

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS-UFAL
CENTRO DE TECNOLOGIA-CTEC
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL-PPGEC

ALINE RAIMUNDA DOS SANTOS

ESTUDO DO USO DE AGREGADO RECICLADO DE RESÍDUO DA CONSTRUÇÃO
E DEMOLIÇÃO EM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO AGREGADO MIÚDO NA
PRODUÇÃO DE ARGAMASSA ESTRUTURAL

Maceió - Alagoas

2025

ALINE RAIMUNDA DOS SANTOS

ESTUDO DO USO DE AGREGADO RECICLADO DE RESÍDUO DA CONSTRUÇÃO
E DEMOLIÇÃO EM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO AGREGADO MIÚDO NA
PRODUÇÃO DE ARGAMASSA ESTRUTURAL

Defesa de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas - PPGEC/UFAL, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, na área de concentração Materiais.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Karoline Alves Melo
Moraes

Coorientadora: Prof.^a Dr.^a Cássia Vanessa
Albuquerque de Melo

Maceió - Alagoas

2025

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

Bibliotecário: Marcelino de Carvalho Freitas Neto – CRB-4 – 1767

- S237e Santos, Aline Raimunda dos.
Estudo do uso de agregado reciclado de resíduo da construção e demolição em substituição parcial do agregado miúdo na produção de argamassa estrutural / Aline Raimunda dos Santos. - 2025.
186 f. : il.
- Orientadora: Karoline Alves Melo Moraes.
Co-orientadora: Cássia Vanessa Albuquerque de Melo.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió, 2025.
- Bibliografia: f. 168-181.
Apêndices: f. 182-186.
1. Agregados (Materiais de construção). 2. Granulometria. 3. Argamassas. 4. Desempenho de materiais de construção. I. Título.

CDU:667.97



**ESTUDO DO USO DE AGREGADO RECICLADO DE RESÍDUO DA CONSTRUÇÃO E
DEMOLIÇÃO EM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO AGREGADO MIÚDO NA
PRODUÇÃO DE ARGAMASSA ESTRUTURAL**

ALINE RAIMUNDA DOS SANTOS

Dissertação submetida à banca examinadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas e aprovada no dia 06 do mês de maio do ano de 2025.

Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente
gov.br KAROLINE ALVES DE MELO MORAES
Data: 14/05/2025 22:45:04-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Karoline Alves de Melo Moraes
(Orientadora – PPGEC/UFAL)

Documento assinado digitalmente
gov.br PAULO CESAR CORREIA GOMES
Data: 14/05/2025 09:03:18-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Paulo César Correia Gomes
(Avaliador Interno – PPGEC/UFAL)

Documento assinado digitalmente
gov.br CASSIA VANESSA ALBUQUERQUE DE MELO
Data: 14/05/2025 21:59:22-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Cássia Vanessa Albuquerque de Melo
(Avaliadora Externa ao Programa – CTEC/UFAL)

Documento assinado digitalmente
gov.br SHEYLA KAROLINA JUSTINO MARQUES
Data: 12/05/2025 11:17:45-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Sheyla Karolina Justino Marques
(Avaliadora Externa à Instituição – IFAL)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por todas as bênçãos sem medidas derramadas sobre minha vida, pela força, coragem e saúde que me permitiram chegar até aqui. Sem ele, eu não teria conseguido. Não foi fácil, mas com suas mãos me sustentando, tudo se tornou mais leve. Obrigado, Deus. Agradeço também a toda a minha família, que esteve presente com apoio, incentivo e palavra de carinho. Peço desculpas pela ausência, mas estava correndo atrás dos meus sonhos. Muito obrigado por me compreenderem. Em especial, quero expressar minha gratidão à minha mãe, Luzia. Obrigado, mãe, por suas orações, seu colo e por tudo que sempre fez por mim. A senhora é um exemplo de mãe, e agradeço ao meu pai, Nicodemos, e meu irmão Denison, pelo apoio.

Meus agradecimentos também vão para meu colega, que estive ao meu lado sem soltar minha mão durante esse período de mestrado: Júlio César, com quem compartilhei um pouco da minha vida e minha rotina, e aos demais que me ajudaram na elaboração deste trabalho: Daiana, Leticia, João Pedro, Rosângela, Nayla, Marília, Yelly e Samira. Agradeço aos técnicos do LEMA, Tassis, Jonas, Gustavo, Valdemir, pelas orientações e conselhos.

Em especial, agradeço à professora Karoline Melo por toda dedicação, apoio e incentivo ao longo dessa jornada. Sua orientação, paciência e confiança foram essenciais para meu desenvolvimento acadêmico e pessoal. Sou imensamente grata por ter tido a oportunidade de contar com a senhora como minha orientadora. Seus conselhos, parceria e seu amor pelo que faz fizeram toda a diferença nesta etapa da minha vida. És um exemplo de excelência acadêmica e de humanidade. Obrigada por acreditar em mim e por me ajudar a me tornar uma profissional melhor. Serei eternamente grata por tudo o que a senhora fez por mim. Meu sincero muito obrigada!

Agradeço também à professora Cássia Vanessa por aceitar ser a coorientadora e contribuir para meu crescimento profissional, me aconselhando e direcionando em minha pesquisa, e ao professor Paulo César Gomes e professora Sheila pela participação nas bancas de qualificação e defesa, que muito contribuíram para a qualidade desta dissertação.

Meus agradecimentos à CAPES e FAPEAL pela bolsa de estudo concedida, permitindo minha dedicação integral ao mestrado. Agradeço ao colaborador do Severinão, seu Cícero, pelo apoio e conselhos prestados durante meu tempo no

laboratório, sendo sempre prestativo. E a todos os professores por transmitirem os conhecimentos, em particular ao professor Eduardo Nobre, por ser um excelente profissional acadêmico, possui um coração generoso.

Aos meus amigos do PPGEC que caminharam comigo nessa jornada acadêmica, obrigada pelo compartilhamento de conhecimento. Aos meus colegas acadêmicos, Jorge Luis, Karlison, Rafael, Clóvis, e ao professor DR. Willian Imamura, e às feras na programação, Pedro Raposo, Gleide Karolayne, obrigado por transmitirem também seus saberes.

Por fim, agradeço a todos que contribuíram de alguma forma para meu progresso, bem como aos demais funcionários do Centro de Tecnologia (CTEC) e do LEMA por toda ajuda e contribuição na minha formação. Minha gratidão a todos vocês.

RESUMO

A construção civil, apesar da sua importância para o desenvolvimento econômico do país, é uma grande consumidora de recursos naturais e geradora de resíduos sólidos. Nesse contexto, a reciclagem de resíduos da construção e demolição (RCD) surge como uma alternativa promissora, com potencial para reduzir o consumo de recursos naturais e mitigar os impactos ambientais. O uso de argamassas com RCD apresenta-se como uma via promissora para essa aplicação, sendo as argamassas materiais compósitos com matriz cimentícia aplicáveis em diversas situações. O presente estudo concentra-se na aplicação da argamassa estrutural, cujo parâmetro de desempenho considerado seguiu as diretrizes dos concretos estruturais, ou seja, resistência à compressão superior a 20 MPa. Para isso, investigou-se o uso de agregados miúdos reciclados a partir de resíduos de demolição e passado por diferentes processos de beneficiamento (britagem em britador de mandíbulas e de martelos), para produção das argamassas, analisando diferentes composições granulométricas entre agregados miúdos reciclados (ARMP, ARSM1, ARSM2) e naturais (ANF e ANG). A metodologia da pesquisa envolveu a caracterização dos agregados miúdos, análise de suas propriedades e estudo de empacotamento de partículas. As argamassas foram analisadas em relação ao comportamento nos estados fresco e endurecido. A caracterização granulométrica dos agregados demonstrou a conformidade dos materiais com os limites estabelecidos pela NBR 7211 (ABNT, 2022). A combinação estratégica de agregados naturais e reciclados possibilitou a obtenção de distribuições granulométricas mais contínuas, potencializando as propriedades mecânicas das argamassas. A análise dos agregados reciclados revelou a influência do processo de britagem, com o britador de mandíbulas 1 (ARSM1) foi obtido um agregado com distribuição granulométrica mais contínua e menor teor de finos, favoráveis à resistência à compressão. Embora as misturas com maior proporção de agregados reciclados tenham mostrado uma menor consistência e maior absorção de água, ajustes nas proporções dos agregados permitiram obter materiais com boa trabalhabilidade e resistência. As argamassas com misturas de agregados naturais e reciclados apresentaram desempenho satisfatório, destacando-se resultados de resistência à compressão consideráveis, com misturas idealizadas alcançando até 35,51 MPa aos 28 dias, sugerindo que a combinação adequada de agregados naturais e reciclados (ARSM1 e ARSM2) pode fornecer uma alternativa viável para diferentes aplicações na construção civil. Em comparação, as composições com ARMP tenderam a apresentar um desempenho menos favorável em termos de resistência à compressão. Em suma, os resultados deste estudo confirmam a viabilidade da utilização de agregados reciclados na produção de argamassas estruturais, desde que as proporções sejam cuidadosamente ajustadas.

PALAVRAS-CHAVES: agregado reciclado misto; composição granulométrica; argamassas; desempenho.

ABSTRACT

The construction industry, despite its importance for the country's economic development, is a major consumer of natural resources and generator of solid waste. In this context, recycling construction and demolition waste (CDW) appears as a promising alternative, with the potential to reduce the consumption of natural resources and mitigate environmental impacts. The use of mortars with CDW appears as a promising route for this application, with mortars made from composite materials with a cementitious matrix being applicable in several situations. The present study focuses on the application of structural mortar, whose performance parameter followed the guidelines for structural concrete, i.e., compressive strength greater than 20 MPa. To this end, the use of recycled fine aggregates from demolition waste and subjected to different beneficiation processes (crushing in jaw and hammer crushers) for the production of mortars was investigated, analyzing different granulometric compositions between recycled fine aggregates (ARMP, ARSM1, ARSM2) and natural (ANF and ANG). The research methodology involved the characterization of the fine aggregates, analysis of their properties and study of particle packing. The mortars were analyzed in relation to their behavior in the fresh and hardened states. The granulometric characterization of the aggregates demonstrated the compliance of the materials with the limits established by NBR 7211 (ABNT, 2022). The strategic combination of natural and recycled aggregates made it possible to obtain more continuous granulometric distributions, enhancing the mechanical properties of the mortars. The analysis of the recycled aggregates revealed the influence of the crushing process. Using jaw crusher 1 (ARSM1), an aggregate with a more continuous particle size distribution and lower fine content was obtained, which favored compressive strength. Although the mixtures with a higher proportion of recycled aggregates showed lower consistency and greater water absorption, adjustments in the proportions of the aggregates allowed obtaining materials with good workability and strength. The mortars with mixtures of natural and recycled aggregates showed satisfactory performance, highlighting considerable compressive strength results, with idealized mixtures reaching up to 35.51 MPa at 28 days, suggesting that the appropriate combination of natural and recycled aggregates (ARSM1 and ARSM2) can provide a viable alternative for different applications in civil construction. In comparison, the compositions with ARMP tended to present a less favorable performance in terms of compressive strength. In summary, the results of this study confirm the feasibility of using recycled aggregates in the production of structural mortars, as long as the proportions are carefully adjusted.

KEYWORDS: mixed recycled aggregate; granulometric composition; mortars; performance.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma do processo de beneficiamento do RCD	24
Figura 2 - Britador Giratório.....	26
Figura 3 - Processos de fratura dos britadores.....	27
Figura 4 - Movimento dos blocos durante a fragmentação no britador de mandíbulas de um eixo (Dodge).....	28
Figura 5 - Britador de mandíbulas de dois eixos (Blake)	29
Figura 6 - Esquema do movimento do britador de mandíbulas de dois eixos (Blake)	29
Figura 7 - Britador de Impacto.....	30
Figura 8 - Corte esquemático do britador de impacto.....	31
Figura 9 - Desenhos esquemáticos dos britadores de mandíbulas e de impacto	31
Figura 10 - Corte esquemático de um moinho de martelos	33
Figura 11 - Corte esquemático de um britador cônico	34
Figura 12 - Evolução da resistência à compressão de argamassas com diferentes percentuais de agregados reciclados aos 28 dias.....	47
Figura 13 - Evolução da resistência à tração na flexão de argamassas com diferentes percentuais de agregados reciclados aos 90 dias	48
Figura 14 - Efeitos de empacotamento	56
Figura 15 - Modelo de Andreasen: distribuição granulométrica.....	60
Figura 16- Modelo de Furnas: apresentação da distribuição granulométrica.....	62
Figura 17 - Modelo de Alfred: distribuição granulométrica das partículas	64
Figura 18 - Fluxograma da pesquisa.....	68
Figura 19 - Processo de britagem: (a) britador de mandíbulas, (b) abertura e (c) placas	73
Figura 20 - Britador de mandíbulas de porte grande	73
Figura 21 - Beneficiamento do agregado reciclado miúdo.....	74
Figura 22 - Recipiente vazio (a) recipiente cheio (b)	78
Figura 23 - Modo de preparo das argamassas.....	84
Figura 24 - Distribuição granulométrica do agregado natural Areia fina	90
Figura 25 - Distribuição da granulométrica do agregado miúdo natural Areia grossa	91
Figura 26 - Granulométrica do ARMP	92
Figura 27 - Distribuição granulométrica do ARMS1.....	93
Figura 28 - Distribuição granulométrica ARMS2.....	94
Figura 29 – Porcentagens retidas individuais do agregado miúdo natural fino	95
Figura 30 - Porcentagens retidas individuais do agregado miúdo natural areia grossa	96
Figura 31 - Porcentagens retidas individuais do agregado miúdo reciclado primário.....	97
Figura 32 - Porcentagens retidas individuais do agregado miúdo reciclado ARMS1	98
Figura 33 - Porcentagens retidas individuais do agregado miúdo reciclado ARMS2	99
Figura 34 – Composições de todos os agregados miúdos analisados	100
Figura 35 – Composição 50%AMNF+50%ARMP	100
Figura 36 - Composição 50%AMNF+50%ARMS1.....	101
Figura 37 - Composição 50%AMNG+50%ARMS1	101
Figura 38 - Composição 50%ANG+50%ARMS2	102
Figura 39 (a) Curva de distribuição granulométrica do ANF 100%; (b) Curva da distribuição granulométrica do ANG 100%	104

Figura 40 - (a) Curva da distribuição granulométrica do ARMP 100%; (b) Curva da distribuição granulométrica do ARSM1 100%; (c) Curva da distribuição granulométrica do ARSM2 100%	105
Figura 41 - (a) Curva da distribuição granulométrica do ANF + ARMP 75-25%; (b) Curva da distribuição granulométrica do ANF + ARSM1 75-25%; (c) Curva da distribuição granulométrica do ANF + ARSM2 75-25%	106
Figura 42 - (a) Curva da distribuição granulométrica do ANG + ARMP 75-25%; (b) Curva da distribuição granulométrica do ANG + ARSM1 75-25%; (c) Curva da distribuição granulométrica do ANG + ARSM2 75-25%.....	108
Figura 43 - (a) Curva da distribuição granulométrica do ANF + ARMP 50-50%; (b) Curva da distribuição granulométrica do ANF + ARSM1 50-50%; (c) Curva da distribuição granulométrica do ANF + ARSM2 50-50%	109
Figura 44 - (a) Curva da distribuição granulométrica do ANG + ARMP 50-50%; (b) Curva da distribuição granulométrica do ANG + ARSM1 50-50%; (c) Curva da distribuição granulométrica do ANG + ARSM2 50-50%.....	110
Figura 45 - (a) Curva da distribuição granulométrica do ANF + ARMP 25-75%; (b) Curva da distribuição granulométrica do ANF + ARSM1 25-75%; (c) Curva da distribuição granulométrica do ANF + ARSM2 25-75%	111
Figura 46 - (a) Curva da distribuição granulométrica do ANG + ARMP 25-75%; (b) Curva da distribuição granulométrica do ANG + ARSM1 25-75%; (c) Curva da distribuição granulométrica do ANG + ARSM2 25-75%.....	112
Figura 47 – MEV do ARMP	114
Figura 48 - MEV do ARMS2.....	114
Figura 49 - MEV do ARMS1.....	115
Figura 50 - MEV do ANF.....	115
Figura 51 - MEV do ANG	115
Figura 52 - Difratogramas de raios X do ARMP	117
Figura 53 - Difratogramas de raios X dos agregados	118
Figura 54 - Resistência à tração das composições ANF + ARSM1	123
Figura 55 - Resistência à tração das composições ANG + ARSM1	124
Figura 56 - Resistência à tração das composições ANF + ARMP	124
Figura 57 - Resistência à tração das composições ANG + ARMP	125
Figura 58 - Resistência à tração das composições ANF + ARSM2	125
Figura 59 - Resistência à tração das composições com ANG + ARSM2.....	126
Figura 60 – Gráfico normal de resíduos; previsto vs. real da composição ANG + ARMP 7 dias	129
Figura 61 - Gráfico normal de resíduos; previsto vs. real da composição ANG + ARMP 14 dias	130
Figura 62 - Gráfico normal de resíduos; previsto vs. real da composição ANG + ARMP 28 dias	130
Figura 63 – mistura de dois componentes 7 e 14 dias	131
Figura 64 - mistura de dois componentes 28 dias	131
Figura 65 - Gráfico normal de resíduos; previsto vs. real da composição ANF + ARMP 7 dias	134
Figura 66 - Gráfico normal de resíduos; previsto vs. real da composição ANF + ARMP 14 dias	135
Figura 67 - Gráfico normal de resíduos; previsto vs. real da composição ANF + ARMP 28 dias	135
Figura 68 - mistura de dois componentes 7 dias e 14 dias.....	136
Figura 69 - Mistura de dois componentes 28 dias	136

Figura 70 - Gráfico normal de resíduos; previsto vs. real da composição ANG + ARSM2 7 dias	139
Figura 71 - Gráfico normal de resíduos; previsto vs. real da composição ANG + ARSM2 14 dias	139
Figura 72 - Gráfico normal de resíduos; previsto vs. real da composição ANG + ARSM2 28 dias	140
Figura 73 - Mistura dos componentes ANG + ARSM2 7 e 14 dias	141
Figura 74 - Mistura dos componentes ANG + ARSM2 28 dias	141
Figura 75 – Gráfico normal de resíduos; previsto vs. real da composição ANF + ARSM2 7 dias	144
Figura 76 - Gráfico normal de resíduos; previsto vs. real da composição ANF + ARSM2 14 dias	145
Figura 77 - Gráfico normal de resíduos; previsto vs. real da composição ANF + ARSM2 28 dias	145
Figura 78 - Mistura de dois componentes 7 e 14 dias	146
Figura 79 - Mistura de dois componentes 28 dias	146
Figura 80 - Gráfico normal de resíduos; previsto vs. real da composição ANG + ARSM1 7 dias	149
Figura 81 - Gráfico normal de resíduos; previsto vs. real da composição ANG + ARSM1 14 dias	149
Figura 82 - Gráfico normal de resíduos; previsto vs. real da composição ANG + ARSM1 28 dias	150
Figura 83 - Mistura dos componentes ANG + ARSM1 7 e 14 dias	151
Figura 84 - Mistura dos componentes ANG + ARSM1 28 dias	151
Figura 85 – Gráfico normal de resíduos; previsto vs. real das composições de ANF + ARSM1 7 dias.	154
Figura 86 - Gráfico normal de resíduos; previsto vs. real das composições de ANF + ARSM1 14 dias.	154
Figura 87 - Gráfico normal de resíduos; previsto vs. real das composições de ANF + ARSM1 28 dias.	155
Figura 88 - Mistura dos componentes ANF + ARSM1 7 e 14 dias	156
Figura 89 - Mistura dos componentes ANF + ARSM1 28 dias	157
Figura 90 - Ensaio de absorção de água por capilaridade após 10 min com ANF..	157
Figura 91 - Ensaio de absorção de água por capilaridade após 90 min com ANF..	158
Figura 92 - Ensaio de absorção de água por capilaridade após 10 min com ANG .	159
Figura 93 - Ensaio de absorção de água por capilaridade após 90 min com ANG .	160
Figura 94 - Resistência à compressão dos concretos	161
Figura 95 - Resistência à tração ANF + ARSM1 7 DIAS	182
Figura 96 - Resistência à tração ANF + ARSM1 14 dias	182
Figura 97 - Resistência à tração 28 dias composição ARSM1	183
Figura 98 - Resistência à tração ARMP 7 dias	183
Figura 99 - Resistência à tração ARMP 14 dias	184
Figura 100 - Resistência à tração ARMP 28 dias	184
Figura 101 - Resistência à tração ARSM2 7 dias	185
Figura 102 - Resistência à tração ARSM2 14 dias	185
Figura 103 - Resistência à tração ARSM2 28 dias	186

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resultado da resistência à compressão das argamassas produzidas com agregado reciclado.....	46
Tabela 2 - Limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo	53
Tabela 3 - Composições de agregados miúdos naturais e reciclados utilizados nas produções de argamassas	54
Tabela 4 - Resistência à Compressão do cimento utilizado	71
Tabela 5 - Traços em massa (cimento:areia+resíduo:água)	83
Tabela 6 - Argamassas confeccionadas.....	87
Tabela 7 - Características físicas dos agregados miúdos naturais areia fina e areia grossa.....	91
Tabela 8 - Características físicas do ARMP	92
Tabela 9 - Características físicas do agregado reciclado miúdo secundário ARMS1.....	93
Tabela 10 - Características da ARMS2	94
Tabela 11 - Comportamentos das argamassas com diferentes combinações de agregados reciclados	103
Tabela 12 - Proporção dos agregados nas composições e valores de R^2	113
Tabela 13 - Propriedades físicas das argamassas produzidas.....	120
Tabela 14 - Valores de resistência à tração na flexão das argamassas produzidas	122
Tabela 15 - Dados da resistência à compressão das argamassas produzidas	127
Tabela 16 – Modelo sequencial das somas dos quadrados dos resultados de resistência à compressão das argamassas ANG + ARMP.....	128
Tabela 17 - Coeficientes em termos de fatores codificados de ANG + ARMP.....	129
Tabela 18 - Modelo sequencial das somas dos quadrados dos resultados de resistência à compressão das argamassas ANG + ARMP.....	132
Tabela 19 - Coeficientes em termos de fatores codificados de ANF + ARMP	133
Tabela 20 - Modelo sequencial das somas dos quadrados dos resultados de resistência à compressão das argamassas ANG + ARSM2.....	137
Tabela 21 - Coeficientes em termos de fatores codificados ANG + ARSM2.....	138
Tabela 22 – Modelo sequencial das somas dos quadrados dos resultados de resistência à compressão das argamassas ANF + ARSM2	143
Tabela 23 - Coeficientes em termos de fatores codificados de ANF + ARSM2	143
Tabela 24 - Modelo sequencial das somas dos quadrados dos resultados de resistência à compressão das argamassas ANG + ARSM1.....	147
Tabela 25 - Coeficientes em termos de fatores codificados ANG + ARSM1.....	148
Tabela 26 – Modelo sequencial das somas dos quadrados dos resultados de resistência à compressão das argamassas ANF + ARSM1	152
Tabela 27 - Coeficientes em termos de fatores codificados ANF + ARSM1	153
Tabela 28 - Consumo de materiais em kg por m ³ do concreto	161

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Classes dos resíduos de construção e demolição	17
Quadro 2 - Normas técnicas relativas à RCD	20
Quadro 3 - Composição dos resíduos em massa.....	22
Quadro 4 - Uso dos resíduos reciclados	23
Quadro 5 - Trabalhabilidade de argamassas com diferentes tipos de agregados avaliada por meio do índice de consistência	44
Quadro 6 - Características químicas do cimento utilizado	70
Quadro 7 - Características físicas e mecânicas do cimento utilizado	71
Quadro 8 - Agregados miúdos utilizados.....	75
Quadro 9 - Abertura de malha das peneiras da Série Normal	76
Quadro 10 - Ensaios de Caracterização das Argamassas	85
Quadro 11 - Composições químicas das amostras	116

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABRECON: Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição

AR: Agregado Reciclado

ARCI: Agregado Reciclado Cimentício

ARCO: Agregado Reciclado de Concreto

ARM: Agregado Reciclado Misto

AMR: Agregado miúdo reciclado

ANF: Agregado miúdo natural fino

ANG: Agregado miúdo natural grosso

ARMP: Agregado reciclado miúdo primário

ARSM1: Agregado reciclado secundário misto 1

ARSM2: Agregado reciclado secundário misto 2

ARP: Agregado Primário Reciclado

ATD: Análise Térmica Diferencial

A/C: Água Cimento

CONAMA: Conselho Nacional do Meio Ambiente

CU: Coeficiente de uniformidade

CPFT: Porcentagem acumulada de partículas finas menores que dp

DQO: Demanda Química de Oxigênio

DRX: Difratometria de raios - X

DTG: Análise Termogravimétrica Diferencial

EDX: Espectrometria de dispersão de raios – X

IBGE: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

LEMA: Laboratório de Estruturas e Materiais

MEV: Microscópio eletrônica de Varredura

NBR: Norma Técnica Brasileira

PIB: Produto Interno Bruto

PNRS: Política nacional de resíduos sólidos

PGRCC: Planos de gerenciamento de resíduos de construção civil

RCD: Resíduos de Construção e Demolição

RCC: Resíduos da Construção Civil

SSS: Saturado com Superfície Seca

SSM: Modelo de suspensão sólida

TGA: Análise Termogravimétrica

PNRS: Política nacional de resíduos sólidos

D_p : Diâmetro da partícula

D_s : Diâmetro da menor partícula

D_l : Diâmetro da maior partícula

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
1.1 OBJETIVO GERAL	12
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
1.3 JUSTIFICATIVA	13
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO	15
2. RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO	16
2.1 CENÁRIO DOS RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD) NO BRASIL	18
2.2 COMPOSIÇÕES E APLICAÇÕES DOS RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD)	21
2.3 TECNOLOGIA UTILIZADA NA TRANSFORMAÇÃO DO RCD EM AGREGADO	23
2.4 TIPOS DE BRITADORES	25
2.4.1 BRITADOR DE MANDÍBULA	28
2.4.2 BRITADOR DE IMPACTO	30
2.4.3 MOINHO DE MARTELO	32
2.4.4 BRITADOR DE CONE OU BRITADOR CÔNICO	33
2.5 AGREGADOS RECICLADOS DE DEMOLIÇÃO	34
2.5.1 TIPOS DE AGREGADO RECICLADO	35
2.6 PROPRIEDADES CARACTERÍSTICAS DOS AGREGADOS PROVENIENTES DE RCD	37
2.6.1 DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA	38
2.6.2 COMPOSIÇÃO QUÍMICA DOS AGREGADOS RECICLADOS	39
2.6.3 ABSORÇÃO DE ÁGUA DOS AGREGADOS RECICLADOS	40
3. ARGAMASSAS COM AGREGADOS RECICLADOS	41
3.2 PROPRIEDADES EM ESTADO FRESCO	43
3.3 ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA (TRABALHABILIDADE)	44
3.4 DENSIDADE DE MASSA E TEOR DE AR INCORPORADO	45
3.5 PROPRIEDADES EM ESTADO ENDURECIDO	45
3.6 RESISTÊNCIA MECÂNICA	46
4 DOSAGEM DAS ARGAMASSAS	50
4.1 TEOR DE FINOS	51
4.2 INFLUÊNCIA DA CURVA GRANULOMÉTRICA	52

4.3 EMPACOTAMENTO DAS PARTÍCULAS.....	55
4.4 MODELO DE ANDREASEN.....	58
4.5 MODELO DE FURNAS	60
4.6 MODELO DE ALFRED.....	63
5. MATERIAIS E MÉTODOS	66
5.1 SELEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	69
5.1.1 CIMENTO	69
5.1.2 AGREGADOS MIÚDOS.....	72
5.1.3 BENEFICIAMENTO DE RESÍDUOS DE DEMOLIÇÃO PARA OBTENÇÃO DOS AGREGADOS RECICLADOS.....	72
5.1.4 DETERMINAÇÃO GRANULOMÉTRICA.....	75
5.1.5 MASSA ESPECÍFICA	76
5.1.6 ABSORÇÃO DE ÁGUA.....	76
5.1.7 MASSA UNITÁRIA.....	77
5.1.8 MATERIAL PULVERULENTO.....	78
5.1.9 DETERMINAÇÃO DE IMPUREZA ORGÂNICA	79
5.1.10 TÉCNICA DE DIFRATROMETRIA DE RAIOS X.....	79
5.1.11 TÉCNICA DE MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA.....	80
5.2 ESTUDO DE COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA DOS AGREGADOS	80
5.2.1 AVALIAÇÃO DAS ARGAMASSAS PELO MÉTODO DE EMPACOTAMENTO (ANDREASEN-ANDERSEN)	81
5.2.2 PRODUÇÃO DAS ARGAMASSAS	82
5.2.3 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS EM SEU ESTADO FRESCO.....	84
5.2.4 ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA	85
5.2.5 MASSA ESPECÍFICA	85
5.2.6 ARGAMASSA EM ESTADO ENDURECIDO	86
5.2.7 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO E RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	87
5.2.8 ABSORÇÃO DE ÁGUA, ÍNDICE DE VAZIOS E MASSA ESPECÍFICA	88
5.2.9 PRODUÇÃO DOS CONCRETOS	89
6. RESULTADOS	90
6.1 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DOS AGREGADOS	90
6.1.2 PORCENTAGEM RETIDA INDIVIDUAL DOS AGREGADOS	95
6.1.3 COMPOSIÇÕES GRANULOMÉTRICAS DOS AGREGADOS	99
6.1.4 EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS NO SOFTWARE EMMA	103
6.1.5 ANÁLISE POR MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV).....	114

6.1.6 DIFRAÇÃO DE RAIOS X (DRX)	116
6.1.7 PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS EM ESTADO FRESCO	119
6.1.8 PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS EM ESTADO ENDURECIDO	121
6.1.8.1 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO	122
6.1.8.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	126
6.1.8.3 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE	157
6.1.9 CONCRETO PRODUZIDO	161
7. CONCLUSÕES.....	163
7.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	166
REFERÊNCIAS	168

1. INTRODUÇÃO

A construção civil é um dos setores que mais cresce globalmente, desempenhando um papel fundamental no desenvolvimento econômico e social. No entanto, este setor é também um dos maiores geradores de resíduos, com um elevado índice de desperdício de materiais utilizados nas obras, onde quase nada é reaproveitado (Barbosa, 2018).

De acordo com a Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição - RCD (Abrecon, 2022), mais popularmente conhecidos como entulhos, são “todo resíduo gerado no processo construtivo, de reforma, escavação ou demolição”. Entram nessa categoria restos de tijolo, concreto, argamassa, aço, madeira etc., que podem ser gerados em obras de construção, reforma ou demolição de qualquer tipo de estrutura, segundo a referida associação. Estima-se que os resíduos da construção civil (RCC) no Brasil equivalem entre 50% e 70% do total de resíduos sólidos gerados (Almeida *et al.*, 2020).

Em 2024, a massa total de resíduos da construção e demolição (RCD), também denominado como resíduos da construção civil (RCC) foi de aproximadamente 44 milhões de toneladas, segundo a ABREMA (2024). Grande parte desse resíduo é descartado de forma clandestina em rios, mares, lagoas, em terrenos baldios e até na rua. O setor da construção civil é responsável por gerar uma grande quantidade de resíduos que causam um impacto significativo no meio ambiente e na sociedade quando são descartados de forma inadequada (Conceição *et al.*, 2021). De acordo com Abrecon (2023), a construção pode gerar uma série de problemas ambientais, incluindo questões de eliminação de resíduos, poluição visual e poluição do ar. As atividades de demolição e reformas também podem causar danos ambientais, como poluição atmosférica e sonora, contaminação do solo e da água e liberação de materiais perigosos.

Com a crescente busca por uma sociedade mais sustentável frente à crise ambiental, é de extrema importância que o mercado da construção civil inclua em seus projetos práticas sustentáveis, que certamente beneficiarão as sociedades presente e futura (Barbosa *et al.*, 2018). O Brasil reciclou aproximadamente 45 milhões de toneladas de resíduos da construção e demolição no ano de 2022, de acordo com Abrema (2023).

Todavia, esse índice ainda é muito irrelevante quando comparada ao volume total de RCD gerado anualmente no país, evidenciando uma grande oportunidade para ampliar a produção de agregados reciclados (TORRES, 2023).

É evidente que a construção civil é um dos setores que mais consomem matérias-primas não renováveis e geram significativos impactos ambientais devido a esse consumo (ABREMA, 2023). De acordo com SHAWKI *et al.*, (2024), os impactos ambientais causados pela produção de cimento e a exaustão dos agregados naturais utilizados na fabricação de concreto têm impulsionado a reciclagem de resíduos de construção e demolição como uma alternativa viável. A utilização de resíduos de construção na produção de agregados pode reduzir a exploração de recursos naturais, também diminuir os custos de transporte e a emissão de CO₂, já que a fonte geradora dos resíduos está geralmente localizada nos centros urbanos (REVETTI *et al.*, 2024).

Neste contexto, como uma alternativa sustentável, o uso das argamassas com RCD apresenta-se como uma via promissora. As argamassas representam materiais compósitos com matriz cimentícia, aplicáveis em variadas situações com funcionalidades distintas, como as argamassas reforçadas (SANTOS, 2008; SANTOS, 2011; BARBOSA e SANTOS, 2013). O presente estudo concentra-se na aplicação da argamassa estrutural, a qual, de acordo com Parente *et al.* (2023), segue os parâmetros apresentados na NBR 6118 (ABNT, 2023) para concreto estrutural, ou seja, deve exibir resistência à compressão superior a 20 MPa.

Diante desse cenário, o presente estudo traz uma abordagem de aplicação de agregados reciclados de RCD para a produção de argamassas estruturais. Através da análise comparativa da influência destes agregados na formulação, na composição granulométrica otimizada e em parâmetros de desempenho de argamassas, pretende-se demonstrar a viabilidade de substituição e os benefícios técnicos, econômicos e ambientais decorrentes deste processo.

1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho é estudar o uso de agregados reciclados de resíduos da construção e demolição em substituição parcial ao agregado miúdo natural na obtenção de argamassa estrutural.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Como objetivos específicos desta pesquisa, destacam-se:

- Analisar a influência da utilização do agregado miúdo de RCD para a produção de argamassa estrutural;
- Identificar parâmetros de dosagem para otimização da fase argamassa, melhorando seu desempenho;
- Identificar composições granulométricas otimizadas entre agregados miúdos naturais e reciclados.

1.3 JUSTIFICATIVA

A presente pesquisa busca contribuir para o avanço do conhecimento na área da construção civil, investigando o potencial de utilização de agregados reciclados provenientes de demolições na produção de novos materiais. Dessa forma, alinha-se com a crescente necessidade de encontrar soluções para o reaproveitamento de resíduos da construção e demolição (RCD), visando mitigar o impacto ambiental causado pelo descarte inadequado e pela extração de recursos naturais.

Nesse contexto, torna-se evidente a relevância de estudos que ofereçam subsídios para a aplicações desses resíduos para a produção de novos materiais para a construção civil. Essa abordagem não apenas contribui para a redução do volume de resíduos destinados a aterros, mas também promove benefícios econômicos ao diminuir a dependência de matérias-primas virgens.

Nascimento (2007) já apontava que a cadeia da construção civil gera impactos ambientais significativos, desde a extração de matérias-primas até a produção de insumos e a geração de resíduos nas construções e demolições de obras. Diante disso, a utilização de agregados reciclados, derivados de RCD, em argamassa ou concreto, apresenta-se como uma alternativa promissora com múltiplos benefícios.

Entretanto, a adoção generalizada desses materiais enfrenta desafios, especialmente no que concerne ao conhecimento e à aceitação por parte dos profissionais da construção e dos usuários finais. A disseminação de informações

sobre as vantagens ambientais e econômicas da utilização de agregados reciclados é essencial para superar resistências e incentivar sua aplicação.

Apesar dos desafios, os RCD oferecem vantagens consideráveis em comparação com os agregados tradicionais. Representa uma alternativa sustentável, transformando materiais que seriam descartados em recursos valiosos. Adicionalmente, podem apresentar custos inferiores aos dos agregados convencionais e contribuir para a redução das emissões de carbono associadas à produção e ao transporte de novos materiais.

Por outro lado, a heterogeneidade dos agregados reciclados é um fator que pode influenciar as propriedades das misturas, representando uma barreira à sua utilização. Neste sentido, a busca por ferramentas e metodologias que permitam superar esses desafios é de grande importância.

A literatura científica apresenta diversas estratégias para otimizar a composição granulométrica de partículas destinadas à produção de misturas cimentícias, visando um melhor empacotamento com redução de vazios, podendo promover um aumento no desempenho mecânico, como o trabalho de Melo (2019), destacando em seus estudos as zonas granulométricas de agregados graúdos e miúdos, buscando-se um empacotamento ideal. Também o estudo de Silva (2024) que ressalta as zonas granulométricas, e outros trabalhos acadêmicos como o de Nato (2023) com estudo do empacotamento pode aprimorar a análise do modelo de Andreassen modificado em agregados, permitindo resultados mais precisos.

Dessa forma, justifica-se a realização deste estudo, que propõe trabalhar na otimização da composição de partículas de agregados naturais e reciclados com o auxílio de softwares de empacotamento, que propõem formulações otimizadas das misturas. A utilização Modelos numéricos parametrizados e integrados a dados experimentais, pode identificar a proporção ideal de cada componente nas misturas, visando atender a requisitos estruturais específicos e desenvolver composições inovadoras com alto desempenho técnico e econômico. Essa abordagem, é possível otimizar as propriedades dos materiais, garantindo soluções eficientes e sustentáveis para diversas aplicações na engenharia.

Assim, a presente pesquisa visa contribuir para os estudos de agregados reciclados na produção de argamassas estrutural, buscando atender aos critérios estabelecidos pela norma NBR 15116 para uso estrutural (ABNT, 2021). Este trabalho se insere no contexto do grupo de pesquisa MECOEFIGON, da Ufal e está alinhado

com outras investigações em andamento sobre a temática do uso de agregados reciclados.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho de dissertação é composto por 8 seções.

A 1ª seção apresenta o contexto do tema (introdução), o objetivo e a justificativa do estudo.

As seções 2 a 4 apresentam a revisão da literatura sobre agregados reciclados, as normas regulamentadoras, as principais características dos agregados reciclados de RCD e por fim, as propriedades das argamassas contendo RCD nos estados fresco e endurecido, bem como aspectos sobre dosagem das argamassas.

A seção 5 apresenta o programa experimental, com o esboço e metodologia dos ensaios, a seleção e caracterização dos materiais, e a investigação experimental das dosagens realizadas e das propriedades consideradas.

A seção 6 apresenta os resultados e discussões dos testes realizados, enquanto a seção 7 apresenta as considerações finais, e por fim, as referências bibliográficas e anexos.

2. RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

A prática da reciclagem de materiais de construção tem sido realizada há muito tempo, com registros que remontam à antiguidade. Desde o Império Romano e a Grécia antiga, resíduos como telhas, tijolos e utensílios de cerâmica eram reaproveitados como agregados em construções simples. No entanto, somente a partir de 1928 foram conduzidos estudos mais sistemáticos para avaliar os efeitos desses agregados no consumo de cimento, consumo de água e granulometria dos agregados de tijolos britados (Zordan, 1997; Levy, 1997; Bazuco, 1999; Ângulo, 2005).

Um marco importante na reciclagem de resíduos de construção e demolição ocorreu após a Segunda Guerra Mundial, quando a reconstrução demandava matéria-prima e havia grandes volumes de resíduos sem destinação adequada. Nessa época, materiais reciclados foram amplamente utilizados, especialmente na Alemanha, onde aproximadamente 115 milhões de metros cúbicos de resíduos foram reciclados, contribuindo para a construção de cerca de 175 mil unidades habitacionais (Zordan, 1997; Levy, 1997; Bazuco, 1999; Angulo, 2005).

Ao longo das últimas décadas, vários países adotaram a prática da reciclagem de materiais de construção, impulsionados por motivos ambientais e econômicos. A reciclagem tem sido realizada tanto por empresas privadas quanto por entidades públicas em diversos países. No entanto, as aplicações da reciclagem variam em cada país, considerando fatores como disponibilidade de locais para disposição e cumprimento das normas relacionadas ao uso desses materiais de construção, e quantidade de resíduos gerados, disponibilizados durante na construção (Zordan, 1997; Levy, 1997; Bazuco, 1999; Ângulo, 2005).

No Brasil, Ângulo (2000) introduziu um quadro pioneiro e abrangente sobre as investigações iniciais em torno da aplicação de resíduos na engenharia civil, incluindo o conceito de reciclagem neste contexto. Este sistema permitiu a separação dos resíduos na origem, tornando mais fácil e eficiente a reciclagem de materiais. Desde então, este sistema foi adotado por muitas cidades e países, tornando mais fácil reduzir o desperdício e conservar recursos. Isto marcou o início das práticas modernas de reciclagem e serviu de exemplo para outras comunidades.

A Resolução nº 307 emitida pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA (BRASIL, 2002) define os resíduos provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras civis, juntamente com os materiais resultantes da

preparação e escavação de terrenos, como RCD (Resíduos de Construção e Demolição). Esses resíduos, também conhecidos como entulhos de obras, calça ou metralha, englobam uma ampla gama de elementos, como tijolos, blocos cerâmicos, concreto, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras, compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiações elétricas, entre outros.

A construção civil gera quantidades significativas de resíduos, principalmente quando se trata de materiais inertes como concreto, tijolo e pedra. Estes materiais são muitas vezes difíceis de eliminar devido ao seu peso e volume, tornando-os difíceis reutilizar, ou seja, depois de gerados eles permanecem por um longo tempo no meio ambiente. Os resíduos podem ser perigosos ao meio ambiente se não forem descartados de maneira adequada, pois podem chegar aos cursos de água e aos aterros, onde podem causar poluição do ar e da água, contaminação do solo e uma série de outros problemas prejudiciais ao meio ambiente e à saúde humana.

No que diz respeito à classificação dos RCD, o CONAMA estabelece quatro classes por meio da Resolução nº 307 (Brasil, 2002). A Resolução nº 348 incluiu o amianto na Classe "D" (resíduos perigosos) (Brasil, 2004), e a Resolução nº 431 alterou a redação das classes B e C (Brasil, 2011), mais recentemente, a Resolução nº 469 modificou a redação da Classe B, incluindo as embalagens de tintas e vernizes (Brasil, 2015). O quadro 1 apresenta as classes dos resíduos de construção e demolição.

Quadro 1 - Classes dos resíduos de construção e demolição

CLASSE A	São os resíduos ou agregados, tais como: Resíduos provenientes de demolição e de perdas de construções e reformas, de obras de pavimentação, infraestrutura e terraplanagem, ou do processo de fabricação de materiais nos canteiros de obra, constituídos por diversos componentes como argamassa, concreto e cerâmica, com potencial de reciclagem ou de utilização como agregado;
CLASSE B	Resíduos recicláveis para outras destinações, mas sem a característica necessárias para serem utilizados como agregado, como papel,

	vidro, madeiras, embalagens vazias de tintas imobiliárias e gesso.
CLASSE C	Resíduos cuja reciclagem ainda não é possível devido à falta de tecnologia economicamente viáveis, que permitam a sua reciclagem ou recuperação;
CLASSE D	Resíduos considerados perigosos por sua composição, como tintas e solventes, ou por estarem contaminados ou prejudiciais à saúde.

Fonte: (Brasil, 2015)

No Brasil, várias empresas têm implementado programas para reduzir perdas e melhorar a gestão de resíduos. No entanto, é necessário investir em tecnologias de reciclagem e reutilização, pois a quantidade de entulho gerado continuará sendo significativa mesmo com a redução de perdas. Do ponto de vista ambiental, a disposição inadequada dos RCD em áreas livres e aterros inertes é um grande problema, além do esgotamento rápido dessas áreas designadas para a deposição dos resíduos (Moraes, 2018).

2.1 CENÁRIO DOS RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD) NO BRASIL

A construção civil tem liderado o consumo de recursos naturais no mundo, produzindo volumes consideráveis de resíduos, resultando em impactos ambientais e preocupações com a escassez desses recursos (Ferreira, 2024). Em 2023 foi estimado que a quantidade de resíduos de construção e demolição (RCD) gerados em todo o mundo ultrapassa os 10 bilhões de toneladas por ano (Lins *et al.*, 2023). No Brasil, a quantificação dos RCD gerados ainda é uma tarefa difícil, com poucos registros oficiais por parte dos municípios, embora alguns autores estejam se especializando e debruçando sobre o tema para realizar maiores estimativas da geração de RCD, utilizando como ferramentas os coeficientes de geração dos resíduos, variáveis como expansão urbana, produto interno bruto (PIB) e o PIB per capita (Ferreira, 2024).

No Brasil, os estudos sobre a viabilidade de uso do RCD começaram na academia com o trabalho pioneiro de Pinto (1986). Esse estudo foi seguido pela pesquisa de Levy (1997), que se concentrou na integração desses agregados em argamassas e misturas. No mesmo ano, investigações de Bodi (1997) aplicaram o RCD ao domínio da engenharia de superfícies rodoviárias, enquanto Zordan (1997) expandiu o conhecimento em tecnologia de concreto.

Em outro estudo, Pinto (1999) mais uma vez chamou a atenção para a indústria ao afirmar que a maior parte dos resíduos sólidos municipais poderia ser composta por mais de metade do RCD em peso, sublinhando o impacto substancial dos resíduos de construção na gestão de resíduos urbanos. Avançando para o novo milênio, a academia dedicou-se a um espectro de estudos empíricos a partir do ano 2000. Estes estudos examinaram rigorosamente as propriedades das variações de agregados reciclados, liderados por Ângulo (2000); a aplicação destes elementos reprocessados em argamassas observadas por Miranda (2000, 2005); e sua utilidade na fabricação de elementos pré-fabricados de concreto, objeto de pesquisa tanto de Buttler (2003), como de Souza (2001). Assim observou-se que foi um período marcado por intensos estudos experimentais, avaliando o potencial do RCD para revolucionar as práticas de construção e a gestão sustentável de resíduos.

Além disso, em 2002, o Conselho Nacional do Meio Ambiente do Brasil aprovou a Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA 307/2022 (Brasil, 2002), estabelecendo diretrizes para a gestão apropriada dos RCD, como também determinava que grandes construtores, tanto entidades governamentais quanto privadas, criassem e executassem planos para gerenciar entulhos de atividades de construção, conhecidos como Planos de Gerenciamento de Resíduos de Construção Civil (PGRCC). A resolução foi estabelecida com o intuito de implantar estratégias de reutilização, reprocessamento ou descarte ambientalmente corretos desses materiais. Apesar da exigência da resolução, observa-se que inúmeras empresas formulam o PGRCC, mas não conseguem concretizá-lo (Miranda, 2017). Mesmo com esta falta de legislação abrangente, a reciclagem de resíduo de construção e demolição testemunhou um aumento, em parte devido ao estabelecimento de instalações de reciclagem dedicadas em vários territórios do país, sublinhando a importância das intervenções de políticas públicas nesta área. Pioneiros no movimento pela reciclagem, municípios como São Paulo em 1991, Londrina em 1993 e Belo Horizonte em 1994 tomaram a iniciativa de instalar as primeiras estações de reciclagem.

As normas técnicas relativas aos resíduos estão apresentadas no quadro 2.

Quadro 2 - Normas técnicas relativas à RCD

Norma	Nome
NBR 15113 (ABNT, 2004)	Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes – Aterros – Diretrizes.
NBR 15114 (ABNT, 2004)	Resíduos sólidos da construção civil – Áreas de reciclagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação.
NBR 15115 (ABNT, 2004)	Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos.
NBR 15116 (ABNT, 2004)	Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural - Requisitos

Fonte: ABRECON (2015)

As normas citadas no quadro 2 enfatizam a gestão adequada dos materiais, através de projetos, implantações e operações que garantam a eficiência e sustentabilidade para assegurar a qualidade e segurança das obras. Além disso, os materiais reciclados contribuíram para a redução do impacto ambiental da construção civil, promovendo com isso a economia circular.

A Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente - Conama nº 307 tem desempenhado um papel fundamental no estímulo ao avanço da reciclagem de resíduos de construção e demolição no Brasil. Além disso, a Conama nº 431 modernizou os sistemas de categorização de resíduos, reconhecendo materiais recicláveis como o gesso. A Resolução nº 448 de 2012 estabeleceu pré-requisitos de autorização para aterros destinados à deposição de resíduos e reforçou obrigações para gestão de resíduos. Por fim, a Resolução nº 469, promulgada em 2015, ampliou os resíduos para abranger embalagens vazias de tintas, ressaltando a necessidade de integração desses resíduos ao processo estruturado de distribuição reversa.

Os principais fatores que impulsionaram a reciclagem de RCD no Brasil foram o aumento da preocupação com o meio ambiente, a conscientização sobre a importância da reutilização de materiais, o surgimento de cooperativas de catadores que recolhiam e separavam resíduos recicláveis e a Publicação da Resolução

Conama nº 307 em 2002, que desenvolvendo um plano de gerenciamento de resíduos de construção civil.

Em 2010 criou-se a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) pela Lei nº 12.305/10 de 02 de agosto de 2010. Essa lei estabelece diretrizes para a gestão e gerenciamento de resíduos sólidos no Brasil, buscando minimizar os impactos ambientais, trazendo vários favorecimentos tanto do ponto de vista ambiental quanto econômico e social (Ferreira, 2024).

As vantagens incluíram a redução de quantidades de resíduos destinados a aterros sanitários, minimizando a contaminação do solo e da água, implementando os sistemas de logística reversa, obrigando setores como de embalagens, pilhas e produtos eletroeletrônicos a estabelecerem mecanismos para que os produtos e suas embalagens fossem reciclados e reutilizados após o uso. Trouxe também como benefício o incentivo à economia verde e ao emprego, pois trouxe novas soluções para o manejo de resíduos, criando assim oportunidades de emprego, especialmente nas áreas de reciclagem e gestão de resíduos, trazendo um fortalecimento para as cooperativas de catadores que passaram a ser mais formalmente reconhecidas e recebendo apoio no desenvolvimento de suas atividades, além da educação ambiental que permitiu a conscientização da população para o descarte correto e a devida reciclagem dos produtos (Ferreira, 2024).

2.2 COMPOSIÇÕES E APLICAÇÕES DOS RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD)

As composições básicas dos resíduos de construção e demolição (RCD) podem variar dependendo do tipo de obra, do sistema construtivo utilizado e da localidade. No contexto internacional, Poon *et al.* (2001), no estudo dos resíduos de construção civil gerado em Hong Kong, apresentaram a composição dos resíduos em massa, descrita no quadro 3.

Quadro 3 - Composição dos resíduos em massa

COMPONENTES	RESÍDUOS DE DEMOLIÇÃO (%)	RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO (%)
Asfalto	1,61	0,13
Concreto	19,99	9,27
Concreto armado	33,11	8,25
Solo (terraplanagem)	11,91	30,55
Pedra britada	6,83	9,74
Pedregulho	4,95	14,13
Madeira	7,15	10,53
Bambu	0,31	0,30
Bloco de concreto	1,11	0,90
Tijolo	6,33	5,00
Vidro	0,20	0,56
Matéria orgânica	1,30	3,05
Tubo de plástico	0,61	1,13
Areia	1,44	1,70
Instalações	0,04	0,03
Outras sobras	0,07	0,24
Aço	3,41	4,36

Fonte: Adaptada, Poon *et al.* (2001)

Conforme estudado na literatura, esses resíduos podem ser classificados em diferentes categorias, conforme John *et al.* (2016):

- Solos.
- Materiais "cerâmicos", como rochas naturais, concreto, argamassa, cerâmica vermelha, cerâmica branca, cimento-amianto, gesso e vidro.
- Materiais metálicos, como aço para concreto armado, latão, chapas de aço galvanizado, entre outros.
- Materiais orgânicos, incluindo madeira, plásticos diversos, materiais betuminosos, tintas e adesivos, papel, restos de vegetais e outros produtos de limpeza de terrenos.

A proporção dessas fases nos RCD pode variar de acordo com sua origem. Por exemplo, resíduos provenientes de obras de pavimentação geralmente apresentam altas concentrações de materiais asfálticos, enquanto aqueles provenientes de obras de edificação possuem uma maior concentração de concreto (Costa, 2018).

Conforme a NBR 15116 (ABNT, 2021), agregados reciclados (miúdos e graúdos) são produzidos a partir do beneficiamento de resíduos da construção civil classe A. Após a reciclagem, os resíduos são reaproveitados em empreendimentos de infraestrutura como materiais agregados. A sua aplicabilidade depende da sua qualidade e proporções. Comparada tecnicamente, a utilização corresponde à eficiência da eliminação de resíduos padrão. As utilizações incluem pavimentação,

produção de concreto e argamassa, reforços de aterros, aterro de valas, entre outros, conforme o quadro 4.

Quadro 4 - Uso dos resíduos reciclados

PRODUTO	USO RECOMENDADO
Areia reciclada	Argamassas de assentamento de alvenaria de vedação, contrapisos, solo-cimento, blocos e tijolos de vedação.
Pedrisco reciclado	Fabricação de artefatos de concreto, como blocos de vedação, pisos intertravados, manilhas de esgoto, entre outros.
Brita reciclada	Fabricação de concretos não estruturais e obras de drenagens.
Bica corrida	Obras de base e sub-base de pavimentos, reforço e subleito de pavimentos, além de regularização de vias não pavimentadas, aterros e acerto topográfico de terrenos.
Rachão	Obras de pavimentação, drenagem e terraplanagem

Fonte: Adaptado da ABRECON (2015)

A NBR 15116 (ABNT, 2021) estabelece ainda que há três tipos de agregados reciclados das subclasses: agregado reciclado de concreto (ARCO), agregado reciclado cimentício (ARCI) e agregado reciclado misto (ARM). Para ser classificado como ARCO o agregado não pode conter material cerâmico, o ARCI pode conter até 10% de material cerâmico, e o ARM pode conter até 40% de material cerâmico.

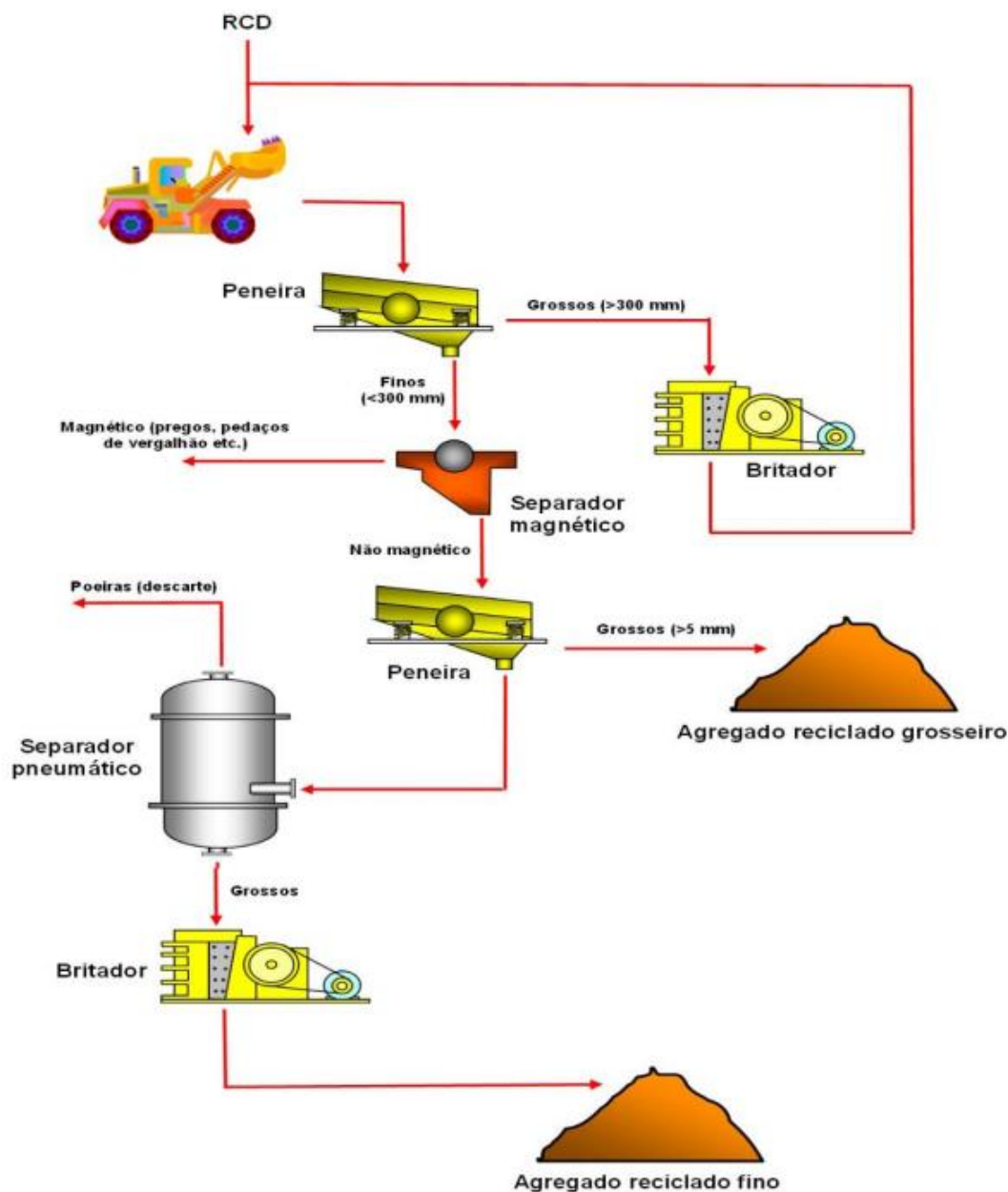
2.3 TECNOLOGIA UTILIZADA NA TRANSFORMAÇÃO DO RCD EM AGREGADO

O método de processamento de RCD em usinas de reciclagem de resíduos de construção e demolição e nos canteiros de obras é análogo em termos de etapas e tipos de equipamentos utilizados. Contudo, as centrais de usinas variam em tamanho e complexidade, dependendo do volume e do tipo de RCD recebido, e das características dos agregados reciclados em demanda, para o uso final do produto (Lima, 1999; Altheman, 2002). Segundo Zordan (1997), as usinas de reciclagem geralmente usam equipamentos com maior capacidade, como por exemplo, britadores primários de impacto.

A transformação do RCD em agregado nas usinas não difere muito do processo de obtenção de agregados naturais através de britagem, de modo que os mesmos equipamentos podem ser utilizados ou adaptados, se necessário, à reciclagem do resíduo de construção e demolição (Lima, 1999).

O processo de beneficiamento do RCD passa por diversas etapas até sua destinação final. Primeiro começa com a coleta do resíduo, direcionando o transporte para as centrais de reciclagem, separando, em seguida triturando com equipamento específico, peneirando e finalizando com o armazenamento do RCD (Silva, 2005; Grabasck, 2016; Silva. Maués, 2021). Conforme apresentado no fluxograma do processo de beneficiamento do RCD da figura 1.

Figura 1 - Fluxograma do processo de beneficiamento do RCD



Fonte: Chiconatto (2020)

Conforme Silva (2005), Grabasck (2016), Silva e Maués (2021), existem vários tipos de britadores comumente usados no processo de britagem do RCD, dentre os quais estão os cônicos e o de mandíbula. O britador de mandíbula é usado para

reduzir o tamanho de grandes pedaços de resíduos, enquanto o britador cônico é usado para reduzir o tamanho de pedaços menores de resíduos. Ambos os britadores são usados para preparar material para processamento dos materiais reciclados (SILVA, 2005; GRABASCK, 2016; SILVA. MAUÉS, 2021). De acordo com Leite (2001), os britadores são determinantes da maior parte das propriedades dos agregados reciclados e os tipos de britadores utilizados merecem atenção especial não só do ponto de vista técnico e operacional, mas também do ponto de vista econômico.

2.4 TIPOS DE BRITADORES

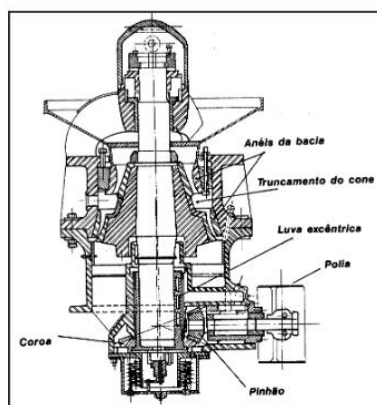
Segundo Sampaio (2018) “a britagem é conduzida por equipamentos robustos e pesados, em função das elevadas forças envolvidas para que haja a cominuição, embora essa a energia específica seja relativamente baixa, da ordem de 1 kWh/t”. As forças necessárias que fragmentam os blocos com tamanho da ordem de 1 m são sempre altas, apenas em casos específicos quando a razão de redução de britadores é pequena, implica em estágios sucessivos em instalações industriais integradas de britagem, proporcionando a relação de redução global de duas ordens de grandeza, ou seja, a britagem é realizada por equipamentos pesados devido a necessidade de aplicar forças grandes para quebrar os grandes blocos de material, e a energia consumida no processo não é muito alta por tonelada, porém que para os materiais maiores, é necessário realizar a britagem em múltiplos estágios para conseguir atingir uma redução de tamanho eficiente (Sampaio; Júnior, 2018)..

Ainda em seus estudos, Sampaio; Júnior (2018) destacam que no processo da moagem, a razão de redução proporcionada por equipamentos individuais é maior, e isso, permite que o número de estágios seja menor comparado à da britagem, tendo em vista, que nesse processo o objetivo principal é continuar a redução do tamanho do material que ocorreu na britagem, porém em uma escala mais fina, reduzindo a tamanhos muito menores, como pó ou partículas finas que chegam em torno de milímetros a micrômetros, tanto a britagem como a moagem são etapas dos processos que apresentam faixas granulométricas diferentes, trabalhando assim com mecanismos de quebra de partículas que predominam em cada etapa (Sampaio; Júnior, 2018).

