período de vida útil do geossintético ocorrem variações, especificamente, reduções das propriedades em razão de mecanismos adversos, que podem influenciar nas propriedades funcionais dos materiais e acometer em desempenho insatisfatório. Em Lopes, Pinho-Lopes e Carneiro (2020) é apresentado um gráfico que expressa a variação de uma determinada propriedade de um geossintético em função do tempo. A **Figura 16** ilustra as variações ao longo do tempo das propriedades de um determinado produto geossintético destinado a desempenhar uma determinada função qualquer conforme apresentado na ISO/TS 13434 - *Geosynthetics — Guidelines for the assessment of durability* (2020).

Figura 16. Variação das propriedades dos geossintéticos ao longo do tempo.



Fonte: Adaptada de ISO/TS 13434 (2020).

2.4.2 Sustentabilidade e aplicações geossintéticas

A ICC vem nas últimas décadas adotando práticas que contribuem para o desenvolvimento sustentável, tal como o emprego de produtos geossintéticos como solução de problemas de engenharia em uma ampla gama de setores. O emprego de geossintéticos pode contribuir para a redução das emissões de CO₂ da construção e infraestrutura operacional, bem como na adaptação de cidades resilientes contra desastres climáticos extremos, inundações, deslizamentos de terra, seca entre outras aplicações, assegurando o desenvolvimento sustentável e o acesso a serviços fundamentais para uma vida com dignidade (DIXON; FOWMES; FROST, 2017; TOUZE, 2021).

As geomembranas podem ser utilizadas para garantir a qualidade da água em obras de barragens de concreto que apresentem vazamentos, garantindo a estanqueidade da barragem. Em barragens de aterro, podem exercer a função de reforço, assegurando a segurança da barragem (CAZZUFFI *et al.*, 2010). No transporte das águas, a utilização de geomembranas no

revestimento de canais pode reduzir o número de vazamentos em pelo menos dez vezes menos do que em canais revestidos de concreto (GIROUD; PLUSQUELLEC, 2017).

As geomembranas podem ser utilizadas na gestão de resíduos agrícolas, tal como no acondicionamento de estrume, permitindo o confinamento dos gases gerados na degradação anaeróbica, a redução de odores indesejáveis e da proliferação de germes e insetos, e assegurando a qualidade do potencial fertilizante. Os gases gerados na digestão anaeróbica, especificamente o metano, podem ser utilizados na geração de energia de biogás abastecendo subsistemas de energia elétrica e de aquecimento na própria matriz (DEGARIE *et al.*, 2000).

As barreiras geossintéticas podem ser projetadas como revestimento de aterros, mitigando a possibilidade de contaminação do solo e cursos d'água. Além disso, podem ser empregados sistemas de coleta de lixiviados e revestimento de geomembranas, aumentando o potencial de proteção ambiental contra contaminantes. Os geocompostos drenantes também podem ser utilizados para auxiliar no controle de fluidos de entrada e saída do aterro (JAISI; GLAWE; BERGADO, 2005).

Segundo Heibaum (2010), distintos geossintéticos podem proteger áreas susceptíveis à erosão superficial, evitando tanto a perda de área, como também o depósito do solo erodido em cursos hídricos, o que causa o assoreamento, e, consequentemente, restringe a navegabilidade, afetando o *habitat* fluvial, podendo ainda, ocasionar onerosas operações de dragagem (HEIBAUM, 2014).

Além disso, a sedimentação pode elevar o nível dos cursos hídricos e contribuir para o número de áreas de inundação. A utilização de um geotêxtil natural pode ser a solução contra a erosão superficial e proteção costeira, contribuindo para a nutrição do solo e reabilitação da fertilidade do terreno, garantindo a qualidade do cultivo agrícola, bem como proteger os solos de agentes do clima extremo, tal como vento, granizo, insolação intensa, entre outros (ALLEN; SPRAGUE, 2011). A utilização de barreiras de sedimentos (*silt fence*) pode mitigar o transporte de sedimentos para terrenos em cotas mais baixas e, consequentemente, evitar o transporte até cursos hídricos, evitando o assoreamento e a possível contaminação (WHITMAN; ZECH; DONALD, 2019).

Christopher (2014) já relatava em seu estudo quatro benefícios da redução de custos atrelados à sustentabilidade possibilitada pela aplicação de materiais geossintéticos: economia por meio da substituição ou redução de materiais; economia por meio da facilidade de instalação e/ou aumento da velocidade de construção; economia de custo do ciclo de vida por meio de melhor desempenho, medido pelo aumento da longevidade ou redução de manutenção; e melhoria da sustentabilidade em termos de conservação ambiental, em comparação com

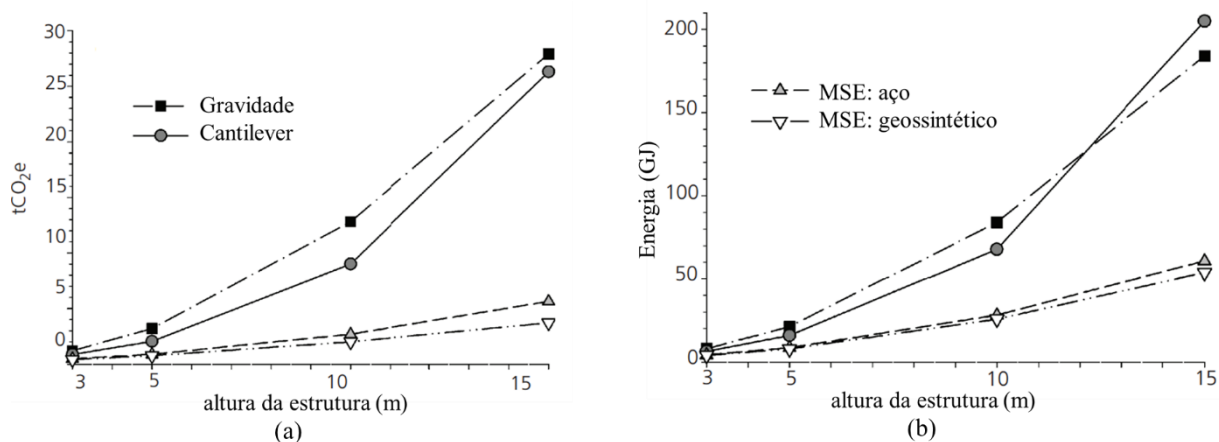
alternativas convencionais. O autor relata a redução do consumo de material utilizado no preenchimento de camadas de subleito e leito de pavimentação, a redução do emprego de concreto e aço em estruturas de contenção, bem como a redução das emissões e a demanda de energia cumulativa.

Segundo a narrativa apresentada por Kuwano, Miyata e Koseki (2014), que aborda a resiliência de 1600 estruturas de solo reforçado com geossintéticos no Japão, que sofreram com a ocorrência de terremotos de magnitude de $M_w = 9.0$ na escala de magnitude de momento (MMS) e tsunamis que alagaram cerca de 40 metros de altura, das analisadas cerca de 1% apresentaram danos significativos, em contrapartida, 90% ficaram intactas. Dos casos observados, algumas estruturas foram danificadas em razão do impacto direto do tsunami, o que acarretou na erosão acelerada de parte do solo de aterro e consequentemente na desestabilização, e posteriormente no colapso das estruturas. Os autores concluíram que as estruturas apresentaram resistência além da requerida em projeto, já que não aderiram condições de contorno referentes a eventos de tamanha intensidade e que falhas locais nas estruturas devem ser tratadas como indicadores de possíveis falhas globais.

Vale ressaltar a contribuição dos projetos que empregam geossintéticos como soluções na redução de impactos ambientais, especialmente na redução de gases de efeito estufa (GEE). Assim, o emprego de produtos geossintéticos em obras de engenharia é uma iniciativa da ICC consolidada com o desenvolvimento sustentável e equilibrada com os dezessete ODS e suas metas, integralizando a Agenda 2030 como um todo (TOUZE, 2021).

Damians *et al.* (2017) apresentou um estudo de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) entre estruturas de contenção de gravidade, *cantilever* e *mechanically stabilised earth* (MSE). As estruturas MSE foram projetadas com reforços de aço galvanizado ou reforço polimérico (geossintéticos). Foram utilizados dois métodos ACV para calcular diferentes impactos ambientais em cada tipo de estrutura executada com alturas de 3, 5, 10 e 15 m. Os resultados mostram que as estruturas MSE em aspectos ambientais foram a solução mais sustentável, especialmente as MSE reforçadas com geossintéticos. A **Figura 17** ilustra a relação entre os impactos ambientais, dos quatro tipos de estruturas em quatro alturas diferentes, avaliados para as categorias de impacto potencial de aquecimento global (a) e demanda cumulativa de energia (b).

Figura 17. Relação entre os impactos ambientais e as alturas das quatro estruturas de contenção.



Fonte: Adaptado de Damians *et al.*, (2017).

2.5 ESTRUTURAS DE SOLO REFORÇADO

2.5.1 Considerações iniciais

As estruturas reforçadas com geossintéticos têm ganhado mercado nos últimos anos, inclusive no Brasil (BRUGGRER *et al.*, 2005; GEROTO *et al.*, 2018). O sucesso disso vai de encontro a obtenção de estruturas cada vez mais verticalizadas, apresentando vantagens técnicas, econômicas e ambientais, desde que obedecidos critérios de projetos, qualidade de execução e realização de manutenções periódicas (DAMIANS *et al.*, 2017; 2018; SOUZA; FRANCO; LINS DA SILVA, 2019).

Tais estruturas são utilizadas como parte imprescindível para o desenvolvimento de uma gama variada de obras e projetos de engenharia, tais como obras de infraestrutura para atender modais viários, como rodoviário, ferroviário e aquaviário, bem como parte da infraestrutura necessária à geração de energia, como em barragens e usinas, e na estabilização de encostas passíveis de movimentação de solo, sendo basicamente, dimensionadas para resistir ao empuxo do solo, possibilitando assim o uso local da região adjacente ao pé e da região localizada sobre a crista do talude ou muro.

Inicialmente, a disponibilidade de tipologias construtivas era limitada às estruturas de contenção tradicionais que faziam uso de concreto armado ou ciclópico, com ou sem inserções de tirantes. No entanto, o custo dessas estruturas convencionais se torna oneroso à medida que aspectos de projeto, tais como a altura e capacidade de suporte da fundação, demandam maior complexidade. Arelado ainda às estruturas convencionais, os projetos que prescrevem o uso de concretos de maiores resistência e/ou o aumento do consumo de cimento, contribuem para o

impacto direto nas emissões de CO₂. Em face dessas dificuldades, foram desenvolvidos muros de gravidade construídos com solo de preenchimento e elementos de reforço, utilizados para melhorar o desempenho mecânico e assegurar a segurança das estruturas de contenção (EHRlich; BECKER, 2009).

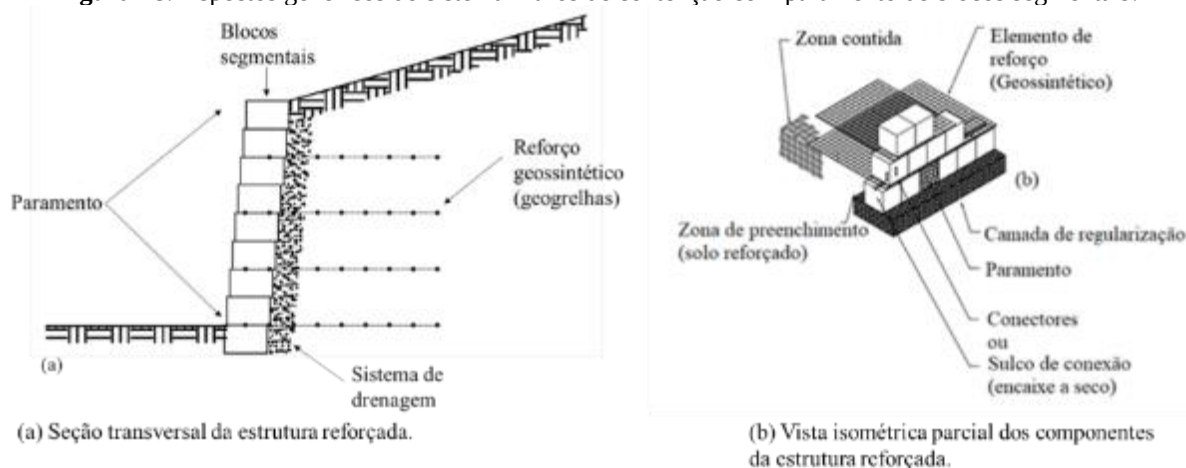
As estruturas de contenção de solo reforçado incluem os muros e taludes de solo reforçado. Conceitualmente, os muros reforçados se assemelham em alguns aspectos aos taludes reforçados, tal como os ligados à sua estabilidade. Contudo, apresentam aspectos intrínsecos, tais como a geometria da estrutura, o paramento com inclinação vertical ou muito próximo a vertical (LESHCHINSKY; BOEDEKER, 1989; PALMEIRA, 2018); os parâmetros de projeto, as superfícies de ruptura dentro da massa de solo reforçado podem apresentar geometria distinta em relação às superfícies de ruptura em taludes íngremes em virtude da inclinação da face; e aspectos construtivos, o paramento dos muros, normalmente, é feito com a instalação de elementos pré-moldados, tais como placas de concreto e blocos segmentais, bem como por elevação de alvenaria, o que difere dos taludes íngremes, em que, geralmente, faz a cobertura vegetal por meio de hidrossemeadura ou plantio de sementes de espécies gramíneas (PALMEIRA, 2018).

Segundo a ABNT NBR 16920-1 (2021), os muros de solo reforçado compreendem as estruturas, nas quais, são aplicados elementos de reforço resistentes a esforços de tração, constituindo assim, uma estrutura semelhante a de um material compósito, com melhor desempenho mecânico frente aos mecanismos de desestabilização do maciço. Quanto aos elementos de reforço, a referida norma cita dois tipos, os metálicos e os geossintéticos. Para os metálicos são exemplificadas as tiras, grelhas soldadas, barras e malhas, enquanto que, para os geossintéticos são exemplificados, os geotêxteis, geogrelhas, geotiras e geobarras. No entanto, a norma não se limita a esses dois tipos, podendo ser utilizados outros, desde que atendam a requisitos de projeto fundamentais à garantia da segurança e desempenho dessas estruturas em vida útil, tais como comportamento tensão versus deformação, resistência aos esforços de tração e durabilidade.

A *Federal Highway Administration* (FHWA) utiliza o termo genérico *Mechanically Stabilized Earth Wall* (MSE wall ou MSEW), como denominação aos muros de solo estabilizado, cuja qual inclui o conceito de solo reforçado. Tal denominação é utilizada para expressar estruturas de contenção onde há inserção de elementos de reforço em várias camadas ao longo da elevação das estruturas, espaçados verticalmente, e que utilizam solo como material de preenchimento (FHWA, 2009).

A *National Concrete Masonry Association* (NCMA) define os muros de solo reforçado como *Reinforced Segmental Retaining Wall* (SRW), como denominação para as estruturas de contenção compostas por paramento, preenchidos com solo mecanicamente estabilizado (NCMA, 2017). A **Figura 18** ilustra um típico sistema de contenção reforçado de muros de contenção compostas por paramento de blocos segmentais.

Figura 18. Aspectos genéricos do sistema muros de contenção com paramento de blocos segmentais.



Fonte: Adaptado de NCMA (2017).

Genericamente, os muros de solo reforçado funcionam como estruturas monolíticas, as quais são inseridos intencionalmente elementos que tendem a melhorar propriedades mecânicas do solo, em especial, a resistência à tração. O uso de materiais fibrosos no solo data de longa data, porém foi apenas em meados da década de 1960 que o engenheiro francês Henri Vidal, fez sua contribuição, ao utilizar fitas metálicas como elemento de reforço. Na década seguinte, os geossintéticos foram utilizados como reforço em estruturas de contenção de solo, possibilitando o desenvolvimento da técnica e a conquista de novos desafios em obras de engenharia (GONÇALVES, 2016).

A **Figura 19** exemplifica um muro de solo reforçado em execução com paramento de blocos segmentais. No exemplo apresentado, é possível identificar os elementos de reforço geossintético (geogrelha), os blocos segmentais utilizados no paramento e o material de preenchimento dos vazios dos blocos segmentais. Os blocos segmentais são preenchidos por material granular, geralmente, rocha britada e é neste contexto em que a pesquisa busca a substituição do agregado natural utilizado no preenchimento dos vazios por agregados reciclados.

Figura 19. Execução de muro de solo reforçado.



Fonte: HUESKER (2016).

No Brasil, o emprego de materiais geossintéticos como elemento de reforço, mais comumente geogrelhas e geotêxteis data do final da década de 1970 (PALMEIRA, 2018; EHRLICH; BECKER, 2009). Contudo, no ano 1984, o sistema construtivo de envelopamento de solo foi utilizado para assegurar a estabilidade de um talude que margeia a rodovia que interliga os municípios de Taubaté e Campos do Jordão, ambos localizados no Estado de São Paulo, próximos a região da Serra da Mantiqueira (CARVALHO; PEDROSA; WOLLE, 1986).

Desde então, o emprego racional de materiais geossintéticos como reforço tornou-se uma alternativa viável frente a outras técnicas de estabilização de solo e vem sendo empregada com frequência como solução geotécnica. A **Figura 20** ilustra a construção de dois patamares de muros de solo reforçado construídos para vencer a altura de 25 metros, suportar base de pavimentação asfáltica e trânsito de veículos, bem como possibilitar o uso do terrapleno no topo do muro segmentado, durante obras de ampliação da rodovia dos Tamoios, km 59,3, para construção de praça de pedágio.

Figura 20. Obra de construção de muro de solo reforçado com blocos segmentais na rodovia Tamoios.



Fonte: FBS - Construção Civil e Pavimentação (2021).

A **Figura 21** ilustra a praça de pedágio da rodovia Tamoios, após o término das obras em plena operação. Detalhe para os muros de solo reforçado com paramento de blocos segmentais.

Figura 21. Sistema de muros de solo reforçado com paramento de blocos segmentais na rodovia Tamoios.



Fonte: HUESKER (2016).

2.5.2 Elementos de reforço

Conforme abordado por Ehrlich e Becker (2009) os muros de solo reforçado podem ser reforçados com reforços metálicos ou geossintéticos.

- i) Reforço metálico: foram muito utilizados no início como inclusões, em forma de tiras de aço, em estruturas de terra armada. As tiras são dimensionadas conforme exigências de projeto e sua aplicação pode onerar os custos da obra em razão de alguns aspectos, tal como vida útil, agressividade do meio e espessura das tiras. Os efeitos da corrosão no reforço devem ser incluídos no dimensionamento e para compensá-los, o projeto exige que à espessura das tiras seja considerado valor adicional, denominado como espessura de sacrifício.
- ii) Reforço geossintético: são utilizados geossintéticos dos tipos geotêxteis tecido, geotêxteis não tecido e geogrelhas. Os geotêxteis tecido são o produto da tecelagem em duas direções de filamentos em forma cilíndrica ou laminetes, confeccionados a partir da extrusão de polímeros derretidos e resfriados. Os geotêxteis não tecido são, basicamente, fabricados a partir dos mesmos filamentos utilizados na confecção dos geotêxteis tecido, no entanto, tais filamentos são cortados em pedaços ou contínuos que posteriormente são lançados em direções aleatórias sobrepondo-se e ligados por processo térmico, resinação com produtos químicos ou entrelaçados por agulhagem. As geogrelhas são produtos de baixa deformabilidade, com elevada resistência à tração, em uma direção (unidirecional) ou em duas direções (bidirecional), e são fabricados a partir de polímeros, tais como polietileno de alta densidade (PEAD), polietileno (PET) e álcool de polivinila (PVA).

Entre os métodos construtivos de sistemas de contenção que utilizam os geossintéticos como inclusões para melhoramento das propriedades dos solos, Ehrlich e Azambuja (2003) destacam dois tipos, o sistema de autoenvelopamento e o sistema de blocos segmentais. No sistema de autoenvelopamento, o geossintético é estendido e uma camada de solo de preenchimento é lançada sobre o reforço e compactada, de modo que as camadas de solo sejam confinadas entre dois reforços. Posteriormente, os geossintéticos são dobrados (ancorados) na parte inferior ou superior da camada. Para garantir a eficiência das etapas construtivas e os aspectos visuais do sistema, são utilizadas como auxílio formas removíveis ou definitivas.

No sistema de blocos segmentais, os elementos de reforço são ancorados pela sobreposição de blocos de encaixe a seco que garantem a verticalidade da estrutura, servem de forma durante a etapa de compactação e como ancoragem dos geossintéticos (GONÇALVES, 2016). As etapas de execução de ambos os sistemas se repetem sucessivamente até atingir as dimensões do projeto.

2.5.3 Interação solo-reforço e bloco-reforço

Antes de iniciar a abordagem do dimensionamento dos muros de solo reforçado, Ehrlich e Becker (2009) atentam para o conhecimento dos fatores que influenciam na determinação da tensão nos reforços. Para isso, os autores citam aspectos relacionados à interação solo e geossintético, tais como as propriedades do solo, a geometria, resistência e rigidez do reforço e as condições de contorno.

A aderência entre o solo e o reforço é um parâmetro fundamental para o geossintético desempenhar a função ao qual foi submetido (BERGADO *et al.*, 1993; HAN *et al.*, 2018; PINHO-LOPES; PAULA; LOPES, 2015), de tal modo que, em situações onde ocorre a formação de uma superfície de ruptura na região posterior ao paramento é indício que a resistência ao cisalhamento do solo foi excedida. Assim, é esperado que o elemento de reforço inserido entre as camadas de solo compactado absorva as cargas provenientes da ruptura do maciço, cargas essas compensadas pela resistência à tração do reforço (ABU-FARSAKH; CORONEL; TAO, 2007).

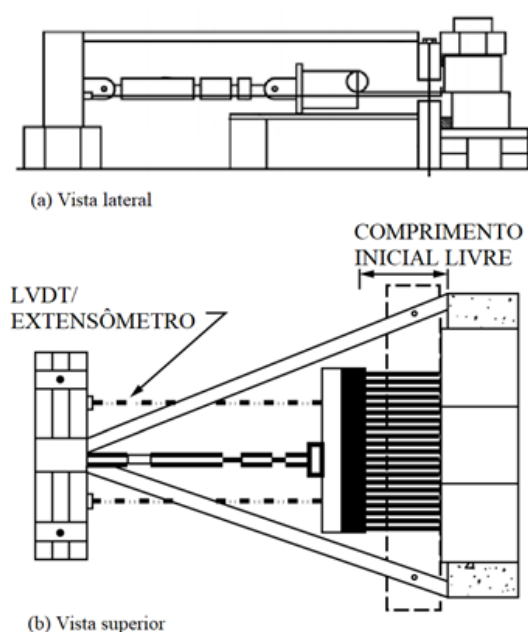
Contudo, os mecanismos de interação entre o solo e reforço dependerão, principalmente, do tipo de geossintético utilizado para tal finalidade. Em situações em que ocorre o emprego de geotêxteis e geobarras, as cargas são transferidas por meio de tensões oriundas do atrito em decorrência do formato do geossintético. Nas geogrelhas, em razão do seu formato, os mecanismos de interação entre solo e geossintético ocorre pelo embricamento do solo confinado no interior dos espaços vazios, pelo atrito lateral dos membros longitudinais e pela resistência passiva nas barras transversais do reforço (EHRlich; BECKER, 2009). Os autores destacam que para o estudo desses mecanismos, dois ensaios são comumente empregados, ensaio de cisalhamento da interface ou ensaio de arrancamento.

Além da interação entre solo e reforço, alguns autores relatam a relação entre bloco e reforço, por meio de ensaios que avaliam a interface de conexão (URASHIMA; MARTINS, 2004; URASHIMA *et al.*, 2006; BERNARDES *et al.*, 2008). Bathurst e Simac (1994) e Vieira (2008) citam que a interação bloco e reforço deve ser analisada para o dimensionamento das tensões do reforço.

A ABNT NBR 16920-1 (2021) preconiza que a verificação da conexão entre o elemento de revestimento do paramento e o reforço deve ou não ser realizada conforme a geometria da estrutura e o sistema construtivo adotado. No entanto, a referida norma descreve que o paramento desempenha as funções de assegurar a estabilidade local, evitar a erosão na face, dar o aspecto adequado e contribuir para a durabilidade da obra.

Como forma de avaliar os esforços na conexão, Urashima e Martins (2004), relataram em um estudo o uso de equipamento de grande porte que possibilitou a análise da interface bloco-geogrelha por meio do ensaio de resistência de conexão, disponibilizando dados de força de pico e deformações da geogrelha de reforço. O equipamento desenvolvido é similar ao equipamento modelo ilustrado e descrito na ASTM D6638-18 (2018), conceitualmente adaptado de Bathurst e Simac (1993) e similar ao desenvolvido por Ali e Bhuiyan (2014a). A **Figura 22** ilustra o modelo de equipamento da ASTM D6638-18 (2018).

Figura 22. Equipamento de ensaio de resistência de conexão.



Fonte: Adaptado de ASTM D6638-18 (2018).

A ASTM D6638-18 (2018) descreve o método de teste usado para determinar propriedades da conexão entre uma camada de reforço geossintético e unidades de blocos segmentais usadas na construção de muros de solo reforçado. O teste é realizado em condições determinadas pelo usuário que reproduzem o sistema de conexão em escala real. Os resultados de força de conexão são organizados em função da carga normal aplicada, de tal maneira que a média de três resultados de força de pico é relacionada com a largura do reforço, a fim de estabelecer a resistência de conexão em unidade de força por comprimento (kN/m).

O comportamento mecânico da conexão é avaliado segundo a resistência última por unidade de largura da amostra, podendo ser expressa pela Equação 1 (BERNARDES *et al.*, 2008; URASHIMA *et al.*, 2006).

$$T_{\text{última}} = \frac{F_p}{C_g} \quad (1)$$

Onde:

$T_{\text{última}}$ – Resistência última de conexão ou resistência de conexão [kN/m];

F_p – Força de ruptura ou de pico [kN]; e

C_g – Largura do corpo de prova ou da amostra [m].

2.5.4 Dimensionamento de muros de solo reforçado

Existem diversos métodos para o dimensionamento de muros de solo reforçado, tais como método de Rankine, de Coulomb, da FHWA (2009), da NCMA (2012), da AASHTO (2002) e de Ehrlich e Mitchel (1994). A ABNT NBR 16920-1 (2021) apresenta alguns métodos conforme a filosofia aplicada no dimensionamento, tais como:

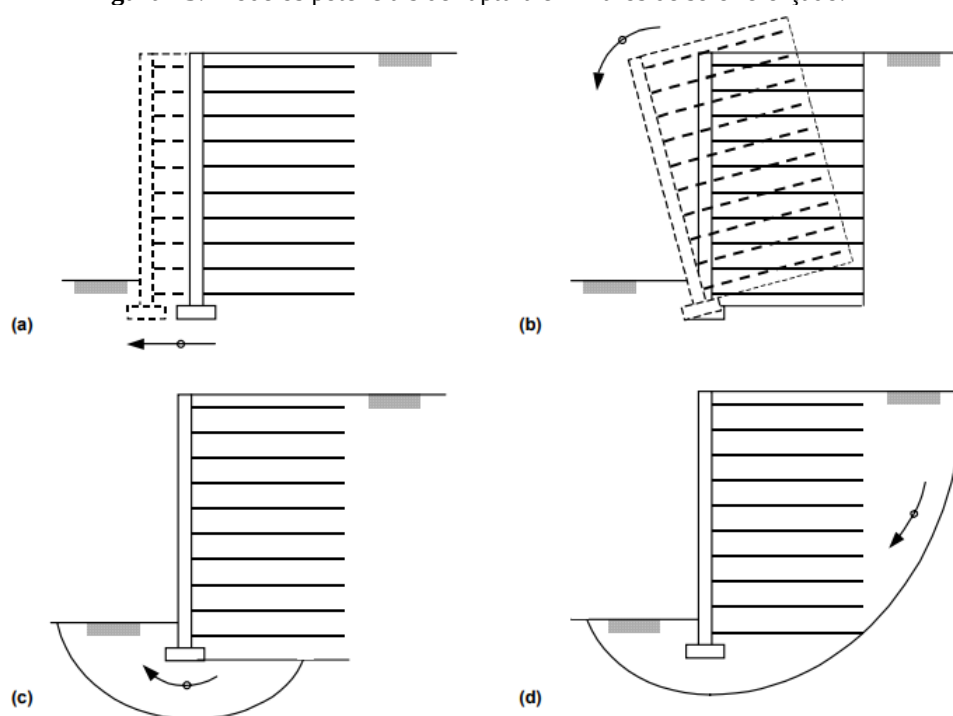
- i) Métodos de homogeneização: partem de uma visão macroscópica, de tal modo, que o solo reforçado apresente comportamento homogêneo e anisotrópico, e que para isso, é recomendado um menor espaçamento vertical entre os elementos de reforço;
- ii) Métodos de equilíbrio limite: consideram modos de ruptura por meio de movimentos de superfície e tem como objetivo satisfazer condições de equilíbrio em razão de forças e esforços atuantes;
- iii) Métodos sob condições de serviço: consideram tensões e deformações previstas na estrutura de contenção;
- iv) Modelagem numérica explícita do maciço reforçado: possibilitam análises de maior complexidade, considerando a interação de um maior número de parâmetro possibilitando avaliar os efeitos da distribuição de tensões e deformação, bem como a simulação de condições adversas para muros de solo reforçado.

Sobre a escolha do método, Souza, Franco e Lins da Silva (2019), relatam que os métodos em condições de serviço e de equilíbrio local apresentam soluções semelhantes. No entanto, ressaltam que os métodos em condições de serviço, são mais realistas em relação a outros métodos. Segundo os autores, a presença ou a ausência de fatores a serem considerados, tais como compactação, restrição à movimentação lateral da base do paramento, rigidez dos reforços e do paramento, influenciam na estimativa da máxima tensão induzida no reforço.

Basicamente, para o dimensionamento dos muros de contenção reforçados são realizadas análises de estabilidade interna e externa. A análise de estabilidade externa segue as mesmas premissas adotadas para muros de gravidade, das quais, citam-se as verificações de segurança

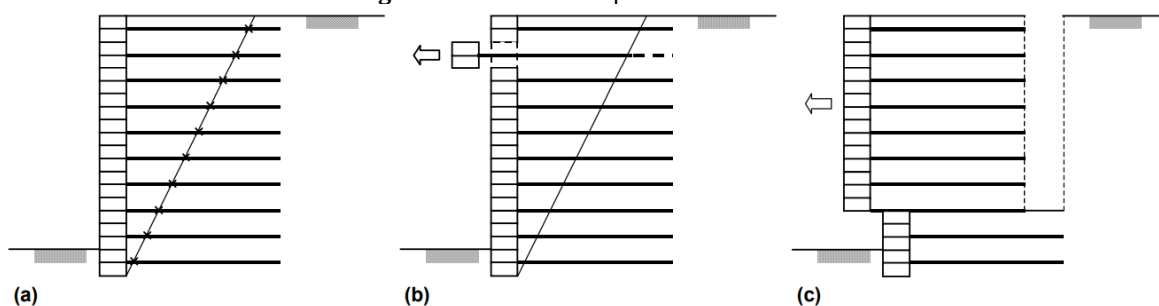
quanto ao tombamento no pé da estrutura reforçada, ao deslizamento da base, capacidade de suporte da fundação e a estabilidade global. Além destas verificações, a análise de estabilidade externa contribui para o pré-dimensionamento da largura da fundação e do comprimento dos reforços a serem embutidos no maciço (AVESANI NETO; GEROTO, 2016). A **Figura 23** ilustra os típicos modelos potenciais de ruptura a serem consideradas na análise de estabilidade externa, que podem ocorrer por (a) deslizamento da base, (b) tombamento, (c) capacidade do suporte de carga e por (d) instabilidade global (EHRlich; BECKER, 2009; VIEIRA, 2008).

