



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MATERIAIS PARA ENGENHARIA

**ANÁLISE ESTATÍSTICA DAS PROPRIEDADES DO CONCRETO
AUTOADENSÁVEL MISTURADO COM RESÍDUO DE BORRACHA DE PNEUS.**

DEMARCUS WERDINE

Itajubá, 2021

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MATERIAIS PARA ENGENHARIA

DEMARCUS WERDINE

ANÁLISE ESTATÍSTICA DAS PROPRIEDADES DO CONCRETO
AUTOADENSÁVEL MISTURADO COM RESÍDUO DE BORRACHA DE PNEUS

Defesa de Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Materiais para Engenharia como parte dos requisitos para obtenção do Título de Doutor em Materiais para Engenharia.

Área de Concentração: Não Metais

Orientadora: Prof.^a Dra. Mirian de Lourdes Noronha Motta Melo

Coorientador: Prof. Dr. Guilherme Ferreira Gomes

Itajubá, 2021

Dedicatória

Dedico este trabalho a Deus, minha essência, meu Tudo.

AGRADECIMENTOS

À Deus por ser minha força, meu refúgio e minha rocha forte.

*À minha esposa e filha amadas pelo apoio incondicional e por serem fundamentais na
minha vida.*

*À minha querida mãe e saudoso pai que apesar de não estar mais entre nós foi quem
sempre me incentivou ao aprendizado.*

*Aos Professores Ma. Cidélia Maria Barbosa Lima pelo apoio e compreensão,
Dra. Miriam de Lourdes Noronha M. Melo pela orientação e estímulo fundamentais e
Dr. Guilherme Ferreira Gomes pela preciosa e indispensável coorientação.*

Aos amigos Déia, Fernando e Lucas Ramon por todo apoio e amizade.

Ao Centro Universitário de Itajubá – FEPI

A Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI

Aos amigos do Excen pelo companheirismo.

Muito Obrigado!

RESUMO

WERDINE, D. (2021), Análise estatística das propriedades do concreto autoadensável misturado com resíduo de borracha de pneus. 2021. 151p. Tese (Doutorado em Materiais para Engenharia). Universidade Federal de Itajubá, Itajubá – MG, 2021.

O presente trabalho tem como objetivo analisar a influência da incorporação de resíduos de borracha de pneus (RBP) em diferentes teores e granulometrias, em substituição parcial a areia, nas propriedades físicas e mecânicas do concreto autoadensável. O mercado da construção civil e as inúmeras inovações tecnológicas da área, têm exigido, cada vez mais, materiais que apresentem características especiais, buscando assim, dentre outros benefícios, a melhoria na durabilidade e no desempenho das estruturas. Desta forma, o concreto, principal material de construção utilizado na atualidade e o segundo mais consumido no mundo, tem sido o alvo de muitas pesquisas e experimentos. É notável que o emprego do concreto autoadensável (CAA), vem sendo descrito por muitos pesquisadores como uma grande revolução ocorrida na tecnologia do concreto devido suas características de fluidez e viscosidade além de proporcionar economia de energia durante sua confecção. As diversas formas de utilizar resíduos de borracha de pneus inservíveis na composição do CAA tem sido um assunto bastante explorado em diversas pesquisas da área, sempre buscando o emprego sustentável do resíduo e os benefícios que ele pode proporcionar ao produto final. Para se obter o traço do CAA, esta pesquisa foi baseada no Método de Gomes, e para o melhor empacotamento dos agregados do concreto, utilizou-se o software EMMA (*Elkem Materials Mixture Analyzer*). Várias misturas foram preparadas com 10%, 30% e 50% de RBP e com granulometrias de dimensões inferiores a 0,6 mm e granulometrias de dimensões entre 0,6 mm e 4,8 mm. No estado fresco, todas as misturas foram submetidas a ensaios que atenderam aos parâmetros exigidos para um CAA. Com objetivo de avaliar o comportamento mecânico dos concretos, também foram realizados, aos 7 e 28 dias, os ensaios no estado endurecido (resistência à compressão axial, esclerometria, módulo de elasticidade estático, absorção por imersão, frequência e fator de amortecimento), bem como, índice de vazios e massa específica dos concretos. Por fim, utilizando a metodologia DOE (*Design of Experiments* - Planejamento de Experimentos), realizou-se uma análise e foram observados estatisticamente os vários efeitos que o teor e a granulometria do RBP, e o tempo de cura causaram nos resultados dos experimentos. O tempo de cura foi o principal fator estatisticamente significativo para os resultados da frequência natural e do fator de amortecimento. Com relação a resistência à compressão axial e ao módulo de elasticidade estático, o fator de maior influência estatística foi o teor de borracha utilizados nas misturas.

Palavras-chave: concreto autoadensável, resíduo de borracha de pneu, propriedades mecânicas, análise estatística.

Abstract

The present work aims to analyze the influence of the incorporation of rubber waste from scrap tires (RWT) in different contents and granulometries, in partial replacement for sand, in the physical and mechanical properties of self-compacting concrete. The civil construction market and the numerous technological innovations in the area have increasingly demanded materials that have special characteristics, thus seeking, among other benefits, the improvement in the durability and performance of the structures. Thus, concrete, the main construction material used today and the second most used in the world, has been the target of many researches and experiments. It is notable that the use of self-compacting concrete (SCC) has been described by many researchers as a major revolution in concrete technology due to its fluidity and viscosity characteristics, besides providing energy savings during its construction. The different ways of using waste rubber from scrap tires in the composition of the SCC has been a subject that has been extensively explored in several researches in the area, always looking for the sustainable use of waste and the benefits that it can provide to the final product. To obtain the SCC trace, this research was based on the Gomes Method, and for the best packaging of concrete aggregates, the EMMA software (Elkem Materials Mixture Analyzer) was used. Several mixtures were prepared with 10%, 30% and 50% of RWT and with particle sizes smaller than 0.6 mm and particle sizes between 0.6 mm and 4.8 mm. In the fresh state, all mixtures were subjected to tests that met the parameters required for an SCC. In order to evaluate the mechanical behavior of concretes, the tests in the hardened state (resistance to axial compression, sclerometry, static elasticity module, immersion absorption, frequency and damping factor) were also performed at 7 and 28 days, as well as, voids index and specific mass of concretes. Finally, using the DOE methodology (Design of Experiments), an analysis was carried out and the various effects that the content and granulometry of the RWT and the curing time caused on the results of the experiments were statistically observed. Curing time was the main statistically significant factor for the results of natural frequency and damping factor. Regarding the resistance to axial compression and the static elasticity module, the factor with the greatest statistical influence was the rubber content used in the mixtures.

Keywords: self-compacting concrete, tire rubber residue, mechanical properties, statistical analysis.

Lista de Figuras

Figura 2.1: Área de superfície específica e tamanho das partículas relacionadas ao tipo de concreto.	26
Figura 2.2: Tipos de cimento empregados nas composições de CAA.	30
Figura 2.3: Esquema do procedimento de dosagem de Okamura e Ouchi.	36
Figura 2.4: Etapas do método de dosagem de Tutikian.	38
Figura 2.5: Procedimento do método de dosagem proposto por Gomes.	40
Figura 2.6: Ilustração representativa do Cone de Abrams ABNT NBR 15823-2:2017.	42
Figura 2.7: Ilustração representativa do Método do Cone de Abrams (<i>Slump Flow Test</i>).	42
Figura 2.8: Ilustração representativa do Funil “V” para ensaio de viscosidade do CAA.	44
Figura 2.9: Ilustração representativa da Caixa “L” para ensaio de habilidade passante do CAA.	46
Figura 2.10: Resumo das propriedades do concreto no estado fresco e respectivos ensaios e normas	47
Figura 2.11: Estrutura de um pneu de automóvel.	50
Figura 2.12: Composição Química dos Pneus.	51
Figura 2.13: Classificações dos agregados de borracha: (a) triturada ou lascada, (b) moída, (c) granular e (d) fibra.	53
Figura 3.1: Etapas do procedimento experimental	57
Figura 3.2: Cone de Marsh para determinação do ponto de saturação do superplastificante.	64
Figura 3.3: Mini-cone de Kantro (mini slump)	65
Figura 3.4: Cone de Consistência (mini tronco de cone) e Mini Funil V.	66
Figura 3.5: Cone de Abrams.	71
Figura 3.6: Funil V	72
Figura 3.7: Caixa L.	73
Figura 3.8: Granulometrias do RBP	74
Figura 3.9: Cilindros Metálicos	75
Figura 3.10: Câmara Úmida	75
Figura 3.11: Corpos de prova com capeamento à base de enxofre	77
Figura 3.12: Máquina Universal de ensaio à compressão	78

Figura 3.13: Suporte ajustável para o ensaio do Módulo de Elasticidade Dinâmico	79
Figura 3.14: Dessecador	80
Figura 3.15: Ensaio absorção por imersão.....	81
Figura 3.16: Ensaio com Esclerômetro.....	83
Figura 3.17: Ensaio de Vibração – Frequência Natural e Fator de Amortecimento.	85
Figura 3.18: Ensaio de Vibração – Frequência Natural e Fator de Amortecimento.	85
Figura 3.19: Combinações para o CAA com RBP.	87
Figura 3.20: Combinações para o CAA com RBP	88
Figura 3.21: Combinações para o CAA com RBP.	88
Figura 4.1: Curva granulométrica da areia	90
Figura 4.2: Curva granulométrica da brita 0.	91
Figura 4.3: Curvas Granulométricas do material fino utilizado nas misturas	92
Figura 4.4: Ensaio de pasta. Cone de Marsh	93
Figura 4.5: Ensaio de pasta. Cone de Kantro (mini <i>slump</i>).....	93
Figura 4.6: Ensaio de argamassa. Cone de Consistência (mini tronco de cone).	94
Figura 4.7: Ensaio de argamassa. Mini funil V	94
Figura 4.8: Comparação entre a curva ideal (vermelha) obtida pelo modelo de Andreassen modificado, e a curva obtida para o traço referência (azul).	96
Figura 4.9: Resultado das Massas Específicas dos concretos no estado fresco	99
Figura 4.10: Resultado do Teor de Ar dos concretos no estado fresco	100
Figura 4.11: Ensaio Slump Flow Test	101
Figura 4.12: Ensaio Funil V	101
Figura 4.13: Ensaio Caixa L.....	102
Figura 4.14: Resultado dos Ensaios de Espalhamento	103
Figura 4.15: Resultado dos Ensaios T 500	104
Figura 4.16: Resultado dos Ensaios - Funil V	105
Figura 4.17: Resultado dos Ensaios – Caixa L.....	106
Figura 4.18: Compressão Axial 7 e 28 dias – Resultados separados por teor de RBP.....	107
Figura 4.19: Compressão axial 7 e 28 dias – Resultados separados por Granulometrias.	108
Figura 4.20: Resultado dos Índices Esclerométricos Efetivos aos 7 e 28 dias.....	108

Figura 4.21: Resultado dos Índices Esclerométricos Efetivos aos 7 e 28 dias.....	109
Figura 4.22: Resultado das Resistências Equivalentes aos Índices Esclerométricos Efetivos aos 28 dias.....	110
Figura 4.23: Resultado dos Módulos de Elasticidade Dinâmicos aos 7 e 28 dias.....	111
Figura 4.24: Resultado dos Módulos de Elasticidade Estáticos aos 7 e 28 dias.....	113
Figura 4.25: Resultado das Massas Específicas Secas.	114
Figura 4.26: Resultado dos Ensaio de Absorção de Água.	115
Figura 4.27: Resultado dos Ensaio de Índice de Vazios.	116
Figura 4.28: Frequência Natural dos concretos endurecidos aso 7 e 28 dias	117
Figura 4.29: Fator de Amortecimento dos concretos endurecidos aos 7 e 28 dias.....	118
Figura 4.30: Imagens do concreto autoadensável de referência (CAA REF) sem borracha por MEV – modo elétrons secundários.....	119
Figura 4.31: Microestrutura do concreto autoadensável com 10% de borracha com granulometria G1(10 G1) por MEV – modo elétrons secundários.	120
Figura 4.32: Microestrutura do concreto autoadensável com 10% de borracha com granulometria G1 (10 G1) por MEV – modo elétrons secundários	121
Figura 4.33: Microestrutura do concreto autoadensável com 30% de borracha com granulometria G1 (30 G1) por MEV – modo elétrons secundários.	122
Figura 4.34: Microestrutura do concreto autoadensável com 30% de borracha com granulometria G1 (30 G1) por MEV – modo elétrons secundários.	123
Figura 4.35: Microestrutura do concreto autoadensável com 50% de borracha com granulometria G1 (50 G1) por MEV – modo elétrons secundários.	123
Figura 4.36: Microestrutura do concreto autoadensável com 50% de borracha com granulometria G1 (50 G1) por MEV – modo elétrons secundários.	124
Figura 4.37: Microestrutura do concreto autoadensável com 10% de borracha com granulometria G2 (10 G2) por MEV – modo elétrons secundários.	125
Figura 4.38: Microestrutura do concreto autoadensável com 30% de borracha com granulometria G2 (30 G2) por MEV – módulo elétrons secundários.	125
Figura 4.39: Microestrutura do concreto autoadensável com 50% de borracha com granulometria G2 (50 G2) por MEV – módulo elétrons secundários.	126
Figura 4.40: Efeitos Principais para Frequência Natural. Média dos Dados.....	129

Figura 4.41: Efeitos Principais para Fator de Amortecimento. Média dos Dados	130
Figura 4.42: Efeitos Principais para Compressão Axial. Média dos Dados.....	131
Figura 4.43: Efeitos Principais para Módulo de Elasticidade Estático. Média dos Dados.....	132
Figura 4.44: Gráfico de Pareto para Frequência Natural.....	133
Figura 4.45: Gráfico de Pareto para Fator de Amortecimento	134
Figura 4.46: Gráfico de Pareto para Resistência à Compressão Axial.....	135
Figura 4.47: Gráfico de Pareto para Módulo de Elasticidade Estático.....	136
Figura 4.48: Representação gráfica da resposta da frequência natural aos 7 e 28 dias.....	140
Figura 4.49: Representação gráfica da resposta do fator de amortecimento aos 7 e 28 dias .	140
Figura 4.50: Representação gráfica da resposta da t. compressão aos 7 e 28 dias	141
Figura 4.51: Representação gráfica da resposta do módulo de elasticidade estático aos 7 e 28 dias.....	141

Lista de Tabelas

Tabela 2.1: Consumos de materiais comumente empregados na confecção de CAA no Brasil	28
Tabela 2.2: Principais tipos de cimento Portland (CP) brasileiros, empregados na construção civil	29
Tabela 2.3: Tipos de aditivos para concreto	33
Tabela 2.4: Classe de espalhamento do CAA em função de sua aplicação.....	43
Tabela 2.5: Classes de viscosidade plástica aparente do CAA em função de sua aplicação....	45
Tabela 2.6: Classes de habilidade passante do CAA em função de sua aplicação.....	46
Tabela 2.7: Materiais Componentes dos Pneus	51
Tabela 3.1: Normas para caracterização do cimento e agregados	58
Tabela 3.2: Características físicas, mecânicas e químicas do cimento.....	59
Tabela 3.3: Ensaio realizados para caracterização dos agregados miúdos e graúdos.....	60
Tabela 3.4: Classificação das adições.....	60
Tabela 3.5: Características físicas e químicas da sílica ativa	61
Tabela 3.6: Ensaio realizados para caracterização filler de mármore e granito.....	62
Tabela 3.7: Características físicas e químicas do superplastificante ADI-SUPER H25	62
Tabela 3.8: Proporções e Granulometrias do RBP	74
Tabela 3.9: Ensaio realizados no CAA REF e nos CAA RBP no estado endurecido	76
Tabela 3.10: Combinações de Materiais para o CAA com RBP.....	87
Tabela 4.1: Características físicas e granulométricas da areia	89
Tabela 4.2: Características físicas e granulométricas da brita 0.....	90
Tabela 4.3: Características físicas e granulométricas do pó pneu	91
Tabela 4.4: Distribuição granulométrica dos materiais finos	92
Tabela 4.5: Resultados dos ensaios da pasta e da argamassa - CAA REF	95
Tabela 4.6: Proporção dos componentes para fabricação do CAA REF.....	96
Tabela 4.7: Planilha (parcial) com dados lançados	97
Tabela 4.8: Traço do CAA	98
Tabela 4.9: Resultado da Massa Específica, Índice e Teor de Ar dos concretos no estado fresco	98

Tabela 4.10: Resultados das características do concreto no estado fresco	102
Tabela 4.11: Resultados dos ensaios de compressão axial	106
Tabela 4.12: Resultado dos ensaios de módulo de elasticidade dinâmico e respectivos módulos de elasticidade estáticos.....	112
Tabela 4.13: Resultados dos ensaios de Massa Específica Seca, Absorção de Água por Imersão e	114
Tabela 4.14: DOE - Relação das variáveis e dos ensaios.....	127
Tabela 4.15: Variáveis de Testes e respectivos níveis.....	128
Tabela 4.16: <i>P-Value</i>	137
Tabela 4.17: Valor de R^2	138
Tabela 4.18: Otimização dos Resultados.....	139

Lista de Siglas, abreviaturas e símbolos

CAA - Concreto autoadensável

RBP - Resíduos de borracha de pneus inservíveis

G1 - Grupo 1

G2 - Grupo 2

CAA REF - Concreto autoadensável referência

ANIP - Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos

FAPESP - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente

UNIFEI - Universidade Federal de Itajubá

MEV - Microscopia eletrônica de varredura

DOE - *Design of Experiments*

CP - Cimento Portland

CP V ARI - Cimento Portland de alta resistência inicial

CP V ARI RS - Cimentos Portland de alta resistência inicial resistente a sulfatos

CP II F 32 - Cimento Portland composto com fíler

CP II Z 32 - Cimento Portland composto com pozolana

CP IV 32 - Cimento Portland pozolânico

CP I S 32 - Cimento Portland Comum com Adições

CP II E 32 - Cimento Portland composto com escória

CP III 40 RS - Cimento Portland de alto-forno

C₃A - Aluminato Tricálcico

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

NBR - Norma Brasileira

API - Adições inertes

APR - Adições reativas

CO₂ - Dióxido de carbono

LS - Lignossulfonatos modificados

NS - Naftaleno sulfonato

MS - Melamina sulfonato ou apenas de melamina

PC - Policarboxilatos

CADAR - Concreto autoadensável de alta resistência

a / c - Relações água/cimento

sp / c - Superplastificante/cimento

sf / c - Pozolanas/cimento

f / c - Sílica ativa ou sílica fume e finos/cimento

FEPI - Centro Universitário de Itajubá

UNIFEI - Universidade Federal de Itajubá

RCMG - Resíduo de Corte de Mármore e Granito

SiO₂ - Dióxido de silício

CAD - Concreto de alto desempenho

TEI - Técnica de Excitação por Impulso

Gm - Parâmetro que define a fluidez e a viscosidade da argamassa

Rm - Parâmetro que define a fluidez e a viscosidade da argamassa

d1 - Diâmetros de espalhamento da argamassa

d2 - Diâmetros de espalhamento da argamassa

do - Diâmetro da base do cone igual a 100mm

t - Tempo de escoamento

ρ_{ap} - Massa específica aparente do concreto (kg/m³)

m - Massa de concreto (kg)

V - Volume do cilindro (dm³)

R - Rendimento (m³)

mc - Massa de cimento da betonada (kg)

mf - Massa total de agregado miúdo da betonada (kg)

mg - Massa total de agregado graúdo da betonada (kg)

ma - Massa total de água adicionada na betonada (kg)

Ia - Índice de ar presente na mistura (%)

Vt - Volume total dos componentes da betonada (m³)

A - Teor de ar do concreto (%)

m_{sat} - Massa do corpo de prova saturado

m_s - massa do corpo de prova seco.

m_i - massa do corpo de prova saturado imerso em água.

IEe - Índice esclerométrico médio efetivo

K - Coeficiente de correção do índice esclerométrico

IE - Índice esclerométrico médio

E_c - Módulo de Elasticidade Estático (GPa)

E_d - Módulo de Elasticidade Dinâmico (GPa)

p - Massa específica do concreto (kg/m^3)

ω - frequência natural (rad/s)

K - rigidez (N/m)

m - massa (kg)

RBP 10 G1 - 10% de Resíduo de Borracha de Pneu de Granulometria 1 ($G1 < 0,6\text{mm}$)

RBP 10 G2 - 10% de Resíduo de Borracha de Pneu de Granulometria 2 ($4,8\text{mm} > G2 > 0,6\text{mm}$)

RBP 30 G1 - 30% de Resíduo de Borracha de Pneu de Granulometria 1 ($G1 < 0,6\text{mm}$)

RBP 30 G2 - 30% de Resíduo de Borracha de Pneu de Granulometria 2 ($4,8\text{mm} > G2 > 0,6\text{mm}$)

RBP 50 G1 - 50% de Resíduo de Borracha de Pneu de Granulometria 1 ($G1 < 0,6\text{mm}$)

RBP 50 G2 - 50% de Resíduo de Borracha de Pneu de Granulometria 2 ($4,8\text{mm} > G2 > 0,6\text{mm}$)

ANOVA - Análise de Variância

Y - Variável de resposta

b_0 - Constante

b_1, b_2, \dots, b_n - Coeficientes do termo linear (também conhecido como inclinação da linha)

X_1, X_2, \dots, X_n - Termos

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	Justificativa.....	22
1.2	Objetivos	24
1.2.1	Objetivo Geral	24
1.2.2	Objetivos Específicos	24
2	REVISÃO DA LITERATURA	26
2.1	Concreto Autoadensável (CAA)	26
2.1.1	Composição do Concreto Autoadensável.....	28
2.1.1.1	Cimento	29
2.1.1.2	Agregados.....	30
2.1.1.3	Adições Minerais.....	32
2.1.1.4	Aditivos Químicos.....	32
2.1.1.5	Água	34
2.2	Métodos de Dosagem do Concreto	34
2.2.1	Método de dosagem proposto por Okamura e Ouchi.....	35
2.2.2	Método de dosagem proposto por Tutikian.....	36
2.2.3	Método de dosagem proposto por Gomes.....	38
2.3	Propriedades do concreto autoadensável no estado fresco.....	40
2.3.1	Determinação do espalhamento e do tempo de escoamento – Método do cone de Abrams (Slump Flow Test)	41
2.3.2	Determinação da viscosidade plástica aparente – Método do funil V (V Funel Test).....	43
2.3.3	Determinação da habilidade passante – Método da caixa L (L Box Test).....	45
2.4	Propriedades do concreto autoadensável no estado endurecido.....	47
2.5	Resíduos de borracha de pneus inservíveis	49
2.6	Concreto com adição de borracha	53
3	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	56
3.1	Primeira etapa – Seleção e caracterização dos materiais	57

3.1.1	Cimento	58
3.1.2	Agregados.....	59
3.1.3	Adições minerais	60
3.1.3.1	Sílica Ativa.....	61
3.1.3.2	Pó de mármore e de granito.....	61
3.1.4	Aditivo superplastificante.....	62
3.1.5	Água	63
3.1.6	Resíduos de borracha de pneus inservíveis (RBP).....	63
3.2	Segunda etapa – Determinação do traço e produção do concreto autoadensável de referência	63
3.2.1	Dosagem do concreto autoadensável de referência (CAA REF)	63
3.2.1.1	Obtenção da composição da pasta.....	64
3.2.1.2	Obtenção da composição da argamassa	65
3.2.1.3	Determinação do esqueleto granular	67
3.2.1.4	Confecção do concreto autoadensável referência	68
3.2.2	Ensaio do concreto autoadensável de referência no estado fresco	68
3.2.2.1	Massa Específica, Rendimento e Teor de ar pelo Método Gravimétrico.....	68
3.2.2.2	Cone de Abrams, Funil V e Caixa L	69
3.3	Terceira etapa – Adição do resíduo de borracha de pneu ao concreto autoadensável de referência	73
3.3.1	Dosagem do concreto autoadensável com adição do resíduo de borracha de pneu ...	73
3.3.2	Ensaio do concreto autoadensável com adição do resíduo de borracha de pneu no estado fresco	74
3.4	Quarta etapa – Confecção dos corpos de prova e realização dos ensaios no estado endurecido.	74
3.4.1	Confecção dos corpos de prova.....	75
3.4.2	Ensaio do concreto no estado endurecido.....	76
3.4.2.1	Resistência à Compressão Axial	76
3.4.2.2	Módulo de Elasticidade Dinâmico	78

3.4.2.3	Absorção de Água, Índice de Vazios e Massa Específica.....	79
3.4.2.4	Dureza Superficial pelo Esclerômetro de Reflexão	82
3.4.2.5	Frequência Natural e Fator de Amortecimento	83
3.5	Análise Estatística	85
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	89
4.1	Caracterização dos materiais utilizados	89
4.2	Determinação do traço e produção do concreto de referência	92
4.2.1	Definição da composição da pasta e da argamassa	92
4.2.2	Dosagem do concreto autoadensável de referência (CAA – REF)	95
4.2.3	Ensaio do Concreto no Estado Fresco	98
4.2.3.1	Massa Específica, Índice e Teor de ar pelo Método Gravimétrico	98
4.2.3.2	Slump Test, Funil V e Caixa L.....	100
4.2.4	Ensaio do Concreto no Estado Endurecido.....	106
4.2.4.1	Compressão Axial	106
4.2.4.2	Dureza Superficial pelo Esclerômetro de Reflexão	108
4.2.4.3	Módulo de Elasticidade Dinâmico e Estático.....	110
4.2.4.4	Absorção por Imersão, Índice de Vazios e Massa Específica.....	113
4.2.4.5	Frequência Natural e Fator de Amortecimento	116
4.2.5	Análise da Microestrutura do concreto autoadensável.....	118
4.2.6	Análise Estatística	126
4.2.6.1	Planejamento de Experimentos	126
4.2.6.2	Análise de Variância (ANOVA)	128
4.2.6.3	Gráficos de Efeitos Principais	128
4.2.6.4	Gráficos de Pareto	132
4.2.6.5	Valor - P	136
4.2.6.6	Coeficientes de Determinação (R ²)	137
4.2.6.7	Equações de Regressão	138
4.2.6.8	Otimização dos Resultados	138

5	CONCLUSÕES	142
	APÊNDICE	145
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	147

1 INTRODUÇÃO

O concreto é o material de construção mais utilizado no mundo. Com o objetivo de otimizar custos e maximizar resistência mecânica e durabilidade deste material o realizadas. O concreto autoadensável (CAA) é um concreto de alto desempenho sofisticado descrito como o “passo mais revolucionário” na tecnologia de concreto nas últimas duas décadas devido ao seu impacto sobre sustentabilidade econômica e ambiental na indústria da construção civil (NAJIM; HALL, 2012).