Os britadores são máquinas usadas para triturar rochas e outros materiais em pedaços menores. Eles são normalmente usados nas indústrias de construção, mineração e demolição para reduzir o tamanho de grandes rochas e pedras. Existem vários tipos de britadores, incluindo britadores de mandíbula, britadores de cone, britadores de impacto e britadores de rolo. Cada tipo de britador tem seu design e finalidade exclusivos, permitindo que diferentes tipos de rochas sejam triturados e reduzidos ao tamanho desejado (Figueira; Luz; Almeida, 2010). Abaixo de modo geral, cita-se o britador giratório para complementar as informações expostas anteriormente.

O britador giratório é um equipamento de britagem primária utilizado quando existe uma grande quantidade de material a ser fragmentado, sendo mais operacional do que o britador de mandíbula, pode ser alimentado por qualquer lado, além de permitir uma pequena armazenagem no seu topo, além de apresentar um baixo custo operacional (Figueira; Luz; Almeida, 2010). A figura 2 mostra o britador giratório.

Figura 2 - Britador Giratório



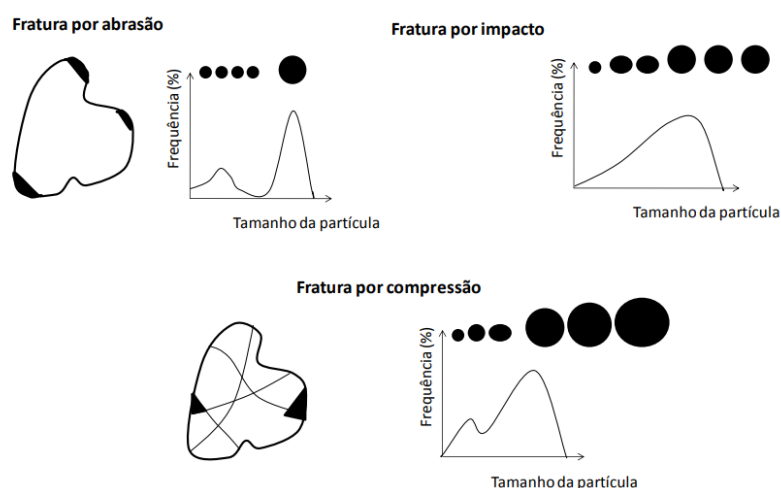
Fonte: Figueira; Luz; Almeida (2010).

Desse modo, nos britadores, o termo cominuição refere-se ao processo de redução do tamanho das rochas ou dos minerais, transformando-os em pedaços menores, é um processo fundamental na mineração e na indústria de britagem, pois torna os materiais mais adequados para os estágios subsequentes do processamento (Figueira; Luz; Almeida, 2010). Todas as etapas de fragmentação, assim como a britagem e a moagem englobam a cominuição, sendo um o processo geral de fragmentação de materiais sólidos.

De acordo com Tenório (2007), a cominuição pode ser feita por britagem ou moagem. Na reciclagem do RCD, a britagem é usada em geral quando se pretende obter majoritariamente grãos de maior dimensão (agregados graúdos). Já a moagem,

de acordo com o autor, parece ser mais usada em obras, quando se visa obter principalmente grãos mais finos (agregados miúdos) para a produção de argamassas. O processo de cominuição (neste caso, britagem) reduz a dimensão máxima do material, formando uma ou mais distribuições de tamanho de partículas (Neves, 2005). A cominuição, ou fragmentação, é conseguida por meio de mecanismos físicos de compressão (esmagamento), impacto, atrito, cisalhamento ou combinação entre eles (Pennsylvania Crusher, 2003; Figueira *et al.*, 2004). A figura 3 mostra em detalhes os processos de fratura dos britadores e a maneira como eles interferem nas distribuições dos tamanhos de partículas geradas decorrentes do processo.

Figura 3 - Processos de fratura dos britadores



Fonte: Adaptado de King (2001) *apud* Neves (2005)

Observa-se a diferença na fratura por abrasão, impacto e compressão, tendo relação principalmente nos tipos de forças que são aplicadas ao material durante o processo de fragmentação, a abrasão ocorre devido ao desgaste causado pelo atrito nas superfícies ou partículas, assim desgastando ou quebrando devido o contato repetido com uma superfície, enquanto a fratura por impacto ocorre quando uma força repentina e de alta intensidade é aplicada a um material, causando a quebra do material por meio do impacto de um objeto como martelada ou o impacto de partículas em alta velocidade, por fim, a fratura por compressão ocorre quando um material é submetido por forças que encolhem ou reduzem o volume do material, essa compressão tende a compactar o material até que não consiga mais resistir à pressão e se quebre (King, 2001 *apud* Neves, 2005). Ainda na figura 3 observa-se que o diâmetro máximo desejado para o agregado reciclado e o método de britagem empregado influenciam diretamente na quantidade de argamassa e pasta que após a

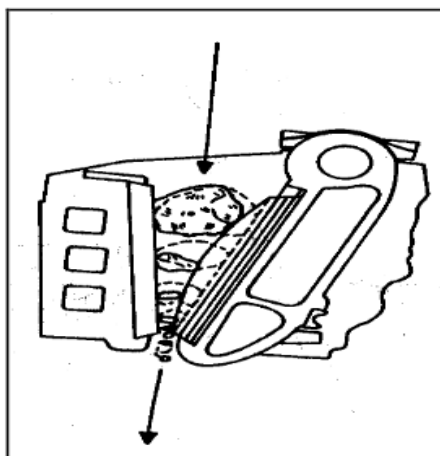
britagem ficará aderida ao agregado original, o que reflete nas suas propriedades físicas e mecânicas, bem como nas do concreto produzido (Hanser, 1992).

2.4.1 BRITADOR DE MANDÍBULA

O britador de mandíbulas que é um equipamento utilizado para fazer a britagem primária em blocos de elevadas dimensões/dureza e com grandes variações de tamanho na alimentação, compondo-se de uma mandíbula fixa, e uma móvel ligada ao excêntrico, ligado diretamente ou indiretamente, fornecendo o movimento de aproximação e afastamento entre essas, desta maneira, o bloco de material alimentado na boca do britador vai descendo entre as mandíbulas, enquanto recebe o impacto responsável pela fragmentação. Esses britadores de mandíbulas são classificados em dois tipos, baseando-se no mecanismo de acionamento da mandíbula móvel, tendo-se também britadores de um eixo e dois eixos do tipo Blake, como também os britadores de dois eixos com a mandíbula móvel têm movimento pendular, enquanto que os de um eixo, tem movimento elíptico (FIGUEIRA; LUZ; ALMEIDA, 2010).

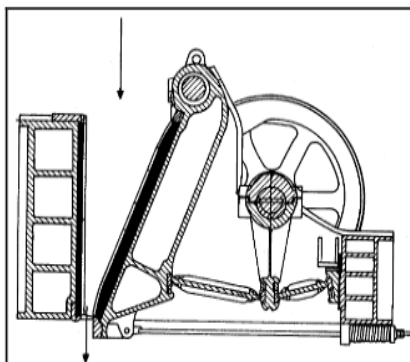
As figuras 4, 5 e 6 mostram respectivamente, o movimento dos blocos durante a fragmentação no britador de mandíbulas de um eixo Dodge, o britador de mandíbulas de dois eixos tipo Blake e o esquema do movimento do britador de mandíbulas de dois eixos tipo Blake.

Figura 4 - Movimento dos blocos durante a fragmentação no britador de mandíbulas de um eixo (Dodge)



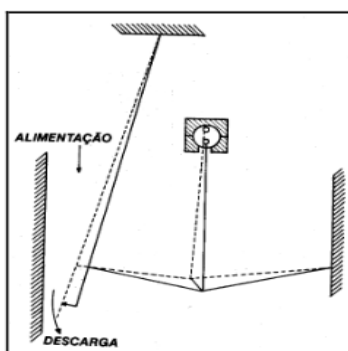
Fonte: Figueira; Luz; Almeida (2010)

Figura 5 - Britador de mandíbulas de dois eixos (Blake)



Fonte: Figueira; Luz; Almeida (2010)

Figura 6 - Esquema do movimento do britador de mandíbulas de dois eixos (Blake)



Fonte: Figueira; Luz; Almeida (2010)

Nos britadores de mandíbula, as partículas são quebradas essencialmente por mecanismos de compressão; os fragmentos presos na abertura da mandíbula sofrem sucessivos processos de quebra por cisalhamento no plano principal de tensões, gerando grande quantidade de finos (Chaves, 2002).

Conforme Luz *et al.* (2018), na etapa de britagem primária os britadores são usados para reduzir rochas grandes em pedaços menores, que são alimentados em uma série de estágios de processamento posteriores.

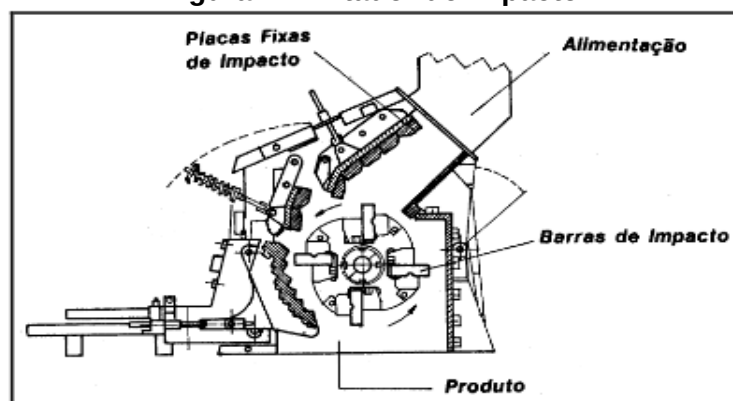
O britador de mandíbulas quebra o material através da aplicação de força compressiva (esmagamento) entre uma ou duas superfícies (mandíbulas) (figura 9). É comumente utilizado para britagem primária, pois não possui alta redução de granulometria (Lima, 1999). Apresenta como vantagens: geração de agregados com melhor distribuição granulométrica, ideal para aplicação em concreto; produção de 20% de finos abaixo de 4,8 mm e operação simples (Hanser, 1992 *apud* Leite, 2001).

2.4.2 BRITADOR DE IMPACTO

O britador de impacto apresenta fragmentação feita por impacto ao invés de compressão, tendo movimentos das barras de 500 até 3.000 rpm, e sua parte da energia cinética é transferida para o material, projetando-o sobre as placas fixas de impacto onde ocorre a sua fragmentação, apresenta elevado custo de manutenção e grande desgaste, não é aconselhável o seu uso em trabalhos com rochas abrasivas ou com materiais com valor da sílica equivalente maior que 15%, pois são equipamentos são escolhidos para britagem primária, que se deseja uma alta razão de redução e alta percentagem de finos. A figura 9 mostra esse tipo de britador. Nos britadores de impacto, a redução de tamanho ocorre essencialmente quando o material é lançado contra uma placa estacionária ou rotativa, o que faz com que o material se quebre e reduza de tamanho. É usado tanto em britagem primária como secundária (Ângulo, 2005; Lima, 1999). Por diversas vezes é o único britador usado. A figura 7 e 8 ilustra o corte esquemático do britador de impacto.

Conforme descrito por Felipe (2019), o britador inicia seu processo com a introdução do material no topo, permitindo que ele desça devido à gravidade. Durante essa descida, o material é atingido por barras móveis que o projetam para a câmara do britador, onde ocorre um impacto secundário. Uma das principais limitações desse equipamento é o elevado custo associado à sua manutenção, além de sua vulnerabilidade ao desgaste.

Figura 7 - Britador de Impacto



Fonte: Figueira; Luz; Almeida (2010).

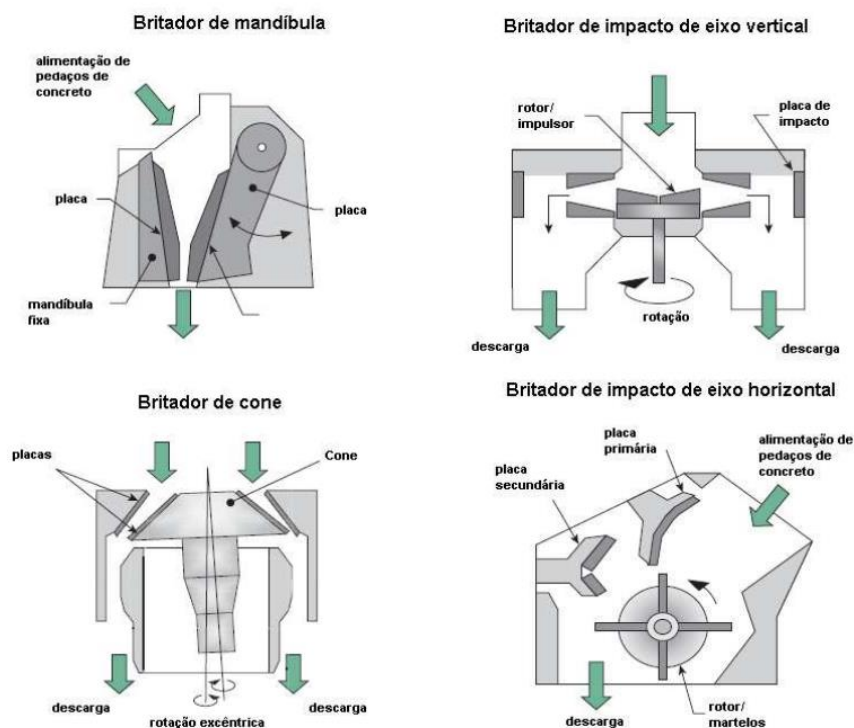
Figura 8 - Corte esquemático do britador de impacto



Fonte: METSO (2015a)

O efeito do impacto é desprezível para partículas menores que 0,15 mm. Dentro de certas limitações mecânicas, aumentando a velocidade do rotor, diminui-se a granulometria de saída (Chaves; Peres, 2012). De acordo com Ângulo (2011), ressalta também que os britadores de impacto têm a vantagem de triturar fragmentos maiores de concreto e produzir brita graduada para pavimento em estágio único; no entanto, sua manutenção é de alto custo. Os britadores de mandíbulas têm menores custos de manutenção e são recomendados quando se deseja produzir agregado graúdo (<19mm). A figura 9 mostra em detalhes os desenhos esquemáticos dos britadores de mandíbulas e de impacto e suas diferenças.

Figura 9 - Desenhos esquemáticos dos britadores de mandíbulas e de impacto



Fonte: Adaptado de APCA (2009)

Assim, em seus estudos Chaves (2002) comparou os britadores de mandíbula, com os britadores de impacto, assim percebeu que os britadores de impacto oferecem taxas de redução mais altas, de até 40:1, quando em circuito fechado, resultando em partículas mais finas (CHAVES, 2002).

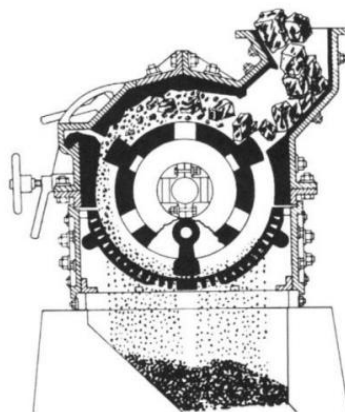
2.4.3 MOINHO DE MARTELO

O número de martelos em um moinho pode afetar sua produtividade e o tamanho das partículas. Quando se deseja um produto final uniforme, utiliza-se um padrão de martelo simplificado, que reduz o número de martelos por eixo, resultando em menos colisões entre as partículas e os martelos na câmara de moagem, isto pode melhorar a eficiência em 5% a 10%, sendo assim, reduzindo a quantidade de martelos (Lara, 2010).

Conforme Bellaver *et al.*, (2000), à medida que aumenta o número de martelos, maior é a probabilidade de as partículas sofrerem múltiplos impactos, resultando em uma moagem com granulometria mais fina, aumentando assim a produtividade. Por outro lado, quando ocorrem poucos golpes de martelo, menos partículas são processadas, levando a menor consumo de energia e menor produtividade. A economia de energia elétrica e o ganho de produtividade com a moagem aumentam conforme o aumento do tamanho das partículas. A figura 10 ilustra o esquema do moinho de martelo.

De acordo com Felipe (2019), a quebra de moinhos de martelos envolve o impacto o impacto de partículas em queda livre atingidas pelos martelos em movimento giratório e arremessados contra a câmara de impacto. Destaca-se a diferença significativa entre materiais fragmentados por compressão e por impacto, com as partículas comprimidas conservando tensões internas que podem induzir a fragmentação nos processos posteriores, ao contrário dos materiais fragmentados por impacto.

Figura 10 - Corte esquemático de um moinho de martelos



Fonte: Napier Munn (2006)

Em virtude de abertura da entrada de materiais ser relativamente pequena e de produzir alta porcentagem de miúdos (Pennsylvania Crusher, 2003; Lima 1999), os moinhos de martelo por muitas vezes são usados em obras de construção civil, com diversas utilidades, incluindo moagem e britagem de materiais.

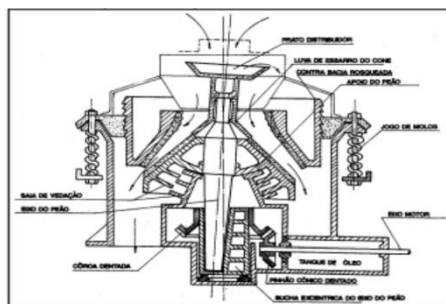
2.4.4 BRITADOR DE CONE OU BRITADOR CÔNICO

O britador cônico é o tipo mais utilizado na indústria mineral, normalmente empregado nas etapas secundária, terciária e quaternária do processo de britagem. Seus baixos custos de operação e manutenção, bem como sua alta durabilidade, fazem dele uma escolha ideal para redução de tamanho de rochas duras, por meio de compressão, com taxa de redução de 3 e 4 e alta frequência de rotação (Tavares, 2009).

O britador de cone é usado para reduzir o tamanho de rochas e outros materiais. Funciona esmagando o material entre um cone de metal estacionário e uma placa de metal em movimento. o material é alimentado no britador e a placa se move para baixo, esmagando o material contra o cone estacionário. O material triturado é então descarregado do britador. Os britadores de cone são usados em uma variedade de indústrias, incluindo mineração, construção e demolição.

O britador cônico só é capaz de processar materiais com diâmetro máximo de 7,87 polegadas, o que equivale a 20 cm, tornando-o o equipamento mais apropriado à britagem secundária (Hansen, 1992 apud Leite, 2001). A figura 12 apresenta o corte esquemático de um britador cônico.

Figura 11 - Corte esquemático de um britador cônico



Fonte: Luz et al., (2010)

A figura 11 mostra de forma resumida o corte esquemático de um britador crônico, a parte superior é chamada de alimentação, onde o material entra no britador e ocorre um controle para evitar que partículas grandes demais cheguem à câmara de britagem, enquanto a câmara de britagem é formada pela parte cônica móvel e a parte cônica fixa, é nessa câmara que ocorre a compressão do material adicionado na câmara de alimentação, enquanto o cone móvel que ocorre o movimento de corte e compressão fazendo com que o material se fracture, ou seja, esse cone móvel gira movimentando-se para cima e para baixo dentro da câmara de britagem, e à medida que o material desce pela câmara, ele é comprimido entre o cone fixo e o cone móvel até ser fragmentado em pedaços menores, após todo esse processo, o material fragmentado é então descarregado pela abertura de descarga, que pertence a parte inferior do britador.

2.5 AGREGADOS RECICLADOS DE DEMOLIÇÃO

Os agregados de demolição reciclados referem-se aos materiais processados obtidos a partir da desintegração de estruturas demolidas, considerando-se que esses resíduos da construção civil proporcionam inúmeros benefícios de ordem social, econômica e ambiental.

Para Orioli *et al.* (2024), as composições dos resíduos de construção e demolição dependem das características de cada região, das técnicas construtivas e das matérias-primas disponíveis. Assim as composições são bastantes variadas devido à grande quantidade de materiais envolvidos na indústria da construção civil (Orioli *et al.*, 2024).

A utilização dos RCD é facilitada por uma série de procedimentos mecânicos que incluem triagem, trituração, peneiramento e lavagem, para garantir que o produto final esteja isento de contaminantes e atenda a padrões de qualidade específicos. A incorporação de RCD em novos materiais de construção serve como uma alternativa aos agregados naturais, conservando assim os recursos naturais e reduzindo o impacto da extração nos ecossistemas (Orioli *et al.*, 2024).

2.5.1 TIPOS DE AGREGADO RECICLADO

A norma NBR 15116 (ABNT, 2021) estabelece os requisitos para agregados reciclados utilizados em argamassas e concretos de cimento Portland. A recente atualização da norma representou um avanço significativo ao possibilitar o emprego de agregados reciclados de classe A para fins estruturais, antes restrito a aplicações não estruturais (resistência C10 e C15). A norma classifica os tipos de agregados reciclados para uso em argamassas e concretos de cimento Portland da seguinte forma (ABNT, 2021a):

- Agregado composto: mistura de agregado reciclado e agregado natural;
- Agregado reciclado cimentício (ARCI): constituído por materiais cimentícios diversos, como concretos, argamassas e blocos pré-moldados de concreto, podendo incluir pequenas quantidades de cerâmica vermelha;
- Agregado reciclado de concreto (ARCO): constituído por resíduos de concreto;
- Agregado reciclado misto (ARM): constituído por uma mistura de materiais cimentícios e materiais cerâmicos.

Embora a NBR 15116 (ABNT, 2021) tenha avançado ao permitir o emprego de agregados reciclados em aplicações estruturais, ela estabelece critérios restritivos significativos. Entre eles, destaca-se a priorização do uso do agregado reciclado de concreto (ARCO) e a imposição de um limite máximo de substituição de 20% dos agregados tradicionais por reciclados em concretos destinados a ambientes com classes de agressividade I e II, conforme definido pela NBR 6118 (ABNT, 2023). Há uma lacuna na norma com relação à fração granulométrica que pode ser usada, ou seja, não está explícito se é possível usar agregados miúdos e graúdos reciclados.

Essa cautela normativa reflete a preocupação com a heterogeneidade inerente ao ARM, decorrente da sua composição mista de diferentes materiais com

propriedades distintas (Xiao et al., 2012). A presença de materiais cerâmicos no ARM, por exemplo, pode influenciar a absorção de água, a densidade e a potencial reatividade (RAA) do concreto Topçu & Saridemir (2008).

Contudo, a literatura científica demonstra um crescente interesse na viabilidade do uso de ARM em aplicações estruturais, muitas vezes ultrapassando os limites conservadores da norma. Estudos como o de Evangelista e Brito (2007) investigaram o desempenho de concretos com elevadas taxas de substituição de agregados naturais por ARM, repostando resultados promissores em termos de resistência mecânica e durabilidade, desde que adotados controles rigorosos na seleção e no processamento dos agregados reciclados. Da mesma forma, Pereira *et al.* (2014) demonstraram que a utilização de ARM com granulometria controlada e a otimização do traço do concreto podem mitigar os efeitos negativos da heterogeneidade do agregado, possibilitando seu uso em elementos estruturais com desempenho satisfatório.

A norma NBR 15116 (ABNT, 2021), ao permitir o uso estrutural de agregados reciclados, abre um leque de possibilidades para a construção civil sustentável. No entanto, para o ARM, a compressão aprofundada de suas características físico-químicas e o desenvolvimento de metodologias de controle de qualidade eficientes são importantes para garantir a segurança e a durabilidade das estruturas.

No entanto, observa-se uma lacuna no que concerne à normatização brasileira e internacional específica para o uso de agregados reciclados em argamassas estruturais. Enquanto normas internacionais como CUR-VB:1984 (Holanda), DIN 4226-100:2002 (Alemanha) e OT 70085:2006 (Suíça) fornece critérios para concreto estrutural reciclado, não há um consenso normativo global para sua aplicação em argamassas estruturais.

Nesse contexto, torna-se relevante adaptar e aplicar os critérios existentes em normas para concreto reciclado (quanto à qualidade dos agregados, limites de contaminantes, granulometria, absorção, RAA, etc.) e em normas para argamassas estruturais convencionais (quanto à resistência de aderência, resistência mecânica, retração, durabilidade) para avaliar o desempenho do ARM em argamassas estruturais (ABNT NBR 15575, ABNT NBR 15812, EM 998-1, EM 998-2).

2.6 PROPRIEDADES CARACTERÍSTICAS DOS AGREGADOS PROVENIENTES DE RCD

Apesar das propriedades do agregado poderem ser estudadas separadamente, aquelas importantes para a tecnologia do concreto estão inter-relacionadas e podem assim ser agrupadas (Mehta; Monteiro, 1994):

- Características dependentes da porosidade: massa específica, absorção de água, resistência, dureza, módulo de elasticidade e sanidade;
- Características dependentes das condições prévias de exposição e das condições de fabricação: tamanho, forma e textura das partículas;
- Características dependentes da composição química e mineralógica: resistência, dureza, módulo de elasticidade e substâncias deletérias presentes.

Ainda de acordo com Mehta e Monteiro (1994), em termos de relação com as propriedades do concreto, as propriedades do agregado podem assim ser agrupadas:

- Influenciadoras do estado fresco: porosidade ou massa específica, composição granulométrica, forma e textura superficial;
- Influenciadoras do estado endurecido: porosidade, composição mineralógica e outras propriedades dependentes destas.

As propriedades dos agregados reciclados de demolição estão diretamente relacionadas ao tipo de material utilizado na sua produção; principalmente, na fração mineral do RCD disponível para sua fabricação, como concreto, blocos, argamassas, cerâmicas, rochas e outros (Damineli, 2007).

A oportunidade de incorporar agregados reciclados na produção de argamassas e concretos surge como uma solução sustentável, diminuindo a dependência de recursos primários, diminuindo a produção de resíduos e promovendo princípios de economia circular. No entanto, a utilização de agregados reciclados na construção civil também acarreta desafios. Um deles é garantir a qualidade e a adequação desses materiais, considerando suas propriedades físicas, mecânicas e durabilidade. A seguir, são avaliadas algumas propriedades dos agregados reciclados, as quais desempenham um papel fundamental na produção de argamassas e concretos, e que serão estudadas no presente trabalho.

2.6.1 DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

Uma das características importantes é a distribuição granulométrica dos agregados reciclados miúdos. A análise dessa distribuição permite avaliar a faixa de tamanho das partículas presentes e sua adequação para a mistura com outros materiais. É fundamental que essa distribuição esteja dentro de limites especificados, de acordo com as necessidades da argamassa ou concreto a ser produzido (Topçu, 2004).

De acordo com Malta (2012), os agregados reciclados de concreto, miúdo e graúdo, apresentam uma composição granulométrica mais contínua e com maior quantidade de finos oriundos da argamassa que se desprende do agregado natural.

A granulometria dos agregados reciclados precisa atender aos mesmos requisitos dos agregados naturais, sendo uma propriedade de extrema importância, pois pode afetar a trabalhabilidade, resistência mecânica, consumo de ligantes, absorção de água, permeabilidade, entre outros (Topçu, 2004).

A composição granulométrica dos agregados reciclados, sejam eles graúdo ou miúdo, varia de acordo com o tipo de resíduo processado, os equipamentos utilizados e o tamanho original do resíduo antes do processamento (Topçu, 2004). O autor também menciona que a forma mais adequada para utilização em concretos e argamassas é o peneiramento do material, possibilitando um ajuste da granulometria, assim buscando obter curvas semelhantes às areias e britas naturais. No entanto, esse procedimento pode aumentar os custos de reciclagem, apresentar desafios técnicos e resultar no desperdício de parte do material reciclado.

Vários estudos realizados por Topçu (2004) mostraram que as distribuições granulométricas dos agregados reciclados são satisfatórias para sua utilização em concretos. Entretanto, há controvérsia nesse requisito, pois alguns estudos afirmam que o agregado reciclado não se encaixa dentro de nenhuma faixa de graduações da norma NBR 7211 (ABNT, 2009d) bem como apresentam valores de dimensão máxima características inferiores (Melo, 2019; Maia *et al.*, 2022). Em um estudo realizado por Miranda *et al.* (2006), verificou-se que os agregados reciclados provenientes de blocos de concreto apresentam uma composição granulométrica mais uniforme em comparação com os agregados provenientes de alvenaria, o que os torna adequados para uso em argamassas.

Segundo Vaz (2016), a composição granulométrica afeta o desempenho do concreto e da argamassa, pois se a areia não for bem graduada, maior será o índice de vazios e, portanto, maior será o consumo de pasta de cimento, acarretando recessão econômica e custo.

2.6.2 COMPOSIÇÃO QUÍMICA DOS AGREGADOS RECICLADOS

A composição química dos agregados reciclados também é um fator a ser considerado. É necessário analisar os teores de substâncias indesejáveis, como sulfatos, cloretos e materiais orgânicos, que podem afetar a durabilidade e resistência do material final. Essa análise química é fundamental para garantir a segurança e a durabilidade das estruturas construídas com agregados reciclados (Pissolato Junior, 2016).

Um estudo realizado por Limbachiya, Marrocchino e Koulouris (2007) analisou as propriedades químicas e mineralógicas dos agregados reciclados e seu desempenho em concretos. Os pesquisadores destacaram a influência de diferentes porcentagens de agregados reciclados graúdos (30%, 50% e 100%) na composição química do concreto. A pesquisa concentrou-se na fração de tamanho 16-4 mm dos concretos reciclados e dos agregados naturais, além da areia natural com dimensão inferior a 4 mm.

Pedrozo (2008) utilizou técnicas de análise para estabelecer a composição química e mineralógica dos agregados reciclados, sendo a espectrometria de dispersão de raios-X (EDX) e a difratometria de raios-X (DRX). Os principais elementos químicos encontrados foram: SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MnO , MgO , CaO , Na_2O , K_2O , P_2O_5 (em % de massa) e traços dos elementos: Pb, Zn, Ni, Co, Cr, V (em ppm).

A composição química dos RCDs pode ser um dos fatores decisivos para avaliar a usabilidade de materiais reciclados em diferentes utilizações. Vários autores demonstram que o teor de pasta de cimento aderida pode ser estimado a partir da composição química (Ângulo; Mueller, 2007).

2.6.3 ABSORÇÃO DE ÁGUA DOS AGREGADOS RECICLADOS

A absorção de água em agregados reciclados, se comparado à absorção de água em agregados naturais, é maior. Conforme Carneiro *et al.* (2001), os agregados reciclados possuem maior absorção de água que os agregados naturais, em função de sua maior porosidade e maior quantidade de finos. Nos agregados reciclados miúdos, uma parcela substancial da fração miúda é composta por partículas da argamassa original, que normalmente apresentam elevados valores de absorção (Saikia *et al.*, 2013).

Como resultado, as misturas cimentícias produzidas com alto teor de substituição de materiais reciclados de RCD requerem uma maior relação a/c para a mesma trabalhabilidade (Oliveira, 2012). Dessa forma, a taxa de absorção de água dos agregados reciclados é um fator crucial a ser considerado ao utilizar esses materiais em concretos.

De acordo com Tam *et al.* (2006), “A absorção de água encontra-se aproximadamente entre 3% e 10% para agregados reciclados e menos de 1% até 5% para os agregados naturais. Esses valores de absorção podem variar de acordo com o tipo de agregado utilizado e o tempo de ensaio da absorção dos agregados”.

No Brasil, é a norma NBR 16916 (ABNT, 2001) que regulamenta o ensaio de absorção de água para agregados miúdos na condição de saturado com superfície seca (SSS) (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2021). Essa norma estabelece um tempo de saturação de 24 horas seguido de secagem ao ar.

Os agregados reciclados demonstram uma capacidade de absorção de água superior, com uma taxa de absorção mais rápida do que os agregados naturais, atingindo quase a saturação em minutos. Leite (2001) e Carrijo (2005) utilizaram um método modificado para avaliar a absorção de água dos agregados de RCD em seus estudos. Nesse método, a absorção é medida não apenas após 24 horas, mas também durante os primeiros minutos e horas de imersão. Leite (2001) observou que tanto os agregados miúdos quanto os graúdos atingiram cerca de 50% de absorção em apenas 10 minutos.

3. ARGAMASSAS COM AGREGADOS RECICLADOS

A argamassa é um material com vários tipos de aplicações na construção civil, como na execução de alvenaria nas etapas de assentamento de blocos, fixação e revestimento. Podem ser usadas também como camadas de contrapiso e piso, e há ainda as argamassas próprias para a execução de revestimento cerâmico e para reparos.

Além destas aplicações, o presente trabalho aborda as argamassas estruturais, menos usuais, que, segundo Parente *et al.* (2023), podem ser usadas em paredes finas, cascas de concreto armado e coberturas finas de concreto armado. No presente trabalho, considera-se ainda está argamassa como uma fase anterior ao concreto, podendo ser usada para estudos prévios de dosagem de concretos estruturais, antes da inserção do agregado graúdo. Desse modo, os autores supracitados indicam que o desempenho dessas argamassas segue os requisitos dos concretos estruturais, destacando-se a exigência de uma resistência mínima à compressão de 20 MPa aos 28 dias (fck), de acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2023).

O uso de RCD como parte de insumo na produção de argamassas é uma alternativa viável e já bastante explorada por diversos autores. Autores como Resende *et al.* (2024) reforçam que a utilização de agregados reciclados (AR) na produção de novos materiais de construção é considerada um dos métodos mais eficientes para agregar valor aos resíduos, assim o uso de RCD como parte dos insumos na produção de argamassa tem ganhado bastante atenção como uma solução sustentável na construção civil.

Além dos benefícios ambientais e econômicos, é importante considerar as propriedades físicas e mecânicas das argamassas feitas com RCD. Algumas dessas propriedades essenciais incluem a resistência à compressão e a absorção capilar.

A substituição parcial ou total dos agregados naturais pelos reciclados geralmente resulta em uma redução na resistência à compressão, sendo que essa redução aumenta com o aumento do teor de substituição (Gonçalves *et al.*, 2007).

Apesar de haver estudos que fornecem informações relevantes sobre o desempenho das argamassas com agregado miúdo reciclado, é necessário considerar as especificidades de cada aplicação e seguir as normas e diretrizes

técnicas adequadas para garantir a qualidade e a durabilidade das estruturas construídas (Pedroso, 2008).

Quanto à absorção de água, há um aumento do seu valor nas argamassas produzidas com agregados reciclados, pois estes se diferenciam dos naturais por possuírem argamassa aderida à superfície dos grãos, com isso tem-se uma menor massa específica e maior absorção de água (Buttler, 2003).

Souza (2020) analisou argamassas com 15% e 30% de agregado reciclado de resíduos de construção (AR), demonstrando viabilidade de substituir agregado natural. O método de mistura do agregado reciclado influenciou pouco as propriedades, resistência à compressão e tração diminuíram pouco, e retração, absorção de água e porosidade aumentaram, sendo que a relação água/cimento afetou mais essas propriedades. O estudo permitiu concluir que é possível substituir até 30% do agregado natural por agregado reciclado, desde que se corrija a relação a/c para garantir a trabalhabilidade e se verifique o desempenho em obra da argamassa aplicada.

Em se tratando de Agregado Reciclado Misto (ARM), geralmente resultante de demolição, e que é objeto de estudo do presente trabalho, este apresenta uma composição diversificada, englobando fragmentos de concretos, argamassa curada e, em proporções variáveis, elementos cerâmicos e outros materiais inertes (Correia *et al.*, 2016). Essa heterogeneidade intrínseca, influenciada pela origem de resíduos e pelo processo de beneficiamento, afeta diretamente os atributos físico do ARM, como a distribuição do tamanho dos grãos, o formato das partículas e, de modo fundamental, sua alta taxa de absorção hídrica (Zhu *et al.*, 2020).

Pesquisas indicam que ARM apresenta uma absorção de água superior à da areia natural, o que pode resultar na diminuição da trabalhabilidade da argamassa recém-misturada, exigindo um volume maior de água na composição para obter a consistência pretendida (Lotfi *et al.*, 2015). Em decorrência disso, essa relação água/cimento elevada pode prejudicar o ganho de resistência mecânica e intensificar a retração da argamassa ao longo do processo de cura (Gomes; Brito 2012). Além disso, a presença de finos e partículas pulverulentas no ARM de demolição pode influenciar a reologia da argamassa, a sua aderência ao substrato e a sua durabilidade a longo prazo, afetando a resistência à carbonatação e a permeabilidade a agentes agressivos (De Brito, Saikia, 2012).

Apesar desses desafios, uma pesquisa científica explorou estratégias para melhorar o uso do ARM de demolição em argamassas estruturais. Técnicas como caracterização detalhada da composição e granulometria do ARM, o pré-tratamento do agregado por meio de lavagem ou pré-saturação para reduzir a absorção inicial de água, e a utilização de aditivos químicos (superplastificantes, agentes incorporadores de ar) apresentam instruções mostradas para melhorar a trabalhabilidade e o desempenho mecânico das argamassas (Safiuddin *et al.*, 2010). Investigações comparativas avaliaram um comportamento de argamassas estruturais produzidas com diferentes taxas de substituição do agregado natural miúdo por ARM de demolição, analisando parâmetros como a resistência à eletricidade, a resistência à tração na flexão, o módulo de elasticidade e a aderência à alvenaria (Martíns – Morales *et al.*, 2011).

De acordo com Parente *et al.* (2023), ao substituir 20% do agregado natural por agregado reciclado na argamassa estrutural analisada em seu trabalho, observou-se um aumento no desempenho mecânico. No entanto, a adição de resíduos cerâmicos resultou em redução da massa específica, aumento da porosidade e melhor capacidade de absorção de água por imersão. Isso se deve ao empacotamento de partículas, ao aumento do teor de finos e à redução da trabalhabilidade da matriz cimentícia.

3.2 PROPRIEDADES EM ESTADO FRESCO

Conforme Pereira (2016), as características das argamassas no estado fresco são determinadas pela morfologia e granulometria da fração miúda, que é determinada pela forma, textura e tamanho do agregado, dependendo da sua origem e natureza.

Podem ser observadas alterações nas propriedades da argamassa no estado fresco em função dos parâmetros texturais da areia, ou seja, quanto mais arredondada, esférica e menos rugosa for a textura superficial, menor será a quantidade de ligante e água de amassamento necessária para garantir a trabalhabilidade, resultando no menor consumo de ambos (Tristão, 2005).

Interferências nas propriedades das argamassas nos estados fresco e endurecido podem ser devidas à distribuição granulométrica, teor de finos, forma e textura superficial dos grãos (Arnold, 2011).

3.3 ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA (TRABALHABILIDADE)

A consistência de uma argamassa é determinada pela facilidade com que ela se deforma sob a ação de cargas, sendo altamente influenciada pela natureza e quantidade de pasta ligante que envolve o agregado. Essa pasta pode apresentar características variadas, seca, plástica ou fluida como apontado por Carasek (2010). Essencialmente, a consistência está diretamente relacionada à trabalhabilidade da argamassa, uma propriedade que pode ser quantificada através de um índice específico.

No quadro 5 mostra alguns resultados de índice de consistência de argamassas produzidas com diferentes tipos de agregado reciclado.

Quadro 5 - Trabalhabilidade de argamassas com diferentes tipos de agregados avaliada por meio do índice de consistência

Autor	Tipo de Agregado	Percentual de AR (%)	Índice de Consistência	Relação água/cimento
Alvarenga (2018)	Argamassa	30	330	1,25
Alvarenga (2018)	Argamassa	50	320	1,25
Andrade <i>et al.</i> , (2018)	Natural	0	270	0,99
Andrade <i>et al.</i> , (2018)	Cerâmico	50	268	1,07
Andrade <i>et al.</i> , (2018)	Cerâmico	75	263	1,08
Girandi (2016)	Natural	0	267	1,73
Girandi (2016)	Misto	100	258	1,79
Oliveira (2012)	Natural	0	295	1,12
Oliveira (2012)	Misto	25	295	1,18
Oliveira (2012)	Misto	50	295	1,25
Silva Neto e Leite (2018)	Misto	0	270	0,88
Silva Neto e Leite (2018)	Misto	20	265	0,88
Silva Neto e Leite (2018)	Misto	40	243	0,88
Souza (2020)	Natural	0	262	0,68
Souza (2020)	Misto	15	231	0,68
Souza (2020)	Misto	30	214	0,68

Fonte: Adaptada de Souza *et al.* (2022)

Pedroso (2008) cita que a trabalhabilidade das argamassas pode ser afetada dependendo da relação água/cimento e do tipo de agregado reciclado utilizado. Gonçalves *et al.* (2007) avaliaram o uso de agregados reciclados cerâmicos na produção de argamassas. Eles verificaram que a trabalhabilidade para uma relação a/c de 0,5 era similar entre as argamassas com agregado reciclado e as argamassas com agregado natural, porém quando a relação a/c era de 0,4, as argamassas com agregado reciclado apresentavam uma redução na trabalhabilidade. A maior diferença

na consistência foi 14% que ocorreu nos agregados triturados com o britador de cone, enquanto os agregados triturados no moinho de impacto, a diferença foi de 6%.

3.4 DENSIDADE DE MASSA E TEOR DE AR INCORPORADO

A massa específica aparente ou densidade expressa a razão entre a massa e o volume de um material, incluindo os vazios. Os vazios presentes na argamassa consistem em ar incorporado ou vazios formados pelo excesso de evaporação da água da mistura. Segundo Nakakura e Cincotto (2004), o teor de ar incorporado afeta diretamente a resistência à compressão.

Além disso, o teor de ar incorporado contribui para o impedimento da passagem de água para o interior pelo fenômeno da capilaridade, pois as bolhas de ar incorporado podem interromper parte dos poros capilares das argamassas (Freitas, 2010).

A densidade de massa da argamassa é um indicativo da compactidade resultante da proporção da mistura agregado/aglomerante e da distribuição granulométrica do conjunto; determina indiretamente o volume de vazios incorporados pelos aditivos e a quantidade de água de amassamento perdida por evaporação (Freitas, 2010).

Com a incorporação de ar, apesar de melhorar a sua trabalhabilidade, o compósito apresenta uma diminuição em certas propriedades após o endurecimento, incluindo a as resistências mecânicas (Mansur, 2007).

3.5 PROPRIEDADES EM ESTADO ENDURECIDO

Para avaliar o desempenho da argamassa em seu estado endurecido é necessário realizar ensaios de resistência mecânica, durabilidade, retração, entre outros. Diversos pesquisadores realizaram experimentos para avaliar as propriedades das argamassas no estado endurecido, esses ensaios incluem-se resistência à compressão, resistência à tração na flexão, resistência de aderência à tração, à fissuração, entre outros (Pereira, 2016).

A porosidade dos agregados determina as suas propriedades mecânicas, uma vez que maior absorção de água e maior teor de ar conduzem a uma maior porosidade após o endurecimento (Hawlitschek, 2014).

Mazzochini e Niemczewski (2019), em seu trabalho, indicaram que ao substituir o agregado natural por agregado miúdo reciclado (AMR) em argamassas observou-se que quanto maior a quantidade de AMR houve uma redução na densidade das argamassas. Isso levou a um maior consumo de água para alcançar a trabalhabilidade ideal. No entanto, as argamassas com AMR apresentaram menor coeficiente de capilaridade e superior resistência à tração na flexão em comparação com a argamassa de referência, sem o agregado reciclado.

3.6 RESISTÊNCIA MECÂNICA

A resistência mecânica da argamassa refere-se à sua capacidade de suportar tensões de compressão, tensão e cisalhamento sem rachar ou desmoronar.

A estrutura porosa e granular dos agregados reciclados influencia a resistência mecânica das argamassas, tanto à compressão como à tração. A forma e a composição desses agregados resultam em maiores demandas de água, o que justifica a perda de resistência à compressão, mas aumenta a resistência à tração na flexão, pois a forma granular proporciona melhor aderência da argamassa aos agregados (Heineck, 2012).

Pedrozo (2008) em seu estudo, observou que a incorporação de agregado de RCD em substituição de 50% da mistura M1 e 25% para a mistura M3 obteve ganhos significativos da resistência à compressão das argamassas. No entanto, para teores de substituição mais elevados, não houve acréscimo de resistência considerados relevantes, na Tabela 1 demonstram-se os resultados obtidos pelo autor.

Tabela 1 - Resultado da resistência à compressão das argamassas produzidas com agregado reciclado

Acréscimo da resistência à compressão 28 dias → 90 dias					
Argamassa/Teor	0	25	50	75	100
M1	23,2	35,8	52,9	33,8	30,4
M2	29,5	34,4	36,0	37,4	32,2
M3	23,2	32,8	24,1	25,4	22,3

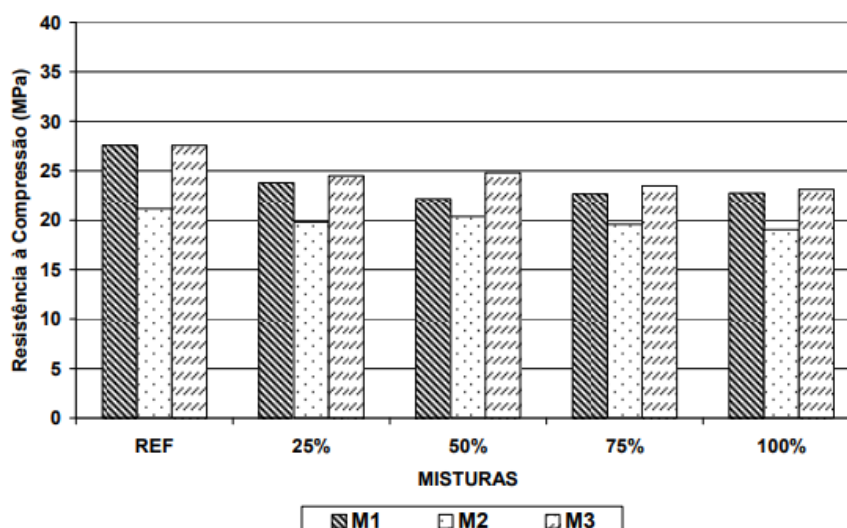
Fonte: Adaptado de Pedrozo (2008)

Por outro lado, Heineck (2012), em seu estudo sobre resistência à compressão, constatou que a resistência da argamassa confeccionada com RCD de concreto era aproximadamente 64% inferior à da argamassa confeccionada com agregado natural.

Segundo Calçado (2015), a substituição do agregado natural pelo reciclado leva a uma diminuição do módulo da elasticidade nas argamassas, mas, ao mesmo tempo, mantém-se os valores de resistência mecânica. No entanto, Tavares de Assunção *et al.* (2007) afirmam que o uso de agregado reciclado resulta em aumento da resistência mecânica, à tração e à flexão.

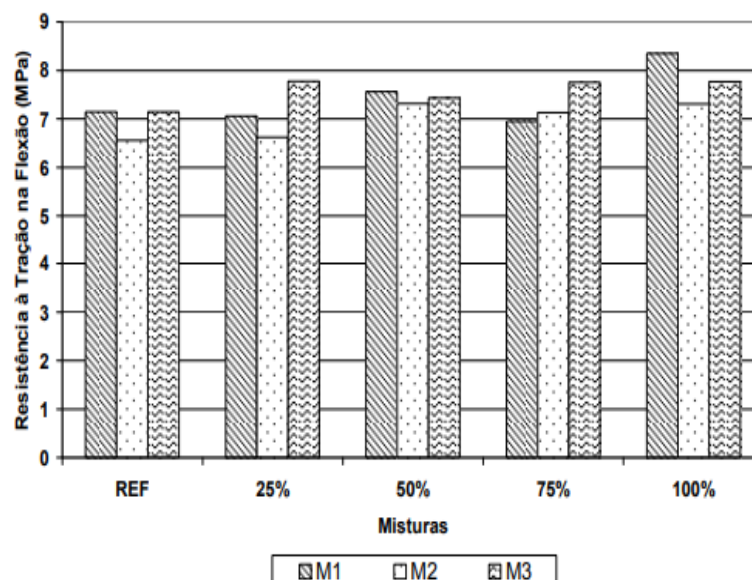
Pedrozo (2008) fez algumas composições de argamassas contendo apenas agregado miúdo natural, e com 25%M1, 50%M1, 75%M1 e 100%M1 de substituição por agregado miúdo reciclado, e utilizando um traço de 1:3,0:0,66. As análises de resistência à compressão e resistência à tração na flexão, ambos ensaios realizados em 28 e 90 dias, cada tipo de composição de argamassa (M1, M2, M3) apresenta uma referência específica para efeito de comparação, e estão apresentadas nas figuras 12 e 13.

Figura 12 - Evolução da resistência à compressão de argamassas com diferentes percentuais de agregados reciclados aos 28 dias



Fonte: Pedrozo (2008)

Figura 13 - Evolução da resistência à tração na flexão de argamassas com diferentes percentuais de agregados reciclados aos 90 dias



Fonte: Pedrozo (2008)

Nas figuras 12 e 13 é possível analisar que os resultados obtidos por Pedrozo (2008) indicam que a incorporação de finos de RCD, especialmente em teores inferiores a 0,15 mm, pode melhorar significativamente a resistência à tração e a resistência à compressão das argamassas. As misturas M1 e M3 exibiram resistência à tração na flexão maior em comparação a M2. A redução da *resistência* à compressão das argamassas com o aumento do teor de substituição dos agregados miúdos reciclados foi observada no estudo de Pedrozo (2008). Para a mistura M1, a redução chegou a 18%, enquanto para a mistura M3, a redução foi de 16%, ambas com 100% de substituição dos agregados miúdos convencionais por agregados reciclados.

Com relação ao uso de agregados reciclados para a produção de concretos, de acordo com *Mehta et al.* (1994), diversos fatores influenciam a resistência mecânica, incluindo a porosidade dos agregados, a porosidade da matriz, a presença de minerais na mistura, a interação química entre o agregado e a pasta de cimento, o teor de ar retido nos agregados e a capacidade de absorção de água pelos agregados.

Em seu estudo, Leite (2001) observa que as partículas do agregado reciclado possuem uma área específica maior, permitindo uma maior absorção da pasta de cimento pelos poros superficiais. Isso resulta em uma maior precipitação de cristais de hidratação nos poros do agregado, o que leva a uma zona de transição mais

fechada e melhora o desempenho do concreto. No entanto, essa autora ressalta que a partícula do agregado reciclado se torna o elo fraco na mistura, justificando a redução da resistência do concreto com o aumento do teor de agregados reciclados.

Buttler (2003) observa que, mesmo com uma relação água/cimento maior no concreto produzido com agregado reciclado, ocorre uma migração de água do agregado para a pasta logo após o endurecimento, resultando em um efeito de "cura interna" na zona de transição, o que melhora as propriedades de aderência entre a pasta e o agregado.

Conforme apontado por Tenório (2007), o agregado reciclado tende a permitir uma densificação da zona de transição e uma redução na microfissuração devido ao seu menor módulo de elasticidade, o que permite a compatibilização de deformação com a pasta. No entanto, o agregado reciclado é mais poroso que o agregado natural.

4 DOSAGEM DAS ARGAMASSAS

Dosar uma argamassa envolve analisar e definir (com base na aplicação e nos métodos pretendidos) as proporções ou quantidades exatas dos materiais componentes da mistura (essas quantidades podem ser indicadas em peso ou volume). Uma abordagem eficaz de dosagem de argamassa é aquela que busca reduzir imprecisões decorrentes de medições inadequadas e produzir uma argamassa de elevada qualidade e durabilidade, exigindo uma base em conceitos e propriedades adequadas, apoiadas por sólidos conhecimentos técnicos e científicos.

Para Lara *et al.* (1995), a funcionalidade satisfatória das argamassas depende, principalmente, da seleção precisa dos materiais e de seu proporcionalmente, denominado procedimento de dosagem.

Conforme Carneiro (1999), normalmente, a composição e a dosagem das argamassas utilizadas no Brasil são estabelecidas em proporções conforme os traços (massa ou volume) delineadas ou especificadas em normas internacionais ou nacionais, como definidos pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

Lara *et al.* (1999), em seu estudo, concluíram que “com acompanhamento adequado, seleção dos materiais, emprego de aditivos e dosagem experimental é possível otimizar estas proporções para cada situação específica”.

Para os autores Carneiro e Cincotto (1999), o princípio para compor e dosar uma argamassa com base na curva granulométrica se faz necessário para obter uma argamassa que possa obter de uma argamassa que possa ser trabalhada no estado fresco e que apresente, no estado endurecido, alta densidade, com reduzido volume de vazios e com capacidade de deformação.

Nesse sentido, as dosagens podem ser determinadas baseadas em conceitos de empacotamento de partículas que determinam as curvas granulométricas do agregado miúdo. Carneiro (1999) indica que a alteração da granulometria do agregado pode aumentar a quantidade de finos inertes utilizados para substituir o cimento sem aumentar significativamente o teor de água.

Selmo (1990 *apud* Cascudo; Carasek, 1994) propôs a dosagem aceitável nas adições em argamassas de revestimento com base na curva de trabalhabilidade, que é derivada da relação entre agregado/cimento e adição/cimento em misturas

experimentais, ao variar a relação areia/cimento. Isso resulta em uma argamassa plástica com mínimo de adição.

4.1 TEOR DE FINOS

Em variadas bibliografias as dimensões para a especificação de finos podem variar, mas em geral, as normas atuais endossam limites muito próximos de 75 μm . Conforme afirmado por Carasek (2007), as partículas finas, devido à sua grande área de superfície e à sua natureza, requerem uma maior quantidade de água de amassamento para atingir a mesma trabalhabilidade, resultando em um aumento na retração e, assim sendo, na formação de fissuras. Dessa forma, a resistência mecânica da argamassa é comprometida devido à relação alta entre água e aglomerante.

De acordo com Miranda (2000), o limite máximo de finos – <75 μm que um agregado reciclado pode possuir para evitar a fissuração de argamassas é de 25%. Entretanto, Silva *et al.* (2009) sugerem que este valor é entre 10% e 15%. Enquanto o teor de materiais finos (<75 μm) das areias naturais beneficiadas raramente ultrapassa 5%, este é o valor mínimo encontrado em areias recicladas de RCD. Como o RCD normalmente vem misturado com materiais cerâmicos, este valor pode oscilar facilmente entre 15% e 30%, garantindo uma boa trabalhabilidade da argamassa (Miranda; Selmo, 2003).

A NBR 15116 (ABNT, 2021) limita o teor de finos <75 μm em <12% para concreto protegido de desgaste superficial e <10% para concreto submetido a desgaste superficial. Miranda (2000) estudou argamassas produzidas com diferentes agregados reciclados (restos de blocos cerâmicos, argamassa e blocos de concreto). No estudo, a argamassa foi dosada levando em consideração o teor total de finos <75 μm e a relação agregado/cimento. O estudo constatou que, independentemente da natureza do agregado reciclado, um teor total de finos <32% de 75 μm tem impacto na fissuração. O valor crítico para fissuração pode depender da distribuição granulométrica da argamassa e a da relação água/cimento, recomenda-se que o teor total de finos não seja superior a 25%.

A adição de partículas finas à argamassa tem influência significativa na sua produção. As partículas finas em grande quantidade também ajudam a aumentar a elasticidade da argamassa, de acordo com Westerholm *et al.* (2008).

Oliveira e Cabral (2011) relatam que a incorporação do agregado reciclado requer maior quantidade de água para atingir a consistência desejada. Pode-se inferir que provavelmente se deva à presença de partículas finas ($<75\ \mu\text{m}$), pois aumenta a superfície e a porosidade do material.

4.2 INFLUÊNCIA DA CURVA GRANULOMÉTRICA

A distribuição granulométrica dos agregados reciclados é um fator crucial para as características das misturas produzidas com eles, como trabalhabilidade, resistência mecânica, consumo de aglomerantes, absorção de água e permeabilidade. O tamanho da partícula do material reciclado varia dependendo do tipo de beneficiamento adotado, além de que a curva granulométrica é uma característica distinta de cada tipo específico de resíduo reciclado (Lima, 1999).

Para Barbosa (2013), a composição granulométrica dos componentes das argamassas pode afetar significativamente sua ductibilidade e resistência mecânica, pois determina a presença ou ausência de vazios entre os grãos, bem como o consumo de cimento e a porosidade resultante. Quando os grãos têm tamanho uniforme, isso pode resultar em um composto altamente poroso. Com a curva granulométrica é possível observar se o tamanho da partícula da amostra atende às especificações, ou se é muito grosso ou muito fino, ou deficiente em determinado tamanho.

A distribuição granulométrica do agregado miúdo afeta o desempenho da argamassa, dificultando a trabalhabilidade e consumindo mais água e ligantes no estado fresco, também contribui para fissuras, rugosidade entre outros (Angelim *et al.*, 2003).

A curva granulométrica fornece informações valiosas sobre a distribuição de partículas em uma amostra de argamassa, o que é essencial para a compreensão da reologia da mistura. A granulometria do agregado miúdo tem impacto direto no desempenho da argamassa. Consequentemente, no seu estado fresco, esta característica afeta a trabalhabilidade e a necessidade de água, bem como aglomerante da mistura. Além disso, no estado endurecido, desempenha um papel no aparecimento de fissuras, rugosidade, permeabilidade e resistência mecânica (Angelim *et al.*, 2003).

Distribuições granulométricas mais amplas, em que há uma variedade de tamanhos de partículas em uma mistura ou material, como no caso da argamassa ou

concreto, facilitam a ocupação dos vazios por partículas menores, aumentando a densidade de empacotamento e, conseqüentemente, reduzindo a quantidade necessária de água para preencher os vazios (Pileggi, 2001).

Os métodos de determinação granulométrica de agregados miúdos utilizados na produção de argamassas e concretos são definidos de acordo com as normas NBR 17054 (ABNT, 2022) e NBR 7211 (ABNT, 2022). Estas normas definem os intervalos de classificação dos agregados miúdo e graúdo, conforme descrito na tabela 2.

Tabela 2 - Limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo

Peneira com abertura de malha (ABNT NBR NM ISO 3310-1)	Porcentagem, em massa, retida acumulada			
	Limites inferiores		Limites superiores	
	Zona utilizável	Zona ótima	Zona ótima	Zona utilizável
9,5 mm	0	0	0	0
6,3 mm	0	0	0	7
4,75 mm	0	0	5	10
2,36 mm	0	10	20	25
1,18 mm	5	20	30	50
600 µm	15	35	55	70
300 µm	50	65	85	95
150 µm	85	90	95	100
NOTAS O módulo de finura da zona ótima varia de 2,20 a 2,90. O módulo de finura da zona utilizável inferior varia de 1,55 a 2,20. O módulo de finura da zona utilizável superior varia de 2,90 a 3,50.				

Fonte: ABNT (2022)

Na análise das características das curvas granulométricas dos agregados miúdos utilizados em formulações de argamassas, na mecânica dos solos, um parâmetro crítico é o coeficiente de uniformidade (CU). Este coeficiente mede a variação relativa nos tamanhos das partículas dentro de uma amostra agregada e é derivado da proporção das aberturas da peneira que facilita a passagem de 60% e 10% da massa particulada através da malha. Os critérios geotécnicos indicam que um valor de CU inferior a 5 significa uma areia altamente uniforme; e para $5 < CU < 15$ a areia possui uniformidade média e para $CU > 15$ a heterogeneidade substancial das areias é menos uniforme (Caputo, 1983).

Entende-se que a homogeneidade da distribuição granulométrica da areia, independentemente da morfologia das partículas, pode afetar negativamente a trabalhabilidade da argamassa. Estas interferências impedem que os grãos de areia deslizem uns em relação aos outros, levando ao aumento de demanda de pasta devido ao endurecimento. Consequentemente, é essencial investigar a uniformidade granulométrica ideal no perfil granulométrico da areia para melhorar o desempenho da argamassa, tendo em vista, que a investigação da granulometria é essencial porque a distribuição dos grãos influencia diretamente a trabalhabilidade da argamassa. Uma granulometria inadequada pode dificultar o deslizamento das partículas, aumentando a necessidade de pasta e, consequentemente, o consumo de água e cimento. Isso impacta a coesão, a resistência e a durabilidade do material. Portanto, determinar a granulometria ideal melhora o desempenho da argamassa, otimizando suas propriedades mecânicas e reológicas (Furnas, 1931).

Silva (2024) estudou a composição entre agregados naturais e reciclados, a fim de obter curvas que se enquadrassem na zona ótima, definida na NBR 7211 (ABNT, 2022). Para as composições analisadas, o autor utilizou os seguintes agregados miúdos: AMNF – Agregado Miúdo Natural Fino, AMNG – Agregado miúdo natural grosso, ARPM – Agregado reciclado primário misto, ARSM1 – Agregado reciclado secundário misto 1, ARSM2 – Agregado reciclado secundário misto 2. Na tabela 3 estão apresentadas as composições entre esses agregados, que atenderam ao critério granulométrico.

Tabela 3 - Composições de agregados miúdos naturais e reciclados utilizados nas produções de argamassas

COMPOSIÇÃO	AGREGADOS	PORCENTAGEM (%)
1	AMNG	50
	ARSM1	50
2	AMNG	70
	ARPLM	30
3	AMNF	50
	ARPLM	50
4	AMNG	50
	ARSM2	50
5	AMNF	60
	ARSM2	40
6	AMNF	50
	ARSM1	50

Fonte: Silva (2024)

Para estas composições, o autor Silva (2024) calculou os valores de coeficiente de uniformidade e verificou que existia uma correlação para as composições que se enquadraram dentro dos limites da zona ótima, as quais apresentaram valores que variaram predominantemente de 4 a 6.

4.3 EMPACOTAMENTO DAS PARTÍCULAS

Os primeiros estudos sobre empacotamento de partículas começaram em 1611, por Kepler, por interesse em diversas disciplinas científicas, estimulando o interesse em diversas áreas da engenharia (Riva, 2010 *apud* Oliveira, 2013).