Figura 23. Modelos potenciais de ruptura em muros de solo reforçado.



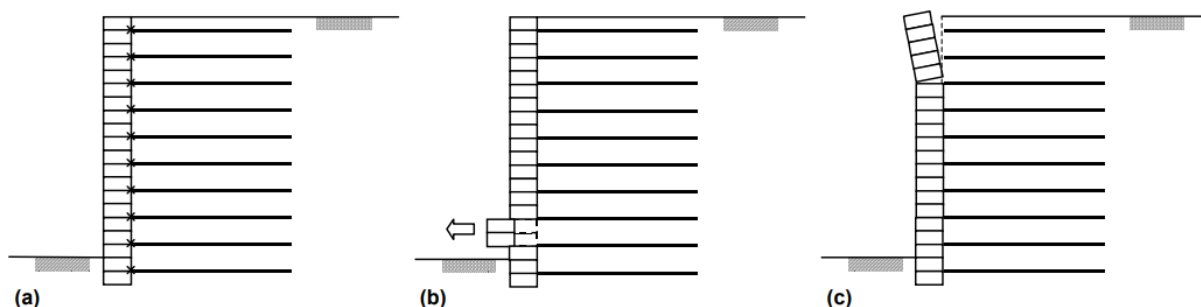
Fonte: Vieira (2008).

A análise de estabilidade interna para dimensionamento tem como propósito definir a resistência mínima, o comprimento e o espaçamento vertical do reforço. A garantia da segurança na análise interna se dá pela verificação quanto a ruptura do reforço por falta de resistência à tração (a), por arrancamento (b), e em estruturas com paramento de blocos, por deslizamento ao nível do reforço (c) (VIEIRA, 2008). A **Figura 24** ilustra os possíveis modos de ruptura na análise da estabilidade interna.

Figura 24. Modos de ruptura na análise interna.

Fonte: Vieira (2008).

Vieira (2008), salienta que deve ser verificada a estabilidade da face, quanto a possibilidade de ruptura local na conexão (a) devido a ação de esforços excessivos e ainda, recomenda a verificação quanto a garantia de que a interface bloco-reforço tenha capacidade para evitar o deslizamento entre os blocos (b) e o tombamento dos mesmos no topo da estrutura (c). A **Figura 25** ilustra os possíveis modos de ruptura na análise da estabilidade da face conforme descrito por Vieira (2008).

Figura 25. Modos de ruptura na análise de face.

Fonte: Vieira (2008).

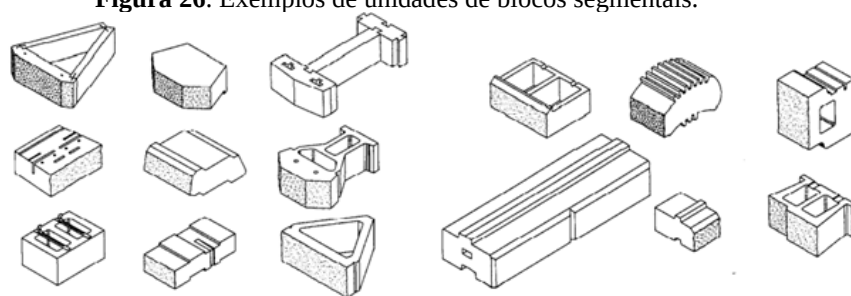
As análises de estabilidade interna e externa das estruturas são preponderantes no dimensionamento projeto e estão condicionadas as propriedades do elemento de reforço, parâmetros do solo de aterro, especificações de drenagem, aplicações de fatores de redução (FR) e de segurança (FS) e o atendimento a questões estruturais e viabilidade de custos (BRUGGER *et al.*, 2005; GEROTO *et al.*, 2018; GERSCOVICH; DANZIGER; SARAMAGO, 2016; KOERNER; SOONG, 2001; SOUZA; FRANCO; LINS DA SILVA, 2019). Além dessas condicionantes, há também a interação dos elementos de revestimento da face da estrutura, os elementos de reforço e o material de aterro (URASHIMA; MARTINS, 2004).

Para Urashima *et al.* (2006), além das análises de estabilidade externa e interna, uma terceira análise de estabilidade deve ser considerada, a estabilidade local, em projetos de estruturas de contenção reforçadas e com paramento de blocos segmentais. Para os autores a interação bloco-reforço deve resistir aos esforços que venham gerar falha da conexão em decorrência das tensões mobilizadas por condições de serviço ou em último caso, por ocasião da ruptura do maciço. Também observaram que o material granular utilizado no preenchimento de blocos, em sistemas segmentados, contribui à melhoria dos mecanismos de interação garantindo o imbricamento dos agregados granulares, o confinamento do conjunto e, conseqüentemente, uma maior resistência de conexão e aos possíveis mecanismos que influenciam a estabilidade local.

2.5.5 Muros de solo reforçado com geossintéticos com paramento de blocos segmentais

Os muros de solo reforçado com geossintéticos com paramento de blocos segmentais se diferem do sistema de envelopamento, principalmente devido ao fato de serem revestidos em sua face com blocos segmentais, nos quais, os elementos de reforço, no caso geossintéticos, são ancorados. Os blocos segmentais utilizados, são fabricados de concreto pré-moldado e possuem geometria variada, conforme as especificações da fabricante, em consonância com normas de padronização que prescrevem as características mínimas necessárias à fabricação dos blocos e em conformidade com o projeto. A **Figura 26** ilustra alguns exemplos de unidades de blocos segmentais.

Figura 26. Exemplos de unidades de blocos segmentais.



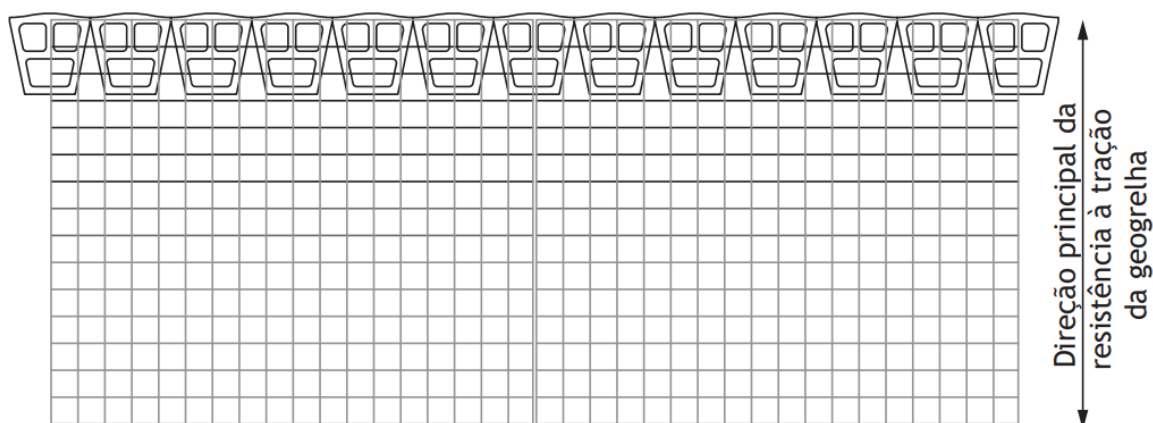
Fonte: Bathurst e Simac (1994).

O processo construtivo ocorre de forma gradual e depende da altura de elevação do muro. À medida que a elevação do muro avança, os blocos são sobrepostos a seco e quando possuem vazios são preenchidos com agregados naturais, convencionalmente rochas britadas. Ressalta-se que os agregados utilizados no preenchimento dos vazios dos blocos, também desempenham

função de drenagem interna da estrutura. Conforme determinado em projeto, os reforços são ancorados ou fixados na parte frontal do bloco, adjacente à face livre da estrutura (PALMEIRA, 2018). Para isto, podem ser utilizados ou não conectores para fixar o elemento de reforço ao bloco, conforme o modelo de bloco utilizado no paramento (BATHURST; SIMAC, 1994). Gradualmente os blocos são sobrepostos, distribuídos os reforços e as camadas de solo de aterro são lançadas sobre os reforços e subseqüentemente compactadas. A priori, é admitida uma pré tensão devido a energia de compactação.

Os reforços são dimensionados conforme análises de estabilidade determinadas em projeto. O dimensionamento, basicamente, define para os reforços, as propriedades requeridas, o comprimento de ancoragem e espaçamento vertical, para os blocos, a resistência à compressão e para o solo de aterro, a energia de compactação (VIEIRA, 2008). Segundo Gerscovich, Danziger e Saramago (2016), reforços de geogrelhas devem ser instalados na direção principal de resistência à tração das barras perpendicularmente ao paramento para não comprometer o comportamento da estrutura. A **Figura 27** ilustra a direção correta da instalação do reforço.

Figura 27. Direção correta de instalação do reforço.
Face em trecho linear



Fonte: Gerscovich, Danziger e Saramago (2016).

2.6 APLICAÇÃO DE RCC EM ESTRUTURAS DE CONTENÇÃO DE SOLO REFORÇADO COM GEOSSINTÉTICOS

Para a aplicação de RCC em estruturas de contenção, são necessários ensaios de caracterização. Estes ensaios são necessários para avaliar o potencial emprego, para atender aos requisitos mínimos de projeto conforme métodos de dimensionamento e para garantir o desempenho satisfatório durante todo tempo de vida útil do projeto. Os RCC são constituídos

por diversos tipos de substâncias, apresentando uma constituição heterogênea e com frações de diversas dimensões o que limita seu emprego em situações que exigem certo rigor quanto às especificações de granulometria dos materiais a serem utilizados em projetos de engenharia (MÁLIA; BRITO; BRAVO, 2011).

A caracterização de material granular utilizado em obras que exijam soluções geotécnicas é preponderante. Koerner e Soong (2001) apontam que entre os problemas recorrentes em obras de contenção, a não especificação quanto ao tipo de solo de preenchimento, pode comprometer definitivamente o desempenho e levar a estrutura ao colapso. Os autores descrevem que o teor de finos e solos de baixa permeabilidade podem contribuir para o aumento da sobrecarga de utilização e problemas de drenagem, e resumizam recomendações quanto a granulometria do solo e recomendações de drenagens.

Em um estudo em que foram analisadas 320 falhas em estruturas de contenção reforçada com geogrelhas e geotêxteis, Koerner e Koerner (2018), apontaram que 73% (232) das falhas ocorreram em estruturas que empregaram solos de granulometria fina como material de aterro na zona de reforço e que 63% (201) por presença de água interna ou externa. Os autores relatam outros aspectos semelhantes na ocorrência das falhas no histórico de casos, tais como o tipo de reforço, o nível de compactação do solo de aterro, o tipo de revestimento utilizado no paramento, a altura da estrutura e erros de projeto, e relatam ainda que 77% (246) das falhas ocorreram antes dos 4 anos após a construção.

Como material de preenchimento de aterro em estruturas de contenção, os materiais reciclados devem atender os limites de dimensão granulométrica e apresentar características físicas e químicas compatíveis com as especificidades do projeto e a tipologia da estrutura. Segundo Vieira (2020), Vieira e Pereira (2016) e Vieira, Pereira e Lopes (2016), estudos têm apresentado resultados semelhantes com o uso de material reciclado como material de preenchimento de aterros reforçados. No entanto, os autores atentam quanto à origem do material empregado em aterros, uma vez que podem ser oriundos de depósitos clandestinos, o que justifica a necessidade de realização dos ensaios de caracterização para melhor controle de qualidade.

O ensaio de granulometria permitiu aos autores (VIEIRA; PEREIRA, 2016; VIEIRA; PEREIRA; LOPES, 2016) definirem as dimensões da amostra e com isso definir quais as possíveis aplicações do material como elemento de preenchimento de estruturas de contenção. Vieira (2020) apresenta o emprego materiais finos para preenchimento de aterro em estruturas de solo reforçado, classificados como areia siltosa, com teor de finos entre 14% e 15,5% referente aos grãos com dimensões máximas inferiores a 20 mm. Além disso, a determinação

da composição granulométrica dos agregados de RCC contribui para a indicar padrões de qualidade, visto que quando empregado em estruturas de contenção, a granulometria é uma característica que afeta o imbricamento entre as partículas, e conseqüentemente a região de contato (DOMICIANO; SANTOS; LINS DA SILVA, 2020).

Se tratando de agregados de preenchimento de blocos segmentais em estruturas de contenção do tipo sistema segmentado reforçado, os autores Ali e Bhuiyan (2014b) utilizaram agregados reciclados de concreto (*Recycled Aggregate Concrete – RCA*) para comparar com agregado natural grosso. Primeiramente os autores observaram que os RCA apresentaram características semelhantes à do agregado natural, como também é observado por outros autores (BHUIYAN; ALI; SALMAN, 2015). Por meio de ensaios de cisalhamento em equipamento de grande porte, os autores concluíram que ocorreu uma leve queda da resistência na interface preenchida por agregados reciclados de concreto, motivada segundo eles, pela perda da aderência. Os blocos ao deslocarem devido aos procedimentos do ensaio, movimentaram o material de preenchimento de modo a friccionar os agregados em contato devido a fragilidade do material, acarretando em perda da aderência do conjunto bloco/bloco e redução do imbricamento. Tal fato foi evidenciado por Bernardes *et al.* (2008).

Os ensaios de arrancamento traduzem a interação entre o elemento de reforço e o material de preenchimento, de forma a relatar a ocorrência de danos causados durante a instalação e/ou por solicitações de serviços, tal como a mobilização de tensões no reforço (BHUIYAN; ALI; SALMAN, 2015; VIEIRA, 2020; VIEIRA; PEREIRA; LOPES, 2016). Os ensaios de lixiviação são essenciais na caracterização de RCC quando estes possuem composição heterogênea e são oriundos de depósitos inadequados. Além disso, esses são importantes para identificarem os componentes presentes na amostra que podem alterar quimicamente a matriz polimérica do reforço, conseqüentemente causando alterações nas propriedades índices e impactando o meio ambiente. Os constituintes mais comuns encontrados em RCC oriundos de deposição inadequada com concentração não aceitável foram os sulfatos e os sólidos dissolvidos, ambos originados de resíduos de materiais cerâmicos (VIEIRA, 2020; VIEIRA; PEREIRA; LOPES, 2016).

Soleimanbeigi *et al.* (2019), abordaram em seu estudo quanto à utilização de RCA como material de aterro muro de terra mecanicamente estabilizada (*Mechanecally Stabilized Earth – MSE*) reforçados com geossintéticos. Os autores realizaram ensaios para determinar propriedades mecânicas e hidráulicas de RCA oriundos de resíduos coletados em dois depósitos diferentes, bem como ensaios para determinar o desempenho do sistema construtivo reforçado, ou seja, relacionado a interação entre o material utilizado como aterro e os materiais poliméricos

utilizados no reforço da estrutura. Em uma das amostras foi identificado uma sútil (0,6%) massa de impurezas, tais como lascas de madeira, pedaços de vidro, cacos de material cerâmico e sobras de material polimérico. Segundo os autores, a disparidade na composição das amostras pode estar relacionada à fonte da qual foram coletadas.

Wen *et al.* (2016) e Wu *et al.* (2020) identificaram por meio de modelagem numérica de uma estrutura de contenção com paramento de *geobags* preenchidas com agregados reciclados de concreto pode ter sua estabilidade influenciada por aspectos geométricos, inclusive a espessura do revestimento utilizado no paramento. Há estudos de análise para validar a influência dos elementos de paramento das estruturas na base de fundação, o que não é comumente considerado para análises de estabilidade (XIE; LESHCHINSKY; YANG, 2016). Segundo estes autores, a massa do material de revestimento e de preenchimento utilizados na construção da estrutura de paramento geram acréscimos substanciais de carga vertical na base da fundação, contribuindo para a redução da estabilidade global e intensificando a possibilidade de ruptura do maciço.

A avaliação da estabilidade de estrutura de contenção é realizada com a contribuição de ensaios de cisalhamento e arrancamento. Uma das hipóteses de falha do maciço aponta um possível arrancamento do reforço na região próxima a crista, ocasionada por forças de tração próxima a base, e por deslizamento entre os elementos, sendo estas duas ocorrências melhor caracterizadas respectivamente pelos ensaios de arrancamento e cisalhamento, como proposto no estudo de Vieira (2018). Parâmetros como coesão, ângulo de atrito, geometria do talude, caracterização dos agregados reciclados, estrutura dos geossintéticos, grau de compactação e teor de umidade ótima, são identificados nos trabalhos como parâmetros que interferem diretamente no comportamento da estrutura de contenção (ALI; BHUIYAN, 2014b; BHUIYAN; ALI; SALMAN, 2015; VIEIRA, 2020; VIEIRA; PEREIRA, 2016; VIEIRA; PEREIRA; LOPES, 2016; WEN *et al.*, 2016; WU *et al.*, 2020; XIE; LESHCHINSKY; YANG, 2016).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

Para realização do ensaio de resistência de conexão foram utilizados blocos segmentais de concreto pré-fabricado do modelo MW de dimensões nominais 40 cm, 30 cm e 20 cm, de largura, comprimento e altura, respectivamente; massa em torno de 27 a 30 quilogramas e com dois vazios internos. Devido às dimensões do equipamento para a montagem do conjunto bloco-geogrelha, foi utilizada a configuração de duas linhas de blocos. A primeira linha foi composta por um bloco inteiro posicionado ao centro da prensa do equipamento e às suas faces laterais, foram posicionados uma meia parte do bloco. A segunda linha foi composta por dois blocos inteiros. A **Figura 28** ilustra o modelo de bloco utilizado no experimento.

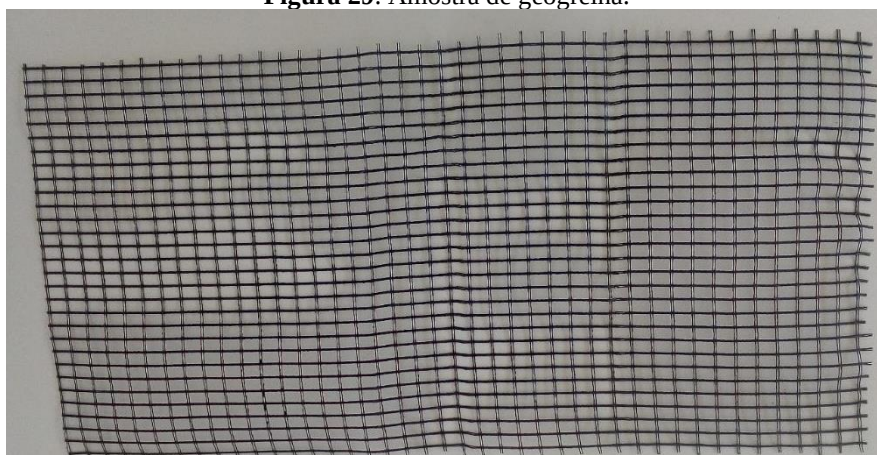
Figura 28. Bloco segmentado modelo MW.



Fonte: Do autor.

Foram empregadas amostras de geogrelhas na função reforço, com dimensões 1,30 m e 0,68 m, comprimento e largura, respectivamente, tipo flexível unidirecional de matriz polimérica de poliacetato de vinila (PVA), com resistência nominal à tração de 110 kN/m na direção principal (longitudinal) e de 25 kN/m na direção secundária (transversal) (ABNT NBR 12824, 2013), e com abertura da malha de 20 mm e 30 mm (dados fornecidos pelo fabricante). A **Figura 29** apresenta a amostra da geogrelha empregada nos ensaios de resistência de conexão.

Figura 29. Amostra de geogrelha.



Fonte: Do autor.

Como material de preenchimento foram utilizados agregados naturais oriundos da extração e de beneficiamento de jazida de gnaiss obtidos em comércio varejista local na cidade de Varginha e agregados reciclados de concreto oriundos do beneficiamento de resíduos de construção e demolição. Tais resíduos foram gerados a partir de material utilizado em obras de pavimentação de acessos às instalações do Campus VIII do CEFET-MG na cidade de Varginha. A **Figura 30** ilustra os dois tipos de agregados a serem utilizados no experimento.

Figura 30. Agregados graúdos classificados na zona granulométrica de 9,5/25 mm.



Fonte: Do autor.

Os ARCO foram produzidos a partir da trituração dos blocos intertravados não utilizados ou sem condições de uso, em usina de beneficiamento de RCC localizada na zona rural do município de Varginha. Para a realização dos ensaios em laboratório, os ARCO foram submetidos aos processos de lavagem para remoção do material pulverulento, e de secagem para então, serem submetidos aos ensaios da campanha experimental. A **Figura 31** apresenta o

volume de resíduos de construção e demolição gerados durante adequação das obras de infraestrutura do Campus VIII, do CEFET-MG, na cidade de Varginha.

Figura 31. Entulho de RCC no Campus VIII, CEFET-MG, Varginha, 2021.



Fonte: Do autor.

Os agregados naturais foram produzidos em usina de beneficiamento de agregados, também localizada no município de Varginha. A **Figura 32** ilustra a usina de beneficiamento de agregados naturais, Pedreira Santo Antônio.

Figura 32. Pedreira Santo Antônio, Varginha, MG.



Fonte: Do autor.

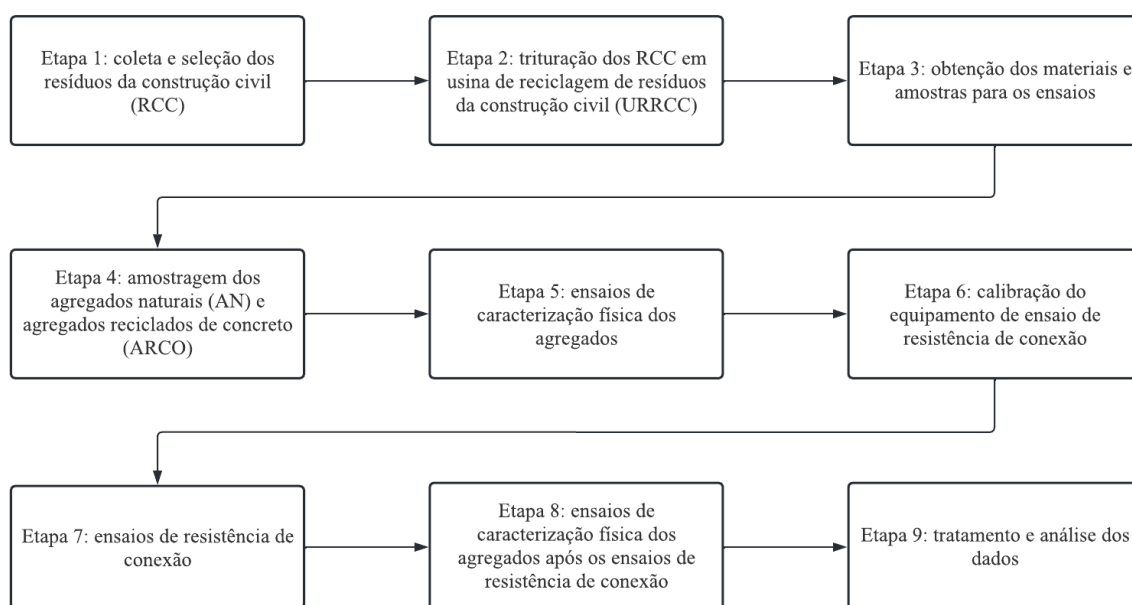
Também foi utilizado um geotêxtil não tecido, com massa por unidade de área de 600 g/m^2 (ABNT NBR 9864, 2013), resistência à tração faixa larga de 31 kN/m (ABNT NBR 12824, 2013) e puncionamento CBR de $5,2 \text{ kN/m}$ (ABNT NBR 13359, 2013) (dados fornecidos pelo fabricante), com função de proteção e nas dimensões de $1,50 \text{ m}$ e $0,50 \text{ m}$, comprimento e largura, respectivamente. Esse produto geossintético foi utilizado na interface bolsa/blocos

segmentais, para evitar que ocorressem danos a bolsa de lona utilizada para aplicação das tensões normais durante a execução dos ensaios de resistência de conexão.

3.2 MÉTODOS

Os ensaios foram realizados no laboratório de materiais de construção e geotecnia do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG), Campus VIII, no município de Varginha, Minas Gerais. A **Figura 33** ilustra o fluxograma das etapas desenvolvidas na pesquisa.

Figura 33. Fluxograma das etapas da pesquisa.



Fonte: Do autor.

Na etapa 1, os RCC foram selecionados e coletados de três pilhas diferentes de resíduos de blocos intertravados de concreto depositadas em local apropriado nas instalações do CEFET-MG. Os resíduos foram descartados e armazenados em pilhas a céu aberto para posterior coleta e destinação final apropriada. Os blocos intertravados de concreto descartados foram selecionados e coletados em unidades até atingirem a capacidade máxima de uma caçamba de 3 m³. A **Figura 34** ilustra a caçamba sem e com o RCC coletado.

Figura 34. Caçamba para armazenamento do RCC coletado.



Fonte: Do autor.

Na etapa 2, os RCC coletados foram transportados à URRCC. No local, os resíduos foram depositados em pilhas e posteriormente transportados por meio de pás carregadeiras até as instalações do equipamento utilizado na britagem. O equipamento utilizado na britagem, possui uma série de componentes, entre os quais estão as mandíbulas, as peneiras e as esteiras. O RCC foi submetido ao processo de britagem para a produção de agregados reciclados de granulometrias diversas, entre as quais a granulometria do tipo brita 1, requerida para o desenvolvimento da pesquisa. A classificação do agregado como brita 1, é meramente utilizada no comércio como forma de se referir ao produto de pedreira (QUARESMA, 2009), contudo segundo a ABNT NBR 7211(2022) os agregados utilizados na pesquisa são classificados como agregados graúdos na zona granulométrica de 9,5/25 mm. Encerrado o processo de britagem dos RCC, os agregados reciclados de concreto (ARCO) foram coletados e armazenados para posteriormente serem transportados para o laboratório. A **Figura 35** ilustra o instante de operação do equipamento de britagem e a obtenção dos agregados diversos na URRCC.

Figura 35. Equipamento de britagem no instante de operação.



Fonte: Do autor.

Na etapa 3, foram obtidos os AN e as amostras de GGR. Os AN foram obtidos em comércio varejista local, em unidades de sacos plásticos de 20 kg e com granulometria classificada como agregado gráudo na zona granulométrica 9,5/25 mm, meramente conhecido como brita 1. Foram utilizados cerca de 1000 kg de AN e 1000 kg de ARCO. As amostras de GGR foram dimensionadas em função das prescrições da ASTM D6638-18 (2018) e das dimensões do equipamento de ensaios de resistência de conexão, com as dimensões de 1,30 m e 0,68 m, comprimento e largura, respectivamente. Foram utilizados cerca de 80 m² de GGR para obtenção de 50 amostras empregadas nos ensaios de resistência de conexão da campanha experimental.

Na etapa 4, os agregados naturais e reciclados de concreto foram submetidos aos procedimentos de amostragem preconizados na ABNT NBR 16915 (2021). Na etapa 5, as amostras representativas reduzidas de ambos os agregados foram submetidas a ensaios de caracterização física para obtenção de parâmetros de propriedades físicas de composição granulométrica, índice de forma (I), densidade determinada na condição seca (ρ_s) e na condição saturada de superfície seca (ρ_{sss}), e teor de absorção de água (Abs), massa unitária (ρ_{ap}), teor de material fino (m) e perda por resistência à abrasão (P) conforme os procedimentos preconizados nas normas ABNT NBR NM 248 (2003), ABNT NBR 7809 (2019), ABNT NBR 16917 (2021), ABNT NBR 16972 (2021), ABNT NBR 16973 (2021) e ABNT NBR 16974 (2022), respectivamente. Além dos parâmetros determinados por meio dessas normas, também foi determinada a compacidade (C) dos agregados por meio da razão entre a massa unitária (ρ_{ap}) e a densidade determinada sob condição seca (ρ_s). Cabe ressaltar que os ensaios de determinação granulométrica de ambos os agregados foram realizados conforme os procedimentos preconizados em norma anteriormente vigente.

Na etapa 6, o equipamento foi calibrado por meio da testagem dos três sistemas e demais componentes que o compõem por meio da realização de um teste de ensaio de resistência de conexão. Em seguida, identificado que o equipamento estava em condições plenas de uso, iniciaram-se os ensaios de resistência de conexão.

Para a etapa 7, antes de dar início aos ensaios de resistência de conexão, foi estabelecida uma campanha experimental que atendesse condições relativas à configuração da montagem do ensaio, magnitude da tensão normal, número de ensaios, requisitos para coleta de amostra representativa de ambos os agregados solicitados e critérios para validação dos resultados. Quanto à configuração da montagem do ensaio de resistência de conexão desta pesquisa, estabeleceu que seriam montadas duas linhas de blocos segmentais, sendo a primeira, no sentido de baixo para cima, composta por um bloco inteiro ao centro e duas meias partes do bloco nas

laterais, e a segunda montada com dois blocos inteiros que sobrepuham a primeira linha e a amostra de geogrelha (GGR) (ver **Figura 48** e **Figura 49**).

Ficou estabelecido que as tensões normais aplicadas por meio da bolsa de lona sobre as fiadas de blocos segmentais teriam a magnitude no valor de 40 kN/m², 50 kN/m², 60 kN/m², 80 kN/m² e 100 kN/m², valores estes definidos em função de prescrições da ASTM D6638-18 (2018), da capacidade de carga do modelo de blocos segmentais empregados na pesquisa e do limite de manutenção da pressurização no tubo de interface ar-água. A **Tabela 5** apresenta as alturas dos muros correspondentes a cada uma das cargas normais aplicadas durante os ensaios e o número de ensaios realizados

Tabela 5. Alturas dos muros correspondente a tensão normal e número de ensaios

Tensão normal (kN/m ²)	40	50	60	80	100
Linhas de blocos	14	18	21	27	34
Altura do Muro (m)	2,8	3,6	4,2	5,4	6,8
Número de ensaios	3	3	3	3	5

Fonte: Do autor.

O modelo de blocos segmentais MW empregado na pesquisa tem como altura máxima de projeto 10 m (especificações técnicas fornecidas pelo fabricante), em função da sua capacidade de resistência à compressão. Essa altura permite o empilhamento máximo de 50 linhas de blocos segmentais e tensão normal correspondente a 150 kN/m². Entretanto, para submeter e manter o conjunto de blocos sob a tensão normal de 150 kN/m², ou seja, à condição limite, não foi possível com o sistema atual.

Foram realizados três ensaios para cada tensão normal aplicada, exceto para a tensão de 100 kN/m², à qual foram cinco ensaios de resistência de conexão. Esta exceção foi estabelecida para que após o término dos cinco ensaios, tanto para os agregados naturais quanto para os reciclados de concreto, o material de preenchimento solicitado e situado na zona de contato entre as duas linhas de bloco e geogrelhas fosse removido em amostras representativas com quantidade suficiente para posterior ensaios de caracterização física. A motivação para escolha da remoção das amostras dos agregados solicitados nos ensaios de resistência de conexão sob tensão de 100 kN/m² foi em decorrência da capacidade de resistência dos blocos segmentais empregados, conforme especificações técnicas fornecidas pelo fabricante para o modelo MW.