O CAA foi desenvolvido e definido pela primeira vez no Japão na década de 1980. No Japão, o desenvolvimento do CAA tem fortemente focado em melhorar o processo de concretagem de estruturas complexas e desenvolver o concreto para situações de demanda. As realizações no Japão despertaram grande interesse na Europa, onde o desenvolvimento para este concreto começou no início dos anos 1990 (SKARENDAHL et al. 2006).

Um concreto só será considerado autoadensável se três propriedades forem alcançadas simultaneamente: fluidez, coesão necessária para que a mistura escoe intacta entre barras de aço (ou habilidade passante) e resistência à segregação (EFNARC, 2002).

O CAA é caracterizado por apresentar alta fluidez, capaz de fazer com que o material preencha as fôrmas onde é aplicado, passando entre as barras das armaduras e consolidando-se somente pela ação de seu peso próprio, sem apresentar segregação e sem necessidade de qualquer tipo de vibração interna ou externa (GOMES e AGULLO, 2004). O uso de concreto autoadensável tornou-se popular nos últimos anos. Não é apenas devido à redução de ruído durante a fase de construção, como consequência de evitar vibrações, mas também reduz a duração da construção, que será refletida em custos de construção mais baixos (SAINZ-AJA et al. 2019).

O concreto autoadensável é considerado um concreto que pode ser colocado e compactado sob seu próprio peso, sem vibração, garantindo o preenchimento completo das fôrmas, mesmo quando o acesso é dificultado por espaços estreitos entre as barras de reforço. Em ordem para atingir esse comportamento, o concreto fresco deve apresentar alta fluidez e boa coesão (YUNG; YUNG; HUA, 2013).

A construção civil é responsável por entre 15 e 50 % do consumo dos recursos naturais extraídos. No Brasil, o consumo de agregados naturais somente na produção de concreto e

argamassas são de 220 milhões de toneladas/ano. Devido a este elevado consumo, os agregados naturais estão cada vez mais escassos. Com isso, os locais para captação destes ficam cada vez mais distantes, elevando seu custo final. Com a necessidade de que novos materiais venham substituir estes agregados, pesquisas estão sendo realizadas com a finalidade de substituir parte do agregado por borracha de pneu, contribuindo para a preservação dos agregados naturais e oferecendo um modo alternativo limpo de reciclagem para a borracha de pneu e busca da sustentabilidade dos processos de produção (FRANÇA, 2004; LI; LING; HUNG MO, 2020).

Compostos de concreto contendo resíduos de borracha de pneus são conhecidos por sua alta tenacidade, o que significa que são especialmente recomendados para estruturas de concreto localizadas em áreas de grande risco de terremoto e também para a produção de dormentes. Embora os estudos sobre as propriedades do concreto com resíduos de borracha de pneus são abundantes, os relacionados à durabilidade são escassos, justificando novas investigações (AZEVEDO; ENSSLIN; JUNGLES, 2014).

A possibilidade de projetar concreto emborrachado autoadensável é de grande interesse para alcançar aplicações duráveis porque esse novo material pode se unir às características do CAA (alta fluidez, alta resistência mecânica, baixa porosidade etc.) com a resistência da borracha.

1.1 Justificativa

A tecnologia do concreto autoadensável é bastante recente em território nacional e pouco aplicada, este trabalho propõe introduzir ao tema um dos desafios atuais, que gira em torno da adição de resíduos de borracha de pneus como agregados na elaboração do CAA.

O concreto autoadensável surgiu como uma alternativa ao convencional. Segundo Karahan et al. (2012); Yung e Hua (2013), o principal interesse pela sua utilização é a facilidade de manuseio e aplicação, cuja habilidade de preenchimento das fôrmas se dá exclusivamente por meio da ação da gravidade, sem nenhuma interferência mecânica ou manual.

Nas poucas empresas de pré-fabricação que já o utilizam (em São Paulo, Paraná, Santa Catarina), a menos de uma, o CAA é usado apenas na fabricação de algumas peças. Fora da pré-fabricação, há registros de sua utilização em edifícios em Goiânia, São Paulo, e Novo Hamburgo. Outros exemplos de aplicações são o Museu Iberê e reservatório de água da Companhia de Saneamento de Minas Gerais – COPASA em Belo Horizonte -MG (COUTINHO, 2011).

Devido ao grande aumento no número de carros em todo o mundo, os pneus inservíveis tornaram-se um grande problema de gestão de resíduos. A grande maioria dos países evita ou proíbe o armazenamento ou deposição de pneus inservíveis, proporcionando um incentivo a explorar estratégias de reciclagem (SILVA JUNIOR; TAKEMOTO; PEREIRA, 2014).

Nas duas últimas décadas, o interesse internacional em pesquisar as propriedades e uso potencial do concreto com borracha tem crescido. Em termos de comportamento mecânico, é um tanto quanto incomum, à medida que não obedece a equações empíricas, relacionando o módulo de elasticidade a resistência à compressão, ao mesmo tempo em que exibe um aumento considerável de capacidade de deformação e, conseqüentemente, de ductilidade (SILVA JUNIOR; TAKEMOTO; PEREIRA, 2014).

Segundo Bušić et al. (2018), pesquisas anteriores sobre elementos estruturais mostram que a substituição do agregado natural por agregado de pneus reciclados no concreto produzirá elementos estruturais com melhor comportamento: maior capacidade de deformações (ductilidade), melhor dissipação de energia e maior amortecimento, em comparação com concreto padrão com agregados convencionais.

O estudo das propriedades do concreto autoadensável misturado com resíduo de borracha de pneus, colabora com a viabilidade técnica do mesmo e a sua aplicação para construção de concreto, gerando ganho ecológico correto ao resíduo, que, também terá valor agregado na cadeia produtiva (SILVA JUNIOR; TAKEMOTO; PEREIRA, 2014).

Segundo a Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos (ANIP), no ano de 2016 foram produzidos 67.870 novos pneus no Brasil, e em torno de 35 milhões foram descartados. De acordo com o IBAMA (2018) em 2017 mais de 585 mil toneladas de pneus inservíveis foram coletadas no Brasil. No primeiro quadrimestre de 2017, foi registrada uma alta no índice de produção, em torno de 1,8%, impulsionada principalmente por pneus agrícolas (33,6%) e caminhonetes (12,2%).

A Resolução nº 258 do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA, determinou que os fabricantes são os responsáveis por dar um destino ao montante descartado. Para cada novo pneu introduzido ao mercado, deve ser dada uma destinação adequada a um inservível.

De acordo com a Revista Pesquisa FAPESP, desde que esta lei entrou em vigor já foram criados mais de 1.008 pontos de coleta, sendo que no ano de 2014, cerca de 90 milhões de pneus foram coletados para terem uma destinação ecologicamente adequada (SILVA et al. 2019). A diminuição da poluição ambiental é uma preocupação constante das entidades governamentais

de proteção ao meio ambiente e a falta de alternativas viáveis para o reaproveitamento, favorece o acúmulo de pneus inservíveis em beiras de estradas, lixões, rios.

Vários estudos têm sido realizados utilizando resíduo de borracha na confecção de concretos, buscando resultados cada vez mais satisfatórios nas propriedades do concreto no estado endurecido.

Holmes et al. (2014), observaram que a granulometria e o teor de borracha são fatores que influenciam nas características do concreto.

Miller (2014) provou que mais de 60% de substituição de borracha pode aumentar a resistência à flexão do concreto, aumentando sua capacidade de absorção de energia.

De acordo com Turatsinze e Garros (2008), a substituição de agregados graúdos naturais (4–10 mm) por agregados graúdos de borracha de dimensões semelhantes induz uma modificação das propriedades frescas.

Tem-se observado uma grande variação nos resultados dos estudos devido a diversidade na granulometria e na proporção de resíduo inserido no concreto. Assim, considera-se significativo o uso de métodos estatísticos para uma análise mais adequada da influência dos parâmetros construtivos do concreto nas respostas estáticas e dinâmicas avaliadas.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

O presente trabalho segue uma linha de pesquisa do Programa de Pós-graduação em Materiais Para Engenharia da Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI – Área de Concentração Não Metais com estudos em concreto. O objetivo principal desta pesquisa foi obter o concreto autoadensável, utilizando o resíduo de borracha de pneus e analisar a influência de diferentes teores e granulometrias deste resíduo nas propriedades do concreto nos estados fresco e endurecido.

1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Caracterizar os materiais utilizados na confecção do concreto;
- Determinar o traço do CAA;

- Avaliar as propriedades do CAA no estado fresco sem e com adição de resíduo de borracha de pneus (RBP);
- Analisar comparativamente os valores das propriedades mecânicas e dinâmicas obtidas por ensaios experimentais do concreto endurecido, observando a variação em função das porcentagens e das granulometrias do resíduo de borracha de pneu incorporado ao concreto;
- Verificar a interação dos resíduos de borracha de pneus na matriz cimentícia por meio de ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV);
- Realizar um estudo experimental utilizando a metodologia estatística DOE (*Design of Experiments*) – Planejamento de Experimentos - para determinar os efeitos do tempo de cura, dos teores e das granulometrias do RBP que afetam os resultados do experimento.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Concreto Autoadensável (CAA)

Segundo Medeiros et al. (2015) com o grande crescimento da construção civil, os estudos relacionados aos novos materiais são necessários e estão em amplo desenvolvimento. O concreto pode ser classificado em categorias de acordo com as dimensões dos agregados ou adições usadas, com isso, o concreto autoadensável se enquadra na segunda geração, como mostra a Figura 2.1.

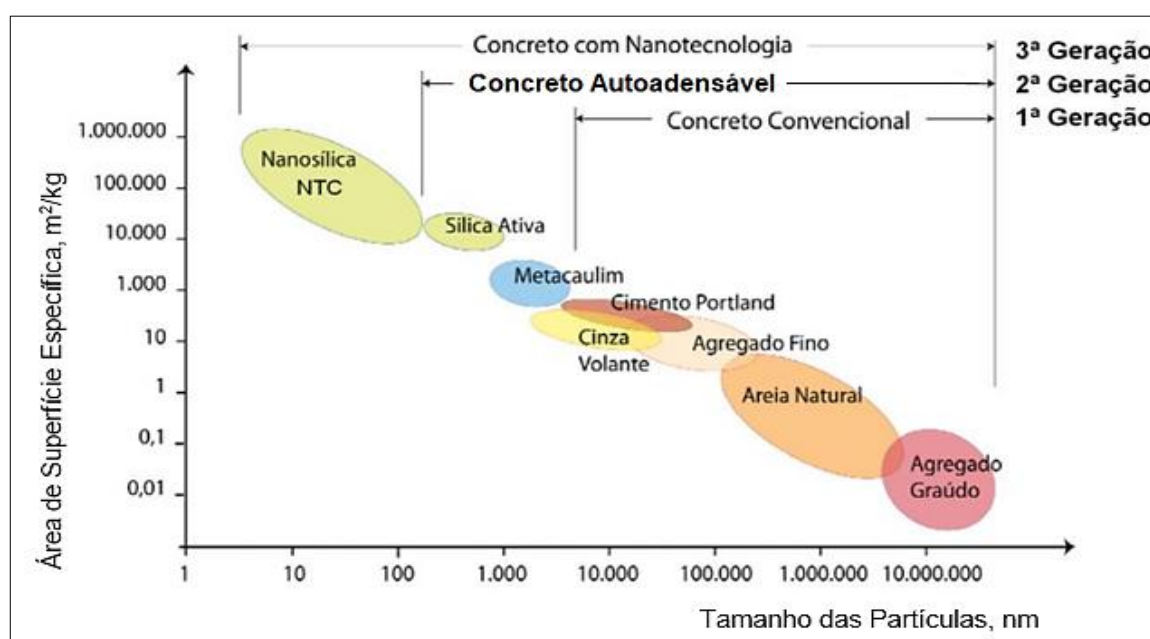


Figura 2.1: Área de superfície específica e tamanho das partículas relacionadas ao tipo de concreto (MEDEIROS et al. 2015).

O CAA é conhecido como um concreto altamente fluido e apresenta mínima resistência ao fluxo e assim, capaz de se consolidar sob seu próprio peso sem qualquer vibração, o que proporciona uma melhoria no ambiente de construção (CHEN; YANG, 2015; KHATUN; SINGH; SHARMA, 2018; SABLE; RATHI, 2012; TUTIKIAN, 2007).

Atualmente, o CAA é usado em muitos países para diferentes aplicações arquitetônicas e estruturais e foi desenvolvido para solucionar os problemas do concreto convencional (SABLE; RATHI, 2012) como, por exemplo, a dificuldade de sua aplicação em elementos estruturais de concreto com alta taxa de armadura.

O CAA é um tipo especial de material onde a vibração/compactação é evitada pela adição de aditivos do tipo superplastificantes nas misturas no estado fresco. Essa tecnologia relativamente nova está ganhando cada vez mais popularidade na indústria da construção, pois

proporciona uma maneira mais segura e ecológica de produzir concreto sem comprometer sua qualidade (CHAVDA; PARIKH, 2018; RAHMAN; USMAN; AL-GHALIB, 2012; SINGH; SINGH, 2018).

Segundo Grünewald (2004) o desenvolvimento do CAA é um grande passo em direção à eficiência e às condições de trabalho nos canteiros de obras e na indústria de pré-fabricados. Esse material apresenta melhor acabamento estético da superfície do concreto, melhores características no estado endurecido e concretagens em tempos mais curtos, conferindo estruturas com maior durabilidade.

Os benefícios deste tipo de concreto vão além da durabilidade e da resistência. O CAA diminui a poluição sonora, já que não faz uso de vibradores, o que também contribui para a redução no consumo de energia elétrica; minimiza os riscos de acidentes causados pelo excesso de pessoas sobre as lajes, pois necessita de menos mão-de-obra; e reduz problemas ergonômicos nos trabalhadores, já que eles fazem um esforço menor no lançamento e acabamento. O uso do CAA direciona a construção civil para uma produção industrializada, aumentando a qualidade, a durabilidade, a confiança na estrutura e a segurança dos trabalhadores (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2011).

Segundo EFNARC (2002) uma mistura de concreto só pode ser classificada como concreto autoadensável se os requisitos para as três características forem cumpridos:

- ✓ Habilidade de Preenchimento (*filling ability*): é a capacidade da mistura fresca fluir sob seu próprio peso e preencher completamente todos os espaços da fôrma.
- ✓ Habilidade Passante (*passing ability*): A capacidade de passagem mede o quanto bem o CAA fresco fluirá através de espaços confinados e com restrições, aberturas estreitas e entre as armaduras de reforço do concreto.
- ✓ Resistência à Segregação (*segregation resistance*): é a capacidade da mistura fresca para manter a distribuição original, a uniformidade dos materiais constituintes durante o transporte, colocação e adensamento. A resistência à segregação está relacionada à viscosidade plástica e a densidade da pasta.

Para adquirir essas propriedades, o concreto deve misturar-se com os superplastificantes, o que o torna não rentável. Apesar do custo do material ser alto, ele pode ser reduzido usando resíduos industriais como alternativa para substituição parcial de cimento e agregado fino (ARUNCHAITANYA; ARUNAKANTHI, 2019).

A obtenção de um concreto com as propriedades exigidas só era possível com alto consumo de cimento, o que refletia em um custo bastante elevado, sendo seu uso restrito a obras

especiais. A introdução de aditivos superplastificantes à mistura permitiu a obtenção de um material mais fluido, de alta resistência, sem consumos excessivos de cimento (NUNES, 2001).

2.1.1 Composição do Concreto Autoadensável

O CAA é constituído por cimento, agregados, água, adições minerais e aditivos, sendo indispensável o uso de aditivos superplastificantes o que assegura a sua alta fluidez. Campos et al. (2018) fizeram uma análise estatística inicial sobre os consumos de materiais de 555 composições de concreto autoadensável. Na Tabela 2.1 estão sintetizados os resultados encontrados pelos autores dos consumos de materiais comumente empregados na produção de CAA no Brasil.

Tabela 2.1: Consumos de materiais comumente empregados na produção de CAA no Brasil.

Material	Número de CAA produzidos	% de uso
Cimento	555	100,00
Filer calcário	163	29,37
Metacaulim	76	13,69
Sílica ativa	72	12,97
Cinza volante	53	9,55
Resíduo de mármore e granito	33	5,95
Cinza de casca de arroz	27	4,86
Agregado miúdo	555	100,00
Agregado graúdo	555	100,00
Aditivo superplastificante	555	100,00
Água	555	100,00

Fonte: Adaptado de CAMPOS et al. 2018.

Além das adições mencionadas na Tabela 2.1 (mais representativas), verificou-se que outros tipos de adição mineral foram empregados para a produção de CAA, tais como: escória de alto forno e de aciaria, cal hidráulica, cinza de bagaço de cana, filers pétreos (quartzo, micaxisto, granito, filito) e resíduos de caulim. Das 555 composições de CAA analisadas, 102 foram produzidas unicamente com cimento como material fino, 411 empregaram um tipo de adição mineral e cimento, 38 misturas foram compostas por dois tipos de adição mineral e apenas 4 composições foram produzidas com três ou mais adições minerais. Com relação aos aditivos químicos, todas as misturas estudadas utilizaram aditivo superplastificante para obtenção do CAA. Em 49 composições também foi utilizado aditivo modificador de viscosidade e em 45 misturas houve o emprego concomitante de aditivo plastificante.

2.1.1.1 Cimento

O cimento Portland é um aglomerante hidráulico no qual o endurecimento ocorre por reações químicas quando adiciona-se água (CELIK et al. 2014; NEVILLE; BROOKS, 2010).

De acordo com Júnior (2015) o cimento Portland é o componente mais nobre do concreto, e a mistura do cimento Portland com água gera uma pasta que envolve os agregados sendo responsável pelas propriedades de ligante.

Segundo Neville (1997) o cimento Portland é composto de clínquer e de adições. O clínquer é o principal componente e está presente em todos os tipos de cimento Portland e tem como matérias-primas o calcário e a argila. As adições podem variar de um tipo de cimento para outro e são principalmente elas que definem os diferentes tipos de cimento.

Os principais tipos de cimento Portland (CP) brasileiros, empregados na construção civil, estão apresentados na Tabela 2.2.

Tabela 2.2: Principais tipos de cimento Portland (CP) brasileiros, empregados na construção civil.

Designação normalizada	Sigla	Classe de resistência	Sufixo	Clínquer + sulfatos de cálcio	Escória granulada de alto-forno	Material pozolânico	Material carbonático	Norma Brasileira
Cimento Portland Comum	CP I	25, 32 ou 40	RS ou BC	100	----	----	----	ABNT NBR 16697:2018
	CPI - S			99 - 95	----	1 - 5	----	
Portland Composto com escória granulada de alto-forno	CP II - E			94 - 56	6 - 34	----	0 - 10	
Cimento Portland composto com material pozolânico	CP II - Z			94 - 76	----	6 - 14	0 - 10	
Cimento Portland composto com material carbonático	CP II - F			94 - 90	----	----	6 - 10	
Cimento Portland de alto forno	CP III			65 - 25	35 - 70	----	0 - 5	
Cimento Portland pozolânico	CP IV			85 - 45	----	15 - 50	0 - 5	
Cimento Portland de alta resistência inicial	CP V - ARI	ARI		100 - 95	----	----	0 - 5	

Fonte: Adaptado de CALADO et al. 2015.

Em seu estudo, Campos et al. (2018) relataram que os cimentos de alta resistência inicial (CP V ARI) e de alta resistência inicial resistente a sulfatos (CP V ARI RS) foram os mais comumente utilizados em CAA, conforme mostra a Figura 2.2, fato que pode estar relacionado

à aplicação do CAA em elementos de concreto pré-moldado que exigem desforma mais rápida das peças. Em menor proporção, verificou-se a utilização dos cimentos compostos CP II F 32 e CP II Z 32 e do cimento CP IV 32. Dentre as composições analisadas, foi também relatado o uso dos cimentos CP I S 32, CP II E 32, CP III 40 RS e CPB.