O empacotamento de partículas é o processo de preencher os vazios disponíveis com outras partículas, isto normalmente é feito pelo preenchimento dos espaços deixados por partículas de maior diâmetro com partículas de menor diâmetro, com os espaços intermediários sendo preenchidos por partículas ainda menores, formando assim um padrão sucessivo (Castro *et al.*, 2009).

Conforme Riva (2010), existem dois tipos extremos de empacotamento de partícula, o primeiro é o monodisperso que ocorre quando as partículas têm todas o mesmo tamanho, o que resulta em uma densidade mínima, pois há mais espaços vazios entre elas; e o segundo é o polidisperso, quando as partículas possuem diferentes tamanhos, permitindo que as menores preencham os espaços entre as maiores, o que aumenta a densidade total do sistema. Os sistemas monodispersos são menos densos, enquanto os polidispersos tendem a ser mais compactos.

É imprescindível destacar que a densidade de empacotamento é a fração do volume total ocupado pelas partículas, sem contar os espaços vazios entre elas. Assim, para encontrar a composição de uma mistura com a maior densidade de empacotamento, deve-se simular diversos traços, o que precisa de muito tempo. Com isso, os modelos de empacotamento são excelentes auxiliares no processo, sendo usados para prever o comportamento das partículas em diferentes arranjos, ajudam a calcular a densidade de empacotamento sem precisar de simulações longas para cada combinação, economizando tempo e tornando o processo mais eficiente (FENNIS *et. al.*, 2012).

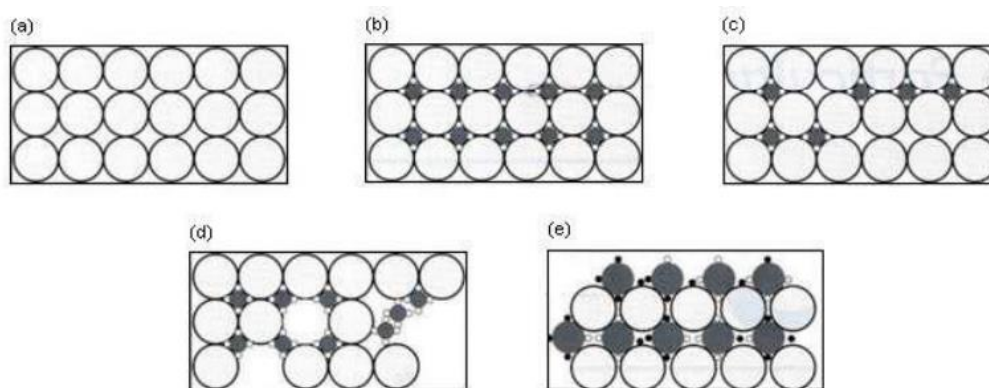
Segundo Melo (2019), são encontradas algumas definições de densidade de empacotamento, admitindo-se que o espaço preenchido pelas partículas não seja

efetivamente ocupado ao serem inseridas em um recipiente, permanecendo alguns espaços vazios entre elas.

Em concordância com os estudos anteriores, a pesquisa de Oliveira *et al.*, (2000) cita além da densidade de empacotamento, outros conceitos para o empacotamento de partículas, entre eles estão a monodispersão, polidispersão, tamanhos discretos, distribuição granulométrica, descontínua, eficiência de empacotamento, fator de empacotamento, porosidade, volume aparente e a densidade relativa de empacotamento. Em seus estudos, os autores reforçaram que no processo de empacotamento de partículas existem duas abordagens básicas, a primeira abordagem é a discreta que considera as partículas individualmente como uma entidade separada e levando em conta as interações entre elas, como colisões ou forças de atração, assim sendo uma abordagem mais detalhada, se concentrando no comportamento e nas características de cada partícula, como sua posição, tamanho e na sua forma. A segunda abordagem é a contínua, na qual as partículas não são tratadas individualmente, mas sim como uma distribuição contínua em um determinado espaço, são partículas muito pequenas e numerosas, de modo que o comportamento coletivo delas pode ser descrito de maneira mais simples, sem a necessidade de tratar cada partícula separadamente; suas propriedades como densidade ou pressão são modeladas em termos de variáveis contínuas, e não discretas (OLIVEIRA *et al.*, 2000).

A figura 14 ilustra alguns efeitos de empacotamento devido à quantidade de partículas e tamanhos.

Figura 14 - Efeitos de empacotamento



Fonte: Oliveira (2013) *apud* Carvalo (2022)

A letra (a) representa a densidade mínima de empacotamento, na qual as partículas estão dispostas de forma mais solta, com muito espaço entre elas. A letra (b) mostra a densidade máxima de empacotamento que é quando as partículas estão organizadas de forma mais compacta, minimizando os espaços vazios entre elas. A letra (c) representa a deficiência de partículas de tamanho menores que é quando há poucas ou nenhuma partícula pequena para preencher os espaços vazios entre as partículas maiores, reduzindo a densidade de empacotamento, deixando mais espaços vazios no material. A letra (d) representa uma deficiência de partículas de tamanho maiores, acontece quando há poucas ou nenhuma partícula grande em um sistema de empacotamento, afetando a forma como as partículas se organizam e impactando a densidade, resistência e estabilidade do material. Por fim, a letra (e) mostra a distribuição inadequada de tamanhos de partículas que ocorre quando os diferentes tamanhos de partículas em uma mistura não estão bem equilibrados, melhor dizendo, a quantidade de partículas pequenas, médias e grandes é desproporcional, o que pode afetar negativamente a eficiência do empacotamento, a resistência do material e outras propriedades importantes (Carvalho, 2022).

Em seus estudos, De Larrard (1999) salienta que “a distribuição granulométrica das partículas, a forma ou morfologia dos grãos e o método de compactação utilizado são os principais fatores que influenciam o empacotamento de partículas”. O empacotamento aprimorado de partícula analisa como essas diferentes partículas podem ser organizadas ou compactadas de maneira mais eficiente.

Com o passar do tempo, diversas teorias e modelos de organização de empacotamento foram criados com intuito de alcançar tais metas e objetivos propostos por diversos autores, incluindo:

- Aperfeiçoamento das curvas granulométricas otimizadas no processo de combinação dos materiais, no qual busca-se obter uma distribuição granulométrica na mistura que se aproxime ao máximo de uma curva ideal, como a proposta no modelo de Andreasen e Andersen (1930);
- Modelos de empacotamento de partículas: Diversos modelos foram desenvolvidos para analisar o empacotamento de partículas, abrangendo desde abordagens analíticas até simulações computacionais; um exemplo é o modelo de suspensão sólida (SSM) proposto por De Larrard e Sedran (1994), que se baseia na geometria dos grupos de partículas para avaliar o arranjo de partículas em uma mistura.

Conforme Melchior (2023), outra categoria de modelos amplamente utilizada envolve os modelos de elementos discretos, nos quais uma distribuição específica de tamanhos é utilizada para gerar uma representação virtual da estrutura de partículas. Esses modelos, desenvolvidos por meio de simulações computacionais, permitem uma avaliação detalhada do empacotamento e interações entre as partículas.

Além disso, destaca-se o ensaio de empacotamento via úmida conforme proposto por Wong e Kwan (2008). Nessa abordagem, a concentração máxima de sólidos é alcançada quando as partículas sólidas atingem a densidade máxima de empacotamento. Esse método experimental se concentra em avaliar o comportamento de partículas em condições úmidas, proporcionando insights valiosos sobre o empacotamento em situações próximas das encontradas na prática.

A metodologia das curvas granulométricas otimizadas é amplamente adotada devido à sua relativa simplicidade, sendo uma das estratégias mais utilizadas para potencializar o adensamento das partículas (Wong; Kwan, 2008).

Segundo Oliveira *et al.* (2000) *apud* Oliveira, (2013), existem duas abordagens para análise de partículas: uma abordagem contínua, que examina partículas com uma distribuição de probabilidade contínua; e uma abordagem discreta, que examina a partícula individualmente.

Existem vários modelos de abordagens contínuas, entre eles são: modelo Andreasen e o modelo Alfred. E para as abordagens discretas podem ser citados: modelo de Furnas e o modelo de Toufar (Oliveira *et al.*, 2000; Oliveira, 2013 *apud* Carvalho, 2022).

4.4 MODELO DE ANDREASEN

O modelo Fuller-Thompson e Andreasen-Andersen foi desenvolvido levando em consideração partículas infinitamente pequenas, pois este modelo não aceita a presença de diâmetro mínimo (Londero *et al.*, 2017). Os autores observaram uma semelhança com uma lei de potência, que afirma que um conjunto de dados representa uma faixa de tamanhos (diâmetros) semelhantes, no entanto, esta suposição nem sempre corresponde à realidade empírica, uma vez que o espectro completo de tamanhos pode não estar incluído no conjunto de dados.

No modelo de Andreasen, as distribuições de tamanho de partículas são modeladas como distribuições contínuas, uma vez que todos os tamanhos podem ser encontrados em distribuições reais de partículas (Londero *et al.*, 2017).

Segundo Oliveira (2013), Andreasen assumiu em seu estudo que para atingir a densidade máxima de empacotamento, as partículas devem ter formas e tamanhos semelhantes em torno de tamanhos diferentes, definido por uma lei de potência, conforme mostrado na equação 1.

$$CPFT = 100 \left(\frac{D_p}{D_L} \right)^q$$

Equação 1

No qual:

CPFT = porcentagem acumulada de partículas finas menores que d_p ;

D_p = diâmetro da partícula avaliada no empacotamento;

D_L = diâmetro da maior partícula;

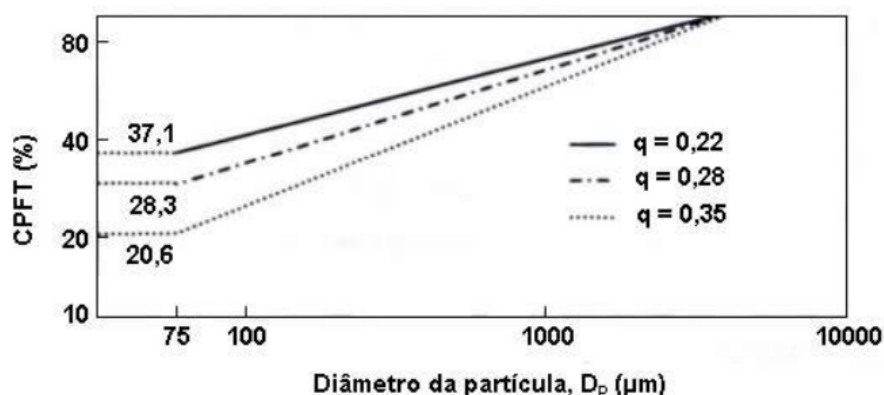
$q = 0,37$ Coeficiente de empacotamento.

O CPFT também chamado de packing factor, representa a eficiência que as partículas estão dispostas em uma determinada configuração, geralmente com relação ao volume que as partículas ocupam em um dado espaço, enquanto o “ q ” é o expoente da lei de potências que caracteriza a distribuição do tamanho das partículas, essa constante “ q ” pode ser ajustada de acordo com o sistema específico ou as características da distribuição das partículas, o D_p é o diâmetro da partícula pequena, representando o tamanho de uma partícula em um sistema heterogêneo, enquanto o D_L é o diâmetro da partícula grande, assim como o D_p , ele descreve o tamanho de outra partícula que faz parte do mesmo sistema, por fim, o CPFT também chamado de packing factor, representa a eficiência que as partículas estão dispostas em uma determinada configuração, geralmente com relação ao volume que as partículas ocupam em um dado espaço (Silvia, 2011).

Neste modelo, o coeficiente $q = 0,37$ proporciona máximo empacotamento teoricamente possível, porém isso só ocorre quando o diâmetro da menor partícula do empacotamento se torna zero, porém na prática não ocorre, desse modo, utiliza o menor diâmetro possível para maximizar o empacotamento e assim trazer dados reais (Stomarior, 2017).

Para otimizar o empacotamento, utiliza-se o menor diâmetro de partícula possível nos estudos de granulometria. Na figura 15 a equação acima é observada graficamente, representando também o modelo de Andeasen para os empacotamentos.

Figura 15 - Modelo de Andeasen: distribuição granulométrica



Fonte: Oliveira *et al.* (2000 apud Oliveira, 2013)

A figura 15 mostra o modelo de Andeasen de distribuição granulométrica, que é uma teoria usada para descrever a distribuição do tamanho das partículas de um material granular, como areia, grãos ou pó (Stomaior, 2017). É um modelo que destaca que as partículas se distribuem em diferentes tamanhos e como isso afeta as propriedades do material, como a sua densidade, a compactação ou a permeabilidade, além de descrever como a proporção de partículas de diferentes tamanhos diminuem à medida que o tamanho das partículas aumenta, assim sendo um modelo que prever a distribuição de tamanhos de um material com base em algumas variáveis, como o diâmetro médio das partículas e o tamanho máximo das partículas (Silvia, 2011).

4.5 MODELO DE FURNAS

Segundo Oliveira (2013), o método de Furnas descreve a distribuição das partículas como discreta, onde partículas menores preenchem os vazios criados pelas maiores, levando ao empacotamento máximo das partículas.

Em 1920, Furnas comparou modelos teóricos e experimentais para estudar o empacotamento de partículas (1929 *apud* Fu; Dekelbab, 2003). O método de Furnas aborda o arranjo de partículas em distribuições de frequência distintas. Proporções de

tamanhos variados de partículas são compactadas em uma configuração de empacotamento máximo. Desta maneira, a teoria de Furnas é aplicável a qualquer mistura polimodal com alguns tamanhos discretos, o que corresponde à distribuição contínua de frequência (Melo, 2019). Aplicando sua teoria para qualquer tamanho de partícula discreta, tem-se a equação 2 (Oliveira, 2013).

$$CPFT = 100 \left(\frac{D_p^{\log r} - D_s^{\log r}}{D_L^{\log r} - D_s^{\log r}} \right) \quad \text{Equação 2}$$

No qual:

$CPFT$ = Percentual acumulado de partículas inferiores a D_p ;

D_p = diâmetro da partícula

D_s = diâmetro da menor partícula;

D_L = diâmetro da maior partícula;

r = relação entre a quantidade de partículas entre duas malhas de peneiras consecutivas.

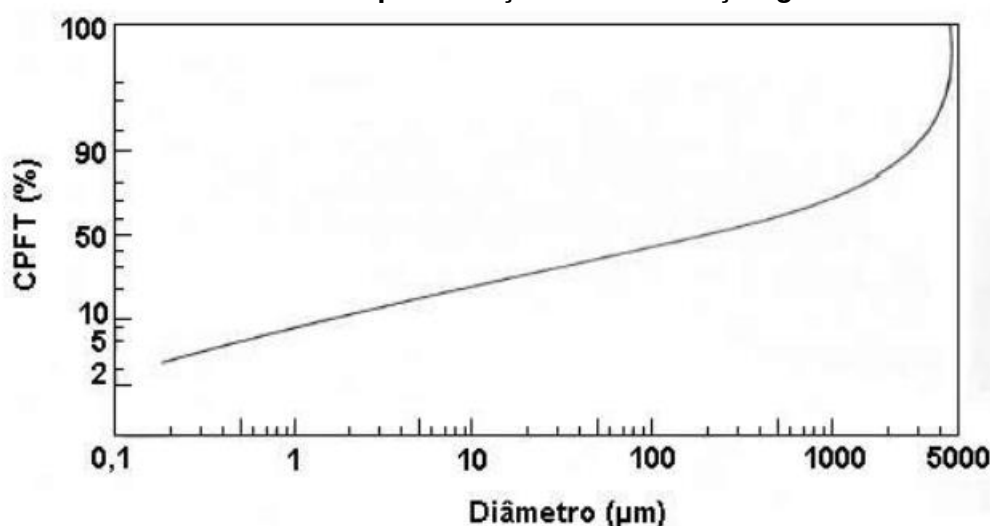
O CPFT chamado também de Custo ou Percentual de Fração de Partículas é o valor que se calcula podendo representar a fração percentual de partículas menores que o diâmetro D_p (ou alguma outra medida relacionada ao tamanho das partículas). O fator 100 é um multiplicador para converter o valor da equação em porcentagem, o D_p é o diâmetro de uma partícula específica no material, pode ser o tamanho de uma partícula em termos de sua posição na distribuição granulométrica, o D_s é o diâmetro mínimo das partículas na amostra, podendo ser o menor diâmetro ou a menor partícula que está sendo considerada, enquanto o D_L é o diâmetro máximo das partículas na amostra, representa o maior tamanho de partícula presente na distribuição. Por fim o $\log r$ é um parâmetro que indica a influência do "logaritmo" sobre os tamanhos das partículas, o valor do r representa a razão entre dois tamanhos de partículas com a razão entre D_L que é o diâmetro máximo e o D_s que é o diâmetro mínimo, então o valor de $\log r$ é usado para ajustar o cálculo de forma que a distribuição dos tamanhos das partículas seja mais proporcional e suavize as

diferenças extremas entre os tamanhos muito pequenos e muito grandes (Silvia, 2011).

Desse modo esse modelo é útil em situações em que quer se entender como a distribuição de partículas varia de forma não-linear, ou seja, a variação não-linear dessa equação ocorre porque usa o logaritmo da razão r para modificar a forma como os tamanhos das partículas são distribuídos, significando assim que a relação entre os diâmetros das partículas não cresce ou diminui de maneira constante, mas sim de forma exponencial ou logarítmica (Stomarior, 2017).

Considerando esta distribuição como empacotamento ideal de partículas, o modelo de Furnas é apresentado graficamente na figura 16.

Figura 16- Modelo de Furnas: apresentação da distribuição granulométrica



Fonte: Watanabe, Ishikawa e Wakamatsu (1989 *apud* Oliveira, 2013)

A figura 16 demonstra o modelo de Furnas através da distribuição granulométrica, que é uma forma de mostrar como os materiais, geralmente agregados ou partículas, estão distribuídos em diferentes tamanhos. O modelo está baseado na ideia de que um material pode ser composto por uma série de partículas de diferentes dimensões, e a distribuição dessas partículas pode afetar as propriedades do material (Stomarior, 2017).

Lopes (2019) realizou uma avaliação concisa dos modelos de Furnas e Andreasen, com foco em suas estruturas, analogias e concorrência matemática. O modelo de Furnas mostra que a soma das partículas finas de diferentes diâmetros forma uma progressão geométrica, já o modelo de Andreasen, quando representado graficamente em escala logarítmica, resulta em uma linha reta, evidenciando uma progressão geométrica. Assim, conclui-se que são modelos que têm uma base

matemática similar que é a progressão geométrica, mas são representados de maneiras diferentes para estudar a distribuição das partículas (Lopes, 2019).

4.6 MODELO DE ALFRED

O modelo de Alfred está relacionado à distribuição granulométrica das partículas, descrevendo a maneira como elas se distribuem em termos de tamanho. Esse modelo propõe que a distribuição do tamanho das partículas em um material segue um padrão específico, geralmente com uma concentração maior de partículas de tamanho médio e uma diminuição progressiva da quantidade de partículas à medida que se afastam desse tamanho médio. O modelo de Alfred é importante, pois permite que se entenda como o material irá se comportar em diferentes processos industriais, como moagem, separação e filtragem, além de influenciar na análise da eficiência e desempenho de materiais particulados (Cury, 2024). O modelo de Alfred é comumente referido como modelo normal, e está expresso na equação 3.

$$CPFT = 100 \left(\frac{D_P^q - D_S^q}{D_L^q - D_S^q} \right) \quad \text{Equação 3}$$

Sendo

CPFT = porcentagem acumula de partículas de finos menores que D_p ;

D_p = diâmetro da partícula avaliada no empacotamento;

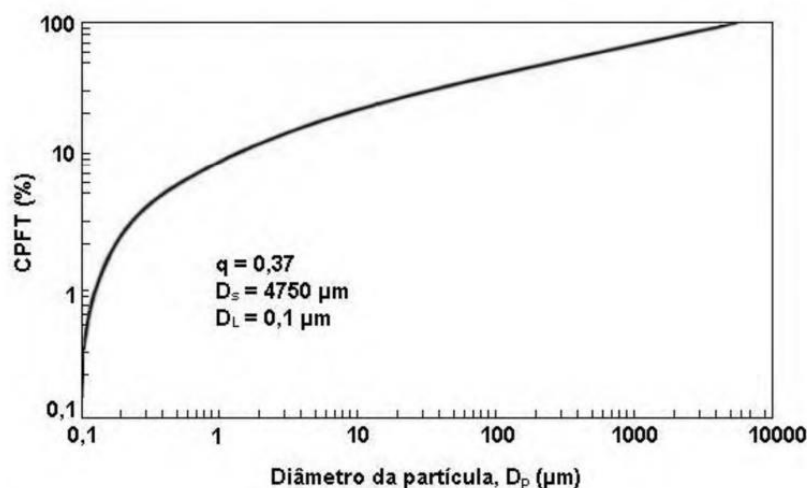
D_s = diâmetro da menor partícula;

D_L = diâmetro da maior partícula;

$q = 0,37$ coeficiente de empacotamento.

Na figura 17 é observado graficamente o modelo de Alfred.

Figura 17 - Modelo de Alfred: distribuição granulométrica das partículas



Fonte: Oliveira *et al.*, (2000 *apud* Oliveira, 2013)

Segundo Oliveira (2013), o modelo de Alfred produz resultados superiores de empacotamento de partículas quando comparado com o modelo de Furnas e o modelo de Andreasen.

A distribuição do tamanho de partículas é essencial na otimização do empacotamento granular das argamassas e concretos. Quando se utiliza a Equação 3, e o valor de q , coeficiente de empacotamento, é igual a 0,37, a fórmula passa a refletir um comportamento específico que pode estar relacionado à elasticidade ou à forma como as variáveis de produção ou desempenho se comportam em relação umas às outras. O coeficiente de empacotamento de 0,37 é uma constante que é usada em modelos para descrever a eficiência de empacotamento ou a relação entre a densidade de materiais, recursos ou produção em determinadas condições, especialmente quando se analisa a transformação ou o uso de espaço ou capacidade de sistemas (Stomarior, 2017).

O q representa o coeficiente granulométrico, ao quantificar a contribuição proporcional de cada fração granulométrica, ou seja, o q geralmente expressa a distribuição dos tamanhos das partículas de um material ou substância, indicando a uniformidade ou a variabilidade da distribuição granulométrica. Um valor de q menor pode indicar uma distribuição mais uniforme, tendo partículas mais próximas em tamanho, enquanto um valor de q maior pode sugerir uma distribuição mais heterogênea, com variações maiores no tamanho das partículas (Silvia, 2011).

Assim, quando se diz que o coeficiente granulométrico quantifica a contribuição proporcional de cada fração granulométrica, está se falando de como o q mede a

participação relativa de diferentes tamanhos de partículas dentro de um material. Esse coeficiente é importante para analisar a distribuição de tamanhos e para entender como cada fração afeta as propriedades do material, como a compactação, permeabilidade, resistência, entre outras (Silvia, 2011).

Como é notório, neste modelo, as partículas são presumidas esféricas. Exigir uma alta eficiência de empacotamento de um sistema de partículas não esféricas, com valores de q entre 0,30 e 0,50, torna-se praticamente inviável, uma vez que a compactação das distribuições formadas com partículas de formatos irregulares é influenciada (Melo, 2019).

Os autores Brouwers e Radix (2005a) e Hunger e Brouwers (2006) recomendam o valor de “ q ” entre 0,22 e 0,25 para concreto autoadensável, porém, neste estudo as misturas produzidas não são para essa finalidade, então o valor de q menor se justifica pelo material ter partículas mais finas já que o RCD já passou por um processo de britagem, gerando partículas mais finas. Segundo Hermann (2016), para faixas granulométricas de partículas finas, os valores próximos a 0,20 com coeficiente de empacotamento de partículas proporcionam maior fluidez e favorecem a surgimento do comportamento pseudoplástico, independente de presença ou ausência de tixotropia.

Conforme Vanderlei, (2004) valores de coeficiente de distribuição inferiores a q 0,37 indicam uma distribuição granulométrica menos eficiente, em comparação com o empacotamento teórico máximo, o que pode levar à presença de maior índice de vazios e, eventualmente, a prejuízos na resistência mecânica do concreto. Esta situação também pode ser observada em misturas com alta proporção de partículas finas, conforme relatado por Ordeñez (2015).

Alguns autores como Lopes (2019) e Melo (2019) utilizaram a teoria de empacotamento dos grãos dos agregados utilizando a técnica de Alfred para organizar partículas, pois com esse método os materiais podem alcançar maior compactação e homogeneidade. É evidente que este método otimiza a distribuição granulométrica das partículas, levando a melhorias nas propriedades mecânicas e físicas dos compósitos. Ao ajustar as interações entre partículas e reduzir os espaços vazios, esta abordagem contribui para um melhor desempenho geral e durabilidade das formulações.

5. MATERIAIS E MÉTODOS

A presente investigação científica foi integralmente conduzida no Laboratório de Estruturas e Materiais (LEMA) da Universidade Federal de Alagoas (UFAL), seguindo rigorosamente as diretrizes estabelecidas pelas normas técnicas pertinentes. O escopo primordial reside na análise da influência da incorporação de agregados miúdos reciclados (RCD) na produção de argamassas estruturais, visando, na finalização do trabalho, avaliar seu potencial para a elaboração de concretos estruturais.

Em relação à natureza da pesquisa, as definições apresentadas por Gil (2010), permitem categorizá-la como descritiva, uma vez que seu propósito é descrever as particularidades do universo investigado. Ademais, ela também se caracteriza como explanatória, buscando proporcionar maior conhecimento sobre o objeto de estudo ou problema em questão, e de caráter experimental, dada a manipulação de variáveis para observar seus efeitos. Finalmente, é considerada bibliográfica, pois se baseia em material já publicado, principalmente em artigos de periódicos e livros. Além de tudo isso, o trabalho tem um caráter essencialmente experimental, baseado na análise de resultados obtidos a partir de uma sequência de experimentos decorrentes das variáveis definidas e dos comportamentos observados nas misturas produzidas. O delineamento sequencial das etapas experimentais encontra-se explicitado no fluxograma apresentado na figura 18.

Conforme o fluxograma apresentado na figura 18, os agregados reciclados utilizados foram submetidos a um processo de caracterização e otimização granulométrica, baseado no modelo de empacotamento de Alfred, seguido da produção das argamassas com finalidade estrutural, as quais passaram por uma caracterização abrangente, através de ensaios tanto no estado fresco quanto no estado endurecido.

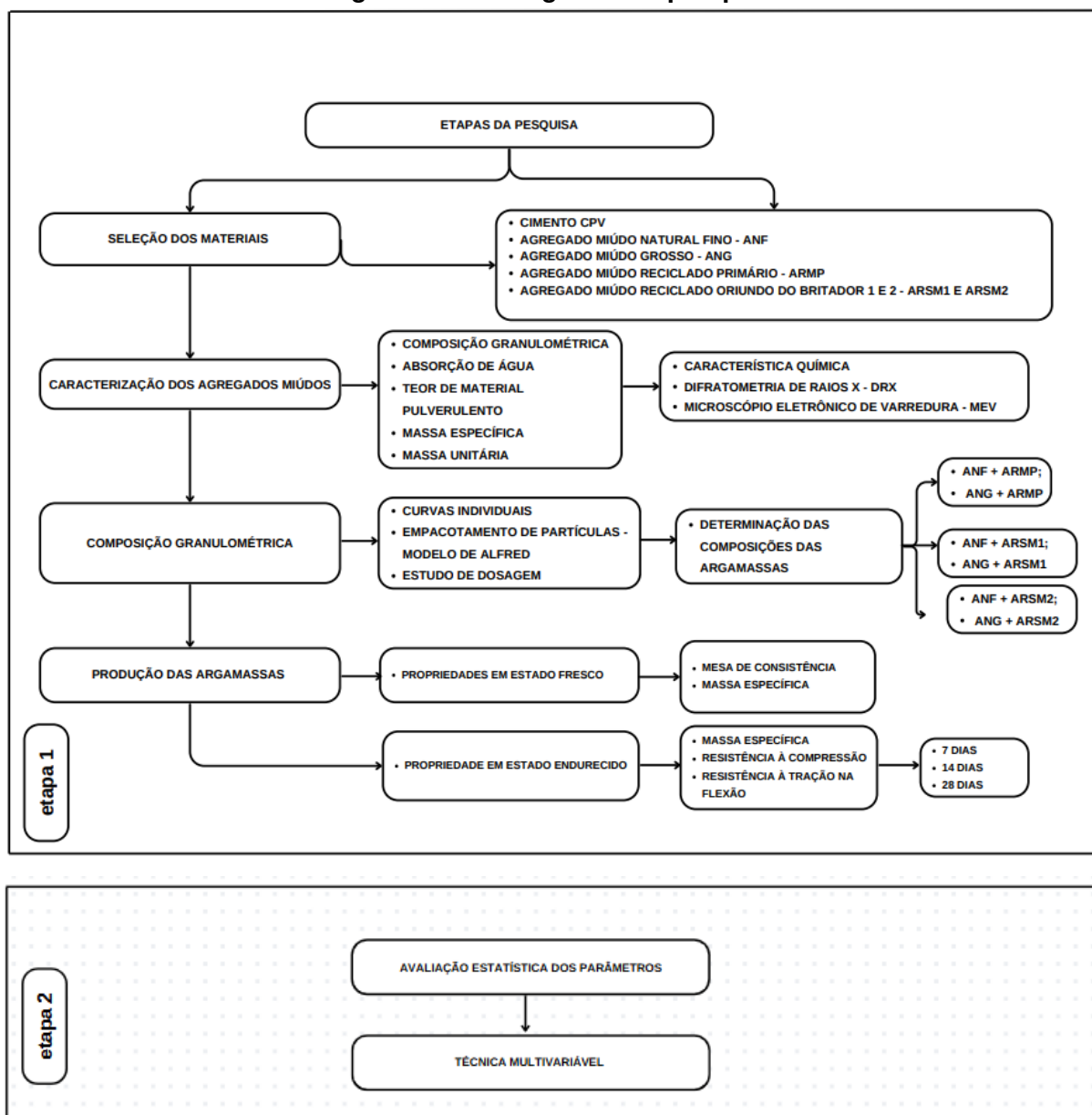
As composições dos agregados estão em consonância com a metodologia empregada por Silva (2024), cujas composições foram detalhadas na revisão bibliográfica deste trabalho (item 4.2). além das composições já estudadas pelo autor, foram incorporadas novas composições com teores de substituição de agregados naturais por reciclados em 25% e 75%, ampliando o escopo comparativo da investigação.

Como referência para alcançar o objetivo do trabalho, buscou-se identificar se as argamassas obtidas atingiriam uma resistência à compressão mínima de 20 MPa aos 28 dias, que caracteriza uma argamassa estrutural, conforme apresentado na literatura (Parente *et al.*, 2023).

Dessa forma, o estudo não se limita à caracterização da argamassa, mas propõe uma aplicação prática desses materiais como um dos constituintes do concreto. Assim, após a conclusão dos ensaios nas diferentes formulações de argamassa, foram selecionadas algumas misturas que demonstrarem o desempenho mecânico requerido, para a produção de concretos.

É importante ressaltar que, a formulação dos concretos seguiu os mesmos princípios de otimização do empacotamento de partículas adotados no desenvolvimento das argamassas. Os concretos resultantes foram então submetidos a ensaios de resistência à compressão, seguindo as diretrizes estabelecidas pela NBR 5739 (ABNT, 2018). A análise comparativa dos valores de resistência obtidos para os concretos e para as respectivas argamassas iniciais permite avaliar a efetividade com que as propriedades mecânicas da argamassa se manifestam no concreto final, validando o potencial da utilização de agregados reciclados, mediados pela argamassa, em aplicações estruturais de concreto.

Figura 18 - Fluxograma da pesquisa



Fonte: Autora (2025)

As variáveis para cada etapa são estabelecidas sequencialmente. As variáveis que serviram como referência para o desenvolvimento deste estudo foram:

Variáveis Fixas:

- **Composição do Traço:** para a produção das argamassas neste estudo, adotou-se uma composição de 1:2:0,5 (cimento: agregado: água), em massa. Essa escolha foi deliberadamente baseada na metodologia empregada por Silva (2024) em seu trabalho. Dessa forma, a adoção do mesmo traço permite estabelecer uma comparabilidade direta entre os resultados obtidos na presente pesquisa com os

achados de Silva (2024), facilitando a análise da influência da substituição do agregado natural pelo agregado reciclado nas propriedades da argamassa.

Variáveis independentes:

- Teor de agregado reciclado em substituição ao agregado natural: os percentuais de substituição do AN por AR foram definidos em quatro níveis: 25%, 50%, 75% e 100%. A variação nesses teores permite avaliar a influência progressiva da incorporação do agregado reciclado nas propriedades da argamassa.

Relação a/c: foram produzidas argamassas com agregados naturais e agregados reciclados com relação a/c fixada em 0,5.

- Idade de cura: As propriedades das argamassas no estado endurecido foram avaliadas em três diferentes idades de cura: 7, 14 e 28 dias de idade. Assim é possível analisar a evolução das propriedades da argamassa ao longo do tempo, influenciada pela incorporação do agregado reciclado.

Variáveis dependentes:

- Consistência: embora não tendo fixado, ela provavelmente variará com a incorporação do agregado reciclado e precisará ser avaliada para garantir a trabalhabilidade das misturas e para correlacionar com as outras propriedades.

- Propriedades: o comportamento das misturas correlaciona-se diretamente a fatores tais como ajuste da relação a/c, o teor de agregado reciclado adotado e a idade em que o ensaio foi executado, mantendo a composição do traço fixa.

5.1 SELEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

5.1.1 CIMENTO

No desenvolvimento deste estudo, foi utilizado o cimento CP V ARI como aglomerante, tendo sido escolhido devido à sua performance. Essa característica é interessante tendo em vista que as misturas incorporam o uso de agregados reciclados, os quais tendem a reduzir a resistência mecânicas das composições. O CP V ARI, por apresentar um alto desempenho, torna-se essencial para mitigar esse potencial redução e garantir os níveis de resistência desejados para a argamassa.

O CP V ARI possui características químicas e físicas específicas, rigorosamente atendidas pelas normas técnicas, que contribuem diretamente para

essa performance superior. Esses atributos asseguram a qualidade e desempenho adequados do cimento na composição da argamassa, sendo a alta resistência mecânica uma das principais vantagens proporcionadas por esse tipo de aglomerante. No quadro 6 são apresentadas as informações relacionadas às propriedades químicas do cimento, como teor de óxido de cálcio (CaO), trióxido de enxofre (SO₃) e óxido de magnésio (MgO), as quais influenciam nas reações de hidratação e, conseqüentemente, no desenvolvimento da resistência, o quadro 6 apresenta as características químicas do cimento.

Quadro 6 - Características químicas do cimento utilizado

Ensaio	Período	12/04/2023	02/05/2023	Limites NBR 16697 (ABNT,2018b)
		28/04/2023	31/05/2023	
ANÁLISE QUÍMICA (%)				
PF 950°C	NBR NM 18 (ABNT, 2012)	5,09	4,81	≤ 6,5
SO ₃	NBR 14656 (ABNT, 2001)	4,00	4,15	≤ 4,5
CaO		60,40	60,30	
MgO		2,47	2,67	

Fonte: Adaptada CSN Cimentos (2023)

Já no quadro 7, são apresentadas as características físicas e mecânicas do cimento, conforme as normas específicas, que são características fundamentais para determinar a trabalhabilidade da argamassa e sua capacidade de suportar as cargas estruturais

Quadro 7 - Características físicas e mecânicas do cimento utilizado

Ensaio	Período	12/04/2023	02/05/2023	Limites NBR 16697 (ABNT, 2018b)
		28/04/2023	31/04/2023	
ENSAIOS FÍSICOS E MECÂNICOS				
Blaine (cm ² /g)	NBR NM 76 (ABNT, 1998)	4817	4859	-
#200 (%)	NBR 11579 (ABNT, 2012)	3,80	3,60	≤ 6
Início de pega (min)	NBR NM 65 (ABNT, 2003)	150,00	141,00	≥ 60
Água de Consistência (%)	NBR NM 43 (ABNT, 2003)	29,6	30,1	-
Massa Específica (kg/m ³)	NBR NM 23 (ABNT, 2001)	3040		-
Massa Unitária (kg/m ³)		1070		-

Fonte: Adaptada CSN Cimentos (2023)

A tabela 4 apresenta a resistência à compressão (MPa) requerida para o cimento CP V ARI.

Tabela 4 - Resistência à Compressão do cimento utilizado

Ensaio	Período	12/04/2023	02/05/2023	Limites NBR 16697 (ABNT, 2018b)
		28/04/2023	31/05/2023	
RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa)				
Resis. Comp 1 D	NBR 7215 (ABNT, 2019)	24,80	25,10	≥ 14,00
Resis. Comp 3 D	NBR 7215 (ABNT, 2019)	35,50	35,00	≥ 24,00
Resis. Comp 7 D	NBR 7215 (ABNT, 2019)	40,10	40,00	≥ 34,00
Resis. Comp. 28 D	NBR 7215 (ABNT, 2019)	48,60	48,70	-

Fonte: Adaptada CSN Cimentos (2023)

5.1.2 AGREGADOS MIÚDOS

No presente trabalho foram utilizados cinco agregados miúdos, categorizados em dois agregados naturais e três agregados reciclados de resíduo de demolição, sendo os mesmos utilizados por Silva (2023).

Os agregados naturais com granularidade de areia fina e areia grossa, foram provenientes de rio, localizado em Alagoas. Os agregados reciclados foram provenientes do beneficiamento de resíduos de demolição de edificações na cidade de Maceió, Alagoas.

Foram realizados ensaios de caracterização dos agregados com o objetivo de avaliar suas propriedades físicas. Os ensaios de caracterização dos agregados foram conduzidos conforme as normas técnicas vigentes, garantindo a confiabilidade e padronização dos resultados obtidos.

Foram realizadas análises granulométricas para determinar a distribuição do tamanho das partículas dos agregados, bem como ensaios de massa específica e massa unitária.

5.1.3 BENEFICIAMENTO DE RESÍDUOS DE DEMOLIÇÃO PARA OBTENÇÃO DOS AGREGADOS RECICLADOS

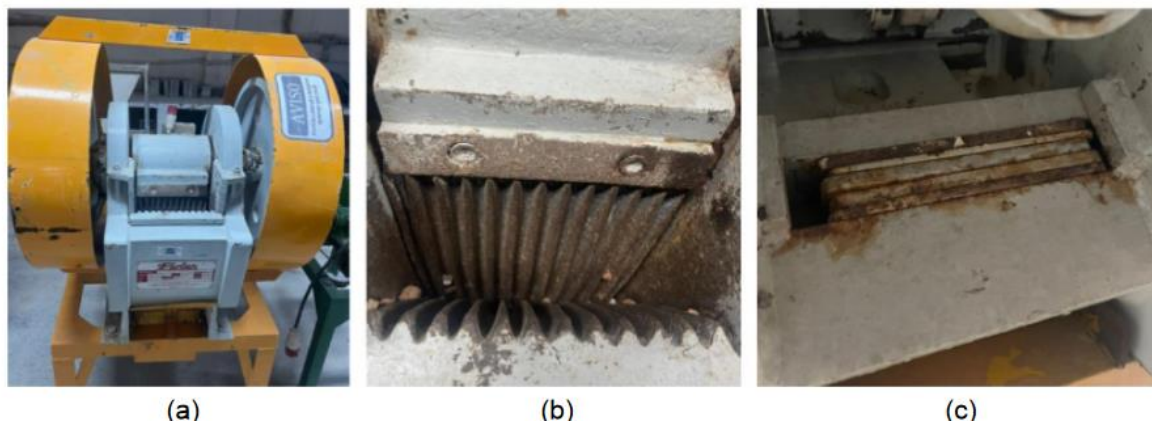
Em princípio, o material extraído após passar por uma britagem primária no canteiro passou por um processo de triagem para segregar resíduos não recicláveis, como madeira, metal, papel e plástico. Após esse processo, o material gerado - agregado reciclado primário (ARP), foi peneirado para categorizar as frações miúda – ARPM (abaixo de 4,75 mm) e graúda – ARPG (acima de 4,75 mm e abaixo de 25 mm). Dessa forma, obteve-se o primeiro tipo de agregado miúdo reciclado utilizado no presente trabalho.

Posteriormente, foram realizados dois procedimentos adicionais de britagem com ARPG, utilizando britadores de mandíbulas de diferentes portes. Um desses britadores, apresentado na figura 19, possui pequeno porte para escala de laboratório. Sua abertura é ajustável para modificar a distribuição granulométrica do material, isso é feito através da inserção de placas de aço, conforme ilustrado na figura 19c. Quanto maior a quantidade de placas, menor a abertura das mandíbulas, como pode ser visto

na figura 19b. Após alguns testes, a abertura definida foi de 3,3 cm, a qual permitiu maior produção de agregado miúdo.

O agregado reciclado oriundo nesse processo de britagem está denominado por ARSM1, constituindo-se o segundo tipo de agregado miúdo reciclado utilizado.

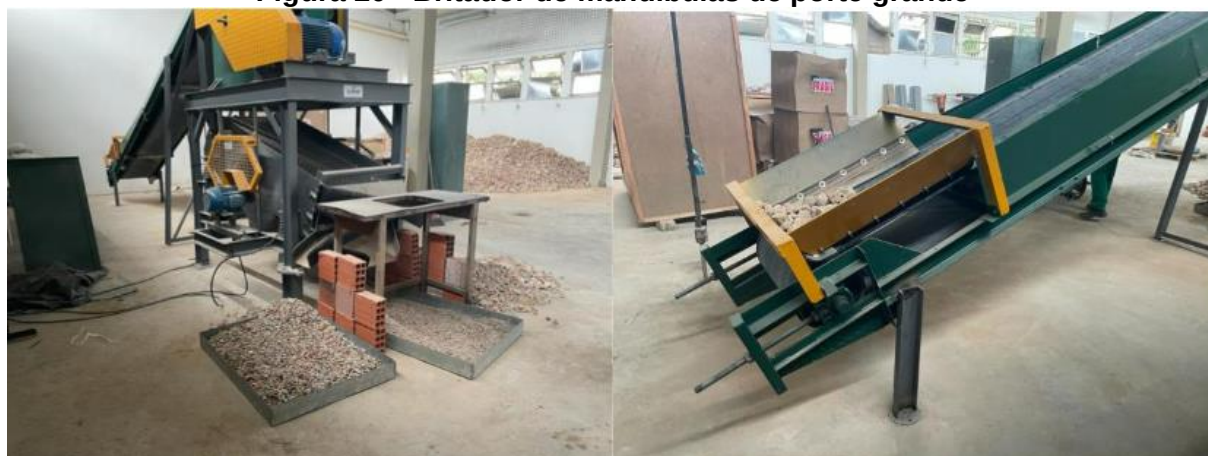
Figura 19 - Processo de britagem: (a) britador de mandíbulas, (b) abertura e (c) placas



Fonte: Autora (2025)

O segundo britador de mandíbulas utilizado consistiu em equipamento de grande porte, para escala industrial, o qual é acoplado à uma peneira vibratória com malhas de 6 mm, 12 mm e 24 mm, conforme figura 20. Dessa forma, utilizou-se a menor fração gerada pelo equipamento, que constitui um agregado miúdo aqui chamado de ARSM2, sendo este o terceiro agregado miúdo reciclado utilizado.

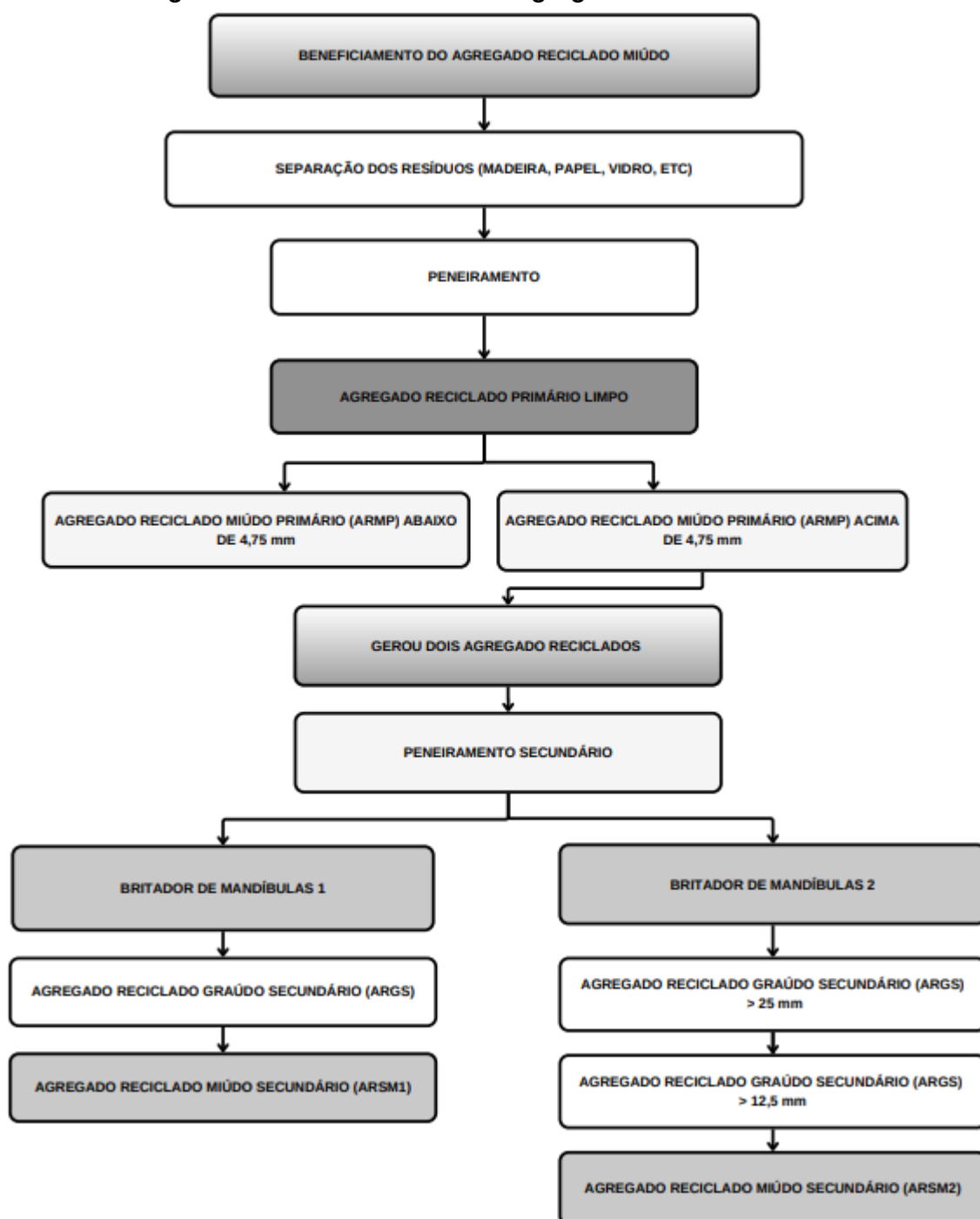
Figura 20 - Britador de mandíbulas de porte grande



Fonte: Autora (2025)

No fluxograma na figura 21 tem-se o resumo dos processos de beneficiamento e obtenção dos agregados reciclados, sendo destacados os três agregados reciclados que foram utilizados no presente trabalho.

Figura 21 - Beneficiamento do agregado reciclado miúdo



Fonte: Autora (2025)

O quadro 8 descreve os materiais com a nomenclatura designada seguindo a mesma nomenclatura do estudo de Silva (2024).

Quadro 8 - Agregados miúdos utilizados

NATURAIS	ANF
	ANG
RECICLADOS	ARMP
	ARMS1
	ARMS2

Fonte: Silva (2025)

As siglas apresentadas referem-se aos seguintes materiais:

- Agregado reciclado miúdo primário: ARMP;
- Agregado reciclado miúdo secundário oriundo do britador 1 – ARMS1;
- Agregado reciclado miúdo secundário oriundo do britador 2 – ARMS2;
- Agregado miúdo natural fino – ANF;
- Agregado miúdo natural grossa – ANG.

5.1.4 DETERMINAÇÃO GRANULOMÉTRICA

A NBR 17054 (ABNT, 2022) especifica a metodologia para determinação da composição granulométrica dos agregados miúdos e graúdos. Este procedimento envolve principalmente a peneiração mecânica ou manual dos agregados, utilizando malhas padronizadas, permitindo a quantificação, entre diversas variáveis, da proporção retida em cada malha. A quadro 9 apresenta os tamanhos de abertura das peneiras de malha padrão descritas na NBR 7211 (ABNT, 2022), essenciais para a realização da avaliação da granulometria dos agregados.

Para a realização do ensaio, foram utilizadas duas amostras de agregado, cada uma pesando em torno de 500 g, submetidas à secagem em estufa a 105 ± 5 °C antes das avaliações. O quadro 9 mostra a abertura de malha das peneiras da Série Normal.

Quadro 9 - Abertura de malha das peneiras da Série Normal

SÉRIE NORMAL
4,75 mm
2,36 mm
1,18 mm
600 μm
300 μm
150 μm

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 17054/2022

A caracterização granulométrica é importante tanto para que se conheça a distribuição das frações dos materiais, como serão úteis para os estudos posteriores referentes à determinação das composições granulométricas otimizadas entre os agregados miúdos naturais e reciclados.

Após a obtenção das curvas granulométricas foram realizadas análises para a verificação do atendimento às zonas especificadas pela NBR 7211 (ABNT, 2022) para a produção de argamassas e concretos.

Foram realizadas análises granulométricas para determinar a distribuição do tamanho das partículas dos agregados, bem como ensaios de massa específica e massa unitária.

5.1.5 MASSA ESPECÍFICA

A massa específica dos agregados foi executada seguindo as orientações da NBR 16916 (ANBT, 2021), que estabelece o método de determinação da massa específica e da massa específica aparente dos agregados miúdos utilizados para a produção das argamassas em estudo. Para cada composição de argamassas foram realizadas 3 repetições de ensaio.

5.1.6 ABSORÇÃO DE ÁGUA

A absorção de água foi determinada nos agregados miúdos (natural e reciclados) conforme a norma NBR 16916 (ABNT, 2021), sendo calculada mediante a equação 4.

$$AbS = \frac{m_B - m_A}{m_A} \times 100$$

Equação 4

Onde:

Abs = absorção de água, em unidade porcentual (%);

m_A = massa da amostra seca em estufa (105 ± 5) °C, em unidade de massa em grama;

m_B = massa da amostra saturada superfície seca, em grama (g).

5.1.7 MASSA UNITÁRIA

A massa unitária dos agregados foi realizada conforme prescrito pela NBR 16972 (ABNT, 2021). Esta norma descreve o método para determinar a densidade aparente e o índice de vazios de agregados miúdos, seja em estado compactado e em estado solto.

No presente trabalho, foram utilizadas duas técnicas: o método A (estado compactado) e método C (estado solto), podendo-se avaliar o potencial de compactação dos agregados, identificando aqueles que apresentam maior ganho de volume após a compactação, o que influencia diretamente as propriedades tecnológicas do concreto e argamassa, como trabalhabilidade e resistência.

Foram realizadas três repetições para o mesmo material em cada método, a fim de que fosse realizada a coleta dos dados necessários para calcular a massa unitária. Na figura 22 pode-se visualizar a realização dos ensaios.

Figura 22 - Recipiente vazio (a) recipiente cheio (b)



Fonte: Autora (2025)

A Equação (5) foi utilizada para o cálculo.

$$\rho_{ap} = \frac{m_{ar} - m_r}{V}$$

Equação 5

Onde:

ρ_{ap} é a densidade do agregado, expressa em quilograma por metro cúbico (Kg/m³);

m_{ar} é o peso do recipiente com o agregado, expresso em quilograma (Kg);

m_r é o peso do recipiente vazio, expresso em quilograma (Kg);

m_r é a massa do recipiente vazio, expressa em quilograma (kg);

V é o volume do recipiente, expresso em metro cúbico (m³).

5.1.8 MATERIAL PULVERULENTO

Para a determinação da quantidade de materiais pulverulentos nos agregados miúdos reciclados e naturais, foi necessário seguir os procedimentos descritos na NBR 16973 (ABNT, 2021). A importância desse ensaio é avaliar a quantidade de materiais pulverulentos, que pode afetar as propriedades das argamassas e concretos produzidos com esses agregados. Foram feitas duas determinações para cada agregado.

O cálculo da massa do material que passa pela peneira com abertura de malha 75 µm, por lavagem, é realizado pela equação 6.

$$m = \frac{m_i - m_f}{m_i} \times 100$$

Equação 6

Onde:

m é a quantidade de material mais fino que a peneira de 75 μm , por lavagem, expressa em porcentagem (%);

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

m_f é a massa da amostra seca após a lavagem, expressa em gramas (g).

5.1.9 DETERMINAÇÃO DE IMPUREZA ORGÂNICA

Esse ensaio visa identificar a presença de substâncias orgânicas nocivas nos agregados, que podem afetar negativamente a hidratação e o endurecimento do cimento.

O procedimento consiste em submeter uma amostra do agregado miúdo a um teste com solução de hidróxido de sódio. A presença de impurezas orgânicas é indicada pela coloração da solução, que pode variar de incolor a marrom escuro, dependendo da quantidade de impurezas presentes.

Esse ensaio é fundamental para garantir a qualidade dos agregados utilizados na produção de argamassas e concretos, uma vez que a presença de impurezas orgânicas pode comprometer o desempenho e a durabilidade desses materiais.

5.1.10 TÉCNICA DE DIFRATOMETRIA DE RAIOS X

Foi realizado o ensaio de DRX em todos os agregados miúdos (natural e reciclados) com finalidade de investigar a estrutura cristalográfica dos materiais através da análise dos padrões de espalhamento de raios X gerados pelo arranjo atômico dentro de uma amostra. Para a realização do ensaio foi utilizado o difratômetro de raios-X XRD 6000, Shimadzu, com tensão de 40Kv e corrente de 30 mA. Foi utilizado para obter padrões de difração variando o ângulo de difração 2θ na faixa de 10 a 70°, com passo de 0,02° e ângulo angular velocidade de 2 graus/min. As fendas de divergência e dispersão utilizadas foram de 1° e 0,30 mm, utilizando radiação CuK α .

5.1.11 TÉCNICA DE MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

Para avaliar o formato e a textura das partículas dos agregados, amostras dos agregados miúdos (natural e AR) foram estudadas por MEV. Foram utilizados um microscópio eletrônico de varredura – MEV e uma platina antivibratória Shimadzu (Modelo Superscan SSX-550) com corrente de 10 MA. As amostras foram metalizadas com partículas de ouro usando Sanya Electron Quinck Coater modelo SC-701 por 6 minutos (10 MA).

Para o experimento, selecionou-se a fração do material retida na peneira de 0,15 mm, de modo a acomodar os grãos no mensurador padrão do MEV com diâmetro aproximadamente de 1 cm.

Por meio desta metodologia, pretendeu-se quantificar parâmetros morfológicos dos agregados como forma, textura, área, perímetro e diâmetro equivalente, que permitiriam inferir sobre o comportamento reológico das argamassas produzidas. Estimou-se que tais atributos, extraídos de micrografias MEV em alta resolução, propiciariam uma análise granulométrica mais detalhada do que a mera utilização de peneiras, fundamentais para a otimização da granulometria proposta.

5.2 ESTUDO DE COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA DOS AGREGADOS

Conforme citado no item 5.1.3, Silva (2024) realizou estudo de composição granulométrica de agregados miúdos naturais e reciclados, sendo os mesmos agregados que foram utilizados no presente trabalho. O autor identificou as composições granulométricas que atendiam ao critério da zona ótima de utilização, prevista da NBR 7211 (ABNT, 2009), e verificou as propriedades de argamassas produzidas com essas composições.

O presente trabalho instituiu um aprofundamento dos estudos de Silva (2024), onde se realizou análise individual das porcentagens retidas de cada agregado, com vistas a identificar os intervalos granulométricos que requerem ajuste para tornar as distribuições mais contínuas, fundamentais à otimização da mistura proposta.

Esta estratégia justifica-se pela necessidade de composições que propiciem melhor empacotamento dos agregados a interação entre si, maximizando a ligação aos grãos e proporcionando maior resistência mecânica às argamassas. A continuidade granulométrica, com presença homogênea de partículas em toda a faixa

dimensional, propicia ao longo do tempo maior estabilidade dimensional e propriedades superiores, ao passo que distribuições descontínuas conduzem a fenômenos de segregação e, por consequência, perda de qualidade do material.

Posteriormente, implementou-se a metodologia de Alfred, utilizando-se o software Emma para formulação de materiais cimentícios, para possibilitar a análise, otimização e escolha das proporções ideais de cada componente (agregados miúdos naturais, reciclados, cimento e água) para a composição final da argamassa.

Esta etapa visa assegurar o mínimo desperdício e massa de materiais, equilíbrio na granulometria, trabalhabilidade adequada e resistência mecânica almejadas para aplicação estrutural. A otimização numérica das doses de cada constituinte respaldou cientificamente a composição escolhida, fundamentando os resultados obtidos.

5.2.1 AVALIAÇÃO DAS ARGAMASSAS PELO MÉTODO DE EMPACOTAMENTO (ANDREASEN-ANDERSEN)

As argamassas produzidas no estudo foram avaliadas com base em seu empacotamento de partículas e composição granulométrica. Inicialmente foi realizada a caracterização dos agregados quanto à sua massa específica e granulometria, obtendo-se o diâmetro máximo de 4,75 mm e diâmetro mínimo de 150 μm . Com esse propósito, o modelo de empacotamento de partículas (Andreasen-Andersen) modificado, conhecido como modelo de Alfred, foi aplicado.

Aplicou-se o modelo de Alfred, utilizando-se o Software EMMA – Elkem Materials Mix Analyzer para a dosagem da argamassa, e empregado uma planilha do Microsoft Excel. Os coeficientes de distribuição de partículas (q) foram estabelecidos para cada mistura de argamassa produzida conforme o modelo de empacotamento de Alfred. A escolha desse modelo foi baseada em sua capacidade de estabelecer limites para os tamanhos mínimos e máximos de partículas. Esse método possibilita obter misturas com maior densidade de partículas e menor porosidade (Grazia *et al.*, 2019).

As argamassas foram formuladas com diferentes composições granulométricas de agregados, mantendo-se fixo o aglomerante. Dessa forma, foram usados agregados miúdo natural e agregado miúdo reciclado de construção e demolição. A análise granulométrica demonstrou que as argamassas produzidas apresentavam

características de empacotamento de partículas distintas na aplicação do modelo de Aldred. Os resultados das análises granulométricas foram representados graficamente por meio de curvas granulométricas, tanto experimentais quanto teóricas, representando as porcentagens passantes em relação aos diâmetros de partículas, em escala logarítmica.

Essas curvas possibilitaram a geração simultânea de um ajuste experimental no programa Excel, desencadeando a elaboração de uma curva teórica por meio da aplicação do modelo matemático de Alfred. Através de um processo iterativo de otimização, foi viável determinar o coeficiente de distribuição (q), de modo a maximizar o coeficiente de correlação R^2 entre a curva granulométrica experimental e a curva granulométrica teórica proposta pelo modelo de Alfred. Assim, o programa Excel possibilita a comparação visual entre a distribuição experimental e a curva prevista pelo modelo utilizado, promovendo uma análise gráfica comparativa de alta precisão.

Foram observados que os parâmetros do modelo de Alfred modificado se ajustaram adequadamente aos dados experimentais, especialmente com o aumento da percentagem de partículas menores na fração granulométrica das argamassas. Os valores de q foram estabelecidos para todas as composições de argamassas em 0,25, mantendo-se inalterados.

Essa abordagem teórica e computacional permitiu uma otimização da composição granulométrica dos agregados, visando alcançar uma maior compacidade e, conseqüentemente, melhores propriedades físicas e mecânicas das argamassas produzidas.

5.2.2 PRODUÇÃO DAS ARGAMASSAS

A escolha do traço utilizado neste trabalho foi baseada nos estudos realizados pelo autor Silva (2024), que utilizou o mesmo traço e algumas composições em seu trabalho. Foi verificado o desempenho das argamassas tanto no seu estado fresco quanto no estado endurecido, demonstrando que a incorporação de agregados reciclados pode representar uma boa alternativa para substituição parcial dos agregados naturais, porém requer alguns ajustes em termos de parâmetros de dosagem e composição granulométrica. A tabela 5 mostra o traço produzido e a porcentagem de cada agregado.