Na etapa 8, para ambos os agregados, após os cinco ensaios de resistência de conexão sob tensão normal de 100 kN/m², foi realizada a remoção da amostra representativa do material granular solicitado e os ensaios de caracterização física para determinação da composição

granulométrica, índice de forma (I), massa unitária (ρ_{ap}), teor de material fino (m), conforme os procedimentos preconizadas nas normas ABNT NBR NM 248 (2003), ABNT NBR 7809 (2019), ABNT NBR 16972 (2021), ABNT NBR 16973 (2021), respectivamente, bem como a compactidade (C), para posterior comparação com as propriedades físicas do material intacto, determinadas antes dos ensaios de resistência de conexão. Dos cinco ensaios de resistência de conexão sob tensão normal de 100 kN/m^2 , três resultados foram adotados para determinar os valores de resistência de conexão selecionados em conformidade ao limite de variação de $\pm 10\%$ em relação ao valor médio obtido nos três testes.

Na etapa 9, os resultados obtidos nos ensaios de caracterização física das amostras intactas e solicitadas dos agregados naturais e reciclados de concreto foram objeto de análise e comparação. Dos três valores de resistência de conexão obtidos para cada tensão normal aplicada, foi realizada a análise estatística com o emprego de medidas dispersão; média amostral ($\bar{x}$), coeficiente de variação (CV) e desvio padrão (S), e da ferramenta gráfica; diagrama de caixas (*boxsplot*).

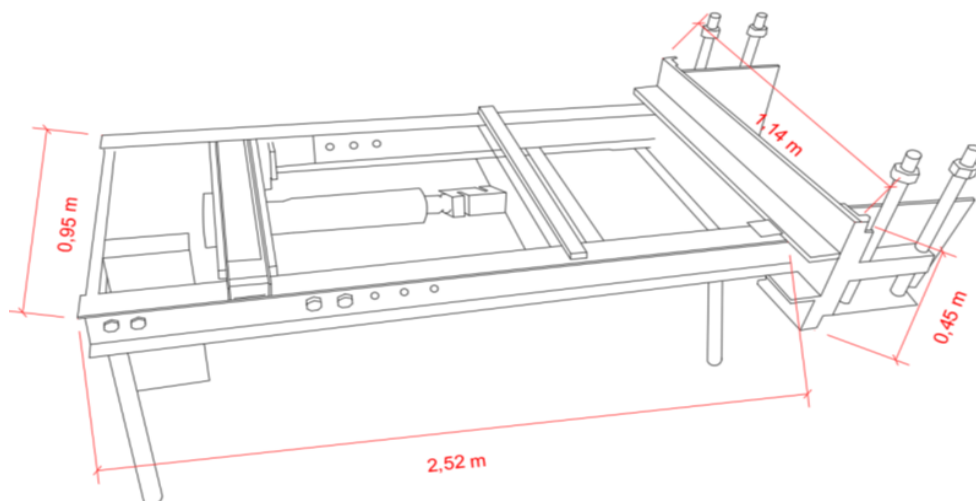
3.3 EQUIPAMENTO

O equipamento utilizado para os ensaios de resistência de conexão bloco-geogrelha foi desenvolvido inicialmente por Urashima e Martins (2004). A **Figura 36** (a) ilustra o equipamento utilizado no ensaio de resistência de conexão e (b) apresenta um desenho isométrico com as principais dimensões do equipamento.

Figura 36. Equipamento para ensaio de resistência de conexão e desenho com dimensões.



(a) Equipamento de ensaio de resistência de conexão.



(b) Desenho isométrico e cotas das principais dimensões.

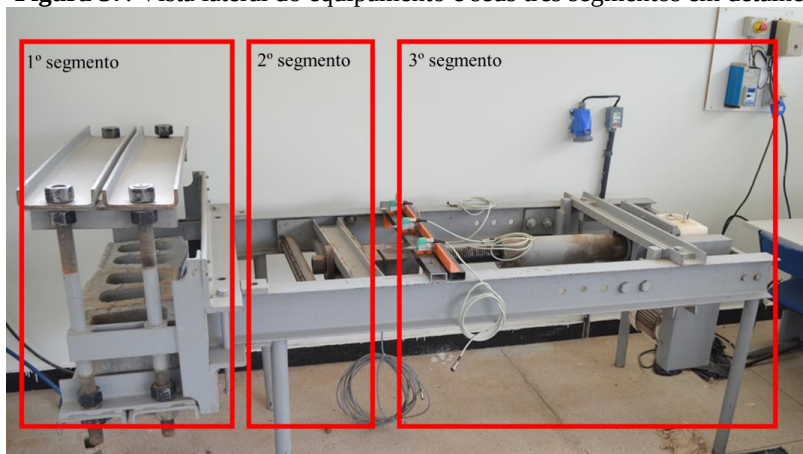
Fonte: Do autor.

O equipamento utilizado no ensaio de resistência de conexão para determinação da resistência de conexão bloco-geogrelha é composto de três sistemas: i) Sistema de aplicação de força horizontal; ii) Sistema de aplicação de tensão normal; e iii) Sistema de leitura, aquisição e armazenamento de dados.

- i. Sistema de aplicação de força horizontal: consiste basicamente em uma prensa mecânica horizontal, composta por três segmentos. O primeiro segmento é a caixa de confinamento aonde é montado o conjunto dos blocos segmentais preenchidos com material granular e é ancorada uma das extremidades da amostra do reforço. A caixa de confinamento apresenta dimensões à qual permite a montagem de duas camadas de blocos com uma linha de amostra do reforço entre elas através de um chanfro na parede da caixa, a amostra do reforço é fixada a uma garra metálica de fixação que compõe o segmento central. Esta garra consiste de um cilindro maior onde a geogrelha é alinhada e esticada. Um segundo cilindro, de menor diâmetro, encaixa-se em um chanfro do cilindro maior, sendo aquele removível, para fixação da outra extremidade da amostra do reforço no cilindro maior. No terceiro segmento encontra-se os sistemas de aplicação e de leitura dos esforços horizontais. A garra metálica é conectada a uma célula de carga fixada a um pistão de rosca de um motor elétrico. O motor trifásico, opera em uma frequência máxima de 1720 RPM (rotações por minuto) e tensão de 220 V (volts) e é acionado pelo comando de um inversor de frequência com capacidade máxima de 60 Hz (Hertz). O acionamento do motor implica na rotação do pistão nos sentidos horário ou anti-horário, conforme

os procedimentos adotados para o ensaio de resistência de conexão. A **Figura 37** ilustra a vista lateral do equipamento e em detalhe os seus três segmentos.

Figura 37. Vista lateral do equipamento e seus três segmentos em detalhe.



Fonte: Do autor.

- ii. Sistema aplicação tensão normal: para simulação de diferentes alturas de muros, uma bolsa de lona de alta resistência contendo água, é pressurizada por meio de um tubo de interface ar-água. A bolsa apresenta as seguintes dimensões (40, 75, 20) [cm] (largura, comprimento, altura) e quando pressurizada tem sua estabilidade garantida devido a sobreposição de um anteparo metálico robusto que é fixado por meio de barras cilíndricas rosqueadas localizadas aos pares na lateral da caixa de confinamento. O tubo, de policloreto de vinila (PVC), possui 120 cm de comprimento e 60 mm de diâmetro nominal, e é instalado na posição vertical em cota acima da maior dimensão de altura do equipamento. Para controle dos fluidos pressurizados ou não, são utilizadas válvulas localizadas na região inferior e superior do tubo, sendo admitida água por ascensão no tubo pela liberação da válvula de gaveta localizada na região inferior e admitido ar pressurizado pela liberação da válvula de gaveta localizada na região superior. O fluido pressurizado no interior do tubo é conduzido para a bolsa por meio de uma mangueira conectada a uma válvula de esfera, engatada na saída inferior do tubo. Nesta saída, foi instalado um manômetro para monitorar a magnitude da tensão estabelecida para cada ensaio. A escolha do sistema ar-água para aplicação de tensão normal, permitiu que os ensaios de resistência de conexão fossem realizados com segurança pelos usuários do equipamento uma vez que, no caso de rompimento da bolsa ocorreria apenas o vazamento de água pelo ponto de rompimento, evitando o risco de explosão. Ressalta-se ainda que o componente anteparo metálico instalado no topo da bolsa

também tem como função secundária assegurar os usuários do equipamento durante a execução do ensaio. A **Figura 38** ilustra (a) o arranjo dos blocos, geogrelha e bolsa, e (b) ilustra a interface ar-água.

Figura 38. Arranjo blocos-geogrelha e tubo da interface ar-água.



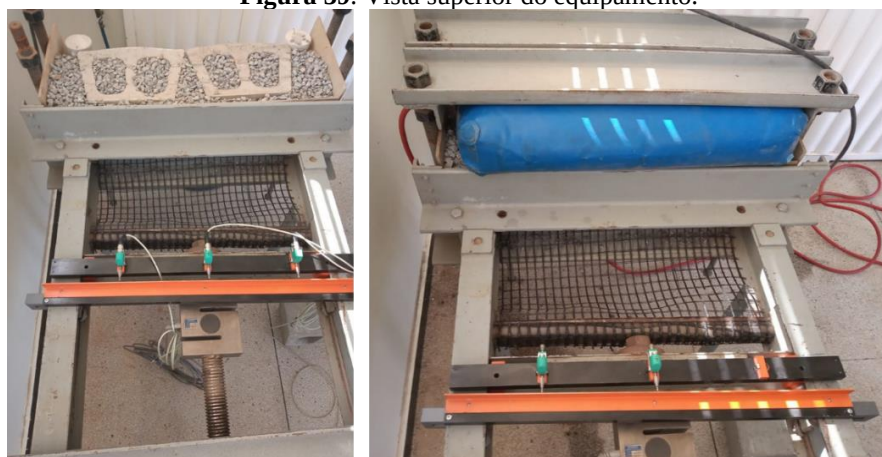
(a) Arranjo dos blocos, geogrelha e bolsa.

(b) Tubo da interface ar-água.

Fonte: Do autor.

- iii. Sistema de leitura, aquisição e armazenamento dos dados: o monitoramento dos ensaios é realizado a partir da leitura das forças horizontais de tração por meio de uma célula de carga fixa ao pistão rosqueado do motor trifásico e do registro dos deslocamentos da amostra do reforço por três transdutores de deslocamento linear variável - *Linear Variable Differential Transformers* (LVDTs) - conforme ocorre o distanciamento da garra em relação a barra de referência fixada no segmento central do equipamento. A aquisição e o armazenamento de dados são funções que ocorrem em um quadro que abriga os componentes de hardwares indispensáveis para o funcionamento desse sistema, tais como as entradas dos cabos de conexão dos componentes de leitura, o dispositivo de armazenamento dos dados de ensaio, componentes para os softwares de aquisição, armazenamento de dados e de interação entre equipamento e usuário, bem como teclado analógico de comandos e monitor de exibição de informações que possibilita a interação e acompanhamento dos ensaios. A aquisição dos dados de leitura de força e deslocamento é realizada por meio de um *software* específico que capta a variação em função do tempo. Em seguida os dados são armazenados em um dispositivo de armazenamento portátil – *Security Card* (SD) - instalado em local específico na lateral do quadro. A **Figura 39** ilustra a vista superior do equipamento durante ensaio de teste, detalhe para os LVDTs.

Figura 39. Vista superior do equipamento.



Fonte: Do autor.

Além dos componentes do equipamento de ensaio de resistência de conexão, foram empregados equipamentos auxiliares para realização de alguns procedimentos, tais como hastes metálicas no procedimento de compactação e equipamentos para manuseio, transporte e lançamento dos agregados durante as etapas de amostragem e dos ensaios de caracterização e de resistência de conexão. Para compor o sistema de aplicação de tensão normal, foi imprescindível o uso de compressor de ar, com motor de 2 HP (*horse-power*), vazão de 8,2 PCM (pés cúbicos por minuto), capacidade do reservatório de 24 litros e pressão de 116 psi (*pound force per square inch*), equivalente a 8 bar (dados fornecidos pelo fabricante), uma vez que este equipamento teve como função vital pressurizar o sistema ar-água e garantir a manutenção da tensão requerida para cada ensaio. A **Figura 40** ilustra o compressor de ar utilizado durante o procedimento de aplicação de tensão normal nos ensaios de resistência de conexão.

Figura 40. Compressor de ar utilizado como equipamento auxiliar.



Fonte: Do autor.

3.4 PROCEDIMENTOS DE ENSAIO

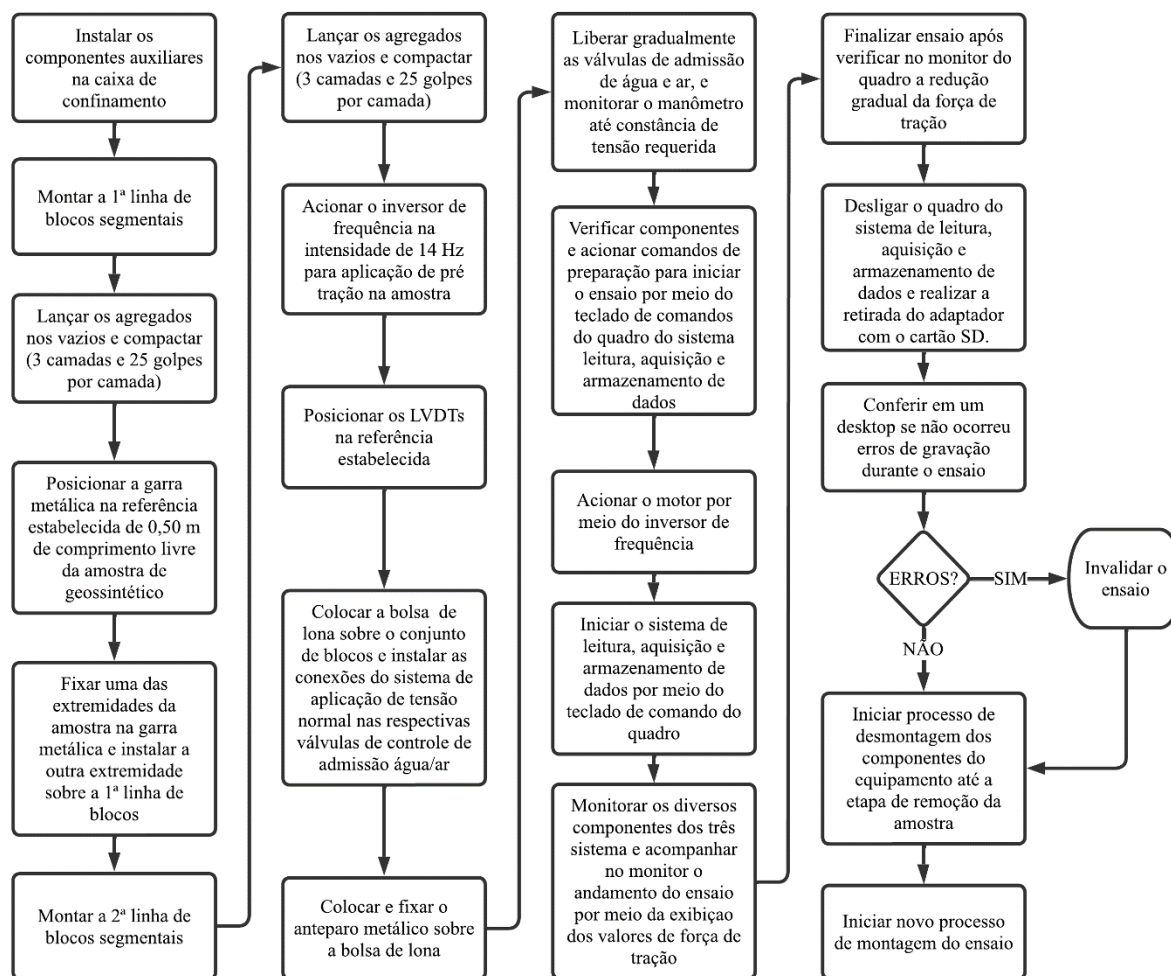
3.4.1 Agregados

Foram realizados procedimentos para a amostragem e ensaios caracterização física dos agregados naturais e reciclados de concreto em conformidade a padrões normatizados.

- i. Agregados - Amostragem - ABNT NBR 16915 (2021);
- ii. Determinação da composição granulométrica - ABNT NBR NM 248 (2003);
- iii. Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro - ABNT NBR 7809 (2019);
- iv. Determinação da densidade e da absorção de água - ABNT NBR 16917 (2021);
- v. Determinação da massa unitária e do índice de vazios - ABNT NBR 16972 (2021);
- vi. Determinação do material fino que passa pela peneira de 75 μm por lavagem - ABNT NBR 16973 (2021);
- vii. Determinação da compacidade dos agregados;
- viii. Determinação da abrasão *Los Angeles* - ABNT NBR 16974 (2022).

3.4.2 Ensaio de resistência de conexão

A **Figura 41** apresenta o fluxograma dos procedimentos adotados para o ensaio de resistência de conexão.

Figura 41. Fluxograma dos procedimentos do ensaio de resistência de conexão.

Fonte: Do autor.

Antes de iniciar os ensaios de resistência de conexão foram seguidas as instruções para calibragem e funcionamento do equipamento e seus sistemas, verificação do estado dos blocos segmentais e preparação das amostras dos elementos de reforço e dos agregados naturais e reciclados de concretos. A **Figura 42** ilustra o momento de preparação de uma das amostras de reforço.

Figura 42. Preparação de amostra de geogrelha.



Fonte: Do autor.

Para realização do ensaio de resistência de conexão, foram atendidas recomendações da ASTM D6638-18 (2018) e as seguintes etapas:

- i. Calibração do equipamento e do sistema de aquisição de dados - etapa inicial em que se realizou o teste funcional dos dispositivos LVDTs e da célula de carga, da interface equipamento-usuário, bem como avaliou o funcionamento dos componentes necessários para o funcionamento do ensaio, tais como o motor responsável pelo movimento do pistão e do inversor de frequência.
- ii. Preparação do ensaio de conexão – as etapas são descritas a seguir.
 - 1) Realização dos procedimentos de amostragem conforme a ABNT NBR 16915 (2021), tais como homogeneização e quarteamento de pilha de agregados com a finalidade de obter amostras representativas para efeito de resultados consistentes nos ensaios. A **Figura 43** ilustra o procedimento de amostragem.

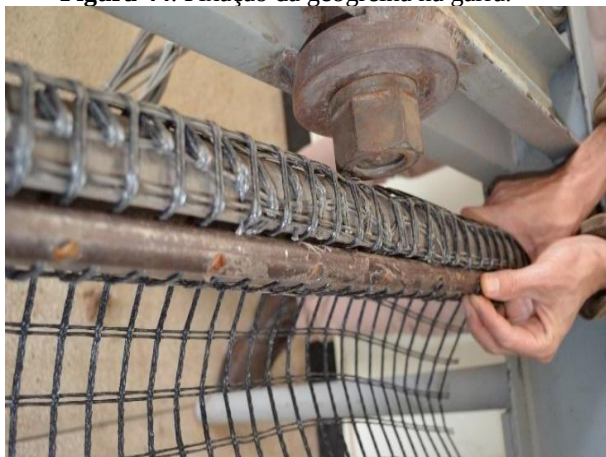
Figura 43. Quarteamento da amostra de agregado natural.



Fonte: Do autor.

- 2) Fixação da geogrelha a ser ensaiada à garra metálica. A **Figura 44** ilustra a fixação da geogrelha na garra.

Figura 44. Fixação da geogrelha na garra.



Fonte: Do autor.

- 3) Colocação das chapas auxiliares de madeira nas faces e dos perfis auxiliares metálicos em L nas arestas verticais da caixa de confinamento. A **Figura 45** ilustra as chapas de madeira instaladas

Figura 45. Chapas auxiliares de madeira.



Fonte: Do autor.

- 4) Inserção da primeira linha de blocos segmentais de modo que o encaixe macho-fêmea possa ser executado corretamente com a camada superior. A **Figura 46** ilustra a primeira linha de blocos.

Figura 46. Primeira camada de blocos.



Fonte: Do autor.

- 5) Após inserção da primeira camada completa-se os vazios com material granular de forma gradual, compactando os grãos em três camadas e aplicando 25 golpes por camada distribuídos em toda a área do vazio. Tanto o número de camadas quanto o número de golpes foram definidos conforme a norma ABNT NBR 16972 (2021), empregada para ensaios de determinação de massa unitária de agregados compactados com dimensão máxima característica menor ou igual a 37,5 mm. A **Figura 47** ilustra a etapa de enchimento dos blocos da primeira camada.

Figura 47. Enchimento dos blocos.



Fonte: Do autor.

- 6) Posicionamento da geogrelha de modo a evitar dobras. A **Figura 48** ilustra o posicionamento da geogrelha sobre a primeira camada de blocos preenchida.

Figura 48. Posicionamento da geogrelha.



Fonte: Do autor.

- 7) Segue-se com a montagem da segunda linha blocos conforme os procedimentos adotados na montagem da primeira linha. A **Figura 49** ilustra a montagem da segunda camada.

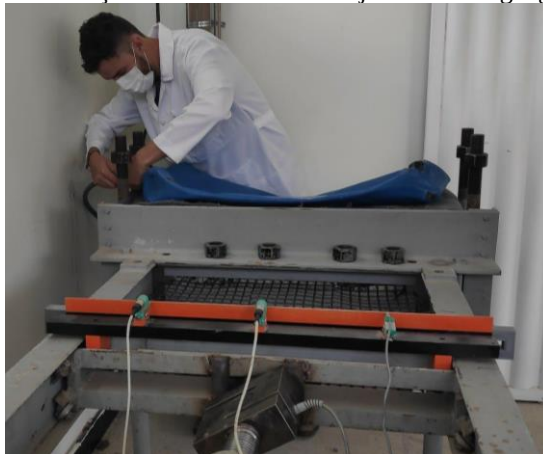
Figura 49. Enchimento da segunda camada de blocos.



Fonte: Do autor.

- 8) Colocação do geotêxtil não tecido, na função de proteção, sobre o conjunto montado na caixa de confinamento e em seguida a bolsa de lona sobre o mesmo geotêxtil. A **Figura 50** ilustra a colocação da bolsa sobre o geotêxtil não tecido e o conjunto da caixa de confinamento;

Figura 50. Colocação da bolsa sobre o conjunto blocos-geogrelha.



Fonte: Do autor.

- 9) Instalação do anteparo metálico sobre a bolsa. A **Figura 51** ilustra o segmento de confinamento com o anteparo metálico sobre a bolsa.

Figura 51. Segmento de confinamento com anteparo metálico instalado.



Fonte: Do autor.

- 10) Inicialização do sistema de leitura, aquisição e armazenamento de dados. A **Figura 52** ilustra o quadro que abriga o sistema de leituras, aquisição e armazenamento de dados.

Figura 52. Quadro do sistema de leitura, aquisição e armazenamento de dados.



Fonte: Do autor.

- 11) Acionamento do motor por meio do inversor na frequência de 14 Hz, equivalente à velocidade de 20 mm/min (BATHURST; SIMAC, 1993; BERNARDES *et al*, 2008; URASHIMA; MARTINS, 2004) para aplicação de força horizontal de tração e movimentação da garra metálica. A **Figura 53** ilustra o inversor de frequência acionado.

Figura 53. Acionamento do inversor de frequência.



Fonte: Do autor.

- 12) Monitoramento do ensaio por meio do acompanhamento dos valores de força exibidos no monitor do quadro do sistema de leitura, aquisição e armazenamento de dados, até o instante em que se verifica o decréscimo de intensidade da força de resistência de conexão após ser atingido a força de pico de resistência. A **Figura 54** ilustra a exibição de valores monitor do quadro durante o andamento do ensaio de resistência de conexão.

Figura 54. Exibição no monitor de valores de força durante ensaio.



Fonte: Do autor.

- 13) Após atendido o critério de parada o sistema de leitura, aquisição e armazenamento é finalizado, desliga-se o inversor de frequência e o quadro, faz-se a retirada do cartão SD do quadro e o fechamento das válvulas do sistema de aplicação de tensão normal, e inicia-se o procedimento de desmontagem do ensaio para preparação de um novo, se necessário.

4 RESULTADOS

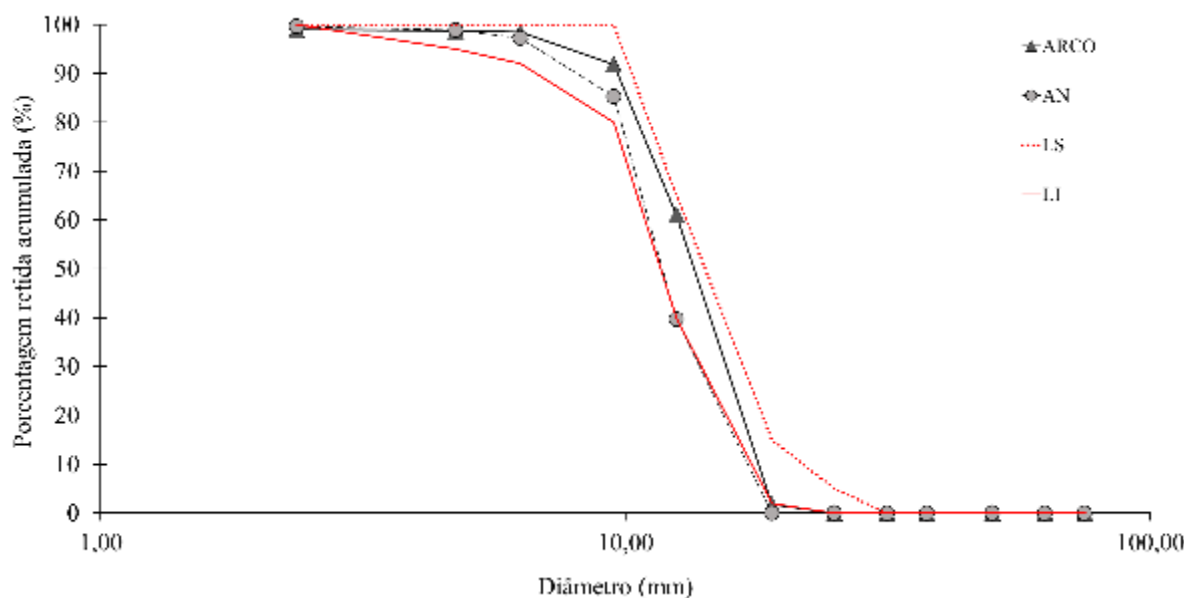
4.1 AGREGADOS

Os agregados naturais e reciclados de concreto foram submetidos aos ensaios de caracterização física antes e após os ensaios de resistência de conexão.

4.1.1 Ensaio de determinação da composição granulométrica ABNT NBR NM 248 (2003)

Para o ensaio de determinação da composição granulométrica foi realizado o peneiramento de quatro amostras de massa igual a 5 kg, sendo duas dessas compostas por agregado natural e as demais de ARCO. Após o peneiramento, foram determinadas a média do percentual retido acumulado em cada peneira por tipo de agregado. Antes dos ensaios de resistência de conexão os valores de diâmetro máximo característico (DMC) de ambas as amostras foi igual a 19 mm, enquanto o módulo de finura (MF) para amostra de AN foi de 6,83 e para o ARCO foi de 6,88. A **Figura 55** ilustra as curvas granulométricas de ambas as amostras e as curvas limite superior (LS) e limite inferior (LI) do intervalo de classificação para o agregado graúdo na zona granulométrica de 9,5/25 mm.

Figura 55. Curvas granulométricas por tipo de agregado.

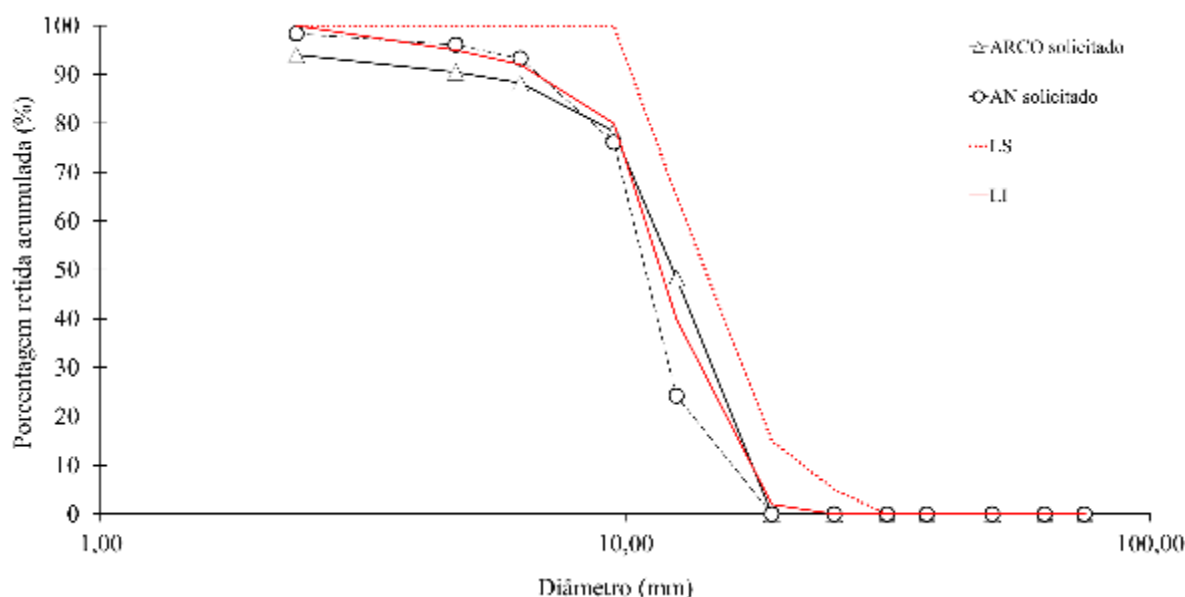


Fonte: Do autor.

Após os ensaios de resistência de conexão os valores de diâmetro máximo característico (DMC) de ambas as amostras foi igual a 19 mm, enquanto o módulo de finura para amostra de

AN solicitado foi de 6,67 e para o ARCO solicitado foi de 6,52. A **Figura 56** ilustra as curvas granulométricas de ambas as amostras e as curvas limite superior (LS) e limite inferior (LI) do intervalo de classificação para o agregado graúdo na zona granulométrica de 9,5/25 mm, após a realização dos ensaios de resistência de conexão.

Figura 56. Curvas granulométricas por tipo de agregado solicitado após ensaio de resistência de conexão.

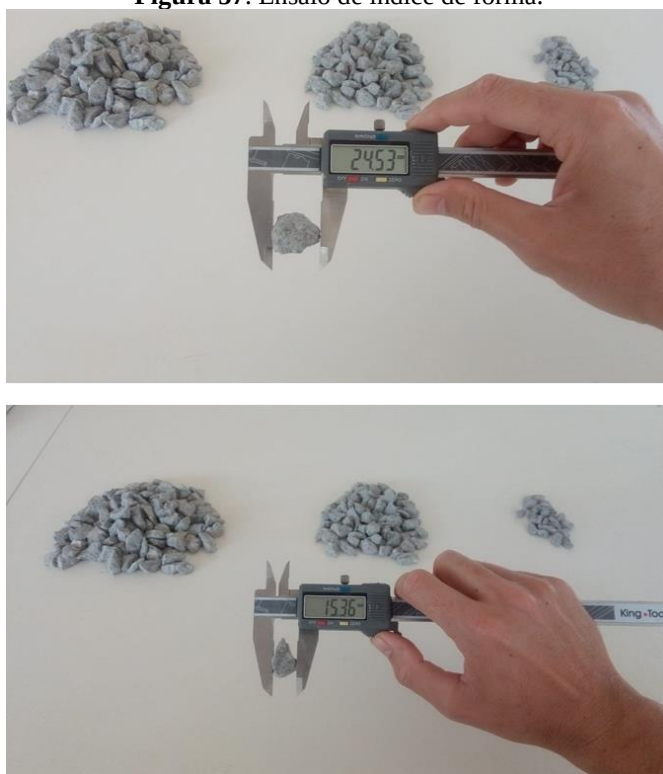


Fonte: Do autor.