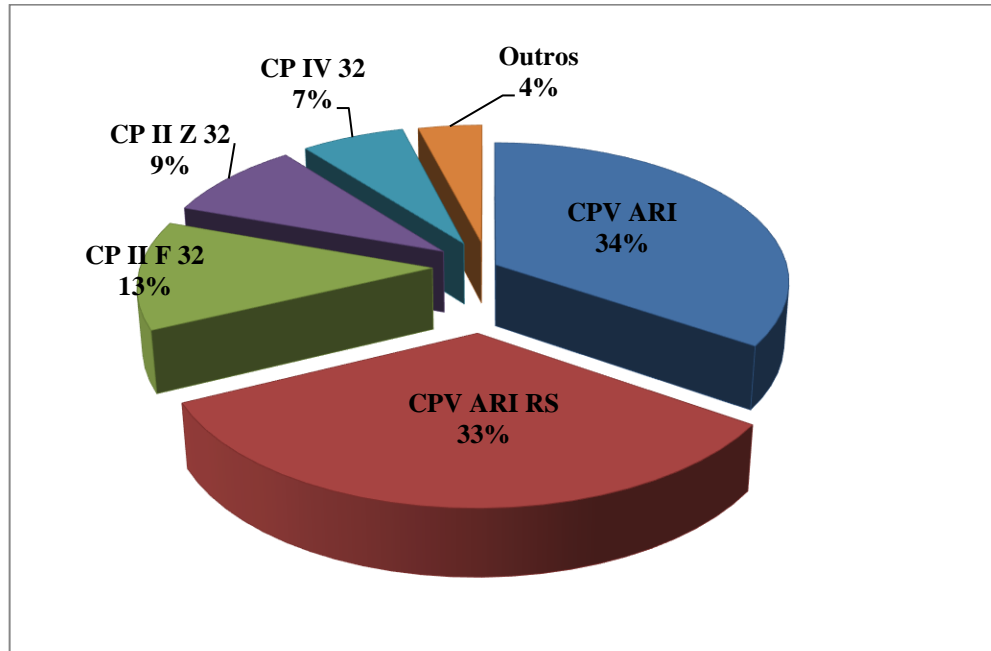


Figura 2.2: Tipos de cimento empregados nas composições de CAA (CAMPOS et al. 2018).

A finura do cimento é de grande importância para o CAA, pois quanto maior a área específica, maior a viscosidade da mistura. O cimento puro e com baixo teor de Aluminato Tricálcico (C_3A) é o mais indicado (CHEN; YANG, 2015). Quanto menor for a quantidade de C_3A , mais fácil será o controle reológico do cimento, bem como o enrijecimento da mistura se dará em um período mais longo (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008).

2.1.1.2 Agregados

Os agregados exercem grande influência nas propriedades do concreto. No estado fresco, influenciam na porosidade e na permeabilidade; já no estado endurecido exercem influência na resistência à compressão e na dureza. São classificados como miúdos e graúdos, compostos por areias e britas, respectivamente, e geralmente compõem de 60 % a 80 % da mistura em concreto convencional.

De acordo com a ABNT NBR 7211:2019 os agregados miúdos são aqueles cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha 4,75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha 150 μ m (0,15 mm).

De modo geral, todas as areias são apropriadas para serem utilizadas como agregados miúdos na produção do CAA. Pode-se utilizar areias naturais (depósitos eólicos e beira de rio) como areias obtidas de processos industriais. As primeiras são mais recomendadas por possuírem forma mais arredondada e textura mais lisa. Deve-se levar em conta ainda que os CAA necessitam da adição de finos e, quanto menor o módulo de finura do agregado miúdo, mais adequado para a produção de concretos de elevada coesão (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008).

Os agregados menores que 0,125 mm podem ser considerados como parte do conteúdo de finos para efeitos de dosagem e, junto com as partículas dos finos e dos aglomerantes, podem aumentar a viscosidade e coesão da mistura (EFNARC, 2002; GOMES; BARROS, 2009).

No CAA os agregados são utilizados em teores inferiores aos usualmente encontrados em concretos convencionais. Há necessidade de se limitar a quantidade e a dimensão máxima, especialmente com relação ao agregado graúdo, para que se tenha melhor controle dos critérios de segregação e bloqueio (MORAES, 2010). Assim, agregados graúdos no CAA devem ter dimensão máxima de 20 mm e estar entre 28% e 35% do volume de concreto (GOMES e BARROS, 2009; HAN; ZHANG; OU, 2017).

A forma, a textura da superfície e a distribuição granulométrica das partículas do agregado são bastante importantes e afetam a compactação e o índice de vazios (GOMES e BARROS, 2009).

Agregados com mais angulosidade e textura de superfície rugosa contêm mais vazios do que os agregados arredondados com textura de superfície lisa e, portanto, necessitam de mais água para a produção do concreto (JAMKAR e RAO, 2004).

Quando a distribuição granulométrica dos agregados não é contínua, podem ocorrer alguns problemas no concreto como: maior consumo de cimento, levando a um aumento no custo; redução da fluidez e existência de mais vazios entre os agregados. Agregados com composição granulométrica contínua produzem misturas com menor consumo de materiais cimentícios e água, diminuindo assim problemas como retração, fissuração e eflorescência (MORAES, 2010).

Os agregados são considerados inertes por não possuírem propriedades ligantes, porém o uso de materiais contaminados ou com características mineralógicas inadequadas podem acarretar uma série de condições desfavoráveis ao concreto estrutural, causando patologias e o colapso da estrutura (JÚNIOR, 2015).

A umidade, a absorção de água, a classificação e as variações na quantidade de finos dos agregados devem ser cuidadosa e continuamente monitoradas, levando-se em consideração a manutenção da qualidade do CAA (GOMES e BARROS, 2009).

2.1.1.3 Adições Minerais

As adições minerais são materiais finos incorporados ao concreto, em grande quantidade, para obter as características de auto adensabilidade, resistência à segregação, viscosidade e melhorar a trabalhabilidade no estado fresco. Favorecem a resistência à fissuração térmica, a redução da expansão álcali-agregado e do ataque de sulfatos além de reduzir custos (MEHTA e MONTEIRO, 2014). Estas adições podem ser inertes (API), que provocam apenas ação física dando mais compacidade ao concreto (*fillers* de calcário, quartzo, pós de mármore e granito), ou reativos (APR) que atuam como pozolanas (cinza volante, cinzas de casca de arroz, cinzas de bagaço de cana de açúcar, sílica ativa e metacaulim). No aspecto ambiental, a substituição do cimento por materiais pozolânicos, reduz a emissão de CO₂ na atmosfera, considerado o principal causador do efeito estufa (JALAL et al. 2012). A adição de finos na mistura, que na maioria das vezes são subprodutos industriais, reduz o descarte em aterros (MEHTA e MONTEIRO, 2014). Conforme Bahoria et al. (2013), os resíduos industriais na forma de agregados miúdos, trazem benefícios ambientais e também proporcionam um melhor desempenho na produção do concreto.

Siddique e Khan (2011) descreveram que o uso de materiais cimentícios, tais como escória de alto forno, cinzas microssilica, metacaulim, *filler* de calcário, cinzas de casca de arroz, entre outros está crescendo cada vez mais. O uso de tais materiais pode ser vantajoso não só pela redução de custos e de impactos ambientais na fabricação de cimento Portland, mas também porque pode aumentar muito o desempenho final das estruturas, como a resistência à compressão.

2.1.1.4 Aditivos Químicos

De acordo com a ABNT NBR 11768 (1992), aditivos são produtos adicionados ao concreto em pequenas quantidades com finalidade de modificar algumas propriedades buscando melhorar as condições de uso do concreto. Alguns tipos de aditivos estão listados na Tabela 2.3.

Tabela 2.3: Tipos de aditivos para concreto.

Siglas	Descrição
P	Plastificante
R	Retardador de Pega
A	Acelerador de Pega
PR	Plastificante Retardador
PA	Plastificante Acelerador de Pega
IAR	Incorporador de Ar
SP	Superplastificante
SPR	Superplastificante Retardador de Pega
SPA	Superplastificante Acelerador de Pega

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 11768 (2019).

Os aditivos superplastificantes (SP) e os modificadores de viscosidade são os mais utilizados; outros, como os incorporadores de ar, são menos utilizados. O uso do superplastificante no CAA é inevitável, pois ele é responsável por uma das principais propriedades do CAA, a fluidez. Sem o superplastificante seria impossível pensar em concreto autoadensável (GOMES e BARROS, 2009).

De um modo geral, os SP podem ser agrupados em quatro categorias, de acordo com sua composição química, como; a) lignossulfonatos ou lignossulfonatos modificados (LS); b) sais sulfonatos de policondensado de naftaleno e formaldeído, usualmente denominados de naftaleno sulfonato ou apenas de naftaleno (NS); c) sais sulfonatos de policondensado de melamina e formaldeído, usualmente denominados de melamina sulfonato ou apenas de melamina (MS) e d) policarboxilatos (PC). Os policarboxilatos (PC), considerados superplastificantes de terceira geração, são os aditivos mais aconselhados para a utilização no CAA, por serem aditivos superplastificantes de alta eficiência que dispersam e desfloculam as partículas de cimento. Assim, permitem a redução da água das misturas em até 40%, mantendo a mesma trabalhabilidade (TUTIKIAN e DAL MOLIN, 2008).

Segundo Neville (1997) os aditivos estão sendo cada vez mais difundidos e tornam-se importantes constituintes na composição de CAA. A razão para o grande crescimento do uso de aditivos é que eles são capazes de conferir benefícios físicos e econômicos em relação ao concreto. Neville (1997) chama a atenção para, muito embora não serem baratos, os aditivos não necessariamente representam despesa adicional porque o uso deles pode resultar em outros ganhos, a exemplo de: custo de mão de obra para adensamento e acabamento após lançamento nas formas; eliminação de acréscimo de consumo de cimento para manutenção da

trabalhabilidade com mesma relação água/cimento, por exemplo; aumento da durabilidade sem o uso de medidas adicionais. Porém, ressalte-se que os benefícios que os aditivos trazem para o concreto não podem ser entendidos como remédios para constituintes de baixa qualidade aplicados à mistura; para proporções incorretas de constituintes na mistura; ou para baixa qualidade da mão de obra empregada nas etapas de transporte, lançamento e adensamento do concreto.

2.1.1.5 Água

A água tem que ter boa qualidade, pois as impurezas podem prejudicar a hidratação do cimento, causando redução da resistência e levar a corrosão das armaduras (NEVILLE e BROOKS, 2010). Deve ser adicionada na quantidade necessária para reação química do cimento, preencher a porosidade dos agregados e vazios entre eles favorecendo a trabalhabilidade (BUCHER et al. 2015).

O controle da água a ser empregada deve verificar possível presença de matéria orgânica, resíduo sólido, sulfatos, cloretos e açúcar. Deve ainda ser determinado seu pH, que normalmente deve se situar entre 6,0 e 8,0 (CALADO et al. 2015).

De acordo com Neville (1997) a quantidade da água na mistura influencia a resistência do concreto resultante, mas, ressalta também o papel que a qualidade da água desempenha: suas impurezas podem interferir com o endurecimento do cimento; pode afetar negativamente a resistência do concreto ou causar manchas na sua superfície. Por essas razões apontadas, a qualidade da água aplicada para fins de mistura e de cura deve ser considerada.

Assim, a utilização de água potável na mistura é geralmente satisfatória, apesar de existirem algumas exceções a exemplo de algumas áreas áridas onde a água potável local seja salina, podendo conter quantidade excessiva de cloretos. Também, algumas águas minerais naturais contendo indesejáveis quantidades de álcalis carbonatos e bicarbonatos que possam contribuir para o aparecimento de reação álcali-sílica.

2.2 Métodos de Dosagem do Concreto

Os principais objetivos a serem alcançados para a concepção do CAA são, adequada fluidez, estabilidade e capacidade de execução e baixo custo. Tais condições não são fáceis de serem atingidas, exigindo extensos estudos laboratoriais preliminares. Assim como para qualquer tipo de concreto, as características de desempenho almejadas deverão ser primeiramente pré-estabelecidas.

Antes de estabelecer um método de dosagem entre os componentes do CAA, é importante conhecer as características individuais de cada elemento. Cuidados na etapa de dosagem de qualquer tipo de concreto são indispensáveis para alcançar um equilíbrio entre as propriedades desejadas ao menor custo possível. Um dos fatores que interferem negativamente na propagação do CAA no Brasil é justamente a falta de métodos de dosagem eficientes.

Atualmente, vários autores vem apresentando diferentes métodos os quais não são universais, são específicos do clima regional, da exposição e dos materiais locais (AHMED et al. 2016).

De acordo com Shi et al. (2015) os métodos de dosagens são divididos em cinco categorias: método empírico usado por (DOMONE, 2007; OKAMURA e OUCHI, 2003; OKAMURA e OZAWA, 1995), método baseado na resistência à compressão utilizados por Helene (2011) e Melo (2005), método do empacotamento dos agregados foram empregados por Gomes e Barros (2009); Sedran e De Larrard (1999); Tutikian e Dal Molin (2008); Zuo et al. (2018); métodos baseados em modelo estatístico fatorial adotados por Alyamac, Ghafari e Ince (2017); Gołaszewski et al. (2016); Harbi, Derabla e Nafa (2017); Khayat, Ghezal e Hadriche (2000); Mastali, Dalvand e Sattarifard (2016); Sonebi et al. (2016) e método baseado na reologia da pasta foi utilizado por (SAAK; JENNINGS; SHAH, 2001).

A seguir apresenta-se um breve resumo de alguns métodos conhecidos no Brasil.

2.2.1 Método de dosagem proposto por Okamura e Ouchi

Okamura e Ouchi (2003) propuseram um sistema simples de dosagem de mistura. Neste método, o teor de agregado graúdo e fino é mantido constante, de modo que a autoadensabilidade pode ser alcançada ajustando-se a relação água/cimento e a dosagem de superplastificantes.

Para alcançar as propriedades de autoadensabilidade, o método parte da fixação de valores de alguns materiais, conforme Figura 2.3.

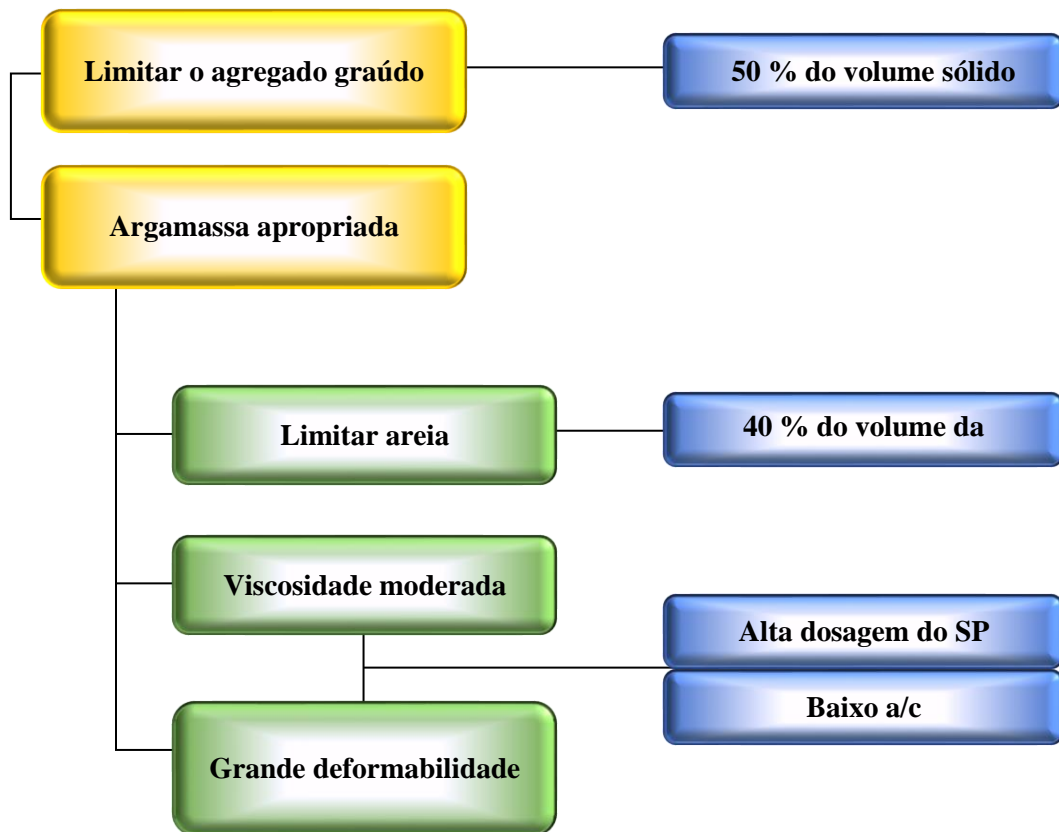


Figura 2.3: Esquema do procedimento de dosagem de Okamura e Ouchi (OKAMURA; OUCHI, 2003).

Os parâmetros são fixados da seguinte forma (Okamura e Ouchi 2003): o conteúdo de agregado graúdo no concreto é fixado em 50% do volume total de sólidos. O teor de agregado fino é fixado em 40% do volume de argamassa e a relação água/finos em volume é assumida como 0,9 a 1,0 dependendo das propriedades dos finos.

A razão água/finos e o teor de aditivo superplastificante utilizados na dosagem do CAA são corrigidos nas fases de pasta e argamassa, por meio dos ensaios de espalhamento e Funil-V até obter fluidez necessária para CAA (OKAMURA e OUCHI, 2003; OKAMURA e OZAWA, 1995). Após isso, são realizados ensaios para determinar a capacidade de preenchimento do CAA (MORAES, 2010).

Okamura e Ouchi (2003) afirmaram que é necessário limitar o uso de agregados graúdos, pois estes exigem uma alta viscosidade da pasta que é alcançada com uso de SP e fator água/cimento (a/c) baixo.

2.2.2 Método de dosagem proposto por Tutikian

O CAA é obtido a partir do concreto convencional vibrado (CCV) calculado pelo método do Instituto de Pesquisa Tecnológica / Universidade de São Paulo (IPT/USP).

Segundo Tutikian (2004), quatro princípios básicos devem ser seguidos:

- Produção da pasta: A pasta é a força motriz da resistência e durabilidade, ou seja, grandes cuidados devem ser tomados na sua concepção. A elaboração da pasta envolve, essencialmente, a determinação da relação água/cimento e a relação dos materiais cimentícios, inclusive as adições minerais. As relações que direcionam os procedimentos de dosagem para concretos convencionais vibrados, no que diz respeito à resistência e durabilidade, são as mesmas para o CAA, ou seja, deverá ser elaborado sob as mesmas orientações e procedimentos.

- Otimização da quantidade da pasta: A seleção da quantidade da pasta é uma parte crítica da mistura no processo de dosagem do CAA. Esta é uma fase que fornece a plasticidade/trabalhabilidade ao concreto. A determinação do volume ótimo da pasta é um processo complexo. O concreto apresenta comportamento inicial como um material plástico quando todos os espaços vazios entre agregados são preenchidos.

Devido ao elevado nível de fluidez, necessário para atingir a completa compactação sem energia externa, o CAA requer maiores quantidades do volume da pasta. Este volume complementar deverá lubrificar e espaçar adequadamente os agregados, de forma que o atrito interno entre os mesmos não comprometa a capacidade do concreto de escoar.

Outro fator deve ser levado em consideração por influenciar na fluidez do concreto; a fluidez da massa é aumentada pela adição de superplastificante (SP) e a sua capacidade de manter o conjunto em suspensão diminui.

Sendo assim, a fluidez do concreto é regida pela combinação bem equilibrada entre o volume de vazios, obtidos por meio da combinação entre os agregados secos, o volume da pasta de fluidez e o nível de fluidez da pasta.

- Proporcionamento do agregado: tem um efeito direto sobre a quantidade da pasta de enchimento e, indiretamente, sobre o custo da matéria-prima do CAA. Em seguida, é importante otimizar a proporção de agregados para obtenção da maior densidade de empacotamento possível. Para um determinado conjunto de agregados, a maior densidade de empacotamento é geralmente obtida com frações granulométricas contínuas. No entanto, quando os agregados fluem através das armaduras, o agregado graúdo, na maioria das vezes, tende a restringir o fluxo do CAA, bloqueando os espaços entre as barras de aço. O proporcionamento dos agregados deve ser feito a fim de alcançar o equilíbrio entre a alta densidade de empacotamento e obtenção de fluidez através dos espaços entre as armaduras e previamente testados por equipamentos que simulem as condições reais.

- Ajustes com incorporação de aditivos: assim como ocorre com qualquer outro tipo de concreto, misturas com aditivos, necessários para obter a fluidez no nível desejado, terá que ser

otimizada experimentalmente, uma vez que cada tipo de aditivo reage de modo diferente para cada tipo de cimento.

Primeiro deve-se escolher e caracterizar todos os materiais, dosar o concreto pela resistência à compressão desejada fixando a relação a/c. Os agregados devem ter menor granulometria possível, sendo os agregados graúdos de dimensão máxima de 20 mm. Os finos pozolânicos devem substituir o cimento e os não pozolânicos substituirão a areia. Determina-se o teor de argamassa como para o CCV. Adiciona-se aditivo superplastificante para transformar em CAA e faz-se a correção de segregação com adição de finos (TUTIKIAN e HELENE, 2011). A Figura 2.4 ilustra as etapas do método proposto por (TUTIKIAN, 2004).

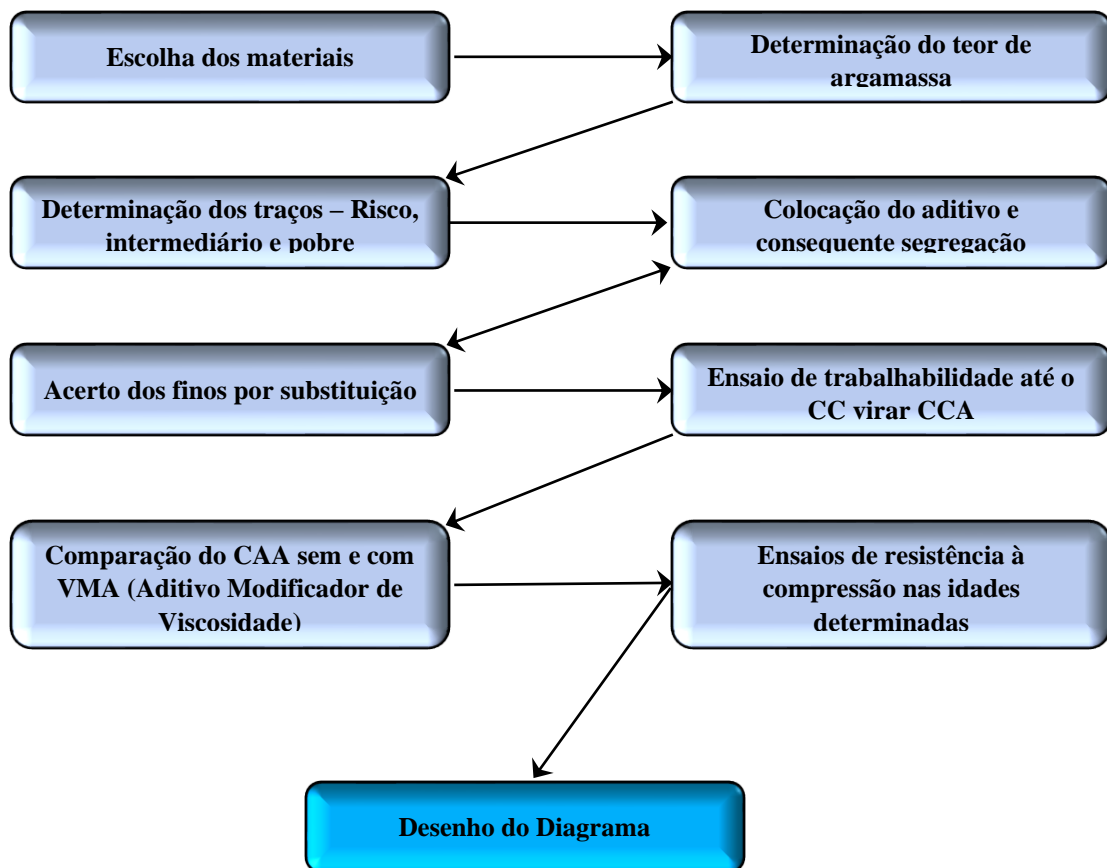


Figura 2.4: Etapas do método de dosagem de Tutikian (TUTIKIAN, 2004).