Tabela 5 - Traços em massa (cimento:areia+resíduo:água)

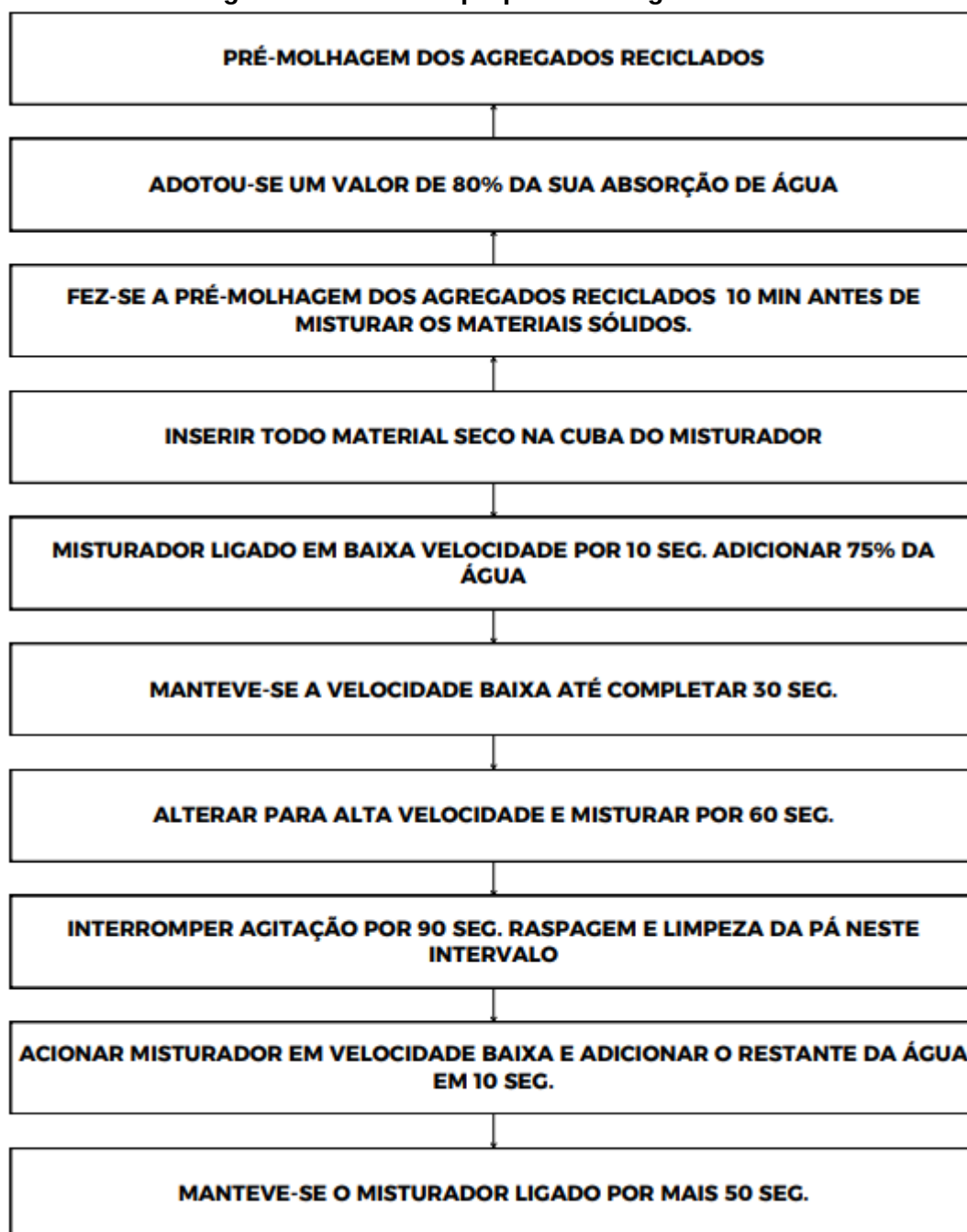
Traço		Consumos (kg/m ³)			
		Cimento	Areia	Resíduo	Água
T1	1:2:0,5	612	612	612	306
T2	1:2:0,5	613	858	368	307
T3	1:2:0,5	601	601	601	300
T4	1:2:0,5	585	585	585	293
T5	1:2:0,5	590	708	472	295
T6	1:2:0,5	574	574	574	287

Fonte: Autora (2025)

Para a produção de argamassas com agregado reciclado de resíduos da construção e demolição (RCD), foi necessário primeiramente realizar a pré-molhagem para obter melhor resultado. Conforme estabelecido na metodologia descrita pela NBR 15116 (ABNT, 2021), a técnica de mistura dos agregados reciclados com os constituintes sólidos da mistura deve ser realizada de acordo com o mesmo padrão. Os agregados reciclados passaram por uma pré-molhagem de 10 minutos. Durante esse processo, toda a água destinada à pré-molhagem, fixada em 50% da água de absorção, é introduzida no recipiente que contém o agregado, em seguida, faz-se a mistura completa para garantir a uniformidade dos agregados.

A pré-molhagem para os agregados reciclados ajuda a reduzir a alta absorção de água dos RCD, tornando a mistura mais trabalhável. A NBR 16541 (ABNT, 2016) descreve um modo de preparo de mistura voltado para agregados convencionais e não contempla as particularidades do uso de agregados reciclados, porém foi necessário fazer adaptação do processo de preparo da argamassa com agregados reciclados devido à inclusão da etapa de pré-molhagem (figura 23).

Figura 23 - Modo de preparo das argamassas



Fonte: Autora (2025)

5.2.3 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS EM SEU ESTADO FRESCO

Foram adotados os métodos de ensaio para avaliação das propriedades de argamassas apresentados no quadro 10. No estado fresco foram analisadas consistência e massa específica, e no estado endurecido, os parâmetros estudados foram resistência à tração na flexão, resistência à compressão e absorção de água.

Quadro 10 - Ensaios de Caracterização das Argamassas

Caracterização	Ensaio	Método
Estado Fresco	Índice de consistência	NBR 13276/2016
	Massa específica	NBR 13278/2005
Estado Endurecido propriedades físicas e mecânica	Resistência à tração na flexão	NBR 13279/2005
	Resistência à compressão	NBR 13279/2005
	Absorção de água	NBR 9778/2009

Fonte: Autora (2025)

5.2.4 ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA

O índice de consistência é um parâmetro importante para avaliar a trabalhabilidade e a fluidez da argamassa, que afetam diretamente a aplicação e o desempenho do material no estado endurecido.

Realizou-se o ensaio em conformidade com a NBR 13276 (ABNT, 2016) em mesa para adensamento de argamassa. Foram empregados: uma fôrma tronco cônico, espátula, soquete, régua metálica e paquímetro universal. Limpou-se juntamente a mesa e o molde tronco cônico com um pano úmido, assegurando assim que as superfícies se apresentassem ligeiramente úmidas. O molde foi preenchido em três camadas de alturas equivalentes, socadas sequencialmente com 15, 10 e 5 golpes.

Posteriormente, rasou-se o molde com o auxílio de uma régua metálica, e retirou-se o molde com cautela. Por fim, efetuou-se novo rasamento da argamassa, retirou-se o tronco e com a manivela foram golpeadas 30 vezes. Foram realizadas 3 repetições para este ensaio.

5.2.5 MASSA ESPECÍFICA

Esse ensaio foi conduzido com estrita conformidade com as diretrizes estabelecidas pela norma NBR 13278 (ABNT, 2005). O procedimento adotado baseia-se na mensuração da massa de um recipiente de volume conhecido antes e após a adição da argamassa sob análise. Ao comparar as massas do recipiente vazio e do recipiente contendo a argamassa ensaiada, juntamente com as massas secas e as

densidades específicas de cada componente da argamassa (incluindo a água) e o volume do recipiente, foi realizado 3 repetições para este ensaio, é possível calcular a densidade de massa da argamassa aplicando a equação 7.

$$d = \frac{mc - mv}{vr} \times 1000$$

Equação 7

Onde:

d = densidade específica da argamassa (Kg/m³);

mc = massa do recipiente cilíndrico com a argamassa (g);

mv = massa do recipiente cilíndrico vazio (g);

Vr = volume do recipiente cilíndrico (cm³).

5.2.6 ARGAMASSA EM ESTADO ENDURECIDO

Para a análise das argamassas no estado endurecido foram moldados corpos de provas cilíndricos e prismáticos, utilizando o procedimento previsto na norma NBR 7215 (ABNT, 2019). Os corpos de prova cilíndricos (50x100 mm) foram moldadas em 4 camadas, aplicando-se 30 golpes em cada camada. Um total de 3 (três) corpos de prova foram confeccionados para cada mistura, destinados aos ensaios de absorção capilar aos 28 dias.

As composições das argamassas apresentadas na tabela 6 foram parcialmente baseadas no trabalho pioneiro de Silva (2024), que investigou o desempenho de argamassas com substituição de 100% e 50% do agregado natural por diferentes tipos de agregados reciclados. No presente estudo, buscou-se expandir o escopo da investigação ao introduzir teores de substituição intermediários de 75% e 25% do (ANF e ANG) por cada um dos agregados reciclados (ARSM1, ARMS2, ARMP). Essa estratégia experimental visa fornecer uma análise mais detalhada da influência da proporção de agregado reciclado no desempenho das argamassas estruturais, permitindo identificar possíveis relações não lineares entre teor de substituição e as propriedades avaliadas. A inclusão das composições com 75% e 25% de substituição, além das estudadas por Silva (2024), permitirá uma avaliação mais abrangente do

potencial de utilização desses agregados reciclados em diferentes proporções para a produção de argamassas com desempenho estrutural otimizado.

Para a confecção dos corpos de prova prismáticos (40x40x160 mm), adotou-se o procedimento descrito na norma 13279 (ABNT, 2005). Foram realizados 270 corpos de provas ao todo. Esses CPs destinaram-se aos ensaios de resistência à compressão e resistência à tração na flexão realizados em 3 idades, 7, 14 e 28 dias, com 3 réplicas cada ensaio.

Tabela 6 - Argamassas confeccionadas

100% ANF
100% ANG
100% ARMP
100% ARSM1
100% ARSM2
75 ANF + 25 ARSM2
75 ANF + 25 ARSM1
75 ANF + 25 ARMP
75 ANG + 25 ARSM2
75 ANG + 25 ARSM1
75 ANG + 25 ARMP
50 ANF + 50 ARSM2
50 ANF + 50 ARSM1
50 ANF + 50 ARMP
50 ANG + 50 ARSM2
50 ANG + 50 ARSM1
50 ANG + 50 ARMP
25 ANF + 75 ARSM2
25 ANF + 75 ARSM1
25 ANF + 75 ARMP
25 ANG + 75 ARSM2
25 ANG + 75 ARSM1
25 ANG + 75 ARMP

Fonte: Autora (2025)

5.2.7 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO E RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Para avaliar as propriedades mecânicas das argamassas no estado endurecido, realizaram-se ensaios de resistência à tração na flexão e resistência à compressão, conforme a NBR 13279 (ABNT, 2005).

A resistência à tração na flexão foi avaliada aos 7, 14 e 28 dias, utilizando três corpos de prova de cada mistura para cada idade. Neste estudo, busca-se entender a evolução das propriedades mecânicas das argamassas ao longo do tempo, o que é essencial para garantir a qualidade do material produzido. Primeiramente foram rompidos 3 corpos de prova à resistência à tração na flexão, gerando dois fragmentos que foram submetidos à compressão, resultando em seis corpos de provas por mistura, conforme determinado a NBR 13279 (ABNT, 2005).

Os valores de resistência à tração na flexão foram obtidos pela equação 8.

$$R_f = 1,5 \times F_f \times L / 403 \text{ (MPa)}$$

Equação 8

Onde:

F_f = Carga (N);

L = Distância entre os suportes (mm).

A resistência à tração na flexão média correspondeu à média aritmética das resistências de 3 corpos de prova por mistura, segundo a NBR 13279 (ABNT, 2005).

Para a realização do ensaio de resistência à compressão, utilizam-se 6 corpos de provas prismáticos por composição das misturas. Os valores de resistência à compressão axial obtiveram-se pela equação 9.

$$R_c = F_c / 1600 \text{ (MPa)}$$

Equação 9

Onde

F_c – Carga (N).

5.2.8 ABSORÇÃO DE ÁGUA, ÍNDICE DE VAZIOS E MASSA ESPECÍFICA

O desempenho das argamassas foi também avaliado através de ensaios de absorção capilar, massa específica e índice de vazios, segundo a norma NBR 9778 (ABNT, 2005). Os ensaios de absorção de água foram por capilaridade conforme a NBR 9779 (2012).

5.2.9 PRODUÇÃO DOS CONCRETOS

Após a obtenção dos resultados dos ensaios de resistência à compressão das argamassas, foram selecionadas as três composições que exibiram os maiores valores. Estas composições foram então utilizadas na próxima etapa de produção de concreto, respeitando a proporção em massa de 1:1:1:0,5 (cimento: agregado graúdo: agregado miúdo natural: agregado miúdo reciclado: água).

Para a composição, utilizou-se agregado graúdo natural, especificando com o brita do tipo 0. Este material apresenta uma dimensão máxima característica de dimensão máxima característica de 19 mm. Suas propriedades físicas foram determinadas como massa específica de $2,68 \text{ g/cm}^3$ e massa unitária $1,74 \text{ g/cm}^3$.

Na sequência, os concretos desenvolvidos a partir dessas argamassas foram submetidos a ensaios de resistência à compressão, permitindo uma análise comparativa com os resultados das argamassas iniciais. Esta análise é fundamental para verificar a possibilidade de transferência das propriedades mecânicas observadas nas argamassas para concretos, confirmando a viabilidade da substituição dos agregados em elementos estruturais.

6. RESULTADOS

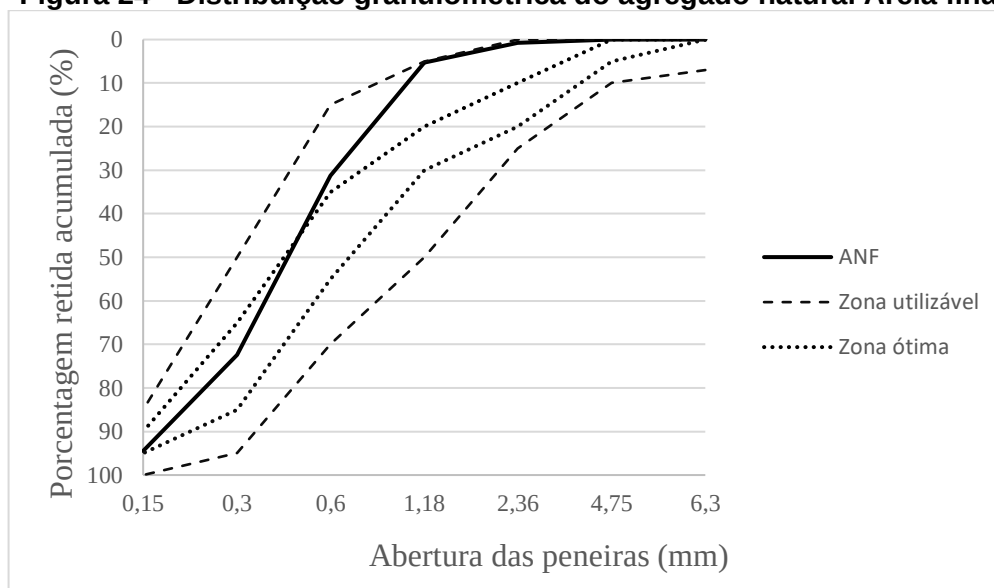
Os resultados das argamassas produzidas serão apresentados considerando tanto o estado fresco quanto o estado endurecido. No estado fresco, foram analisadas propriedades como índice de consistência, massa específica. Já no estado endurecido, foram avaliadas características como resistência à compressão, resistência a tração, absorção de água.

Essa abordagem permite uma análise completa do desempenho das argamassas, considerando tanto as propriedades quando ainda frescas quanto as propriedades após o endurecimento. Isso é fundamental para garantir que as argamassas atendam aos requisitos técnicos e de desempenho necessários para a aplicação desejada, tanto na fase de aplicação quanto durante a vida útil da construção.

6.1 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DOS AGREGADOS

As características dos agregados naturais estão apresentadas na tabela 7. As figuras 24 e 25 demonstram a distribuição granulométrica dos agregados naturais, areia fina e grossa, respectivamente.

Figura 24 - Distribuição granulométrica do agregado natural Areia fina

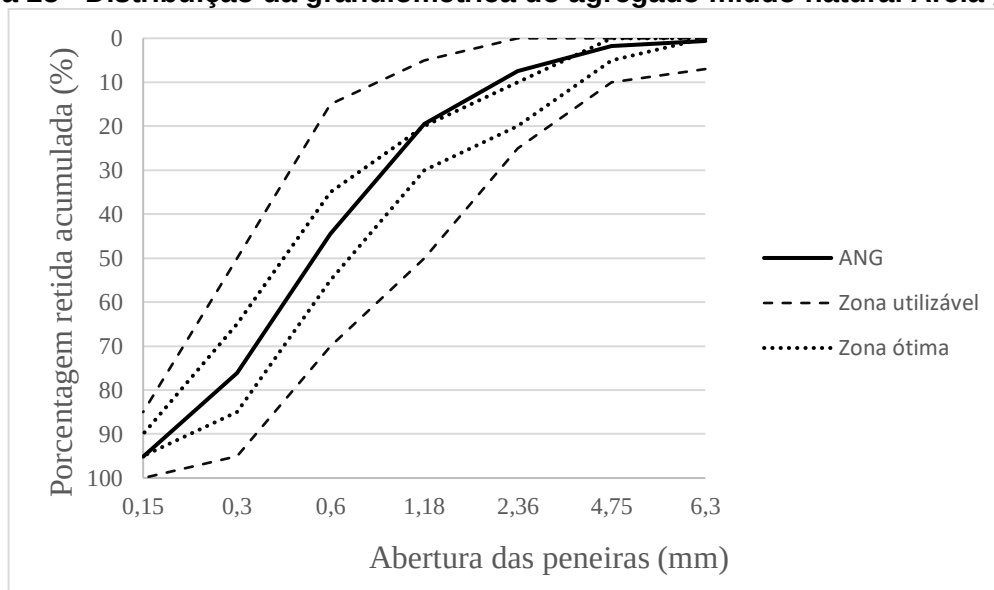


Fonte: Autora (2025)

A granulometria do agregado miúdo natural areia fina está situada dentro da zona ótima nas peneiras de menor abertura e depois se apresentando mais próximo

à zona utilizável inferior, de acordo com os limites estabelecidos da NBR 7211 (ABNT, 2022).

Figura 25 - Distribuição da granulométrica do agregado miúdo natural Areia grossa



Fonte: Autora (2025)

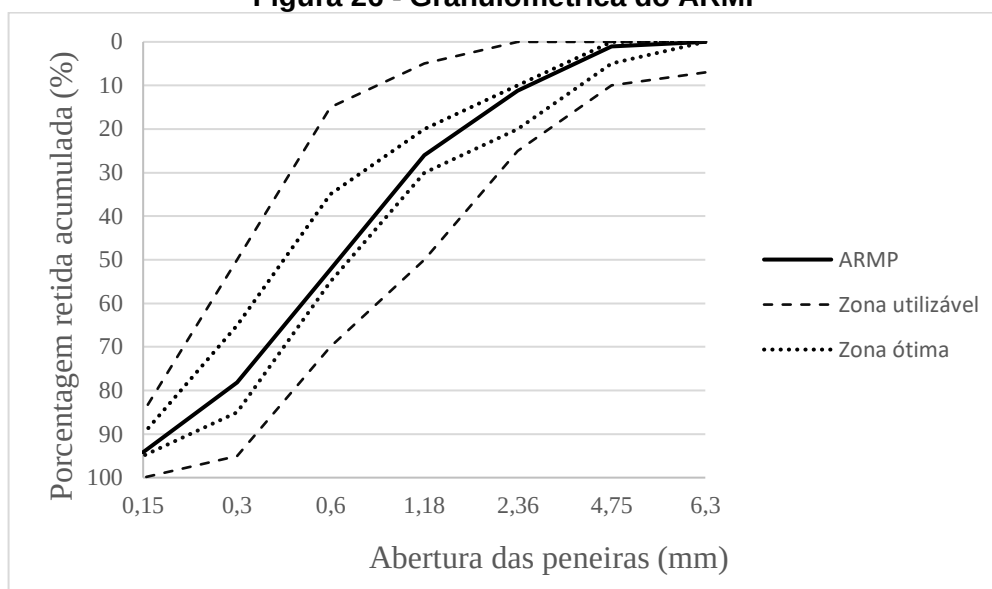
O agregado miúdo grosso está contido quase inteiramente na zona ótima, com uma pequena parcela abaixo do limite inferior, entre as peneiras 1,18 mm e 2,36 mm.

Tabela 7 - Características físicas dos agregados miúdos naturais areia fina e areia grossa

Características físicas do agregado miúdo	Resultados	
	Agregado miúdo natural - Areia fina	Agregado miúdo natural - Areia grossa
Módulo de finura (mm)	2,04	2,45
Dimensão máxima característica (mm)	2,36	4,75
Massa unitária no estado compactado (g/cm³)	1,45	1,60
Massa específica (g/cm³)	2,33	2,51
Massa específica saturada superfície seca (g/cm³)	2,36	2,52
Absorção de água (%)	1,2	0,6
Teor de material pulverulento (%)	0,01	-

Fonte: Autora (2025)

A análise dos limites de distribuição granulométrica do agregado reciclado primário está apresentada na figura 26, e na tabela 8, as suas caracterizações físicas.

Figura 26 - Granulométrica do ARMP

Fonte: Autora (2025)

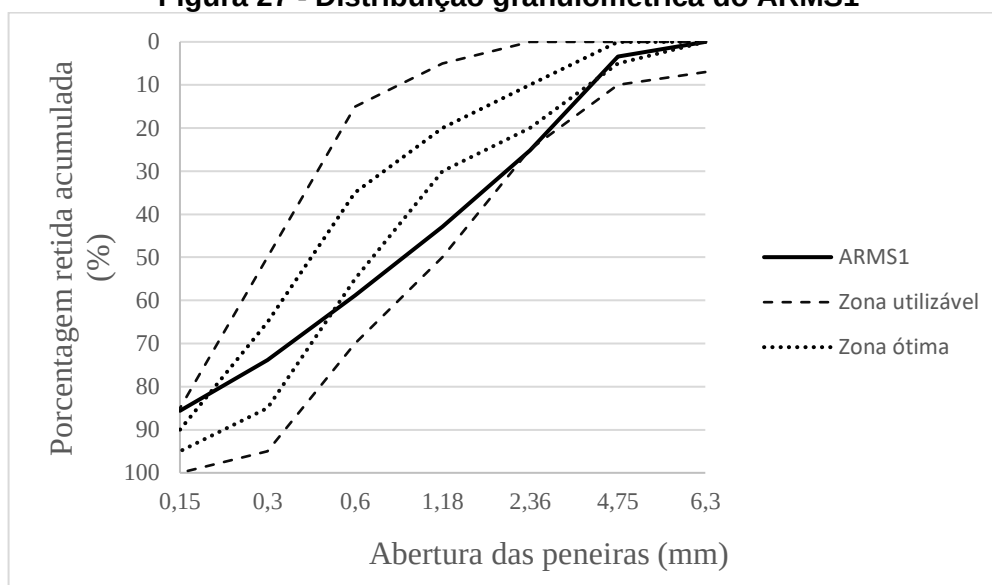
A análise dos limites de distribuição granulométrica do agregado reciclado primário estabelece que a dimensão máxima característica corresponde a 4,75 mm e o módulo de finura a 3,56, estando na zona ótima e atendendo, assim, às recomendações da NBR 7211 (ABNT, 2022). Os dados das características do ARMP estão apresentados na tabela 8.

Tabela 8 - Características físicas do ARMP

Características físicas do agregado miúdo ARMP	Resultados
Módulo de finura (mm)	4,75
Dimensão máxima característica (mm)	3,56
Massa unitária no estado compactado (g/cm ³)	1,36
Massa específica (g/cm ³)	2,08
Massa específica saturada superfície seca (g/cm ³)	2,47
Teor de Material pulverulento (%)	1,0

Fonte: Autora (2025)

A figura 27 traz a distribuição granulométrica do agregado reciclado miúdo secundário do britador 1– ARMS1.

Figura 27 - Distribuição granulométrica do ARMS1

Fonte: Autora (2025)

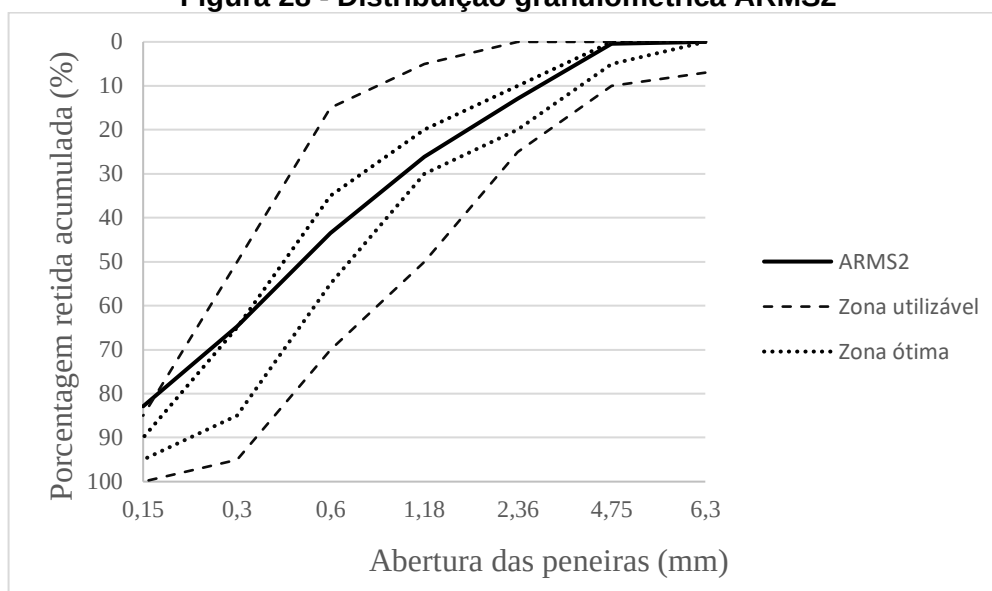
A distribuição granulométrica do agregado miúdo reciclado ARMS1 está situada dentro da zona utilizável superior nas peneiras de maior abertura, apresentando apenas um ponto dentro da zona ótima, que corresponde à dimensão entre 0,15 mm e 0,3 mm, de acordo com os limites estabelecidos pela NBR 7211 (ABNT, 2022). Na tabela 9 encontraram-se as propriedades físicas desse material.

Tabela 9 - Características físicas do agregado reciclado miúdo secundário ARMS1

Características físicas do agregado miúdo – ARMS1	Resultados
Módulo de finura (mm)	2,89
Dimensão máxima característica (mm)	2,36
Massa unitária no estado compactado (g/cm ³)	1,45
Massa específica (g/cm ³)	2,08
Massa específica saturada superfície seca (g/cm ³)	2,24
Absorção de água (%)	7,39
Teor de Material pulverulento (%)	0,02

Fonte: Autora (2025)

A figura 28 apresenta o agregado reciclado miúdo secundário do britador 2 – ARMS2. Na tabela 10 estão suas características físicas.

Figura 28 - Distribuição granulométrica ARMS2

Fonte: Autora (2025)

A distribuição granulométrica da areia reciclada secundária ARMS2 está na maior parte dentro da zona ótima e, com um ponto próximo da zona utilizável inferior na peneira 0,15 mm. As características da areia reciclada estão apresentadas na tabela 10.

Tabela 10 - Características da ARMS2

Características físicas do agregado miúdo – ARMS2	Resultados
Módulo de finura (mm)	2,30
Dimensão máxima característica (mm)	4,75
Massa unitária no estado compactado (g/cm³)	1,35
Massa específica (g/cm³)	2,08
Massa específica saturada superfície seca (g/cm³)	2,24
Absorção de água (%)	7,7
Teor de Material pulverulento (%)	1,64

Fonte: Autora (2025)

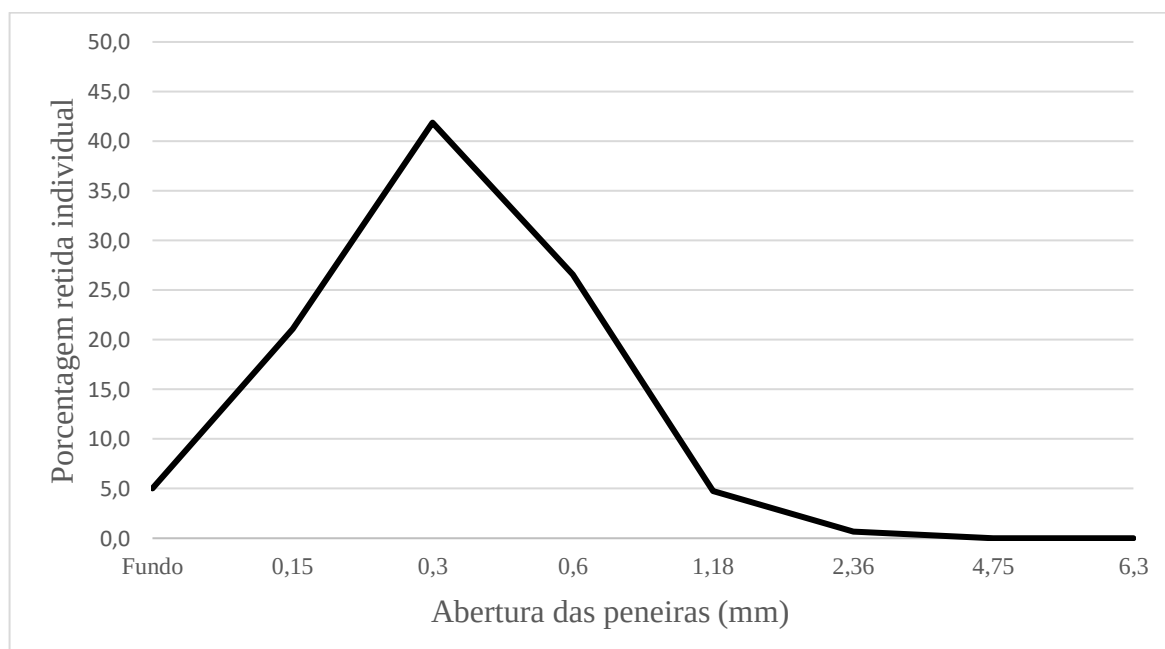
Ao comparar o agregado natural (ANF) com agregado reciclado (ARMS1), observa-se que os valores de teor de material pulverulento são bastante próximos entre si. Esse resultado corrobora o encontrado na literatura por Castro (2007), que indica que a presença de partículas minerais (finas) com diâmetros menores que 0,075 mm é intensificada no processo de beneficiamento de RCD para a geração de agregados reciclados. No entanto, o agregado (ARMP) e (ARMS2) obterão valores superiores a 0,075, o que resulta em uma problemática dos agregados reciclados

quanto à fragilidade durante o processo de beneficiamento do RCD conforme Silva (2011).

6.1.2 PORCENTAGEM RETIDA INDIVIDUAL DOS AGREGADOS

A distribuição granulométrica dos agregados é essencial para compreender a curva de distribuição, e identificar a predominância de frações granulométricas e garantir a adequação da composição dos materiais para aplicação desejada. Uma distribuição equilibrada, com variedade de tamanhos de partículas, geralmente indica um material mais compacto e resistente. Isso ocorre porque as partículas menores preenchem os vazios entre as maiores, resultando em um empacotamento eficiente e maior densidade. Os resultados obtidos quanto à distribuição granulométrica dos agregados estão ilustrados nas figuras 29 a 33 que mostram a porcentagem retida individual de cada agregado.

Figura 29 – Porcentagens retidas individuais do agregado miúdo natural fino



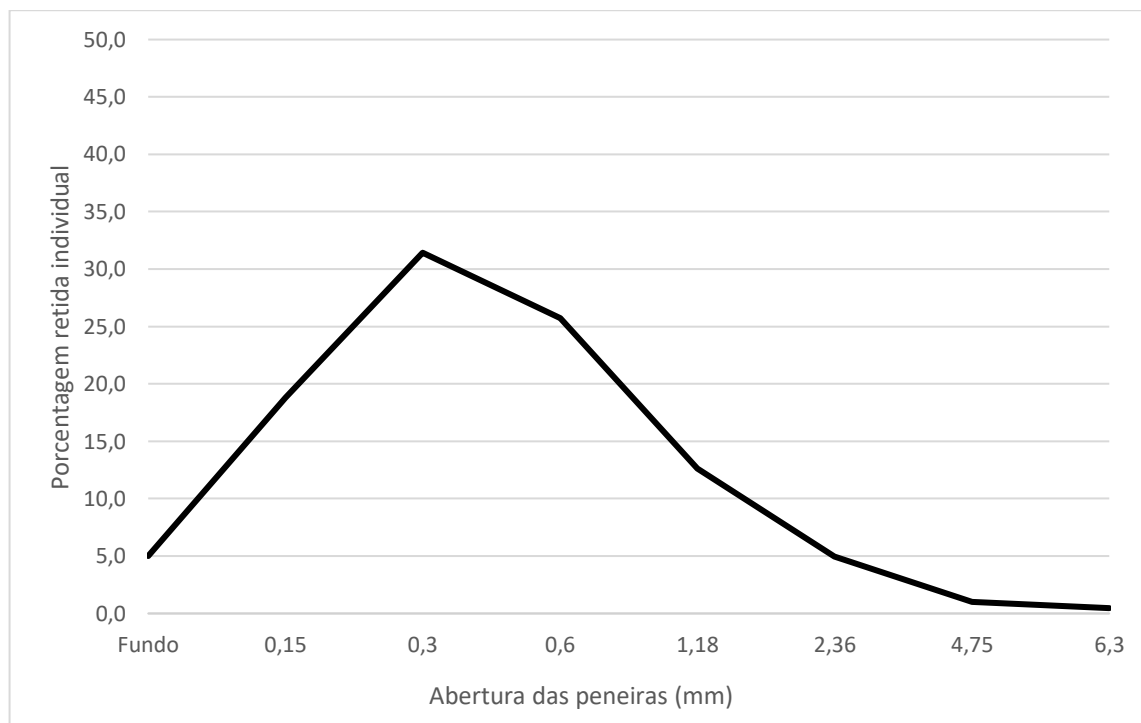
Fonte: Autora (2025)

A curva apresenta uma distribuição contínua dos tamanhos de partícula, sem grandes descontinuidades, o que é desejável para obter um material bem graduado. Observa-se que o agregado é composto predominantemente por partículas finas, com

maior percentagem retida ocorrendo nas peneiras de menor abertura (0,3 mm e 0,6 mm).

A curva apresentada na figura 30 traz as percentagens retiradas do agregado miúdo natural grosso.

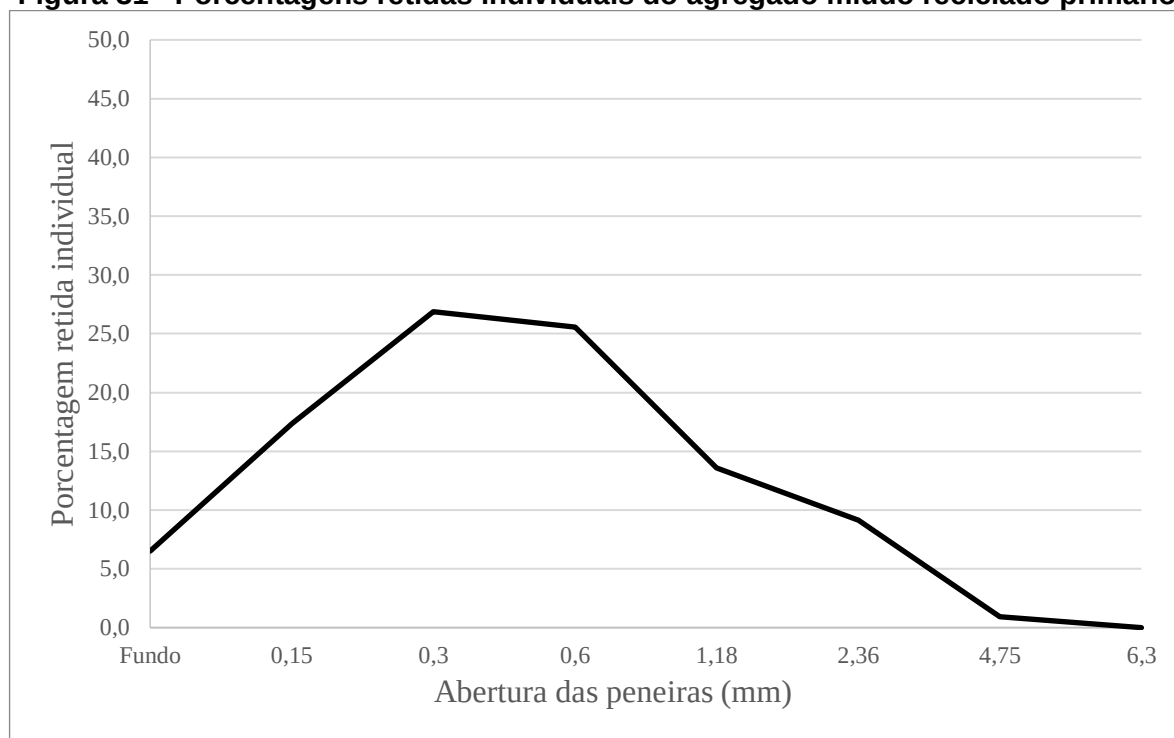
Figura 30 - Percentagens retidas individuais do agregado miúdo natural areia grossa



Fonte: Autora (2025)

A curva de distribuição granulométrica mostra a concentração de partículas dos agregados miúdos natural areia grossa. Há um pico de 0,3 mm com aproximadamente 32% das partículas retidas, indicando alta concentração nessa faixa granulométrica. Poucas são as partículas finas, retidas nas aberturas menores, e há uma redução na percentagem de partículas mais grossas, retidas nas aberturas maiores. A distribuição é mais concentrada em torno de 0,3 mm e 0,6 mm, sugerindo uma granulometria menos uniforme.

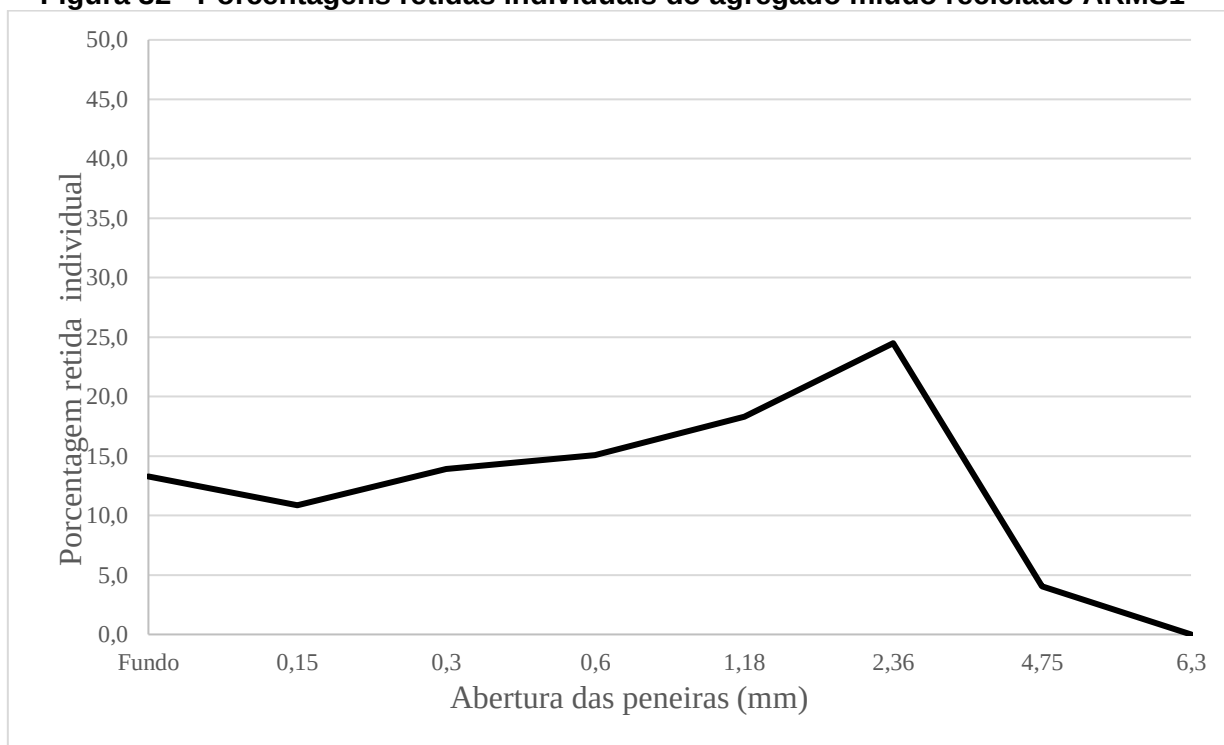
Na figura 31 apresenta a distribuição granulométrica do agregado miúdo reciclado primário.

Figura 31 - Porcentagens retidas individuais do agregado miúdo reciclado primário

Fonte: Autora (2025)

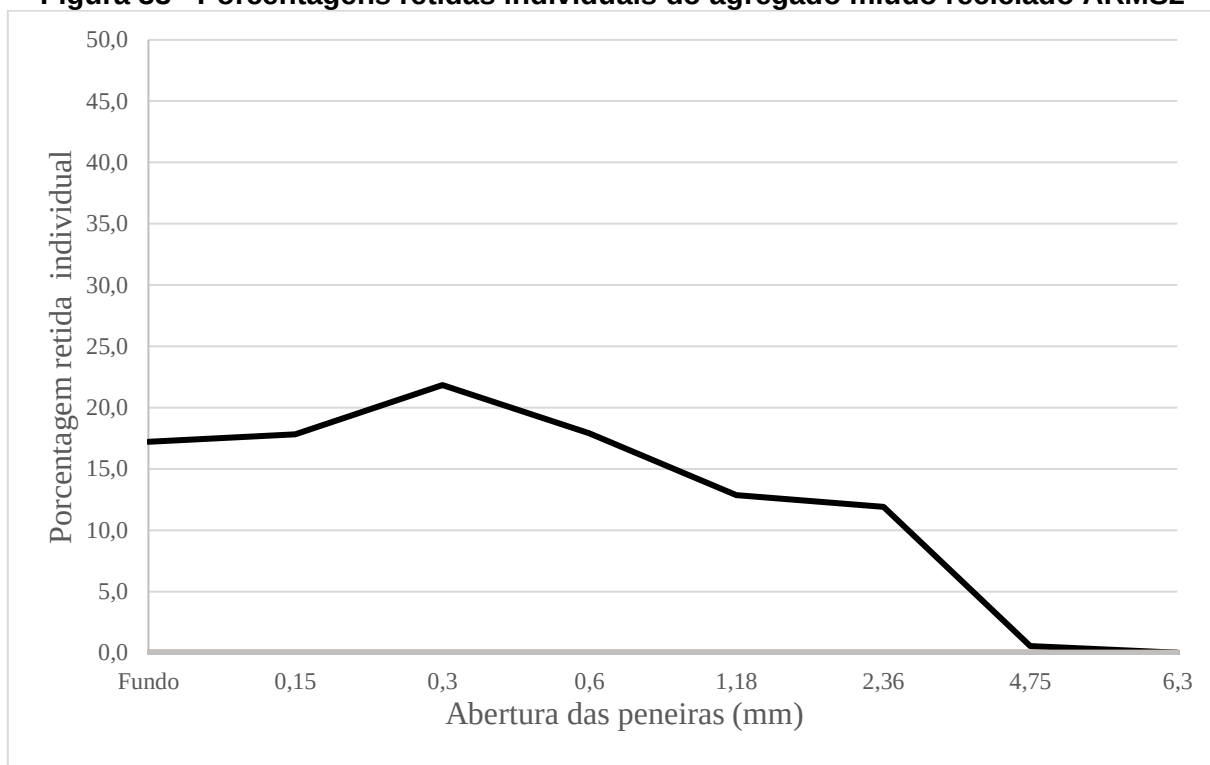
As porcentagens retidas do agregado reciclado primário demonstram uma maior concentração de partículas na faixa granulométrica de 0,3 mm. Por outro lado, há uma menor presença de partículas finas nas aberturas menores (0,3 mm e 0,6 mm), com declínio na peneira 0,15 mm com porcentagens retidas individuais mais baixas. Também se observa uma redução na porcentagem de partículas mais grossas retidas nas aberturas maiores (1,18 mm, 2,36 mm e 4,75 mm).

A figura 32 apresenta as porcentagens retidas do agregado miúdo reciclado ARSM1.

Figura 32 - Porcentagens retidas individuais do agregado miúdo reciclado ARMS1

Fonte: Autora (2025)

O agregado miúdo reciclado ARMS1 possui uma distribuição granulométrica com partículas mais finas e com distribuição uniforme, a maior concentração de grãos do agregado miúdo reciclado ARMS1 está na faixa intermediária entre 1,18 mm e 2,36 mm de abertura de peneira. Na figura 33 apresentam-se as porcentagens retidas do ARMS2.

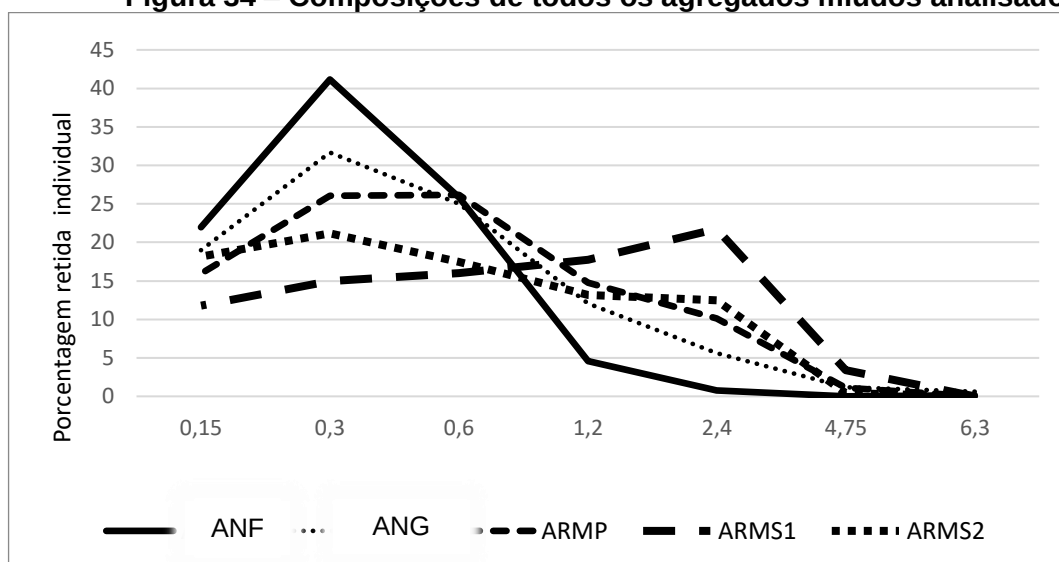
Figura 33 - Porcentagens retidas individuais do agregado miúdo reciclado ARMS2

Fonte: Autora (2025)

No ARMS2 há uma concentração muito alta de partículas retidas na peneira 0,3 mm, e observa-se que a porcentagem retida diminui rapidamente conforme a abertura da peneira aumenta, chegando a menos de 5% nas peneiras maiores, como 4,75 mm e 6,3 mm.

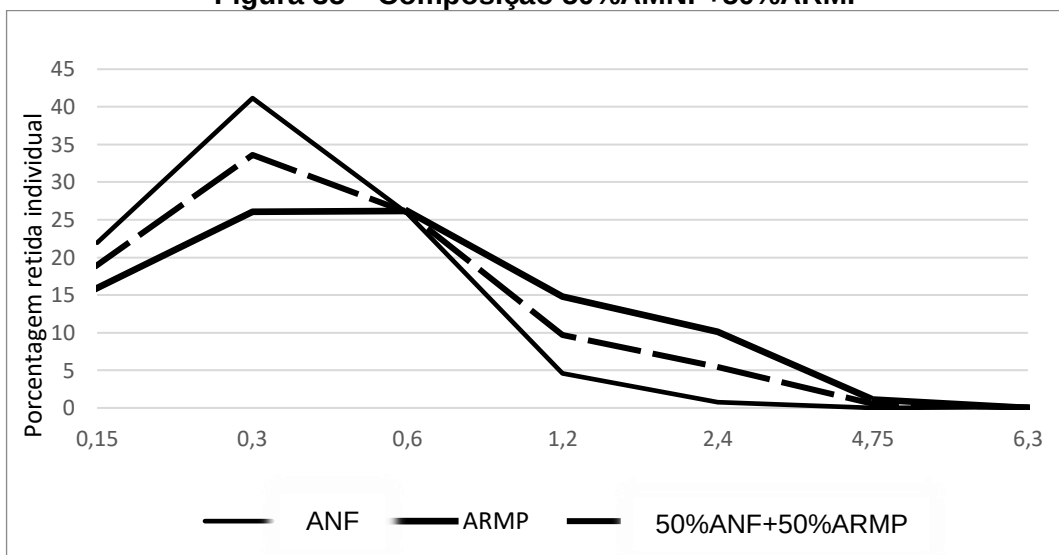
6.1.3 COMPOSIÇÕES GRANULOMÉTRICAS DOS AGREGADOS

A distribuição granulométrica dos agregados é um parâmetro fundamental no desempenho de materiais cimentícios. Essa composição refere-se à proporção relativa de partículas de diferentes tamanhos que compõem o agregado, desde as frações mais finas até as mais grossas. Na figura 34 estão apresentadas as curvas de todos agregados, onde pode-se ver que eles possuem picos e vales diferentes. Isso sugere que é possível realizar composições granulométricas entre eles, a fim de tornar a distribuição de partículas mais contínua, melhorando as propriedades das misturas produzidas com estes agregados.

Figura 34 – Composições de todos os agregados miúdos analisados

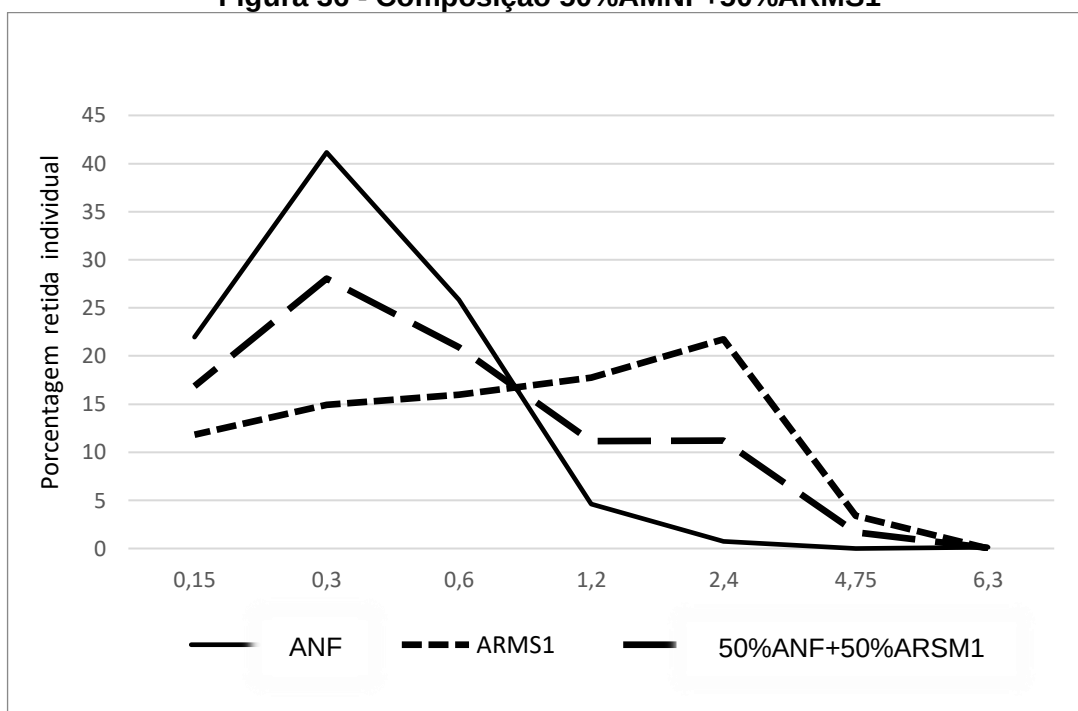
Fonte: Autora (2025)

Utilizando-se as composições encontradas no trabalho de Silva (2024), mostradas no quadro 4, foram elaboradas as curvas granulométricas com as porcentagens retidas individuais, as quais estão mostradas nas figuras 35 a 38.

Figura 35 – Composição 50%AMNF+50%ARMP

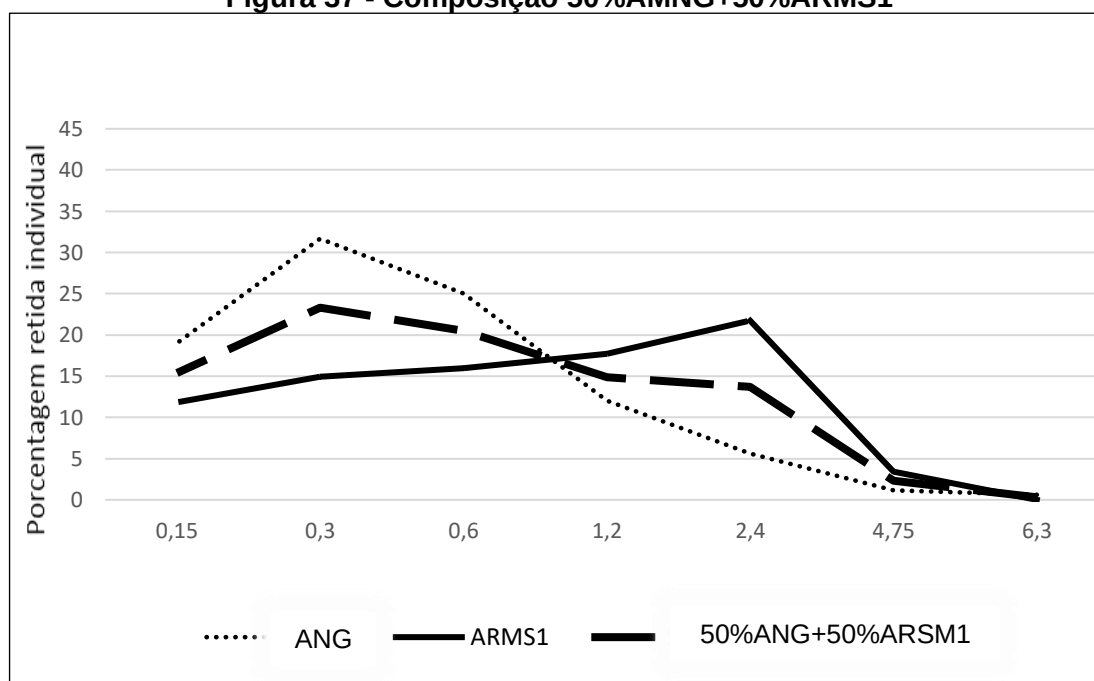
Fonte: Autora (2025)

Figura 36 - Composição 50%AMNF+50%ARMS1

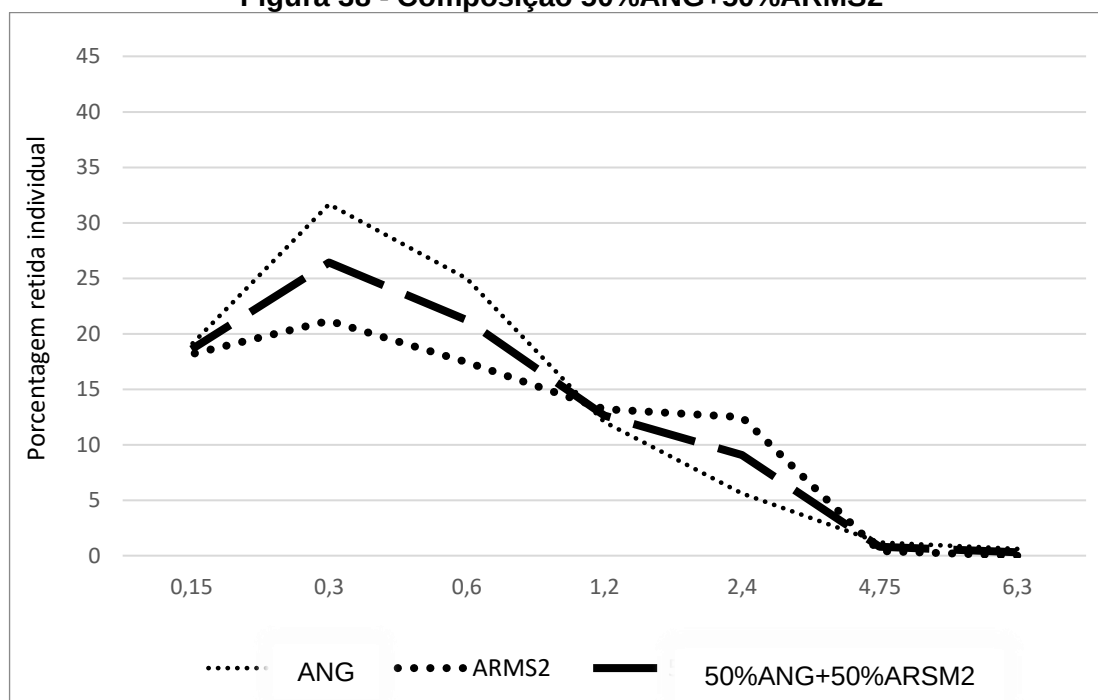


Fonte: Autora (2025)

Figura 37 - Composição 50%AMNG+50%ARMS1



Fonte: Autora (2025)

Figura 38 - Composição 50%ANG+50%ARMS2

Fonte: Autora (2025)

Diante das porcentagens retiradas individuais, foi possível observar, por exemplo, que a areia natural fina com substituição de 50% por agregado reciclado de demolição ARMP, ARMS1 e ARMS2, apresenta uma composição mais uniforme em termos de quantidade de partículas de diferentes tamanhos. Com relação à areia natural grossa, destaca-se a sua composição com o ARMS1, que demonstra uma distribuição mais contínua.

Uma comparação entre os agregados reciclados (ARMP, ARSM1 e ARSM2) apresenta a influência do processo de beneficiamento do RCD nas suas características. A diferença no teor de finos entre o ARSM1 (britador de mandíbulas 1) e o ARSM2 (britador de mandíbulas 2) sugere que o tipo de britador no processo de beneficiamento pode impactar a quantidade de partículas finas geradas.

Com base nos parâmetros analisados de teor de material pulverulento, absorção de água e inferências sobre a distribuição granulométrica, o processo de beneficiamento que originou o ARSM1 (britador de mandíbulas 1) demonstra um maior potencial para produzir um agregado reciclado com características mais favoráveis à aplicação em argamassas estruturais em comparação com ARSM2 (britador de mandíbulas 2).

Na tabela 11 apresenta-se o comportamento das argamassas com estas composições de agregados, produzidas no estudo de Silva (2024).

Tabela 11 - Comportamentos das argamassas com diferentes combinações de agregados reciclados

COMPOSIÇÃO	AGREGADOS	PORCENTAGEM (%)	ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA (mm)	MASSAS ESPECÍFICAS	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO (MPa)	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO MÉDIA (MPa)
1	ANG	50	303,0	2206,95	1,8	19,65
	ARSM1	50				
2	ANG	70	341,8	2258,14	1,65	24,27
	ARPM	30				
3	ANF	50	329,67	2210,93	1,57	20,19
	ARPM	50				
4	ANG	50	308,07	2192,36	1,39	19,13
	ARSM2	50				
5	ANF	60	335,27	2233,47	1,63	24,78
	ARSM2	40				
6	ANF	50	324,9	2214,64	1,64	22,96
	ARSM1	50				

Fonte: Adaptado de Silva (2024)

É evidente que em todos os casos, as composições que apresentam uma substituição de 50% (a maior extensão de substituição estudada) de agregado miúdo natural por agregados reciclados exibem um índice de consistência diminuído. Além disso, observa-se que misturas com uma elevada proporção de substituição dos agregados miúdos naturais por agregados reciclados demonstram uma massa específica menor, conforme obtido por Silva (2024).

No presente trabalho, pretende-se analisar o desempenho das argamassas não apenas em relação à quantidade de material reciclado, mas também do ponto de vista do empacotamento de partículas.

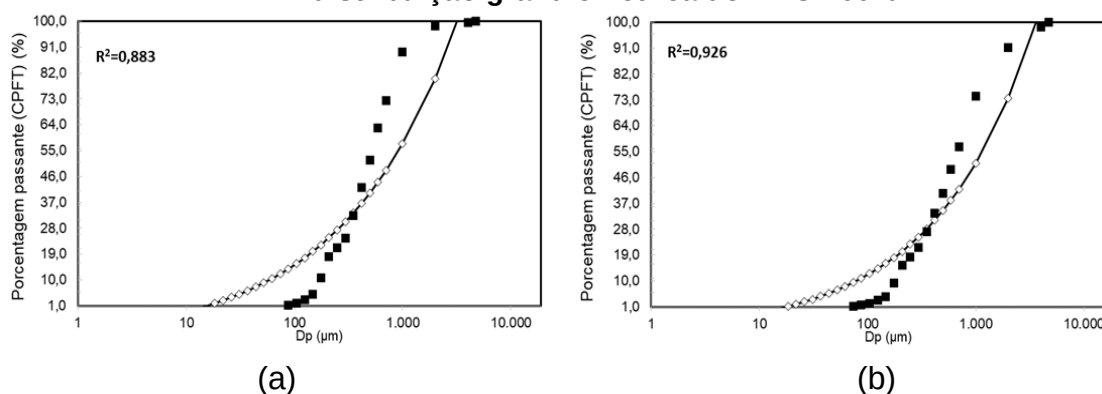
6.1.4 EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS NO SOFTWARE EMMA

A fim de ser avaliado o empacotamento de partículas das diferentes misturas de argamassas, buscou-se analisar o valor do coeficiente de distribuição (q). Para isso, foram inseridas as composições granulométricas dos componentes do esqueleto granular (agregados miúdos naturais e reciclados) presentes nas misturas, possibilitando ao software EMMA ampliar a distribuição granulométrica em um número de peneiras.

Para a obtenção das curvas de distribuição granulométrica das misturas de referência ANF 100%, ANG 100%, ARMP 100%, ARSM2100%, ARSM1 100%, foi considerada a distribuição discreta das curvas de distribuição granulométrica, para cada mistura. O modelo de empacotamento de Alfred foi aplicado, onde no eixo das abscissas são representadas as dimensões das partículas em escala logarítmica e no eixo das ordenadas estão representadas as porcentagens passantes.