4.1.2 Ensaio de determinação do índice de forma pelo método do paquímetro ABNT NBR 7809 (2019)

Para o ensaio de determinação do índice de forma (I) foram determinadas as frações retidas nas peneiras maiores que 5% após peneiramento da amostra e a partir dos percentuais foram determinadas as quantidades de grãos de agregados conforme a fração, totalizando 200 grãos. Para a realização das medidas de comprimento e espessura dos grãos foi utilizado um paquímetro digital e aferidas tais medidas foi calculado o índice de forma (I), por meio da razão entre o comprimento e a espessura dos grãos. Antes dos ensaios de resistência de conexão, o índice de forma (I) dos AN foi de 2,11 e do ARCO foi de 2,55.

Após os ensaios, os resultados de índice de forma (I) para os AN foi de 1,87 e para o ARCO foi de 2,18. Os valores obtidos em todos os ensaios são típicos de agregados com formato lamelar. A variação dos valores do I antes e após os ensaios de resistência de conexão indicaram a redução de 14,5% e para os ensaios que empregaram o ARCO e de 11,4% para os ensaios que empregaram o AN. A **Figura 57** ilustra procedimento realizado no ensaio de índice de forma.

Figura 57. Ensaio de índice de forma.

Fonte: Do autor.

4.1.3 Ensaio de determinação de densidade e da absorção de água ABNT NBR 16917 (2021)

Para o ensaio de determinação da densidade e da absorção foram preparadas quatro amostras, duas delas sendo compostas por AN e as outras duas por ARCO. As quatro amostras foram submersas por 24 horas para posterior pesagem. Passado o período de 24 horas, cada amostra teve sua superfície seca e pesada. Em seguida, passaram por pesagem hidrostática e posteriormente colocadas em estufa para secagem. Após o período de secagem em estufa, as amostras foram novamente pesadas. A **Tabela 6** apresenta os resultados dos valores médios determinados para cada parâmetro físico por tipo de agregado.

Tabela 6. Valores médios de densidades e absorção de água por tipo de agregado

Material	Densidades		Absorção de água
	$\rho_s (g/cm^3)^*$	$\rho_{ss} (g/cm^3)^{**}$	Abs (%)
AN	2,81	2,83	0,6
ARCO	2,21	2,37	7,2

*Densidade do agregado na condição seca.

**Densidade do agregado na condição saturada de superfície seca.

Fonte: Do autor.

A **Figura 58** ilustra algumas das etapas do ensaio de determinação da densidade e da absorção de água.

Figura 58. Etapas do ensaio de determinação da densidade e da absorção de água.



Fonte: Do autor.

Os dados utilizados para determinação dos parâmetros de densidade de ambos os agregados na condição seca (ρ_s , g/cm^3) e de condição saturada de superfície seca (ρ_{sss} , g/cm^3), e do teor de absorção de água (Abs , %) são apresentados no **Quadro 3** do APÊNDICE A.

4.1.4 Ensaio de determinação da massa unitária ABNT NBR 16972 (2021)

O ensaio de determinação da massa unitária foi realizado por meio de dois métodos, o método A, realizado com o agregado compactado, e o método C, realizado com o agregado solto. Basicamente o ensaio consistiu em determinar a massa por unidade de volume do material inserido em um recipiente com dimensões e volume padronizados conforme a referida norma. A **Figura 59** ilustra os procedimentos do ensaio de determinação da massa unitária.

Figura 59. Ensaio de determinação da massa unitária.



Fonte: Do autor.

A **Tabela 7** apresenta os resultados de massa unitária determinada após os procedimentos dos métodos A e C em duas condições, sendo a primeira determinação realizada com o material intacto e a segunda determinação realizada com o material solicitado, ou seja, após os ensaios de resistência de conexão.

Tabela 7. Valores de massa unitária por tipo de agregado.

Estado do material	Material	Método A	Método C
		Massa unitária $\rho_{ap} \text{ (kg/m}^3\text{)}$	Massa unitária $\rho_{ap} \text{ (kg/m}^3\text{)}$
Intacto	AN	1611	1518
	ARCO	1258	1163
Solicitado	AN	1685	1561
	ARCO	1314	1176

Fonte: Do autor.

Os dados utilizados para determinação dos parâmetros de massa unitária (ρ_{ap} , kg/m^3) de ambos os agregados empregando os procedimentos do método A e do método C são apresentados no **Quadro 4** do APÊNDICE A.

4.1.5 Ensaio de determinação do material fino que passa pela peneira de 75 μm por lavagem ABNT NBR 16973 (2021)

Para determinação do material fino que passa pela peneira de 75 μm por lavagem foram realizados quatro ensaios em quatro amostras, sendo duas amostras compostas por agregado natural e as outras duas ARCO, antes e após os ensaios de resistência de conexão. O procedimento dos ensaios consistiu na pesagem da amostra seca antes da lavagem, lavagem do material, secagem em estufa do material e pesagem do material seco em estufa. A lavagem do material era interrompida quando o conteúdo de um de dois recipientes de vidro, um contendo água potável e o outro o líquido resultante da lavagem do material granular, estivesse com aspecto límpido, similar ao do recipiente com água potável. Após os ensaios, foi possível inferir que os ARCO necessitaram de uma maior quantidade de ciclos de lavagem do que o agregado natural, tanto antes quanto após os ensaios de resistência de conexão. A **Tabela 8** apresenta os valores médios dos resultados dos ensaios realizados.

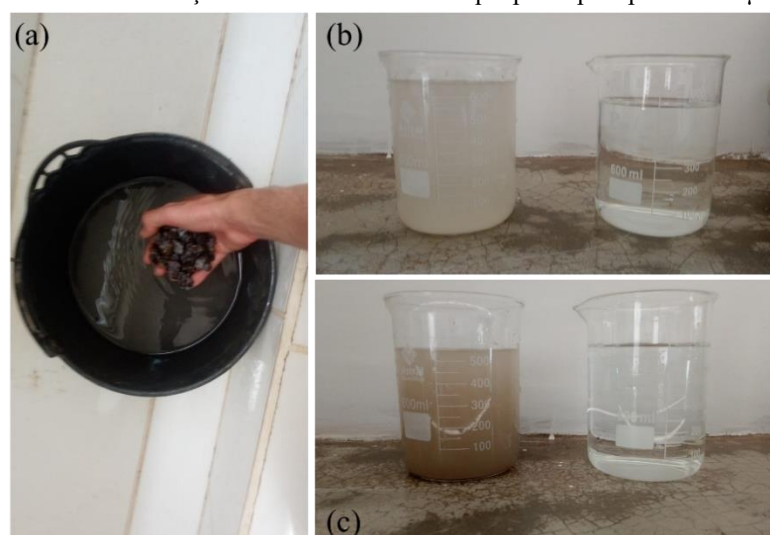
Tabela 8. Valores médios de material fino que passa pela peneira 75 μm .

Estado do material	Material	Média
		m^* (%)
Intacto	AN	0,31
	ARCO	4,01
Solicitado	AN	0,62
	ARCO	4,21

*Porcentagem de material mais fino que passa pela peneira de 75 μm , por lavagem.

Fonte: Do autor.

A **Figura 60** ilustra procedimentos do ensaio de determinação de material mais fino que passa pela peneira 75 μm por lavagem e em detalhe as etapas de (a) lavagem do material granular, (b) primeiro ciclo de lavagem do AN e (c) primeiro ciclo de lavagem do ARCO.

Figura 60. Ensaio de determinação do material mais fino que passa pela peneira 75 μm por lavagem.

Fonte: Do autor.

4.1.6 Determinação da compacidade dos agregados

A compacidade (C , %) dos agregados é determinada pela razão entre a massa unitária (ρ_{ap} , kg/m^3) e a densidade determinada sob condição seca (ρ_s , kg/m^3). A **Tabela 9** indica os resultados de compacidade (C , %) obtidos para os agregados natural e reciclado de concreto antes e após os ensaios de resistência de conexão

Tabela 9. Valores de compactidade para os agregados natural e reciclado.

Estado do material	Material	Massa unitária $\rho_{ap} (kg/m^3)$		Densidade $\rho_s (kg/m^3)$	Compacidade C (%)	
		Método A	Método C		Método A	Método C
Intacto	AN	1611	1518	2810	57%	54%
	ARCO	1258	1163	2210	57%	53%
Solicitado	AN	1685	1561	2810	60%	56%
	ARCO	1314	1176	2210	59%	53%

Fonte: Do autor.

4.1.7 Ensaio de abrasão *Los Angeles* ABNT NBR 16974 (2022)

Para realização do ensaio de abrasão *Los Angeles* foram preparadas quatro amostras sendo duas de AN e duas de ARCO, classificadas como graduação B. Os resultados dos ensaios são apresentados na **Tabela 10** e indicam uma similaridade nos resultados entre os dois tipos de brita.

Tabela 10. Resultados dos ensaios de abrasão *Los Angeles*.

Amostra	Material	Massa da amostra total seca (g)	Massa retida na peneira nº 12 (g)	Perda por abrasão (P, %)
1	AN	5000	2956,1	40,9
2	AN	5000	2718,31	45,6
3	ARCO	5000	2914,50	41,7
4	ARCO	5000	2950,28	41,0

Fonte: Do autor.

4.2 ENSAIO DE RESISTÊNCIA DE CONEXÃO

4.2.1 Resultados dos ensaios com emprego de agregados naturais

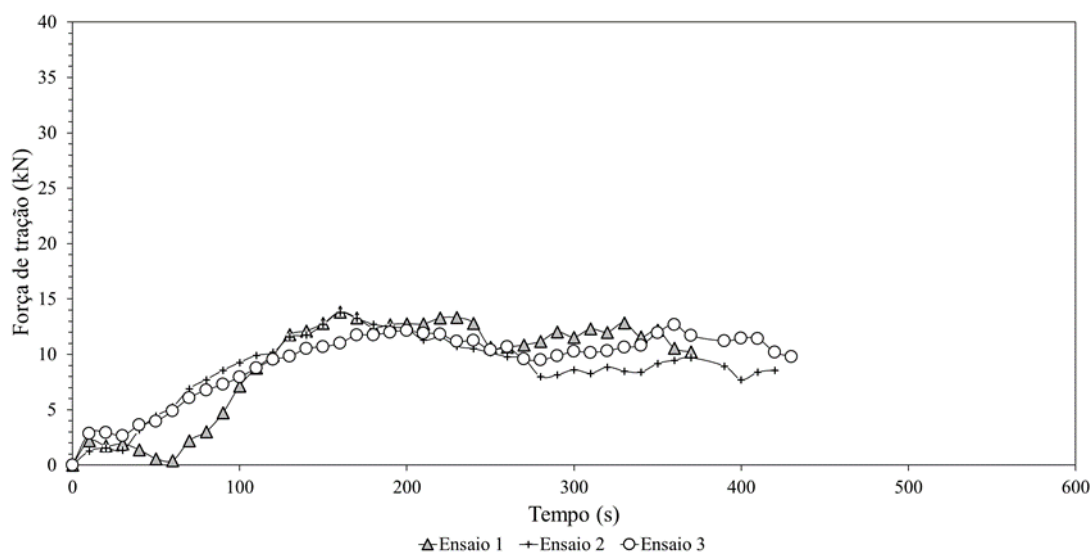
As resistências de conexão obtidas após os três ensaios de conexão são apresentadas na **Tabela 11** conforme a carga normal aplicada no conjunto. Os valores de resistência de conexão foram obtidos por meio do emprego da Equação 1 (BERNARDES *et al.*, 2008; URASHIMA *et al.*, 2006).

Tabela 11. Valores de resistência de conexão para diferentes tensões normais.

Tabela 11: Valores de resistência de conexão para diferentes tensões normais.										
Geossintético	Polímero	Bloco	Conexão	Material granular	Unidade	Tensão normal (kN/m²)				
						40	50	60	80	100
Geogrelha 110 kN/m	Álcool de polivinila (PVA)	MW	Simples	Agregado natural (AN)	kN/m	21,4	25,0	29,5	40,2	54,9
						20,5	24,0	26,5	36,8	51,1
						19,4	23,8	26,3	36,1	45,5
					Média	20,4	24,2	27,4	37,7	50,5

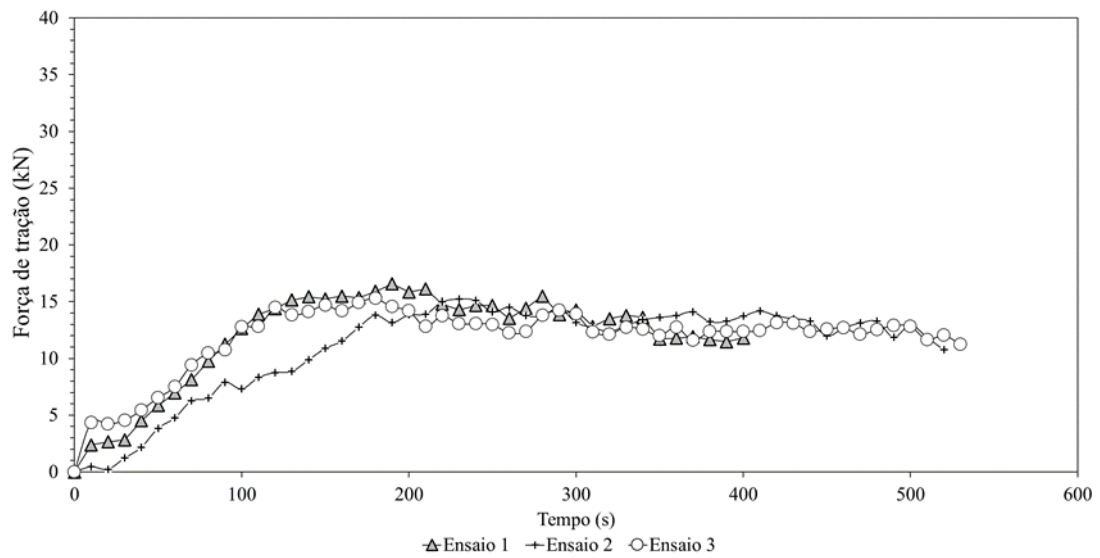
Fonte: Do autor.

As **Figura 61** a **Figura 65** ilustram as curvas de força versus tempo para o ensaio de resistência de conexão para as cargas normais de 40 kN/m², 50 kN/m², 60 kN/m², 80 kN/m² e 100 kN/m², respectivamente, quando empregados AN como material granular de preenchimento dos blocos segmentais. Devido aos limites do componente móvel de medição dos dispositivos LVDTs, os resultados de deformação não foram avaliados. Os resultados não tratados podem ser analisados nos gráficos apresentados no **Quadro 5** constante no APÊNDICE B.

Figura 61. Curvas de resistência de conexão com emprego de agregado natural (40kN/m²).

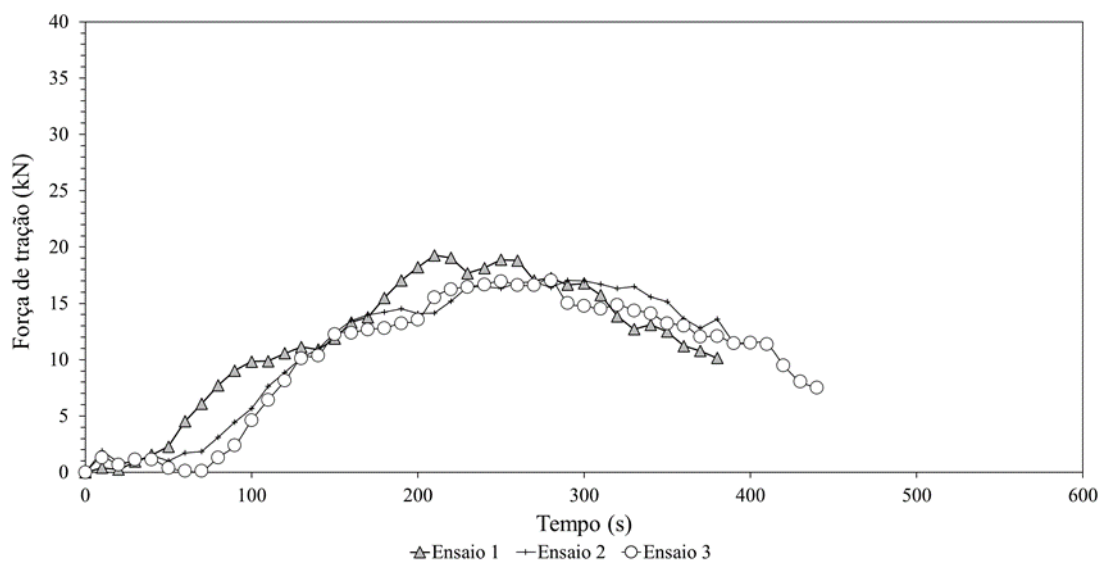
Fonte: Do autor.

Figura 62. Curvas de resistência de conexão com emprego de agregado natural (50kN/m²).



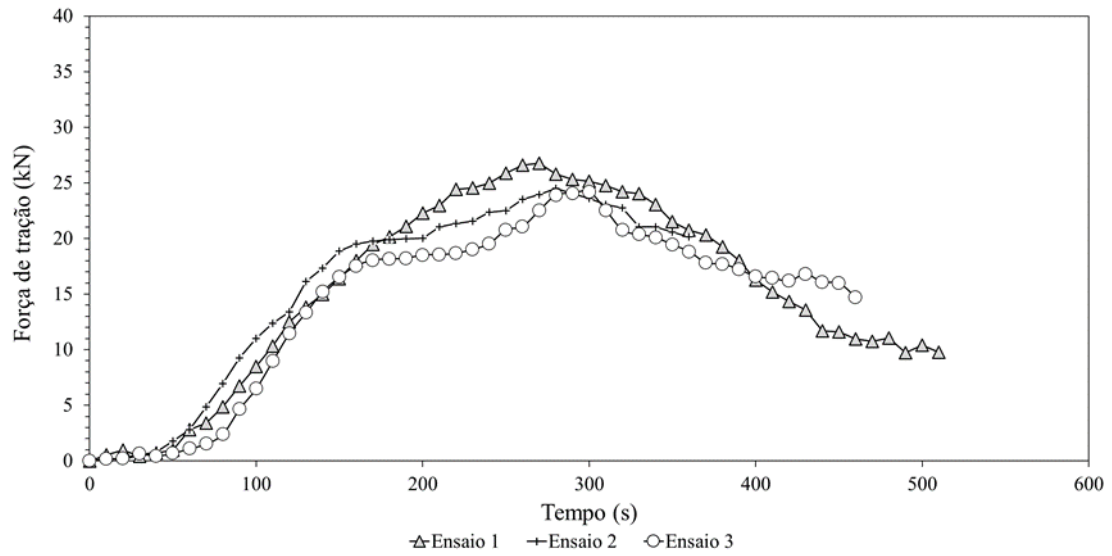
Fonte: Do autor.

Figura 63. Curvas de resistência de conexão com emprego de agregado natural (60kN/m²).



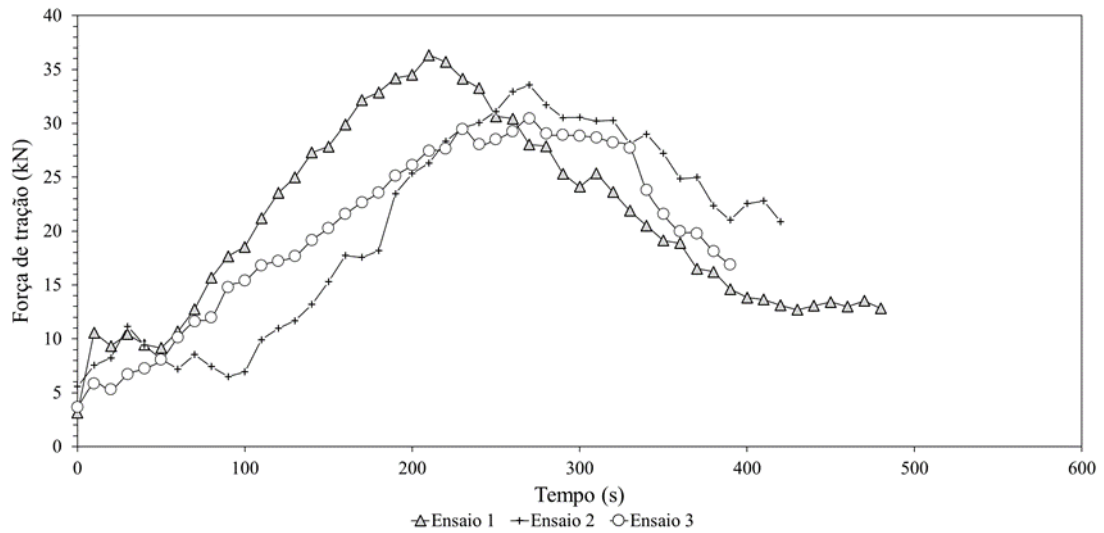
Fonte: Do autor.

Figura 64. Curvas de resistência de conexão com emprego de agregado natural (80kN/m²).



Fonte: Do autor.

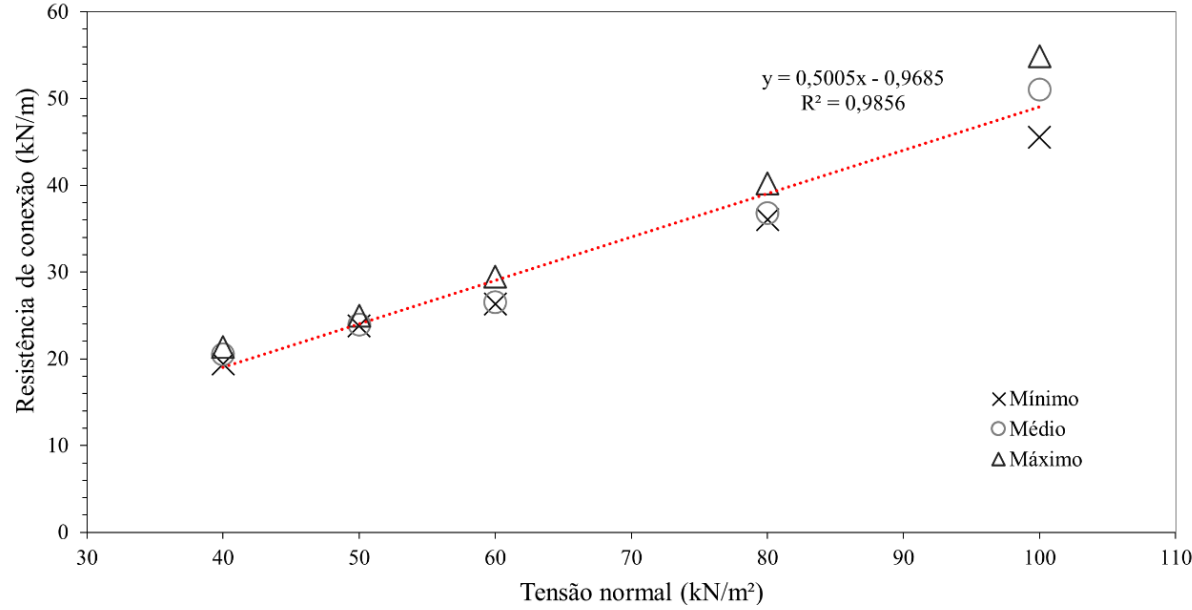
Figura 65. Curvas de resistência de conexão com emprego de agregado natural (100kN/m²).



Fonte: Do autor.

A **Figura 66** ilustra o gráfico dos resultados dos valores obtidos nos ensaios de resistência de conexão para cada uma das cinco tensões normais. Os valores plotados no gráfico são ordenados na ordem de mínimo, médio e máximo.

Figura 66. Valores de resistência de conexão em função da carga normal aplicada (emprego de AN).



Fonte: Do autor.

4.2.2 Resultados dos ensaios com emprego de agregados reciclado de concreto

As resistências de conexão obtidas após os três ensaios de conexão são apresentadas na **Tabela 12** conforme a carga normal aplicada no conjunto. Os valores de resistência de conexão foram obtidos por meio do emprego da Equação 1 (BERNARDES *et al.*, 2008; URASHIMA *et al.*, 2006).

Tabela 12. Valores de resistência de conexão para diferentes tensões normais.

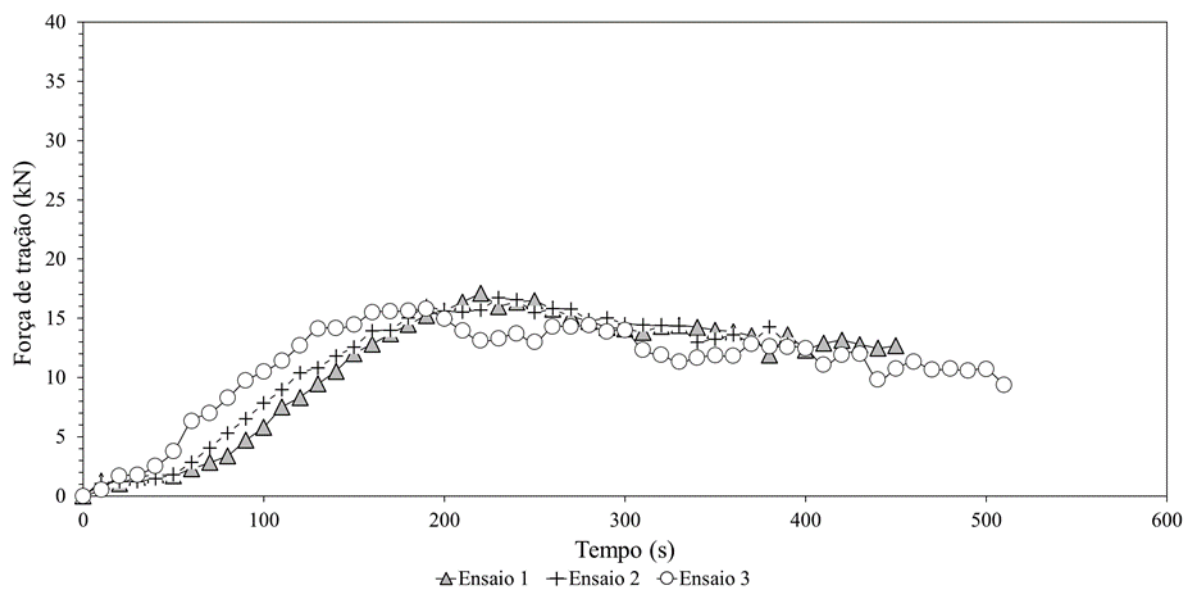
Geossintético	Polímero	Bloco	Conexão	Material granular	Unidade	Tensão normal (kN/m²)				
						40	50	60	80	100
Geogrelha 110 kN/m	Álcool de polivinila (PVA)	MW	Simples	Agregado reciclado de concreto (ARCO)	kN/m	25,5	32,9	39,5	40,4	45,1
						24,8	32,1	36,9	39,7	43,8
						24,0	29,6	34,8	39,3	43,2
					Média	24,8	31,5	37,1	39,8	44,0

Fonte: Do autor.

As **Figura 67** a **Figura 71** ilustram as curvas de força versus tempo para o ensaio de resistência de conexão para as cargas normais de 40 kN/m², 50 kN/m², 60 kN/m², 80 kN/m² e 100 kN/m², respectivamente, quando empregados ARCO como material granular de

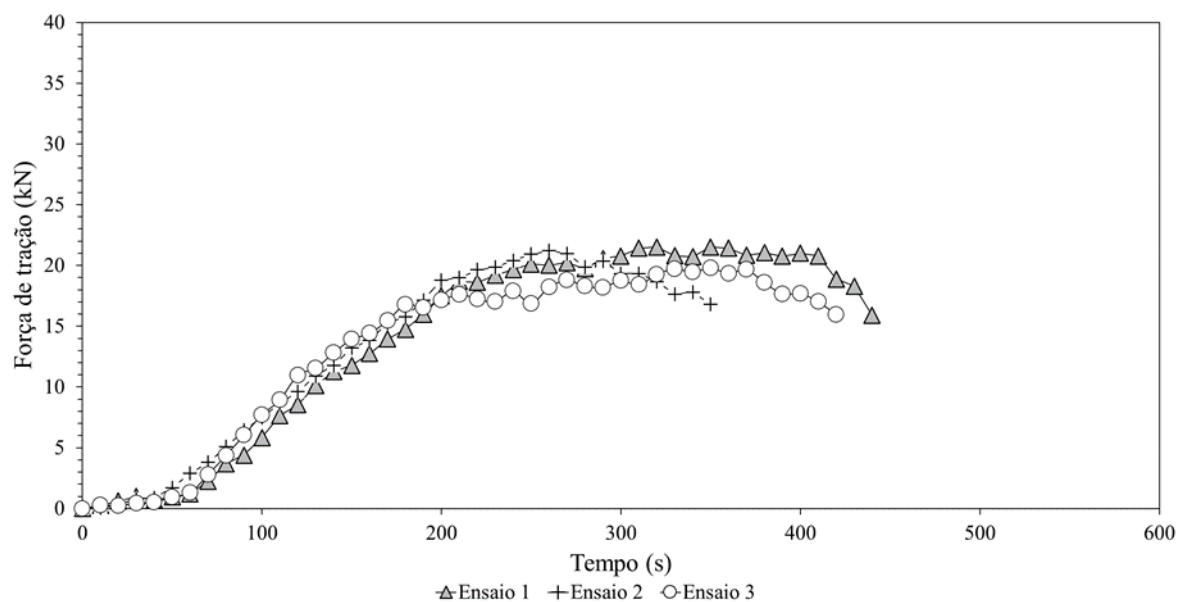
preenchimento dos blocos segmentais. Devido aos limites do componente móvel de medição dos dispositivos LVDTs, os resultados de deformação não foram avaliados.

Figura 67. Curvas de resistência de conexão com emprego de agregado reciclado (40kN/m^2).



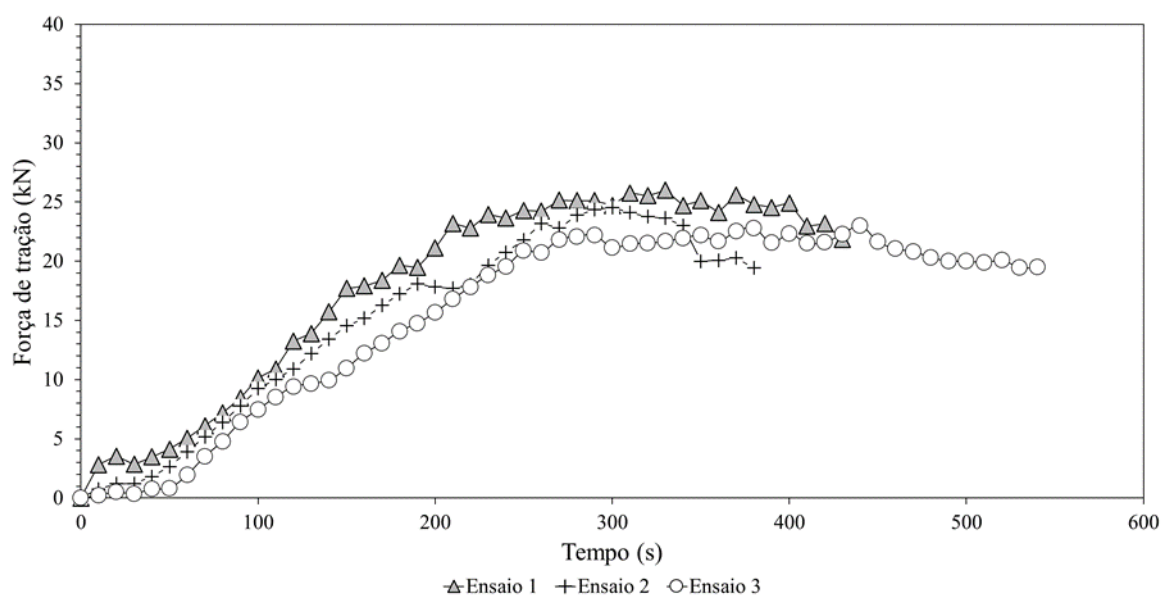
Fonte: Do autor.