2.2.3 Método de dosagem proposto por Gomes

Segundo Tutikian (2004) o método de Gomes é voltado para a dosagem de concreto autoadensável de alta resistência (CADAR) e o procedimento está ilustrado na Figura 2.5. Este procedimento considera o concreto como bifásico, sendo uma fase a pasta e a outra o esqueleto granular, e estas fases podem ser obtidas e otimizadas separadamente, buscando um conteúdo de pasta para que o concreto tenha características de CAA.

Uma das principais vantagens desse processo é a habilidade de separar as fases que permite a determinação independente dos diferentes parâmetros de mistura ou variáveis (GOMES e BARROS, 2009).

O método é executado em três etapas, conforme mostrado na Figura 2.5. A primeira etapa avalia as propriedades reológicas da mistura, como viscosidade e fluidez, e é conhecida como otimização da pasta ou obtenção da composição da pasta. A segunda etapa é a determinação/otimização do esqueleto granular, que consiste em definir a proporção ideal de agregados miúdo e graúdo, que promova menor volume de vazios. A terceira etapa refere-se a obtenção do volume de pasta ótimo para satisfazer as condições de resistência e autoadensamento exigidos pelo CAA (GOMES e BARROS, 2009).

A composição da pasta é definida pela quantidade de cimento e pelas relações água/cimento (a/c), superplastificante/cimento (sp/c), pozolanas/cimento (sf/c), no caso de sílica ativa ou sílica fume e finos/cimento (f/c) (GOMES e BARROS, 2009).

A pasta do CADAR deve ser fluida e, ao mesmo tempo, manter a coesão da mistura. Por isso, a dosagem do aditivo superplastificante e dos finos é feita através de testes específicos. O ponto de saturação do aditivo superplastificante e a relação f/c são encontrados através dos testes do cone de *Marsh* em conjunto com o *mini-slump*. A relação a/c é determinada em relação à resistência requerida e, normalmente, se mantém em torno de 0,35 a 0,40 (TUTIKIAN, 2004).

O esqueleto granular é obtido experimentalmente medindo-se a densidade de combinações de agregados secos não compactados e escolhendo-se a combinação com a maior densidade e menor teor de vazios (GOMES e BARROS, 2009).

Depois de determinadas as relações de sp/c e f/c para a pasta e a proporção ideal de agregados graúdos e miúdos, o volume ótimo de pasta deve ser determinado de maneira que preencha os vazios do esqueleto granular, proporcionando a característica de autoadensamento no estado fresco e a resistência a compressão desejada no estado endurecido (LISBÔA, 2004).

Os requisitos estabelecidos ao concreto para determinação do volume de pasta são aqueles que atendem às seguintes propriedades: capacidade de preenchimento, capacidade de passagem entre armaduras e estabilidade ou ausência de segregação. Os ensaios utilizados são: de espalhamento (cone de *Abrams*) e Funil-V, ambos para capacidade de preenchimento; Caixa-L, para capacidade de passagem por armaduras; e Tubo-U, para verificar a resistência à segregação do concreto (GOMES e BARROS, 2009).

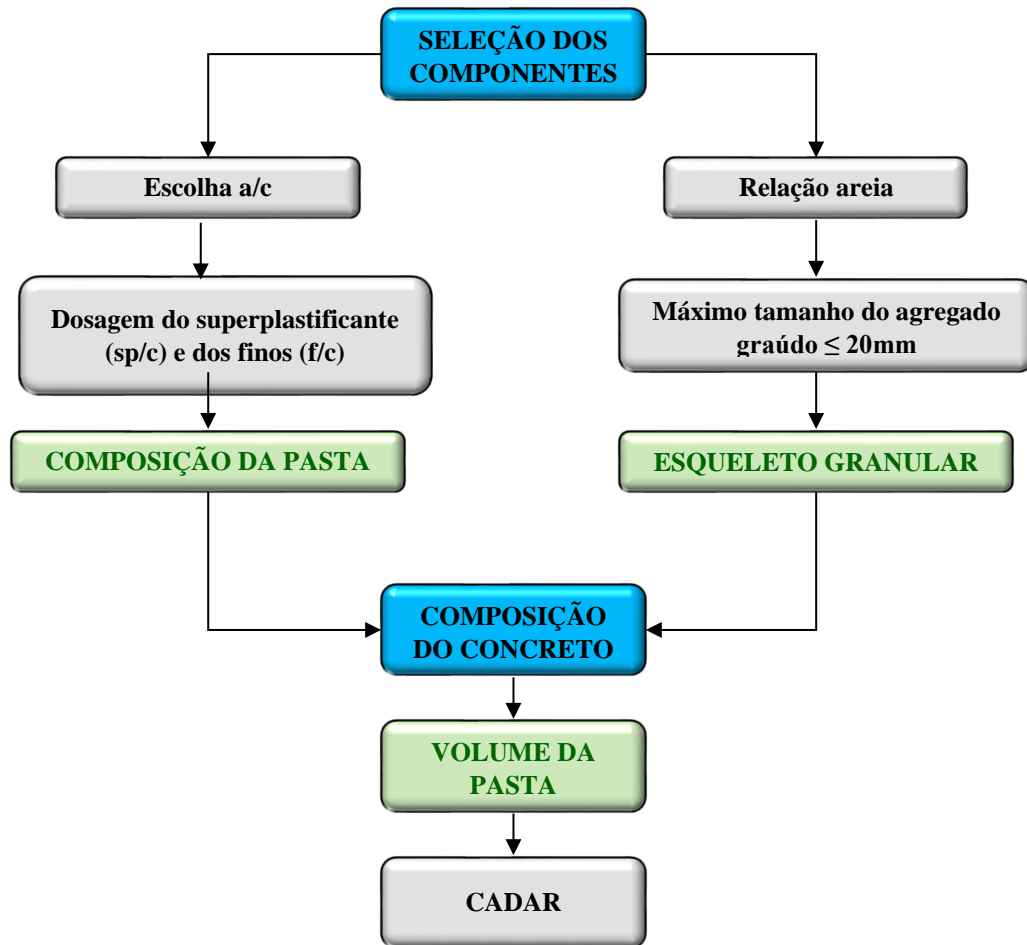


Figura 2.5: Procedimento do método de dosagem proposto por Gomes (GOMES, 2002).

2.3 Propriedades do concreto autoadensável no estado fresco

O que estabelece o concreto como autoadensável são suas características no estado fresco. É fundamental averiguar, tanto na sua produção como no recebimento, se o concreto possui habilidade de preenchimento, passante e se resiste à segregação (REPETTE, 2011).

A habilidade de preenchimento é a propriedade que caracteriza a capacidade do concreto autoadensável de fluir dentro da fôrma, preenchendo todos os espaços somente pelo efeito de seu peso próprio. Os mecanismos que governam essa propriedade são: alta fluidez e coesão da mistura (GOMES e BARROS, 2009). A capacidade de preenchimento deve ser alta o suficiente para permitir que o ar escape e contribua para obtenção de concreto adequadamente compacto. Os agregados graúdos do concreto podem representar risco de obstrução do fluxo (EFNARC, 2002).

A habilidade de passagem é a propriedade que caracteriza a capacidade do CAA de passar por entre obstáculos, como armaduras e seções estreitas, sem que haja obstrução do fluxo. Os mecanismos que governam essa propriedade são: viscosidade da pasta e as

características dos agregados. Havendo presença de segregação, essa propriedade dificilmente será atendida (GOMES e BARROS, 2009).

A estabilidade ou a resistência à segregação é a propriedade que caracteriza a capacidade do CAA de preencher os espaços sem que haja separação dos seus elementos constituintes, como por exemplo, a separação do agregado graúdo dos demais componentes do concreto. Essa propriedade melhora a uniformidade da mistura durante o transporte, o lançamento e a consolidação. Os mecanismos que governam essa propriedade são a viscosidade e a coesão da mistura (GOMES e BARROS, 2009).

Verifica-se que essas propriedades estão diretamente correlacionadas com as seguintes características reológicas do concreto: a viscosidade plástica e a tensão de cisalhamento (GUETTI, 2012; TUTIKIAN e DAL MOLIN, 2008). A primeira é a medida da taxa de fluxo do material, enquanto a tensão de cisalhamento é uma medida de força, necessária para o movimento do concreto (TUTIKIAN e DAL MOLIN, 2008).

Para obter combinações satisfatórias de alta fluidez e estabilidade (ou, em termos reológicos, baixa tensão de escoamento e moderada viscosidade plástica) o CAA requer alto volume de finos, baixa relação água/finos e quantidades significativas de superplastificantes (DOMONE, 2007).

As propriedades do CAA no estado fresco devem ser quantificadas ou qualificadas através de ensaios que representem seu comportamento na aplicação (GOMES e BARROS, 2009). Muitos métodos de ensaio diferentes foram desenvolvidos em tentativas de caracterizar as propriedades do CAA no estado fresco. Até agora, de acordo com Ma'aruf, Abba e Nuruddeen (2017), não foi encontrado nenhum método único que caracterize todos os aspectos relevantes da trabalhabilidade, de modo que cada projeto de mistura deva ser verificado e testado por mais de um método de teste.

A seguir serão descritos os principais métodos de ensaios normativos para caracterização do CAA baseados na (NBR 15823-1, 2017).

2.3.1 Determinação do espalhamento e do tempo de escoamento – Método do cone de Abrams (Slump Flow Test)

O método do cone de *Abrams* tem como objetivo avaliar a fluidez (SF) do CAA por meio da determinação do seu espalhamento e tempo de escoamento. A fluidez é definida como sendo a capacidade do concreto de fluir livremente sem segregar (ANGELIN, LINTZ e

BARBOSA, 2018). Para este ensaio, emprega-se um tronco de cone, confeccionado em chapa metálica, com dimensões conforme mostram as Figura 2.6 e Figura 2.7.

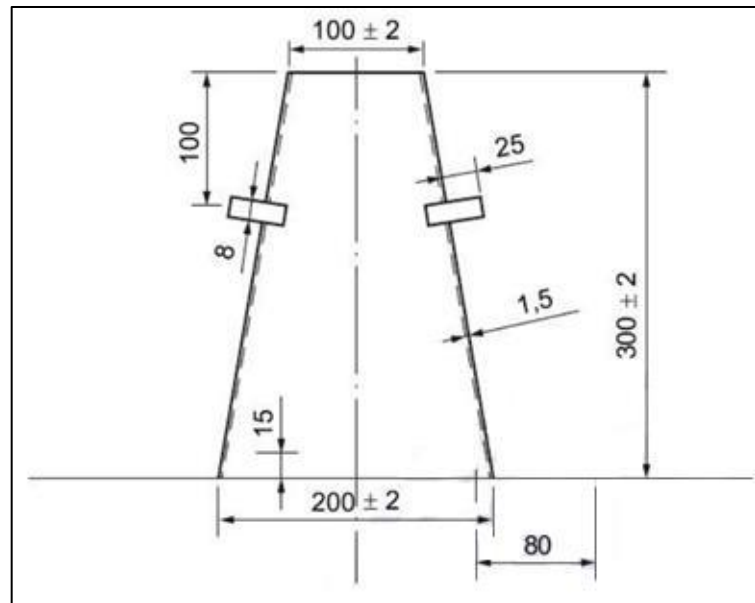


Figura 2.6: Ilustração representativa do Cone de Abrams (NBR 15823-2, 2017).

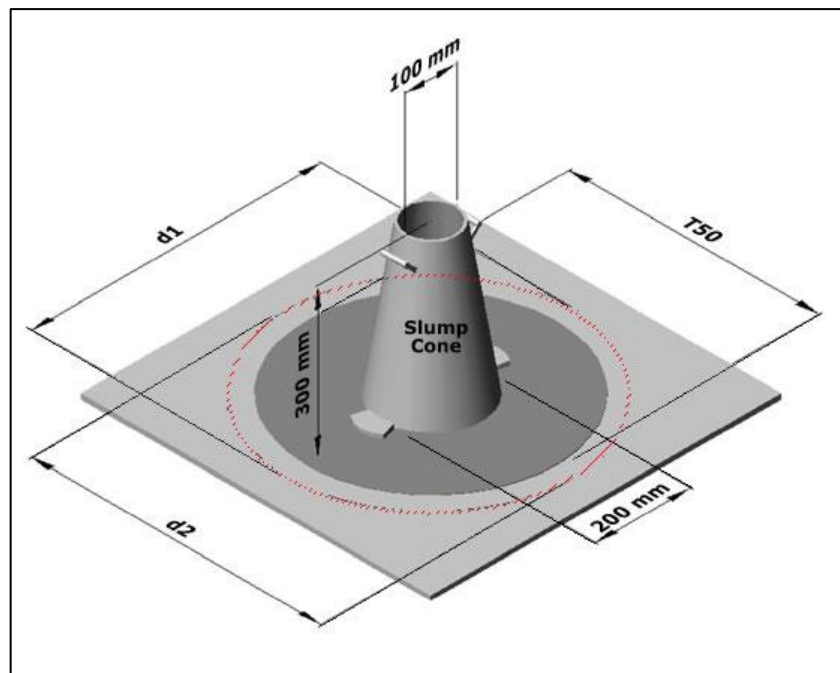


Figura 2.7: Ilustração representativa do Método do Cone de Abrams (*Slump Flow Test*) (CAVALCANTI, 2006).

De acordo com a (NBR 15823-1, 2017) e em função do espalhamento, o CAA pode ser classificado em SF1, SF2 e SF3, e sua aplicação está relacionada com a classe de espalhamento como apresentado na Tabela 2.4.

Tabela 2.4: Classe de espalhamento do CAA em função de sua aplicação

Espalhamento (mm)	Classe de espalhamento	Aplicação	Exemplo
550 a 650	SF1	Estruturas não armadas ou com baixa taxa de armadura, cuja concretagem é realizada a partir do ponto mais alto com deslocamento livre; Concreto autoadensável bombeado; Estruturas que exigem curta distância de espalhamento horizontal.	Lajes, revestimento de túneis, estacas e certas fundações profundas.
660 a 750	SF2	Adequada para a maioria das aplicações correntes.	Paredes, vigas, pilares e outras.
760 a 850	SF3	Estruturas com alta densidade de armadura e/ou forma arquitetônica complexa, com uso de agregado graúdo de pequenas dimensões (menor que 12,5 mm).	Pilares-parede. Paredes-diafragma. Pilares.

Fonte: Adaptado de (NBR 15823-1, 2017).

O ensaio de espalhamento é o mais utilizado tanto em laboratório quanto em campo devido à facilidade e a rapidez de execução e também por utilizar um equipamento (cone de *Abrams*) que é amplamente usado em concretos convencionais (GOMESe BARROS, 2009).

2.3.2 Determinação da viscosidade plástica aparente – Método do funil V (*V Funel Test*)

A viscosidade é uma propriedade relacionada à consistência do concreto no estado fresco e influencia a resistência do mesmo ao escoamento. Quanto maior a viscosidade, maior a resistência do concreto ao escoamento, fazendo com que seu deslocamento dentro da fôrma ocorra de forma mais lenta.

O ensaio do funil V, conforme mostrado na Figura 2.8, avalia a capacidade do concreto autoadensável de passar por seções estreitas. Esse ensaio fornece um resultado qualitativo da viscosidade plástica aparente (VF) do CAA sob fluxo confinado e baseia-se no tempo que uma amostra de CAA, de aproximadamente 10 litros, requer para fluir através do orifício interior de um funil.

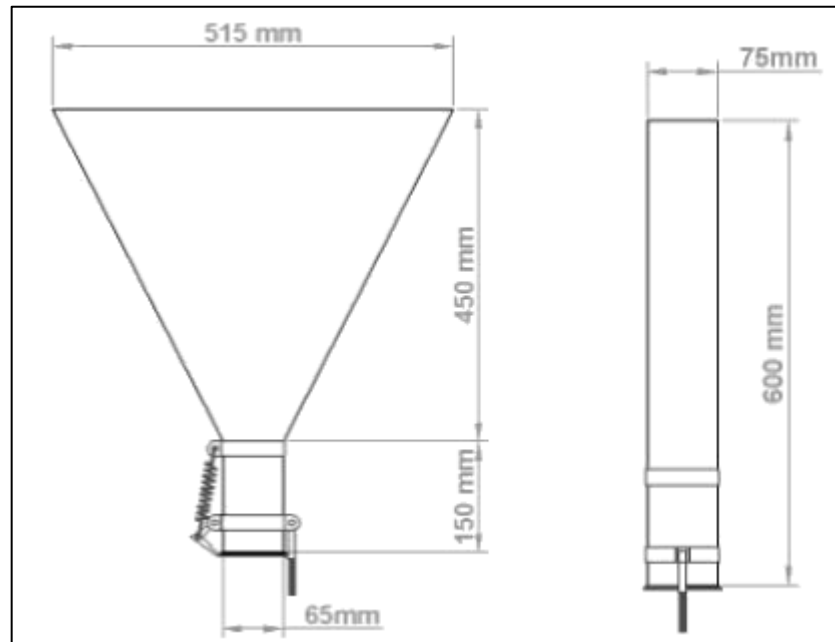


Figura 2.8: Ilustração representativa do Funil “V” para ensaio de viscosidade do CAA NBR 15823-4, 2017).

Na Tabela 2.5 estão apresentadas as recomendações de aplicação do CAA conforme a classe de viscosidade plástica aparente, segundo a (NBR 15823-5, 2017).

Tabela 2.5: Classes de viscosidade plástica aparente do CAA em função de sua aplicação

Viscosidade plástica aparente (Funil V) (s)	Classe de viscosidade	Aplicação	Exemplo
< 9	VF1	Adequado para elementos estruturais com alta densidade de armadura e embutidos, mas exige controle da exsudação e da segregação; Concretagens realizadas a partir do ponto mais alto com deslocamento livre.	Lajes, paredes diafragma, pilares-parede, indústria de pré-moldados e concretos aparentes.
9 a 25	VF2	Adequado para a maioria das aplicações correntes; Apresenta efeito tixotrópico que acarreta menor pressão sobre as fôrmas e melhor resistência à segregação; Efeitos negativos podem ser obtidos com relação à superfície de acabamento (ar aprisionado), no preenchimento de cantos e suscetibilidade a interrupções ou demora entre sucessivas camadas.	Vigas, pilares e outras.

Fonte: Adaptado de (NBR 15823-5, 2017).

2.3.3 Determinação da habilidade passante – Método da caixa L (L Box Test)

Este método está previsto na (NBR 15823-4, 2017), e é utilizado para medir a habilidade passante (PL) do concreto fresco por obstáculos, simplesmente pela ação do seu peso próprio, permanecendo coeso. Esse ensaio simula o comportamento do concreto ao ser lançado em uma fôrma de concreto armado, uma vez que a caixa L contém barras de aço equidistantes entre si, que representam as armaduras de uma estrutura qualquer.

A Caixa L, conforme ilustrada na Figura 2.9, é composta por dois compartimentos: uma câmara vertical e um canal horizontal os quais se comunicam por meio de uma comporta. Logo após esta comporta, é instalado um conjunto de barras de aço de diâmetro 12,5 mm cada.

O concreto é depositado na câmara vertical da caixa e logo em seguida abre-se a comporta. Quanto mais fluida estiver a mistura, mais rápido chegará no final desta seção. Após ter cessado o escoamento do concreto na câmara horizontal, as alturas do concreto no início (H_1) e no final (H_2) do trecho horizontal devem ser registradas.

A habilidade passante é calculada em milímetros por meio da razão entre essas alturas (H_2/H_1).

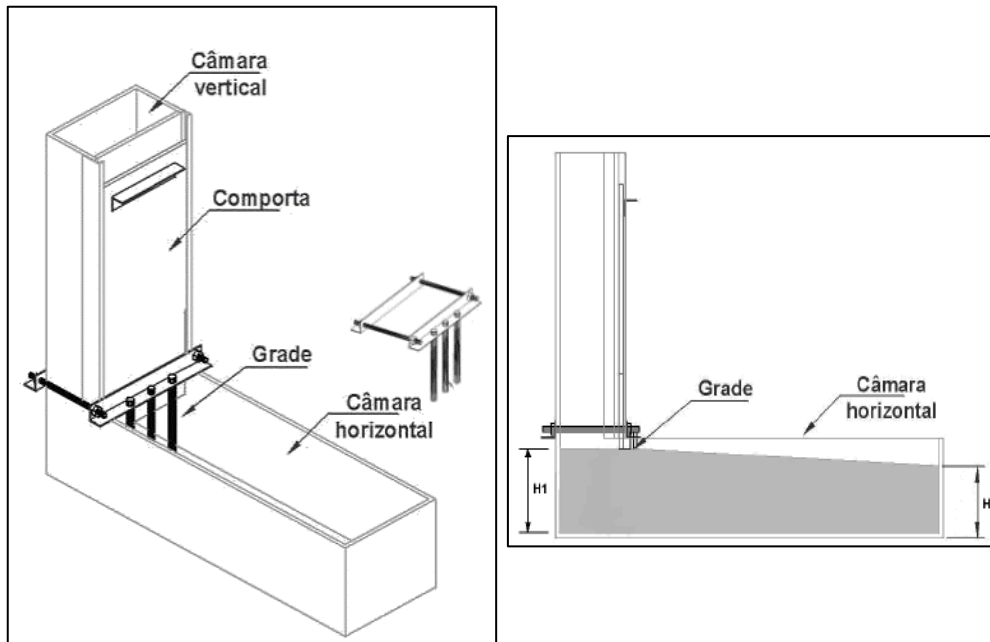


Figura 2.9: Ilustração representativa da Caixa "L" para ensaio de habilidade passante do CAA (NBR 15823-4, 2017).

A classificação do CAA em função da habilidade passante é dada NBR 15823-4 (2017) e encontra-se transcrita na Tabela 2.6.

Tabela 2.6: Classes de habilidade passante do CAA em função de sua aplicação.

Habilidade passante (Caixa "L") (H_2/H_1)	Classe de habilidade passante	Aplicação	Exemplo
$\geq 0,80$ – com duas barras de ferro	PL1	Adequada para elementos estruturais com espaçamentos de armadura de 80 a 100 mm.	Lajes, painéis, elementos de fundação.
$\geq 0,80$ – com três barras de ferro	PL2	Adequada para a maioria das aplicações correntes. Elementos estruturais com espaçamentos de armadura de 60 a 80 mm.	Vigas, pilares, tirantes, indústria de pré-moldados.

Fonte: Adaptado de (NBR 15823, 2017).

A Figura 2.10 apresenta um resumo das propriedades do concreto no estado fresco e seus respectivos ensaios e normas.