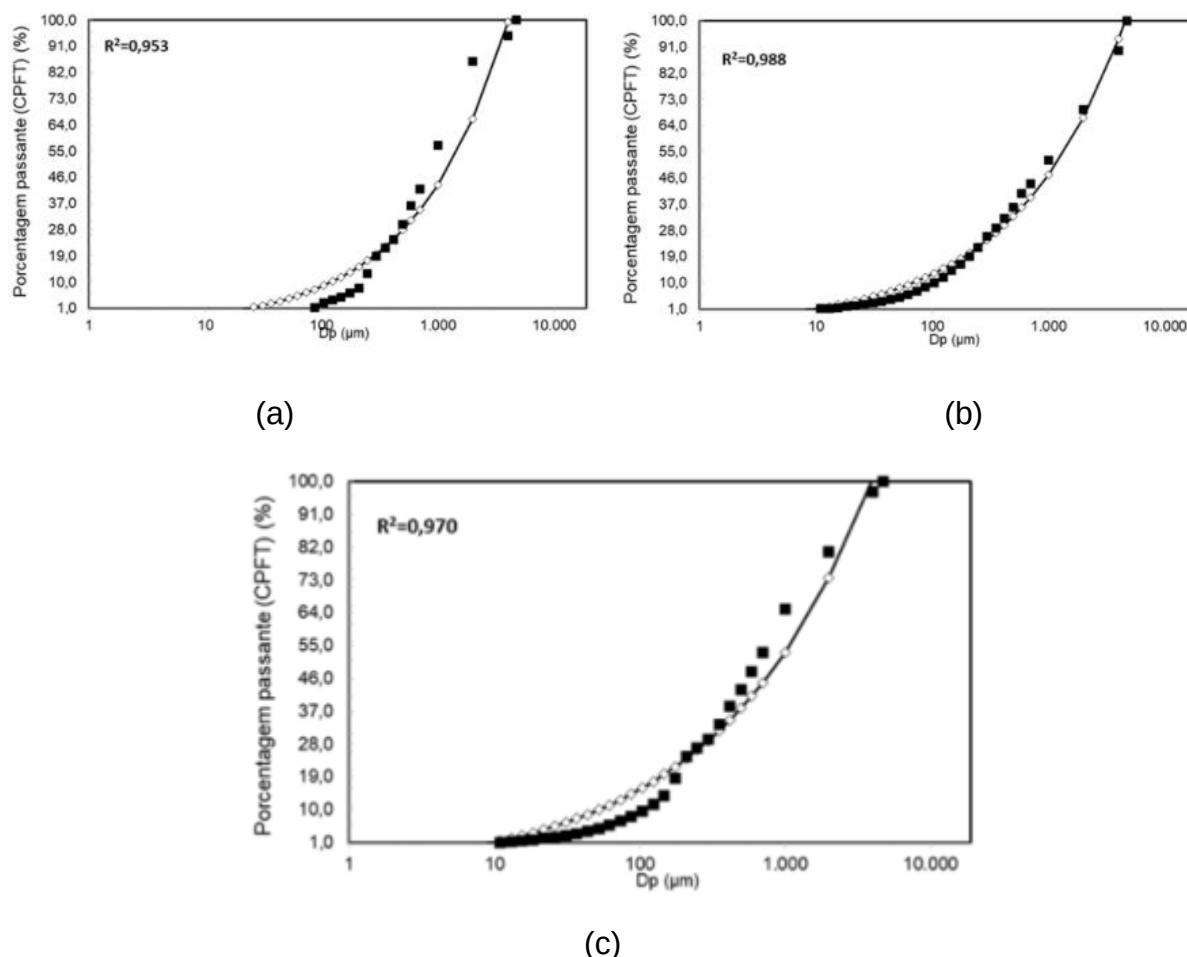
As imagens apresentam uma análise teórica da correlação entre as curvas ideais de empacotamento (quadrado branco) e as curvas obtidas das composições (quadrado preto). Estas são as curvas de distribuição de referência e estão representados nas figuras 39 a 40. O eixo horizontal, denominado D_p , exibe o diâmetro das partículas em escala logarítmica, permitindo uma visualização detalhada da distribuição granulométrica em uma ampla faixa de tamanhos, desde partículas finas até as mais grosseiras. Já o eixo vertical representa a porcentagem acumulada de partículas que passam por determinado tamanho de peneira, conhecida como porcentagem passante (CPFT). Para todas as curvas de distribuição o q adotado foi o q 0,25 para melhor ajuste das composições das argamassas.

Figura 39 (a) Curva de distribuição granulométrica do ANF 100%; (b) Curva da distribuição granulométrica do ANG 100%



Fonte: Autora (2025)

Figura 40 - (a) Curva da distribuição granulométrica do ARMP 100%; (b) Curva da distribuição granulométrica do ARSM1 100%; (c) Curva da distribuição granulométrica do ARSM2 100%



Fonte: Autora (2025)

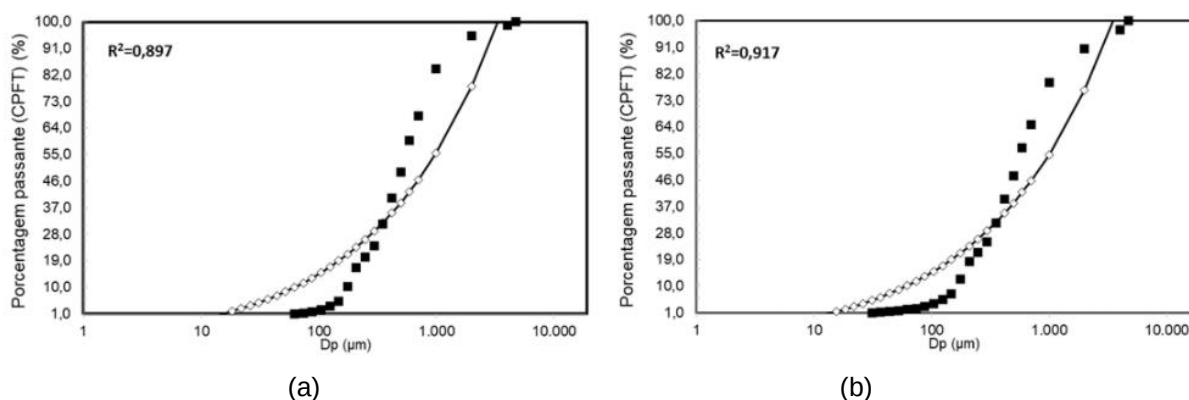
O empacotamento de partículas das composições de agregados das argamassas foi analisado, considerando as porcentagens retidas individuais dos agregados individuais dos agregados individualmente, a fim de obter curvas granulométricas experimentais. A tendência das curvas granulométricas, observada nos gráficos obtidos no Excel, é de obter distribuições contínuas, nas quais as frações granulométricas aproximam-se com partículas de diâmetros mais próximos.

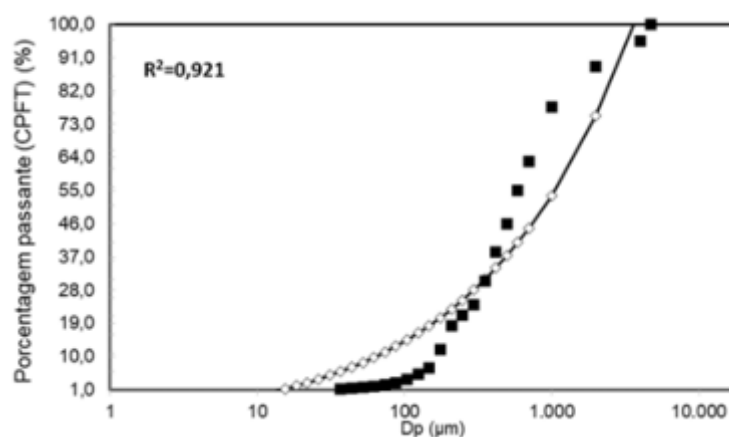
Manteve-se inalterado o coeficiente de distribuição ($q=0,25$), constatando que o coeficiente por si só não identifica quais distribuições obtiveram maior empacotamento ou quais são as frações granulométricas predominantes. O eixo horizontal, denominado D_p , exibe o diâmetro das partículas em escala logarítmica, permitindo uma visualização detalhada da distribuição granulométrica em uma ampla faixa de tamanhos, desde partículas finas até as mais grosseiras. Já o eixo vertical

representa a porcentagem acumulada de partículas que passam por determinado tamanho de peneira, conhecida como porcentagem passante (CPFT).

As curvas apresentadas no gráfico demonstram um ajuste matemático preciso, com elevados coeficientes de determinação (R^2), indicando uma forte correlação entre os dados experimentais e o modelo teórico adotado. Essa característica confere representatividade à análise, possibilitando a extrapolação e a comparação de diferentes amostras. Nas figuras 41 e 42 são das misturas com composições (a) ANF + ARMP 75-25%; (b) Curva da distribuição granulométrica do ANF + ARSM1 75-25%; (c) Curva da distribuição granulométrica do ANF + ARSM2 75-25%. A figura 43 (a) ANG + ARMP 75-25%, (b) Curva da distribuição granulométrica do ANG + ARSM1 75-25%; (c) Curva da distribuição granulométrica do ANG + ARSM2 75-25%. A figura 44 (a) ANF + ARMP 50-50%; (b) Curva da distribuição granulométrica do ANF + ARSM1 50-50%; (c) Curva da distribuição granulométrica do ANF + ARSM2 50-50%. A figura 45 (a) Curva da distribuição granulométrica do ANG + ARMP 50-50%; (b) Curva da distribuição granulométrica do ANG + ARSM1 50-50%; (c) Curva da distribuição granulométrica do ANG + ARSM2 50-50%. A figura 46 (a) ANF + ARMP 25-75%; (b) Curva da granulométrica do ANG + ARSM1 25-75%; (c) Curva da distribuição granulométrica do ANG + ARSM2 25-75%.

Figura 41 - (a) Curva da distribuição granulométrica do ANF + ARMP 75-25%; (b) Curva da distribuição granulométrica do ANF + ARSM1 75-25%; (c) Curva da distribuição granulométrica do ANF + ARSM2 75-25%





(c)

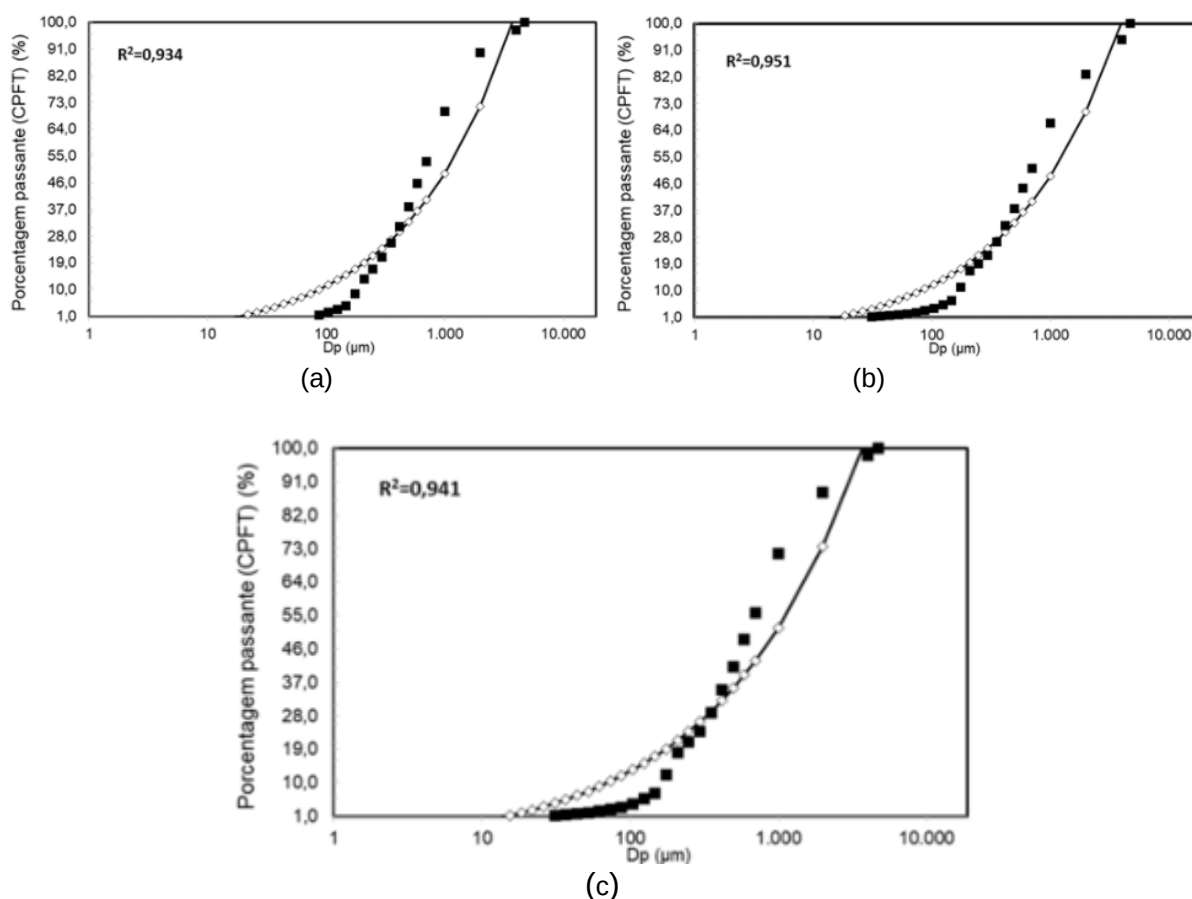
Fonte: Autora (2025)

As curvas granulométricas apresentam uma ampla faixa de tamanhos de partículas, desde 1 μm até 10.000 μm (10 mm), permitindo uma caracterização detalhada da distribuição granulométrica. Os coeficientes de determinação de R^2 são muito próximos, variando entre 0,897, 0,917 e 0,921, o que demonstra um excelente ajuste dos dados experimentais aos modelos teóricos utilizados.

As curvas exibem um comportamento típico de uma distribuição granulométrica, com um crescimento gradual da porcentagem passante à medida que o diâmetro das partículas aumenta. As composições que melhor se ajustaram a curva, apresentaram o menor desvio de empacotamento. Segundo Corrêa (2021), quando menor desvio, indicará um empacotamento mais adequado da mistura, o que resulta em uma maior resistência à compressão do material composto, portanto, uma mistura com índice de desvio de empacotamento menor tem tendência de apresentar uma maior resistência compressão.

Apesar da similaridade geral, as três curvas apresentam pequenas diferenças em seus traçados, curva da distribuição granulométrica do ARSM1 100%, a curva da distribuição granulométrica do ANG + ARSM1 25-75%, e a do ANG + ARSM2 25-75%. Isso indica que as amostras analisadas possuem distribuições granulométricas ligeiramente distintas. Essa variação pode ser decorrente de diferenças na origem, processamento ou composição dos materiais.

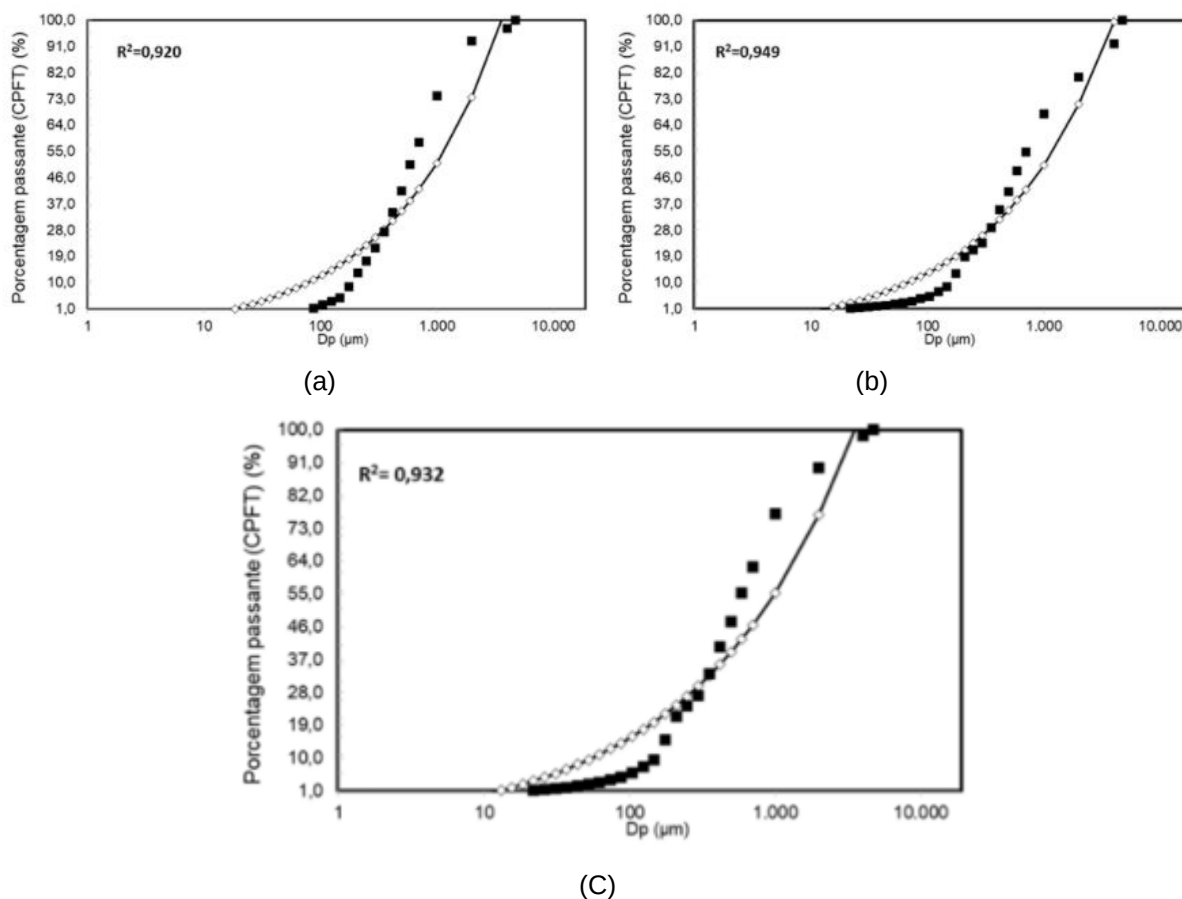
Figura 42 - (a) Curva da distribuição granulométrica do ANG + ARMP 75-25%, (b) Curva da distribuição granulométrica do ANG + ARSM1 75-25%; (c) Curva da distribuição granulométrica do ANG + ARSM2 75-25%



Fonte: Autora (2025)

A terceira curva a figura 42 (a) apresenta uma inclinação mais acentuada em comparação às demais, especialmente na região intermediária. Essa característica sugere uma distribuição granulométrica com uma faixa de tamanhos de partículas mais estreita, ou seja, uma amostra com partículas mais uniformes. Na figura 43 representa as composições ANF com 50% dos agregados naturais e 50% de reciclados.

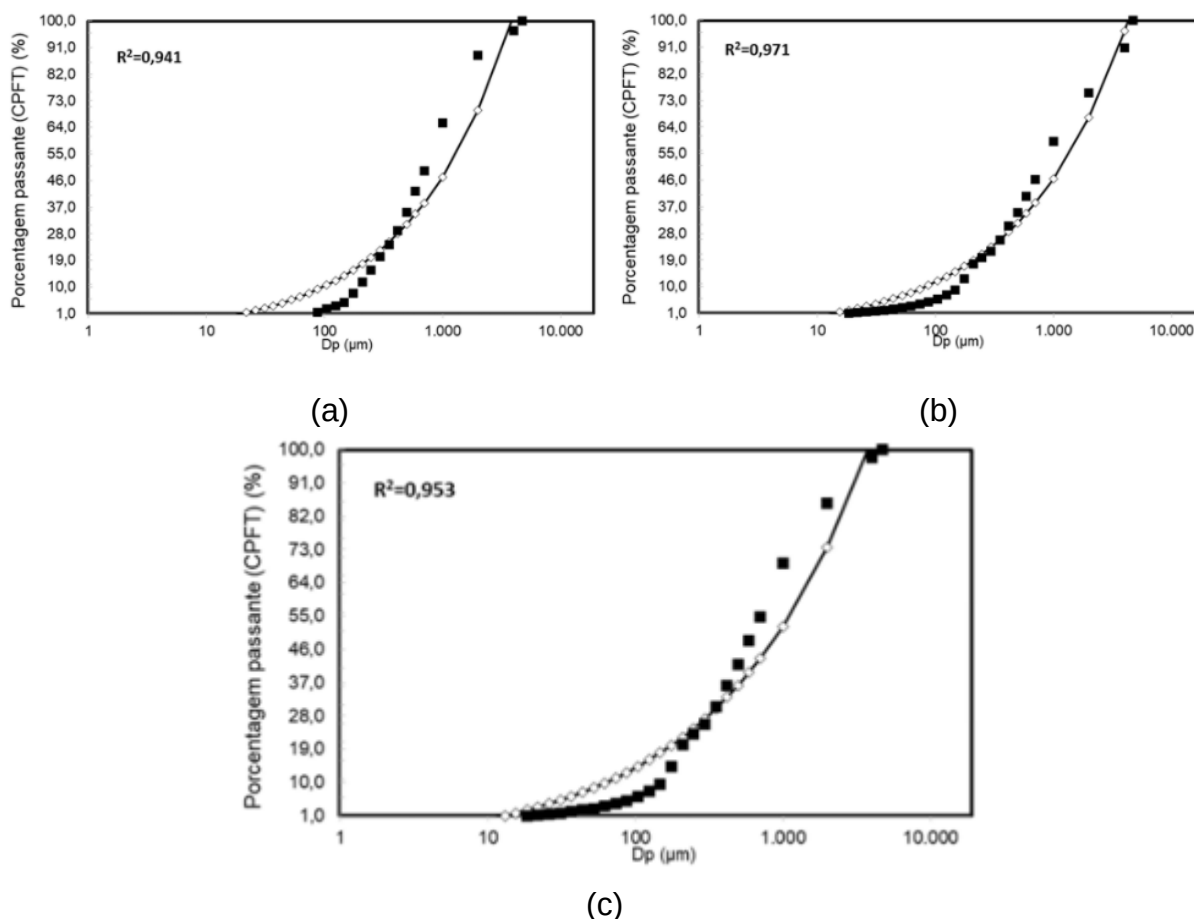
Figura 43 - (a) Curva da distribuição granulométrica do ANF + ARMP 50-50%; (b) Curva da distribuição granulométrica do ANF + ARSM1 50-50%; (c) Curva da distribuição granulométrica do ANF + ARSM2 50-50%



Fonte: Autora (2025)

As curvas apresentam inclinações mais similares entre si, diferentes das curvas com ANG da imagem 43. Os valores de R^2 são mais próximos, variando de 0,920 a 0,949. Apesar da similaridade geral, as curvas apresentam pequenas diferenças em seus traçados, indicando que as amostras analisadas possuem distribuições granulométricas ligeiramente distintas. A figura 44 apresenta as figuras das curvas da distribuição de ANG na composição 50-50%.

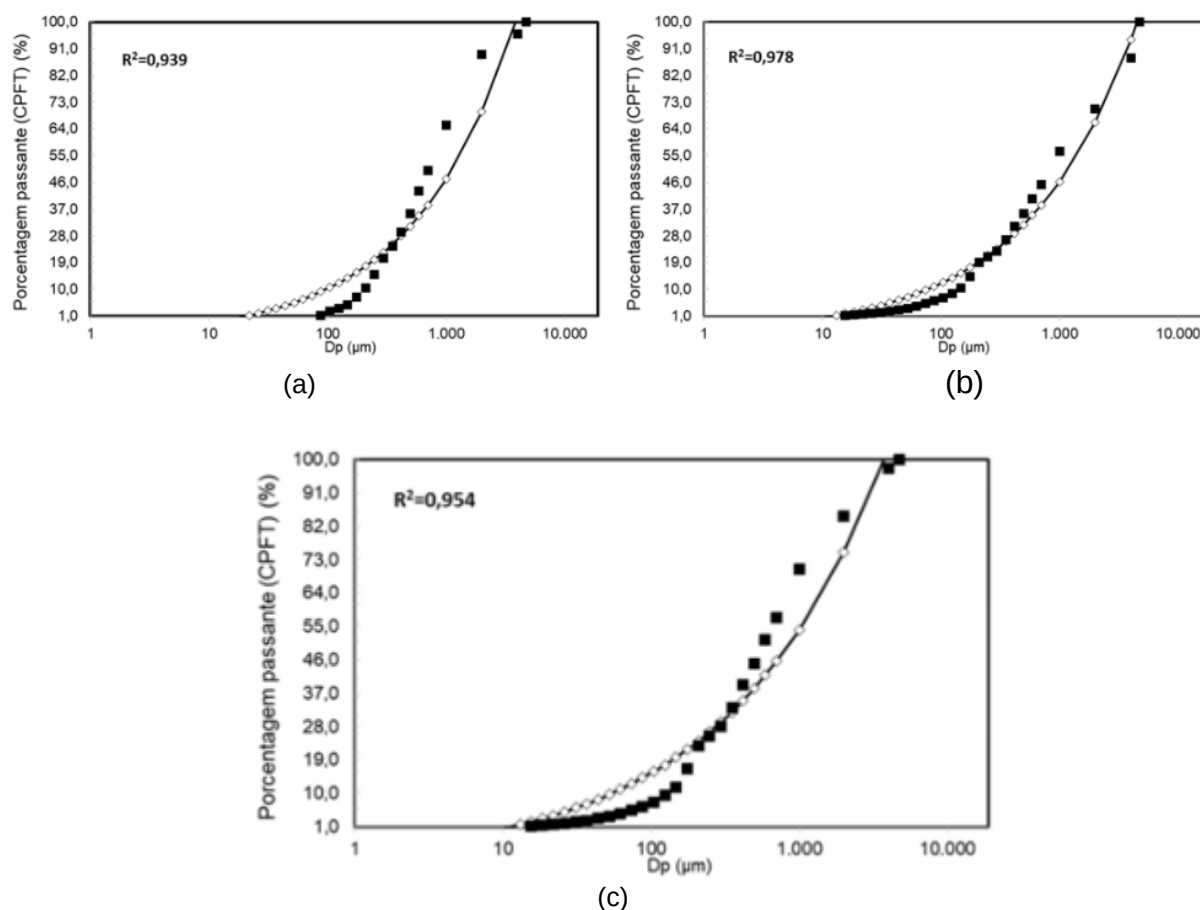
Figura 44 - (a) Curva da distribuição granulométrica do ANG + ARMP 50-50%; (b) Curva da distribuição granulométrica do ANG + ARSM1 50-50%; (c) Curva da distribuição granulométrica do ANG + ARSM2 50-50%



As curvas granulométricas apresentadas nesta imagem exibem inclinações e valores de R^2 bastante similares, a curva da figura 45 - ANG + ARSM1 50-50% e a da figura 45 - ANG + ARSM2 50-50%, apresentam uma boa uniformidade na distribuição de tamanho de partículas entre as amostras analisadas. Isso indica uma forte correlação entre os dados experimentais e o modelo teórico adotado.

As demais curvas na imagem 45 são apresentadas por misturas de ANF com agregados na composição 25-75% de substituição de agregados.

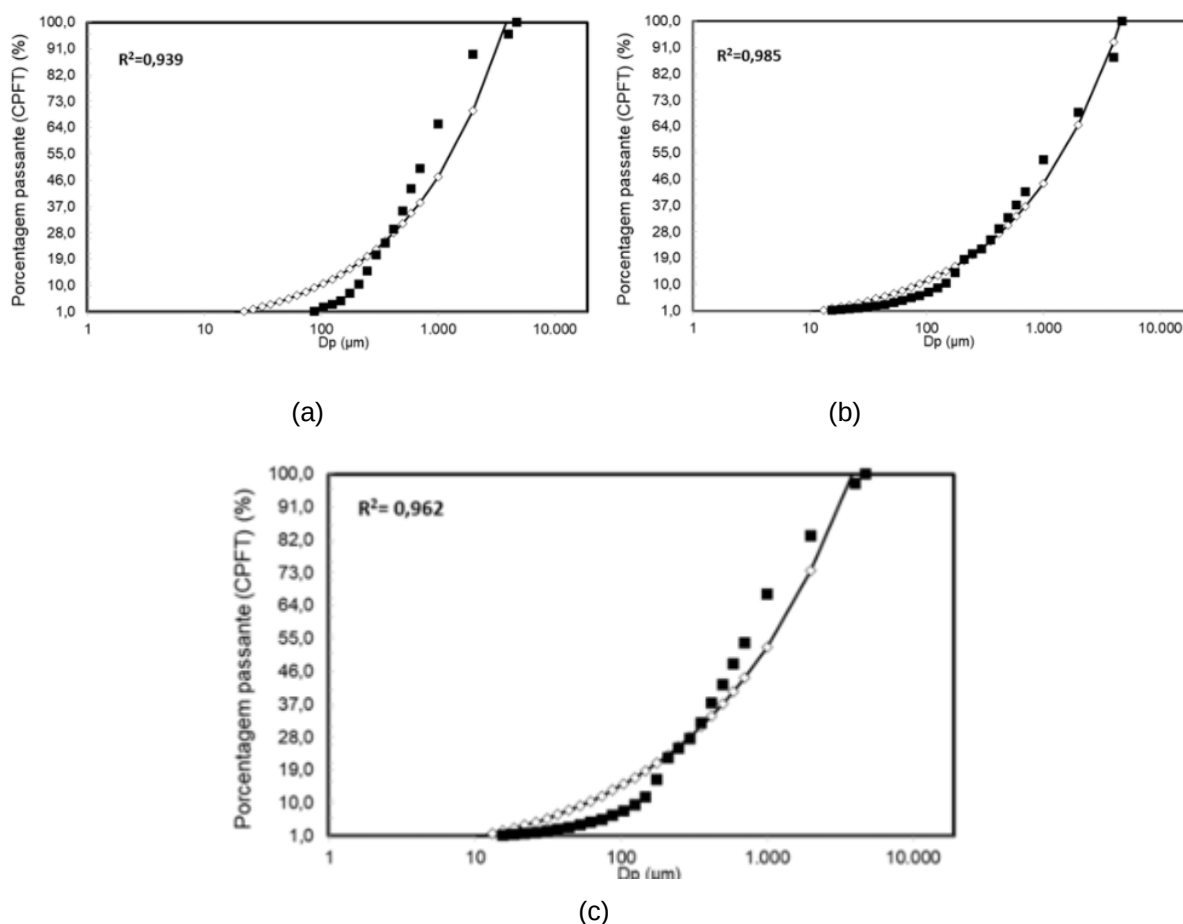
Figura 45 - (a) Curva da distribuição granulométrica do ANF + ARMP 25-75%; (b) Curva da distribuição granulométrica do ANF + ARSM1 25-75%; (c) Curva da distribuição granulométrica do ANF + ARSM2 25-75%



Fonte: Autora (2025)

Pode-se observar que as curvas da distribuição granulométricas ANF com diferentes agregados, exibem similaridade, e os valores de R^2 que mais se ajustaram tanto com os dados experimentais e o modelo teórico foi o da figura 45 – o R^2 de 0,978. Isso demonstra que o modelo matemático utilizado para gerar as curvas se adequa bem aos resultados obtidos. Na figura 46 apresenta a curva de distribuição de ANG com agregados diferentes na composição de 25-75% de substituição do natural por reciclado.

Figura 46 - (a) Curva da distribuição granulométrica do ANG + ARMP 25-75%; (b) Curva da distribuição granulométrica do ANG + ARSM1 25-75%; (c) Curva da distribuição granulométrica do ANG + ARSM2 25-75%



Fonte: Autora (2025)

Todas as três curvas das misturas contendo ANG mais diferentes agregados, apresentam um ajuste estatístico bom, na figura 46 – b e c, com valores de R^2 próximos a 1, indicando que o modelo matemático utilizado se adequa bem aos dados experimentais. Na tabela 12 apresentam-se as porcentagens dos agregados das composições e valores de R^2 .

Tabela 12 - Proporção dos agregados nas composições e valores de R^2

Composições dos Agregados	Proporção das composições	Valor de R^2
ANF	100%	0,883
ANG	100%	0,926
ARMP	100%	0,953
ARSM1	100%	0,988
ARSM2	100%	0,970
ANF + ARMP	75-25%	0,897
ANF + ARSM1	75-25%	0,917
ANF + ARSM2	75-25%	0,921
ANG + ARMP	75-25%	0,934
ANG + ARSM1	75-25%	0,951
ANG + ARSM2	75-25%	0,941
ANF + ARMP	50-50%	0,920
ANF + ARSM1	50-50%	0,949
ANF + ARSM2	50-50%	0,932
ANG + ARMP	50-50%	0,941
ANG + ARSM1	50-50%	0,971
ANG + ARSM2	50-50%	0,953
ANF + ARMP	25-75%	0,939
ANF + ARSM1	25-75%	0,978
ANF + ARSM2	25-75%	0,954
ANG + ARMP	25-75%	0,939
ANG + ARSM1	25-75%	0,985
ANG + ARSM2	25-75%	0,962

Fonte: Autora (2025)

Pode-se observar nas figuras que os coeficientes de correlação não alcançaram seu valor máximo ($R^2 = 1$) em virtude da pequena quantidade de materiais utilizados nas misturas, um R^2 tão alto próximo de 1, significa que a curva se ajuste muito bem aos pontos experimentais, refletindo uma distribuição granulométrica bem caracterizada e controlada.

Em algumas composições como a ANF 100% obteve-se um R^2 no valor de 0,883; a ANG 100% $R^2 = 0,926$; ANF + ARMP 75-25% $R^2 = 0,897$; ANF + ARSM1 75-25% $R^2 = 0,917$; ANF + ARSM2 75-25% $R^2 = 0,921$; tiveram um índice de desvio de empacotamento maior, o que tem a necessidade de uma distribuição de partículas que promova um preenchimento eficiente dos vazios, a partir do que o valor teórico não se ajusta ao experimental.

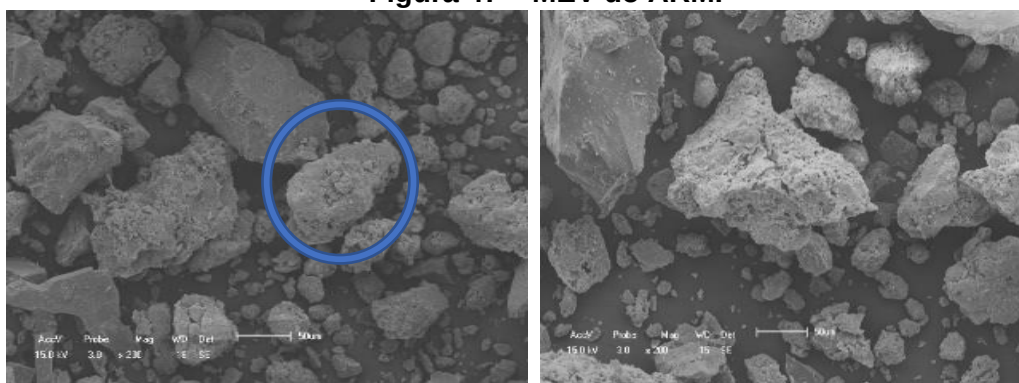
Portanto, na figura 40 – b e c ARSM1 100% e ARSM2 100% misturas de referência, obtiveram curvas com ótimo ajuste com o modelo teórico e o experimental,

e as misturas representadas ANF + ARSM1 25-75% e um $R^2 = 0,978$ e ANG + ARSM2 25-75% com $R^2 = 0,985$ foram as composições que apresentaram excelente concordância com o modelo teórico e os dados experimentais. Porém, é importante ressaltar que as demais misturas analisadas representadas no estudo, apesar de estarem bem representadas e se encaixarem adequadamente no modelo teórico, mostraram um desvio mínimo de empacotamento ideal, o que pode alterar tanto a composição quanto o resultado final.

6.1.5 ANÁLISE POR MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

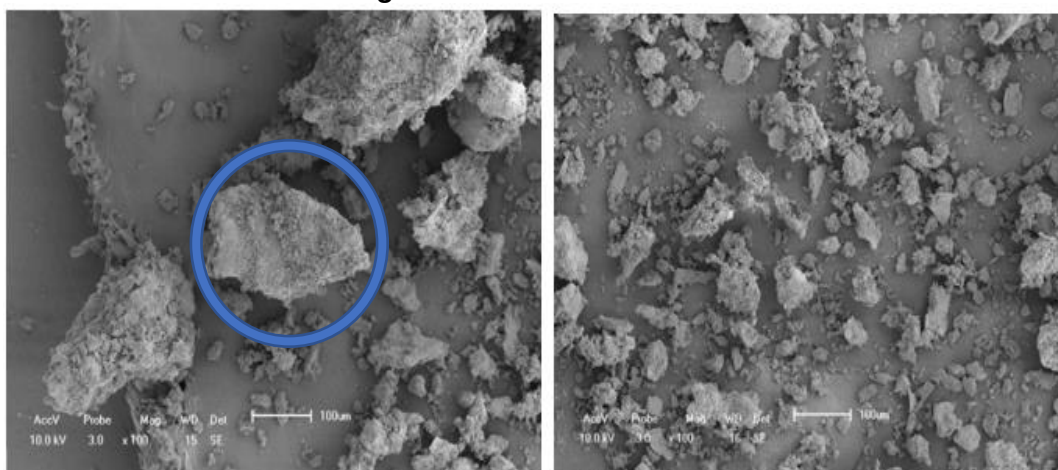
No presente trabalho, utilizando-se da técnica de MEV, foi estudada a morfologia da superfície das amostras dos agregados naturais, ANF e ANG e dos agregados reciclados, ARMP, ARSM2 e ARSM1 usados na produção de argamassa estrutural. Nas figuras 47 a 51 mostra-se a morfologia dos diferentes agregados.

Figura 47 – MEV do ARMP

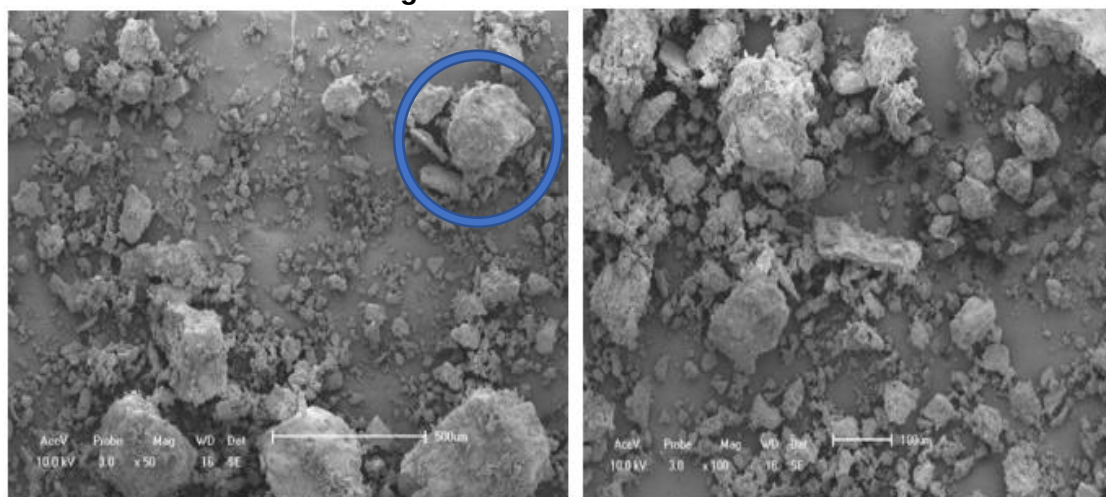


Fonte: Autora (2015)

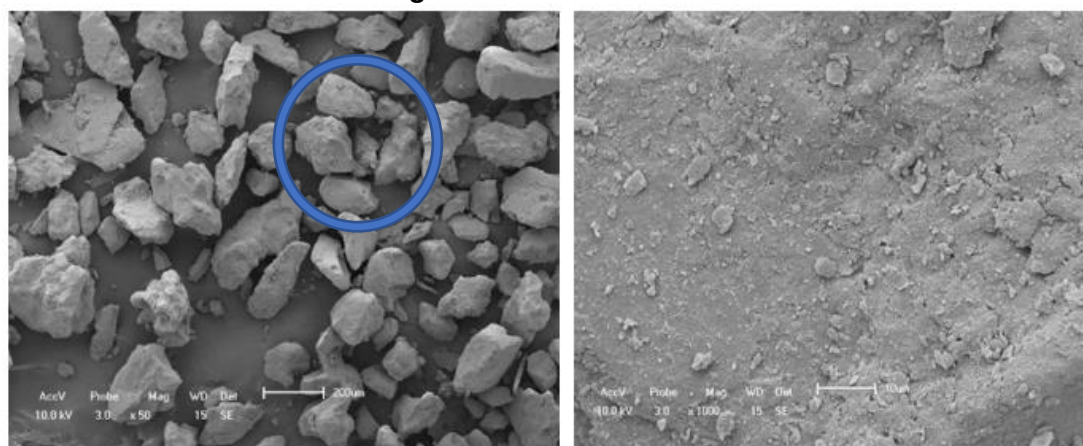
Figura 48 - MEV do ARMS2



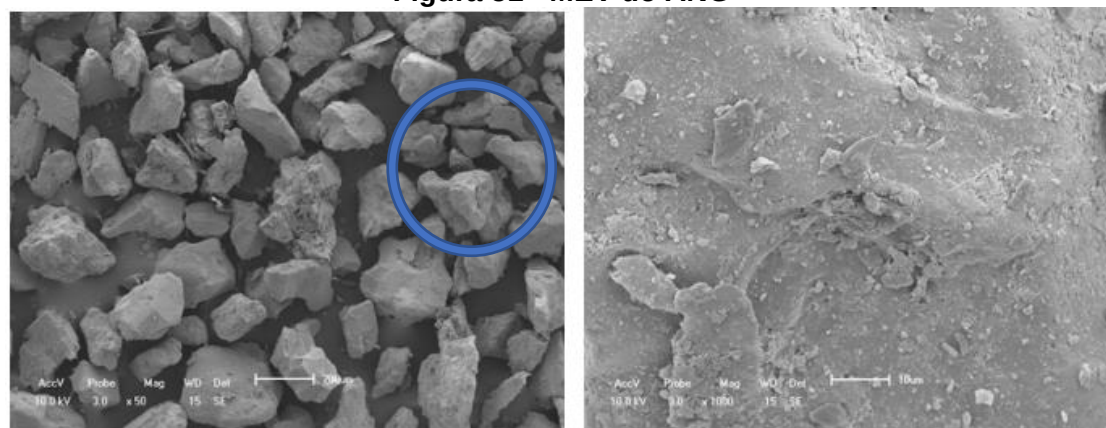
Fonte: Autora (2025)

Figura 49 - MEV do ARMS1

Fonte: Autora (2025)

Figura 50 - MEV do ANF

Fonte: Autora (2025)

Figura 51 - MEV do ANG

Fonte: Autora (2025)

As amostras dos agregados naturais ANF e ANG exibiram morfologia de partículas irregulares, ausentes de formas cristalinas muito visíveis e extremidades assimétricas. A análise granulométrica revelou dimensões significativamente inferiores ao potencial máximo, atribuível à elevada proporção de partículas na fração fina da amostra.

Em contrapartida, a análise microestrutural dos agregados reciclados ARMP, ARSM1 e ARSM2 demonstrou maior adesão de partículas à superfície porosa e áspera, associada a uma topografia porosa e de elevada rugosidade. A avaliação morfológica dos grãos evidenciou uma predominantemente de curvaturas arredondadas, dimensão longitudinais reduzidas e texturas superficiais de rugosidade moderada. Diante disso, a microestrutura desses agregados apresentou características intermediárias entre um material de porosidade aparente e um material de natureza densa conforme descrito na literatura por Ferreira (2019).

A análise da microestrutura dos agregados reciclados por microscopia eletrônica de varredura (MEV) em estudos prévios, como o de Limbachiya et al., (2007) apresenta característica uma superfície porosa e rugosa, além de presenças partículas de pasta de cimento aderidas, que corrobora as observações morfológicas realizadas nas amostras deste estudo.

6.1.6 DIFRAÇÃO DE RAIOS X (DRX)

O quadro 11 apresenta todas as fases detectadas nos espectros de DRX, sua identificação, composição química e em quais amostras elas estão presentes.

Quadro 11 - Composições químicas das amostras

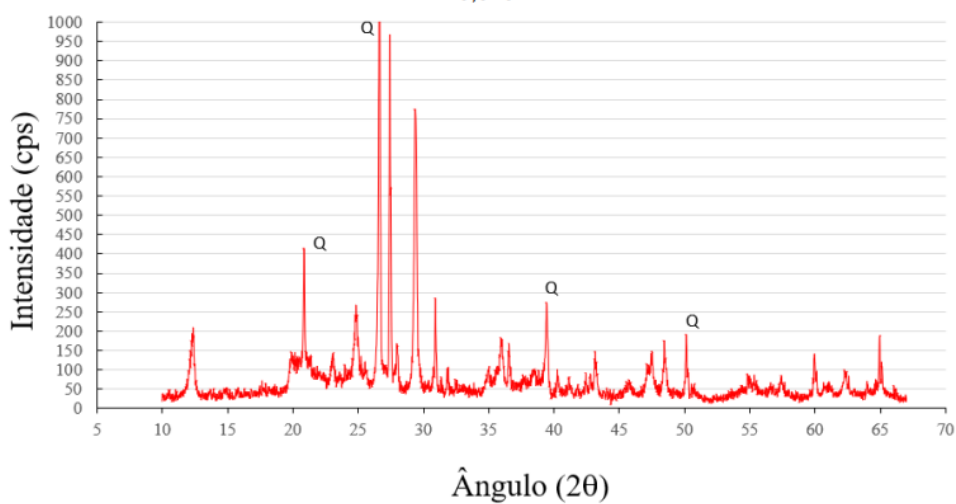
Fase	Nome	Composição Química	Amostras identificadas
1	Quartzo	SiO_2	ANF, ANG, ARSM1 e ARMS2
2	Aluminossilicato	Al_2SiO_5	ANF
3	Ortoclásio	$\text{K(Al,Fe)Si}_2\text{O}_8$	ANF e ARMS2
4	Feldspato Nefelina	NaAlSiO_4	ANF
5	Potássio	K	ANF
6	Espinélio 1	$\text{Mg}_{0,7}\text{Fe}_{0,23}\text{Al}_{1,97}\text{O}_4$	ANF

7	Hematita	Fe_2O_3	ANG e ARMS2
8	Feldspato Plagioclásio	$(\text{Ca},\text{Na})(\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_8$	ANG
9	Enstatita	MgSiO_3	ANG
10	Espinélio 2	$(\text{Mg}_{0,4}\text{Al}_{0,6})\text{Al}_{1,8}\text{O}_4$	ANG
11	Feldspato Kalsilita	KAlSiO_4	ANG
12	Sódio	Na	ARMS2 e ARMS1
13	Aluminossilicato de sódio	$\text{Na}_4\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_9$	ARMS2
14	Talco	$3\text{MgO} \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	ARMS1
15	Óxido de Cálcio	CaO	ARMS1
16	Montmorilonita	$\text{Al}_{2,66}\text{H}_{2,66}\text{O}_{12,66}\text{Si}_{3,67}$	ARMS1

Fonte: Autora (2025)

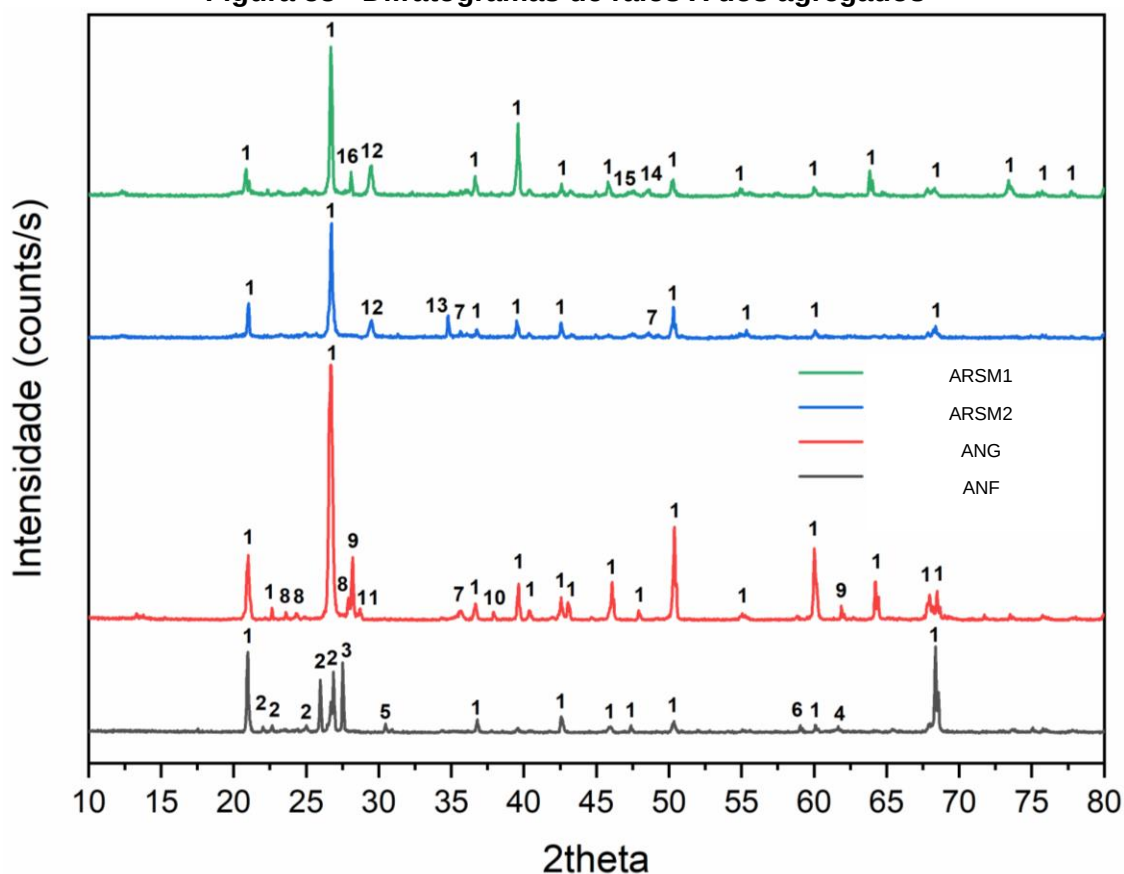
Nas figuras 52 e 53 são apresentados os difratogramas de raios X de todos os agregados.

Figura 52 - Difratogramas de raios X do ARMP



Fonte: Braskem (2023)

Figura 53 - Difratomogramas de raios X dos agregados



Fonte: Autora (2025)

Em virtude da natureza intrinsecamente heterogênea do material analisado, a investigação por difração de raios X (DRX) apresentou a um espectro diversificado de picos de difração. Em concordância com achados de (Marinoni, 2012 *apud* SOUZA *et al.*, 2021), a intensidade dos sinais detectados na difração de raios X (DRX) de um material fornece informações importantes sobre a organização atômica de seus constituintes minerais, amostras que exibem picos de difração de maior intensidade são indicativas de um arranjo cristalinos mais perfeito e com menor ocorrência de distorções em sua rede, essa elevada ordem estrutural geralmente se traduz em uma maior estabilidade do material, influenciando suas propriedades físico-químicas.

A caracterização por DRX identificou o quartzo (SiO_2) como as principais fases cristalinas presentes em todos os agregados. A reatividade potencial do quartzo, de maneira geral, pode ser associada à intensidade do ângulo de extinção ondulante e à deformação em sua estrutura cristalina, embora existam exceções a essa regra (POOLE, 1992; KIHARA, 1986 *apud* COUTO, 2008).

No que concerne aos agregados naturais, a análise apresentou a presença de distintos tipos de feldspatos, ortoclásio, feldspato nefelina e feldspato plagioclásio. Adicionalmente, detectou-se a presença de óxidos, como hematita (Fe_2O_3), nas amostras de areia grossa e ARSM2. Além disso, outros compostos, incluindo espinélios, enstatita, talco e montmorilonita, foram identificados em algumas das amostras avaliadas.

Em contrapartida, a avaliação das amostras de agregados reciclados evidenciou a existência de fases cristalinas como óxido de cálcio (CaO), alumina (Al_2O_3). Tais componentes, juntamente com a sílica (SiO_2) são frequentemente identificados em amostras de agregados reciclados por estarem associados à presença de cimento nos resíduos provenientes de estruturas de concretos e argamassas. Desta forma, constata-se que a composição desta amostra consiste em materiais reciclados provenientes de concreto e argamassa, e compostas principalmente por materiais provenientes de partículas de pasta de cimento endurecida e de agregados naturais, rochas naturais, cerâmicas vermelhas, entre outros.

Esses compostos cristalinos são tipicamente encontrados em estudos envolvendo o uso de agregado miúdo reciclado, conforme reportado por diversos autores (Toledo *et al.*, 2007; Limbachiya; Marrocchino; Koulouris, 2007).

6.1.7 PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS EM ESTADO FRESCO

Neste estudo, serão discutidos os resultados obtidos nas análises de consistência das argamassas elaboradas, os quais estão apresentados na tabela 13.

Tabela 13 - Propriedades físicas das argamassas produzidas

Formulações	Índice de Consistência (cm)	Massa Específica real (g/cm³)
100% ANF	30,93	1,59
100% ARSM1	23,62	1,95
100% ANG	32,17	1,86
100% ARSM2	27,58	1,21
100% ARMP	25,02	1,82
50%ANF+50%ARSM1	27,38	2,04
50%ANF+50%ARMP	27,61	1,46
50%ANG+50%ARMP	28,24	2,07
50%ANF+50%ARSM2	30,36	2,08
50%ANG+50%ARSM2	29,65	1,60
50%ANG+50%ARSM1	27,53	1,84
25%ANF+75%ARSM2	27,83	2,03
25%ANG+75%ARMP	27,18	2,03
25%ANF+75%ARMP	26,40	1,59
25%ANF+75%ARSM1	23,88	2,03
25% ANG+75%ARSM2	26,46	2,06
25% ANG+75%ARSM1	24,26	1,84
75%ANG+25%ARSM1	29,65	2,12
75% ANF+25% ARSM2	30,07	2,08
75%ANG+25%ARSM2	32,30	2,11
75%ANG+25%ARMP	30,19	2,12
75% ANF+25%ARSM1	26,81	2,06
75%ANF+25%ARMP	30,04	2,11

Fonte: Autora (2025)

A tabela 13 fornece informações fundamentais sobre o índice de consistência e a massa específica de cada composição analisada. Observa-se que a formulação com menor índice de consistência é aquela composta por 100% ARSM1, enquanto as composições com 75% ANG + 25% ARSM2 e 100% ANG apresentaram os maiores índices de consistência, com valores de 32,30 cm e 32,17 cm, respectivamente.

É importante ressaltar que todas as argamassas produzidas foram mantidas com uma relação a/c de 0,5. Ao manter essa relação constante em todas as formulações, garante-se uma condição de igualdade para a análise dos resultados de consistência e massa específica.

Ao analisar os resultados obtidos, nota-se que a faixa de variação da massa específica das composições está entre aproximadamente 1,21 g/cm³ e 2,12 g/cm³. As argamassas com massa específica real mais elevada, próximas de 2,12 g/cm³, podem ser consideradas as de melhor desempenho, pois indicam uma maior compacidade e

densidade do material, o que tende a se traduzir em melhores propriedades mecânicas. Essas argamassas mais densas geralmente apresentam uma menor porosidade e, conseqüentemente, uma maior resistência a esforços mecânicos, além de uma menor suscetibilidade a processos de deterioração.

Por outro lado, as argamassas com massa específica mais baixa, próximas de $1,21 \text{ g/cm}^3$, podem ser consideradas as de pior desempenho, uma vez que essa menor densidade sugere maior porosidade e, possivelmente, uma menor resistência mecânica, que é o caso da composição com 100% ARSM2, diferente da composição de 50 ANF + 50 ARMP que também obteve uma massa específica menor com valor de 1,46, porém com valores de resistência maior.

De acordo com a pesquisa conduzida por Silva (2024), foi constatado que as misturas com uma maior porcentagem de substituição de agregado miúdo natural por agregado reciclado tendem a apresentar uma menor massa específica. No entanto, no presente trabalho, as substituições com diferentes proporções de agregados naturais contradizem os resultados obtidos no estudo, uma vez que indicam que um aumento na taxa de substituição está diretamente relacionado a um aumento na massa específica, mas também está ligado ao empacotamento, quanto maior a porcentagem de agregado reciclado que é o caso desse estudo, as amostras de ARMP, ARSM1 e ARSM2 ficaram bem ajustadas com os valores teóricos.

6.1.8 PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS EM ESTADO ENDURECIDO

A avaliação das propriedades das argamassas em seu estado endurecido abrangeu os ensaios de resistência à compressão e resistência à tração na flexão aos 7, 14 e 28 dias.

Essa abordagem detalhada permitiu uma análise abrangente do desempenho dos diferentes tipos de argamassas em condições reais, evidenciando como a substituição dos agregados naturais por agregado reciclados afetou a resistência à compressão e a resistência à tração dos materiais ensaiados ao longo do tempo.

6.1.8.1 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

Os dados referentes à resistência à tração na flexão média, coletados nos intervalos de 7, 14 e 28 dias para as diferentes composições, estão disponíveis na tabela 14.

Tabela 14 - Valores de resistência à tração na flexão das argamassas produzidas

COMPOSIÇÃO	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO MÉDIA (MPa) 7 DIAS	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO MÉDIA (MPa) 14 DIAS	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO MÉDIA (MPa) 28 DIAS
ANF 100%	6,41	6,57	7,45
ARSM1 100%	6,03	6,69	7,68
ANF 75% +25% ARSM1	9,52	6,84	7,57
ANF 50% +50% ARSM1	7,03	7,33	6,82
ANF 25% +75% ARSM1	5,35	6,5	7,89
ANG 100%	6,15	6,56	7,23
ARSM1100%	6,03	6,69	7,68
ANG 75% +25% ASRM1	5,95	7,15	6,84
ANG 50% +50% ARSM1	5,85	6,96	7,94
ANG 25% +75% ARSM1	5,71	5,9	7,74
ANF 100%	6,57	6,57	7,45
ARMP 100%	6,11	6,11	5,96
ANF 75% +25% ARMP	5,54	5,54	7,28
ANF 50% +50% ARMP	5,8	5,8	6,82
ANF 25% +75% ARMP	6,52	6,52	6,6
ANG 100%	6,15	6,15	7,23
ARMP 100%	4,83	4,83	5,96
ANG 75% +25% ARMP	5,61	5,61	6,96
ANG 50% +50% ARMP	5,05	5,05	5,21
ANG 25% +75% ARMP	5,18	5,18	6,36
ANF 100%	6,41	6,57	7,45
ARSM2100%	5,58	6,35	6,7
ANF 75% +25% ARSM2	5,33	5,94	6,28
ANF 50% +50% ARSM2	5,13	6,05	6,97
ANF 25% +75% ARSM2	4,44	6,66	6,41
ANG 100%	6,15	6,56	7,23
ARSM2 100%	5,58	6,35	6,7
ANG 75% +25% ARSM2	4,6	5,29	6,67

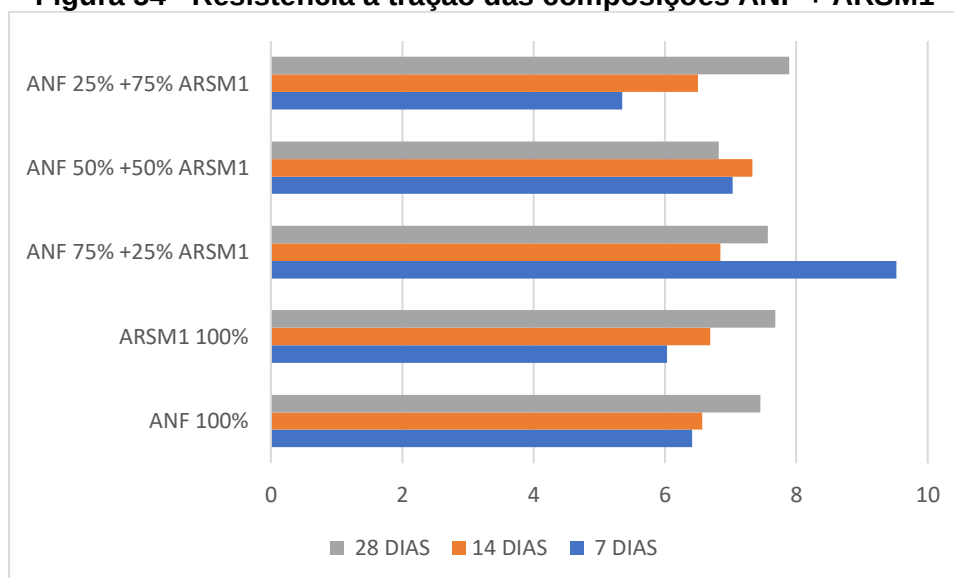
ANG 50% +50% ARSM2	4,2	6,77	8,01
ANG 25% +75% ARSM2	6,17	5,75	6,51

Fonte: Autora (2025)

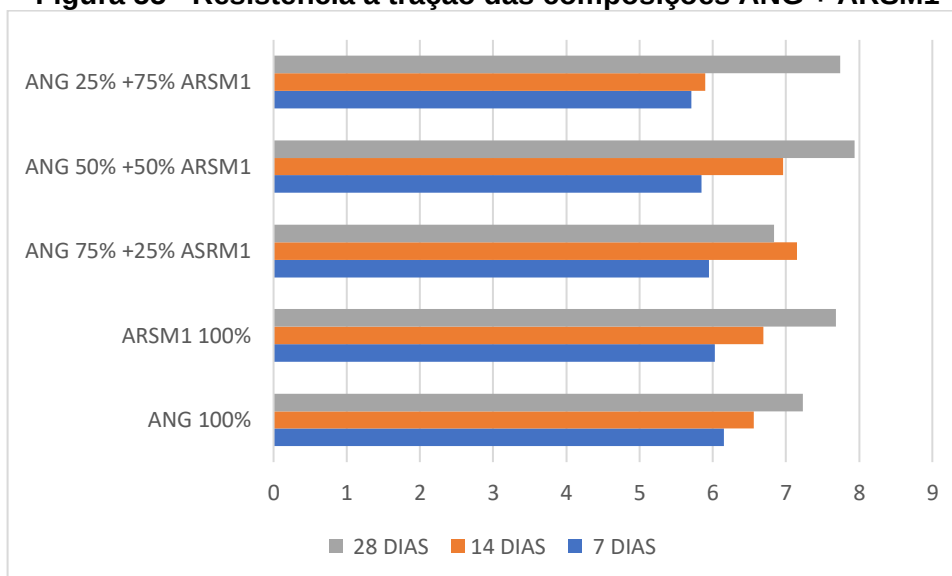
Foi realizado o cálculo do desvio absoluto máximo, que representa a discrepância entre a resistência média e a resistência individual que apresenta a maior variação em relação à média. Este procedimento visa assegurar que os resultados estejam em conformidade com as diretrizes estabelecidas pela NBR 13279 (ABNT, 2005). Os desvios absolutos máximos obtidos para todas as composições excederam o limite de 0,3 MPa determinado pela norma, indicando a não conformidade em todos os casos com a NBR 13279 (ABNT, 2005).