Figura 68. Curvas de resistência de conexão com emprego de agregado reciclado (50kN/m^2).



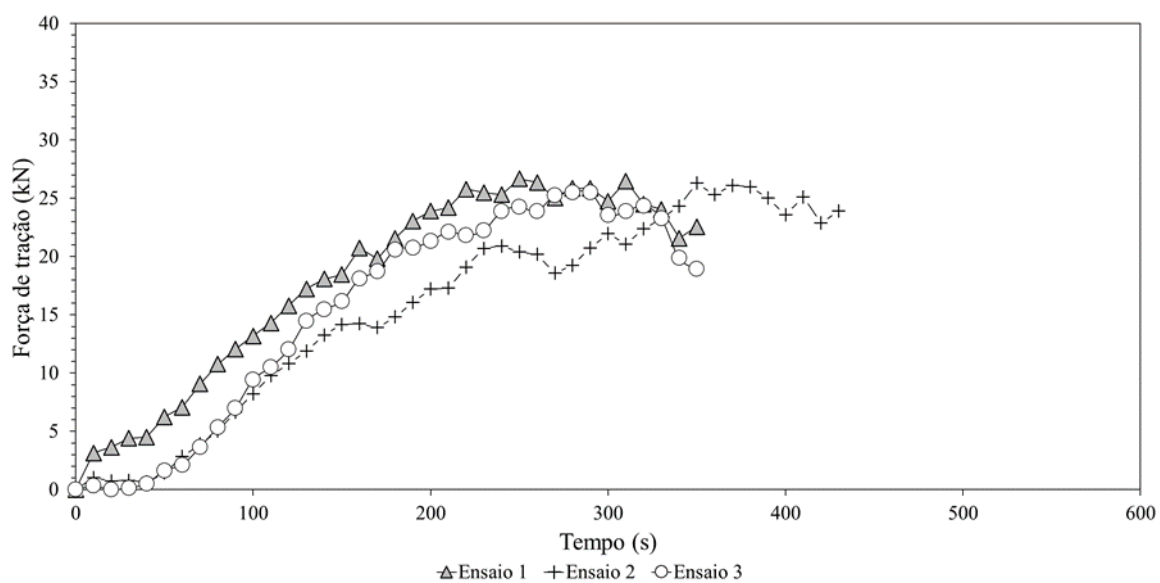
Fonte: Do autor.

Figura 69. Curvas de resistência de conexão com emprego de agregado reciclado (60kN/m²).



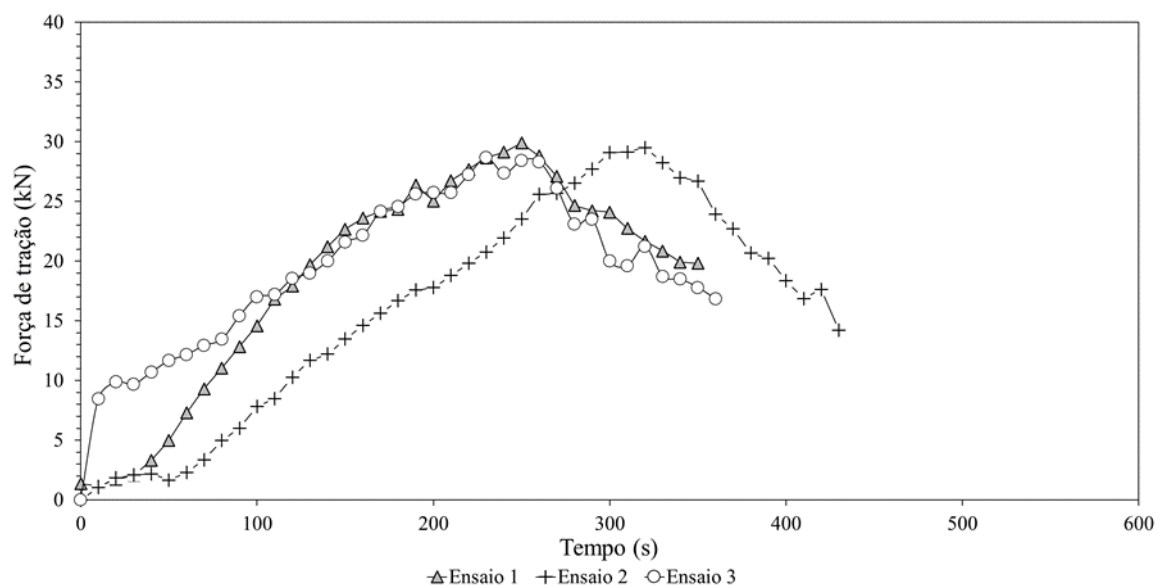
Fonte: Do autor.

Figura 70. Curvas de resistência de conexão com emprego de agregado reciclado (80kN/m²).



Fonte: Do autor.

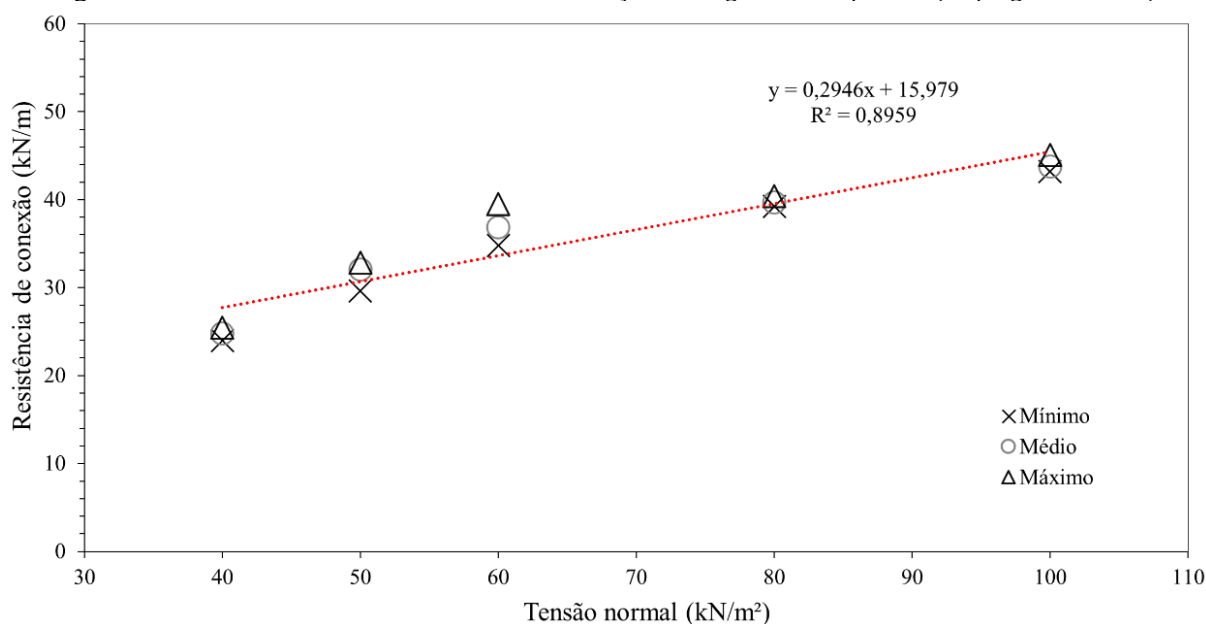
Figura 71. Curvas de resistência de conexão com emprego de agregado reciclado (100kN/m²).



Fonte: Do autor.

A **Figura 72** ilustra o gráfico dos resultados dos valores obtidos nos ensaios de resistência de conexão para cada uma das cinco tensões normais. Os valores plotados no gráfico são ordenados na ordem de mínimo, médio e máximo. Os resultados não tratados podem ser analisados nos gráficos apresentados no **Quadro 5** constante no APÊNDICE B.

Figura 72. Valores de resistência de conexão em função da carga normal aplicada (emprego de ARCO).



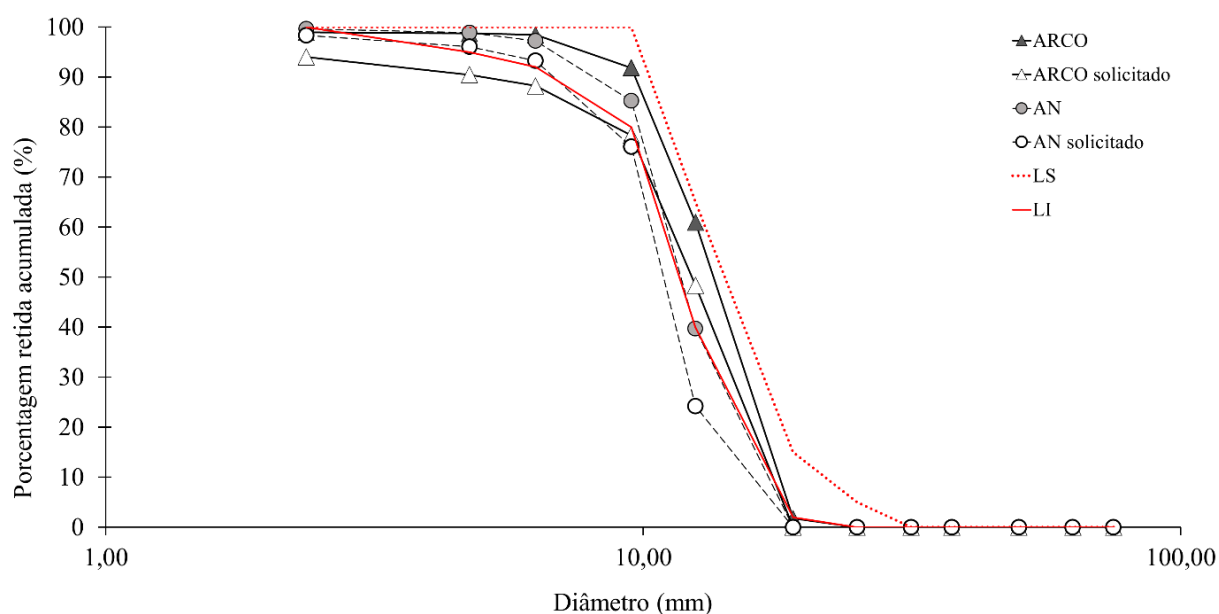
Fonte: Do autor.

5 DISCUSSÕES

5.1 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

Os resultados obtidos nos ensaios de caracterização em ambos os agregados apresentaram consistência e similaridade. Antes da realização dos ensaios de resistência de conexão, a partir da determinação da composição granulométrica conforme ABNT NBR NM 248 (2003), foram traçadas as curvas de ambos os agregados dentro do intervalo limite da composição granulométrica que os classifica como agregados graúdos na zona granulométrica 9,5/25 mm, conforme ABNT NBR 7211 (2022). No entanto, após a realização dos ensaios de resistência de conexão, foi observado um deslocamento das curvas, mais expressivo para os ARCO. A **Figura 73** apresenta as curvas de composição granulométrica dos AN e dos ARCO antes (intacto) e após (solicitado) os ensaios de resistência de conexão, bem como as curvas que indicam os limites superior (LS) e inferior (LI) de classificação do agregado graúdo na zona granulométrica de 9,5/25 mm.

Figura 73. Curvas granulométricas dos agregados antes e após os ensaios de resistência de conexão.



Fonte: Do autor.

A redução da composição granulométrica também pôde ser observada por meio de análise visual das amostras representativas de ambos os agregados retiradas após a realização dos cinco ensaios de resistência de conexão submetidos a tensão normal de 100 kN/m². Ressalta-se que tal redução da composição granulométrica, evidenciada pelo deslocamento das curvas é parcialmente relacionada ao número de reutilização dos agregados em ambos os ensaios de

resistência de conexão. A **Figura 74** ilustra as amostras representativas de agregados naturais e reciclados de concreto, antes e após os ensaios de resistência de conexão.

Figura 74. Amostras de AN e ARCO antes e após os ensaios de resistência de conexão.



(a) Amostras de AN antes (esquerda) e após (direita) os ensaios de resistência de conexão.



(b) Amostras de ARCO antes (esquerda) e após (direita) os ensaios de resistência de conexão.

Fonte: Do autor.

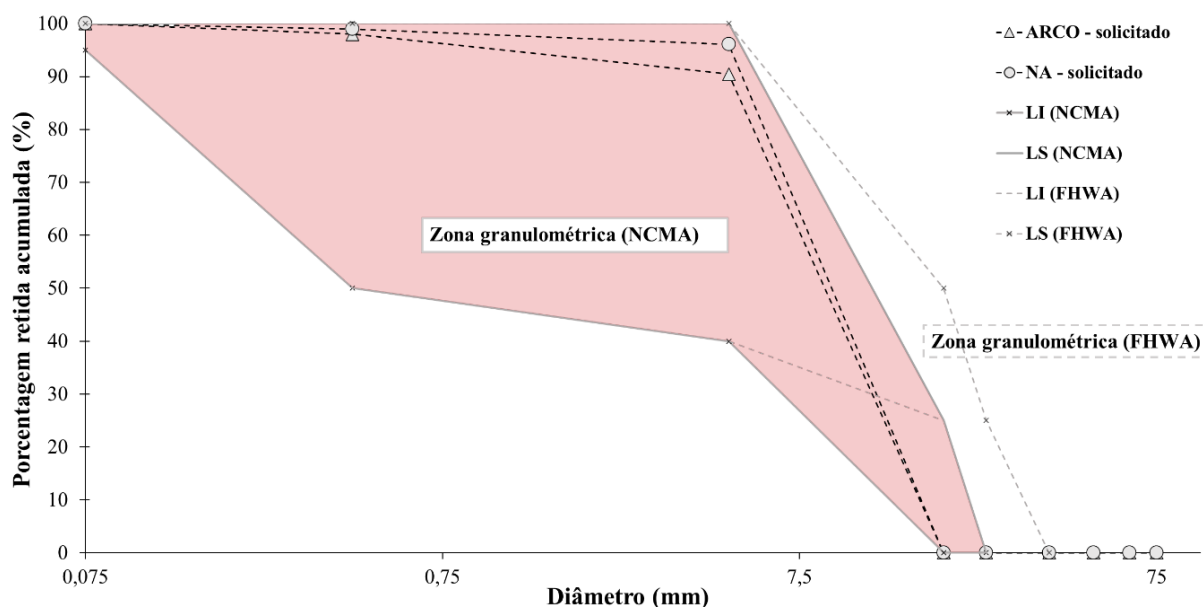
A redução da composição granulométrica após os ensaios de resistência de conexão também foi evidenciada por Bernardes *et al.* (2008), que após uma série de 16 ensaios puderam por meio de análise visual qualitativa descrever que os agregados naturais do tipo brita 1 sofreram acentuada redução na dimensão dos grãos. Assim como para Bernardes *et al.* (2008), a desagregação dos agregados foi mais expressiva na região próxima à zona de cisalhamento, ou seja, na região de interface entre os elementos que compõem o conjunto na caixa de confinamento.

Além do traçado das curvas de composição granulométrica de ambos os agregados, o ensaio de determinação da composição granulométrica possibilitou a determinação do módulo de

finura (MF) e o diâmetro máximo característico (DMC). Após os cinco ensaios de resistência de conexão submetidos a tensão normal de 100 kN/m^2 , ficou evidenciado a redução no valor do MF para ambos os tipos de agregados. Para os AN a redução foi de 2%, enquanto que para os ARCO a redução foi de 5%, ou seja, mais expressiva, enquanto o DMC de ambos os agregados se manteve igual a 19 mm.

As evidências do deslocamento da curva granulométrica e da redução do MF para ambos os agregados após os ensaios de resistência de conexão, indicam que os agregados naturais e reciclados de concreto foram desclassificados como agregado graúdo na zona de 9,5/25 mm. Contudo, mesmo com tais evidências, os agregados atenderam a composição granulométrica segundo o NCMA (2017), quando empregados como material granular de preenchimento de blocos segmentais. Tal apontamento pode ser verificado na **Figura 75**, em que é apresentada as curvas granulométricas características dos agregados naturais e reciclados após os ensaios de resistência de conexão em relação aos limites superior (LS) e inferior (LI), e as respectivas zonas granulométricas, preconizadas pelo NCMA (2017) e FHWA (2009), para a aceitação de agregados empregados como material preenchimento de blocos segmentais em estruturas de contenção reforçada.

Figura 75. Curvas granulométricas dos agregados solicitados e zonas granulométricas do NCMA e FHWA.



Fonte: Do autor.

Os resultados dos ensaios de caracterização física antes e após os ensaios de resistência de conexão são sumarizados na **Tabela 13**.

Os resultados de alguns parâmetros tal como densidade, absorção de água e teor de material fino apresentaram variações que podem estar associadas a presença de argamassa aderida nos ARCO (CENTENO *et al.*, 2014). As tensões aplicadas nos ensaios de resistência de conexão culminaram na quebra dos materiais granulares (AN e ARCO), com o aumento do teor de material fino (m , %) e diminuição do índice de forma (I). Isto influenciou diretamente nos aumentos de massa unitária (ρ_{ap} , kg/m^3) e respectivas compacidades (C , %).

Tabela 13. Propriedades físicas dos AN e AR antes e após os ensaios de resistência de conexão.

		Valores das propriedades físicas do agregado intacto		Valores das propriedades físicas do agregado solicitado		Referência normativa para os ensaios de caracterização física
Propriedades físicas		AN	ARCO	AN	ARCO	
Densidades	$\rho_s (g/cm^3)^1$	2,81	2,21	n/a	n/a	ABNT NBR 16917:2021
	$\rho_{sss} (g/cm^3)^2$	2,83	2,37	n/a	n/a	
Absorção de água	$Abs (%)$	0,6	7,2	n/a	n/a	
Massa unitária	$\rho_{ap} (kg/m^3)^3$	1611	1258	1685	1314	ABNT NBR 16972:2021
	$\rho_{ap} (kg/m^3)^4$	1518	1163	1561	1176	
Compacidade e	$c (%)^3$	57%	57%	60%	59%	n/a
	$c (%)^4$	54%	53%	56%	53%	
Teor de material fino	$m (%)$	0,31	4,01	0,62	4,21	ABNT NBR 16973:2021
Índice de forma	I	2,11	2,55	1,87	2,18	ABNT NBR 7809:2019
Perda por abrasão Los Angeles	$P (%)$	43,25	41,35	n/a	n/a	ABNT NBR 16974:2022

¹Densidade determinada sob a condição seca conforme ABNT NBR 16917:2021.

²Densidade determinada sob a condição saturada de superfície seca conforme ABNT NBR 16917:2021.

³Massa unitária determinada conforme método A da ABNT NBR 16972:2021.

⁴Massa unitária determinada conforme método C da ABNT NBR 16972:2021.

Fonte: Do autor.

No ensaio de índice de forma pelo método do paquímetro, ABNT NBR 7809 (2019), antes dos ensaios de resistência de conexão os valores determinados apresentaram uma leve variação e foram maiores que 1, o que denota similaridade entre as dimensões dos grãos de ambos os agregados e os caracterizam em forma não cúbica, mas sim lamelar. Após os ensaios de

resistência de conexão, ocorreu redução no índice de forma de ambos os agregados. A redução do índice de forma foi mais expressiva para os ARCO, na ordem de 14,5% em relação ao valor do índice de forma determinado antes dos ensaios de resistência de conexão, enquanto que para os AN, a redução do índice de forma foi de 11,4%.

A perda por abrasão ocasionada pelo atrito dos grãos promoveu a redução da granulometria, e o deslocamento da curva granulométrica, visto que mais impactante nos ARCO. As alterações no formato dos grãos foram evidenciadas com o arredondamento dos mesmos, como verificado nos resultados dos valores do índice de forma, caracterizando o formato com tendência ao cúbico. Em ambos os apontamentos, os ARCO tiveram alterações nos valores das características de distribuição granulométrica e de índice de forma, maiores em relação aos AN, como era esperado para esses materiais, devido a parcela da sua composição com maior fragilidade às solicitações durante a realização dos ensaios de resistência de conexão.

O teor de material fino indicou maior concentração de material fino nos ARCO em relação aos AN. Para os ARCO o teor determinado foi em torno de mais de 13 vezes o teor de material fino para os AN, antes dos ensaios de resistência de conexão e em torno de sete vezes maior após os ensaios de resistência de conexão. A maior concentração pode estar atrelada a fatores tais como exposição do RCC ao tempo, antes e durante o processo de beneficiamento, ao fato de ocorrer a desagregação da argamassa aderida durante o processo de britagem do RCC na usina e ao próprio tipo de processo de cominuição empregado na planta de produção de agregados (DOMICIANO; SANTOS; LINS DA SILVA, 2020; FIGUEIREDO *et al.*, 2017).

No ensaio de determinação da massa unitária, os valores obtidos para os AN foram maiores que dos ARCO, tanto no método A quanto no método C, agregado compactado e agregado solto, respectivamente. Tais valores condizem com os resultados determinados no ensaio de densidade, ABNT NBR 16917 (2021), visto que os valores tanto da densidade determinada sob a condição seca quanto da densidade determinada sob condição saturada de superfície seca determinados para os AN foram maiores, em torno de 27% mais expressivos em relação ao ARCO.

A absorção de água dos ARCO é cerca de 12 vezes maior que a absorção de água dos AN. Visto isso, a partir da relação dos valores determinados de densidades e absorção de água, inferiu-se que os ARCO apresentam uma característica peculiar nos agregados reciclados: maior porosidade quando comparados aos AN; como relatado por outros autores (MIRAMOV; HU; CAVALLINE, 2022; SILVA; BRITO; DHIR, 2014).

Quanto à compacidade, os valores determinados foram consistentes entre si, apresentaram uma suave variação entre os métodos A e C, e quando comparados entre os tipos de agregados

ensaios, apresentaram uma certa similaridade. A compacidade é uma propriedade determinada por meio da relação de dois parâmetros, a densidade determinada sob a condição seca e a massa unitária, logo a variação dessas propriedades interfere diretamente nos resultados dessa propriedade. A variação dos valores de compacidade após os ensaios de resistência de conexão também foi influenciada em decorrência do deslocamento da curva granulométrica, em que se observou a redução das partículas, da redução do índice de forma e do aumento do teor de finos nas amostras ensaiadas.

Os valores determinados no ensaio de abrasão *Los Angeles*, apresentaram resultados abaixo de 50% de perda, o que caracterizou o uso de ambos os agregados para um emprego mais nobre, tal como a execução de concretos. Além disso, cabe ressaltar que as duas amostras de ARCO submetidas ao ensaio apresentaram resultados similares, o que não ocorreu para as amostras de AN. Para ambos os agregados o percentual de perda foi menor de 50%, limite este recomendado para aplicação de agregados graúdos como material drenante (GEORIO, 2000) e para solicitações por desgastes superficiais conforme preconizado na ABNT NBR 7211 (2022).

Mesmo que os resultados dos ensaios de perda por abrasão *Los Angeles* validem o uso para aplicações de ambos agregados como material drenante, os teores de material fino (m , %) devem ser avaliados com cautela, visto que podem ocasionar efeitos indesejáveis ao sistema drenante, tais como colmatção e variação da permeabilidade e consequentemente no aumento das pressões hidrostáticas (ARAÚJO; MARTINS; FERREIRA, 2019).

5.2 ENSAIOS DE RESISTÊNCIA DE CONEXÃO

Nos ensaios de resistência de conexão em que foram empregados ARCO como material de preenchimento dos blocos segmentais, os valores de resistência de conexão obtidos sob a solicitação das tensões normais de 40 kN/m², 50 kN/m², 60 kN/m² e 80 kN/m² foram maiores em relação aos valores obtidos nos ensaios que empregaram os AN. Contudo, nos ensaios sob solicitação de 100 kN/m², os valores foram mais expressivos quando empregados AN. Tal constatação pode ser observada na **Tabela 14**.

Tabela 14. Valores de resistência de conexão e medidas de dispersão para os AN e os ARCO.

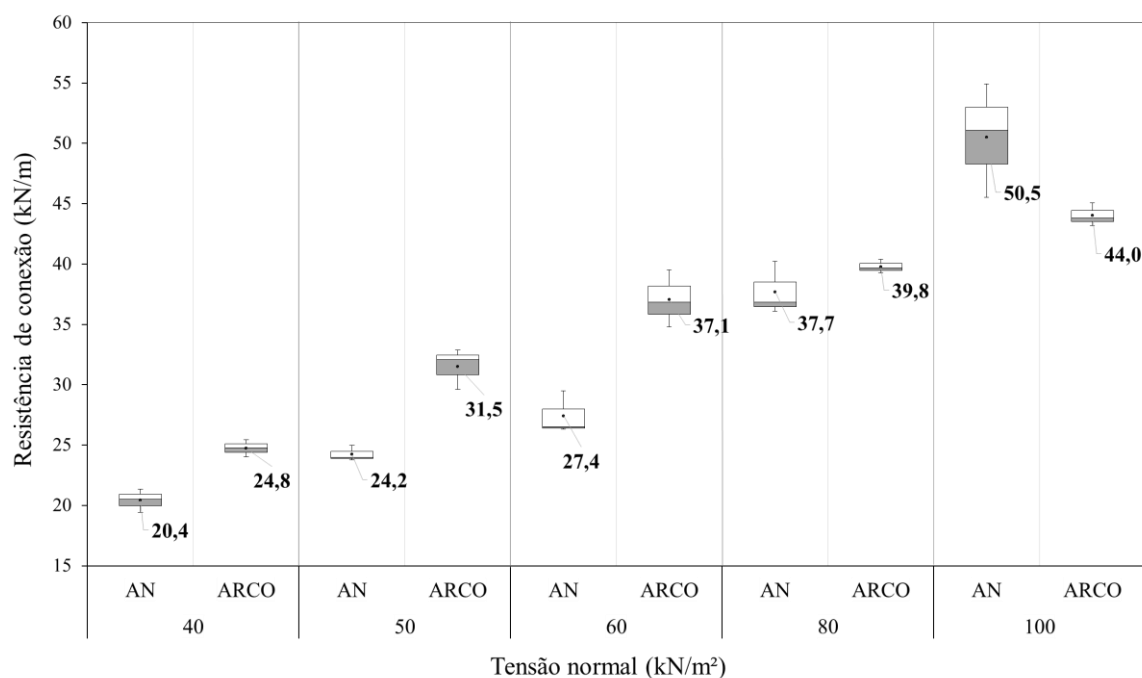
Tensão normal (kN/m ²)	AN	Medidas de dispersão			ARCO	Medidas de dispersão		
	Resistência de conexão $T_{última}$ (kN/m)	$\bar{x}$ (kN/m)	S (kN/m)	CV (%)	Resistência de conexão $T_{última}$ (kN/m)	$\bar{x}$ (kN/m)	S (kN/m)	CV (%)
40	19,4	20,4	1,0	4,8	24,0	24,8	0,7	2,9
	20,5				24,8			
	21,4				25,5			
50	24,0	24,2	0,6	2,7	29,6	31,5	1,7	5,4
	23,8				32,1			
	25,0				32,9			
60	26,3	27,4	1,8	6,4	34,8	37,1	2,4	6,4
	26,5				36,9			
	29,5				39,5			
80	36,1	37,7	2,2	5,9	39,3	39,8	0,6	1,5
	36,8				39,7			
	40,2				40,4			
100	45,5	50,5	4,7	9,3	43,2	44,0	1,0	2,2
	51,1				43,8			
	54,9				45,1			

Fonte: Do autor.

Os valores das forças de tração de pico (F_p) obtidos nos ensaios de resistência de conexão são apresentados na **Tabela 16** constante no APÊNDICE C.

A **Tabela 14** apresenta também as medidas de dispersão: média amostral ($\bar{x}$, kN/m), desvio padrão (S , kN/m) e coeficiente de variação (CV , %) dos valores de resistência de conexão. A partir da análise das medidas de dispersão inferiu-se que a variação dos resultados foi mais expressiva nos ensaios de resistência de conexão quando o conjunto foi submetido à tensão normal de 100 kN/m² quando empregado AN, condição esta em que o emprego de AN como material de preenchimento apresentou melhor desempenho de resistência de conexão quando comparado aos ensaios sob a mesma condição em que foram empregados ARCO.

Os dados dos ensaios também foram tratados por meio da ferramenta gráfica, diagrama de caixas (gráfico *boxplot*). O diagrama de caixas é apresentado na **Figura 76** de modo a corroborar para análise de que houve maior dispersão dos dados dos valores de resistência de conexão obtidos nos ensaios quando o conjunto em que foi empregado agregados naturais foi submetido a tensão normal de 100 kN/m².

Figura 76. Diagrama de caixas de resistência de conexão para ambos os agregados.

Fonte: Do autor.

Com exceção dos resultados obtidos nos ensaios de resistência de conexão sob tensão normal 50 kN/m² com emprego de ARCO, os demais resultados com emprego de AN apresentaram CV mais significativos. Isto pode ser explicado devido as características físicas dos AN no que se refere aos aspectos de forma, densidade, porosidade e resistência a solicitações, tal como ao esmagamento.

Para ambos os agregados, os valores determinados de resistência de conexão em razão da tensão normal aplicada apresentaram comportamento linear como apresentado na **Figura 66** e na **Figura 72**. Nos ensaios de resistência de conexão que empregaram AN, foi observado que o coeficiente de determinação (R^2) (**Figura 66**) obtido foi mais representativo em relação ao coeficiente de determinação (**Figura 72**) dos ensaios de resistência de conexão que empregaram o ARCO, com valores em torno de 99% e 90%, respectivamente.

Isto posto, inferiu-se que o modelo linear adotado explica a variância dos valores de resistência de conexão em relação as tensões normais aplicadas, principalmente para o modelo adotado para os resultados que empregaram o AN como material de preenchimento dos blocos segmentais.

Os resultados de resistência de conexão apontam que com o aumento da tensão normal aplicada a partir da tensão de ensaio de 80 kN/m², promove em primeiro instante o estreitamento dos valores médios de resistência em relação aos valores obtidos nos ensaios que empregam AN, na ordem de 5,5 %, mantendo-se mais expressivos. Contudo, com a aplicação da tensão

normal de 100 kN/m², os valores de resistência de conexão dos ensaios que empregam o AN são mais expressivos, na ordem de 12,8 %, em relação aos valores de resistência obtidos nos ensaios com emprego ARCO. Com o aumento da tensões normais aplicadas, a compactação dos ARCO provocou o esmagamento dos grãos e como consequência, ocorreu a redução do contato entre o material granular e a geogrelha, promovendo a menor aderência e tornando imbricamento ineficiente.