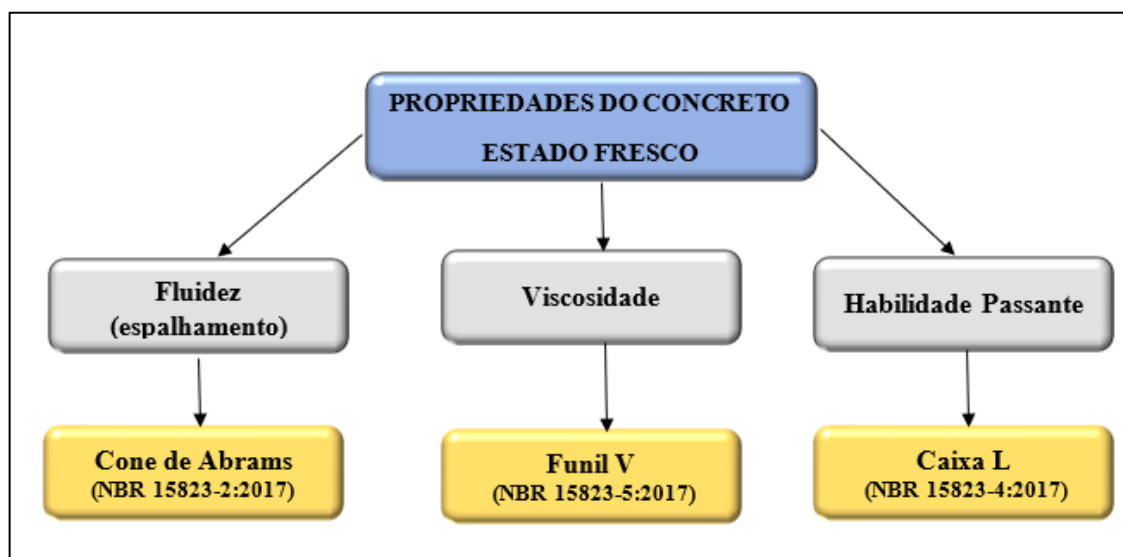


Figura 2.10: Resumo das propriedades do concreto no estado fresco e respectivos ensaios e normas (Fonte: AUTOR, 2020).

2.4 Propriedades do concreto autoadensável no estado endurecido

Apesar das vantagens do CAA serem atribuídas, principalmente, as suas características no estado fresco, as propriedades no estado endurecido da mistura também devem ser verificadas (CAVALCANTI, 2006).

O estudo do comportamento das propriedades no estado endurecido merece atenção, tanto pelos aspectos relacionados ao projeto estrutural e durabilidade, quanto para fornecer informações à dosagem que propiciem produzir misturas mais econômicas.

As diferenças na composição do CAA (agregados com menores dimensões, maior quantidade de finos e uso de superplastificantes), a interação entre os materiais bem como o grau de compactação e as condições do concreto, são fatores que alteram o desenvolvimento de suas propriedades no estado endurecido (MARQUES, 2011).

As propriedades no estado endurecido do CAA não diferem das do concreto convencional. Os ensaios para avaliar o CAA no estado endurecido são os mesmos empregados no concreto convencional (REPETTE, 2011; TUTIKIAN e DAL MOLIN, 2008).

Apresenta-se a seguir, as propriedades mecânicas do CAA estudadas neste trabalho:

- Resistência à Compressão axial: a norma brasileira que prescreve este tipo de ensaio é a (NBR 5739, 2018). Pela avaliação da resistência à compressão, que é a característica mais especificada e avaliada entre todas as do concreto endurecido, um bom número de outras características mecânicas do CAA, pode ser avaliado, pois há relações pré-estabelecidas entre elas e especificadas em normas.

Segundo EFNARC (2005), o CAA com uma relação a/c ou a/pó semelhante terá uma resistência ligeiramente maior em comparação ao concreto compactado convencional (CCV). Isso ocorre em função da ausência de vibração o que acaba gerando maior resistência na interface entre o agregado e a pasta endurecida.

Persson (2001) comparou a resistência à compressão do CAA e do concreto convencional dosados para resistências equivalentes e concluiu que o CAA possuía uma resistência superior à do concreto convencional em 20 MPa, para o fator água/aglomerante igual a 0,40, e superior em 5 MPa para o fator água/aglomerante de 0,80.

De acordo com De Shutter et al. (2008), o CAA produzido com a mesma quantidade de cimento e água que o concreto convencional possui a mesma resistência que o concreto convencional ou maior o que pode ser atribuído a maior quantidade de finos no CAA.

Nos estudos de Bosiljkov (2003), verificou-se o aumento na resistência à compressão dos traços contendo *filler* mais fino e com melhor distribuição granulométrica.

Domone (2007) analisou estudos sobre as propriedades mecânicas do CAA. Notou que a resistência à compressão foi fortemente influenciada pelo tipo e quantidade de adição mineral utilizada, bem como pelo fator água/aglomerante. Os resultados de resistência à compressão mostraram variações de acordo com o tipo de agregado usado: os concretos convencionais com agregados britados apresentaram resistência cerca de 8 MPa maior do que a dos concretos convencionais com agregados arredondados, nos CAA esta diferença foi de 4 MPa.

- Módulo de Elasticidade Dinâmico: pode ser definido como sendo a relação entre a tensão aplicada e a deformação instantânea dentro de um limite proporcional adotado. O módulo de elasticidade do concreto é um dos parâmetros utilizados no cálculo estrutural e, sob o aspecto de projeto, é muito importante conhecer as propriedades elásticas do concreto para que se conheçam as deformações dos elementos estruturais que o concreto compõe (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Segundo Diógenes et al. (2011), ensaios dinâmicos, de caráter não destrutivo, são uma poderosa ferramenta aos projetistas por apresentarem a vantagem de fornecer informações integradas e globais da estrutura a respeito da rigidez e do amortecimento e, além disso, podem ser repetidos e comparados ao longo do tempo.

As normas ASTM C215 (2014) e ASTM E1876 (2015) descrevem as principais metodologias para a caracterização dos módulos elásticos dinâmicos de corpos de prova de concreto.

- Absorção, Índice de Vazios de Ar e Massa Específica: segundo a NBR 9778 (2005), a absorção de água por imersão é o processo pelo qual a água é conduzida e tende a ocupar os poros permeáveis de um corpo sólido poroso; índice de vazios é a relação entre o volume de poros permeáveis e o volume total da amostra; e massa específica é a relação entre a massa do material seco e o seu volume, excluindo os poros permeáveis.

- Dureza: a avaliação da dureza superficial do concreto pode ser realizada pelo esclerômetro de reflexão. A esclerometria é um ensaio não destrutivo cujo objetivo é avaliar a dureza superficial do concreto ou do maciço rochoso.

De acordo com a NBR 7584 (2012) o ensaio fornece uma estimativa da dureza superficial, da região mais externa do elemento estrutural. Apesar de ser uma avaliação superficial, na maioria dos casos a norma citada relata como satisfatória a correlação entre índice de reflexão e resistência à compressão do concreto, justificando a aplicação em análises usuais de engenharia.

- Frequência Natural e Fator de Amortecimento: por meio de um único ensaio estático e não destrutivo, estas grandezas são avaliadas pela técnica de excitação por impulso. Este ensaio identifica quais são as frequências naturais de vibração e os respectivos fatores de amortecimento mediante o processamento da resposta acústica do corpo a uma excitação mecânica por impulso.

2.5 Resíduos de borracha de pneus inservíveis

O aumento no volume de resíduos de pneus inservíveis em todo o mundo é uma consequência drástica do aumento significativo no número de veículos e, está se tornando um dos principais problemas ambientais dos dias atuais (BUŠIĆ et al. 2018; HESAMI; SALEHI HIKOUEI e EMADI, 2016).

Silva et al.(2019) avaliou a borracha de recauchutagem, em substituição parcial do agregado miúdo natural em porcentagens de (10%, 20%, 30%, 40% e 50%) para a produção de pisos táteis intertravados de concreto, e, apesar da redução das resistências mecânicas, os traços atingiram ótimos valores de resistência à compressão e resistência à tração na flexão e melhor resistência à abrasão.

Santos e Borja (2005) citam: “Um dos principais desafios ambientais enfrentados ao redor do mundo é a disposição de pneus inservíveis em terrenos baldios, rios e lagoas, formando um grande passivo ambiental. A utilização de pneus em obras de construção civil e em muitas outras áreas, além de dar uma destinação nobre a um elemento altamente poluente do meio

ambiente, poderá proporcionar uma sensível economia no produto final. Considerando a sua substituição total ou parcial por elementos naturais e de uso tradicional dentro da construção civil, não esquecendo que um dos principais aspectos e de grande relevância na utilização desse material é o ecológico.”

A estrutura típica de um pneu, conforme Figura 2.11 é constituída de vários componentes fabricados com diversos materiais, como borracha (natural e sintética), negro de fumo, enxofre (elemento vulcanizante), somado com vários outros produtos químicos, catalisadores, plastificantes, cargas reforçantes além de lonas emborrachadas de cordonéis de aço, de náilon ou outros materiais como o kevlar (ANIP, 2018).

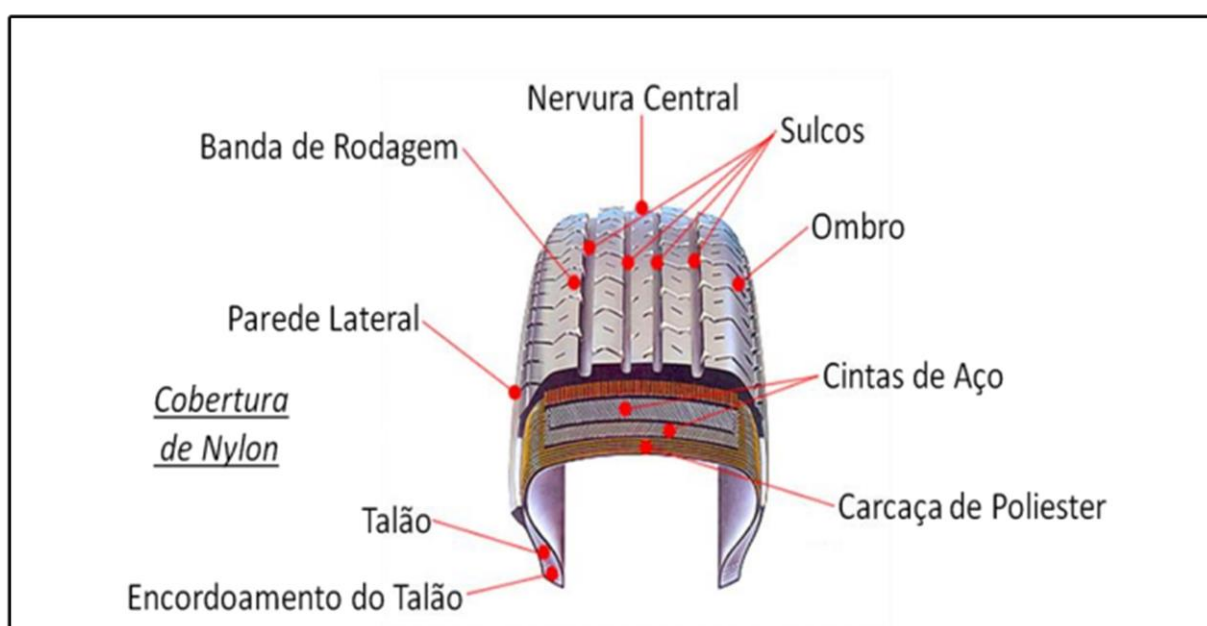


Figura 2.11: Estrutura de um pneu de automóvel (GEOCITIES, 2019).

A borracha é o principal material constituinte do pneu, representando mais de 40% do seu peso total. A proporção dos materiais na composição do pneu varia de acordo com seu uso. Por exemplo, nos pneus de automóveis de passeio, que rodam em estradas pavimentadas, a borracha sintética é mais usada que a borracha natural. Nos pneus de caminhões de carga, empregados em múltiplas estradas, predomina o uso da borracha natural, por sua maior resistência aos cortes e lacerações (ANIP, 2018).

A borracha natural representa entre 30% e 40% do peso de um pneu de caminhão e entre 15% e 20% de um pneu de carro de passeio. Os fabricantes de pneus consomem cerca de 70% da produção mundial de borracha natural, que apresenta várias qualidades: maleabilidade, grande resistência mecânica e térmica e aderência em todos os tipos de solo (ANDRIETTA,

2002). A Figura 2.12 e a Tabela 2.7 apresentam, respectivamente, a composição química e os materiais componentes dos pneus radiais para automóveis.

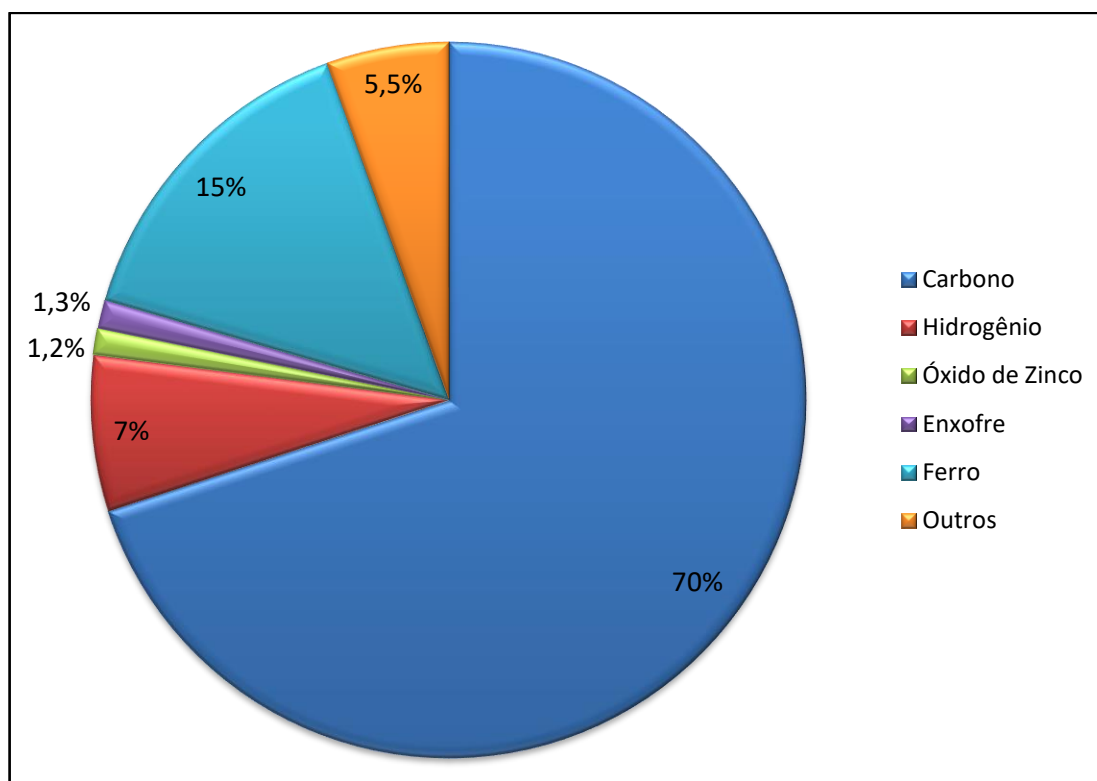


Figura 2.12: Composição Química dos Pneus (ANDRIETTA, 2002).

Tabela 2.7: Materiais Componentes dos Pneus

Material	Quantidade (%)	
	Carro	Caminhão
Borrachas	48	45
Negro de fumo	22	22
Aço	15	25
Tecido de nylon	5	-
Óxido de zinco	1	2
Enxofre	1	1
Aditivos	8	5

Fonte: adaptado de (ANDRIETTA, 2002).

Os pneus têm em média uma vida útil de que varia de 40 mil a 100 mil km, dependendo do tipo e das condições de utilização. Após a vida útil, boa parte é descartada ou encaminhada para recapagem, gerando resíduos nos dois casos (MOREIRA, FIDELIS e DIAS, 2014). Esses resíduos são muitas vezes descartados de modo inadequado, como terrenos baldios, beira de estradas, aterros a céu aberto entre outros destinos finais incorretos, o que causa transtornos à saúde pública e danos ao meio ambiente (SPÓSITO, BERTO e SILVA, 2017).

Além dos danos causados ao meio ambiente e a saúde pública o resíduo de borracha proveniente de pneus inservíveis, é um material não biodegradável e tem uma vida útil relativamente longa com projeção de decomposição em aproximadamente 500 anos (MOREIRA, FIDELIS e DIAS, 2014).

Diante da necessidade de reciclagem ou reutilização desse material, diversas novas maneiras de uso do mesmo já foram criadas e novos estudos têm sido realizados nesta direção. Um caminho para o reaproveitamento desses resíduos, que ganhou notoriedade nas últimas décadas, é a sua aplicação como material de construção civil, empregado na substituição parcial dos agregados no concreto (GHOSH e BERA, 2016; HESAMI, SALEHI HIKOUEI e EMADI, 2016).

A reutilização do resíduo de borracha de pneu como agregado do concreto apresenta um papel importante na preservação do meio ambiente, pois, além de diminuir a extração de recursos naturais, como a areia e a brita, também pode diminuir o descarte inadequado desses resíduos (MARINHO et al. 2014; THOMAS, GUPTA e PANICKER, 2016).

Alves e Cruz (2007) dizem que, como a química do pneu é avançadíssima e o mesmo demora cerca de 600 anos até se decompor na natureza, as propriedades que o fazem ser tão durável são transferidas para o concreto, tornando-o mais resistente às intempéries, ao envelhecimento e também mais elástico.

O resíduo de borracha de pneu utilizado para fabricação de concretos pode ser classificado em quatro categorias, conforme apresentadas na Figura 2.13, dependendo do tamanho da borracha, da forma da borracha e do material substituído:

a) Borracha triturada ou lascada (borracha grossa): usada na substituição do agregado graúdo; as partículas de borracha estão entre 13 e 76 mm (BUŠIĆ et al. 2018; GANJIAN, KHORAMI e MAGHSOUDI, 2009).

b) Borracha moída: geralmente utilizada na substituição da areia; as partículas são produzidas com uma alta irregularidade na faixa de 0,425 a 4,75 mm (GANJIAN, KHORAMI e MAGHSOUDI, 2009).

c) Borracha granular: é o agregado de borracha que passa pela peneira de 0,425 mm. Alguns pesquisadores utilizaram na mistura do CAA (GANJIAN, KHORAMI e MAGHSOUDI, 2009; GHOSH e BERA, 2016).

d) Fibra: a borracha fragmentada tem a forma de fibras curtas com uma média de 12,5 mm de comprimento (BUŠIĆ et al. 2018).

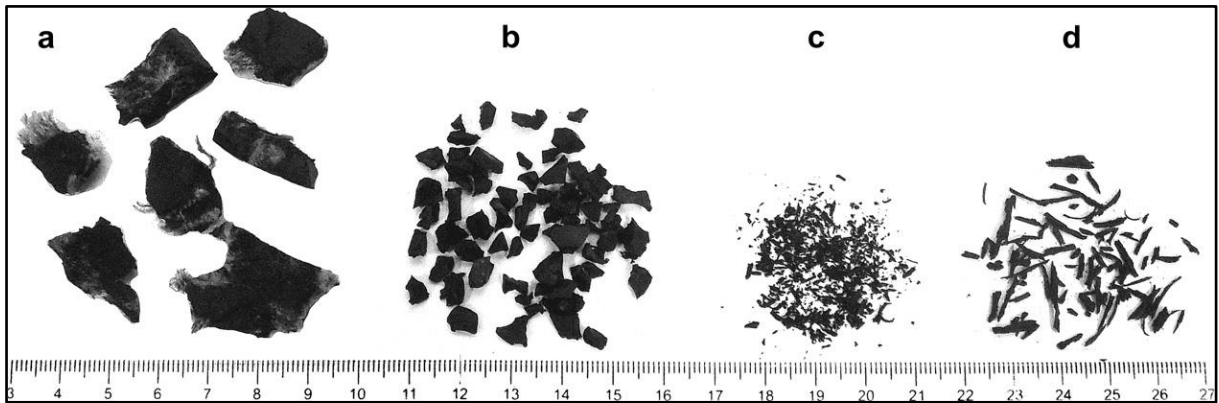


Figura 2.13: Classificações dos agregados de borracha: (a) triturada ou lascada, (b) moída, (c) granular e (d) fibra (NAJIM e HALL, 2010).

2.6 Concreto com adição de borracha

Alta trabalhabilidade é uma vantagem diferenciada do concreto autoadensável em relação a outros tipos de concreto e a utilização de novos materiais como os resíduos de borracha de pneus pode influenciar diretamente essa propriedade.

Estudos recentes mostraram que há uma diminuição da resistência a compressão dos concretos autoadensáveis com a adição de resíduo de borracha na substituição parcial dos agregados. Esses estudos também mostraram que essa diminuição é proporcional a porcentagem de substituição, ou seja, o aumento no teor de resíduo de borracha provoca maior redução na resistência à compressão (ABDELALEEM, ISMAIL e HASSAN, 2018; GUPTA, CHAUDHARY e SHARMA, 2016; HESAMI, SALEHI e EMADI, 2016; ISMAIL e HASSAN, 2016; LV *et al.* 2019; YOUNIS; NAJI e NAJIM, 2017; ZAOIAI *et al.* 2016).

Ismail e Hassan (2016) verificaram em seu estudo que o aumento no teor de resíduo de borracha de pneu no concreto aumentou a viscosidade da mistura, reduziu a fluidez e a habilidade passante. Segundo os autores, a redução na habilidade passante, pode ser atribuída ao atrito e bloqueio entre agregados graúdos e as partículas de borracha. No estudo os autores também notaram o aumento na segregação à medida que a porcentagem de resíduo de borracha aumentou. Eles atribuíram isto à baixa densidade da borracha, o que facilita a flutuação em direção à superfície do concreto durante a mistura.

Nos trabalhos de Lv *et al.* (2019) e Abdelaleem *et al.* (2018) foi relatado que a fluidez, a habilidade de preenchimento e a habilidade passante do concreto diminuiriam à medida que a porcentagem de substituição da areia pelas partículas de borracha aumentou. Essa queda nas propriedades do concreto no estado fresco foi atribuída pelos autores à superfície rugosa e forma irregular das partículas de borracha. Lv *et al.* (2019) observaram que o aumento da porcentagem

de borracha (mantendo o teor de água constante) provocou uma redução da taxa de segregação, ao contrário de Abdelaleem et al. (2018) onde um aumento na porcentagem de borracha de 0% para 30% aumentou quatro vezes o grau de segregação.

Hesami et al. (2016) relataram que a adição de 15 % de borracha, reduziu a resistência à compressão em 29 %, enquanto, para a adição de 5 % houve redução de aproximadamente 13 % na resistência a compressão, em comparação com o concreto sem adição de borracha.

No estudo de Abdelaleem et al. (2018) a resistência à compressão do concreto sem borracha foi de 75,7 MPa. Com 5 % de substituição do agregado por borracha a resistência a compressão caiu para 66,7 MPa (aproximadamente 12 % de redução) e com 15 % de substituição diminuiu para 44,8 MPa (cerca de 40 % de redução).

A redução na resistência à compressão devido a inserção de resíduos de borracha pode ser atribuída à dois fatores:

(a) fraca ligação na zona de transição interfacial (ZTI) entre a pasta de cimento e o resíduo de borracha em comparação com a pasta de cimento e os agregados naturais (ISMAIL, HASSAN, 2016; LV et al. 2019; NAJIM e HALL, 2010; ZAOIAI et al. 2016).

(b) diferença significativa entre o módulo de elasticidade dos agregados de borracha e da pasta de cimento endurecido (ISMAIL, HASSAN, 2016; NAJIM e HALL, 2010).

Além dos fatores citados anteriormente, Ismail e Hassan (2016) verificaram em seu trabalho que o aumento da porcentagem de resíduo de borracha aumentou o teor de ar no concreto o que também pode ter contribuído para diminuição na resistência à compressão.