Com base nos dados apresentados na tabela 14, foram elaborados gráficos de barras para cada tipo de argamassas, visando a análise de tendências nos resultados dos ensaios. Essa abordagem técnica considera as diferentes composições de agregados, permitindo uma avaliação detalhada das propriedades mecânicas e comportamentais das argamassas em questão. Na figura 54 e 55 são apresentadas a resistência à tração das composições ANF + ARSM1 e ANG + ARSM1.

Figura 54 - Resistência à tração das composições ANF + ARSM1

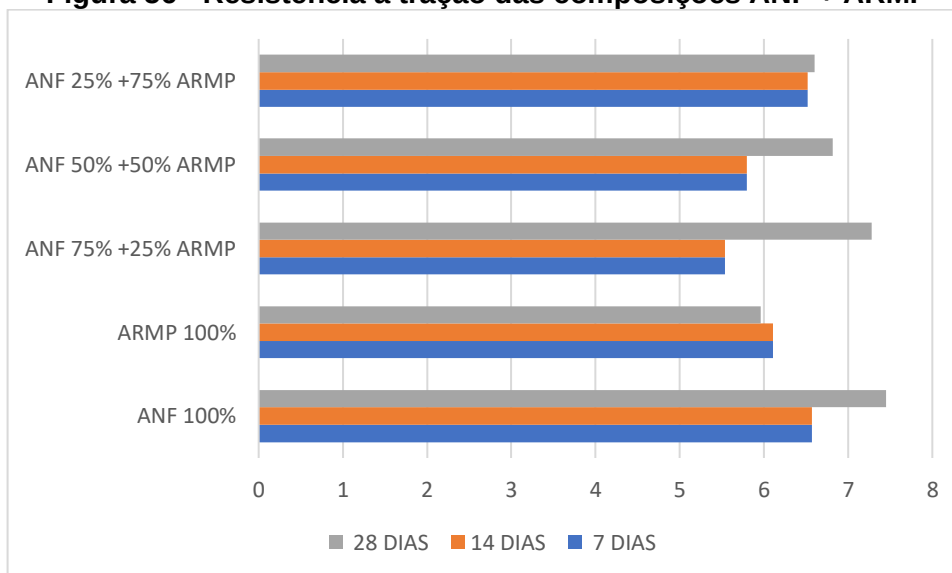


Fonte: Autora (2025)

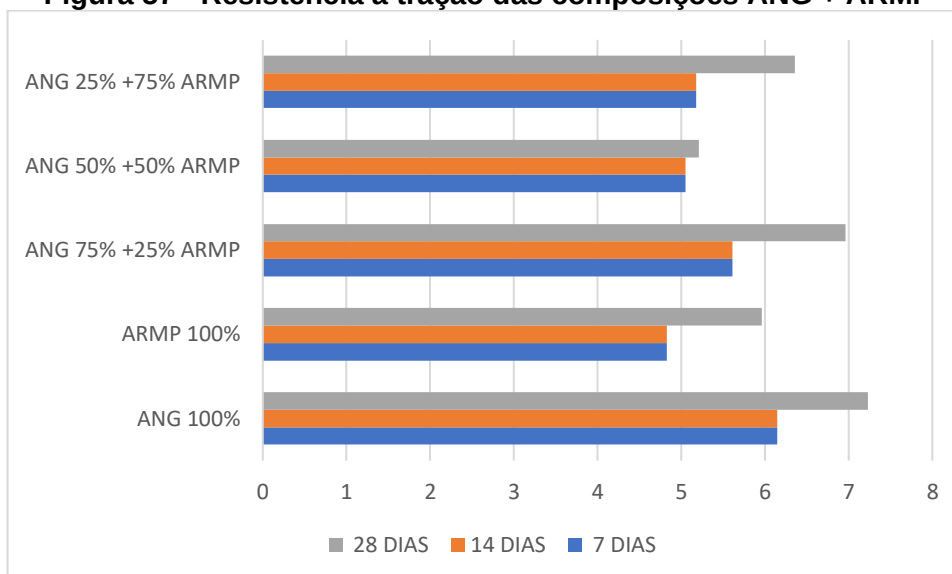
Figura 55 - Resistência à tração das composições ANG + ARSM1

Fonte: Autora (2025)

A composição “ANG 25% + 75% ARSM1” apresenta a maior resistência à tração na flexão média aos 28 dias, com 7,89 MPa para esta combinação de agregados. Com proporções mais altas de ARSM1, como em “ARSM1 100%” e “ANG 25% + 75% ARSM1”, a resistência tende a aumentar. A resistência geralmente cresce ao longo do tempo, com exceções, como a queda na resistência da composição “ANG 50% + 50% ARSM1” aos 28 dias. A composição “ANG 50% + 50% ARSM1” alcança a maior resistência aos 28 dias, com 7,94 MPa, dentre as argamassas com a mesma combinação. Na figura 56 e 57 são apresentadas as resistência à tração das diferentes idades das composições ANF + ARMP e ANG + ARMP.

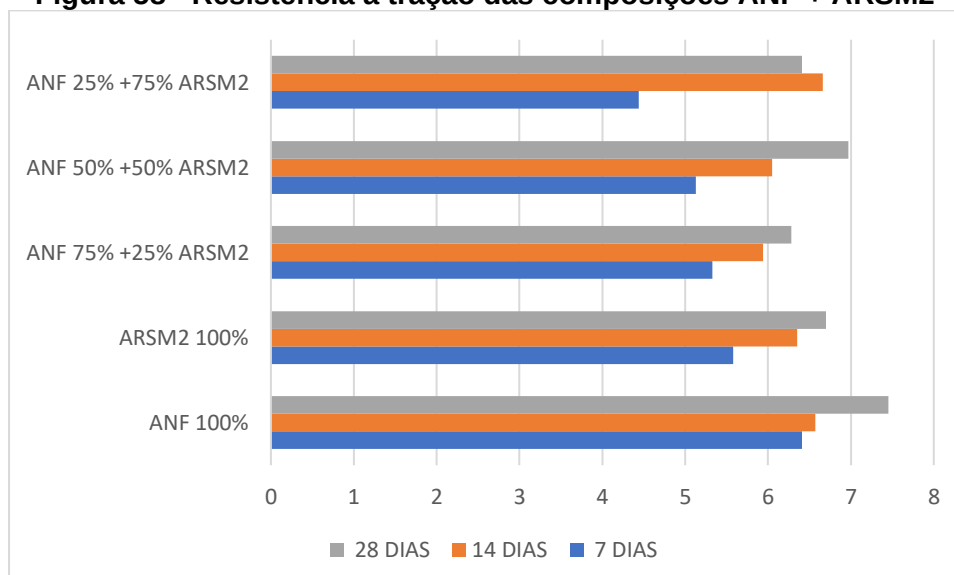
Figura 56 - Resistência à tração das composições ANF + ARMP

Fonte: Autora (2025)

Figura 57 - Resistência à tração das composições ANG + ARMP

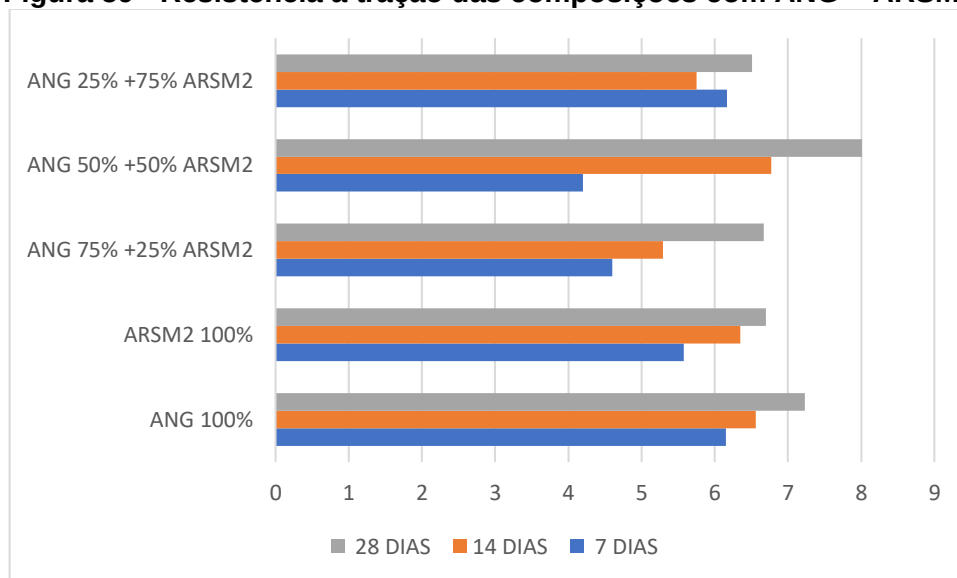
Fonte: Autora (2025)

A composição “ANF 100%”, apresenta a de maior resistência à tração aos 28 dias, atingindo 7,45 MPa. Em comparação, a composição com maior proporção de ARMP, como “ARMP 100%”, apresenta uma resistência à tração é menor, chegando a 5,96 MPa. A resistência se mantém estável ao longo do tempo (7, 14 e 28 dias), exceto em casos como “ANG 50% + 50% ARMP”, que mostra queda aos 28 dias. Conclui-se que a argamassa “ANF 100%” é a mais resistente, com 7,45 MPa aos 28 dias. Na figura 58 e 59 são apresentadas a resistência à tração das composições ANF + ARSM2 e ANG + ARSM2.

Figura 58 - Resistência à tração das composições ANF + ARSM2

Fonte: Autora (2025)

Figura 59 - Resistência à tração das composições com ANG + ARSM2



Fonte: Autora (2025)

A composição ANG 50% + 50% ARSM2 apresenta maiores resultados de resistência à tração na flexão média, com 8,01 MPa aos 28 dias, superando as demais composições analisadas. As comparações mostram que compostos com maior proporção de ARSM2 têm melhor desempenho do que aqueles com maior proporção de ANF. Composições intermediárias, com 50% de cada material, também têm resultados positivos. Em resumo, a composição ideal é a ANG 50% + 50% ARMG, que se destaca em todas as idades analisadas.

De acordo com Silva (2010), o aumento na resistência à tração das argamassas recicladas analisadas pode ser explicado pela diminuição da relação água/cimento efetiva, mesmo mantendo a quantidade de água da mistura constante.

6.1.8.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Os resultados de resistência à compressão são fundamentais para compreender a viabilidade e eficácia das substituições realizadas. A tabela 15 apresenta os dados da resistência à compressão em diferentes idades.

Tabela 15 - Dados da resistência à compressão das argamassas produzidas

Composição	Resistencia à compressão aos 7 dias	Resistência à compressão aos 14 dias	Resistência à compressão aos 28 dias
ANF 100%	22,56	25,31	26,42
ANF 75% +25% ARMP	18,92	22,79	26,63
ANF 50% +50% ARMP	22,85	26,61	26,39
ANF 25% +75% ARMP	19,50	23,97	24,19
ARMP 100%	20,66	21,55	24,85
ANF 75% +25% ARSM2	19,41	22,29	29,75
ANF 50% +50% ARSM2	18,33	23,54	35,51
ANF 25% +75% ARSM2	13,83	21,21	28,31
ARSM2100%	20,67	19,51	21,29
ANF 75% +25% ARSM1	39,78	28,13	34,04
ANF 50% +50% ARSM1	20,91	35,05	29,59
ANF 25% +75% ARSM1	19,37	23,38	29,04
ARSM1100%	24,22	31,31	29,74
ANG 100%	23,13	26,69	34,97
ANG 75% +25% ARMP	22,4	22,25	29,12
ANG 50% +50% ARMP	19,11	27,66	23,56
ANG 25% +75% ARMP	18,47	22,85	25,73
ARSM2 100%	20,67	19,51	21,29
ANG 75% +25% ARSM2	19,8	26,88	32,2
ANG 50% +50% ARSM2	16	29,43	31,68
ANG 25% +75% ARSM2	22,29	24,72	18,9
ARSM2 100%	20,67	19,51	21,29
ANG 100%	23,13	29,69	34,97
ANG 75% +25% ASRM1	22,95	29,1	27,25
ANG 50% +50% ARSM1	26,24	29,19	31,72
ANG 25% +75% ARSM1	19,05	22,87	34,79

Fonte: Autora (2025)

A tabela 16 apresenta as análises do modelo sequencial somas dos quadrados das resistências à compressão de ANG + ARMP.

Tabela 16 – Modelo sequencial das somas dos quadrados dos resultados de resistência à compressão das argamassas ANG + ARMP

Resistência à compressão	Fonte	Soma dos Quadrados	df	Quadrado Médio	Valor de F	Valor de P	
7 Dias	Modelo	15.92	3	5.31	14.68	0.1890	Não significativa
	⁽¹⁾ Mistura Linear	7.87	1	7.87	21.77	0.1344	
	AB	5.15	1	5.15	14.24	0.1649	
	AB(A-B)	2.91	1	2.91	8.04	0.2159	
	Residual	0.3614	1	0.3614			
	Cor Total	16.28	4				
14 Dias	Modelo	9.37	1	9.37	1.31	0.3353	Não significativa
	⁽¹⁾ Mistura Linear	9.37	1	9.37	1.31	0.3353	
	Residual	21.45	3	7.15			
	Cor Total	30.82	4				
28 Dias	Modelo	9.37	1	9.37	1.31	0.3353	Não significativa
	⁽¹⁾ Mistura Linear	9.37	1	9.37	1.31	0.3353	
	Residual	21.45	3	7.15			
	Cor Total	30.82	4				

Fonte: Autora (2025)

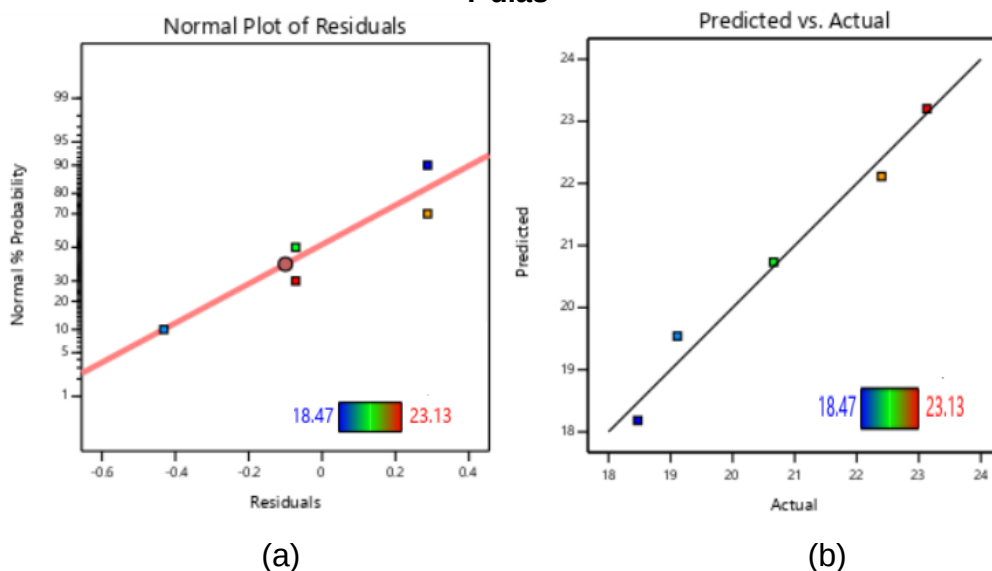
Para a resistência à compressão aos 7 dias, O modelo apresenta um valor F do modelo de 14,68, o que implica que o modelo não é significativo em relação ao ruído. Há uma chance de 18,90% de que um valor F tão grande possa ocorrer devido ao ruído. Valores P inferiores a 0,0500 indicam que os termos do modelo são estatisticamente significativos, enquanto valores superiores a 0,1000 indicam que os termos do modelo não são significativos. Já para a resistência à compressão aos 14 dias, a análise de variância mostra que há muitos termos de modelo que não são significativos, o que dificulta a identificação do modelo mais adequado para representar o comportamento nessa idade. A análise do ajuste para a resistência à compressão aos 28 dias, apresenta um valor F do modelo de 1,31. Isso implica que o modelo não é estatisticamente significativo em relação ao ruído presente nos resultados experimentais, havendo uma probabilidade de 33,53% de que um valor F tão baixo quanto 1,31 possa ocorrer apenas devido a flutuações aleatórias, e não por conta da adequação do modelo em representar o fenômeno. A tabela 17 demonstra os coeficientes em termos de fatores codificados.

Tabela 17 - Coeficientes em termos de fatores codificados de ANG + ARMP

Resistência à compressão	Componente	Estimativa de coeficiente	df	Erro padrão	95% CI Baixo	95% CI Alto	VIF
7 dias	A-ANG	23.20	1	0.5969	15.62	30.79	1.85
	B-ARMP	20.73	1	0.5969	13.15	28.32	1.85
	AB	-9.70	1	2.57	-42.37	22.96	2.43
	AB(A-B)	14.37	1	5.07	-50.04	78.79	1.25
14 dias	A-ANG	26.14	1	2.07	19.54	32.73	1.13
	B-ARMP	22.26	1	2.07	15.67	28.86	1.13
28 dias	A-ANG	34.90	1	1.61	27.97	41.83	1.66
	B-ARMP	25.44	1	1.61	18.51	32.37	1.66
	AB	-20.19	1	7.32	-51.68	11.29	2.43

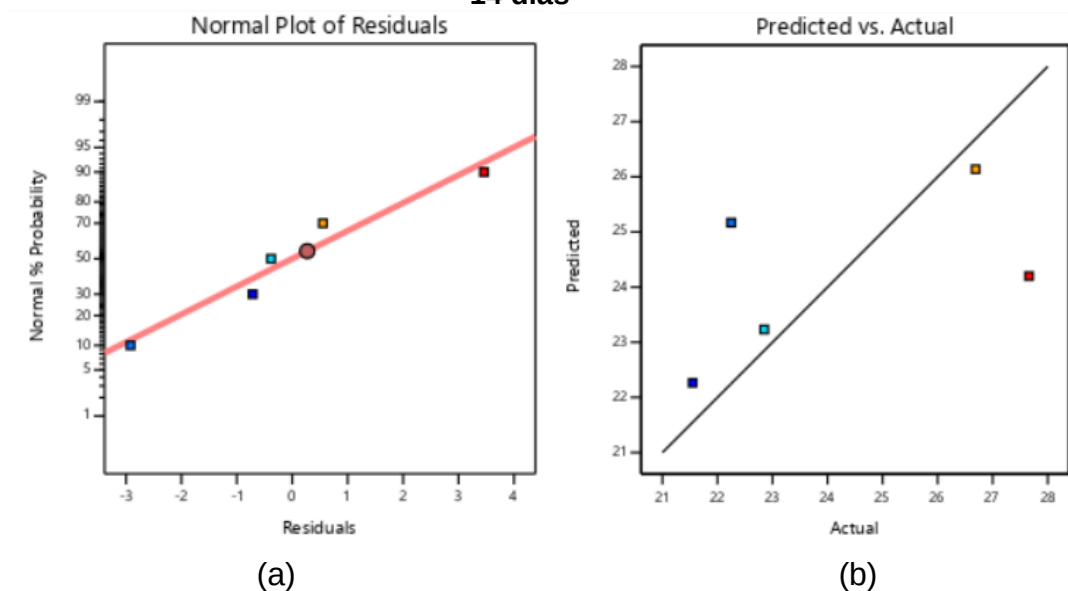
Fonte: Autora (2025)

A estimativa do coeficiente representa a mudança esperada na resposta por mudança unitária no valor do fator quando todos os fatores restantes são mantidos constantes. A interceptação em um projeto ortogonal é a resposta média geral de todas as execuções. Os coeficientes são ajustes em torno dessa média com base nas configurações dos fatores. Quando os fatores são ortogonais o fator de inflação da variância (VIFs) são 1; VIFs maiores que 1 indicam multicolinearidade; quanto maior o VIF, mais grave é a correlação dos fatores. Como regra geral, VIFs inferiores a 10 são toleráveis. Os gráficos de resíduos são mostrados nas figuras 60, 61 e 62.

Figura 60 – Gráfico normal de resíduos; previsto vs. real da composição ANG + ARMP 7 dias

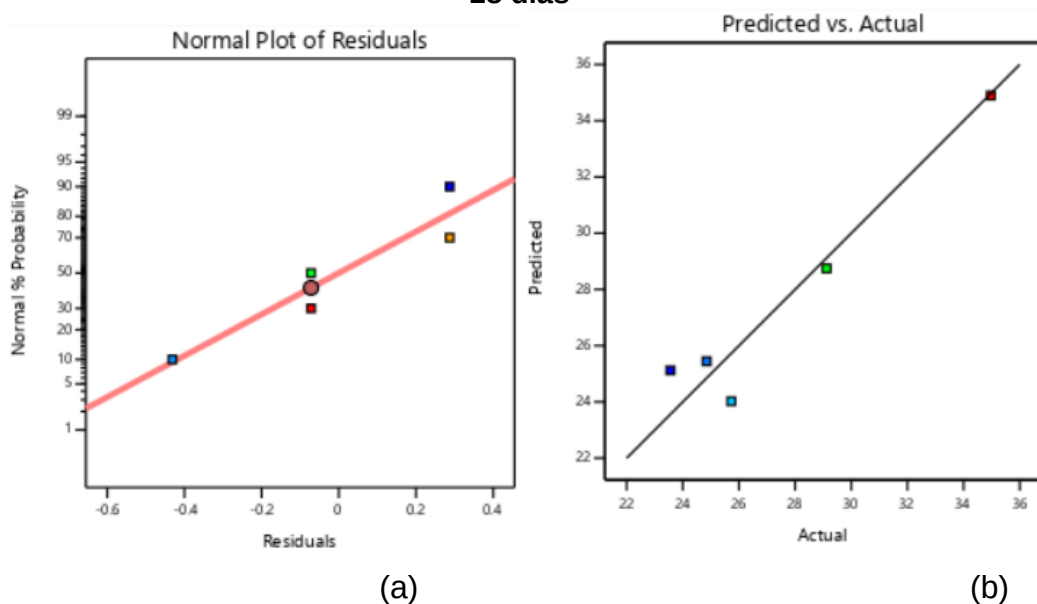
Fonte: Autora (2025)

Figura 61 - Gráfico normal de resíduos; previsto vs. real da composição ANG + ARMP 14 dias



Fonte: Autora (2025)

Figura 62 - Gráfico normal de resíduos; previsto vs. real da composição ANG + ARMP 28 dias



Fonte: Autora (2025)

As figuras apresentam uma análise detalhada dos resíduos da resistência à compressão aos 7, 14 e 28 dias, respectivamente. Esse tipo de análise é importante para avaliar a qualidade do ajuste do modelo estatístico utilizado para prever a resistência à compressão.

O gráfico de probabilidade normal (a) relaciona os resíduos com os valores normais previstos. Nesse tipo de gráfico, espera-se que os pontos fiquem próximos à

curva normal, indicando que os resíduos seguem uma distribuição normal. Nas três figuras, observa-se que a maioria dos pontos está próxima da curva normal, com apenas alguns pontos um pouco afastados, principalmente no gráfico referente aos 14 dias. O gráfico anterior vs atual mostra uma distribuição aleatória dos pontos em torno de zero, indicando a ausência de tendências sistemáticas nos resíduos.

Portanto, a análise conjunta desses dois gráficos de resíduos sugere que o modelo estatístico utilizado para prever a resistência à compressão aos 7, 14 e 28 dias apresenta um bom ajuste aos dados, especialmente no modelo estatístico aos 7 dias, com distribuição normal dos resíduos e ausência de tendências sistemáticas. as figuras 63 e 64 apresenta as misturas dos dois componentes.

Figura 63 – mistura de dois componentes 7 e 14 dias

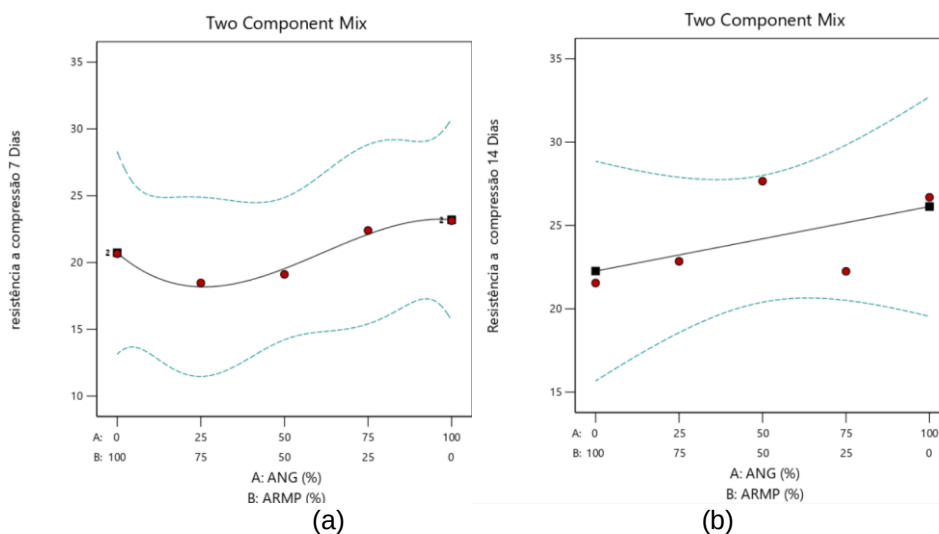
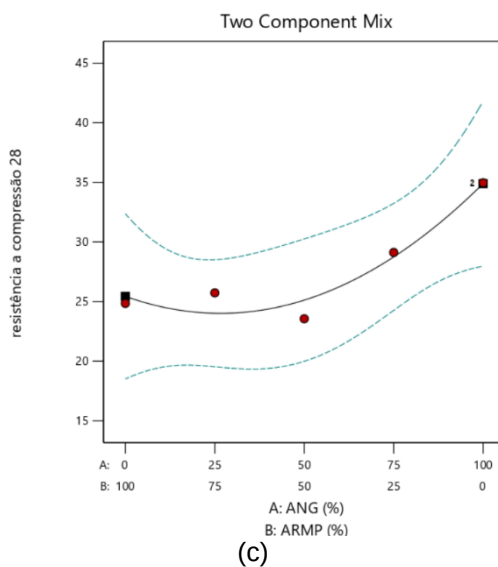


Figura 64 - mistura de dois componentes 28 dias



Fonte: Autora (2025)

O gráfico apresenta um padrão de contorno que indica as regiões de diferentes valores de resistência à compressão. As linhas de contorno representam os valores previstos da resistência à compressão, as linhas pontilhadas representam o intervalo de confiança de 95% em torno de valores previstos. A curva parábola indica que existe uma composição ótima da mistura dos dois componentes (A e B) que maximiza a resistência à compressão. Essa composição ótima parece estar entre todas as composições possíveis de ambos agregados.

A resistência à compressão aos 7 dias, na composição de 50 ANG + 50 ARMP apresentou um aumento gradativo na primeira idade. No entanto, entre 14 e 28 dias, houve uma diminuição de resistência à compressão, passando de 27,66 MPa aos 14 dias e 23,56 MPa aos 28 dias.

Por outro lado, a composição de 75 ANG + 25 ARMP obteve um bom resultado, alcançando 22,40 MPa aos 7 dias. Essa resistência se manteve aos 14 dias, chegando a 29,12 MPa aos 28 dias. Nas demais composições, observa-se um comportamento similar, com variações na resistência à compressão ao longo dos diferentes períodos de cura. A composição ótima está entre 50-75% de ANG e 25-50% de ARMP, conforme indicado nos gráficos.

É importante ressaltar que a resistência à compressão não apresenta um aumento significativo entre 14 e 28 dias, sugerindo que o período ideal de cura pode ser de 14 dias, sem ganhos expressivos ao se estender para 28 dias.

Análises da combinação ANF + ARMP

A tabela 18 representa do modelo sequencial das somas dos quadrados das composições ANF + ARMP.

Tabela 18 - Modelo sequencial das somas dos quadrados dos resultados de resistência à compressão das argamassas ANG + ARMP

Resistência à compressão	Fonte	Soma dos quadrados	df	Quadrado médio	Valor de F	Valor de P	
7 dias	Modelo	1.42	2	0.7106	0.1283	0.8863	Não significativo
	⁽¹⁾ Mistura Linear	1.04	1	1.04	0.1872	0.7074	
	AB	0.3845	1	0.3845	0.0694	0.8168	
	Residual	11.07	2	5.54			
	Cor Total	12.50	4	4.02	1.01	0.3894	
14 dias	Modelo	4.02	1	4.02	1.01	0.3894	Não significativo

	⁽¹⁾ Mistura Linear	4.02	1	3.99			
	Residual	11.97	3				
	Cor Total	15.99	4				
28 dias	Modelo	3.11	1	3.11	5.34	0.1039	Não significativo
	⁽¹⁾ Mistura Linear	3.11	1	3.11	5.34	0.1039	
	Residual	1.75	3	0.5828			
	Cor Total	4.86	4				

Fonte: Autora (2025)

Na análise da resistência à compressão ao longo de diferentes períodos de tempo, verificou-se que o modelo utilizado não demonstrou significância estatística nos sete dias iniciais, evidenciado por um valor de F de 0,1283 e uma probabilidade de 88,63% de que as observações estejam ligadas a flutuações aleatórias. Tanto o termo “Mistura Linear” quanto o fator “AB” e o resíduo não apresentaram relevância estatística, com níveis de significância superiores a 0,10.

Ao completar 14 dias, a situação se manteve similar, com o modelo geral não alcançando significância estatística, revelando um valor de F de 1,01 e uma probabilidade de 38,94% de que os resultados sejam meramente por conta de variações aleatórias. Mais uma vez, o termo “Mistura Linear” não se mostrou estatisticamente relevante.

Por fim, no contexto de 28 dias, apesar de um valor de F de 5,34, o modelo utilizado não atingiu significância estatística, com uma probabilidade de 10,39% de que os resultados sejam aleatórios. Da mesma forma que nas etapas anteriores, o termo “Mistura Linear” não apresentou relevância estatística, enquanto o termo residual exibiu alta variabilidade, dificultando a adequação do modelo. A tabela 19 representa os termos de fatores.

Tabela 19 - Coeficientes em termos de fatores codificados de ANF + ARMP

Resistência à compressão	Componente	Estimativa de coeficiente	df	Erro padrão	95% CI Baixo	95% CI Alto	VIF
7 dias	A-ANF	21.87	1	2.21	12.34	31.40	1.66
	B-ARMP	20.59	1	2.21	11.06	30.11	1.66
	AB	-2.65	1	10.06	-45.95	40.64	2.43
14 dias	A-ANF	25.31	1	1.55	20.39	30.24	1.13
	B-ARMP	22.78	1	1.55	17.85	27.70	1.13
28 dias	A-ANF	26.81	1	0.5913	24.93	28.69	1.13
	B-ARMP	24.58	1	0.5913	22.70	26.46	1.13

Fonte: Autora (2025)

A tabela 19 apresenta os coeficientes em termos de fatores codificados para a resistência à compressão em diferentes idades. Para a resistência aos 7 dias, o componente A-ANF, B-ARMP são nomenclaturas utilizadas na tabela para representar diferentes componentes ou fatores que foram analisados em um estudo. A-ANF apresenta uma estimativa de coeficiente de 21,87, com intervalo de confiança de 95% entre 13,34 e 31,40, enquanto o componente B-ARMP apresenta uma estimativa de 20,59, com intervalo de confiança de 95% entre 11,06 e 30,11. O termo da interação AB apresenta um coeficiente negativo de -2,65, com intervalo de confiança de 95% entre -45,95 e 4,64.

Aos 14 dias, o componente A-ANF apresenta uma estimativa de coeficiente de 25,31, com intervalo de confiança de 95% entre 20,39 MPa e 30,24 MPa, e o componente B-ARMP apresenta uma estimativa de 22,78, com intervalo de confiança de 95% entre 17,85 e 27,70. Aos 28 dias, o componente A-ANF apresenta uma estimativa de coeficiente de 26,81, com intervalo de confiança de 95% entre 24,93 e 28,69, e o componente B-ARMP apresenta uma estimativa de 24,58, com intervalo de confiança de 95% entre 22,70 e 26,46. Os fatores de inflação da variância (VIFs) são 1; VIFs maiores que 1 indicam multicolinearidade, sugerindo uma correlação mais forte entre os fatores. As figuras 65, 66 e 67 apresenta os gráficos de resíduos.

Figura 65 - Gráfico normal de resíduos; previsto vs. real da composição ANF + ARMP 7 dias

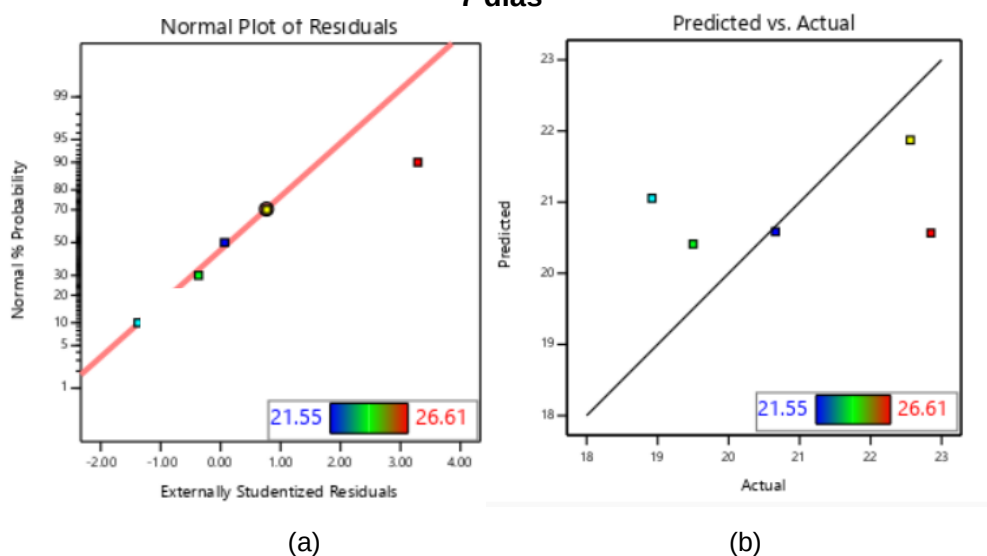


Figura 66 - Gráfico normal de resíduos; previsto vs. real da composição ANF + ARMP 14 dias

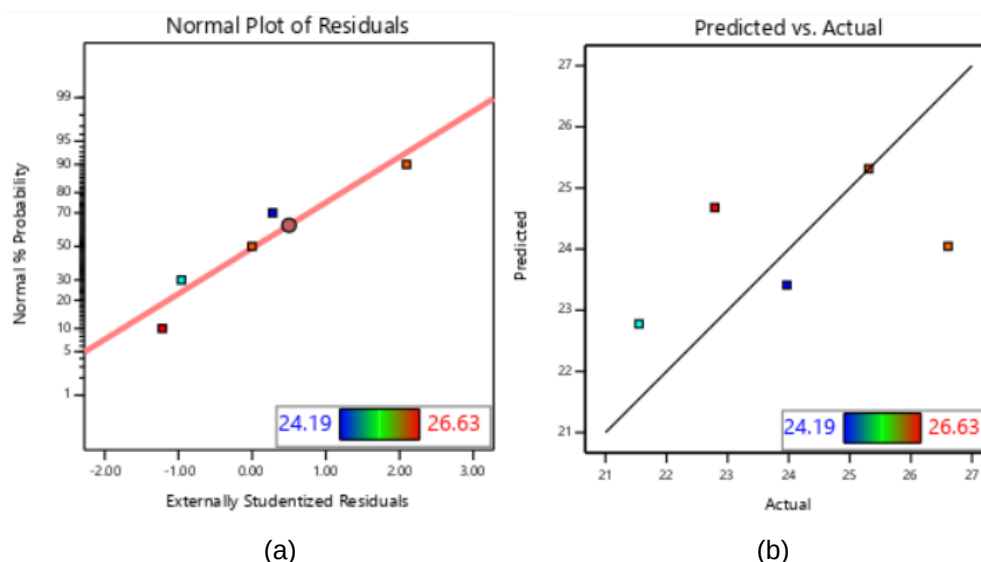
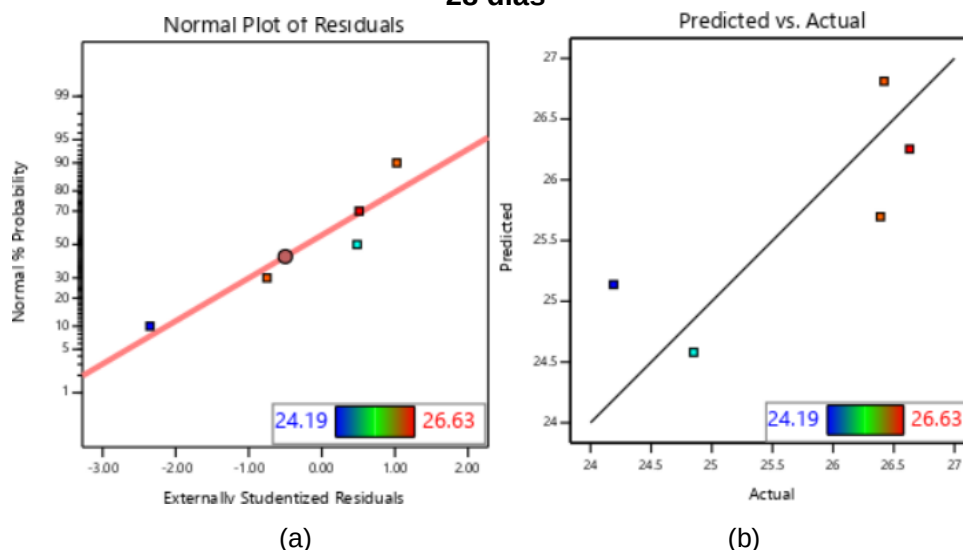


Figura 67 - Gráfico normal de resíduos; previsto vs. real da composição ANF + ARMP 28 dias



Fonte: Autora (2025)

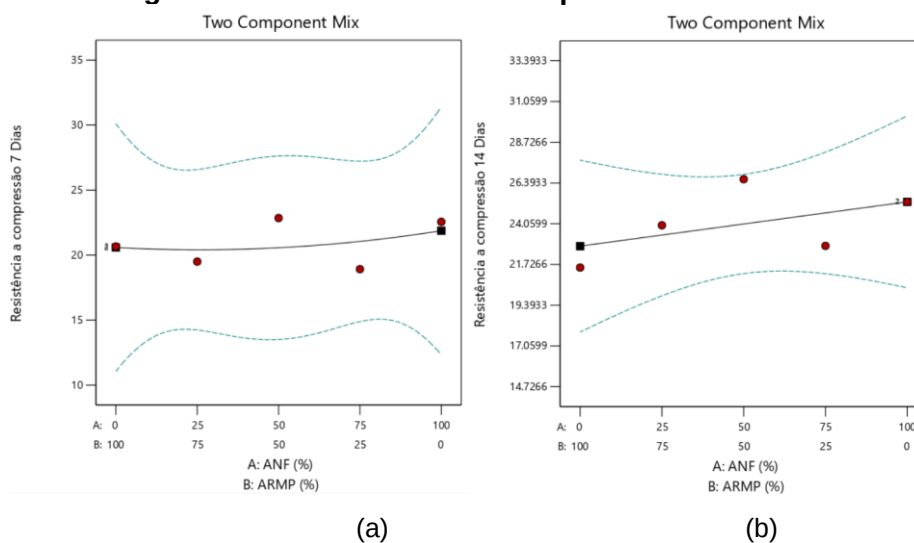
Na representação gráfica do plot normal dos resíduos, destinada aos períodos de 7 (Figura 65), 14 dias (Figura 66), é possível observar que os resíduos externamente padronizados apresentam uma distribuição que se aproxima da normalidade. Esse padrão sugere que os pressupostos subjacentes ao modelo de regressão foram satisfeitos em todas as situações avaliadas.

Ao analisar os gráficos de previsto vs atual, observa-se uma boa correlação entre os valores previstos pelos modelos e os valores reais observados. Os pontos se alinham próximos à linha de referência, tanto para os 7 dias (Figura 65), 14 dias (Figura 66) quanto 28 dias (Figura 67), demonstrando a capacidade dos modelos em fazer previsões confiáveis.

Comparando os valores previstos e observados, na figura 65 (7 dias) os valores previstos são 21,55 e 26,61 na figura 66 (14 dias) os valores previstos são 24,19 e 26,63, e na figura 67 (28 dias) os valores previstos são 24,19 e 26,63. Em todos os casos, os valores reais observados são próximos a esses valores previstos.

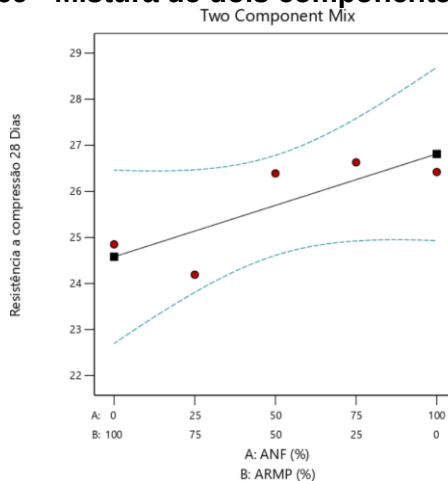
Portanto, os modelos apresentados nas três figuras demonstram um bom ajuste aos dados, com resíduos normalmente distribuídos e boa correlação entre os valores previstos e observados, tanto aos 7 dias quanto aos 14 e 28 dias. Isso indica que esses modelos são capazes de fazer previsões confiáveis para a resposta (resistência à compressão) em função dos fatores A-ANF e B-ARMP, independentemente do período de análise considerado. As figuras 68 e 69 apresentadas são dos componentes de 7, 14 e 28 dias.

Figura 68 - mistura de dois componentes 7 dias e 14 dias.



Fonte: Autora (2025)

Figura 69 - Mistura de dois componentes 28 dias



(c)

Fonte: Autora (2025)

Na figura 68, referente aos períodos de 7 a 14 dias, verifica-se que a resistência à compressão aumenta à medida que os valores de ANF e ARMP também aumentam. Os gráficos apresentam um padrão semelhante, com a resistência atingindo valores máximos próximos a 25% de ANF e 75% ARMP. Já na figura 69, apresenta a mistura de componentes aos 28 dias, observa-se um padrão análogo, com o aumento da resistência à compressão à medida que os valores de ANF se aproximam de 75%. Neste caso, a resistência máxima é alcançada com valores próximo a 75 % de ANF e ARMP.

Comparando os diferentes períodos, nota-se que a resistência à compressão aumenta com o decorrer do tempo, com valores mais altos sendo registrados aos 28 dias. Isso sugere que a melhor composição para obter a maior resistência à compressão é com 75% de ANF e 25% de ARMP. Isso quer dizer que o modelo tem a capacidade de prever a resistência com base na composição da mistura e no tempo de cura.

Análise das argamassas ANG + ARSM2.

Análises das argamassas ANG + ARSM2, na tabela 20 apresenta o modelo sequencial das somas dos quadrados.

Tabela 20 - Modelo sequencial das somas dos quadrados dos resultados de resistência à compressão das argamassas ANG + ARSM2

Resistência à compressão	Fonte	Soma dos quadrados	df	Quadrados médio	Valor de F	Valor de P	
7 dias	Modelo	0.5905	1	0.5905	0.0586	0.8243	Não significativo
	⁽¹⁾ Mistura Linear	0.5905	1	0.5905	0.0586	0.8243	
	Residual	30.22	3	10.07			
	Cor Total	30.82	4				
14 dias	Modelo	50.72	1	50.72	7.93	0.0670	Não significativo
	⁽¹⁾ Mistura Linear	50.72	1	50.72	7.93	0.0670	
	Residual	19.19	3	6.40			
	Cor Total	69.90	4				
28 dias	Modelo	165.32	1	165.32	11.78	0.0415	significativo
	⁽¹⁾ Mistura Linear	165.32	1	165.32	11.78	0.0415	
	Residual	42.09	3	14.03			
	Cor Total	207.41	4				

Fonte: Autora (2025)

No modelo de 7 dias, observa-se um valor – F notavelmente baixo de 0,06, acompanhado de um valor – p expressivamente alto de 82,43% indicando que o modelo não é significativo em relação ao ruído, sugerindo a necessidade de reestruturação do modelo através da eliminação de variáveis independentes não significativas. O modelo de 14 dias apresenta uma melhoria substancial em seus indicadores estatísticos. Com um valor – F de 7,93 e um valor – p de 6,70%, este modelo demonstra um poder explicativo consideravelmente superior ao modelo de 7 dias. Embora o valor – p ainda esteja ligeiramente acima do limiar convencional de 5%, a proximidade com este valor sugere que o modelo possui termos significativos, ainda que possam existir variáveis que não contribuem significativamente para o poder preditivo do modelo.

O modelo de 28 dias emerge como o mais robusto estatisticamente, apresentando um valor- F de 11,78 e um valor – p de 4,15%. Estes parâmetros indicam uma significância estatística satisfatória, com o valor – p situando-se abaixo do nível crítico de 5%. Esta configuração sugere que o modelo possui um poder explicativo significativo e que suas variáveis independentes contribuem de maneira relevante para a capacidade preditiva do modelo. A tabela 21 apresenta os coeficientes em termos de fatores codificados.

Tabela 21 - Coeficientes em termos de fatores codificados ANG + ARSM2

Resistência à compressão	Componente	Estimativa de coeficiente	df	Erro Padrão	95% CI Baixo	95% CI Alto	VIF
7 dias	A-ANG	20.86	1	2.46	13.04	28.69	1.13
	B-ARMG	19.89	1	2.46	12.07	27.72	1.13
14 dias	A-ANG	30.55	1	1.96	24.32	36.78	1.13
	B-ARMG	21.54	1	1.96	15.31	27.78	1.13
28 dias	A-ANG	35.94	1	2.90	26.71	45.17	1.13
	B-ARMG	19.68	1	2.90	10.44	28.91	1.13

Fonte: Autora (2025)

A análise estatística apresentada na tabela 21 apresenta a correlação entre resistência à compressão e os componentes A-ANG e B-ARSM2, avaliados em períodos de 7, 14 e 28 dias. Os dados contemplam coeficientes estimados, graus de liberdade (df=1), erro padrão e intervalos de confiança de 95%.

Os coeficientes representam a variação unitária na resposta do fator, onde a intercepção em projetos ortogonais indica a resposta média global. A análise do fator de inflação da variância (VIF) demonstra ortogonalidade quando VIF = 1, sendo que

VIF>1 indica multicolinearidade. Os valores obtidos, inferiores a 10, validam estatisticamente o modelo.

A correlação estabelecida entre os componentes e a resistência à compressão associada aos baixos índices de VIF, fundamenta a confiabilidade do modelo preditivo, permitindo uma análise precisa da influência de cada componente no desenvolvimento da resistência mecânica ao longo do tempo especificado. Na figura 70, 71 e 72 são apresentados os gráficos dos resíduos.

Figura 70 - Gráfico normal de resíduos; previsto vs. real da composição ANG + ARSM2 7 dias

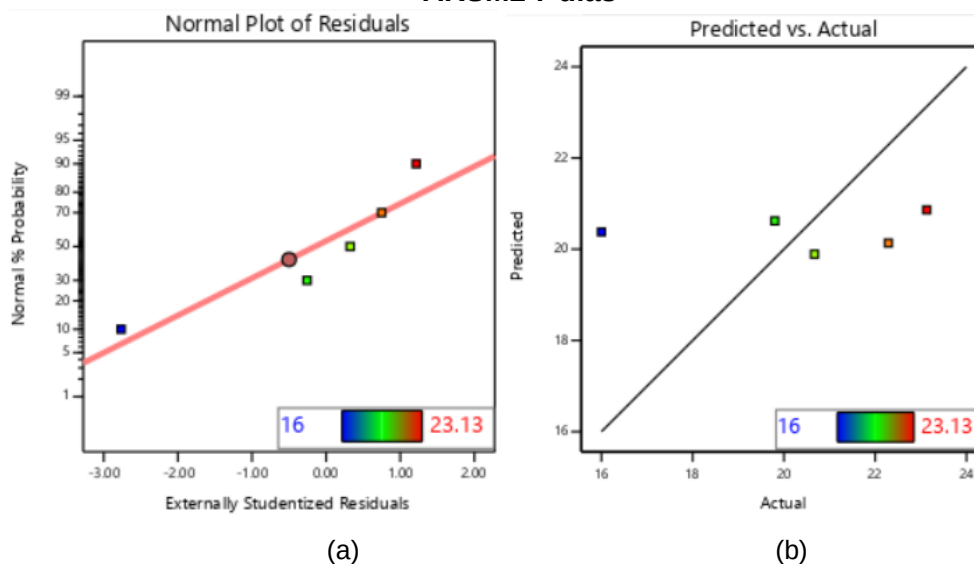


Figura 71 - Gráfico normal de resíduos; previsto vs. real da composição ANG + ARSM2 14 dias

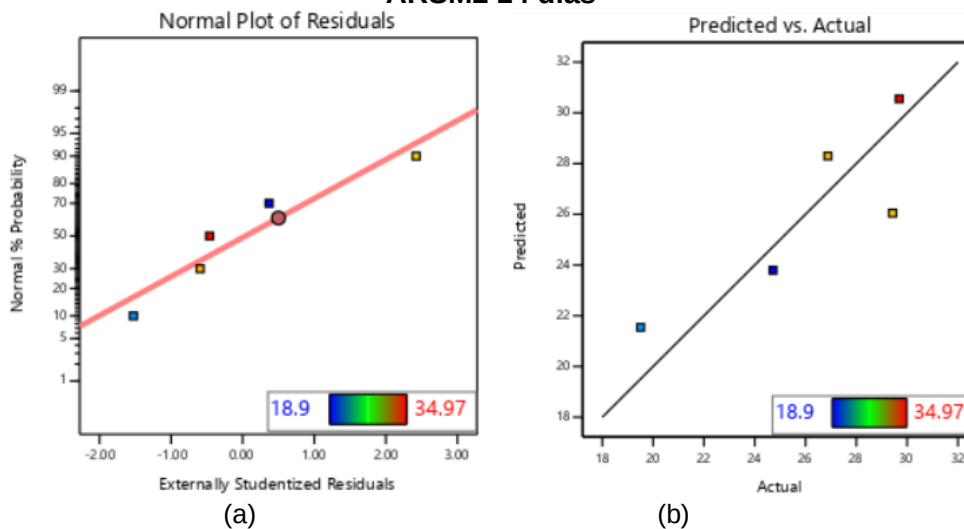
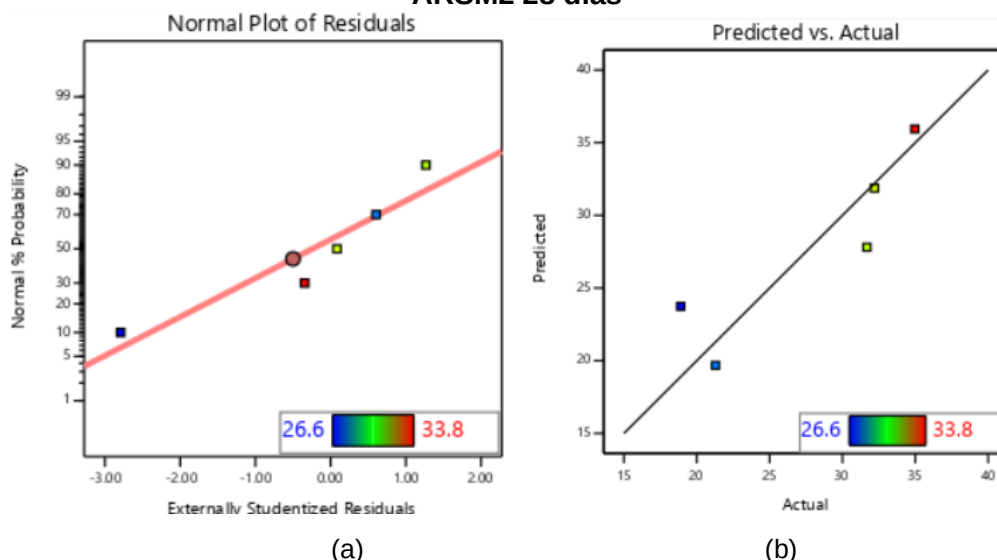


Figura 72 - Gráfico normal de resíduos; previsto vs. real da composição ANG + ARSM2 28 dias



Fonte: Autora (2025)

As figuras 70, 71 e 72 apresentam as análises gráficas dos resíduos para resistência à compressão nas idades de 7, 14 e 28 dias. Em cada figura, são apresentados dois tipos de gráficos: o gráfico de probabilidade normal dos resíduos e os gráficos de valores previstos versus valores ajustados.

Os gráficos de probabilidade normal mostram a distribuição dos resíduos padronizados (resíduos estudantizados externamente) em comparação com a distribuição normal teórica. A adequação do modelo pode ser verificada pela proximidade dos pontos à linha reta de referência. Para as três idades analisadas, observa-se que os pontos se distribuem de forma satisfatória ao longo da linha, indicando que os resíduos seguem aproximadamente uma distribuição normal, atendendo assim a uns pressupostos fundamentais da análise de regressão.

Nos gráficos de valores previstos versus valores ajustados (Previsto vs. real), a linha diagonal representa concordância perfeita entre as previsões do modelo e os valores reais. A dispersão dos pontos em torno dessa linha fornece uma medida visual de qualidade do ajuste do modelo. O coeficiente de determinação obtido foi de 23,13 MPa para 7 dias, para 14 dias 34,97 MPa, e para 28 dias 33,8 MPa, indicando que o modelo explica satisfatoriamente a variabilidade dos dados.

Os pontos se aproximam da linha diagonal, indicando que o modelo está realizando previsões razoavelmente precisas, no entanto, é possível notar uma leve tendência de aumento da dispersão dos pontos à medida que os valores previstos aumentam. Essa observação sugere a possibilidade de heteroscedasticidade, ou seja,

de que a variância dos resíduos não é constante ao longo dos valores previstos. Os gráficos a seguir são das misturas dos componentes nas figuras 73 e 74.

Figura 73 - Mistura dos componentes ANG + ARSM2 7 e 14 dias

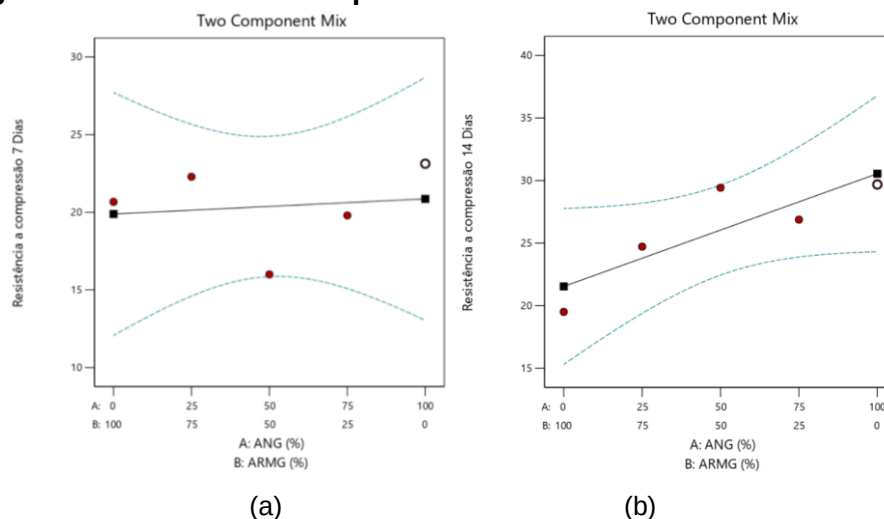
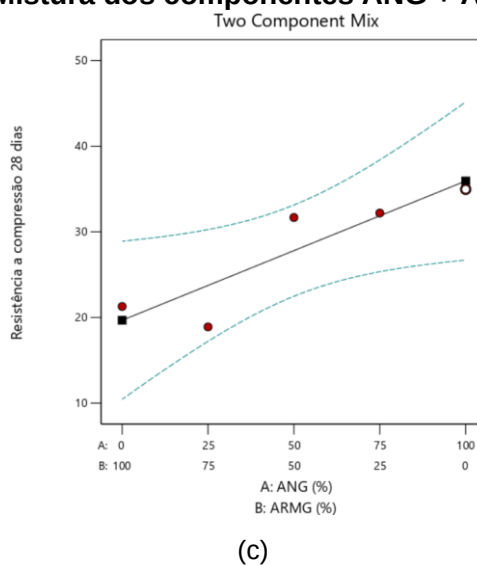


Figura 74 - Mistura dos componentes ANG + ARSM2 28 dias



Fonte: Autora (2025).

A figura 73 e 74 apresenta um gráfico que demonstra a relação entre a porcentagem de ANG (eixo x) e ARSM2 (eixo y). O comportamento parabólico da curva evidencia uma relação não linear entre as variáveis. Em todas as análises realizadas, observa-se que a correlação entre a composição da mistura (ANG e ARSM2) e a resistência à compressão apresenta comportamento curvilíneo não linear.

Analisando a evolução da resistência à compressão das diferentes composições de ANG e ARSM2 ao longo das idades, observa-se que aos 7 dias a composição de referência com 100% de ARSM2 obteve 20,27 MPa, enquanto a

composição com 100% de ANG apresentou melhor desempenho inicial, chegando a 23,13 MPa. Já as composições com maior proporção de ANG (50% e 75%) apresentaram valores menores de 16,0 MPa, respectivamente.

Aos 14 dias de idade, a composição de referência com (100% de ARSM2) apresentou um decréscimo, atingindo 19,51 MPa. Em contrapartida, a composição com 25% de ANG e 75% de ARSM2 aumentou para 24,75 MPa, e a composição com proporções iguais 50% ANG + 50% ARSM2 obteve o melhor desempenho nesta idade, com 29,43 MPa. A composição com 75% de ANG e 25% de ARSM2 também apresentou um bom resultado satisfatório, atingindo 26,88 MPa, enquanto a composição com 100% de ANG manteve sua evolução, chegando a 29,69 MPa.

Na idade de 28 dias, a composição de referência com (100% ARSM2) atingiu 21,29 MPa, enquanto a composição com 25% ANG e 75% ARMG apresentou uma redução para 18,9 MPa. As composições com maiores proporções de ANG (50% e 75%) mantiveram sua evolução positiva, alcançando 31,68 MPa e 32,32 MPa, respectivamente. A composição com 100% ANG apresentou o melhor desempenho final, atingindo 34,94 MPa.

Conclui-se, portanto, que a composição mais eficiente em termos de resistência à compressão aos 28 dias é a foi a composição com 100% ANG, apresentando o valor de 34,94 MPa. Destacam-se também as composições com maiores proporções de ANG (50% e 75%), que apresentaram resultados 31 MPa, demonstrando a influência positiva do agregado natural no desempenho mecânico do material.

Análise das argamassas com ANF + ARSM2:

Os resultados da resistência à compressão serão apresentados a seguir, e tabela 22 apresenta o modelo sequencial das somas dos quadrados dos resultados de resistência das composições ANF + ARSM2.

Tabela 22 – Modelo sequencial das somas dos quadrados dos resultados de resistência à compressão das argamassas ANF + ARSM2

Resistência à compressão	Fonte	Soma dos quadrados	df	Quadrados médio	Valor de F	Valor de P	
7 dias	Model	28.35	2	14.17	1.96	0.3376	Não significativo
	⁽¹⁾ Mistura Linear	8.76	1	8.76	1.21	0.3856	
	AB	19.59	1	19.59	2.71	0.2414	
	Residual	14.45	2	7.23			
	Cor Total	42.80	4				
14 dias	Modelo	16.08	1	16.08	13.92	0.0336	Significativo
	Mistura Linear	16.08	1	16.08	13.92	0.0336	
	Residual	3.47	3	1.16			
	Cor total	19.54	4				
28 dias	Model	94.62	2	47.31	7.80	0.1137	Não significativo
	⁽¹⁾ Mistura Linear	13.69	1	13.69	2.26	0.2719	
	AB	80.93	1	80.93	13.34	0.0675	
	Residual	12.13	2	6.07			
	Cor Total	106.75	4				

Fonte: Autora (2025)

A análise estatística dos três modelos de regressão revela diferentes níveis de significância. O modelo 2 destaca-se como o mais significativo, apresentando um valor – F de 13,92 e apenas 3,36% de chance de ocorrência por ruído. Em contraste, o modelo 1 (Valor – F: 7,80; 11,37% de chance de ruído) e o modelo 3 (valor – F: 1,96; 33,76% de chance de ruído) não demonstraram significância estatística relevante. Em todos os casos, considera-se que valores – P menores que 0,0500 indicam termos significativos, enquanto valores acima de 0,1000 sugerem termos não significativos, sendo possível melhorar o desempenho dos modelos através da redução de termos insignificantes. A tabela 23 apresenta os coeficientes em termos codificados.