Os valores de resistência de conexão obtidos nos ensaios atenderam aos limites preconizados na ASTM D6638-18 (2018) quanto aos requisitos de repetibilidade, em que recomenda a repetição dos ensaios quando os valores de resistência de conexão obtidos extrapolarem em $\pm 10\%$ do valor médio do somatório dos valores de resistência de conexão de todos os ensaios para cada série de ensaios em razão da tensão normal aplicada sob o conjunto.

A **Tabela 15** apresenta valores médios de resistência de conexão obtidos nesta pesquisa e por outros autores em função da tensão normal aplicada e do modelo de GGR utilizada, considerando do modelo a sua resistência nominal principal igual a 110 kN/m, como referência para os apontamentos e que utilizaram o equipamento desenvolvido por Urashima e Martins (2004). Outros valores de resistência de conexão e informações complementares obtidos por outros autores são apresentados no **Quadro 11** do ANEXO A.

Tabela 15. Valores médios de resistência média obtidos em estudos diversos.

Autor (es)	Geogrelha	Polímero	Bloco	Material de preenchimento	Tensão normal (kN/m ²)				
					40	50	60	80	100
Guimarães (2006)	110/30x20	PET	W	Brita 1	-	49	-	-	58
Almeida e Toma (2011)	110/30x20	PVA	MW	Brita 1	38,25	-	40,76	40,41	46,8
Pinto (2015)	110/30x20	PVA	MW	Brita 1	-	38,83	-	-	38,15
Rocha (2022)	110/20x30	PVA	MW	AN	20,4	24,2	27,4	37,7	48,3
				ARCO	24,8	31,5	37,1	39,8	44

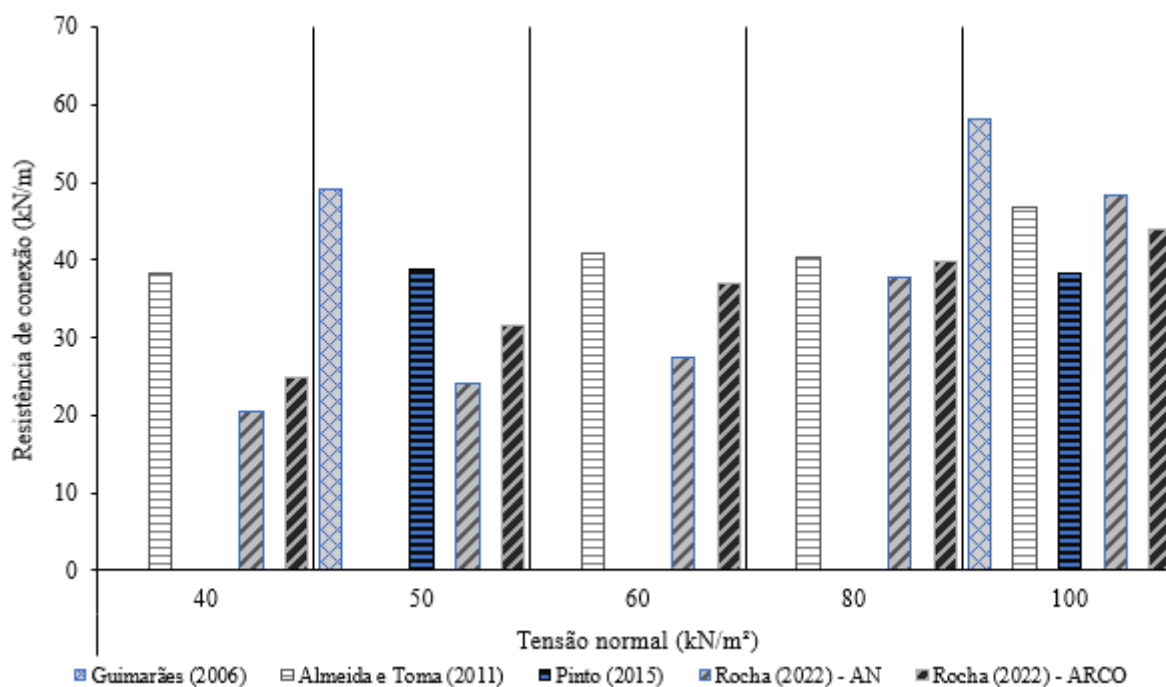
Fonte: Do autor.

As pesquisas realizadas por Guimarães (2006), Almeida e Toma (2011) e Pinto (2015) fazem uso do termo “brita 1” para classificar o material granular utilizado no preenchimento dos blocos segmentais conforme denominação estabelecida pela norma vigente à época. Todos os resultados apresentados na **Tabela 15** levaram em consideração a montagem do conjunto de

blocos-geogrelha na caixa de confinamento do equipamento de ensaio de resistência de conexão conforme a configuração adotada nesta pesquisa, e utilizaram o reforço com conexão do tipo simples. Resultados de resistência de conexão obtidos por meio do procedimento de montagem do ensaio com o tipo de conexão dupla são mais expressivos, podendo atingir valores em torno de 50% maiores que os obtidos em ensaios que utilizam o tipo de conexão simples, conforme determinado por outros autores (ALMEIDA; TOMA, 2011; BERNARDES *et al.*, 2008; GUIMARÃES, 2006; PINTO, 2015).

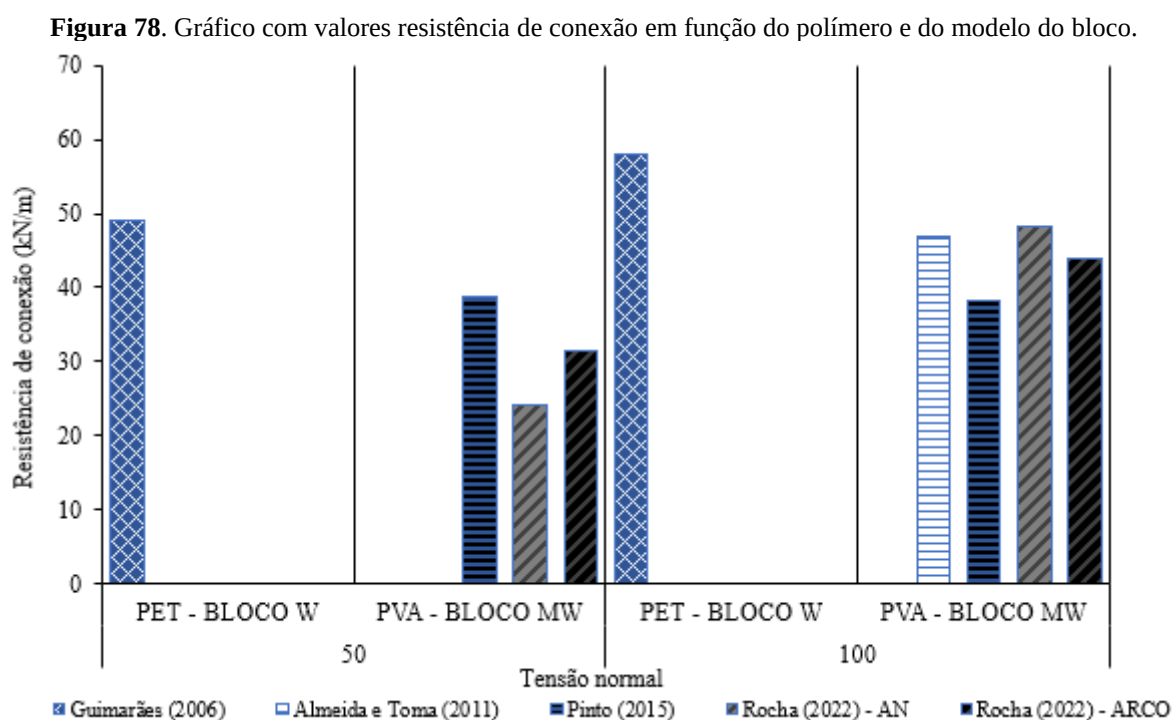
A **Figura 77** ilustra os valores médios de resistência de conexão obtidos pelos autores Guimarães (2006), Almeida e Toma (2011) e Pinto (2015), bem com os valores obtidos pelos resultados desta pesquisa, plotados em um gráfico. A partir da representação gráfica é possível observar que quando comparados com o estudo em questão, os resultados obtidos nesta pesquisa foram expressivos apenas na situação em que a tensão normal aplicada foi de 100 kN/m². Nesta situação, os valores de resistência de conexão com emprego de ambos os agregados foram concomitantemente mais expressivos que os resultados obtidos por Pinto (2015) e menos expressivos que Guimarães (2006), ao mesmo tempo que Almeida e Toma (2011) apresentaram resultados mais próximos dos valores obtidos nesta pesquisa.

Figura 77. Gráfico de diversos resultados de resistência de conexão.



Fonte: Do autor.

A **Figura 78** apresenta o gráfico com os valores de resistência de conexão obtidos por Guimarães (2006); Almeida e Toma (2011) e os obtidos neste estudo quando empregados ambos os agregados, em função do tipo de polímero predominante utilizado na fabricação do reforço, especificamente de GGR e do modelo de blocos segmentais. Para efeito de comparação foram apresentados os resultados dos autores em que para uma mesma situação de solicitação de tensão normal em que haviam mais de um tipo de polímero, de bloco, e de material de preenchimento. Neste sentido, os valores de resistência de conexão são referentes às solicitações de tensão normal de 50 kN/m² e 100 kN/m², aos reforços fabricados predominante dos polímeros de polietileno (PET) e de acetato de polivinila (PVA) e que utilizaram os blocos segmentais nos modelos W e MW, respectivamente.



Fonte: Do autor.

Os resultados apresentados na **Figura 78** indicam que para os ensaios de resistência de conexão em que foram empregadas amostra de GGR fabricadas pelo polímero predominante de PET foram mais expressivos nas situações em que o conjunto foi submetido a tensão normal de 50 e 100 kN/m². O tipo de polímero utilizado na fabricação dos geossintéticos tem influência nas suas propriedades (SHUKLA, 2016b; PALMEIRA, 2018).

Bhuiyan, Ali e Salman (2014) realizaram testes de cisalhamento entre blocos segmentais, geossintéticos e agregados naturais em equipamento de grande porte similar ao utilizado nesta

pesquisa, com o intuito de avaliar a interação dessas matérias quando empregados como elementos de solução de contenção em solo reforçado. Os autores utilizaram três tipos de inclusões geossintéticas, sendo duas geogrelhas (GGR), uma flexível fabricada de polietileno (PET) e outra rígida fabricada de polietileno de alta densidade (PEAD), e um geotêxtil não tecido flexível fabricado de polietileno (PET). Os resultados apresentados pelos autores também indicaram que para inclusões de GGR flexíveis fabricadas de PET os resultados de coesão e ângulo de atrito foram mais expressivos.

Quanto ao modelo de blocos segmentais utilizados, observa-se que os resultados de resistência de conexão obtidos no estudo que utilizou o modelo do tipo W (GUIMARÃES, 2006) apresentou valores mais expressivos em relação ao estudos que empregaram o modelo MW (ALMEIDA; TOMA, 2011; PINTO, 2015) e ao estudo desta pesquisa.

Quanto ao modo de falha dos reforços, para todos os ensaios de resistência de conexão realizados durante a campanha experimental foi observado a ocorrência de falhas por ruptura do reforço na região interna da caixa de confinamento do conjunto, entre as linhas de blocos segmentais. Não foram evidenciados nenhum modo de falha caracterizado por arrancamento total do reforço, o que aponta a efetiva interação entre os elementos de interface do conjunto e a distribuição uniforme da tensão normal aplicada efetivada **Figura 79** ilustra uma amostra de GGR após finalização de ensaio de resistência de conexão.

Figura 79. Amostra de GGR após ensaio de resistência de conexão.



(a) Amostra de GGR com ruptura interna no conjunto da caixa de confinamento após ensaio de resistência de conexão.



(b) Vista da zona ancorada da amostra de GGR após realização do ensaio de resistência de conexão.



(c) Detalhe de ruptura das tiras no sentido da direção principal da amostra de GGR após remoção.

Fonte: Do autor

Durante a campanha experimental foi observado que a reutilização dos agregados tanto reciclados quanto naturais para uma série de três ensaios de resistência de conexão, influenciou parcialmente nos dados obtidos, o que pode ser verificado com o traçado das curvas de força versus tempo (ver gráficos das **Figura 61 a Figura 65**, e das **Figura 67 a Figura 71**). Em alguns resultados, as curvas dos três ensaios apresentaram traçados semelhantes, caracterizando dados mais homogêneos e resultados de resistência de conexão com menor dispersão nos valores obtidos, conforme apresentado pelas análises estatísticas empregadas. No entanto, o traçado das curvas explica o arranjo dos grãos dos agregados tanto nas aberturas das GGR quanto nos vazios dos blocos segmentais.

Após os ensaios de resistência de conexão, as amostras de GGR foram removidas e analisadas visualmente. As amostras de GGR removidas podem ser visualizadas entre os **Quadro 6** e o **Quadro 10**, constantes no APÊNDICE D.

Durante a avaliação visual das amostras removidas após a realização dos ensaios de resistência de conexão não foram identificadas falhas na região dos encaixes macho-fêmea dos blocos segmentais modelo MW, região esta com potencial de ruptura e de influência na perda da ancoragem do reforço, contribuindo para falha local no conjunto. No entanto, foram identificados danos nesta região sem potencial para comprometer o desempenho da resistência da conexão.

As falhas por ruptura interna das amostras ocorreram em decorrência do atrito entre os componentes da interface do conjunto (agregados, blocos e geogrelhas). Como evidenciado em todas as amostras durante a realização dos ensaios de resistência de conexão, as primeiras tiras a romperem foram as da direção transversal (secundária) da malha da GGR. Tal evidencia se deve ao fato de as amostras de reforço se tratarem de GGR unidirecionais, nas quais a direção longitudinal das tiras apresenta maior capacidade de resistência à tração, enquanto a direção transversal apresenta menor capacidade em relação a direção longitudinal ou principal. Visto isto, as tensões cisalhantes na direção transversal são mobilizadas para solicitações de menor intensidade e tendem a romper primeiro.

6 CONCLUSÃO

A pesquisa consistiu na realização de ensaios de laboratório para avaliar o desempenho de agregados reciclados de concreto quando empregados como material de preenchimento em muros de solo reforçado com geogrelhas e com paramento de blocos segmentais. O desempenho do emprego desses agregados foi avaliado por meio da comparação dos valores de resistência de conexão obtidos nos ensaios de resistência de conexão em relação a valores obtidos em ensaios realizados com agregados naturais.

Antemão, foi necessária a realização de ensaios de caracterização física para determinar a distribuição granulométrica, os valores de densidade e de massa unitária, os teores de absorção de água e de material pulverulento, bem como o índice de forma dos AN e ARCO antes e após a realização dos ensaios de resistência de conexão. A caracterização física permitiu realizar a comparação dos valores das propriedades físicas como modo de avaliar o desempenho dos materiais granulares empregados, bem como possibilitou inferir sobre o comportamento desses após os ensaios de resistência de conexão.

Os RCC utilizados nesta pesquisa foram coletados de 3 pilhas diferentes compostas de blocos intertravados que haviam sido classificados como resíduos de obra pregressa. As demais etapas que sucederam a coleta do RCC até o beneficiamento do ARCO, ocorreram de maneira contínua, com poucas interrupções e paralisações. Desta forma, ressalta-se que para a obtenção de agregado reciclado de qualidade que atenda as preconizações de norma, é necessário a separação do material ainda em canteiro de obra, de maneira a facilitar a coleta seletiva.

Os resultados de valores de resistência de conexão, conduzem ao emprego de agregados reciclados de concreto como alternativa no preenchimento de blocos em muros de solo reforçado com geogrelhas e paramento de blocos segmentais com altura livre máxima de 5 m. Para projetos que exijam das geometrias altura superior ao referido valor, o uso não é recomendado, visto que os resultados obtidos nos ensaios de resistência de conexão para tensão normal de 100 kN/m² (equivale a 6,4 m de altura) foram menos expressivos em relação aos ensaios que empregaram o AN. Em complemento, ressalta-se que esses resultados de resistência de conexão foram influenciados pela acentuada redução das características físicas das amostras de ARCO após a série de cinco ensaios, o que também poderá influenciar no desempenho secundário do material granular de preenchimento quanto à função de drenagem do paramento de muros de solo reforçado.

Mesmo sendo de conhecimento que a altura máxima para muros de solo reforçado com paramento construído com o modelo de bloco segmental utilizado (modelo MW) é de 10 metros,

a pesquisa limitou a explorar alturas máximas de 6,8 metros, com tensão normal equivalente a 100 kN/m² como predefinido na campanha experimental. Analisados os valores de resistência de conexão e de propriedades pós ensaios de resistência de conexão, pode-se inferir que a altura máxima de segurança é limitada ao valor de 5 metros para estruturas de contenção que empregam ARCO como material de preenchimento de blocos segmentais.

Os ensaios de caracterização física empregados em ambos os agregados, normalmente, são utilizados para caracterização destes para execução de concretos estruturais ou não estruturais. A princípio, para a pesquisa, a similaridade e a consistência dos resultados obtidos denotam o potencial emprego do ARCO como material de preenchimento de blocos segmentais em muros de solo reforçado. As características física relacionadas as propriedades e a geometria do ARCO em relação aos AN são parâmetros que promovem a sua aplicação em funções que não estabelecem rigorosos controles de qualidade, o que pode ser questionável quando se tratar de emprego de agregados reciclados em aplicações mais nobres, como na execução de concretos e argamassas.

A princípio, a presença de argamassa aderida nos agregados reciclados é um fator que pode alterar as características físicas das partículas e consequentemente no desempenho mecânico quando empregado com material de preenchimento de blocos segmentais. Contudo, é recomendado que sejam realizados outros ensaios de caracterização para avaliar outros parâmetros, tais como resistência ao esmagamento, teor de argamassa aderida, entre outros para avaliar com precisão a relação entre os agregados reciclados e a resistência obtida nos ensaios de resistência de conexão, bem como ensaios que visam determinar a influência das características física no desempenho propriedades de condutividade hidráulica, tais como a permeabilidade.

O desenvolvimento de pesquisas que promovam a caracterização de RCC, bem como a caracterização de produtos de beneficiamento destes, tal como os agregados reciclados, permite atribuir informações necessários para definir parâmetros de qualidade, visto que são materiais com características heterogêneas e apresentam discrepâncias no comportamento quando submetidos às solicitações, o que dificulta a padronização do emprego para os diversos ramos da ICC. Logo, a importância dessas pesquisas está relacionada com a possibilidade de inserir um produto sustentável de qualidade na cadeia produtiva da construção civil.

Os resultados apresentados contribuíram para instigar as políticas públicas no que tange ao incentivo à atividade de reciclagem e outras práticas de manejo de RCC. Ampliar as possibilidades de emprego de agregados reciclados contribui para inserção de agregados reciclados em sistemas construtivos não convencionais, fomenta o desenvolvimento de tecnologias sustentáveis e atende aos objetivos da PNRS, metas da Agenda 2030 entre outros pilares do desenvolvimento sustentável.

O emprego de soluções de contenção do tipo muros de solo reforçado com geossintéticos em situações que exijam aterro contribuem diretamente para o aspecto resiliente das cidades sustentáveis. Diante dos desafios postos pelas mudanças climáticas, em que a ocorrência de eventos extremos se tornou frequente em determinadas localidades, principalmente nos grandes centros urbanos, em que a infraestrutura não responde em tempo hábil. Desta forma, a aplicação de soluções alternativas frente às convencionais é vantajosa, uma vez que proporciona o atendimento de aspectos técnicos de projeto, de prazo, de custo, agilidade de construção, possibilidade de manutenção e monitoramento, bem como o apelo arquitetônico e o atendimento aos aspectos sustentáveis.

Os muros de solo reforçado se mostram uma alternativa que permite a utilização de reforços fabricados a partir de matrizes poliméricas, produtos geossintéticos, tal como as geogrelhas. O emprego desses produtos tem aumentado em obras de engenharia civil e geotécnica, em decorrência da versatilidade dos diversos produtos em atendimento as mais variadas funções e aplicações. Além do aspecto sustentável atrelado ao menor consumo de materiais de origem cimentícia, o emprego de geossintéticos possibilita incluir produtos beneficiados de RCC como material tanto de aterro como de preenchimento dos blocos segmentais de forma a garantir a segurança, desempenho e qualidade da estrutura de contenção em solo reforçado.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O resultado desta pesquisa é sem dúvida uma descoberta. A metodologia adotada apresentou uma proposta replicável, para proporcionar o aprimoramento do método empregado e possibilitar a realização de novas pesquisas. Alguns assuntos que surgiram ao longo e após a realização da pesquisa não puderam compor o resultado final, mas são de expressivo interesse para novas pesquisas que abordam a temática em questão.

- 1) Avaliar os agregados utilizados no preenchimento por meio de outros ensaios de caracterização para se ter uma relação mais precisa entre o material de reforço, o material de preenchimento e os materiais de revestimento do paramento, bem como definir propriedades hidráulicas (permeabilidade) dos agregados e analisar as possíveis contribuições para o sistema de drenagem e estabilidade da estrutura;
- 2) Avaliar o desempenho dos ensaios de resistência de conexão para agregados oriundos de RCC com classificações diferentes, bem como ARCO oriundos de outras fontes, tal como concreto estrutural de diversas resistências. A possibilidade do emprego de outros materiais, tanto utilizados como reforço quanto utilizados no revestimento do paramento, no que diz respeito a geometria, resistência e outras propriedades de ambos;
- 3) Avaliar a influência da compactação nos ensaios de resistência de conexão e nos parâmetros físicos dos agregados;
- 4) Avaliar danos causados durante a instalação dos geossintéticos, execução do muro de solo reforçado e operação quando empregados agregados reciclados. Determinar por meio de experimentos de laboratório e campo, possíveis parâmetros a serem empregados nas formulações para definição do fator e segurança mínima;
- 5) Avaliar e comparar os impactos causados na utilização de agregados advindos RCC com relação aos AN por meio de aplicação de metodologia de avaliação do ciclo de vida (ACV);
- 6) Realizar a experimento que busque avaliar em escala real, estruturas de contenção do tipo muro de solo reforçado para avaliar o desempenho da estrutura que empregue agregados de RCC tanto no preenchimento dos blocos segmentais, quanto no preenchimento do aterro.
- 7) Realizar os ensaios de resistência de conexão com alterações nas prerrogativas definidas nesta pesquisa, tais como valores de tensões normais e de força horizontal de tração sob velocidades alternativas do fuso que busquem avaliar o

comportamento não só dos materiais empregados, bem como o equipamento e o método aplicado.

REFERÊNCIAS

- ABU-FARSAKH, Murad; CORONEL, Julian; TAO, Mingjiang. Effect of Soil Moisture Content and Dry Density on Cohesive Soil Geosynthetic Interactions Using Large Direct Shear Tests. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 19, n. 7, p. 540-549, 2007.
- AKHTAR, Ali.; SARMAH, Ajit 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. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.085>
- ALI, Faisal; BHUIYAN, Md Zahidul Islam. Design and Fabrication of the Apparatus for Laboratory Study of Segmental Retaining Wall Units. **Electronic Journal of Geotechnical Engineering**, v. 19, pp. 6413-6424, 2014a.
- ALI, Faisal; BHUIYAN, Md Zahidul Islam. Performance of Segmental Block System In-filled With Recycled Concrete Aggregate. **Electronic Journal of Geotechnical Engineering**, v. 19, pp. 6413-6424, 2014b.
- ALLEN, Sam; SPRAGUE, C. Joel. Carbon footprint implications of the erosion control response. In: Proceedings 24th Annual GRI Conference: Optimizing Sustainability Using Geosynthetics, Dallas, TX, USA. **Anais [...]**. Philadelphia, PA, USA, pp. 86-93, 2011.
- ALMEIDA, Alexandre Augusto Ferreira de; TOMA, Bruno Hideo. **Análise experimental da conexão entre blocos segmentais e geogrelha**. Trabalho de Graduação em Engenharia Civil, Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 103 f., 2011.
- AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS - AASHTO. **Standard Specifications for Highway Bridges**. AASHTO, Washington, D.C., 2002.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM. **ASTM D6638-18**: Standard Test Method for Determining Connection Strength Between Geosynthetic Reinforcement and Segmental Concrete Units (Modular Concrete Blocks). ASTM, West Conshohocken, PA, 2018.
- ANESANI NETO, José Orlando; HAYASHIDA, Eduardo Menani; PEREIRA, Vinicius Rocha Gomes. Levantamento e comparação dos custos de diferentes soluções de estruturas de contenção em aterro. In: VI Conferência Brasileira de Estabilidade de Encostas (COBRAE 2013), 2013, 04 de outubro a 06 de outubro, Angra dos Reis. **Anais ...** Angra dos Reis, 2013.
- ANGULO, Sergio Cirelli. **Variabilidade de agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados**. São Paulo, 2000. 155p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- ARAÚJO, Brenda Muller de; MARTINS, Cátia de Paulo; FERREIRA, Guilherme Soldati. Estudo do Resíduo de Construção Civil para Uso em Drenagem Profunda. In: 5ª edição do Simpósio de Prática de Engenharia Geotécnica na Região Centro Oeste – GEOCENTRO. **Anais [...]**. Brasília, Distrito Federal, 2019.
- ARTONI, Riccardo; CAZACLIU, Bogdan; HAMARD, Erwan; COTHENET, Alexis; PARHANOS, Régis Sebben. Resistance to fragmentation of recycled concrete aggregate. **Materials and Structures**. Vol. 50, 11, pp.1-14. 2017.
- ASLAM, Muhammad Shahzad; HUANG, Beijia; CUI, Lifeng. Review of construction and demolition waste management in China and USA. **Journal of Environmental Management**, v. 264, n. 110445, 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS - ABRELPE. **Estimativa de custos para viabilizar a universalização da destinação adequada de resíduos sólidos no Brasil**. São Paulo, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS - ABRELPE. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil – 2021**. São Paulo, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10004**: Resíduos sólidos: classificação. ABNT, Rio de Janeiro, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15116**: Agregados reciclados para uso em argamassas e concretos de cimento Portland — Requisitos e métodos de ensaios. ABNT, Rio de Janeiro, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16915**. Agregados - Amostragem. ABNT, Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16917**. Agregado graúdo - Determinação da densidade e da absorção de água. ABNT, Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16920-1**: Muros e taludes em solos reforçados — Parte 1: Solos reforçados em aterros. ABNT, Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16972**. Agregados - Determinação da massa unitária e do índice de vazios. ABNT, Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16973**. Agregados - Determinação do material fino que passa pela peneira de 75 µm por lavagem. ABNT, Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16974**. Agregado graúdo - Ensaio de abrasão Los Angeles. ABNT, Rio de Janeiro, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7211**. Agregado para concreto: Especificação. ABNT, Rio de Janeiro, 2022.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 10318-1**. Geossintéticos — Parte 1: Termos e definições. ABNT, Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 10318-2**. Geossintéticos — Parte 2: Símbolos e pictogramas. ABNT, Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 10319**. Geossintéticos — Ensaio de tração faixa larga. ABNT, Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 12236**. Geossintéticos — Ensaio de punção estático (punção CBR). ABNT, Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 9864**. Geossintéticos — Método de ensaio para determinação da massa por unidade de área de geotêxteis e produtos correlatos. ABNT, Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 248**. Agregados - Determinação da composição granulométrica. ABNT, Rio de Janeiro, 2003.

ASSUNÇÃO, Lucinei Tavares de; CARVALHO, Geraldo Ferreira de; BARATA, Márcio Santos. Avaliação das propriedades das argamassas de revestimento produzidas com resíduos da construção e de demolição como agregado. **Exacta**. v. 5, n.2, pp. 223-230. 2007.

AVESANI NETO, José Orlando; GEROTO, Regis Eduardo. Diretrizes Básicas para Concepção de Muros de Solo Reforçado de Grandes Alturas. In: XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica O Futuro Sustentável do Brasil passa por Minas COBRAMSEG 2016 — 19-22 outubro, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil. **Anais [...]**. Belo Horizonte, 2016.

BATHURST, Richard J.; SIMAC, Michael R. Geosynthetic reinforced segmental retaining wall structures in North America. In: Proceedings of the Fifth International Conference on Geotextiles, Geomembranes and Related Products, Singapura, 5 – 9 setembro, 1994. **Anais [...]**. Singapura, 1994.

BATHURST, Richard J.; SIMAC, Michael R. Laboratory Testing of Modular Unit-Geogrid Facing Connections, STP 1190 Geosynthetic Soil Reinforcement Testing Procedures (S.C.J. Cheng editor), **American Society for Testing and Materials** (Special Technical Publication), pp. 32–48, 1993.

BERGADO, Dennes T.; CHAI, J. C.; ABIERA, H. O.; ALFARO, M. C.; BALASUBRAMANIAM. Interaction between cohesive-frictional soil and various grid reinforcements. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 12, n. 4 p. 327-349, 1993.

BERNARDES, George P.; BARRANCO, Thiago; MACUCO, Frederico; URASHIMA, Denise C.; MONTEZ, Flávio T.; SILVA, André E. F.; BRUGGER, Paulo J. Influência da Granulometria do Material de Preenchimento no Comportamento Mecânico de Conexão de Sistema Blocos Segmentais Geogrelha. In: XIV COBRAMSEG - Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. **Anais [...]**. Búzios, RJ, 2008.

BESSA, Sofia Araújo Lima; MELLO, Tiago Augusto Gonçalves; LOURENÇO, Karen Katleen. Análise quantitativa e qualitativa dos resíduos de construção e demolição gerados em Belo Horizonte/MG. **Revista Brasileira de Gestão Urbana**, v. 11, 16 p. 2019.

BHUIYAN, Mohammad Zahidul Islam; ALI, Faisal H.; SALMAN, Firas A. Effect of flexibility of geosynthetic inclusion on the interface shear capacity of segmental block system. **Electronic Journal of Geotechnical Engineering**, v. 19 B, pp. 254–265, 2014.

BHUIYAN, Mohammad Zahidul Islam; ALI, Faisal H.; SALMAN, Firas A. Application of recycled concrete aGGRregates as alternative granular infills in hollow segmental block systems. **Soils and Foundations**, v. 55, n. 2, p. 296–303, 1 abr. 2015.

BRASIL. DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL - DNPM. **Anuário Mineral Brasileiro**. Ministério de Minas e Energia. Brasília, 2010a. 871 p.

BRASIL. DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL - DNPM. **Anuário Mineral Brasileiro**. Ministério de Minas e Energia. Brasília, 2001. 404 p.

BRASIL. **Lei nº 12.305, em 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. 02 de agosto de 2010. PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA, Casa Civil, Superintendência para Assuntos Jurídicos, 2010b.

BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE - MMA. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos**. Brasília, Secretaria de Qualidade Ambiental. Brasília, 2020. 187 p.

BRASIL. **Resolução CONAMA nº 307, de 05 de julho de 2002**. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. DOU nº 136, de 17/07/2002, págs. 95-96. Julho de 2002. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, Brasília, DF. 2002.

BRASIL. **Resolução CONAMA nº 469, de 30 de julho de 2015**. Altera a Resolução CONAMA no 307, de 05 de julho de 2002, que estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. DOU nº 144, de 30/07/2015, págs. 109-110. Julho de 2015. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2015.

BRUGGER, Paulo J.; SILVA, André E.F.; RODRIGUES, Vitor J.; SARAMAGO, Robson P. Muro Reforçado em Geogrelhas e Blocos Segmentais – Um Caso de Obra com Altura de 13,50 metros. In: IV COBRAE – 4ª CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE ESTABILIDADE DE ENCOSTAS, **Anais [...]**. Salvador, 2005.