O tamanho das partículas de borracha também pode influenciar a resistência à compressão. Hilal (2017) verificou que as partículas de borracha grossa são mais prejudiciais sobre a resistência à compressão em comparação com partículas finas. Assim como na resistência a compressão, a adição de resíduo de borracha no concreto tem um efeito negativo no módulo de elasticidade (ABDELALALEEM, ISMAIL e HASSAN, 2018; GUPTA, CHAUDHARY e SHARMA, 2016; HESAMI, SALEHI HIKOUEI e EMADI, 2016; YOUNIS, NAJI e NAJIM, 2017).

No trabalho de Hilal (2017) o módulo de elasticidade estático diminuiu com o aumento do tamanho e do teor de borracha. A redução do módulo de elasticidade do concreto com a adição do resíduo de borracha, segundo Abdelaleem et al. (2018), deve-se à baixa rigidez da borracha em comparação com a areia substituída.

De acordo com Gupta et al. (2016) a redução no módulo de elasticidade estático e dinâmico na substituição parcial do agregado fino por fibra de borracha indica maior

flexibilidade, e segundo os autores, concreto emborrachado pode, portanto, ser usado na construção como absorvedor de ondas de choque de terremoto, base de maquinário, construção de pavimento de rodovias, pistas de aeroportos e barreiras contra colisões.

Com relação à absorção de água, Hesami et al. (2016) verificaram que a adição de resíduo de borracha aumentou a absorção de água. Em seu estudo o aumento na quantidade de borracha de 0 a 15%, aumentou a absorção de água em 26,47%. Os autores associaram esse aumento ao fato de as partículas de borracha apresentarem diferentes formas e estruturas o que gerou alguma porosidade no concreto aumentando a absorção de água.

Zaoiai et al. (2016) observaram que a substituição de 2,5% de areia gerou uma redução na contração do concreto de 15%.

No estudo de Onuaguluchi e Panesar (2014) a resistividade do concreto contendo borracha foi superior à do concreto de referência. A maior resistividade do concreto emborrachado foi atribuída pelos autores à propriedade de isolamento elétrico da borracha fragmentada.

Segundo Lv et al. (2019) devido à boa capacidade de deformação plástica das partículas de borracha, a capacidade de dissipação de energia do concreto seria significativamente melhorada com a incorporação de partículas de borracha.

A incorporação das fibras de borracha ao concreto vem sendo estudada cada vez mais com o desejo de aumentar a resistência à tração do mesmo, pois os resíduos de pneu têm como propriedade principal a alta tenacidade. Além da preocupação em manter suas propriedades mecânicas, existe também a necessidade de que os concretos se tornem mais resistentes às agressões do ambiente, denominando concreto de alto desempenho (LI et al. 2004).

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Neste trabalho propôs-se a produção do CAA verificando a adequação da adição de resíduo de borracha de pneu, com diferentes percentuais e granulometrias, em substituição a areia do concreto, com o objetivo de analisar as propriedades do material produzido no estado fresco e endurecido.

Apresenta-se a seguir uma descrição sucinta do procedimento experimental adotado, o qual foi dividido em cinco etapas:

- Primeira etapa: o procedimento desta etapa, denominado Seleção e Caracterização dos Materiais, foi desenvolvido nos laboratórios do Centro Universitário de Itajubá – FEPI e da Universidade Federal de Itajubá/IRN – UNIFEI. A principal finalidade desta etapa foi estabelecer uma regularidade das características dos materiais constituintes do concreto. Para isto, utilizou-se materiais dos mesmos fornecedores durante todo o processo experimental. Após definido os fornecedores, os materiais foram caracterizados conforme normas vigentes. Nesta etapa também se caracterizou o resíduo de borracha de pneu (RBP).
- Segunda etapa: consistiu na determinação do traço, baseado na metodologia de Gomes, (2002) e Lisbôa, (2004) produção do concreto autoadensável de referência (CAA REF). Utilizando-se dos materiais selecionados e caracterizados, determinou-se, na segunda etapa, um traço de tal forma que o produto final, por meio de ensaios estabelecidos por normas, atendessem aos requisitos que o caracterizassem como concreto autoadensável. Para isso, várias amostras foram produzidas e submetidas a ensaios no estado fresco.
- Terceira etapa: após a determinação do traço do CAA REF, adicionou-se resíduo de borracha de pneu (RBP), substituindo a areia, em volume, em diferentes porcentagens (10%, 30% e 50%) e granulometrias ($d < 0,6 \text{ mm}$ e $4,8 \text{ mm} > d \geq 0,6 \text{ mm}$), assim, novas amostras foram produzidas. Na sequência, realizou-se os mesmos ensaios citados na etapa anterior com o intuito de verificar a influência do resíduo de borracha de pneu nas misturas.
- Quarta etapa: nesta etapa foram produzidos corpos de prova e realizados os ensaios aos 7 e 28 dias no estado endurecido no CAA REF e no CAA com as adições do resíduo de borracha de pneu objetivando avaliar a influência delas nas propriedades estáticas e dinâmicas do concreto.
- Quinta etapa: realizou-se uma análise estatística para avaliar a influência do RBP e do tempo de cura em propriedades do concreto no estado endurecido.

Um resumo das etapas descritas anteriormente está representado pela Figura 3.1.

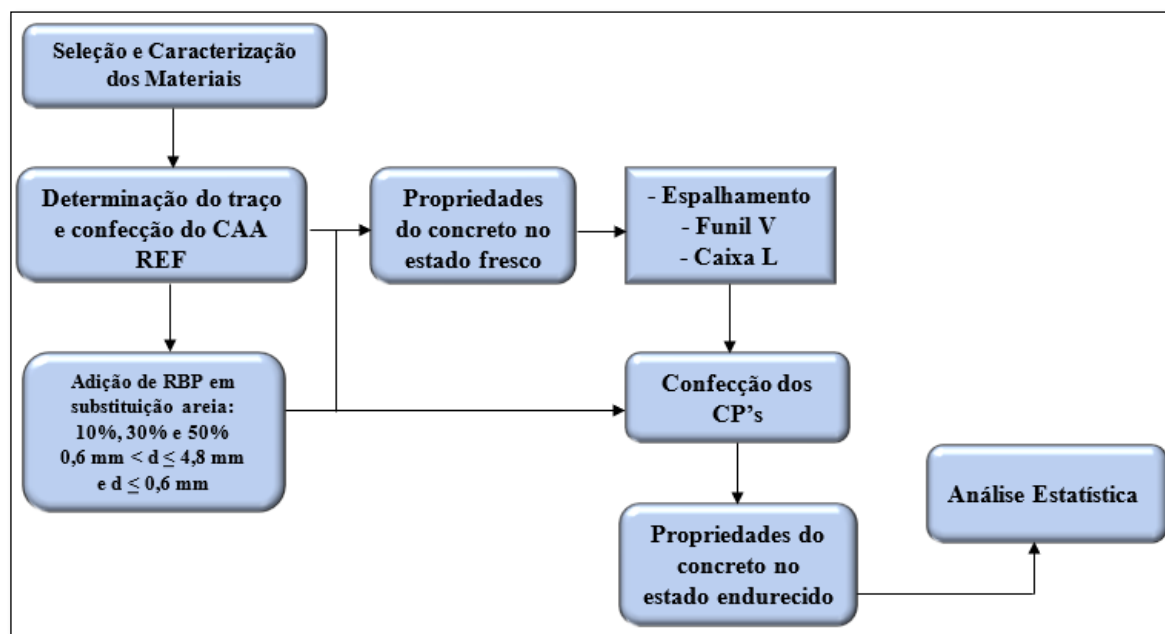


Figura 3.1: Etapas do procedimento experimental (AUTOR, 2020).

3.1 Primeira etapa – Seleção e caracterização dos materiais

Os materiais utilizados para a produção do CAA REF foram: cimento Portland, agregados (miúdo e graúdo), sílica ativa, pó de mármore (RCMG – Resíduo de Corte de Mármore e Granito), aditivo superplastificante (SP) e água. Para a produção do CAA com resíduo de borracha de pneu, utilizou-se os mesmos materiais, porém com adição do resíduo.

Na caracterização dos materiais foram utilizados as informações fornecidas pelos fabricantes para o cimento Portland, a sílica ativa e o aditivo superplastificante. Os agregados miúdo e graúdo, o pó de mármore e o resíduo de borracha de pneu foram caracterizados por meio de ensaios normalizados pela ABNT.

O cimento e suas adições, os agregados e aditivos são caracterizados por meio de ensaios conforme as normas ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) e/ou ASTM (*American Society for Testing and Materials*) e por meio de técnicas de caracterização dos materiais, conforme descritas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Normas para caracterização do cimento e agregados.

Material	Propriedades	ABNT	ASTM
Cimento	Massa específica	NBR 16605:2017	-
	Módulo de finura	NBR 16372:2015	C115-96a:2003
	Início de pega	NBR 16607:2017	C191:2008
	Análise Química	NBR NM 10:2012	C150 / C150M- 12
Adições Cimentantes	Pozolanidade	NBR 12653:2015	C311 e C11b:2011 C 618-08:2008
Agregados graúdos e miúdos	Distribuição granulométrica	NBR 248:2003	C136:2006
	Massa unitária solta e compacta	NBR NM 45:2006	C29C/29M:2007
	Amostragem	NBR 16915:2021	-
	Especificação	NBR 7211:2019	C 33:2007
	Determinação do Teor de argila	NBR 7218:2010	
	Determinação de sais, cloreto e sulfatos	NBR 9917:2009	C 88:2005
	Reatividade álcali -agregado	NBR 15577-1:2018	C 586:2005
Agregados miúdos	Massa específica	NBR NM 52:2009	C128:2007
	Absorção	NBR NM 30:2001	C128:2007
	Umidade	NBR 9775:2011	C 70:2006
	Inchamento	NBR 6467-2:2009	
	Impurezas orgânicas	NBR NM 49:2001	C 40:2004
Agregados graúdos	Massa específica e Absorção	NBR NM 53:2009	C127:2007
Aditivos	Requisitos	NBR 11768-1:2019	C494:2008

Fonte: Adaptado de (NEVILLE; BROOKS, 2010).

3.1.1 Cimento

Foi utilizado o cimento Portland CP V-ARI, aglomerante hidráulico de alta resistência inicial e elevada finura o que favorece a produção de misturas mais fluidas (menor tensão de escoamento) e coesas.

As características físicas, mecânicas e químicas do cimento Portland CP V-ARI, utilizado nesta pesquisa, foram fornecidas pelo fabricante e estão apresentadas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Características físicas, mecânicas e químicas do cimento

Características	
Massa Específica	2,8 a 3,2 g/cm ³
Massa Específica Aparente	0,9 a 1,2 g/cm ³
Área Específica	507 m ² /kg
pH em solução aquosa	12 a 14
Cor	Cinza
Início de pega	113 min
Fim de pega	148 min
Resistência aos 7 dias	47,9 MPa
Resistência aos 28 dias	53,7 MPa

3.1.2 Agregados

O agregado miúdo utilizado foi a areia natural média, de origem quartzosa, por possuir formato mais arredondado e textura lisa, a fim de reduzir a probabilidade de vazios. Como agregado graúdo utilizou-se a brita zero de origem granítica, já que a mesma possui dimensão máxima característica de 9,5 mm, o que permite melhor fluidez da mistura. Ambos os agregados foram procedentes da região do Sul de Minas Gerais, obtidos no comércio local.

A Tabela 3.3 apresenta os ensaios realizados para caracterização dos agregados miúdo e graúdo.

Tabela 3.3: Ensaios realizados para caracterização dos agregados miúdos e graúdos

Componentes	Ensaio	Normas ABNT	Local
Agregado miúdo (Areia natural média)	Distribuição Granulométrica	NBR NM 248/2003	Laboratório de Estruturas da UNIFEI
	Massa específica	NBR NM 52/2009	
	Absorção	NBR NM 30/2000	
	Massa unitária solta	NBR NM 45/2006	
Agregado graúdo (Brita zero)	Distribuição Granulométrica	NBR NM 248/2003	Laboratório de Materiais de Construção da FEPI
	Massa específica	NBR NM 53/2009	
	Absorção	NBR NM 53/2009	
	Massa unitária solta	NBR NM 45/2006	

Fonte: (AUTOR, 2020).

3.1.3 Adições minerais

Segundo a EFNARC (2005), adições são comumente utilizadas para melhorar e manter a resistência à coesão e segregação do CAA. A adição também regulará o teor de cimento, a fim de reduzir o calor de hidratação e encolhimento térmico.

As adições são classificadas de acordo com suas capacidades reativas com a água, conforme a Tabela 3.4.

Tabela 3.4: Classificação das adições

Tipo I	Inertes ou Semi-inertes	Fílleres de agregados
		(calcários, dolomíticos ou graníticos)
Tipo II	Pozolânicas	Cinza volante, conforme a EN 450-1
		Sílica ativa, conforme a EN 13263-1
	Hidráulicas	Escória de alto-forno

Fonte: Adaptado de (EFNARC, 2005).

Dentre as adições minerais acima apresentadas optou-se, neste trabalho, pela sílica ativa (Tipo II) e pelo pó de mármore (Tipo I), visando propiciar determinada quantidade de finos que promovesse a viscosidade e coesão exigidas ao CAA no estado fresco.

3.1.3.1 Sílica Ativa

A sílica ativa foi escolhida pelo fato de proporcionar maior fluidez e durabilidade ao concreto. Além disso, segundo Mehta e Monteiro (2014), por se tratar de um produto pozolânico, a sílica ativa auxilia a redução da quantidade de cimento na confecção de concreto o que ajuda um projeto a tornar-se ecologicamente correto.

Conforme informações da empresa que comercializa o produto, as partículas de sílica ativa são esféricas, vítreas e possuem um diâmetro médio menor do que $1\mu\text{m}$ o que lhe confere melhor desempenho em concretos e argamassas tanto no estado fresco quanto no endurecido. A sílica ativa utilizada nesta pesquisa foi utilizada como adição mineral em substituição parcial do cimento. Na Tabela 3.5 estão apresentadas as características da sílica utilizada, conforme dados da empresa fornecedora.

Tabela 3.5: Características físicas e químicas da sílica ativa

Características	
Teor de SiO ₂	> 85%
Superfície Específica	20.000 m ² /kg
Formato da Partícula	Esférico
Massa Específica	2,20 kg/dm ³

Fonte: Adaptado de (TECNOSIL, 2019).

3.1.3.2 Pó de mármore e de granito

Com a finalidade de proporcionar concretos de melhor desempenho, tanto no estado fresco, relacionado à trabalhabilidade, como endurecido, relacionado à resistência, adicionou-se ao concreto *filler* de mármore e granito (RCMG – Resíduo de Corte de Mármore e Granito). Este material, foi obtido pela secagem (estufa a 105°C durante 24 horas) da lama resultante do corte de mármore e granitos em comércio local. Após secagem, utilizou-se o material passante na peneira 1,2 mm e pelo método do frasco de *Le Chatelier*, (NBR 16605, 2017), obteve-se a massa específica do material igual a 2,83 g/cm³. A Tabela 3.6 apresenta os ensaios realizados para caracterização deste material.

Tabela 3.6: Ensaios realizados para caracterização filler de mármore e granito

Componente	Ensaios	Equipamento/ Norma ABNT	Local
RCMG	Granulometria a laser	Microtrac, S3500	Laboratório de caracterização estrutural (LCE) da UNIFEI
	Massa específica	NBR 6474 - NM 23	

Fonte: (AUTOR, 2020).

3.1.4 Aditivo superplastificante

É um aditivo de alta tecnologia, formulado a base de polímeros de éteres carboxílicos modificados, que agem sobre as partículas de cimento apresentando um altíssimo efeito dispersante, de onde se obtém concretos altamente fluidos com uma relação água/cimento extremamente baixa, longa manutenção e elevadas resistências mecânicas iniciais e finais.

É compatível com todos os tipos de cimento Portland e é especialmente indicado para a fabricação de concretos autoadensáveis, pré-moldados, protendidos, CAD (concreto de alto desempenho), microconcreto, fabricação de artefatos de cimento, concretagem de peças esbeltas e de difícil acesso ou com alta densidade de ferragens.

As propriedades físicas e químicas do superplastificante utilizado nos experimentos, estão apresentados na Tabela 3.7.

Tabela 3.7: Características físicas e químicas do superplastificante ADI-SUPER H25

Características do ADI-SUPER H25	
Estado físico	Líquido
Cor	Castanho claro
Odor	Ligeiramente característico
pH	5,50 + 1,00
Massa específica	1,055 + 0,02 (g/cm ³)
Teor de voláteis	75,00 (% p/p)
Solubilidade	Totalmente solúvel em água

Fonte: Adaptado de (ADITIBRAS, 2017).

3.1.5 Água

A água utilizada para a produção dos concretos foi proveniente do sistema de abastecimento público, tratada e distribuída pela Companhia de Saneamento - COPASA Minas Gerais, cujas características atendem a (NBR 6118, 2014).

3.1.6 Resíduos de borracha de pneus inservíveis (RBP)

Nesta pesquisa utilizou-se o resíduo de borracha de pneus provenientes da indústria de recauchutagem de pneus usados obtidos por processo de raspagem mecânica. A massa específica do material foi determinada conforme (NM 52, 2009). Pelo fato de a massa específica do resíduo de borracha de pneu ser baixa e inferior à da água, o líquido utilizado no ensaio para determinação da massa específica foi o álcool Anidro 99.5 INPM.

Para determinar a distribuição granulométrica do RBP, utilizou-se as mesmas diretrizes do agregado miúdo, ou seja, a (NBR 248, 2003).

Nesta pesquisa, utilizou-se duas granulometrias do RBP: o material passante na peneira 0,6 mm (Granulometria 1 – G1); e o material passante na peneira 4,8 mm e retido na peneira 0,6 mm (Granulometria 2 – G2).

3.2 Segunda etapa – Determinação do traço e produção do concreto autoadensável de referência

3.2.1 Dosagem do concreto autoadensável de referência (CAA REF)

O CAA REF é a sigla dada ao concreto confeccionado sem nenhum tipo de resíduo.

O método de dosagem adotado neste trabalho para produção do CAA REF foi baseado nas diretrizes proposta por Gomes (2002), descrito no item 2.2.3, verificando-se sua validade por meio das propriedades físicas e mecânicas do concreto.

Esta metodologia propõe a obtenção de CAA de alta resistência à compressão (acima de 40 MPa aos 28 dias) através da otimização da composição da pasta (cimento, água e superplastificantes) e do esqueleto granular em separado, para posteriormente realizar a mistura desses dois elementos através da definição do volume ideal de pasta.

Assim, embora o Método de Gomes contemple apenas o ensaio da pasta e do esqueleto granular, optou-se nesta pesquisa em realizar também o ensaio de argamassa como parte do procedimento de dosagem para obtenção do CAA.

A seguir, serão descritos os ensaios realizados para caracterização da pasta e da argamassa assim como a descrição da metodologia utilizada para determinar o esqueleto granular da mistura.

3.2.1.1 Obtenção da composição da pasta

Para o estudo de comportamento de fluxo da pasta foram realizados os ensaios de *Cone de Marsh* e o *Mini-Slump*, que serão descritos a seguir:

Cone de Marsh:

De acordo com a (NBR 7682, 1983), para a realização do ensaio foi utilizado um cone de *Marsh*, apresentado pela Figura 3.2, com abertura de saída de 8 mm de diâmetro. O procedimento consistiu no preenchimento do cone com um volume de um litro de pasta, marcando-se o tempo (T) necessário para o escoamento de 500 ml dessa pasta constituída por cimento, água e superplastificante, pela abertura de saída do cone. O volume de pasta que escoou pelo funil foi medido em um recipiente graduado, e os tempos foram determinados através de um cronômetro digital.



Figura 3.2: Cone de Marsh para determinação do ponto de saturação do superplastificante (Fonte: AUTOR, 2020).

O ensaio com o Cone de *Marsh* realizado nesse trabalho seguiu a metodologia citada por Gomes e Barros (2009) com superplastificante variando entre 0,8 % e 1,2 % em relação à massa do cimento, conforme indicação do fabricante.

Mini-slump:

No ensaio de *Mini-Slump*, um molde cônico ou cilíndrico é preenchido com a pasta, e em seguida, é levantado verticalmente a uma velocidade constante, deixando a pasta se espalhar livremente em uma base. Mede-se então o diâmetro final do material espalhado, como medida alternativa para estimativa das tensões de cisalhamento da amostra (SCHEEREN et al. 2017).

Para o ensaio realizado neste trabalho, seguindo a metodologia descrita por Gomes e Barros (2009), foi utilizado um mini cone de Kantro em acrílico, posicionado sobre uma superfície de vidro centralizada sobre papel milimetrado, mostrado pela Figura 3.3.

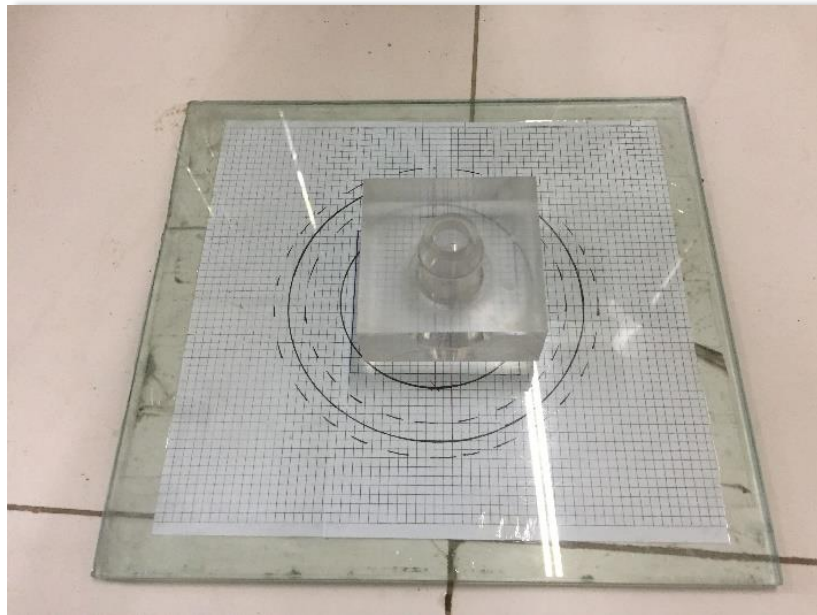


Figura 3.3: Mini-cone de Kantro (mini slump) (Fonte: AUTOR, 2020).

Os ensaios da pasta com o Cone de *Marsh* e o *Mini-Slump* permitem obter as respectivas relações de sp/c e f/c , que geram misturas de concreto com fluidez máxima, sem segregação e com alto nível de coesão interna, coesão essa, que não prejudique significativamente a fluidez do material (CAVALCANTI, 2006).

Segundo Okamura et al. (2000), para atender as propriedades de fluidez e viscosidade do CAA é importante determinar a dosagem de superplastificantes e a relação água/materiais finos, em argamassa.

Para isto, atendendo o Método de Okamura, realizou-se dois ensaios de argamassa: cone de consistência e Funil V, conforme descritos na sequência.

3.2.1.2 Obtenção da composição da argamassa

- Cone de Consistência (mini tronco de cone) e Funil V:
Os parâmetros que definem a fluidez e a viscosidade da argamassa são:

$$G_m = \frac{(d_1 \times d_2 - d_0^2)}{d_0} \quad \text{Equação 1}$$

$$R_m = \frac{10}{t} \quad \text{Equação 2}$$

G_m é medido através do ensaio do tronco de cone de consistência e determinado medindo duas medidas perpendiculares do diâmetro de espalhamento, sendo d_1 e d_2 os diâmetros de espalhamento da argamassa e d_0 é o diâmetro da base do cone igual a 100 mm.

R_m é medido através do ensaio no mini funil V para argamassa e determinado medindo o tempo que a argamassa leva para fluir pelo funil, sendo t em segundos.