Tabela 23 - Coeficientes em termos de fatores codificados de ANF + ARSM2

Resistência à compressão	Componente	Estimativa de coeficiente	df	Erro padrão	95% CI baixo	95% CI Alto	VIF
7 dias	A-ANF	23.20	1	2.53	12.31	34.08	1.66
	B-ARSM2	19.45	1	2.53	8.57	30.34	1.66
	AB	-18.93	1	11.49	-68.38	30.53	2.43
14 dias	A-ANF	24.91	1	0.8326	22.26	27.56	1.13
	B-ARSM2	19.84	1	0.8326	17.19	22.49	1.13
28 dias	A-ANF	25.79	1	2.32	15.81	35.76	1.66
	B-ARSM2	21.11	1	2.32	11.13	31.08	1.66
	AB	38.47	1	10.53	-6.85	83.79	2.43

Fonte: Autora (2025)

A tabela apresenta os coeficientes estimados para diferentes componentes (A-ANF, B-ARSM2, AB) em três períodos de tempo (7 dias, 14 dias, 28 dias) em relação à resistência à compressão. Para o componente A-ANF no período de 7 dias, o coeficiente estimado é 23.20, com um erro padrão de 2.53 e um intervalo de confiança de 95% entre 12.31 e 34.08. O fator de inflação da variância (VIF) para esse componente é de 1.66, indicando que não há problemas graves de multicolinearidade.

A estimativa do coeficiente representa a mudança esperada na resposta por mudança unitária no valor do fator quando todos os fatores restantes são mantidos constantes. A interceptação em um projeto ortogonal é a resposta média geral de todas as execuções. Os coeficientes são ajustes em torno dessa média com base nas configurações dos fatores. Quando os fatores são ortogonais, os VIFs maiores que 1 indicam multicolinearidade; quando maior o VIF, mais grave é a correlação dos fatores. Como regra geral, VIFs inferiores a 10 são toleráveis. A figura 75, 76 e 77 apresentadas são do diagnóstico residual.

Figura 75 – Gráfico normal de resíduos; previsto vs. real da composição ANF + ARSM2 7 dias

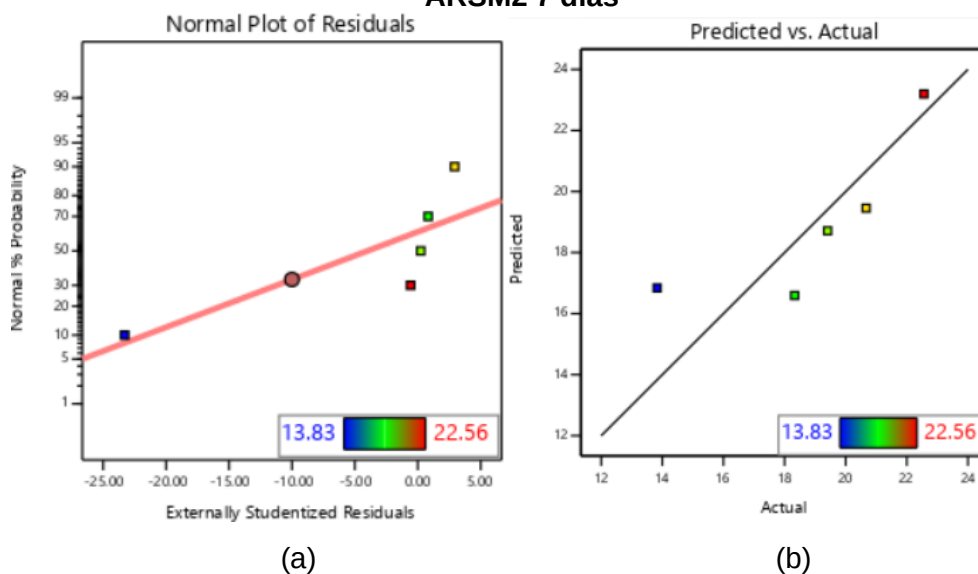


Figura 76 - Gráfico normal de resíduos; previsto vs. real da composição ANF + ARSM2 14 dias

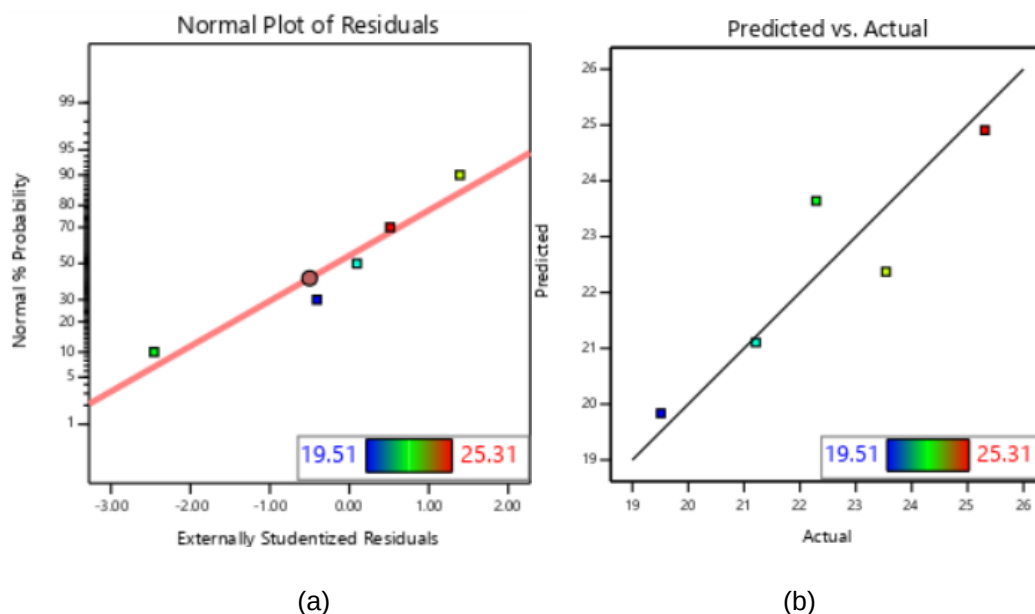
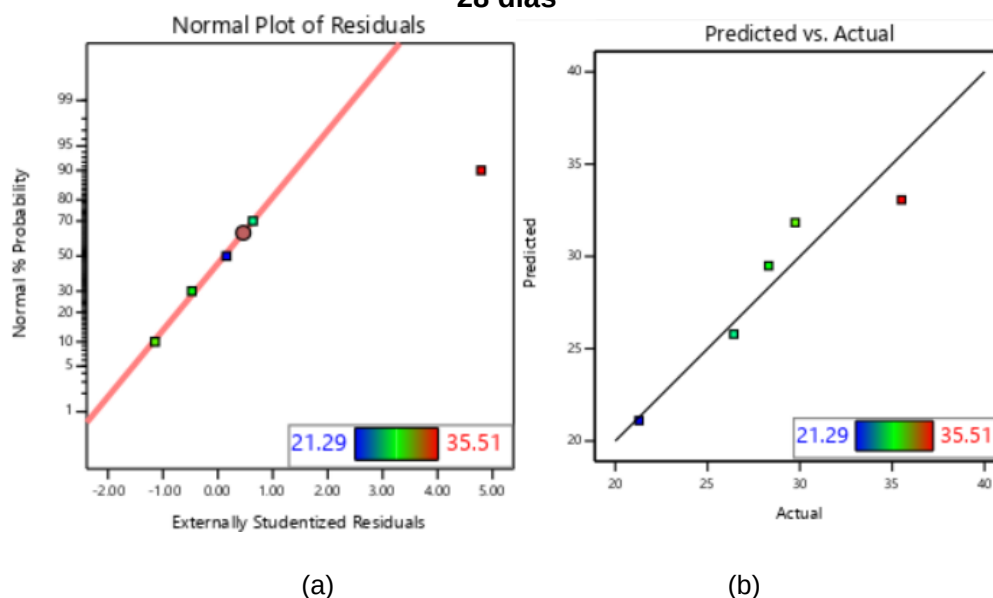


Figura 77 - Gráfico normal de resíduos; previsto vs. real da composição ANF + ARSM2 28 dias



Fonte: Autora (2025)

Nos gráficos (7, 14 e 28 dias), os resíduos padronizados externamente seguem uma distribuição aproximadamente linear, indicando uma variância constante dos erros ao longo dos valores previstos. Isso sugere que a suposição de homoscedasticidade é atendida. Nos gráficos de previsto vs. real mostra-se a relação entre os valores previstos pelo modelo de regressão linear e os valores reais observados. Isso indica que os resíduos são independentes, atendendo a outra

suposição importante para a validade da análise de regressão. As métricas apresentadas nos gráficos, como o (R^2) e os resíduos extremamente, fornecem informações adicionais sobre a qualidade do ajuste do modelo e a detecção de possíveis outliers. Portanto, a análise dos gráficos apresentados sugere que o modelo de regressão linear aplicado aos dados atende às suposições de homocedasticidade (variância constante dos resíduos) e independência dos resíduos, fortalecendo a validade do modelo. Na figura 78 e 79 são apresentados os resultados obtidos das composições de dois componentes.

Figura 78 - Mistura de dois componentes 7 e 14 dias

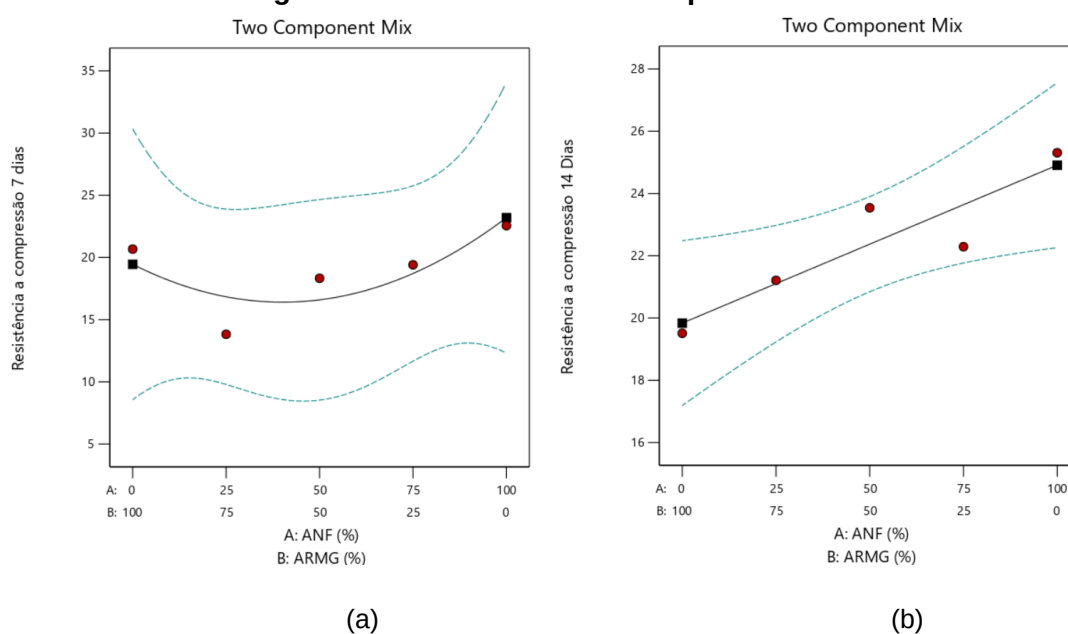
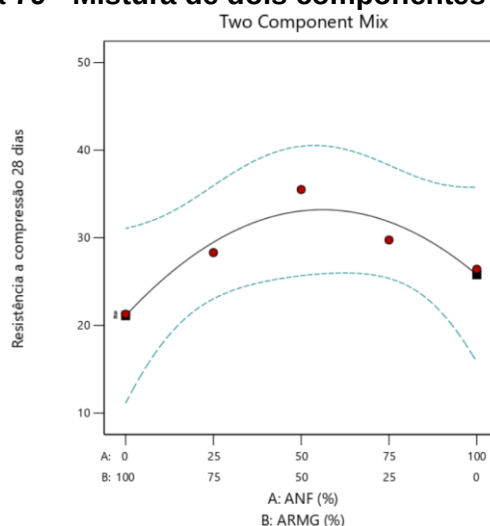


Figura 79 - Mistura de dois componentes 28 dias



(c)

Fonte: Autora (2025)

Os resultados da resistência à compressão aos 7 dias, a mistura contendo 100% de ANF atingiu uma resistência de 22,56 MPa. Isso reflete a eficácia do ANF em proporcionar um ganho rápido de resistência, possivelmente devido à sua compactação e ligação inicial eficaz quando comparado a misturas que contêm outros componentes.

No entanto, ao prolongar o período de cura para 14 dias e 28 dias, a resistência máxima à compressão foi verificada em misturas com uma composição equilibrada de 50% ANF e 50% ARMG, com resistência de 23,54 MPa para 14 dias e 35,51 MPa para 28 dias, respectivamente. Este resultado sugere que, apesar do ANF sozinho promover uma resistência inicial satisfatória, a inclusão de ARMG é benéfica para o desempenho a longo prazo pode ser explicado pela melhoria das propriedades e pela redução de porosidade, promovidas pela combinação dos diferentes tipos de agregados.

Análises das argamassas com areia natural fina ANG + ARSM1

A tabela 24 apresenta os modelos sequencial das somas dos quadrados das composições ANG + ARSM1.

Tabela 24 - Modelo sequencial das somas dos quadrados dos resultados de resistência à compressão das argamassas ANG + ARSM1

Resistência à compressão	Fonte	Soma dos quadrados	df	Quadrados médio	Valor de F	Valor de P	
7 dias	Model	0.2958	1	0.2958	0.0326		Não significativo
	⁽¹⁾ Mistura Linear	0.2958	1	0.2958	0.0326		
	Residual	27.24	3	9.08			
	Cor Total	27.54	4				
14 dias	Model	0.8940	1	0.8940	0.0655	0.8145	Não significativo
	⁽¹⁾ Mistura Linear	0.8940	1	0.8940	0.0655	0.8145	
	Residual	40.93	3	13.64			
	Cor Total	41.82	4				
28 dias	Model	43.21	3	14.40	21.36	0.1574	Não significativo
	⁽¹⁾ Mistura Linear	0.8526	1	0.8526	1.26	0.4627	
	AB	1.11	1	1.11	1.64	0.4216	
	AB(A-B)	41.25	1	41.25	61.18	0.0810	
	Residual	0.6742	1	0.6742			
	Cor Total	43.89	4				

Fonte: Autora (2025)

Observa-se que um valor de F de 0,07 indica que o modelo não é significativo em relação ao ruído, sugerindo um ajuste inadequado aos dados. Analogamente, um valor F de 0,03 também indica significância, com uma chance de 86,83%, reforçando essa inadequação.

Por outro lado, um valor F de 21,36 sugere que o modelo ainda não é significativo, mas tem uma chance reduzida de 15,74% de ser resultado do ruído. Mesmo não sendo estatisticamente robusto, este modelo ajusta-se melhor aos dados do que os anteriores.

Quanto aos valores de p, se eles forem menores que 0,05, isso indica que os termos do modelo são significativos, ou seja, contribuem de forma relevante. Valores acima de 0,10 indicam termos menos relevantes, que podem não contribuir substancialmente. Dessa forma, a exclusão de termos insignificantes pode aprimorar o ajuste e o desempenho preditivo do modelo.

Na tabela 25 são apresentados os resultados obtidos dos coeficientes em termos codificados das composições ANG + ARSM1.

Tabela 25 - Coeficientes em termos de fatores codificados ANG + ARSM1

Resistência à compressão	Componente	Estimativa de coeficiente	df	Erro Padrão	95% CI Baixo	95% CI Alto	VIF
7 dias	A-ANG	23.46	1	2.33	16.03	30.89	1.13
	B-ARSM1	22.77	1	2.33	15.35	30.20	1.13
14 dias	A-ANG	29.03	1	2.86	19.92	38.14	1.13
	B-ARSM1	27.83	1	2.86	18.73	36.94	1.13
28 dias	A-ANG	34.87	1	0.8152	24.51	45.23	1.85
	B-ARSM1	29.64	1	0.8152	19.28	40.00	1.85
	AB	-4.50	1	3.51	-49.12	40.11	2.43
	AB(A-B)	-54.16	1	6.92	-142.14	33.82	1.25

Fonte: Autora (2025)

A tabela apresenta os resultados para diferentes períodos de cura (7 dias, 14 dias e 28 dias), com as colunas indicando o componente (níveis dos fatores ANG, ARSM1 e suas interações), a estimativa de coeficiente, os graus de liberdade (df), o erro padrão, os intervalos de confiança de 95% e o fator de inflação da variância (VIF). Os coeficientes dos fatores ANG e ARSM1 são positivos, indicando um efeito positivo na resistência à compressão, enquanto a interação AB (A-B) apresenta um coeficiente negativo, sugerindo um efeito de interação negativo. Os valores de VIF são relativamente baixos, exceto para os termos A-ANG e B-ARSM1 aos 28 dias, que

apresentam VIF de 1,85, indicando uma possível multicolinearidade moderada. Nas figuras 80, 81 e 82 são apresentados os gráficos de resíduos.

Figura 80 - Gráfico normal de resíduos; previsto vs. real da composição ANG + ARSM1 7 dias

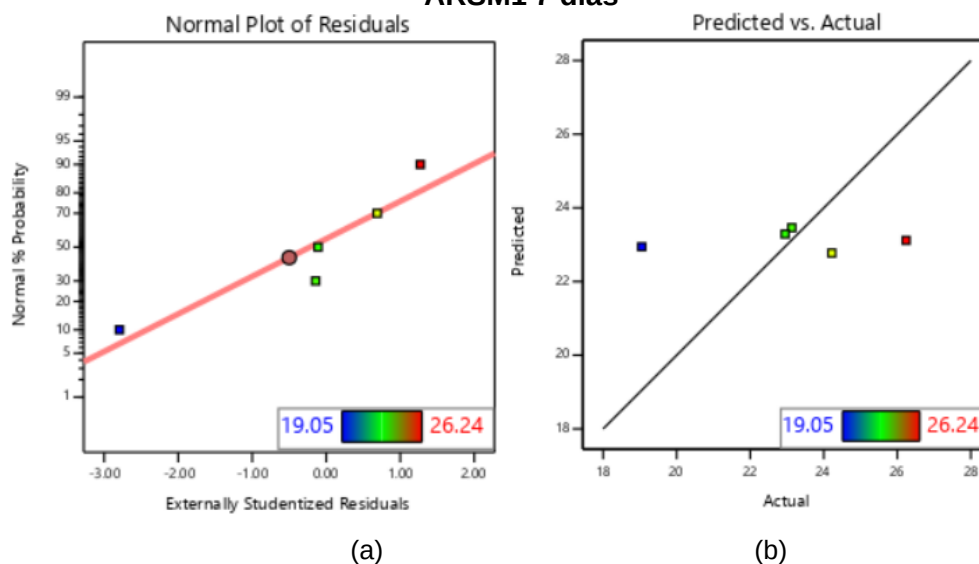


Figura 81 - Gráfico normal de resíduos; previsto vs. real da composição ANG + ARSM1 14 dias

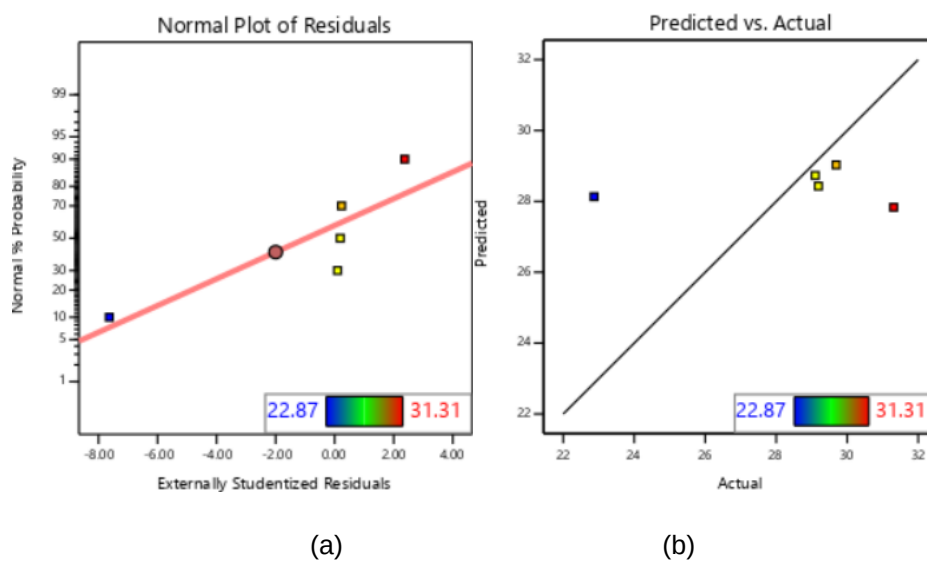
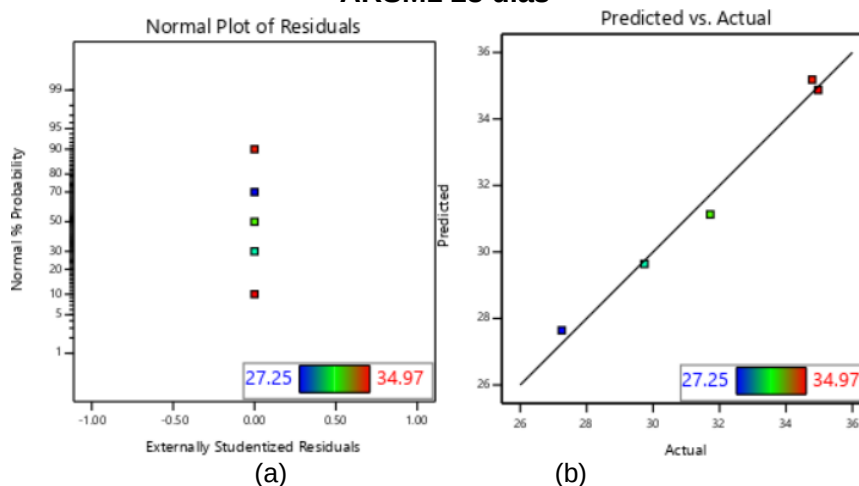


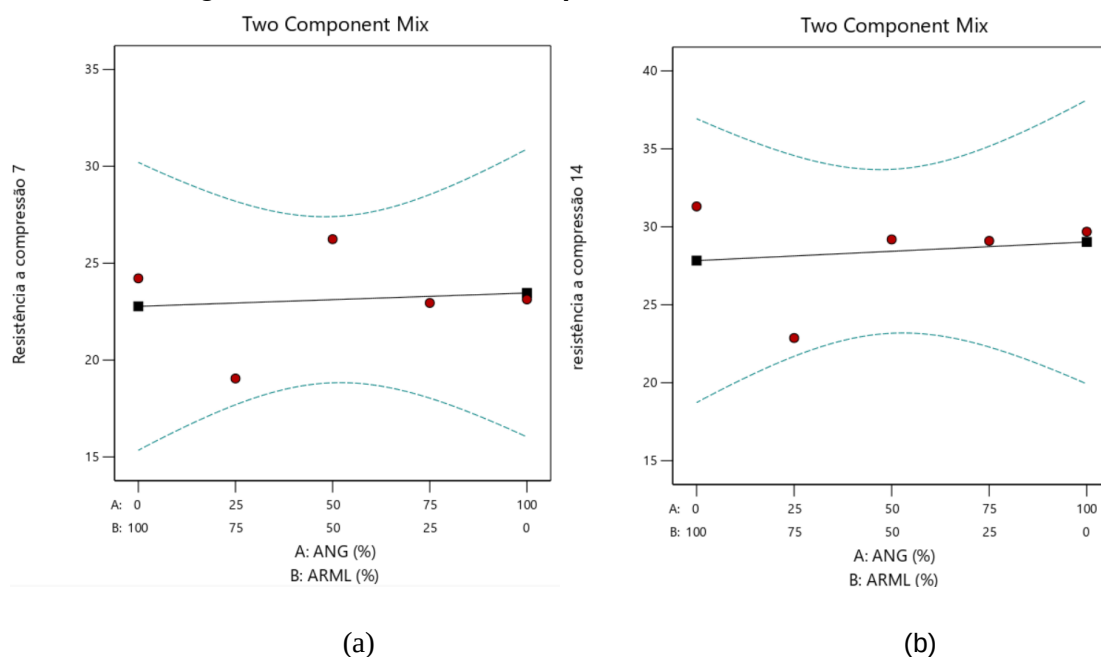
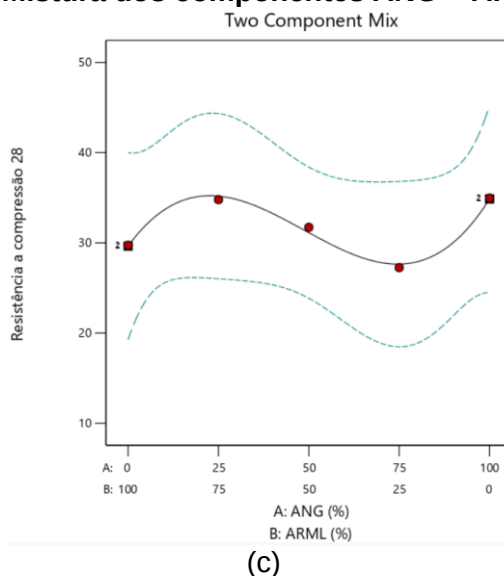
Figura 82 - Gráfico normal de resíduos; previsto vs. real da composição ANG + ARSM1 28 dias



(a) (b)
Fonte: autora (2025)

O gráfico de probabilidade normal dos resíduos de 7 e 14 dias, apresenta uma distribuição aproximadamente linear, indicando que os resíduos seguem uma distribuição normal. Os pontos se alinham próximos à reta de referência, com apenas alguns outliers leves, isso sugere que os resíduos têm uma distribuição simétrica e homogênea. Já o gráfico de probabilidade normal de resíduos de 28 dias o alinhamento dos pontos não é tão linear quanto nos gráficos anteriores, apresentando uma leve curvatura na parte central. Há uma maior dispersão dos pontos, com alguns outliers mais distantes da reta de referência. Pode haver uma heteroscedasticidade (variância não constante) dos resíduos, com uma dispersão maior em algumas regiões do gráfico.

Os gráficos de valores previstos versus reais para todas as idades, mostram uma boa aderência dos pontos à linha de 45 graus, indicando uma forte correlação entre os valores previstos pelo modelo e os valores observados. A distribuição dos pontos em torno da linha de referência é equilibrada, com valores previstos próximos aos valores reais. Comparando com os gráficos anteriores (7, 14 e 28 dias) apresenta resultados semelhantes, quanto a normalidade e homoscedasticidade dos resíduos, e uma boa capacidade preditiva do modelo, com valores previstos próximos aos valores reais. Os gráficos de mistura das composições são apresentados nas figuras 83 e 84.

Figura 83 - Mistura dos componentes ANG + ARSM1 7 e 14 dias**Figura 84 - Mistura dos componentes ANG + ARSM1 28 dias**

Fonte: Autora (2025)

A resistência à compressão aos 7 dias, a mistura com 50% de ANG e 50% de ARSM1 apresentou a maior resistência, chegando a 26,24 MPa. Isso é superior aos 24,22 MPa obtidos com 100% de ARSM1 e aos 23,13 MPa com 100% de ANG. Portanto, a mistura ótima aos 7 dias parece ser a de 50% ANG e 50% ARSM1, com maior resistência à compressão.

Já aos 14 dias, a mistura com 100% de ARSM1 se destacou, atingindo 31,31 MPa de resistência. Isso é superior aos 29,69 MPa da mistura com 100% de ANG e

aos valores intermediários entre 22,87 MPa e 29,19 MPa das misturas com proporções variadas de ANG e ARSM1.

Por fim, aos 28 dias, a mistura com 100% de ANG apresentou a maior resistência chegando a 34,87 MPa. Superando os 29,64 MPa da mistura com 100% de ARSM1 e os valores entre 27,25 MPa e 34,79 MPa das misturas intermediárias.

Portanto, a escolha da melhor mistura dependerá do objetivo e da idade de interesse. Aos 7 dias, a mistura 50-50% é a mais adequada. Já aos 14 e 28 dias, as misturas com maior proporção de ANG ou ARSM1 são preferíveis, dependendo da resistência requerida.

Dados da composição ANF+ARSM1

Os dados estatísticos são apresentados na tabela 26 da composição ANF + ARSM1.

Tabela 26 – Modelo sequencial das somas dos quadrados dos resultados de resistência à compressão das argamassas ANF + ARSM1

Resistência à compressão	Fonte	Soma dos quadrados	df	Quadrados médio	Valor de F	Valor de P	
7 dias	Model	213.58	3	71.19	1.20	0.5708	Não significativo
	⁽¹⁾ Mistura Linear	29.21	1	29.21	0.4936	0.6101	
	AB	3.92	1	3.92	0.0663	0.8396	
	AB(A-B)	180.46	1	180.46	3.05	0.3311	
	Residual	59.17	1	59.17			
	Cor Total	272.76	4				
14 dias	Model	5.26	1	5.26	0.1924	0.6906	Não significativo
	⁽¹⁾ Mistura Linear	5.26	1	5.26	0.1924	0.6906	
	Residual	81.98	3	27.33			
	Cor Total	87.23	4				
28 dias	Model	25.07	3	8.36	1.69	0.5026	Não significativo
	⁽¹⁾ Mistura Linear	0.2690	1	0.2690	0.0543	0.8542	
	AB	7.06	1	7.06	1.42	0.4439	
	AB(A-B)	17.74	1	17.74	3.58	0.3094	
	Residual	4.95	1	4.95			
	Cor Total	30.02	4				

Fonte: Autora (2025)

A análise dos valores-F dos diferentes modelos de regressão apresentados na tabela 26 apresenta algumas informações importantes sobre a significância estatística

desses modelos. O valor-F do modelo para 7 dias é de 1,69, o que indica que há uma probabilidade de 50,26% de que um valor tão alto possa ter ocorrido apenas devido ao ruído, ou seja, esse modelo não é estatisticamente significativo em relação ao ruído presente nos dados.

O valor-F do modelo para 14 dias é de 0,19, com uma probabilidade de 69,06% de que esse valor tenha ocorrido por acaso, também sugerindo que este modelo não é significativo. No entanto, o valor-F do modelo para 28 dias, é de 1,20, com uma probabilidade de 57,08% de que esse valor possa ter sido gerado apenas pelo ruído. Portanto, este modelo também não apresenta significância estatística robusta.

Esses resultados indicam que, apesar das diferenças observadas nos coeficientes de determinação e outras métricas de ajuste, nenhum dos modelos testados pode ser considerado realmente significativo do ponto de vista estatístico. A tabela 27 apresenta os fatores de coeficientes em termos codificados de ANF + ARSM1.

Tabela 27 - Coeficientes em termos de fatores codificados ANF + ARSM1

Resistência à compressão	Componente	Estimativa de Coeficiente	df	Erro padrão	95% CI Baixo	95% CI Alto	VIF
7 dias	A-ANF	23.48	1	7.64	-73.56	120.52	1.85
	B-ARSM1	25.14	1	7.64	-71.90	122.18	1.85
	AB	8.47	1	32.89	-409.50	426.43	2.43
	AB(A-B)	113.28	1	64.87	-710.96	937.52	1.25
14 dias	A-ANF	27.19	1	4.05	14.30	40.07	1.13
	B-ARSM1	30.09	1	4.05	17.20	42.97	1.13
28 dias	A-ANF	26.69	1	2.21	-1.39	54.76	1.85
	B-ARSM1	30.01	1	2.21	1.93	58.08	1.85
	AB	11.36	1	9.52	-109.56	132.28	2.43
	AB(A-B)	35.52	1	18.77	-202.94	273.98	1.25

Fonte: Autora (2025)

A tabela 27 mostra os coeficientes codificados para os modelos de que usam as variáveis A-ANF e B-ARSM1 para estimar a resistência à compressão em diferentes idades. Ao analisarmos os resultados, observamos o seguinte:

Para resistência à compressão aos 7 dias, o modelo que considera apenas o fator AB tem um coeficiente de 8,47, com um grande erro padrão de 32,89 e um intervalo de confiança de 95% que vai de -409,50 a 426,43. Isso sugere que esse modelo não é estatisticamente significativo para prever a resistência nesse período

Já para a resistência a compressão aos 14 dias, os modelos com os fatores A-ANF e B-ARSM1 demonstra significância estatística, com intervalos de confiança de 95% que excluem o zero.

No período de 28 dias, o modelo com apenas o fator AB possui coeficiente de 11,36, com erro padrão de 9,52 e um intervalo de confiança de 95% de -109,56 e 132,28. também não é estatisticamente significativo. Os gráficos são apresentados na figura 85, 86 e 87.

Figura 85 – Gráfico normal de resíduos; previsto vs. real das composições de ANF + ARSM1 7 dias.

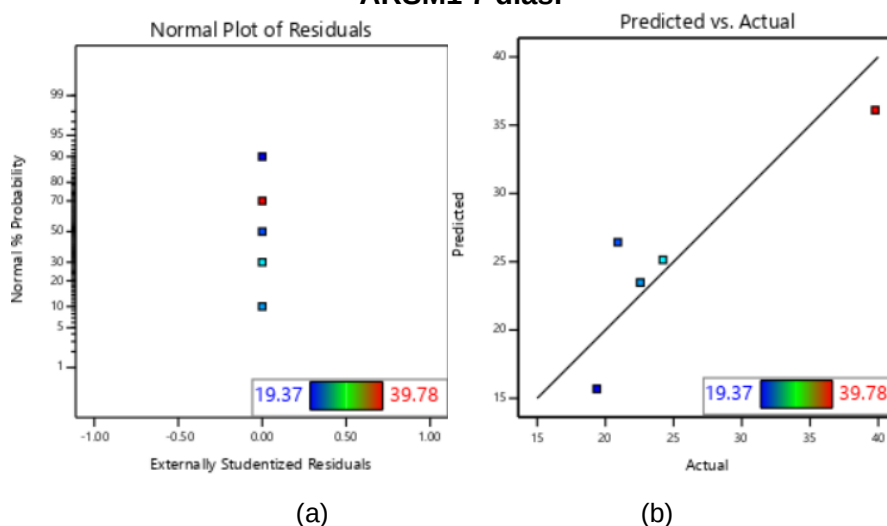


Figura 86 - Gráfico normal de resíduos; previsto vs. real das composições de ANF + ARSM1 14 dias.

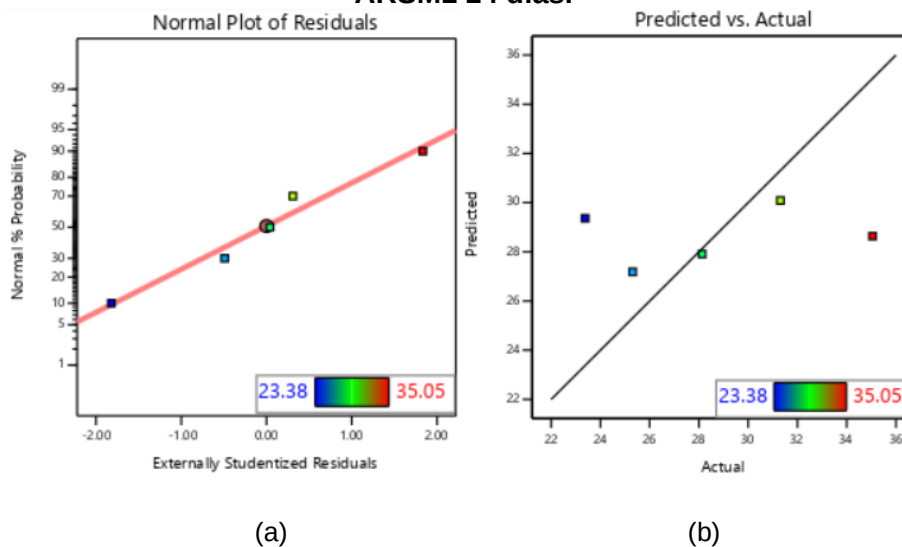
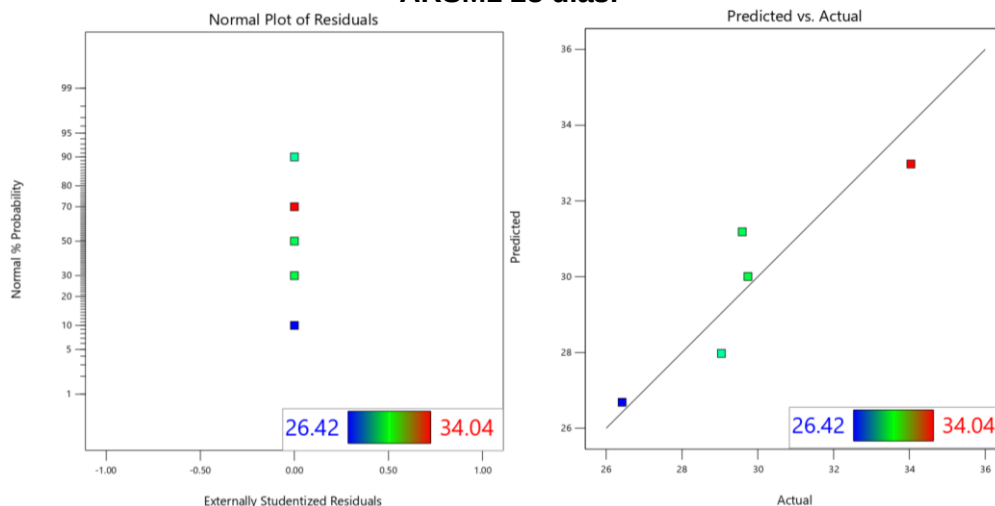


Figura 87 - Gráfico normal de resíduos; previsto vs. real das composições de ANF + ARSM1 28 dias.



(a)

(b)

Fonte: Autora (2025)

Ao analisar os gráficos de normal de resíduos para 7 e 28 dias, nota-se que a distribuição dos resíduos padronizados se aproxima significativamente de uma distribuição normal, o que satisfaz um dos requisitos essenciais do modelo de regressão. Além disso, observamos a homocedasticidade, indicando que a variância dos resíduos é uniforme, sem apresentar padrões discerníveis. Não são identificadas observações atípicas (outlier) que possam influenciar negativamente a distribuição normal dos resíduos.

Diferente dos 14 dias, o gráfico de normal de resíduos mostra que os pontos se alinham muito próximos à linha central, reforçando a conclusão de que os resíduos do modelo seguem uma distribuição normal. Isso é um indicativo positivo de que os pressupostos do modelo de regressão estão sendo atendidos. Portanto, a análise deste gráfico de normal de resíduos com a linha central traçada confirma que os resíduos do modelo seguem uma distribuição normal, o que fortalece a confiabilidade e robustez dos resultados obtidos.

Assim, a visualização dos pontos alinhados em uma linha reta no gráfico normal de resíduos é um forte indício de que o modelo de regressão atende aos principais pressupostos, como a normalidade e homoscedasticidade dos resíduos. Esse alinhamento proporciona maior confiabilidade no modelo.

Os gráficos previstos pelo modelo de regressão revelam uma boa correspondência entre os valores previstos e os valores reais ao longo de 7 dias, com

pontos alinhados próximos à linha de 45 graus. Entretanto, ao analisar o período de 14 dias, observa-se uma dispersão um pouco maior dos pontos, indicando uma precisão ligeiramente menor nas previsões.

De modo geral, os gráficos indicam que o modelo de regressão é bem ajustado para previsões de 7 dias, com resíduos próximos à distribuição normal e uma correspondência eficaz entre os valores previstos e reais. Por outro lado, para previsões de 14 dias, o modelo apresenta um ajuste um pouco menor preciso, com resíduos mais afastados da normalidade e maior dispersão entre valores previstos e reais.

É notável uma melhoria significativa na capacidade preditiva do modelo em relação à resistência à compressão aos 28 dias. Os resíduos seguem uma distribuição normal, o que sugere que as premissas do modelo estão sendo melhor atendidas.

A diferença entre os valores previstos e reais diminui consideravelmente, indicando uma melhor adaptação do modelo aos dados observados ao longo do tempo. Este avanço na precisão do modelo ao longo das iterações é um sinal positivo, demonstrando que ajustes e refinamentos contínuos podem resultar em previsões mais precisas da resistência à compressão dessa mistura de dois componentes. Os gráficos apresentados na figura 88 e 89 são das misturas dos componentes.

Figura 88 - Mistura dos componentes ANF + ARSM1 7 e 14 dias

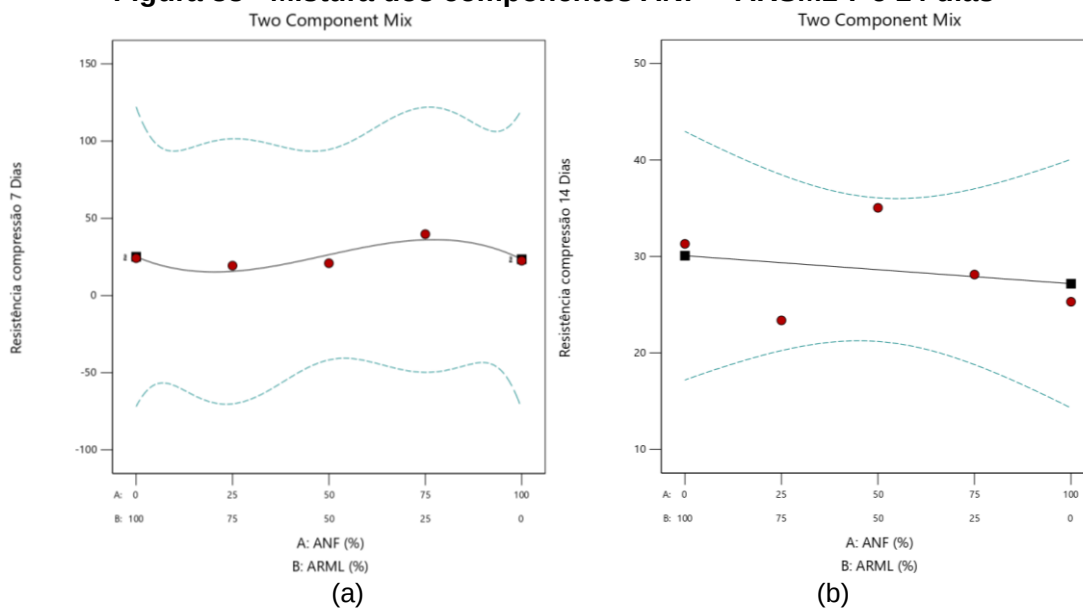
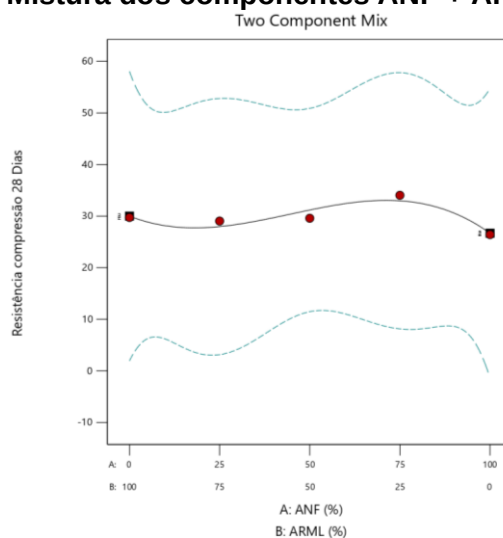


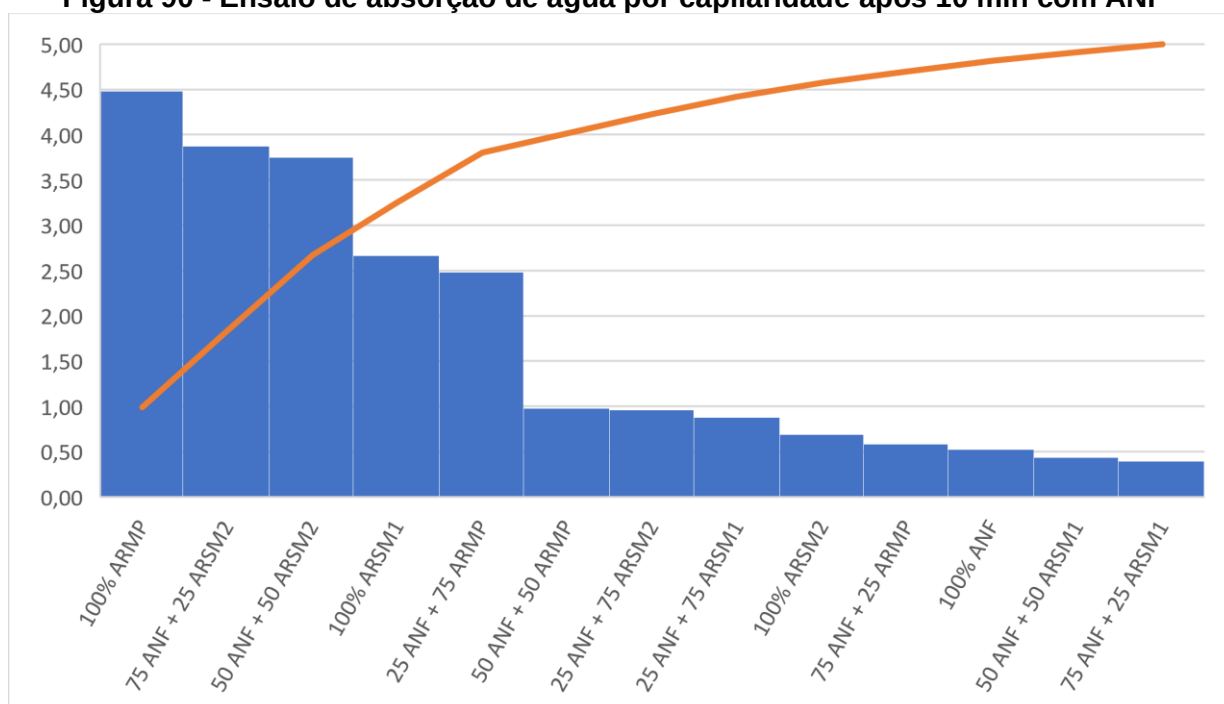
Figura 89 - Mistura dos componentes ANF + ARSM1 28 dias

(c)

Fonte: Autora (2025)

6.1.8.3 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

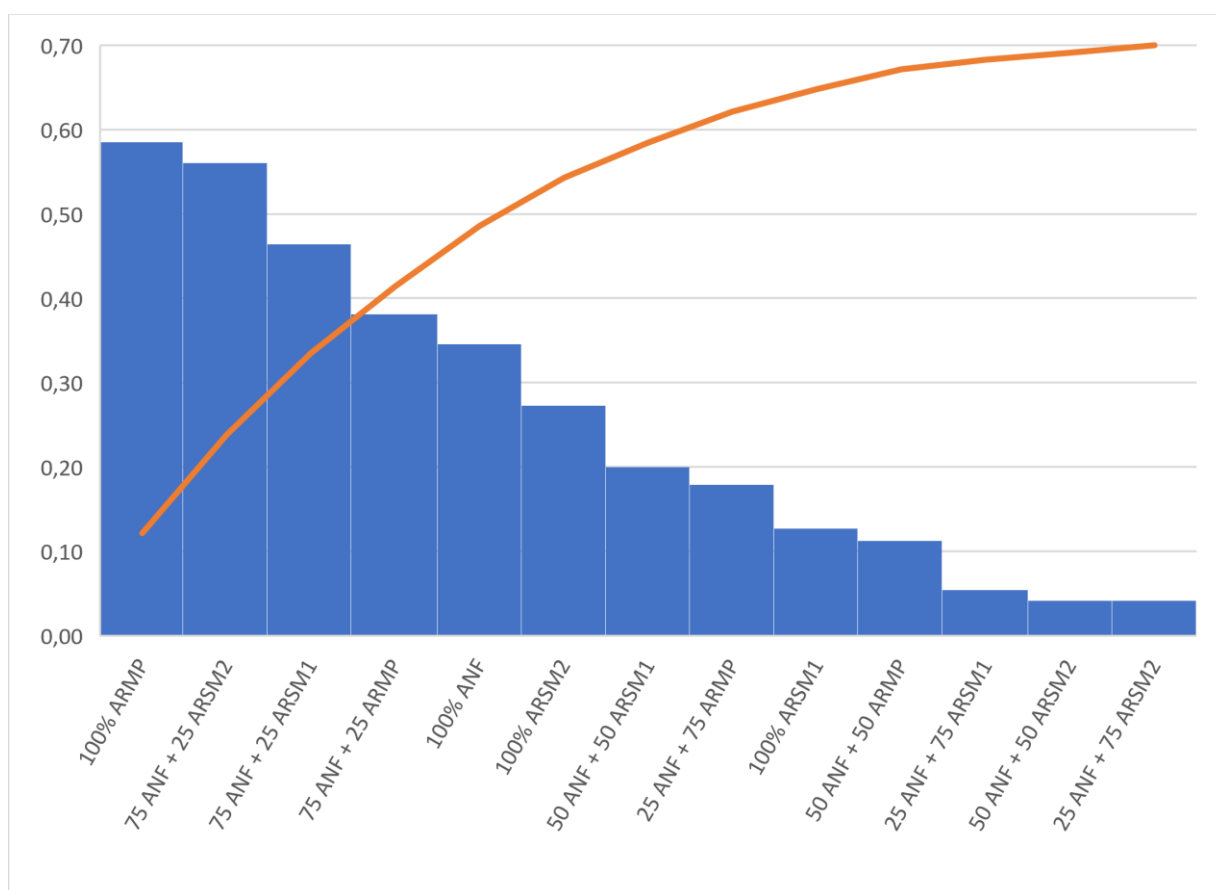
As conclusões das análises de absorção de água por capilaridade são expressas através dos dados médios obtidos, e apresentados em um gráfico. Na figura 90 e 91 apresenta os resultados da absorção de água por capilaridade das composições com ANF.

Figura 90 - Ensaio de absorção de água por capilaridade após 10 min com ANF

Fonte: Autora (2025)

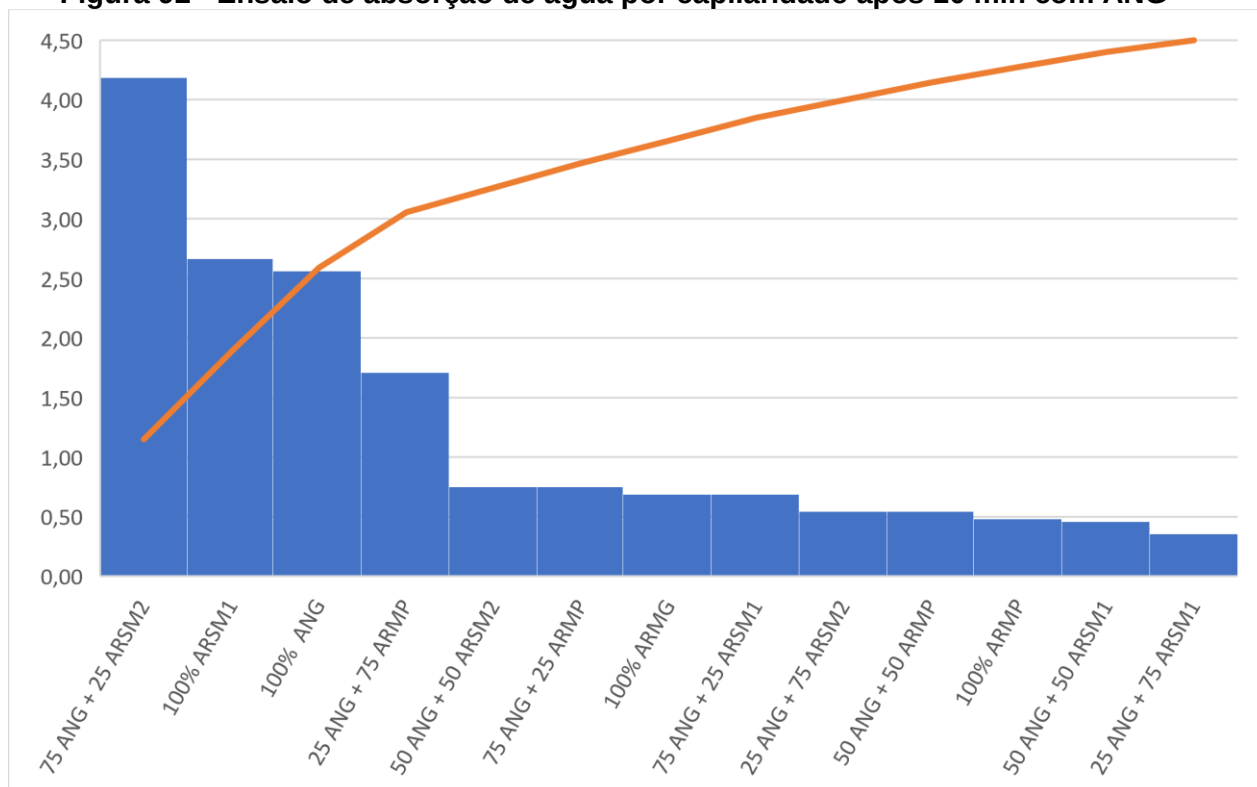
Analisando os dados observa-se que a composição com a melhor capilaridade (menor absorção de água) é a de agregado natural 100 ANF, 50% ANF + 50 ARSM1, e 75% ANF + 25 ARSM1. Estas apresentaram melhor eficiência na redução de absorção de água, com valor de aproximadamente $0,4 \text{ cm}^3$. O gráfico 91 apresenta o ensaio por capilaridade aos 90 minutos.

Figura 91 - Ensaio de absorção de água por capilaridade após 90 min com ANF



Fonte: Autora (2025)

Analisando o gráfico de capilaridade das diferentes misturas de argamassa após 90 minutos, é possível observar que a mistura com maior capilaridade, ou seja, a maior absorção de água, é a 100% ARMP, chegando a aproximadamente 60 cm^3 . No entanto, as misturas com menor capilaridade, abaixo de $0,15 \text{ cm}^3$, são a que contém uma proporção maior de ARSM1 e ARSM2 na mistura, a capilaridade tende a diminuir, indicando uma menor absorção de água o que é o caso das composições 25 ANF + 75 ARSM1, 50 ANF + 50 ARSM2, e 25 ANF + 75 ARSM2. O gráfico 92 e 93 demonstra a absorção de água por capilaridade com ANG.

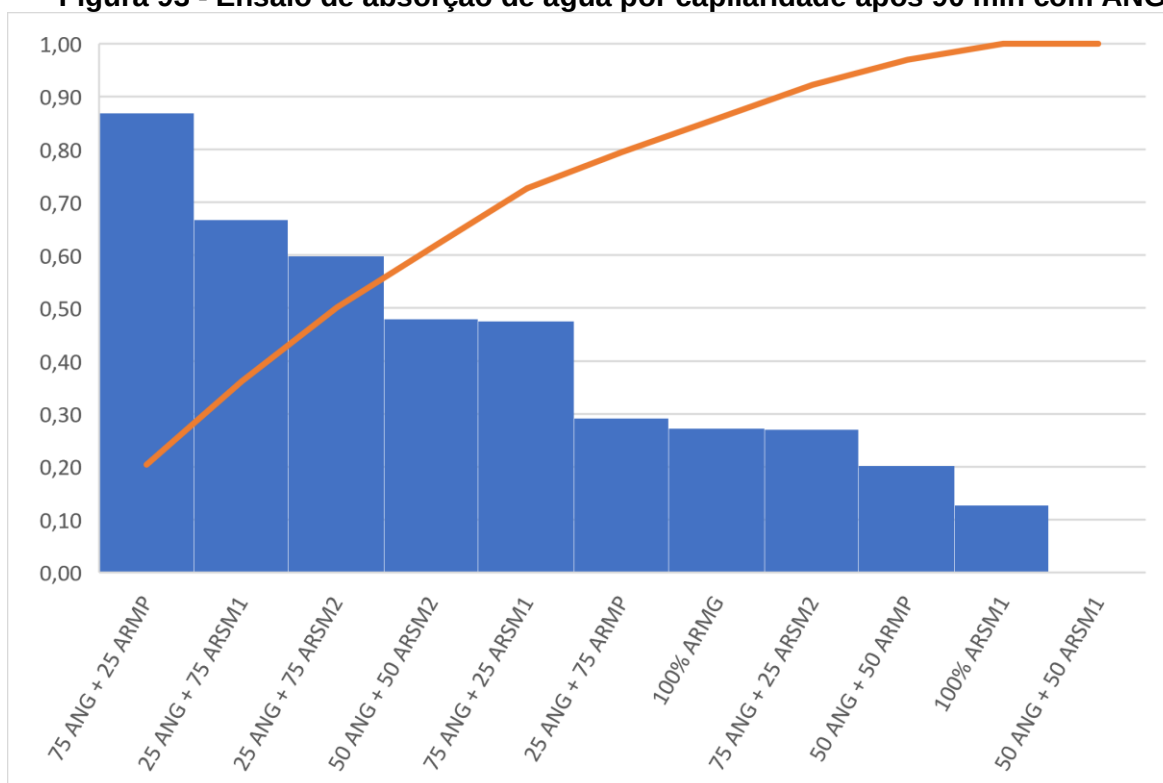
Figura 92 - Ensaio de absorção de água por capilaridade após 10 min com ANG

Fonte: Autora (2025)

Com base na análise do gráfico apresentado, a composição com 75 ANG + 25 ARSM2 apresenta a maior capilaridade após 10 minutos. Essa composição atingiu aproximadamente 4,4 cm³ de capilaridade, sendo a maior entre todas as composições analisadas.

Entre as composições analisadas, a mistura com 25 ANG + 75 ARSM1, apresentou a melhor capilaridade, ficando em torno de 0,2 cm³ após 10 minutos.

Nas demais composições os resultados são menores em comparação com as composições de ANF. A ANG apresentou melhores resultados na maioria das composições de capilaridade.

Figura 93 - Ensaio de absorção de água por capilaridade após 90 min com ANG

Fonte: Autora (2025)

Analisando o gráfico, observa-se que a capilaridade das diferentes misturas de argamassa após 90 minutos varia significativamente. A composição com 100% ARMP apresenta a maior capilaridade, chegando a aproximadamente 4,5 cm³, as composições com maior proporção de ARMP (25 ANG + 75 ARMP e 75 ANG + 25 ARMP) também apresentam baixa capilaridade, abaixo de 1,0 cm³. As composições com 100% ANG, 100% ARSM1, e 50 ANG + 50 ARSM1 apresentaram as menores capilaridades, ficando, abaixo de 0,50 cm³. Em comparação com as composições contendo ANF, é possível observar que os resultados para capilaridade são mais satisfatórios com ANG.

Após um detalhado processo de avaliação da resistência à compressão de diversas argamassas, foram identificadas três composições específicas para a fabricação de concreto estrutural que apresentaram desempenho superior. As formulações selecionadas foram: 25% ANG + 75%ARSM1; 25% ANF + 75%ARSM1; 25% ANF + 75%ARSM2. Estas misturas foram escolhidas com base na sua superioridade em termos de propriedades mecânicas, particularmente através de uma análise rigorosa que incluiu a comparação e o cruzamento de dados de desempenho em estado endurecido, garantindo assim que essas combinações sejam capazes de atender às exigências técnicas para aplicações em construção civil.

6.1.9 CONCRETO PRODUZIDO

Após uma análise minuciosa das propriedades das argamassas, foram desenvolvidos concretos utilizando os mesmos parâmetros e distribuição granulométrica das argamassas previamente estudadas. As composições granulométricas selecionadas para essa etapa foram 25% ANG + 75% ARSM1, 25%ANF + 75%ARSM2, 25% ANF + 75% ARSM2. Na tabela 28 estão mostrados os consumos dos materiais utilizados na produção dos concretos.