BUDKE, Régis; CARDOSO, Jackson Rainério; VALE, Silvio Bispo do. Resíduos de Construção Civil: Classificação, Normas e Reciclagem. In: ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E METALURGIA EXTRATIVA (XXIV ENTMMME), 2011, Salvador. **Anais [...]** Salvador, 2011. 1 CD-ROM.

BUENO, Benedito de Souza. **Matérias-Primas**. In: VERTEMATTI, José Carlos (coord). Manual Brasileiro de Geossintéticos. São Paulo: Blucher, pp. 13-26, 2004.

CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO CIVIL - CBIC. **Indicadores Imobiliários Nacionais 4T 2020**. Coletiva de Imprensa, 2021.

CARASEK, H.; GIRARDI, A. C. C., ARAÚJO, R. C., ANGELIM, R. & CASCUDO, O. Estudo e avaliação de agregados reciclados de resíduo de construção e demolição para argamassas de assentamento e de revestimento. **Cerâmica**, v.64, n.370, pp. 288-300; 2018. <https://doi.org/10.1590/0366-69132018643702244>.

CARDOSO, Afrodite da Conceição Fabiana; GALATTO, Sérgio Luciano; GUADAGNIN, Mario Ricardo. Estimativa de geração de resíduos da construção civil e estudo de viabilidade de usina de triagem e reciclagem. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, n. 31, 10 p. Março de 2014.

CARDOSO, Rafaela; SILVA, Rui Vasco; BRITO, Jorge de; DHIR, Ravindra. Use of recycled aGGRregates from construction and demolition waste in geotechnical applications: A literature review. **Waste Management**, v.49 pp. 131- 145, 2016.

CARVALHO, Henrique José Silva de.; SCHEER, Sérgio. A utilização de modelos BIM na gestão de resíduos de construção e demolição. In: ENCONTRO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DE INFORMAÇÃO E COMUNICAÇÃO NA CONSTRUÇÃO, 7., 2015, Recife. **Anais [...]** Porto Alegre: ANTAC, 2015.

CARVALHO, P. A. S.; PEDROSA, J. A. B. A.; WOLLE, Claudio Michael. Aterro reforçado com geotexteis: uma opção alternativa para a engenharia geotécnica. **Anais [...]**. São Paulo: Abms, 1986.

CAZZUFFI, Daniele; GIROUD, Jeanpierre.; SCUERO, Alberto; VASCHETTI, Gabriella. Geosynthetic barriers systems for dams. In: Proceedings 9th international conference on geosynthetics. **Anais [...]**. Guarujá, SP, Brasil, pp. 115-163, 2010.

CENTENO, Pedro Henrique Matthey; SALAZAR, Rafael Andrés Robayo; URREGO, Yimmy Fernando Silva; JARAMILLO, Norman Andrés Álvarez; ARJONA, Silvio Delvasto. Caracterización física y mecánica de

- agregados reciclados obtenidos a partir de escombros de la construcción. **Informador Técnico**. v.78 (2). p.121-127. 2014.
- CHEN, Jie; WANG, Yuyin; ROEDER, Charles W.; MA, Ji. Behavior of normal-strength recycled aGGRregate concrete filled steel tubes under loading. **Engineering Structures**. v. 130, pp.23-40. 2017.
- CHENG, Jack C. P., MA, Lauren Y. H. A BIM-based system for demolition and renovation waste estimation and Planning. **Waste Management**, v. 33, n. 6, p. 1539–1551, 2013. DOI: 10.1016/j.wasman.2013.01.001. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2013.01.001>.
- CHRISTOPHER, Barry R. Cost savings by using geosynthetics in the construction of civil work projects. In: 10th International Conference on Geosynthetics, 10 ICG, Berlin, Germany. **Anais [...]**. Berlin, Germany, 19p., 2014.
- COLLIN, James G. Lessons learned from a segmental retaining wall failure. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 19, pp. 445-454, 2001.
- COP27 Climate Change Conference. Disponível em: <https://unfccc.int/event/cop-27>. Acessado em 10/01/2023.
- DAMIANS, Ivan P.; BATHURST, Richard J.; ADROGUER, Eduard G.; JOSA, Alejandro; LLORET, Antonio. Environmental assessment of earth retaining wall structures. **ICE Environmental Geotechnics**, v. 4, nº. 6, pp. 415–431, 2017.
- DAMIANS, Ivan P.; BATHURST, Richard J.; ADROGUER, Eduard G.; JOSA, Alejandro; LLORET, Antonio. Sustainability assessment of earth retaining wall structures. **ICE Environmental Geotechnics**, v. 5, nº. 4, pp. 187–203, 2018.
- DEGARIE, C. J.; CRAPPER, T.; HOWE, B. M.; BURKE, B. F.; MC CARTHY, P. J. Floating geomembrane covers for odour control and biogás collection and utilization in municipal lagoons. **Water Science and Technology**, v. 42, nº. 10–11, pp. 291–298, 2000.
- DIXON, Neil; FOWMES, Gary; FROST, Matthew. Global challenges, geosynthetic solutions and counting carbon. **Geosynthetics International**, v. 24, nº. 5, pp. 451–464, 2017. <http://dx.doi.org/10.1680/jgein.17.00014>.
- DOMICIANO, Marcela L., SANTOS, Eder C.G., LINS DA SILVA, Jefferson. Geogrid Mechanical Damage Caused by Recycled Construction and Demolition Waste (RCDW): Influence of Grain Size Distribution. **Soils and Rocks**, v. 43, n. 2, pp. 231-246, 2020.
- DONATO, Cláudio José; DA SILVA, Irene Caires; ASTOLPHI, José Luís de Lima; ALVIM, Joselene Lopes; ULIANA, Maira Rodrigues; MULLER, Taís. Reciclagem de resíduos da construção civil. **Colloquium Humanarum**, vol. 14, n. Especial, Jul– Dez, p. 666-670, 2017. ISSN: 1809-8207. DOI: 10.5747/ch.2017.v14.nesp.001008.
- EHRlich, Maurício; AZAMBUJA, Eduardo. Muros de solo reforçado. In: IV Simpósio Brasileiro de Geossintéticos - V Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental. **Anais [...]**. Porto Alegre, pp. 81-100, 2003.
- EHRlich, Maurício; BECKER, Leonardo **Muros e taludes de solo reforçado: projeto e execução**. São Paulo: Oficina de textos. 2009. 126 p.
- EHRlich, Maurício; MITCHELL, James K. Working stress design method for reinforced soil walls. **Journal of Geotechnical Engineering**, v. 120, n. 4, p. 625-645, 1994.
- ETXEBERRIA; Miren; GONZALEZ-COROMINAS, Andreu. The assessment of ceramic and mixed recycled aGGRregates for high strength and low shrinkage concretes. **Materials and Structures**, v. 51, n. 5, p. 1-21, 2018.
- EVANGELISTA, Patrícia Pereira de Abreu; COSTA, Dayana Bastos; ZANTA, Viviana Maria. Alternativa sustentável para destinação de resíduos de construção classe A: sistemática para reciclagem em canteiros de obras. **Ambiente Construído**, v. 10, n. 3, pp. 23-40. 2010
- FARIAS FILHO, José Rodrigues; MENEZES, Romualdo R.; FERREIRA, Heber Sivini; SANTANA, Lisiane N.L.; NEVES, Gelmires de Araújo; FERREIRA, H.C. Estudo da durabilidade de argamassas alternativas contendo resíduos. **Cerâmica**. v. 57, pp.395-403, 2011.
- FBS – CONSTRUÇÃO CIVIL E PAVIMENTAÇÃO. Disponível em: http://www.fbsconstrutora.com.br/areas-de-atuacao/?tipo_da_obra=Concession%C3%A1ria. Acesso em: 23 jun. 2021.
- FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION - FHWA. **Design and Construction of Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes –Volume I**. FHWA-NHI-10-024, Federal Highway Administration, US Department of Transportation, Washington D.C., 2009.

FERNANDES, Maria da Paz Medeiros; SILVA FILHO, Luiz Carlos Pinto da. Um modelo orientativo para a gestão municipal dos RCCs. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 17, n. 2, pp. 21-38. 2017.

FIGUEIREDO, Paula de Oliveira; ULSEN, Carina; BERGEMAN, Maurício Guimarães; EL HAJJ, Thammiris Mohamad. Caracterização de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição produzidos por diferentes métodos de cominuição. In: XXVII Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa. **Anais [...]**. Belém, 2017.

FLEURY, Mateus P.; SANTOS, Eder C.G.; LINS DA SILVA, Jefferson; PALMEIRA, Ennio M. Geogrid installation damage caused by recycled construction and demolition waste. **Geosynthetics International**, v. 26, n. 6, pp. 641–656, 2019.

FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO - FJP. **Deficit Habitacional no Brasil 2016-2019**. Belo Horizonte, 2021.

GALAN, Carla Gonzalez. Mineração, Licenciamento e Sustentabilidade. **Areia e brita**, ano:23, ed.75, pp. 10-15, 2020.

GEORIO - FUNDAÇÃO INSTITUTO DE GEOTÉCNICA DO MUNICÍPIO DO RIO DE JANEIRO. Manual Técnico de Encostas. Muros. **Fundação Instituto de Geotécnica do Município do Rio de Janeiro**, v.3, 2ª ed., 2000.

GEROTO, Regis Eduardo; RODRIGUES, Ary Paulo; ANJOS, Juliana Lopes dos; SCHMIDT, Cristina F. **Uso de geogrelhas para a construção de um muro em solo reforçado com 25m de altura na rodovia dos Tamoios (SP-099)**. (Apresentação de Trabalho/Conferência ou palestra). 2018.

GERSCOVICH, Denise; DANZIGER, Bernadete Ragoni; SARAMAGO, Robson. **Contenções: teoria e aplicações em obras**. São Paulo: Oficina de Textos, 240 p., 2016.

GIROUD, Jeanpierre.; PLUSQUELLEC, Herve. Water, canals and geosynthetics. In: Proceedings Geoafrika 2017. **Anais [...]**. Marraquexe, Marrocos, pp. 53–112, 2017.

GONÇALVES, Julio Fernandes. **Estudo numérico do comportamento de muros de solo reforçado com geossintéticos**. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Civil. São Paulo, 158 p., 2016.

GONZALEZ-COROMINAS, Andreu.; ETXEBERRIA, Miren; FERNANDEZ, Ignasi. Structural behaviour of prestressed concrete sleepers produced with high performance recycled aggregate concrete. **Materials and Structures**. v. 50, n. 94, pp.1-14. 2017.

GOULART, João Maurício Homs; PORTELINHA, Fernando Henrique Martins; AVESANI NETO, José Orlando. Processo construtivo de estrutura de contenção feita com solo local reforçado com geossintético eface drenante. In: 1º Workshop de Tecnologia de Processos e Sistemas Construtivos - TECSIC – 2017,03 e 04 de agosto de 2017, Campinas -SP. **Anais [...]**. Campinas, 2017.

GUIMARÃES, Paulo Renato Martins. **Ensaio laboratoriais para a determinação de parâmetros de conexão em estruturas tipo muros segmentais**. Trabalho de conclusão de curso de Graduação em Engenharia Civil – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 106 f., 2006.

HAN, Bingye; LING, Jianming; SHU, Xiang; GONG, Hongren; HUANG, Baoshan. Laboratory investigation of particle size effects on the shear behavior of aGGRregate-geogrid interface. **Construction and Building Materials**, v. 158, pp. 1015-1025, 2018.

HEIBAUM, Michael. Geosynthetics in agricultural and aquacultural applications. In: Proceedings 9th international conference on geosynthetics. **Anais [...]**. Guarujá, SP, Brasil, pp. 259-271, 2010.

HEIBAUM, Michael. Natural disasters mitigation by using construction methods with geosynthetics (flooding). In: Proceedings 10th International Conference on Geosynthetics, 10 ICG, Berlin, Germany. **Anais [...]**. Germany, p. 16, 2014.

HUESKER. **Muros Terrae: sistema de contenções em blocos segmentais e geogrelha Fortrac**. São José dos Campos: Huesker, 24 p., 2016.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO/TS 13434**. Geosynthetics — Guidelines for the assessment of durability. ISSO, Switzerland, 2020.

JAISI, Deb P.; GLAWE, Ulrich; BERGADO, Dennes T. Hydraulic behaviour of geosynthetic and granular landfill drainage materials in the Sa Kaeo landfill, Thailand. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 23, n.º. 3, pp. 185-204, 2005.

JOHN, Vanderley Moacyr; AGOPYAN, Vahan. Reciclagem de resíduos da construção. **Anais [...]**. São Paulo: Secretaria de Estado do Meio Ambiente / Cetesb, 2000.

JOHN, Vanderley Moacyr; ANGULO, Sérgio Cirelli. Metodologia para desenvolvimento de reciclagem de resíduos. In: ROCHA, Janaíde Cavalcante; JOHN Vanderley Moacyr. **Coletânea Habitare - vol. 4 - Utilização de Resíduos na Construção Habitacional**. Porto alegre: ANTAC, 2003, pp. 8-71.

KOERNER, Robert M. **Designing with Geosynthetics**. Xlibris, Bloomington, IN, USA, 6th edn, v.2, 418p. 2012.

KOERNER, Robert M.; KOERNER, George R. An extended data base and recommendations regarding 320 failed geosynthetic reinforced mechanically stabilized earth (MSE) walls. **Geotextiles and Geomembranes**, v.46, pp. 904-912, 2018.

KOERNER, Robert M.; SOONG, Te-Yang. Geosynthetic reinforced segmental retaining walls. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 19, pp. 359-386, 2001.

KUWANO, Jiro; MIYATA, Yoshihisa; KOSEKI, Junichi. Performance of reinforced soil walls during the 2011 Tohoku earthquake. **Geosynthetics International**, v. 21, n.º.3, pp. 179-196, 2014.

KWAN, Wai Hoe; RAMLI, Mahyuddin; KAM, Kenn Jhun.; SULIEMAN, Mohd Zailan. Influence of the amount of recycled coarse aggregate in concrete design and durability properties. **Construction and Building Materials**, n. 26, p. 565–573, 2012.

LA SERNA, Humberto Almeida de; REZENDE, Márcio Marques. **Agregados para a construção civil**. [s.l.]: DNPM, pp. 602-635, 2013. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/outras-publicacoes-1/8-1-2013-agregados-minerais> . Acesso em: 28 jun. 2021.

LAGE, Isabel Martínez; ABELLA, Fernando Martínez; HERRERO, Cristina Vázquez; ORDÓÑEZ, Juan Luis Pérez. Estimation of the annual production and composition of C&D Debris in Galicia (Spain). **Waste Management**, v. 30, n. 4, pp. 636-645, 2010

LANGER, Marcelo.; NAGALLI, André. Política Nacional de Resíduos Sólidos: possibilidades para o desenvolvimento de inovação tecnológica. **Unesc & Ciência – ACET Joaçaba**, v. 8, n. 1, pp. 69-78. 2017.

LESHCHINSKY, Dov; BOEDEKER, Ralph H. Geosynthetic Reinforced Soil Structures. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, n. 10, p. 1459-1478, 1989.

LIU, Jingkuang; GONG, Engqing; WANG, Xuetong. Economic benefits of construction waste recycling enterprises under tax incentive policies. **Environmental Science and Pollution Research**, 15p., 2021.

LOPES, Maria da Graça; BARROSO, Madalena. **Matéria-Prima Processos de Fabrico e Classificação**. In: LOPES, Maria da Graça; BARROSO, Madalena; NEVES, José. Geossintéticos em Engenharia Civil: dimensionamento, instalação e casos de obras. Lisboa, Portugal: Sociedade Portuguesa de Geotecnia, pp. 1-15, 2020a.

LOPES, Maria da Graça; BARROSO, Madalena. **Principais Funções e Propriedades Relevantes**. In: LOPES, Maria da Graça; BARROSO, Madalena; NEVES, José. Geossintéticos em Engenharia Civil: dimensionamento, instalação e casos de obras. Lisboa, Portugal: Sociedade Portuguesa de Geotecnia, pp. 16-36, 2020b.

LOPES, Maria da Graça; BARROSO, Madalena; NEVES, José. **Definições**. In: LOPES, Maria da Graça; BARROSO, Madalena; NEVES, José. Geossintéticos em Engenharia Civil: dimensionamento, instalação e casos de obras. Lisboa, Portugal: Sociedade Portuguesa de Geotecnia, pp. xv-xvi, 2020.

LOPES, Maria de Lurdes; PINHO-LOPES, Margarida; CARNEIRO, José Ricardo. **Comportamento a Longo Prazo - Durabilidade**. In: LOPES, Maria da Graça; BARROSO, Madalena; NEVES, José. Geossintéticos em Engenharia Civil: dimensionamento, instalação e casos de obras. Lisboa, Portugal: Sociedade Portuguesa de Geotecnia, pp. 325-372, 2020.

MACENA, Clayton Luis; LEME, Mariane Alves de Godoy. Reciclagem de resíduos sólidos na construção civil. **Revista foco: caderno de estudos e pesquisas**, n. 13, pp. 38-53, 2017.

MÁLIA, Miguel; BRITO, Jorge de; BRAVO, Miguel. Indicadores de resíduos de construção e demolição para construções residenciais novas. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 11, n. 3, p. 117-130, jul./set. 2011.

MALTA, Juliana Oliveira; SILVA, Vanessa Silveira; GONÇALVES, Jardel Pereira. Argamassa contendo agregado miúdo reciclado de resíduo de construção e demolição. **Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais**, v.1, n.2, p. 176-188, 2013.

- MAMIROV, Miras; HU, Jiong; CAVALLINE, Tara. Geometrical, physical, mechanical, and compositional characterization of recycled concrete aGGRregates. **Journal of Clear Production**, v. 339, nº 130754, 2022.
- MEDINA, César.; ROJAS, María Isabel Sanchez de; FRÍAS, Moisés. Freeze-thaw durability of recycled concrete containing ceramic aGGRregate. **Journal of Cleaner Production**, n. 40, p. 151-160, 2013.
- MENEZES, Romualdo R.; FARIAS FILHO, José Rodrigues.; FERREIRA, Heber Sivini; NEVES, Gelmires de Araújo; FERREIRA, H.C. Reciclagem de resíduos da construção civil para a produção de argamassas. **Cerâmica**. v. 55, pp.263-270, 2009.
- MIRAMOV, Miras; HU, Jiong; CAVALLINE, Tara. Geometrical, physical, mechanical, and compositional characterization of recycled concrete aGGRregates. **Journal of Cleaner Production**, v. 339, n. 130754, 2022.
- MIRANDA, Leonardo Fagundes Rosemback; TORRES, Levi; VOGT, Vanessa; BROCARD, Fernanda Louize Monteiro; BARTOLI, Hewerton. Paronama atual do setor de reciclagem de resíduos de construção e demolição no Brasil. In: XVI Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Desafios e Perspectivas da Internacionalização da Construção (ENTAC 2016), 2016, 21 a 23 de setembro de 2016, São Paulo. **Anais[...]**. São Paulo, 2016.
- MOVIMENTO ECOLÓGICO - MOVIECO. **Cartilha Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS)**. Movieco, p.26, 2013. Disponível em: <www.movieco.org.br>. Acesso em: 18 nov. 2020.
- NATIONAL CONCRETE MASONRY ASSOCIATION - NCMA. **Design Manual for Segmental Retaining Walls, 3rd Edition**. Publication nº. TR 127B, National Concrete Masonry Association, Herndon, VA, 2012.
- NATIONAL CONCRETE MASONRY ASSOCIATION- NCMA. **Segmental Retaining Walls Best Practices Guide for the Specification, Design, Construction, and Inspection of SRW Systems**. Publication No. TR308, National Concrete Masonry Association, Herndon, VA, 2017.
- OSSA, Alexandra; GARCÍA, Juan Lopez; BOTERO, Eduardo. Use of recycled construction and demolition waste (CDW) aGGRregates: A sustainable alternative for the pavement construction industry. **Journal of Cleaner Production**. v. 135, pp. 379-386, 2016.
- PALMEIRA, Ennio Marques. **Geossintéticos em geotecnia e meio ambiente**. São Paulo: Oficina de Textos, 2018.
- PAZ, Diogo H. F.; LAFAYETTE, Kalinny P. V. Forecasting of construction and demolition waste in Brazil. **Waste Management & Research**, [s.l.], v. 34, n. 8, p. 708- 716, 11 jul. 2016. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.1177/0734242x16644680>
- PINHO-LOPES, Margarida; PAULA, António Miguel; LOPES, Maria de Lurdes. Pull-out response of geogrids after installation. **Geosynthetics International**, Vol. 22, No. 5, pp. 339-354, 2015.
- PINTO, Fernando Moretto. **Ensaios laboratoriais para a determinação da resistência de conexão entre geogrelhas de PVA e blocos segmentais**. Trabalho de Graduação em Engenharia Civil - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 323 f., 2015.
- PLATAFORMA AGENDA 2030. Disponível em: < <http://www.agenda2030.com.br/> >. Acesso em: 28 set. 2021.
- PREFEITURA MUNICIPAL DE VARGINHA. **Coleta seletiva em Varginha é ampliada**. Prefeitura Municipal de Varginha, Varginha, 19 de julho de 2017. Disponível em: < <https://www.varginha.mg.gov.br/portal/noticias/0/3/1656/coleta-seletiva-em-varginha-e-ampliada/> >. Acesso em: 17 nov. 2020.
- PREFEITURA MUNICIPAL DE VARGINHA. **O lixo de varginha – Um esclarecimento necessário**. Prefeitura Municipal de Varginha, Varginha, 07 de novembro de 2013. Disponível em: < <https://www.varginha.mg.gov.br/portal/noticias/0/3/4301/o-lixo-de-varginha--um-esclarecimento-necessario> >. Acesso em: 17 nov. 2020.
- PREFEITURA MUNICIPAL DE VARGINHA. **Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos – PMGIRS**. Prefeitura Municipal de Varginha, Varginha, 2013.
- QUARESMA, Luis Felipe. Agregados para construção civil: Relatório Técnico 30. **Ministério de Minas e Energia/Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral - SGM**, Brasília, 33p., 2009.
- RAUBER, Marcos Eduardo. Apontamentos sobre a Política Nacional de Resíduos Sólidos, instituída pela Lei Federal nº 12.305, de 02.08.2010. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental, REGET-CT/UFMS**, v. 4, n. 4, pp. 1-24. 2011.

- SADATI, Seyedhamed; KHAYAT, Kamal H. Field performance of concrete pavement incorporating recycled concrete aGGRregate. **Construction and Building Materials**. Vol. 126, pp. 691-700, 2016.
- SANTOS, Eder C.G.; PALMEIRA, Ennio M.; BATHURST, Richard J. Behaviour of a geogrid reinforced wall built with recycled construction and demolition waste backfill on a collapsible foundation. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 39, pp. 9-19, 2013.
- SANTOS, Eder C.G.; PALMEIRA, Ennio. M. Estruturas de Solo Reforçado e Resíduos de Construção e Demolição Reciclados. **Revista Fundações e Obras Geotécnicas**, v. 1, pp. 36-40, 2011.
- SHUKLA, Sanjay Kumar. **Basic description, functions and selection of geosynthetics**. In: SHUKLA, Sanjay Kumar. An Introduction to Geosynthetic Engineering. London, United Kingdom: Taylor & Francis Group, pp. 1-41, 2016a.
- SHUKLA, Sanjay Kumar. **Geosynthetics – properties, applications and design concepts** In: SHUKLA, Sanjay Kumar. An Introduction to Geosynthetic Engineering. London, United Kingdom: Taylor & Francis Group, pp. 51-108, 2016b.
- SILVA, Luiz Fernando Félix; SILVA, Marli Auxiliadora da. Resíduos sólidos na construção civil: qual o custo de sua destinação e tratamento? In: XXIII CONGRESSO BRASILEIRO DE CUSTOS, 2016, Porto de Galinhas. **Anais [...]**. Porto de Galinhas, 2016.
- SILVA, Rui Vasco, BRITO, Jorge de., DHIR, Ravindra K. Properties and composition of recycled aGGRregates from construction and demolition waste suitable for concrete production. **Construction and Building Materials**, v. 65, pp. 201-217, 2014.
- SINDICATO DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO CIVIL NO ESTADO DE MINAS GERAIS - SINDUSCON-MG. **Alternativas para a destinação de resíduos da construção civil**. SINDUSCON-MG. 3ª ed. Belo Horizonte, 2014. 116 p.
- SOLEIMANBEIGI, Ali, TANYU, Burak F., AYDILEK, Ahmet H., FLORIO, Paulo., ABBASPOUR, Aiyoub., DAYIOGLU, Asli Y.; LIKOS, William J. Evaluation of recycled concrete aGGRregate backfill for geosynthetic-reinforced MSE walls. **Geosynthetics International**, 26, n°. 4, pp. 396-412, 2019. <https://doi.org/10.1680/jgein.19.00025>.
- SOUZA, Samara Tessarolli de; FRANCO, Yara Barbosa; LINS DA SILVA, Jefferson. Análise de Métodos de Dimensionamento de Muro de Solo Reforçado com Geogrelha e Estimativa de Custo. In: IX Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental (REGEO 2019) - VIII Congresso Brasileiro de Geossintéticos (Geossintéticos 2019). **Anais [...]**. São Carlos, São Paulo, 2019.
- TOUAHAMIA, M.; SIVAKUMAR, Vinayagamoorthy; MCKELVEY, D. Shear strength of reinforced-recycled material. **Construction and Building Materials**, v.16, n. 6, pp.331-339, 2012.
- TOUZE, Natalie. Healing the world: a geosynthetics solution. **Geosynthetics International**, v. 28, n°. 1, pp. 1-31, 2021. <https://doi.org/10.1680/jgein.20.00023>
- UNION EUROPÉENNE DES PRODUCTEURS DE GRANULATS - UEPG. **Annual review 2019-2020**. UEPG, 2021.
- URASHIMA, Denise C.; BERNARDES, George P.; SILVA, André E.F.; BRUGGERER, Paulo J. e VIDAL, Delma M. Ensaios de Laboratório de Conexão Blocos-Geogrelhas em Estruturas Tipo Muros Segmentais. In: III Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. **Anais [...]**. Curitiba, Paraná, vol.3, p. 1903-1908, 2006.
- URASHIMA, Denise de Carvalho; MARTINS, Carlos Humberto. Ensaio para determinação dos parâmetros de interface bloco-geogrelha em estruturas de contenção de taludes por blocos intertravados. XXXI Jornadas Sud-Americanas de Ingeniería Estructural. **Anais[...]**. Mendoza, 2004.
- VIEIRA, Bianca Alencar; NOGUEIRA, Lauro. Construção civil: crescimento versus custos de produção civil. **Sistema & Gestão**, v. 13, n. 3, 2018.
- VIEIRA, Castorina Fernanda da Silva. **Muros e taludes de solo reforçado com geossintéticos. Comportamento e metodologias de dimensionamento**. Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil, 575 p, 2008.
- VIEIRA, Castorina Silva. Valorization of Fine-Grain Construction and Demolition (C&D) Waste in Geosynthetic Reinforced Structures. **Waste and Biomass Valorization**, v. 11, n. 4, pp. 1615-1626, 2020.

- VIEIRA, Castorina Silva; PEREIRA, Paulo M. Interface shear properties of geosynthetics and construction and demolition waste from large-scale direct shear tests. **Geosynthetics International**. [S.l.]: ICE Publishing., 1 fev. 2016.
- VIEIRA, Castorina Silva; PEREIRA, Paulo M.; LOPES, Maria de Lurdes. Recycled Construction and Demolition Wastes as filling material for geosynthetic reinforced structures. Interface properties. **Journal of Cleaner Production**, v. 124, pp. 299–311, 2016.
- WANG, Xiaohan.; LIU, Bingkang; ZHANG, Cong. Seismic behavior of recycled aGGRregate concrete beams under cyclic torsion. **Construction and Building Materials**. v. 129, pp. 193-203. 2016.
- WEN, Hua; WU, Jiu-jiang; ZOU, Jiao-li; LUO, Xio; ZHANG, Min; GU, Chengzhuang. Model tests on the retaining walls constructed from geobags filled with construction waste. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2016, n 4971312, p.13, 2016. <http://dx.doi.org/10.1155/2016/4971312>
- WHITMAN, J. Blake; ZECH, Wesley C.; DONALD, Wesley N. Improvements in small-scale standardized testing of geotextiles used in silt fence applications. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 47, nº. 5, pp. 598-609, 2019.
- WU VIENNA. Raw Material Profile for Non-metallic minerals. Visualisations based upon the UN IRP Global Material Flows Database. **Vienna University of Economics and Business**. Disponível em: < <http://www.materialflows.net/visualisation-centre/raw-material-profiles> > . Acesso em: 12 jul. 2022.
- WU, Jiujiang; NAGGRAR, M. Hesham El; LI, Xiaonan; WEN, Hua. DEM analysis of geobag wall system filled with recycled concrete aGGRregate. **Construction and Building Materials**, v. 238, n. 117684, 2020.
- XIE, YongGGRui; LESHCHINSKY, Ben; YANG, Shangchuan. Evaluating reinforcement loading within surcharged segmental block reinforced soil walls using a limit state framework. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 44, n. 6, pp. 832–844, 2016.

APÊNDICE A – DADOS DE ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS

Quadro 3. Dados dos ensaios de densidade e absorção de água.

Ensaio	Agregado graúdo - Determinação da densidade e absorção de água (ABNT NBR 16917:2021)						
Material	Agregado Natural (AN)				Agregado Reciclado de Concreto (ARCO)		
Data	28/09/2021				13/06/2022		
Amostra	A B				A B		
Massa inicial (g)	3000 3000				3501,3 3500,3		
Massa seca (g) - m_A	2989,3 2995,3				2833,5 2837,2		
Massa saturada (g) - m_B	3009,6 3010,3				3039,9 3041		
Massa submersa (g) - m_C	1942,9 1950,2				1758,4 1758,1		
Densidades	A B Média				A B Média		
$\rho_{ss} \text{ (g/cm}^3\text{)}$	2,82141183 2,839638 2,830525				2,372142021 2,370410788 2,371276		
$\rho_s \text{ (g/cm}^3\text{)}$	2,80238118 2,825488 2,813935				2,211080765 2,211551953 2,211316		
Abs (%)	0,7% 0,5% 0,6%				7,3% 7,2% 7,2%		

Fonte: Do autor.