Ambos os ensaios estão apresentados pela Figura 3.4.



Figura 3.4: Cone de Consistência (mini tronco de cone) e Mini Funil V (Fonte: AUTOR, 2020).

Alto valor de G_m indica maior deformabilidade, e menor valor de R_m indica maior viscosidade. Argamassas com valores de $G_m = 5$ e $R_m = 1$ são consideradas bem aceitáveis para obter concretos com propriedades autoadensáveis, conforme Takada et al. (2000).

Gomes (2003) sugere $G_m > 8$, correspondentes a diâmetros de espalhamento > 300 mm; e R_m de 1 a 5, correspondentes a tempos de fluxo (t) de 2 s a 10 s. Já Edamatsu et al. (1999) encontraram valores de G_m entre 3 e 7, correspondentes a diâmetros de espalhamento da argamassa de 200 mm a 283 mm, e de R_m entre 1 e 2, correspondentes aos tempos de fluxo de 5 s a 10 s, para as argamassas utilizadas no CAA. Neste trabalho, adotou-se os critérios segundo (GOMES, 2003).

3.2.1.3 Determinação do esqueleto granular

De acordo com Klein et al. (2017), os materiais compósitos empregados na construção civil são compostos por partículas de diferentes formas e tamanhos. Entre estes, podem-se citar os concretos e argamassas, formados por grãos de dimensões milimétricas, micrométricas e, em alguns casos, inclusive nanométricas. Além disso, os grãos podem apresentar forma bastante esférica, como é o caso da sílica ativa, ou grãos mais angulosos e, em alguns casos, alongados, como ocorre com alguns agregados de britagem.

Toda essa variedade de grãos deve ser combinada de modo a ocupar o maior volume possível, para que o índice de vazios destes materiais seja sempre reduzido, favorecendo a resistência mecânica e durabilidade do material final.

Em concretos e argamassas, a pasta de cimento preenche os espaços vazios entre os agregados, conectando esses grãos no estado endurecido, garantindo assim a integridade e propriedades mecânicas do material. Dentre os componentes do concreto, o cimento é o mais oneroso e resulta em maior impacto ao meio ambiente pela elevada emissão de CO₂ durante seu processo de produção.

Uma forma de reduzir o consumo de cimento está atrelada a obter um esqueleto granular compacto, que apresente máxima densidade de empacotamento do agregado. Isso colabora para a redução do volume de pasta de cimento necessária para preencher os vazios existentes no esqueleto granular.

Assim, para se obter esqueletos granulares compactos é necessário fazer o uso de modelos de empacotamento de partículas que permitam estabelecer a proporção e tamanho adequados dos agregados, de modo a obter um conjunto com um baixo índice de vazios.

Diversos são os modelos existentes, cada qual considerando efeitos geométricos e de interação entre grãos, resultando em diferentes valores de densidades de empacotamento. Esta densidade é definida como o volume de sólidos em uma unidade de volume total e, estando associada ao índice de vazios, é de extrema relevância no estudo do empacotamento de agregados para a produção de concretos e argamassas. A densidade de empacotamento é influenciada pelas características dos agregados, como distribuição granulométrica e morfologia das partículas. A forma dos grãos influencia na acomodação das partículas, uma em relação às outras. Quanto mais distante da forma esférica os grãos se apresentarem, maior será o espaço vazio entre as partículas, resultando na diminuição da densidade de empacotamento.

Para auxiliar na otimização do esqueleto granular, utilizou-se neste trabalho, o software EMMA (*Elkem Materials Mixture Analyzer*), disponibilizado pelo *Elkem Materials*, no qual a

dosagem foi realizada a partir do modelo de *Andreassen* modificado, o qual considera o melhor empacotamento de agregados para a dosagem de concretos.

Segundo Vanderlei (2004), para obter a formulação de um concreto que favorece o empacotamento máximo, o autor definiu que o coeficiente de empacotamento deve ter um valor igual ou menor que 0,37 para não haver porosidade residual. Assim, essas verificações foram feitas por meio de simulações computacionais e o valor utilizado neste trabalho foi de 0,25 mais indicado para CAA, conforme (CASTRO e PANDOLFELLI, 2009).

3.2.1.4 Confeção do concreto autoadensável referência

A dosagem do CAA REF, foi feita a partir da mistura entre o esqueleto granular e a pasta otimizada. Foram produzidos 20 litros de concreto de acordo com o procedimento de mistura, relacionado a seguir:

- Adicionar na betoneira o agregado miúdo, o cimento, a sílica ativa, o pó de mármore e misturar por cerca de três minutos;
- Adicionar parte da água (2/3) e misturar por mais três minutos;
- Em seguida, adicionar o restante da água com superplastificante e misturar por cerca de três minutos;
- Finalmente, adicionar e misturar o agregado graúdo por mais quatro minutos.

A ordem dos materiais adicionados na betoneira foi definida para combinar os materiais na mistura dos concretos.

Para confecção das misturas, utilizou-se das instalações do Laboratório de Estruturas da Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI, por meio do uso da betoneira de eixo inclinado com capacidade para 145 litros da marca CSM[®].

A avaliação do concreto autoadensável referência foi realizada por meio de ensaios da mistura no estado fresco, conforme descritos a seguir.

3.2.2 Ensaios do concreto autoadensável de referência no estado fresco

Para analisar as características do CAA REF no estado fresco, foram realizados os seguintes ensaios:

3.2.2.1 Massa Específica, Rendimento e Teor de ar pelo Método Gravimétrico

Baseado na norma NBR 9833 (2009), massa específica é a massa da unidade de volume do concreto fresco adensado, incluindo o volume de ar aprisionado e incorporado; rendimento

é o volume resultante da mistura fresca adensada; e teor de ar é o volume incorporado ao concreto fresco, expresso como percentagem do volume total do concreto adensado.

Inicialmente registrou-se a massa de um cilindro metálico vazio (\emptyset 10 cm e altura 20 cm). Em seguida, o cilindro foi totalmente preenchido de concreto e anotou-se a massa total.

De acordo com a NBR 9833 (2009), a massa específica, o rendimento, o índice de ar e o teor de ar foram calculados pelas Equações 3, 4, 5 e 6 respectivamente.

$$\rho_{ap} = \frac{m}{(V \times 1000)} \quad \text{Equação 3}$$

$$R = \frac{(mc + mf + mg + ma)}{\rho_{ap}} \quad \text{Equação 4}$$

$$Ia = \frac{R}{Vt} \quad \text{Equação 5}$$

$$A = \left(1 - \frac{1}{Ia}\right) \times 100 \quad \text{Equação 6}$$

Sendo:

- ρ_{ap} : massa específica aparente do concreto (kg/m^3);
- m: massa de concreto (kg);
- V: volume do cilindro (dm^3);
- R: rendimento (m^3);
- mc: massa de cimento da betonada (kg);
- mf: massa total de agregado miúdo da betonada (kg);
- mg: massa total de agregado graúdo da betonada (kg);
- ma: massa total de água adicionada na betonada (kg);
- Ia: Índice de ar presente na mistura (%);
- Vt: volume total dos componentes da betonada (m^3);
- A: teor de ar do concreto (%).

3.2.2.2 Cone de Abrams, Funil V e Caixa L

Cone de Abrams: o ensaio de espalhamento foi realizado pelo método do cone de Abrams (*slump flow test*) a fim de medir o espalhamento (SF) do concreto. Por esse método, baseado na NBR 15823 (2017), também foi possível verificar, através da estabilidade visual, a

presença ou não dos fenômenos de exsudação e/ou segregação dos agregados. Simultaneamente a este ensaio, determinou-se também o T₅₀₀. Os equipamentos necessários para realização desse ensaio foram:

- Cone de Abrams, com diâmetro superior de 100 mm e inferior de 200 mm, com altura de 300 mm;
- Uma placa metálica reta, lisa e de material sólido que não solte material, com dimensões de, no mínimo, 90 cm de lado;
- Uma trena ou uma régua de, no mínimo, 100 cm;
- Um cronômetro.

Para eficácia do ensaio, adotou-se o seguinte procedimento, normatizado pela (NBR 15823-2, 2017).

Posicionou-se a base do cone no centro da placa quadrada, a qual estava nivelada, onde são feitas duas marcações circulares: uma com 200 mm (base do cone) e outra com 500 mm, mostrado pela Figura 3.5. O cone, limpo e umedecido, foi fixado pelas suas alças, pelas mãos do operador. A amostra de concreto foi inserida dentro do cone sem adensamento, e de maneira contínua e uniforme. O concreto excedente no topo do cone e resíduos da base foram retirados. Após esse procedimento inicial, o cone foi retirado cuidadosamente, na direção vertical, em um único movimento. Assim que iniciado esse movimento, o cronômetro foi acionado. Quando o espalhamento do concreto atingiu a marca de 500 mm, o cronômetro foi parado, e registrou-se o tempo (T₅₀₀). Ao final do espalhamento, com uma trena, foram medidos dois diâmetros perpendiculares, em milímetros, do círculo formado pela massa de concreto. Com esses dados calculou-se a média aritmética, resultado que é denominado como espalhamento do concreto (SF).



Figura 3.5: Cone de Abrams (Fonte: AUTOR, 2020).

Ensaio de funil V: para determinação da viscosidade plástica aparente sob fluxo confinado (VF). Descrito com mais detalhes no item 2.3.1.2, este ensaio foi realizado segundo a NBR 15823-5 (2017) a qual classifica o concreto como VF1 quando o tempo total para o concreto escoar no interior do funil V for menor ou igual a 8 s. Se o tempo para este escoamento estiver no intervalo entre 9 s e 25 s, o concreto é classificado como VF2. Para o primeiro caso, o concreto é indicado para aplicação em elementos estruturais com alta densidade de armadura e para o segundo caso, na maioria das aplicações correntes.

Os equipamentos necessários para realização do ensaio foram:

- Funil em forma de V, com as dimensões conforme Figura 3.6;
- Um recipiente com capacidade de, no mínimo 12 L;
- Uma concha metálica;
- Um cronômetro.

Para a realização deste ensaio, o funil foi posicionado em uma superfície plana, rígida e horizontal, e em seguida preenchido completamente com a amostra de CAA, sem qualquer adensamento e interrupção. Um recipiente foi colocado sob o funil para coletar o concreto. Após removido o excesso de concreto do topo do funil, abriu-se a porta de saída do mesmo. Nesse ato acionou-se o cronômetro e registrou-se o tempo desde a abertura até o momento em que o funil ficou totalmente esvaziado. Esse tempo é denominado como tempo para escoamento completo do concreto.



Figura 3.6: Funil V (Fonte: AUTOR, 2020)

Ensaio de caixa L: para determinação da habilidade passante (PL). Esse ensaio, foi baseado na NBR 15823-4 (2017). Com a comporta fechada, o concreto foi depositado na câmara vertical da caixa, sem adensamento e de maneira uniforme. Na sequência, a comporta foi aberta e o concreto fluiu do local de origem até a seção horizontal do equipamento. Quando o concreto cessou seu movimento, foram registradas as alturas H_1 e H_2 (início e final do trecho horizontal da caixa) e assim a habilidade passante (HP) foi calculada (H_2/H_1).

Para executar esse ensaio, foram necessários os seguintes equipamentos:

- Uma caixa em forma de L, conforme Figura 3.7;
- Um recipiente com volume, de no mínimo, 14 L;
- Uma trena ou régua, de no mínimo, 1.000 mm;
- Um cronômetro.



Figura 3.7: Caixa L (Fonte: AUTOR, 2020).

3.3 Terceira etapa – Adição do resíduo de borracha de pneu ao concreto autoadensável de referência

3.3.1 Dosagem do concreto autoadensável com adição do resíduo de borracha de pneu

A partir do traço do CAA REF, descrito na 2ª etapa, substituiu-se parcialmente a areia natural em volume pelo RBP, nas proporções e granulometrias conforme Tabela 3.8. A granulometria G1 é aquela cujos grãos estão compreendidos entre 0,6 mm e 4,8 mm e a granulometria G2 é aquela cujos grãos são menores que 0,6 mm. A Figura 3.8 mostra as duas granulometrias (G1 e G2) do RBP utilizadas nos ensaios.

Tabela 3.8: Proporções e Granulometrias do RBP

	Porcentagem de RBP	Granulometria de RBP
TRAÇO 1	10%	$G1 < 0,6\text{mm}$
TRAÇO 2		$4,8\text{mm} > G2 \geq 0,6\text{mm}$
TRAÇO 3	30%	$G1 < 0,6\text{mm}$
TRAÇO 4		$4,8\text{mm} > G2 \geq 0,6\text{mm}$
TRAÇO 5	50%	$G1 < 0,6\text{mm}$
TRAÇO 6		$4,8\text{mm} > G2 \geq 0,6\text{mm}$

Fonte: AUTOR, 2020.

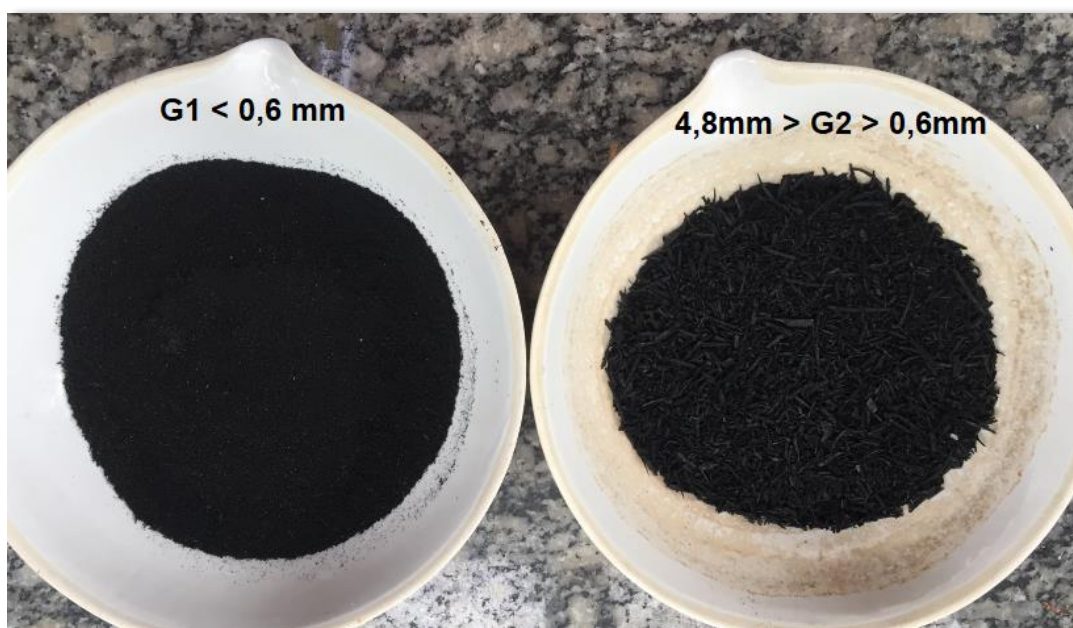


Figura 3.8: Granulometrias do RBP (Fonte: AUTOR, 2020).

3.3.2 Ensaios do concreto autoadensável com adição do resíduo de borracha de pneu no estado fresco

Para o concreto com adição de RBP no estado fresco, foram realizados os mesmos ensaios do CAA REF, conforme descritos no item 3.2.2 - Ensaios do concreto autoadensável de referência no estado fresco.

3.4 Quarta etapa – Confecção dos corpos de prova e realização dos ensaios no estado endurecido.

3.4.1 Confeção dos corpos de prova

Os corpos de prova foram confeccionados de acordo com a NBR 5738 (2018), utilizando cilindros metálicos com 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura untados com óleo mineral, conforme Figura 3.9. De acordo com as prescrições da norma mencionada, os corpos de prova, após a moldagem e desforma, foram submetidos ao processo de cura dentro da câmara úmida, mostrada pela Figura 3.10, até atingir as idades dos ensaios (7 e 28 dias).



Figura 3.9: Cilindros Metálicos (Fonte: AUTOR, 2020).



Figura 3.10: Câmara Úmida (Fonte: AUTOR, 2020).

3.4.2 Ensaios do concreto no estado endurecido

Neste trabalho, os concretos no estado endurecido foram submetidos aos ensaios relacionados na Tabela 3.9 juntamente com as respectivas normas vigentes, quantidade de corpos de prova e a idade de realização de cada ensaio. A realização desses ensaios objetivou-se na caracterização estrutural estática e dinâmica dos concretos.

Tabela 3.9: Ensaios realizados no CAA REF e nos CAA RBP no estado endurecido

Ensaio	Normas	Nº Corpos de Prova Ø 10 x 20 cm				Idade dos Ensaio	Tipo (*)
		CAA REF	CAA RBP 10	CAA RBP 30	CAA RBP 50		
Resistência à Compressão Axial	NBR 5739/2018	8	16	16	16	7 e 28 dias	D
Módulo de Elasticidade Dinâmico	ASTM 1876-01	6	12	12	12	7 e 28 dias	ND
Absorção de Água, Índice Vazios e Massa Específica	NBR 9778/2012	6	12	12	12	7 e 28 dias	ND
Dureza pelo Esclerômetro	NBR 7584/2012	8	16	16	16	7 e 28 dias	ND
Frequência Natural/Fator de Amortecimento		6	12	12	12	7 e 28 dias	ND

Fonte: (AUTOR, 2020).

Tipo (*): D: Destrutivo; ND: Não destrutivo.

A seguir, serão descritos os ensaios conforme relacionados na Tabela 3.9.

3.4.2.1 Resistência à Compressão Axial

O ensaio de compressão foi realizado de acordo com a NBR 5739:2018 a qual especifica que corpos de prova cilíndricos de concreto, devem ser moldados de acordo com a NBR 5738:2015 versão corrigida 2016. Segundo as prescrições das normas mencionadas, o corpo de prova, após a moldagem e desforma, deve ser submetido ao processo de cura dentro da câmara úmida até atingir as idades do ensaio (7 e 28 dias). Após sua regularização (capeamento), mostrada pela Figura 3.11, é iniciado o ensaio, o qual se prolonga até haver a ruptura da peça.



Figura 3.11: Corpos de prova com capeamento à base de enxofre (Fonte: AUTOR, 2020).

O ensaio foi realizado nos corpos de prova de CAA com e sem adição de RBP. Foram ensaiados quatro corpos de prova cilíndricos de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura para cada traço de concreto desenvolvido.

Para a realização dos ensaios utilizou-se uma máquina modelo WAW-1000 marca TIME *Testing Machines*, com capacidade de carga de 1000 toneladas, conforme Figura 3.12, instalada no Laboratório de Estruturas da Universidade Federal de Itajubá.



Figura 3.12: Máquina Universal de ensaio à compressão (Fonte: AUTOR, 2020).

3.4.2.2 *Módulo de Elasticidade Dinâmico*

Para a realização deste ensaio não destrutivo, foram utilizados três corpos de prova cilíndricos 10 cm x 20 cm, de cada traço aos 7 e 28 dias.

Baseado na ASTM E1876 (2015) os corpos de prova foram submetidos à Técnica de Excitação por Impulso (TEI). Inicialmente, registrou-se os comprimentos, diâmetros e as massas dos corpos de prova que, na sequência, foram apoiados sobre um suporte ajustável, Figura 3.13. Em seguida, por meio de um impulsor manual, cada corpo de prova recebeu leves batidas provocando respostas acústicas as quais foram detectadas por um captador acústico. Estas respostas acústicas foram processadas pelo software *Sonelastic*[®] versão 3.0 para o cálculo dos módulos de elasticidade e do amortecimento de cada corpo de prova.

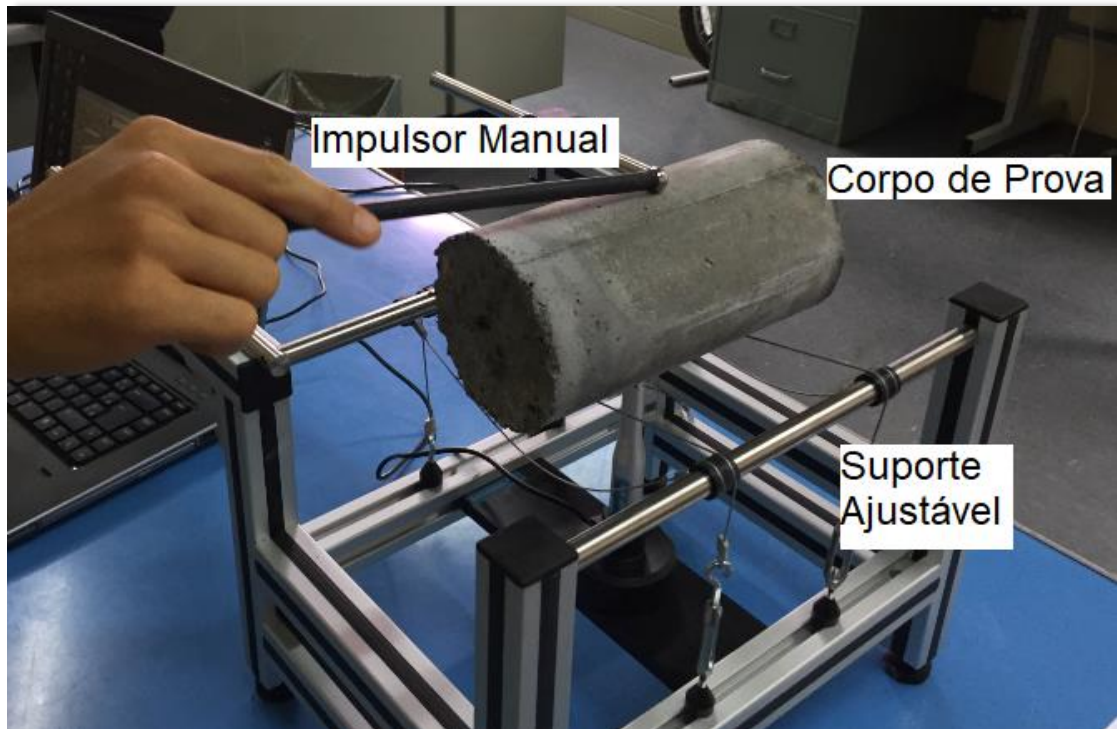


Figura 3.13: Suporte ajustável para o ensaio do Módulo de Elasticidade Dinâmico (Fonte: AUTOR, 2020).

3.4.2.3 Absorção de Água, Índice de Vazios e Massa Específica

Para determinação da absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica foi empregada a norma ABNT NBR 9778 (2012), para concretos com 30 dias de idade.

Utilizou-se corpos de prova cilíndricos com 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura. Para cada traço de concreto desenvolvido, foram ensaiados três corpos de prova os quais inicialmente foram submetidos em estufa a uma temperatura de 105°C por 72 horas. Na sequência, os corpos de prova foram resfriados no dessecador, conforme Figura 3.14, até atingirem uma temperatura próxima de 23°C. Em seguida, foram pesados em balança obtendo-se assim a massa do corpo de prova seco (m_s).



Figura 3.14: Dessecador (Fonte: AUTOR, 2020).

Para obtenção da massa do corpo de prova saturado, os corpos de prova foram imersos em água por um período de 72 horas e depois pesados em balança hidrostática (m_i), conforme Figura 3.15. Finalmente, com um pano úmido, eliminou-se o excesso de água dos corpos de prova e realizou-se a pesagem deles obtendo-se assim a massa saturada (m_{sat}).