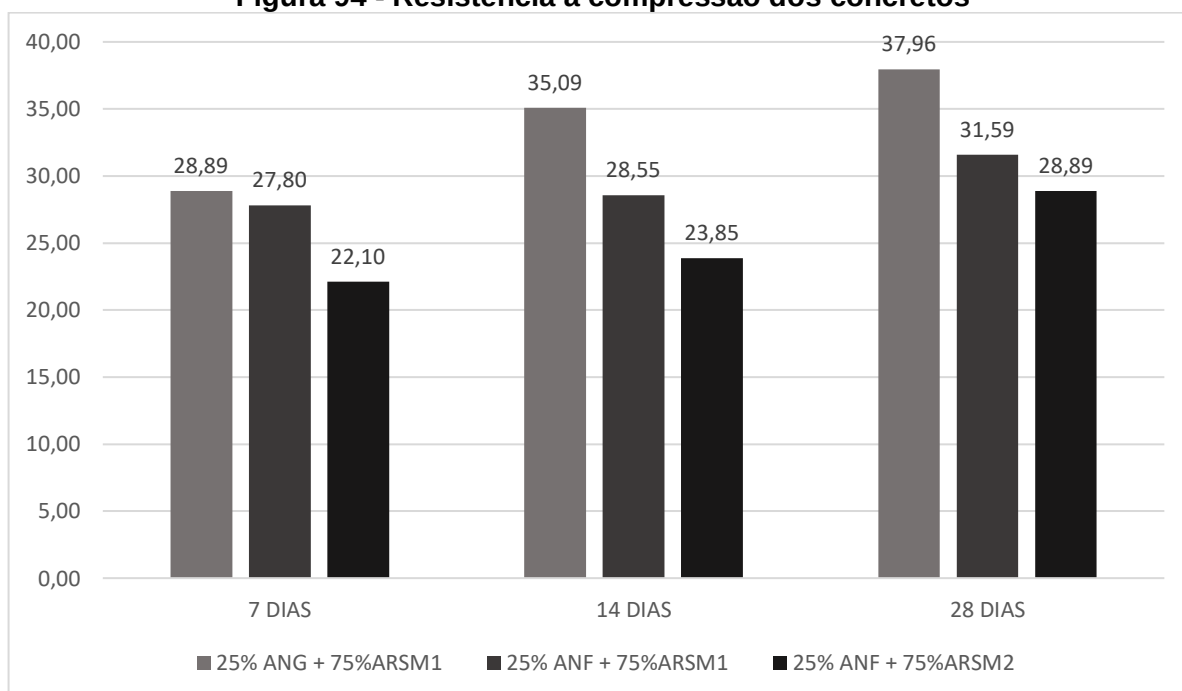
Tabela 28 - Consumo de materiais em kg por m³ do concreto

COMPOSIÇÃO	CIMENTO	AREIA NATURAL	AGREGADO RECICLADO	BRITA	ÁGUA
25% ANF + 75% ARSM2	10,397	10,397	10,397,40	10,397	5,198
25% ANF + 75% ARSM1	10,384	10,384	10,384	10,384	5,192
25% ANG + 75% ARSM1	10,440	10,440	10,440	10,440	5,220

Fonte: Autora (2025)

Os resultados da resistência à compressão dos concretos produzidos estão representados graficamente na figura 94.

Figura 94 - Resistência à compressão dos concretos



Fonte: Autora (2025)

Ao avaliar os gráficos, verifica-se que a mistura que se destacou em termos de resistência à compressão foi aquela composta por 25% de agregado natural ANG e 75% de ARSM1. Essa combinação demonstrou os valores mais elevados de resistência à compressão em todas as medições realizadas aos 7, 14 e 28 dias.

Apesar de apresentar valores inferiores em relação à formulação ANG + ARSM1, o desempenho da composição ANF + ARSM1 foi satisfatório e bastante consistente ao longo do tempo. Observa-se que o uso do ANF proporciona uma microestrutura menos resistente e mais frágil em comparação ao uso de ANG.

Em contrapartida, a composição contendo 25% de agregado natural ANF e 75% de ARSM2 apresentou os menores níveis de resistência à compressão ao longo do período de observação.

Todos os concretos obtidos apresentaram resistência à compressão aos 28 dias adequados para serem utilizados em elementos estruturais convencionais (f_{ck} maior que 20 MPa, o que corresponde a um f_{cj} maior que 26,6 MPa), desde que compatível com o projeto estrutural e respeitados os critérios de agressividade ambiental e durabilidade previstos nas normas vigentes (NBR 8953, NBR 6118 e NBR 12655).

Os resultados obtidos no concreto reproduzem o comportamento observado nas argamassas. Desse modo, pode-se dizer que a mistura com o agregado reciclado ARSM1 teve melhor desempenho mecânico quando combinada com a areia natural grossa (ANG); já quando se manteve o mesmo agregado natural (ANF), a mistura com ARSM1 teve melhor desempenho em relação àquela com ARSM2.

7. CONCLUSÕES

O presente estudo investigou de forma abrangente as propriedades de argamassas produzidas com distintas composições granulométricas, combinando agregados naturais (ANF e ANG) e reciclados (ARMP, ARSM1, ARSM2), avaliando o comportamento tanto no estado fresco quanto no estado endurecido. A análise integrada das características dos agregados e do desempenho das argamassas se mostrou fundamental para determinar a viabilidade técnica e o potencial de aplicação desses materiais na construção civil.

A caracterização granulométrica dos agregados demonstrou a conformidade dos materiais com os limites estabelecidos na NBR 7211 (ABNT, 2022), atestando sua adequação para a produção de argamassas e concretos. A análise demonstrou que o ANF apresenta uma distribuição granulométrica predominantemente dentro da zona ótima, enquanto o ANG está quase totalmente nessa mesma zona, com uma pequena parte abaixo do limite inferior. O ARMP também se enquadra na zona ótima, enquanto o ARSM1 está majoritariamente na zona utilizável superior, com poucos pontos na zona ótima e o ARSM2 distribui-se majoritariamente na zona ótima com um ponto próximo da zona utilizável inferior. Destaca-se que a diferença de granulometria entre os agregados reciclados ARSM1 e ARSM2 se deve aos diferentes equipamentos usados para a britagem. A combinação estratégica de agregados naturais e reciclados possibilitou a obtenção de distribuição granulométrica mais contínua, um fator reconhecido por potencializar as propriedades mecânicas das argamassas através da otimização do empacotamento de partículas (Powers, 1968).

A análise granulométrica dos agregados reciclados (ARMP, ARSM1 e ARSM2) demonstrou que o britador utilizado no seu processamento teve um impacto significativo nas características das partículas, influenciando diretamente o desempenho das argamassas. Em particular, o britador de mandíbulas 1, responsável pela produção do ARSM1, tendeu a gerar um agregado com uma distribuição mais contínua quando combinado com agregados naturais, além de um menor teor de finos em comparação com o ARSM2. Essas características do ARSM1, resultante do processo de britagem, mostraram-se favoráveis para o desenvolvimento da resistência à compressão nas argamassas.

A análise do MEV apresentou a morfologia superficial distinta dos agregados, com os agregados reciclados exibindo maior rugosidade e porosidade, fatores que

podem influenciar a aderência com a pasta de cimento e, consequentemente, as propriedades mecânicas. A composição mineralógica identificada por DRX também pode ter influenciado a reatividade e durabilidade das argamassas.

Na análise das propriedades da argamassa no estado fresco, observou-se uma redução no índice de consistência em comparação com a argamassa de referência (com 100% de agregados naturais), assim como evidenciado no trabalho de Silva (2024). Essa diminuição é atribuída à menor capacidade de retenção de água dos agregados reciclados em comparação aos naturais, o que impacta diretamente na trabalhabilidade da mistura. Os resultados da análise da massa específica das argamassas apresenta uma variação significativa entre as diferentes formulações, com valores de aproximadamente 1,21 g/cm³ a 2,12 g/cm³. As composições com maior massa específica, como as 75% ANG + 25% ARSM1 e ARSM2, indicam uma maior densidade e compacidade. Constata-se que houve um desempenho mecânico superior para estas misturas. Por outro lado, as argamassas com massa específica mais baixa, como a de 100% ARSM2, apresentaram menor resistência mecânica.

A análise da absorção de água por capilaridade demonstra que a substituição do agregado natural por agregados reciclados (ARSM1 e ARSM2) tendem a reduzir a absorção de água nas argamassas, especialmente em maiores proporções e após um período prolongado (90 minutos). A utilização de agregados reciclados de britagem primária (ARMP) resultou na maior absorção de água. Além disso, as composições com ANG apresentaram, de modo geral, menor capilaridade em comparação com aquelas contendo ANF.

Ao considerar a resistência à tração na flexão, observou-se que as composições com maior proporção de agregados reciclados ARSM1 e ARSM2 apresentaram melhores resultados. Destaque foi dado à composição ANG 50% + 50% ARSM2 que atingiu 8,01 MPa aos 28 dias. De modo geral, a resistência à tração aumentou com o passar do tempo (7,14 e 28 dias), com algumas exceções em que houve queda aos 28 dias. Portanto, os resultados sugerem que a utilização de agregados reciclados, especialmente o ARSM1 e ARSM2, pode contribuir para o aumento da resistência à tração em argamassas.

Quanto aos resultados de resistência à compressão, de maneira geral, as composições com maior proporção de agregados reciclados ARSM1 e ARSM2 apresentaram melhores resultados. Destaca-se a composição ANG 50% + 50% ARSM2, que atingiu 35,51 MPa aos 28 dias. A resistência à compressão aumentou

com o passar do tempo (7, 14 e 28 dias), com algumas exceções em que houve queda aos 28 dias. As composições com ANG 25% + 75% ARSM1 e ARSM2 obtiveram os melhores desempenhos de resistência à compressão aos 28 dias, chegando a 34,79 MPa e 35,51 MPa, respectivamente. Os resultados indicam que a incorporação de agregados reciclados, notadamente o ARSM1 e ARSM2, poderá contribuir para o aumento da resistência à compressão em argamassas.

Em comparação às diversas composições contendo ARSM1 e ARSM2, as misturas com ARMP tenderam a apresentar um desempenho menos favorável com relação à resistência à compressão, nas proporções avaliadas. A forma como ocorreu a britagem primária do ARMP pode ter influenciado negativamente suas características, contribuindo para o seu desempenho inferior em comparação com os agregados reciclados de britagem secundária (ARSM1 e ARSM2). Além disso, esse agregado apresentava uma coloração mais avermelhada, demonstrando uma predominância de materiais cerâmicos, tornando esse agregado menos resistente.

Ao analisar os resultados obtidos nas composições de argamassas desenvolvidas nesta pesquisa e compará-las com os achados de Silva (2024), observa-se que a resistência à compressão atingiu 35,51 MPa, superando consistentemente os valores encontrados por Silva (2024), que observou um desempenho de 19,13 MPa para a mesma composição. Essa discrepância significativa, que sugere uma distinção fundamental entre os estudos, pode ser atribuída à variação nos métodos de composição granulométrica empregados, bem como à origem dos materiais, aos métodos de ensaio e a outros parâmetros experimentais. Tais fatores demandam uma investigação aprofundada para a plena compressão e reconciliação dessas diferenças observadas, especialmente no que tange ao estudo do empacotamento das partículas e sua influência na resistência final da mistura.

Com base na resistência à compressão superior, três composições contendo ARSM1 e ARSM2 foram selecionadas para a produção de concreto estrutural.

A análise dos concretos elaborados com diferentes composições de agregados reciclados constatou que a mistura contendo 25% de ANG + 75% de ARSM1 apresentou o melhor desempenho em termos de resistência à compressão. Apesar de resultados inferiores, as composições com 25% ANF e 75% ARSM1 ou ARSM2 também demonstraram um desempenho satisfatório e consistente, sendo todas classificadas como concreto estrutural. Esses resultados indicam a viabilidade da

utilização desses agregados reciclados na produção de concretos. Ademais, resultados obtidos nos concretos refletiram a eficácia das argamassas com as mesmas composições granulométricas, evidenciando a reprodutibilidade dos resultados em diferentes escalas de produção.

Em suma, os resultados deste estudo confirmam a viabilidade da utilização de agregados reciclados na produção de argamassas, desde que as proporções sejam cuidadosamente ajustadas. A combinação de agregados naturais e reciclados não apenas atende às exigências de resistência mecânica, mas também resulta em materiais com desempenho adequado para diversas aplicações na engenharia civil.

A análise detalhada das propriedades das argamassa destaca a importância de uma abordagem integrada que considere tanto as características físicas dos materiais quanto suas interações em diferentes estados. O desenvolvimento de argamassas mais eficientes é um passo importante para a inovação na construção civil, promovendo a melhoria da performance estrutural e a durabilidade das edificações.

Além disso, a continuidade da pesquisa sobre o empacotamento de partículas e a microestrutura das argamassa pode oferecer novas perspectivas sobre como otimizar as composições para atender às exigências técnicas da construções modernas. Este estudo não apenas contribui para o conhecimento técnico na área, mas também abre caminhos para práticas construtivas mais eficazes e inovadoras, garantindo a qualidade e a segurança das estruturas.

7.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Buscando dar continuidade aos estudos realizados sobre o uso de agregado reciclado de resíduo da construção e demolição (RCD) em substituição parcial do agregado natural na produção de concretos, sugerem-se os seguintes temas para serem abordados em futuras pesquisas:

Realizar estudos de viabilidade técnica e econômica da aplicação de concretos com agregados reciclados em diferentes tipos de obras e elementos estruturais, visando promover a adoção dessa tecnologia na prática da construção civil.

Estudo da influência de aditivos na argamassa com substituição parcial de agregado miúdo natural por agregado miúdo reciclado: explorar o uso de aditivos para

otimizar as propriedades mecânicas como resistência, durabilidade e trabalhabilidade, visando aprimorar seu desempenho e ampliar suas possíveis aplicações na construção civil.

Investigar da influência do tempo de cura na resistência e durabilidade da argamassa com agregado reciclado: realizar ensaios que analisem o comportamento da argamassa estrutural ao longo de diferentes períodos de cura, visando compreender como o tempo influencia a resistência mecânica, a absorção da água e a durabilidade do material quando agregados reciclados são utilizados em substituição parcial do agregado miúdo.

REFERÊNCIAS

- ALBERTE, E. P. V.; HANDRO, J. B. **Estado do conhecimento acerca de especificações técnicas e normativas para agregados reciclados de RCD**. *Ambiente Construído, [S. l.]*, v. 21, n. 3, p. 305–320, 2021. Disponível em: <https://seer.ufrgs.br/index.php/ambienteconstruido/article/view/105013>. Acesso em: 3 maio. 2024.
- ANTONIASSI, Juliana Lívi. **A difração de raios X com o método de Rietveld aplicada à bauxita de Porto Trombetas, PA**. 2010 Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.
- ANGULO, Sérgio Cirelli e FIGUEIREDO, Antonio Domingues de. **Concreto com agregados reciclados. Concreto: ciência e tecnologia**. Tradução. São Paulo: Ibracon, 2011...Disponível em: <https://repositorio.usp.br/directbitstream/6b6f9fbe-e27d-4f86-8301-da1629f9b826/Figueiredo-2011-concreto.pdf>. Acesso em: 03 maio 2024.
- ANGULO, Sérgio Cirelli. **Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento de concretos**. 2005.Tese (Doutorado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.
- ARNOLD, Daiana Cristina Metz. **Análise da influência da forma dos grãos nas propriedades das argamassas**. 2011, 185f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, RS, 2011.
- ABRECON. **Pesquisa Setorial 2017/2018**. 2018. Disponível em: <<https://abrecon.org.br/pesquisa>. Acesso em: 22 fev. 2025
- ABRECON. **Pesquisa Setorial 2019/2020**. 2020. Disponível em: <<https://abrecon.org.br/documentos-e-informa/pesquisa-setorial-2017-2018>>. Acesso em: 22 fev. 2025
- ABRECON. **Pesquisa Setorial**. 2023. Disponível em: <<https://abrecon.org.br/pesquisa>>. Acesso em: 22 fev. 2025
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregados para concreto: NBR 7211**. Rio de Janeiro, 2022a.
- _____. **NBR 5739: Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos**: Rio de Janeiro, 2018.
- _____. **NBR 5752: Materiais pozolânicos – Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias**. Rio de Janeiro, 2014.

_____**NBR 6118:** Projeto de estruturas de concreto –Procedimento. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2014.

_____**NBR 7215:**Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.

_____**NBR 7218:** Agregados – Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis. Rio de Janeiro, 2010a.

_____**NBR 9779:** Argamassa e concreto endurecido – Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 2013.

_____**NBR 10005:** Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

_____**NBR 10006:** Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

_____**NBR 13281:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Requisitos. Rio de Janeiro, 2005.

_____**NBR 13279:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.

_____**NBR 13749:** Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas — Especificação. Rio de Janeiro, 2013.

_____**NBR 15116:** Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil: Utilização em pavimento e preparo de concreto sem função estrutural: requisitos. Rio de Janeiro, 2021a.

_____**NBR 15261:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da variação dimensional (retratação ou expansão linear). Rio de Janeiro, 2005.

_____**NBR 15575-4:** Edificações habitacionais de até cinco pavimentos – Desempenho – Parte 4: Requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas - SVVIE. Rio de Janeiro, 2005.

_____**NBR 16915:** Agregados – Amostragem. Rio de Janeiro, 2021c.

_____**NBR 16916:** Agregados miúdo – Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2021d.

_____**NBR 16972:** Agregados – Determinação da massa unitária e do índice de vazios. Rio de Janeiro, 2021f.

_____**NBR 16973:** Agregados – Determinação do material fino que passa pela peneira de 75 µm por lavagem. Rio de Janeiro, 2021g.

_____**NBR 17054:** Agregados – Determinação da composição granulométrica – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2022e.

BRASIL 61. Lixo: Brasil gerou mais de 40 mil toneladas de resíduos de construção. 2022. Disponível em: <https://brasil61.com/n/lixo-brasil-gerou-mais-de-40-mil-toneladas-de-residuos-de-construcao-bras2411893>. Acesso em: 18 abr. 2025.

BAÍIA, Luciana. L. M.; SABBATINI, F.H. **Projeto e Execução de Revestimento de Argamassa**. 4 ed. São Paulo: Nome da Rosa, 2008.

BRAGA, M.; BRITO, J. de; VEIGA, R. **Incorporation of fine concrete aggregates in mortars**. *Construction And Building Materials*, [s.l.], v. 36, p.960-968, nov. 2012. Elsevier BV. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.06.031.4

BRAGAGNOLO, L.; KORF, E. P., **Aplicação de resíduos na fabricação de concreto: como técnicas analíticas de caracterização podem auxiliar na escolha preliminar do material mais adequado?** Revista Matéria, v.25, n.01, 2020.

BAZUCO, Régis Sandro. **Utilização de agregados reciclados de concreto para a produção de novos concretos**. 1999, 100 p. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999.

BARBOSA, M. T. G.; SANTOS, W. J.. ARGAD: **High Performance Mortar**. In: **Portugal SB 13 - Portugal Sustainable Building Contribution to Achieve the EU 20-20-20 Targets**, 2013, Guimaraes. Portugal. University of Minho, v. 1. p. 387. 2013.

BUTTLER, Alexandre Marques. **Concreto com agregados graúdos reciclados de concreto: influência da idade de reciclagem nas propriedades dos agregados e concretos reciclados**. 2003. Dissertação (Mestrado em Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

BUTTLER, Alexandre Marques. **Uso de agregados reciclados de concreto em blocos de alvenaria estrutural**. 2007. Tese (Doutorado – Engenharia de estruturas) Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2007.

Bastos, Patrícia Cardoso. **Análise comparativa entre o uso de métodos convencionais e o uso de softwares para a seleção de britadores e peneiras**. 2001. 2015, 114f. Monografia (Doutorado de Recursos Minerais), Universidade Federal de Minas Gerais, Porto, 2015.

BS EN 1052-3: **Test Methods of test for masonry. Determination of initial shear strength**. 2002.

CARRIJO, P. M. **Análise da absorção de água em agregados reciclados de resíduos de construção**. Dissertação (Mestrado) – USP, São Paulo, 2005.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). **Resolução nº 307, de 05 de julho de 2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil.** Diário Oficial da União, Brasília, DF, 17 jul. 2002.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). **Resolução nº 348, de 16 de agosto de 2004. Altera a resolução CONAMA nº 307, de 5 de Julho de 2002, incluindo o amianto na classe de resíduo perigosos.** Brasília, DF, 17 de ago. 2004.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). **Resolução nº 431, de 24 de maio de 2011. Estabelece nova classificação para o gesso.** Brasília, DF, 25 maio 2011.

CONAMA. Resolução nº 469, de 29 de julho de 2015. **Altera a resolução CONAMA nº 307/2002 sobre gestão de resíduos da construção civil.** Brasília, DF, 30 jul. 2015.

COSTA. **Propriedades mecânicas e durabilidade de concretos produzidos com agregados miúdos reciclados e metacaulim dosados pelo modelo de empacotamento compressível.** 2021. Dissertação. Mestrado em Engenharia civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2021.

COSTA FAGURY, Samir; MAZZEO GRANDE, Fernando. **Gestão de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) - aspectos gerais da gestão pública de São Carlos/SP.** Exacta, São Paulo, vol. 5, n. 1, 2007.

COUTO, T. A. **Reação Álcali-Agregado: Estudo do Fenômeno em Rochas Silicosas.** 2008. 191f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2008.

Correia, J. R., de Brito, J., & Pereira, A. S. (2016). Characteristics of concrete produced with coarse recycled concrete aggregates with different amounts of adhered mortar. *Construction and Building Materials*, 110, 146-162.

CALCADO, Gabrielle Christina da Silva. **Influência da adição de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição no desempenho de argamassas de cimento Portland.** 2015. Monografia (Graduação em Engenharia Civil). Universidade federal do Rio de Janeiro – UFRJ / Escola Politécnica, 2015.

CARVALHO, Patrícia Vieira Pontes. **Análise da influência de modelos de empacotamento de partículas na resistência à compressão axial de um concreto de pós reativos.** 2022. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

CONCEIÇÃO, M. M. M. et al. **Diagnóstico dos resíduos de demolição e construção no Brasil**. Brazilian Journal of Development, v. 7, n. 9, p. 87466-87481, 2021.

CURY, Ana Carolina Seguro et al. **Análise da influência do teor de fibras de aço relacionado ao excesso de volume de pasta do concreto de ultra-alto desempenho**. 2024. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

CARASEK, Helena. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. São Paulo: IBRACON, 2007. V. 2.

CARASEK, Helena. Argamassas. In: ISAIA, Geraldo Cechella. **Materiais de Construção Civil**. 2ed. São Paulo: IBRACON, 2010, v. 2.

CABRAL, Antonio Eduardo Bezerra. **Modelagem de propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados, considerando-se a variabilidade da composição do RCD**. 2007. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental). Escola de Engenharia de São Carlos. São Carlos, Universidade de São Paulo, 2007

DAMINELI, Bruno Luís. **Estudo de métodos para caracterização de propriedades físicas de agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados**. 2007, 107p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) - Escola Politécnica, University of São Paulo, São Paulo, 2007.

De Brito, J., & Saikia, N. (2012). **Recycled aggregate in concrete: applications and performance**. Springer Science & Business Media.

DOTTO, G. L. et al. **Equilibrium and thermodynamics of azo dyes biosorption onto *Spirulina platensis***. Brazilian Journal of Chemical Engineering, v. 30, n. 1, p. 13–21, jan. 2013

Dom Total, Construção Civil, 2025 Disponível Em: <
<https://domtotal.com/noticia/1262733/2018/06/Reaproveitamento-De-Residuos-SolidosDa-Construcao-Civil-No-Brasil/>>

EN 13139: **Aggregates for mortar**. 2002.

EN 206:2013 + A1:2015. **Concrete - Specification, performance, production and conformity**. European Committee for Standardization, Brussels, 2015.

Evangelista, A. C. J., & de Brito, J. (2007). **Concrete made with aggregates from construction and demolition waste: Microstructural analysis**. *Cement and Concrete Composites*, 29(8), 664-672.

FERREIRA, Amanda Daniele Berredo Matos et al. **Análise do cenário dos resíduos de construção e demolição no município de Goianésia do Pará**. 2024.

FERREIRA, R. L. S.; ANJOS, M. A. S.; PEREIRA, J. E. S.; FONSECA, N. J. M.; NÓBREGA, A. K. C., **Avaliação das propriedades físicas, químicas e mineralógicas da fração fina (<150µm) do agregado reciclado de RCD.** v. 65, pp. 139-146, 2019.

FIGUEIRA, Hedda Vargas; LUZ, Adão Benvindo da; ALMEIDA, Salvador Luiz Matos de. **Britagem e moagem.** 2010.

FREITAS, C. **Argamassas de Revestimento com Agregados Miúdos de Britagem da Região metropolitana de Curitiba: Propriedades no Estado Fresco e Endurecido.** 2010. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

FENNIS, S. A.A.M.; WALRAVEN, J. C. **Using particle packing technology for sustainable concrete mixture design.** Heron, v. 57, n. 2, p. 73-102, 2012.
HAFEZ, H.; KURDA, R.; KURDA, R. et al. **A critical review on the influence of fine recycled aggregates on technical performance, environmental impact and cost of concrete.** Applied Sciences, v. 10, pp. 1-24, 2020.

HANSEN, T. C. **Recycling of demolished concrete anda masonry: report of Technical Committee 37 – DRC, Demolition and reuse of concrete.** Rilem report 6. London; New York: E & FN Spon, 1992.

HAWLITSCHKE, GUSTAV. **Caracterização das propriedades de agregados miúdos reciclados e a influência no comportamento reológico de argamassas.** 2014, 166p Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

HEINECK, Simone. **Desempenho de argamassas de revestimento com incorporação da fração miúda da britagem de concreto.** Dissertação (Mestrado). Universidade do vale do rio dos sinos, São Leopoldo, 2012.

HOLT, PK, BARTON, GW, WARK, M. E MITCHELL, CA. **A quantitative comparison between chemical dosing and electrocoagulation.** Collois and Surfaces A 211 (2002).

GRANER, C. A. F; ZUCCARI, M. L.; PINHO, S. Z. **Determinação da demanda química de oxigênio em águas por espectrofotometria simultânea dos íons crômio (III) e dicromato.** Eclética Química, São Paulo, 1998.

GRÉGORIO CRINI, PIERRE-MARIE BADOT. **Application of chitosan, a natural aminopolysaccharide, for dye removal from aqueous solutions by adsorption processes using batch studies: A review of recent literature.** Progress in Polymer Science, 2008.

GOLÇALVES, J.P.; TAVARES, L.M.; TOLEDO F., R.D.; FAIRBAIRN, E.M.R.; CUNHA, E.R. **Comparison of natural and manufactured fine aggregates in**

cement mortars. Cement and Concrete Research, volume 37, pages 924 – 932, 2007.

GIRARDI, ALINE CRISPIM CANEDO. **Avaliação da substituição total de areia natural por RCD em revestimentos de argamassa.** 2016, 130f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, Goiânia, 2016.

Gomes, M. G., & de Brito, J. (2012). **Structural behaviour of reinforced concrete beams made with recycled concrete aggregates.** *Materials and Structures*, 45(9), 1451-1470.

JOHN, Vanderley Moacyr e AGOPYAN, Vahan. **Reciclagem de resíduos da construção.** 2000, Anais. São Paulo: Secretaria de Estado do Meio Ambiente / Cetesb, 2000. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/directbitstream/e807d4a7-3074-4c45-b935-e68e92a8d85d/John-2000-reciclagem.pdf>. Acesso em: 03 maio 2024.

JUAN, M. S.; GUTIÉRREZ, P. A. **Influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate.** *Construction and Building Materials*, 2009.

JUAN, M. S. **Estudio sobre la utilización de árido reciclado para la fabricación de hormigón estructural.** 2004. 502p. Tesis (Doctorado) – Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, 2004.

KERN, P.; MORESCO, M.; PIZONI, GONZÁLEZ, A. S. **IMPLANTAÇÃO DE PLANTAS DE RECICLAGEM DE RCD: ANÁLISE FINANCEIRA, FATORES DE INFLUÊNCIA E O PAPEL DOS PRINCIPAIS AGENTES.** *MIX Sustentável, [S. l.]*, v. 7, n. 2, p. 79–92, 2021.

KHATIB, J. M. **Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate.** *Cement and Concrete Research*; volume 35, pages 763 – 769, 2005.

LATTERZA, Luciano de Melo. **Concreto com agregado graúdo proveniente da reciclagem de resíduos de construção e demolição. Um novo material para fabricação de painéis leves de vedação –** São Carlos. 1998, 116p. Dissertação (Mestrado em estruturas). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.

LIMBACHIYA, M.C.; MARROCCHINO, E, KOULOURIS, A.; **Chemical – mineralogical characterization of coarse recycled concrete aggregate.** *Waste Management*; volume 27, pages 201-208, 2007.

LIMA, Anderson Luiz. Pires de. **Melhoria na eficiência do moinho de martelos em processo de moagem na fabricação de ração para aves.** 2018. Trabalho de

Conclusão de Curso (Especialização em Engenharia de Produção) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2018.

LIMA, José Antonio Ribeiro de. **Proposição de diretrizes para produção e normalização de resíduo de construção reciclado e de suas aplicações em argamassas e concretos**. 1999. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

LIMA, P.R.L.; TOLEDO FILHO, R.D.; GOMES, O.D.M., 2014, “**Influence of recycled aggregate on the rheological behavior of cement mortar**”. Key Engineering Materials.

LEITE, MÔNICA BATISTA. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos em agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. 2001. 270p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2001.

LEVY, Salomon Mony. **Reciclagem do entulho de construção civil, para utilização como agregado de argamassas e concretos**. 1997. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.

Limbachiya, M. C.; Leelawat, T.; Dhir, R. K. (2007). **Use of recycled concrete aggregate for low-strength concrete**. *Materials and Structures*, 40(6), 581-590.

LINS, E. A. M; FERREIRA, G. L. B; SANTANA, L. R.; PAZ, D. H. F; CAVALCANTI, F. M. **Gestão de Resíduos da Construção Civil e Demolição em Obra Comercial**. XIV Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental, Natal/RN: 2023.

LOTFI, M., Ben Amor, M., & Bouzidi, Y. (2015). **Effect of recycled concrete aggregates on the properties of self-compacting concrete**. *Construction and Building Materials*, 94, 53-61.

Martín-Morales, F. J., Zamora-Ramírez, C., Vale, J., Akçaoğlu, T., & Mazarrón, F. R. (2011). **Use of recycled construction and demolition waste as aggregate in hydraulic lime mortars**. *Construction and Building Materials*, 25(5), 2142-2150.

MAIA, P. S.; JUNIOR, L. A. S.; SALLES, P. V.; CARVALHO, M. V. S. **Avaliação técnica de concreto estrutural fabricado com agregado graúdo de resíduos de construção e demolição**. *Research, Society and Developemt*, v.11, n.8, 2022.

MALTA, J. O. **Dosagem de concretos produzidos com agregado miúdo reciclado de resíduo de construção e demolição**. 2012. 1792 f. Dissertação. (Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana) -Escola Politécnica, Universidade federal da Bahia, Salvador, 2012.

MACIOSKI, Gustavo. **Avaliação do comportamento de argamassas estabilizadas para revestimento**. 2014. 117 f. Trabalho Final de Curso (Graduação) - Engenharia Civil - Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2014.

METHA, P. K.; MONTEIRO, P.J.M. **Microestrutura, propriedades e materiais**. 3 ed. Editora Imbracon, São Paulo, 2008.

Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2014). **Concrete: microstructure, properties, and materials**. McGraw-Hill Education.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. Tradução de Paulo Roberto do Lago Helene (Coord.) et al. São Paulo: Pini, 1994.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedade e Materiais**. 2a Edição. São Paulo: IBRACON, p. 751, 2014.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. In: 3a ed. ed. São Paulo - SP: Editora Pini, 2008.

MIRANDA, Leonardo Fagundes Rosemback. **Estudo dos fatores que influem na fissuração de revestimentos de argamassa com entulho reciclado**. 2000. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2000.

MIRANDA, Leonardo e SELMO, Sílvia Maria de Souza. **Argamassas com areia de entulho reciclado**. Técnica, v. 74,2003.

MIRANDA, LFR; SELMO, SMS. **Part II – Analysis of the effect of materials finer than 75µm under accelerated aging performance**. Construction and Building Materials; volume 20, pages 625-633, 2006.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Boletim do Setor Mineral 2020** (Julho). In: SECRETARIA DE GEOLOGIA, M. E T. M. (Ed.). Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral. 4. ed. Brasília: Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral, 2020.

MOREIRA, L. H. H. **Avaliação da influência da origem e do tratamento dos agregados reciclados de resíduos de construção e demolição no desempenho mecânico do concreto estrutural**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Programa de pós-graduação em Engenharia Civil da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.2010.

MENDES, José Ricardo. **Gestão de Resíduos Sólidos da Construção Civil (RCC) no município de Hortolândia**. 2019. Monografia (Curso Superior de Tecnologia em Gestão Empresarial) Americana, 2019.

MARANHÃO, F. L. **The Production Variability of Recycled Aggregate in a Large Plant: Case Study**. Elsevier. Fev. 2016.

MELO, Cássia Vanessa Albuquerque De. **Avaliação e determinação de parâmetros para otimização de esqueleto granular em atendimento à autodensibilidade de concretos.** 2019. 246f. Tese (Doutorado em Materiais). Programa de Pós graduação em materiais da Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2019.

MOHAMMED, A.; SANJAYAN, J. G.; DUAN, W. H.; NAZARI, A. **Incorporating graphene oxide in cement composites: a study of transport properties.** Construction and Building Materials, v. 84, p. 341-347, 2015.

NEVILLE, Adam Mathew. **Propriedades do Concreto.** Tradução: Salvador E. Giamusso, 2 ed. rev. Atual, São Paulo: Ed. PINI, 1997.

NATO, Chrystian Tavares. Dosagem de concretos pela teoria do empacotamento de partículas e método IPT-EPUSP. 2023. 55f. il. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Cajazeiras, 2023.

NAPIER-MUNN, T. J. et al. **Minerak Comminution Circuits: their operation and optimization.** Queensland (JKMRC), 1996.

OLIVEIRA, C. O. **Análise das propriedades reológicas de materiais cimentícios associando o conceito de empacotamento de partículas.** 2013, 141 f. Dissertação (mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Ilha Solteira, 2013.

OLIVEIRA, I. R.; STUDART, A. R.; PILEGGI, R. G.; PANDOLFELLI, V. C. **Dispersão e empacotamento de partículas – princípios básicos e aplicações em processamento cerâmico.** Fazendo Arte Editorial, 2000.

OLIVEIRA, C. F. **Análise das propriedades do concreto quando utilizado após início de pega: tempo de utilização de concreto estrutural vencido.** 2010. Dissertação. (Mestrado em construção civil). Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2018.

OLIVEIRA M. E. D.; CABRAL E. B. **Argamassas de revestimentos produzidos com agregados reciclados de Fortaleza/ CE Brasil.** Revista Engenharia Civil, Universidade do Minho, n. 41, 21-34 p., Braga, 2011.

OLIVEIRA, I. R.; STUDART, A. R.; PILEGGI, R. G.; PANDOLFELLI, V. C. **Dispersão e empacotamento de partículas – princípios básicos e aplicações em processamento cerâmico.** Fazendo Arte Editorial, 2000.

ORIOLI, Monigleicia Alcalde et al. **Uso de agregado reciclado de resíduos de construção e demolição na estabilização de um solo siltoso melhorado com cimento para aplicação em base de pavimentos urbanos.** 2024.

PARENTE, Luiza Gomes Corrêa, CASTRO, Luciana Dias Martins da Costa; GARCIA, Dayana Cristina Silva; SANTOS, White J. Estudo sobre a substituição parcial do agregado miúdo natural por reciclado proveniente de resíduos de tijolos cerâmicos na produção de argamassa estrutural. In: VIII Encontro Nacional de Aproveitamento de Resíduos na Construção, 2023, Foz do Iguaçu.

PAULINO, R. S.; LAZARI, C. H.; MIRANDA, L. F. R.; VOGT, V. **Atualização do cenário da reciclagem de resíduos de construção e demolição no Brasil: 2008 - 2020**. AMBIENTE CONSTRUÍDO (ONLINE), v. 23, p. 83-97, 2023.

PENNSYLVANIA CRUSHER. **Handbook of crushing. Broomall: Pennsylvania Crusher**, 2003. Disponível em: Acesso em: 2005.

Pereira, P., Evangelista, A. C. J., & de Brito, J. (2014). **The effect of concrete composition on the mechanical properties of recycled aggregate concrete**. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 18(3), 367-385.

PEDROZO, R. F. E. **Influência da substituição do agregado miúdo natural por agregado reciclado fino em propriedades de argamassas e concretos**. 2008. 161 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, 2008

PISSOLATO JUNIOR, Osvaldo. **Argamassa de revestimento utilizando areia proveniente da britagem de resíduo de construção civil**. 2016. 91p. Dissertação (Mestrado) Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas-SP., 6 jun. 2016.

REIS G. R.; SILVA, C. P.; LIMA, H. J. N. **Avaliação do uso de agregados reciclados na fabricação de concreto**. *Inter scientia*, v.8 n.1 (2021).

RESENDE, Heron Freitas et al. **Uso de resíduos de construção e demolição como agregado reciclado no concreto: Uma breve revisão de literatura**. *Revista Principia*, v. 61, n. 3, p. 691-709, 2024.

RILEM Recommendation: **Specifications for concrete with recycled aggregates**. *Materials and Structures*, v. 27, p. 557-559, 1994.

ROY, D. M.; SCHEETZ, B. E.; SILSBEE, M. R. Processing of optimized cements and concretes via particle packing. *MRS Bulletin*, Nova Iorque, v. 18, p. 45-49, 1993.

SILVA, Juan Victorio Lima Montenegro da. **Análise da composição de agregados naturais e reciclados para a produção de argamassas**. Monografia (Conclusão de curso) – Federal University of Alagoas, Maceió, 2024.

SILVA, N. G. **Argamassa de revestimento de cimento, cal e areia britada de rocha calcária**. 2006 Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Construção Civil – PPGCC, Setor de Tecnologia, da Universidade Federal do Paraná. Curitiba/PR, 2006.

SILVA, R. V.; BRITO, J.; DHIR, R. K. **Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production.** Construction and Building Materials, v. 65, p. 201-217, 2014.

SILVA, R.; BRITO, J. D.; DHIR, R. **Use of recycled aggregates arising from construction and demolition waste in new construction applications.** Journal of Cleaner Production. Elsevier, v. 236, p. 117629, 2019.

SILVA, Jorge Luis Oliveira. **Análise de propriedades mecânicas de concretos produzidos com diferentes dosagens de agregados reciclados de concreto.** 2023. 109f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Alagoas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Maceió, 2023.

SILVA, E. C. R.; Miranda, L. F. R.; Melo, D. V. P.; Amorim Neto, E.; Araújo, M. C.; Gomes, T. O., **Propriedades de agregados reciclados produzidos a partir de RCD gerado em canteiros de obras de Recife/PE para uso em argamassas.** In: VIII Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas. Curitiba/PR, 2009.

SANTANA, M. J. A.; CARNEIRO, A. P.; SAMPAIO, T. S. **Uso do agregado reciclado em argamassas de revestimento. Reciclagem de entulho para a produção de materiais de construção.** Salvador. EDUFBA; Caixa Econômica Federal, 2001. p. 262 – 299.

SANTOS, M. L. L. O. **Aproveitamento de resíduos minerais na formulação de argamassas para a construção civil.** Tese de doutorado - Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, RN, 2008.

SANTOS, W. J. **Argamassa de alto desempenho.** Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora, MG, 2011

SAFIUDDIN, M., Salam, M. A., & Jumaat, M. Z. (2010). **Effects of recycled concrete aggregate on the properties of new concrete.** Journal of Materials in Civil Engineering, 22(8), 696-702.

SILVA, R. V. (2011). **Utilização de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição em betões estruturais.** Tese de Doutorado, Universidade Técnica de Lisboa.

SOUSA, Rebeka Manuela Lobo; SILVA, Paulysendra Felipe; OLIVEIRA, Francisca Das Chagas; SOUSA, Heitor Fernandes; LOPES, Phillype Dowglas; CHAVES, Francisco Arlon De Oliveira; FALCÃO, Milton De Sousa; PAZ, Gilvan Moreira Da; SOARES, Roberto Arruda Lima. **Estudo da qualidade do agregado miúdo utilizado na construção civil.** RESEARCH, SOCIETY AND DEVELOPMENT, v. 10, p. e420101422295, 2021.

SOUZA, F. dá S. et al. **Mapping and recycling proposal for the construction and demolition waste generated in the Brazilian Amazon.** Conservation and Recycling, v. 176, p. 105896, 2022.

SOUZA, J. S.; ANDRADE, P. dos S.; SILVA, M. M.; SCRAVELA, I. S. S. **PROPRIEDADES DE ARGAMASSAS PRODUZIDAS COM RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO.** Periódico Científico Eletrônico da FATEC, v. 7, p. 1-17, 2022.

SARDÁ, MARCIA CRISTINA. **Diagnóstico do Resíduo da Construção Civil gerado no município de Blumenau – SC.** Potencialidades de Uso em obras públicas. 129p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – UFSC. Florianópolis, 2003.

SALES, A. T. C; CABRAL, M. F. F. **Argamassas com agregados reciclados de resíduo de construção.** In: Encontro Nacional sobre Aproveitamento de Resíduo na Construção, 2009.

SAMPAIO, João Alves; JÚNIOR, Homero Delboni. 4.1 **PRINCÍPIOS DA COMINUIÇÃO** .2018.

SANTOS, A. S.; ISELLE, A.; DIAS SILVA, H. **RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL: Conceito, Históricos e Gerenciamento.** Revista eletrônica Organizações e Sociedade, Iturama/MG, v. v.8, n. 10, p. 5-21p, 2019.

SIPRES, Clarice. **ANÁLISE TÉCNICA DO USO DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD) NA PRODUÇÃO DE CONCRETO SECO PARA PISO INTERTRAVADO.** 2019. 56p. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2019.

Tavares de Assunção, L., Ferreira de Carvalho, G., & Santos Barata, M. (2007). **Avaliação das propriedades das argamassas de revestimentos produzidos com resíduos de construção e demolição como agregados.** Exacta, 5 (2), 223-230.

TENÓRIO, J. J. L. **Avaliação de propriedades do concreto produzido com agregados reciclados de resíduos de construção demolição visando aplicações estruturais.** 2007. 157f Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Alagoas. Maceió, 2007.

TRISTÃO, F. A. **Influência dos parâmetros texturais das areias nas propriedades das argamassas mistas de revestimento.** 286 f. 2005. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

TOPÇU, I.B.; SENDEL, S. **Properties of concretes produced with waste concrete aggregate.** Cement and Concrete Research, volume 34(8), pages 1307–12, 2004.

Topçu, İ. B., & Sarıdemir, M. (2008). Effect of crushed ceramic waste as fine aggregate on properties of cement mortars. ***Cement and Concrete Research***, **38**(11), 1187-1193.

TSENG, ESTER. **Reciclagem total de pavimentos de concreto como agregados para construção de novos pavimentos de concreto: O caso do Rodoanel Metropolitano Mário Covas / E. Tseng.** – São Paulo, 2010.

WESTERHOLM M.; LAGERBÇAD B.; SILFWERBRAND J.; ERIC F. **Influence of fine aggregate characteristics on the rheological properties of mortars.** *Cement and Concrete Composites*, Volume 30, Issue 4, p. 274-282, Abril, 2008.

WILLS, B. A.; NAPIER-MUNN, T. J. **Wills' mineral processing technology: an introduction to the practical aspects of ore treatment.** 7. ed. London: Butterworth-Heinemann, 2006

XIAO, J., Li, W., Poon, C. S., & Zhang, Z. (2012). **Properties of concrete prepared with recycled concrete aggregates.** *Construction and Building Materials*, **31**, 721-727.

ZORDAN, S. E. **A utilização do entulho como agregado, na confecção do concreto.** 1997.140p. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia Civil, Departamento de Hidráulica e Saneamento, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 1997.

Zhu, H., Zhang, Z., Xiao, J., & Poon, C. S. (2020). **Effect of adhered mortar content on the properties of recycled concrete aggregates and performance of recycled aggregate concrete.** *Cement and Concrete Composites*, **105**, 103442.

Apêndice

Nas figuras 95 a 103 são apresentados os gráficos da resistência à tração nas diferentes idades de 7, 14 e 28 dias,

Figura 95 - Resistência à tração ANF + ARSM1 7 DIAS

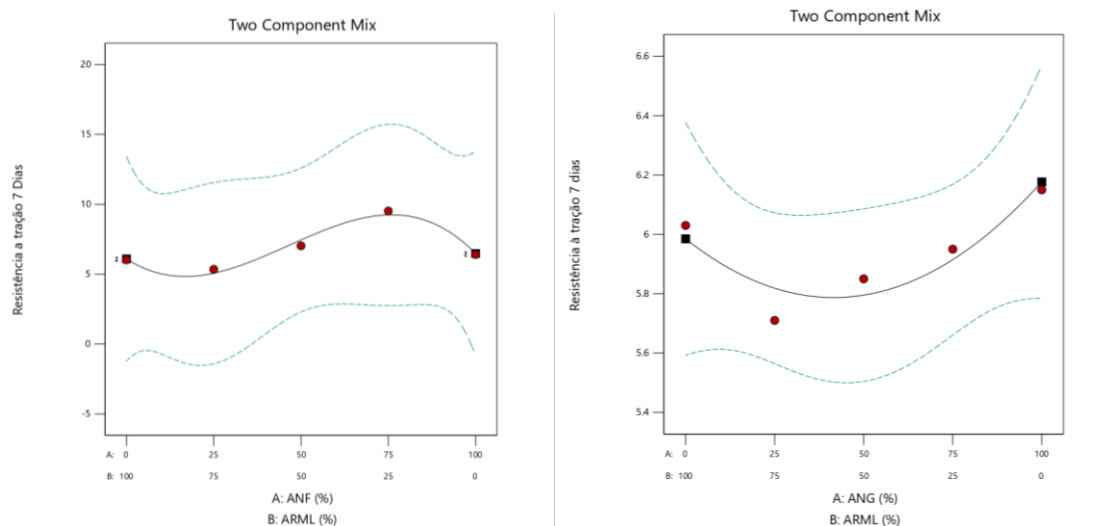


Figura 96 - Resistência à tração ANF + ARSM1 14 dias

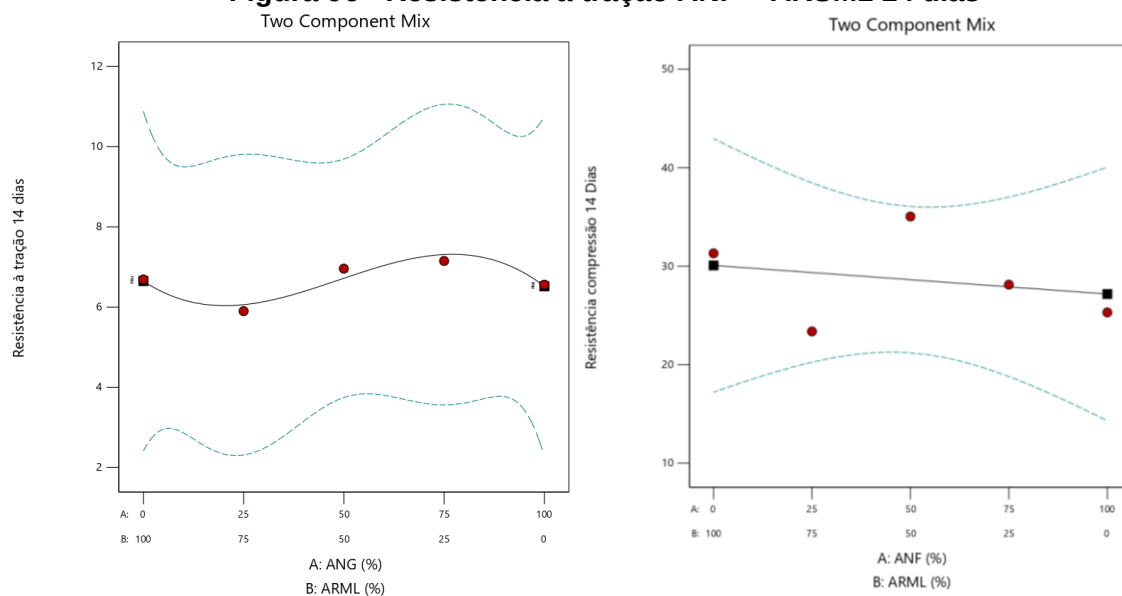
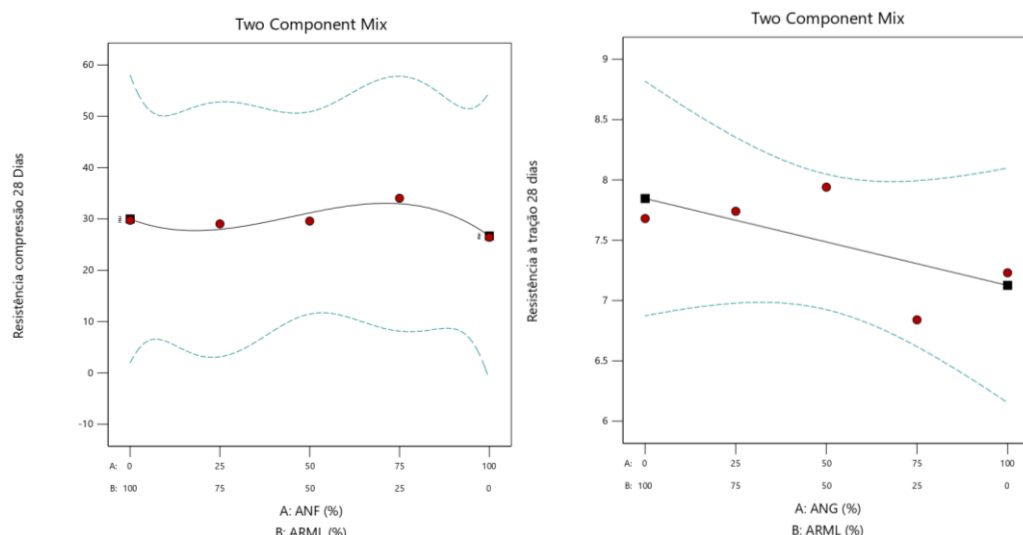


Figura 97 - Resistência à tração 28 dias composição ARSM1

A composição “ANF 25% + 75% ARSM1” apresenta a maior resistência à tração na flexão média aos 28 dias, com 7,89 MPa para esta combinação de agregados. Com proporções mais altas de ARSM1, como em “ARSM1 100%” e “ANG 25% + 75% ARSM1”, a resistência tende a aumentar. A resistência geralmente cresce ao longo do tempo, com exceções, como a queda na resistência da composição “ANF 50% + 50% ARSM1” aos 28 dias. A composição “ANG 50% + 50% ARSM1” alcança a maior resistência aos 28 dias, com 7,94 MPa, dentre as argamassas com a mesma combinação. As figuras 104 a 106 apresenta a resistência à tração do ARMP.

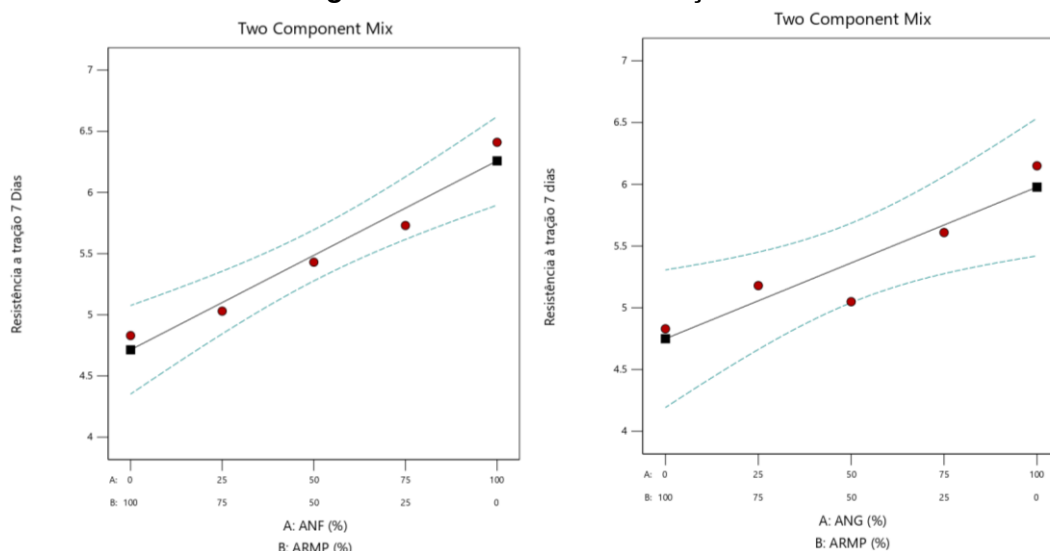
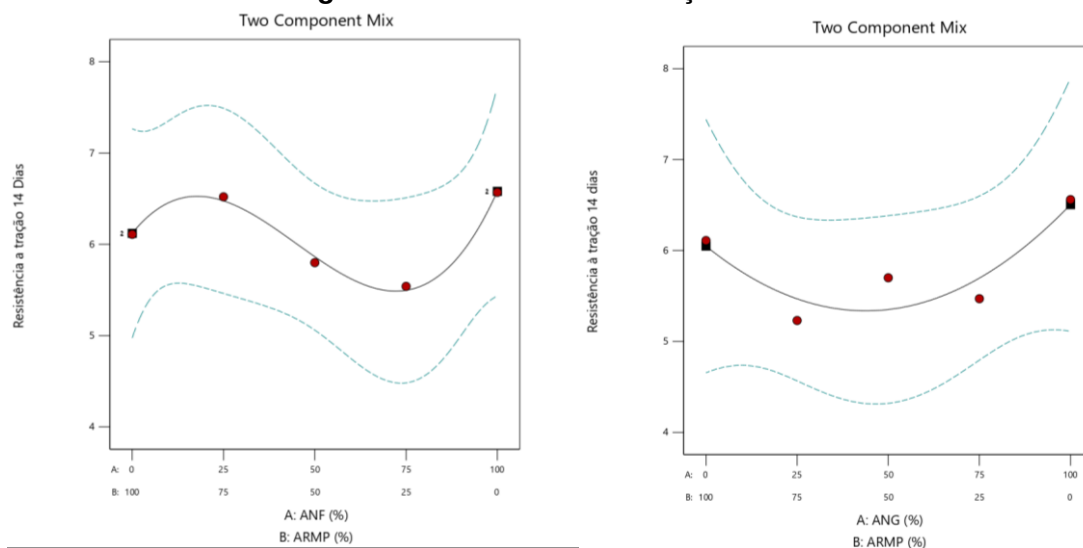
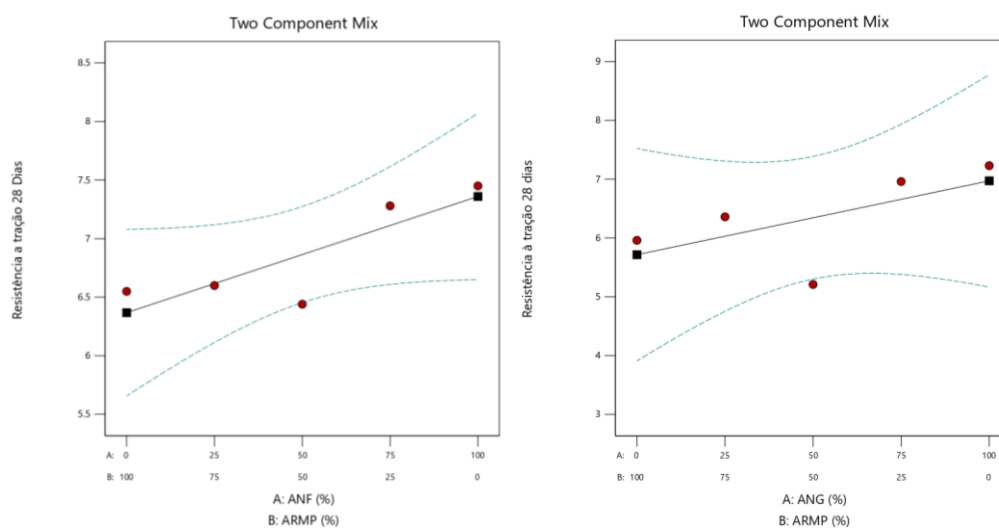
Figura 98 - Resistência à tração ARMP 7 dias

Figura 99 - Resistência à tração ARMP 14 dias**Figura 100 - Resistência à tração ARMP 28 dias**

Fonte: Autora (2025)

A composição “ANF 100%”, com 7,45 MPa, é a de maior resistência à tração aos 28 dias. Com maior proporção de ARMP, como “ARMP 100%”, a resistência à tração é menor, atingido 5,96 MPa. A resistência se mantém estável ao longo do tempo (7, 14 e 28 dias), exceto em casos como “ANG 50% + 50% ARMP”, que mostra queda aos 28 dias. Conclui-se que a argamassa “ANF 100%” é a mais resistente, com 7,45 MPa aos 28 dias.

Figura 101 - Resistência à tração ARSM2 7 dias

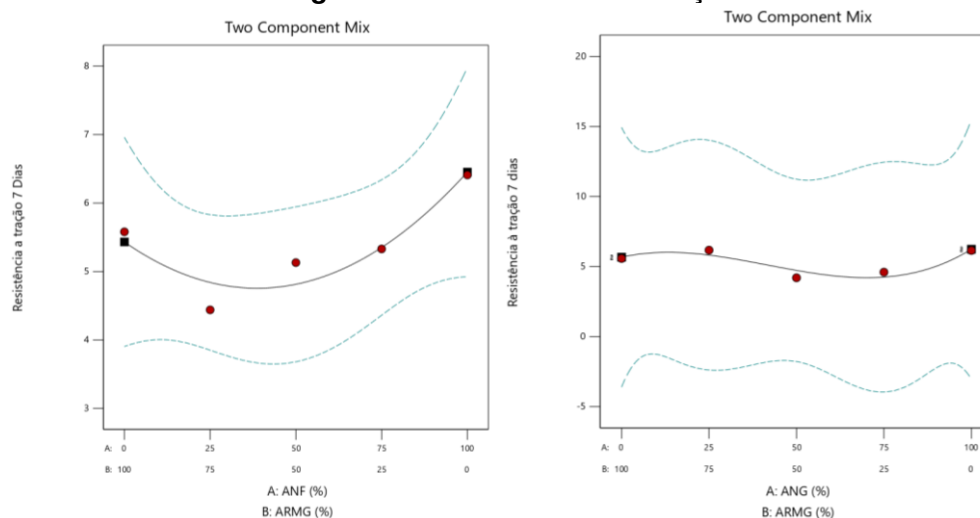


Figura 102 - Resistência à tração ARSM2 14 dias

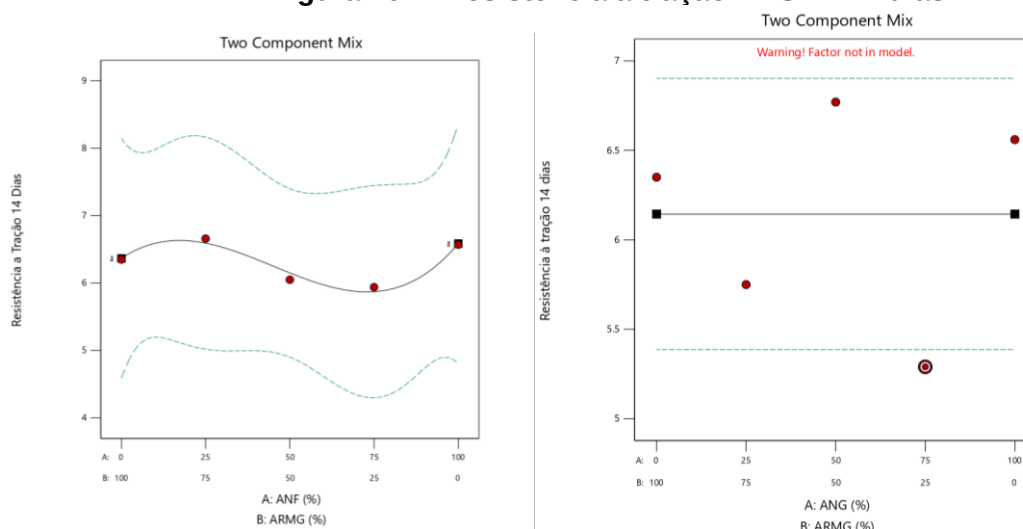
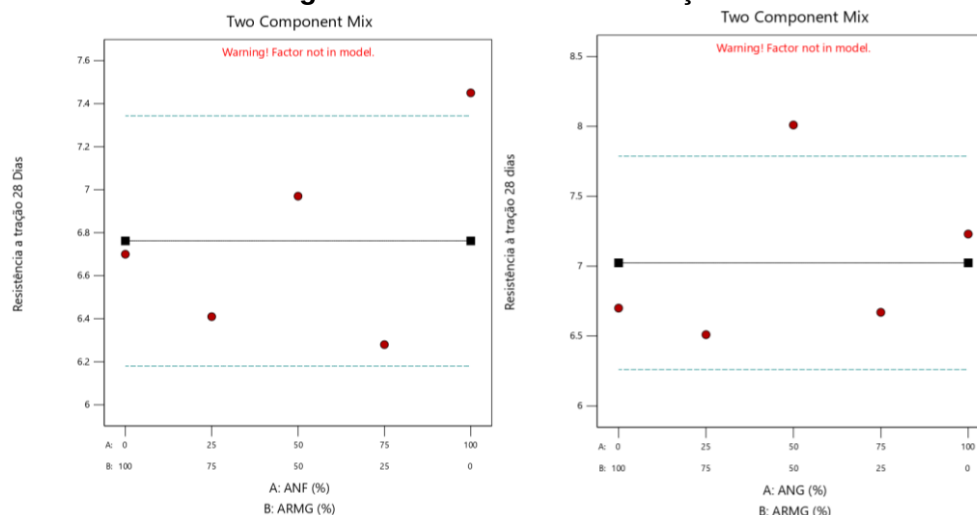


Figura 103 - Resistência à tração ARSM2 28 dias

Fonte: Autora (2025)

A composição ANG 50% + 50% ARSM2 mostra maiores resultados de resistência à tração na flexão média, com 8,01 MPa aos 28 dias, superando as demais composições analisadas. As comparações mostram que compostos com maior proporção de ARSM2 têm melhor desempenho do que aqueles com maior proporção de ANF. Composições intermediárias, com 50% de cada material, também têm resultados positivos. Em resumo, a composição ideal é a ANG 50% + 50% ARMG, que se destaca em todas as idades analisadas.

De acordo com Silva (2010), o aumento na resistência à tração das argamassas recicladas analisadas pode ser explicado pela diminuição da relação água/cimento efetiva, mesmo mantendo a quantidade de água da mistura constante.