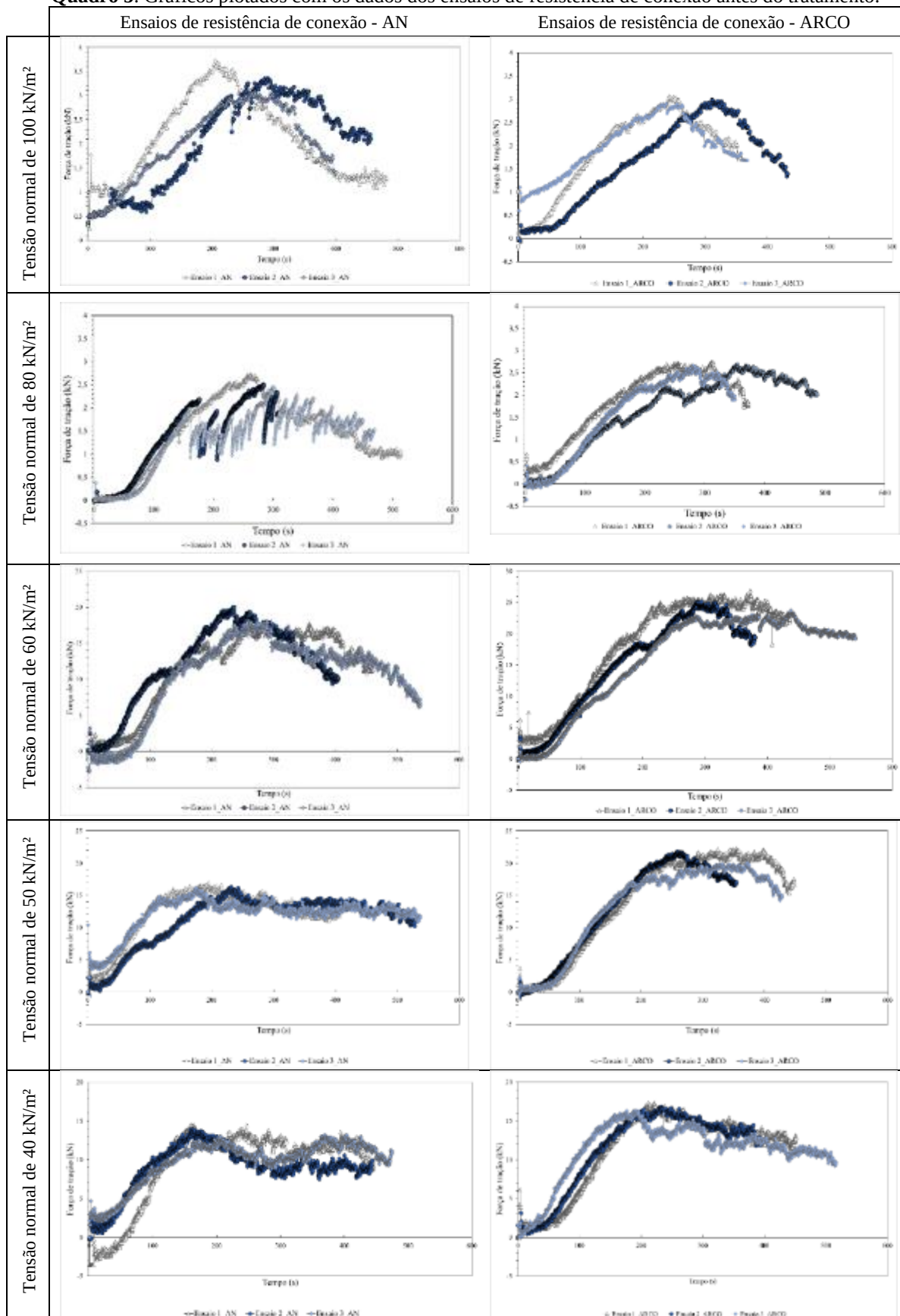
Quadro 4. Dados dos ensaios de determinação de massa unitária.

Ensaio	Agregado graúdo - determinação da massa unitária e índice de vazios (ABNT NBR 16972:2021)																		
Material	Agregado Natural (AN)																		
Estado	Intacto					Estado	Solicitado												
Data	21/09/2021					Data	12/12/2021												
Volume recipiente (m³)	0,009964912					Volume recipiente (m³)	0,009924812												
Peso recipiente (kg)	9,94					Peso recipiente (kg)	9,9												
ρ água (kg/m³)	997,5					ρ água (kg/m³)	997,5												
Método A - compactado										Método A - compactado									
Amostra	A		B	Recipiente	média	Amostra	A		B	Recipiente	média								
Massa (kg)	17,1		17,4	1,2	1610,65	Massa (kg)	17,96		17,92	1,22	1684,67								
ρ ap (kg/m³)	1595,598592		1625,704	1686,681818		1682,652													
Método C - solto										Método C - solto									
Amostra	A		B	Recipiente	média	Amostra	A		B	Recipiente	média								
Massa (kg)	16,24		16,42	1,2	1518,33	Massa (kg)	16,68		16,74	1,22	1560,73								
ρ ap (kg/m³)	1509,295775		1527,359	1557,712121		1563,758													
Material	Agregado Reciclado de Concreto (ARCO)																		
Estado	Intacto					Estado	Solicitado												
Data	08/06/2022					Data	09/06/2022												
Volume recipiente (m³)	0,009964912					Volume recipiente (m³)	0,010005013												
Peso recipiente (kg)	9,94					Peso recipiente (kg)	9,98												
ρ água (kg/m³)	997,5					ρ água (kg/m³)	997,5												
Método A - compactado										Método A - compactado									
Amostra	A		B	Recipiente	média	Amostra	A		B	Recipiente	média								
Massa (kg)	13,86		13,62	1,2	1258,42	Massa (kg)	14,44		14,26	1,2	1314,34								
ρ ap (kg/m³)	1270,457746		1246,373	1323,336673		1305,346													
Método C - solto										Método C - solto									
Amostra	A		B	Recipiente	média	Amostra	A		B	Recipiente	média								
Massa (kg)	12,8		12,82	1,22	1163,08	Massa (kg)	12,94		13,04	1,22	1176,41								
ρ ap (kg/m³)	1162,077465		1164,085	1171,412826		1181,408													

Fonte: Do autor.

APÊNDICE B – GRÁFICOS DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA DE CONEXÃO

Quadro 5. Gráficos plotados com os dados dos ensaios de resistência de conexão antes do tratamento.



Fonte: do autor

APÊNDICE C – VALORES DE FORÇA DE TRAÇÃO DE PICO E DE RESISTÊNCIA DE CONEXÃO

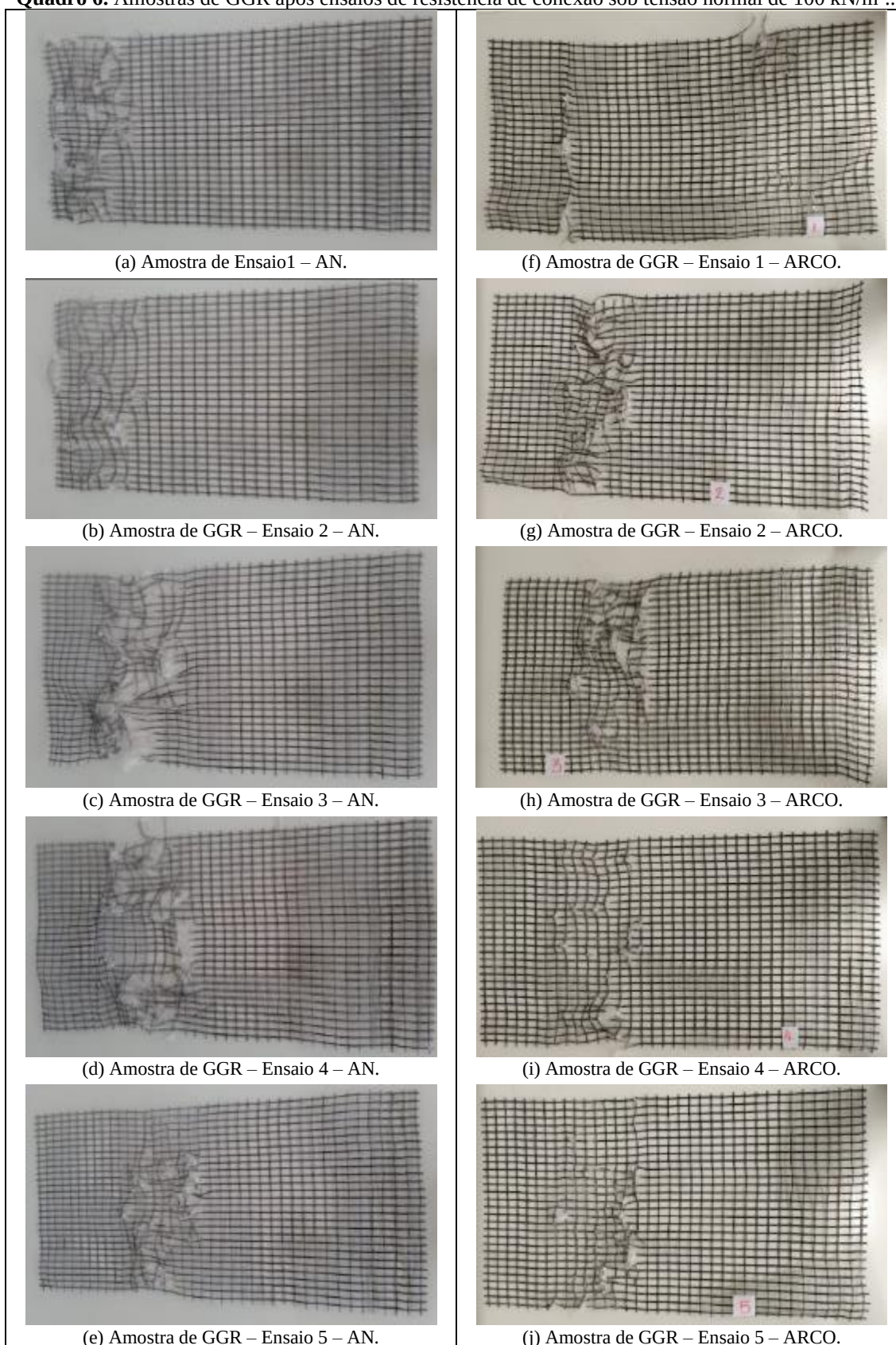
Tabela 16. Valores de força de tração de pico e resistência de conexão.

Número de ensaios	Largura do geossintético C_g (m)	Tensão normal (kN/m ²)	Agregado natural (AN)		Agregado reciclado de concreto (ARCO)	
			Força de tração de pico	Resistência de conexão de pico	Força de tração de pico	Resistência de conexão de pico
			F_p (kN)	$T_{última}$ (kN/m)	F_p (kN)	$T_{última}$ (kN/m)
1	0,68	40	13,2	19,4	16,3	24,0
2	0,68	40	13,9	20,5	16,9	24,8
3	0,68	40	14,5	21,4	17,3	25,5
média	0,68	40	13,9	20,4	16,8	24,8
1	0,68	50	16,3	24,0	20,1	29,6
2	0,68	50	16,2	23,8	21,8	32,1
3	0,68	50	17,0	25,0	22,3	32,9
média	0,68	50	16,5	24,2	21,4	31,5
1	0,68	60	17,9	26,3	23,7	34,8
2	0,68	60	18,0	26,5	25,1	36,9
3	0,68	60	20,0	29,5	26,9	39,5
média	0,68	60	18,7	27,4	25,2	37,1
1	0,68	80	24,5	36,1	26,7	39,3
2	0,68	80	25,0	36,8	27,0	39,7
3	0,68	80	27,4	40,2	27,5	40,4
média	0,68	80	25,6	37,7	27,0	39,8
1	0,68	100	31,0	45,5	29,4	43,2
2	0,68	100	34,7	51,1	29,8	43,8
3	0,68	100	37,3	54,9	30,7	45,1

Fonte: Do autor.

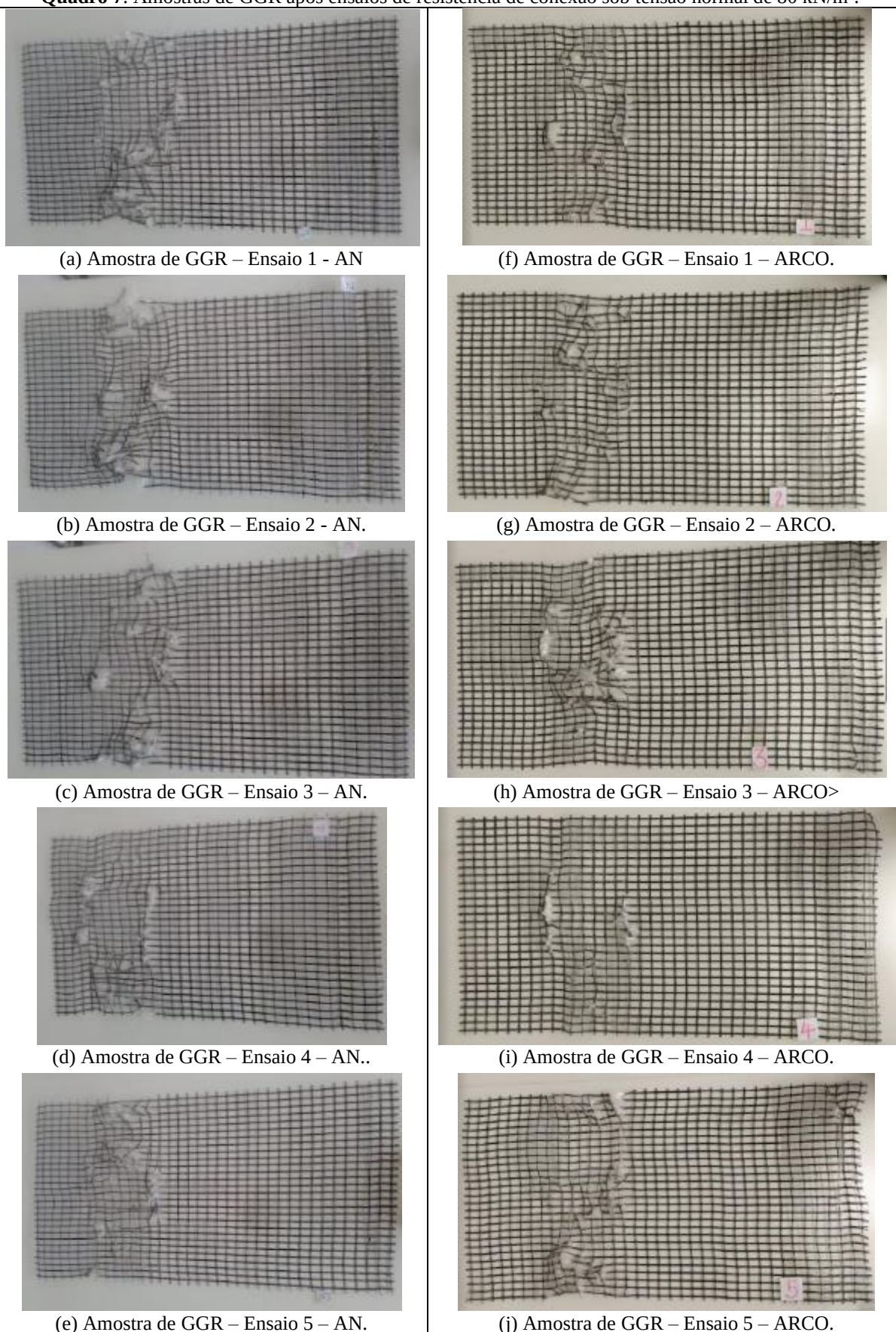
APÊNDICE D – AMOSTRAS DE GEOGRELHAS APÓS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA DE CONEXÃO

Quadro 6. Amostras de GGR após ensaios de resistência de conexão sob tensão normal de 100 kN/m²..



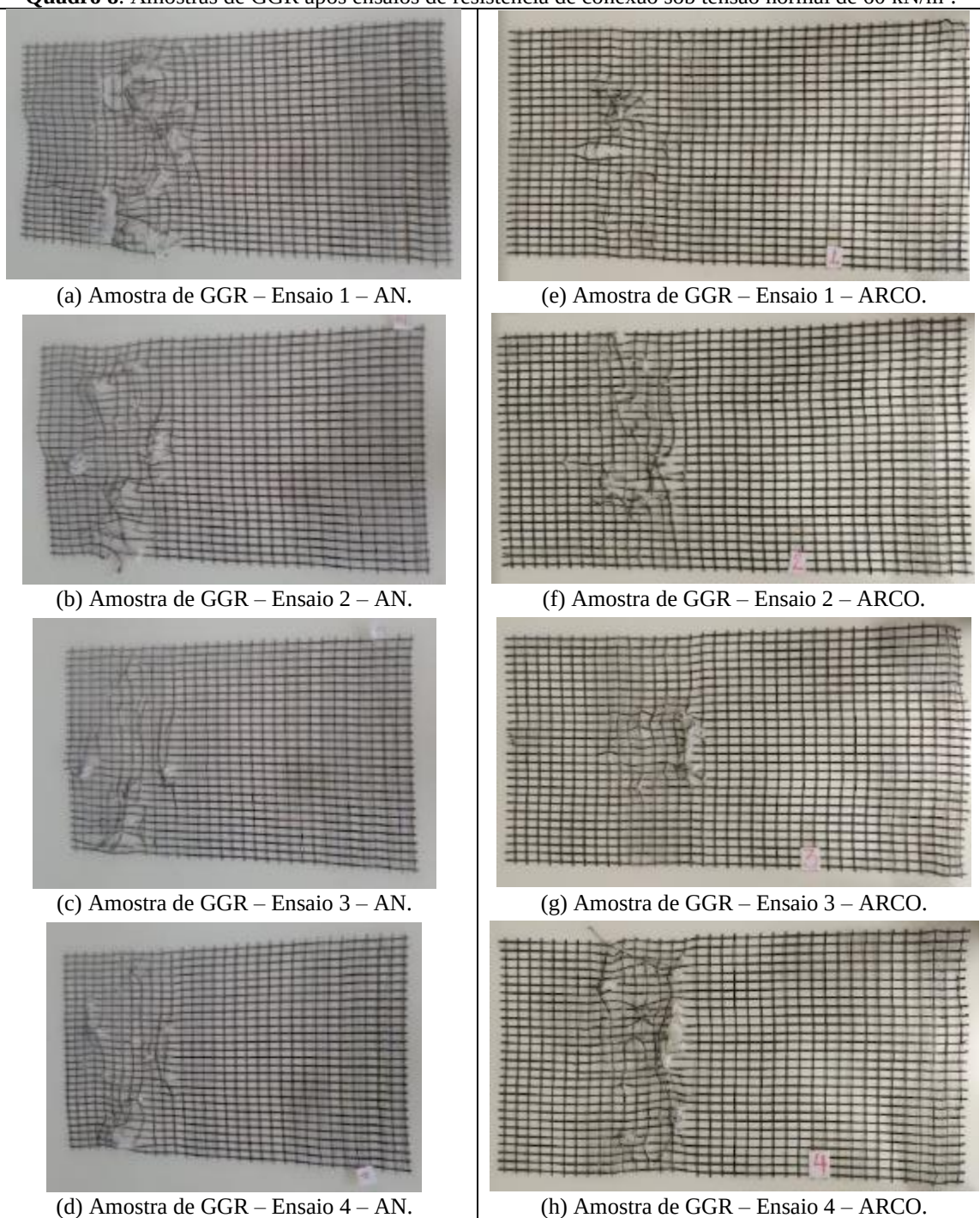
Fonte: Do autor.

Quadro 7. Amostras de GGR após ensaios de resistência de conexão sob tensão normal de 80 kN/m².



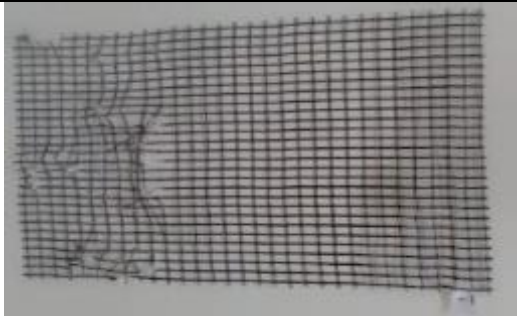
Fonte: Do autor.

Quadro 8. Amostras de GGR após ensaios de resistência de conexão sob tensão normal de 60 kN/m².

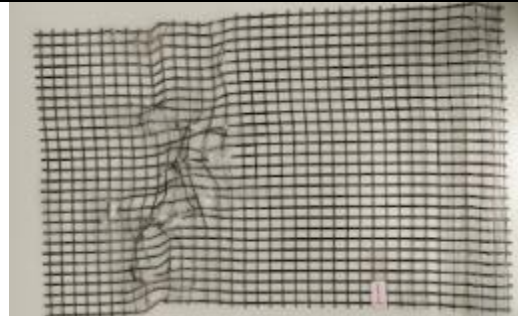


Fonte: Do autor.

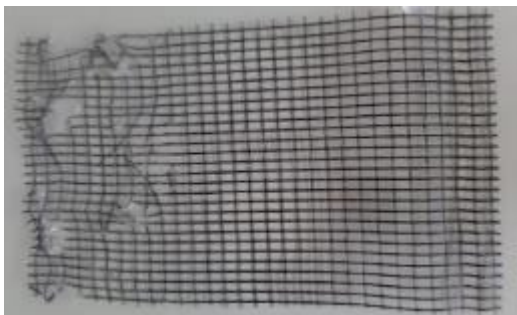
Quadro 9. Amostras de GGR após ensaios de resistência de conexão sob tensão normal de 50 kN/m².



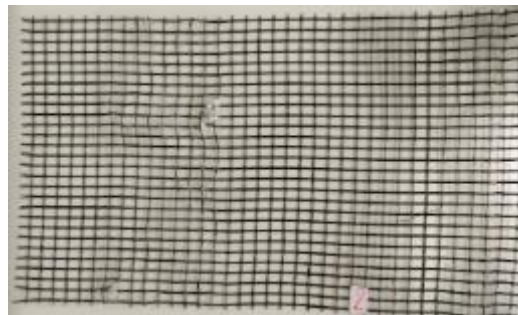
(a) Amostra de GGR – Ensaio 1 – AN.



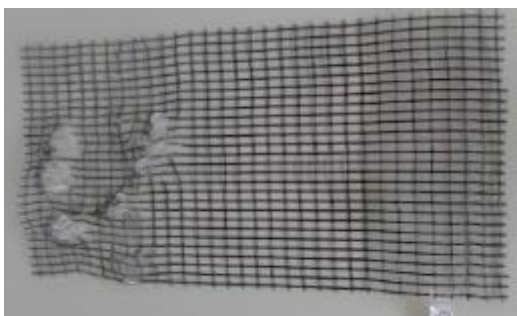
(e) Amostra de GGR – Ensaio 1 – ARCO.



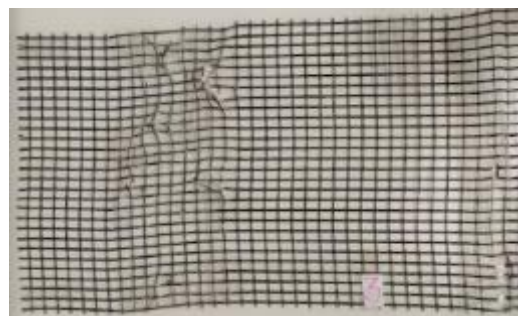
(b) Amostra de GGR – Ensaio 2 – AN.



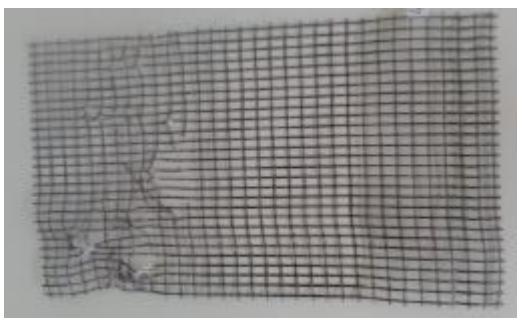
(f) Amostra de GGR – Ensaio 2 – ARCO.



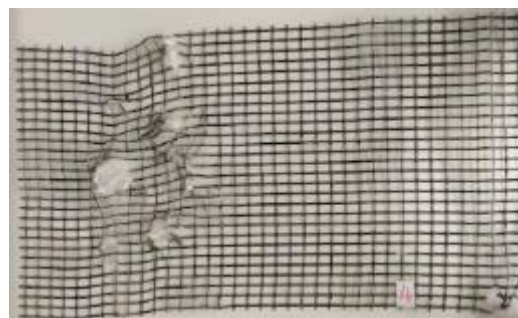
(c) Amostra de GGR – Ensaio 3 – AN.



(g) Amostra de GGR – Ensaio 3 – ARCO.



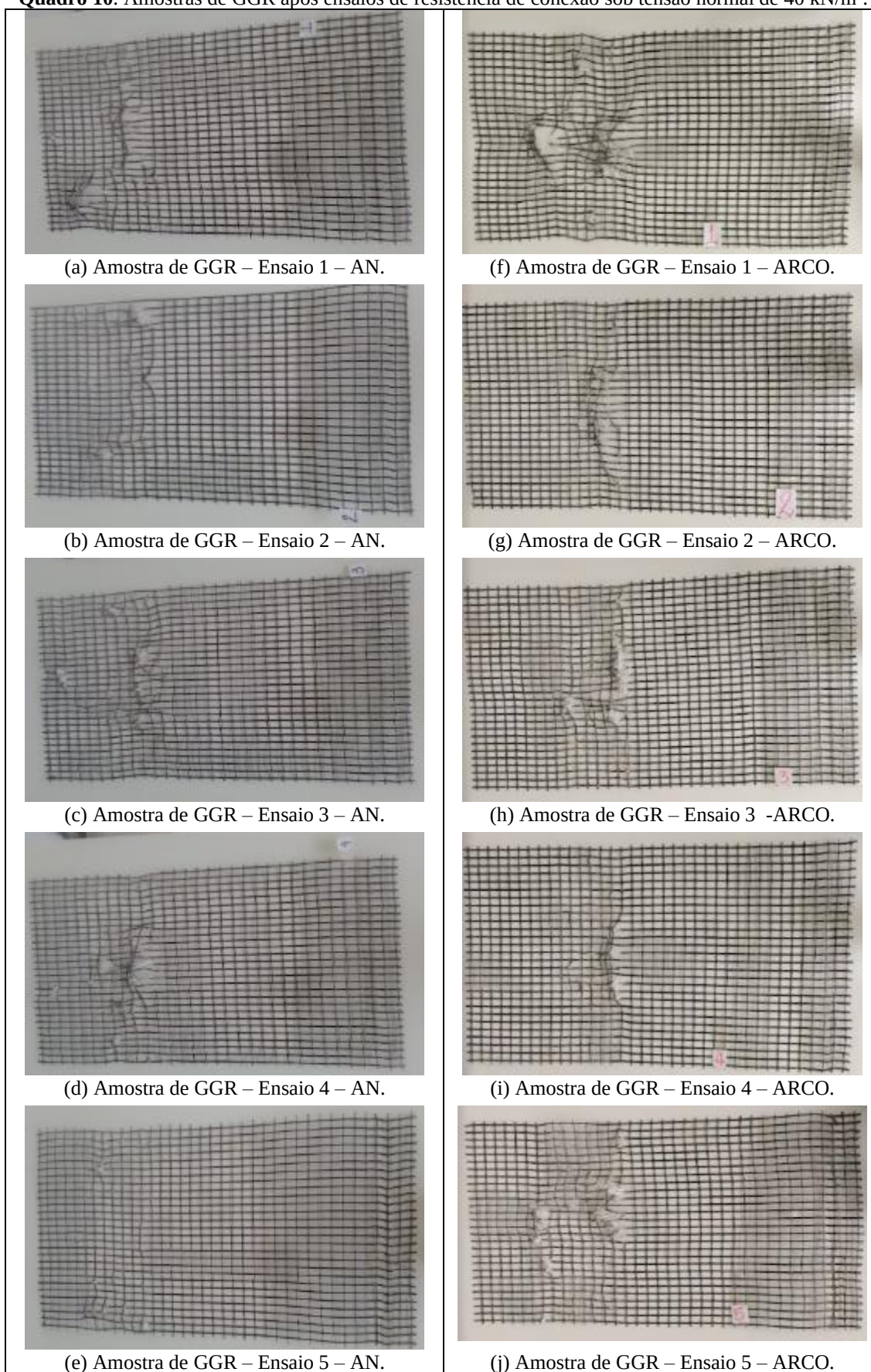
(d) Amostra de GGR – Ensaio 4 – AN.



(h) Amostra de GGR – Ensaio 4 – ARCO.

Fonte: Do autor.

Quadro 10. Amostras de GGR após ensaios de resistência de conexão sob tensão normal de 40 kN/m².



Fonte: Do autor.

ANEXO A – VALORES DE RESISTÊNCIA DE CONEXÃO POR DIVERSOS AUTORES

Quadro 11. Valores de resistência de conexão diversos.

Autor (es)	Modelo geogrelha (kN/m)/(cm x cm)	Tipo de polímero	Modelo do Bloco	Material de Preenchimento	Tipo de conexão	Resistência de conexão - T ₀₀ (kN/m)													
						Tensão normal (kN/m²)													
						3	18	20	35	37	40	50	60	70	71	80	85	100	105
Guimarães (2006)	55/30x20	PET	W	Brita 1	simples	3,25	22,95	-	23,95	-	-	29,15	-	28,35	-	-	29,9	31,5	-
	dupla				6,25	25	-	31	-	-	42,75	-	47,75	-	-	62,5	62,5	-	
	simples				4,93	22,75	-	26,05	-	-	23,1	-	41,4	-	-	37,2	45,17	-	
	dupla				3,15	17,5	-	26	-	-	34,8	-	34,5	-	-	45	57,67	-	
	110/30x20				simples	4,35	25,5	-	41	-	-	49	-	55	-	-	53	58	-
					dupla	6,25	25	-	31	-	-	42,75	-	47,75	-	-	62,5	62,5	-
Urashima <i>et al.</i> (2007)	20/13x20	PET	W	Brita 1	simples	7,9	-	-	-	12,7	-	-	-	-	12,1	-	-	-	15
	dupla				11,2	-	-	-	19,6	-	-	-	-	23	-	-	-	24,4	
	simples				11,9	-	-	-	22,6	-	-	-	-	25,5	-	-	-	23,5	
	dupla				11,4	-	-	-	28,6	-	-	-	-	37,7	-	-	-	45,8	
Bernardes et. al (2008)	35/20x20	PET	"L" de face	Brita 1	simples	11,3	13,75	-	16,95	-	-	17,25	-	-	-	-	-	-	-
	Pedrisco			simples	4,9	10,95	-	12,1	-	-	14,8	-	-	-	-	-	-	-	
	Vazio			simples	2,8	6,65	-	8,95	-	-	11,13	-	-	-	-	-	-	-	
Almeida e Toma (2011)	110/30x20	PVA	MW	Brita 1	simples	-	-	23,1	-	-	38,25	-	40,76	-	-	40,41	-	46,8	-
	dupla				-	-	32,38	-	-	48,42	-	65	-	-	68,44	-	81,09	-	
Pinto (2015)	35/20x20	PVA	MW	Brita 1	simples	8,47	12,68	-	12,35	-	-	14,26	-	11,45	-	-	14,09	12,85	-
	dupla				-	-	-	20,33	-	-	20,04	-	20,66	-	-	21,74	22,62	-	
Pinto (2015)	55/30x20				simples	11,51	16,34	-	18,24	-	-	20,69	-	20,56	-	-	20,17	22,36	-
	dupla				-	-	-	35,4	-	-	32,59	-	32,98	-	-	31,19	33,7	-	
Pinto (2015)	80/30x20				simples	12,81	23,05	-	26,45	-	-	31,9	-	28,14	-	-	32,39	34,52	-
	dupla				-	-	-	43,1	-	-	50,57	-	48,61	-	-	52,01	54	-	
Pinto (2015)	110/30x20				simples	-	-	-	33,64	-	-	38,83	-	38,38	-	-	40,93	38,15	-
	dupla				-	-	-	43,97	-	-	57,47	-	60,08	-	-	63,87	63,09	-	
Rocha (2022)	110/20x30	PVA	MW	agregado natural (AN)graúdo na zona granulométrica de 9,5/25 mm	simples	-	-	-	-		20,4	24,2	27,4	-		37,7	-	48,3	-
				agregado reciclado de concreto (ARCO) graúdo na zona granulométrica de 9,5/25 mm	simples	-	-	-	-		24,8	31,5	37,1	-		39,8	-	44	-

Fonte: do autor



PPGEC – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil
Av Amazonas, 7675, Belo Horizonte-MG
www.civil.cefetmg.br/mestrado