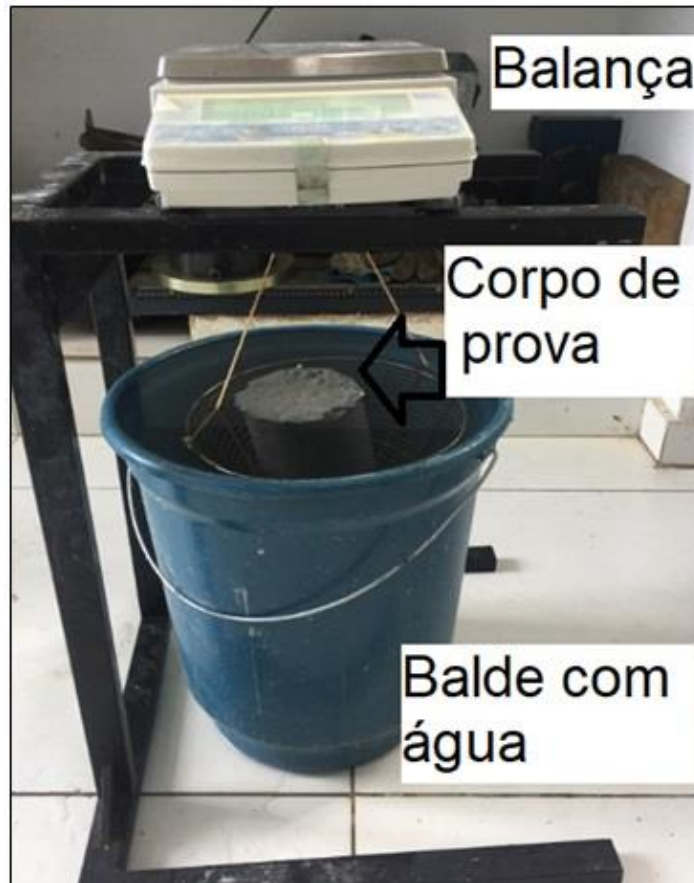


Figura 3.15: Ensaio absorção por imersão (Fonte: AUTOR, 2020).

A Equação 7 foi utilizada para o cálculo da absorção de água por imersão:

$$\text{Absorção} = \left(\frac{m_{\text{sat}} - m_s}{m_s} \right) \times 100 \quad \text{Equação 7}$$

Sendo:

- m_{sat} : é a massa do corpo de prova saturado
- m_s : é a massa do corpo de prova seco.

O índice de vazios foi calculado conforme a Equação 8:

$$\text{Índice de vazios} = \left(\frac{m_{\text{sat}} - m_s}{m_{\text{sat}} - m_i} \right) \times 100 \quad \text{Equação 8}$$

Sendo:

- m_i : é a massa do corpo de prova saturado imerso em água.

A massa específica da amostra seca e a massa específica da amostra saturada foram calculadas segundo as Equação 9 e Equação 10, respectivamente.

$$Massa\ seca = \frac{ms}{(msat - mi)} \quad \text{Equação 9}$$

$$Massa\ específica\ saturada = \frac{msat}{(msat - mi)} \quad \text{Equação 10}$$

A balança utilizada para medição dos pesos das amostras foi da marca Shimadzu, modelo UX6200H, com precisão de três casas decimais. A estufa utilizada para secagem dos corpos-de-prova foi da marca *Ethiktechnology*.

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Estruturas da UNIFEI.

3.4.2.4 Dureza Superficial pelo Esclerômetro de Reflexão

A dureza do CAA foi avaliada de acordo com a ABNT NBR 7584 (2012). A norma prescreve um método não-destrutivo para avaliação da dureza superficial do concreto endurecido pelo uso de um esclerômetro de reflexão. Segundo a norma, quanto maior a dureza da superfície ensaiada menor a parcela da energia que se converte em deformação permanente e, por conseguinte, maior deve ser o recuo ou a reflexão do martelo.

O índice esclerométrico (IEe) é o valor obtido através do impacto do esclerômetro sobre uma área de ensaio, fornecido diretamente pelo aparelho correspondente ao número de recuo do martelo. Calcula-se este índice pelo produto do coeficiente de correção do índice esclerométrico e da média aritmética (IE) de nove valores individuais dos índices esclerométricos, conforme Equação 11.

$$IEe = K \times IE \quad \text{Equação 11}$$

Sendo:

- IEe: Índice esclerométrico médio efetivo;
- K: Coeficiente de correção do índice esclerométrico, obtido quando da aferição do aparelho;
- IE: índice esclerométrico médio.

Conforme determina a norma, o equipamento foi calibrado e assim obteve-se o coeficiente de correção do índice esclerométrico (K) com valor de 1,278.

Neste trabalho, utilizou-se o esclerômetro tipo 58-C0181/N da marca *Controls*, do Laboratório de Estruturas da Universidade Federal de Itajubá, mostrado na Figura 3.16. Os ensaios foram realizados aos 7 e 28 dias da concretagem em quatro corpos de prova, para cada traço de concreto desenvolvido. Foram realizadas nove medidas em pontos distribuídos e

marcados uniformemente (distância de 50 mm a partir do centro) sobre a face de cada corpo de prova.



Figura 3.16: Ensaio com Esclerômetro (Fonte: AUTOR, 2020).

3.4.2.5 *Frequência Natural e Fator de Amortecimento*

De acordo com Rao (2018, p.92), “se um sistema, após uma perturbação inicial, for deixado vibrar sozinho, a frequência com que oscila sem forças externas é conhecida como frequência natural”.

A frequência natural é uma característica própria do sistema, e depende apenas da sua massa e da rigidez, conforme Equação 12.

$$\omega = \sqrt{\left(\frac{k}{m}\right)} \quad \text{Equação 12}$$

Sendo:

ω = frequência natural (rad/s);

k = rigidez (N/m);

m = massa (kg).

A Equação 12 vale apenas para sistemas simples com um grau de liberdade, onde a massa e a rigidez são conhecidas.

De acordo com *The Fundamentals of Modal Testing* o amortecimento ocorrerá sempre que houver dissipação de energia num sistema submetido a vibração. Na vibração natural, o amortecimento ocorre como consequência da perda de energia do sistema como resultado da redução da amplitude do movimento.

Nesta pesquisa, os corpos de prova foram submetidos a vibrações livres onde a perda de energia é equilibrada pela energia fornecida pela excitação. Em ambas as situações, o amortecimento implica em remover a energia do sistema.

Um sistema estrutural em vibração dissipa energia, e a força de amortecimento associada a essa dissipação é bastante complexa por depender de diversos fatores. Alguns estão relacionados às características do sistema construtivo, como os materiais utilizados, as tensões envolvidas, a amplitude das oscilações, a existência de elementos não estruturais como paredes, pisos e móveis, e o estado de fissuração da estrutura (BLESSMANN, 2005).

Para identificar as frequências naturais e os fatores de amortecimento dos concretos endurecidos, realizou-se nesta pesquisa uma análise modal experimental por meio de testes de vibração livre, o qual consistiu na aplicação de uma força externa, exercida por um martelo de impacto que excita uma gama de frequências da estrutura em questão. Neste ensaio, realizado no Laboratório de Vibrações da UNIFEI, utilizou-se três corpos de prova de cada traço e todas as peças foram apoiadas sobre um suporte para simular a condição livre, e em seguida aderiu-se o acelerômetro na face oposta àquela que sofreria o impacto do martelo (*impact hammer*), conforme Figura 3.17 e Figura 3.18.

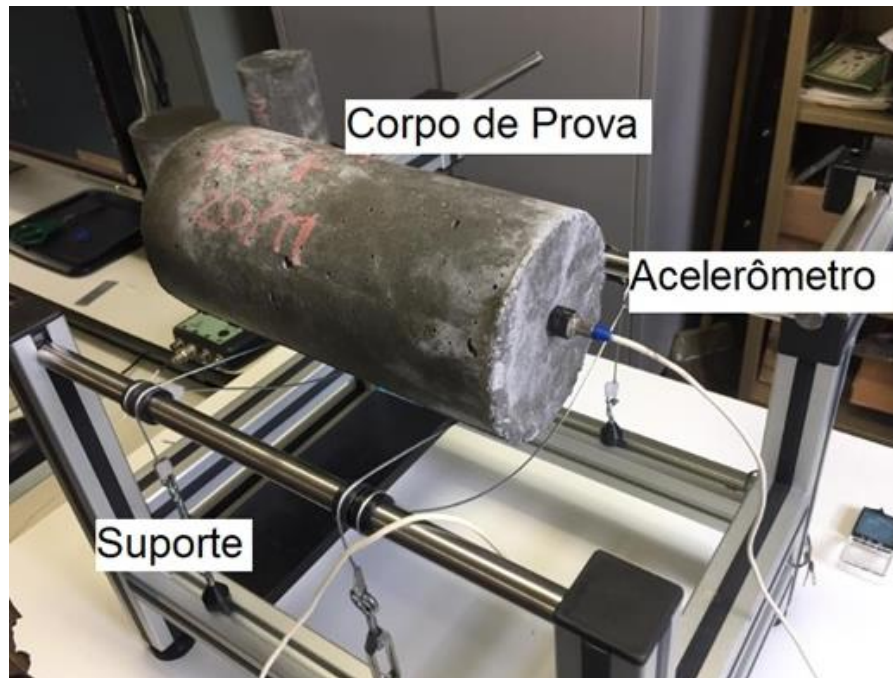


Figura 3.17: Ensaio de Vibração – Frequência Natural e Fator de Amortecimento (Fonte: AUTOR, 2020).

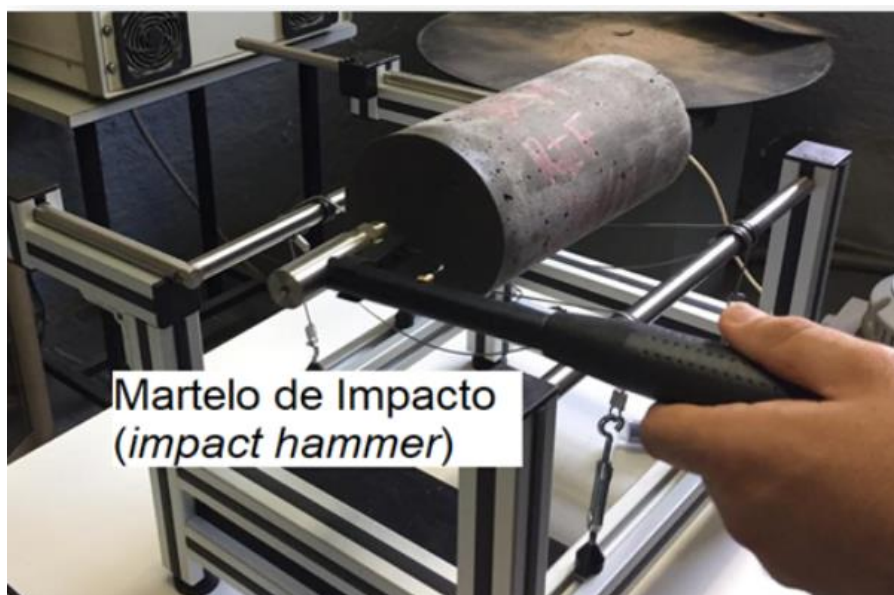


Figura 3.18: Ensaio de Vibração – Frequência Natural e Fator de Amortecimento (Fonte: AUTOR, 2020).

3.5 Análise Estatística

Estudos estatísticos são muito importantes para realizar a análise de informações coletadas, interpretação e divulgação de dados e resultados.

Segundo Ignácio (2012), a estatística na atualidade tem contribuído de forma significativa para o processo de tomada de decisão, pois grande parte do que se faz se baseia em métodos quantitativos, e a estatística é uma dessas áreas. A estatística consiste no

planejamento, coleta, consistência, tabulação, análise e interpretação de dados de pesquisas envolvendo censos ou levantamentos por amostragem.

Neste trabalho, para a análise estatística, utilizou-se a ferramenta denominada *Design of Experiments* (DOE) – Planejamento de Experimentos.

A abordagem do DOE fornece uma maneira de revelar quais fatores influenciam a resposta de um experimento. No presente estudo, a ideia chave para se utilizar esta metodologia é encontrar uma solução ideal para a confecção do CAA com RBP.

De acordo com Mohan (2004), esta metodologia é baseada em duas técnicas: metodologia de *design* de mistura e superfície de resposta na qual a abordagem primária para o problema geral é otimizar a mistura cujas propriedades dependem das proporções dos materiais componentes. Nessas técnicas, em vez de selecionar um ponto de partida, um conjunto de combinações, cobrindo uma faixa escolhida de proporções para cada componente, é configurado de acordo com o procedimento estatístico estabelecido.

Wolinski (2019) afirma que a metodologia DOE possibilita uma redução significativa do número de resultados de cálculos necessários para atingir a precisão assumida na determinação da superfície de resposta.

O projeto de experimentos (DOE), segundo Park (2019), é uma abordagem estatística amplamente utilizada nas aplicações de engenharia, uma vez que a abordagem tenta apresentar um conhecimento preditivo sobre problemas complexos e multivariáveis com poucos números de tentativas.

Segundo Aranda et al. (2007), o DOE é uma técnica utilizada para se planejar experimentos, ou seja, para definir quais dados, em que quantidade e em que condições devem ser coletadas durante um determinado experimento, buscando, basicamente, satisfazer dois grandes objetivos: a precisão estatística possível na resposta e o menor custo. Atualmente, essa técnica vem sendo utilizada em grande escala.

Aranda et al. (2007) ainda afirma que através desta técnica, pesquisadores podem determinar as variáveis que exercem maior influência no desempenho de um determinado processo, tendo como resultados: (i) redução da variação do processo e melhor concordância entre os valores nominais obtidos e os valores pretendidos; (ii) redução do tempo do processo; (iii) redução do custo operacional e (iv) melhoria no rendimento do processo.

Em uma pesquisa como a realizada, é necessário mais tempo, energia, custo e recursos materiais. Portanto, é desejável ter um número menor de experimentos para decidir eficientemente o efeito de diferentes parâmetros que afetam a saída. Assim, uma abordagem

estatística do projeto experimental é uma ferramenta necessária para diminuir o número de experimentos e tirar conclusões significativas da análise de dados.

Nesse sentido, buscando uma combinação apropriada dos parâmetros de entrada, considerou-se neste trabalho seis combinações, variando o teor e a granulometria do RBP, para a confecção do CAA. As variáveis de entrada, faixa escolhida para o estudo, materiais empregados e combinações, estão apresentados na Tabela 3.10.

Tabela 3.10: Combinações de Materiais para o CAA com RBP.

Combinações	% RBP	Granulometria do RBP	Materiais (kg) – Traço Unitário							
			Cimento	Areia	Pó Mármore	Sílica Ativa	RBP	Brita 0	SP	Água
REF	0%	0	1	1,896	0,3	0,06	0	1,626	0,008	0,371
1	10%	$G1 < 0,6\text{mm}$	1	1,626	0,3	0,06	0,052	1,626	0,008	0,371
2		$4,8\text{mm} > G2 \geq 0,6\text{mm}$								
3	30%	$G1 < 0,6\text{mm}$	1	1,338	0,3	0,06	0,171	1,626	0,008	0,371
4		$4,8\text{mm} > G2 \geq 0,6\text{mm}$								
5	50%	$G1 < 0,6\text{mm}$	1	0,371	0,3	0,06	0,289	1,626	0,008	0,371
6		$4,8\text{mm} > G2 \geq 0,6\text{mm}$								

Fonte: AUTOR, 2020.

Figura 3.19 a Figura 3.21 apresentam as combinações para o CAA com RBP utilizadas neste trabalho.

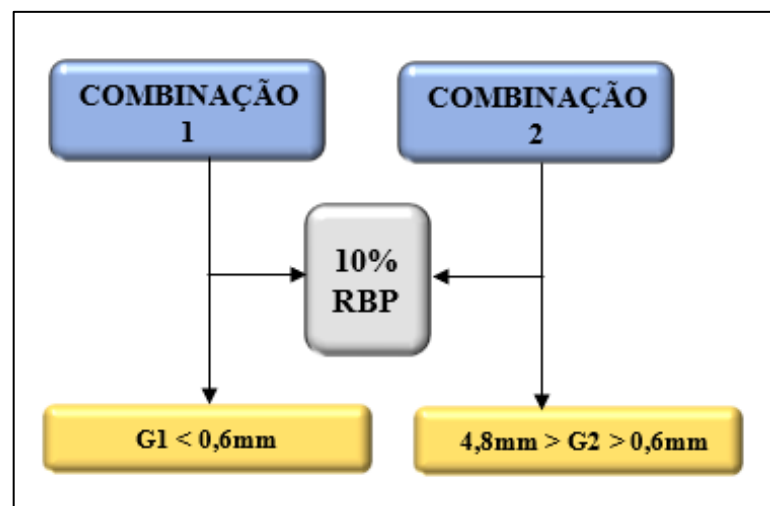


Figura 3.19: Combinações para o CAA com RBP (Fonte: AUTOR, 2020).

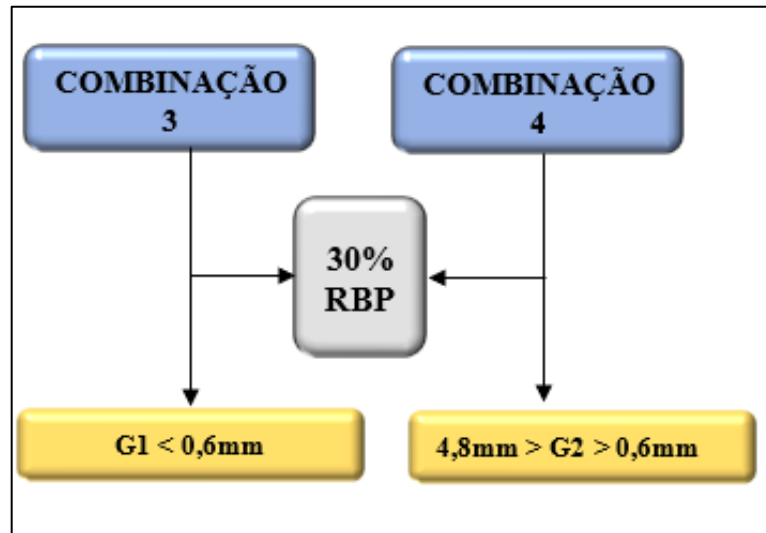


Figura 3.20: Combinações para o CAA com RBP (Fonte: AUTOR, 2020).

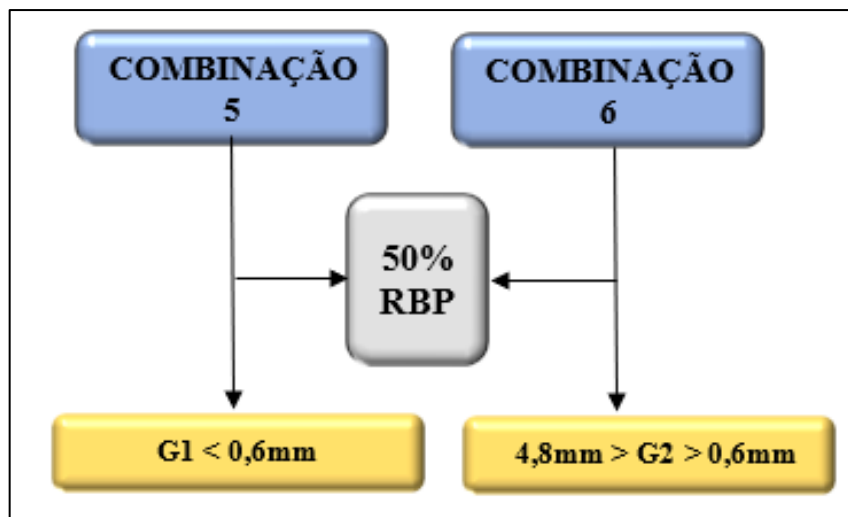


Figura 3.21: Combinações para o CAA com RBP (Fonte: AUTOR, 2020).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização dos materiais utilizados

As distribuições granulométricas da areia, brita 0 e RBP foram obtidas por meio do processo de peneiramento.

A Tabela 4.1 e a Figura 4.1 apresentam respectivamente as características e a curva granulométrica da areia utilizada nos ensaios.

Tabela 4.1: Características físicas e granulométricas da areia.

Abertura da Peneira (mm)	Areia Natural	
	% Retida	% Acumulada
4,8	1	1
2,4	2	3
1,2	8	11
0,6	21	32
0,3	32	64
0,15	26	90
0,075	9	99
Fundo	1	100
D _{máx} característico	2,4 mm	
Módulo de finura	1,99	
Massa específica	2,50 kg/dm ³	
Massa unitária	1,50 kg/dm ³	
Absorção de água	0,37 %	
Classificação	Zona ótima inferior (ABNT NBR 7211:2009)	

Fonte: AUTOR, 2020.

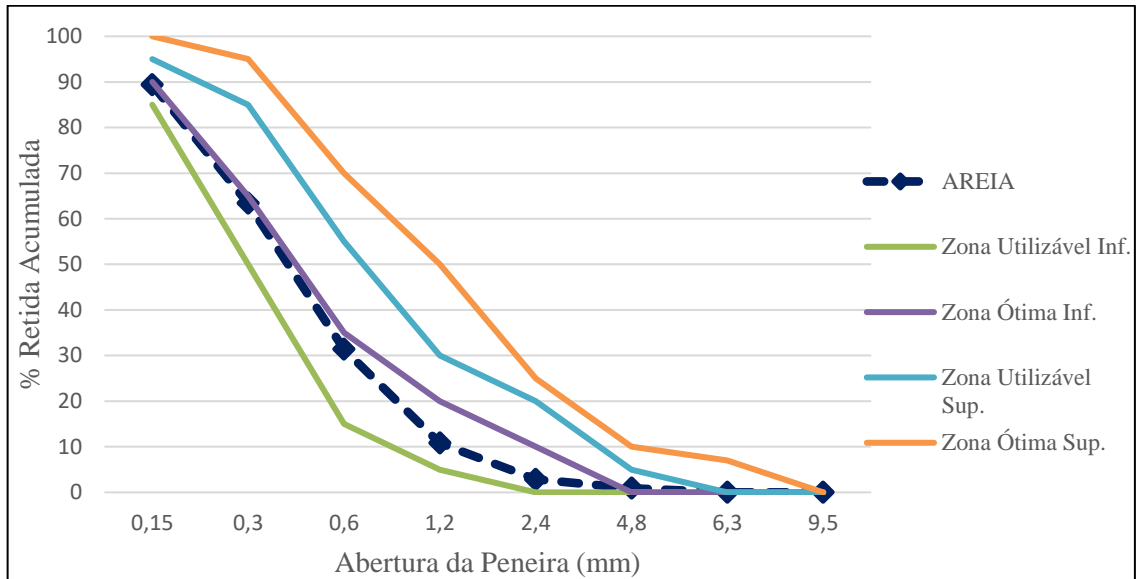


Figura 4.1: Curva granulométrica da areia (Fonte: AUTOR, 2020).

A Tabela 4.2 e a Figura 4.2 apresentam respectivamente as características e a curva granulométrica da brita 0 utilizada nos experimentos.

Tabela 4.2: Características físicas e granulométricas da brita 0

Abertura da Peneira (mm)	Brita 0	
	% Retida	% Acumulada
12,5	1	1
9,5	7	8
6,3	42	50
4,75	26	76
2,4	20	96
1,2	1	97
0,6	3	100
0,3	0	100
0,15	0	100
0,075	0	100
Fundo	0	100
D _{máx} característico	12,5 mm	
Módulo de finura	5,77 %	
Massa específica	2,65 kg/dm ³	
Massa unitária	1,57 kg/dm ³	
Absorção de água	0	
Classificação	4,75/12,5 (ABNT NBR 7211/2009)	

Fonte: (AUTOR, 2020).

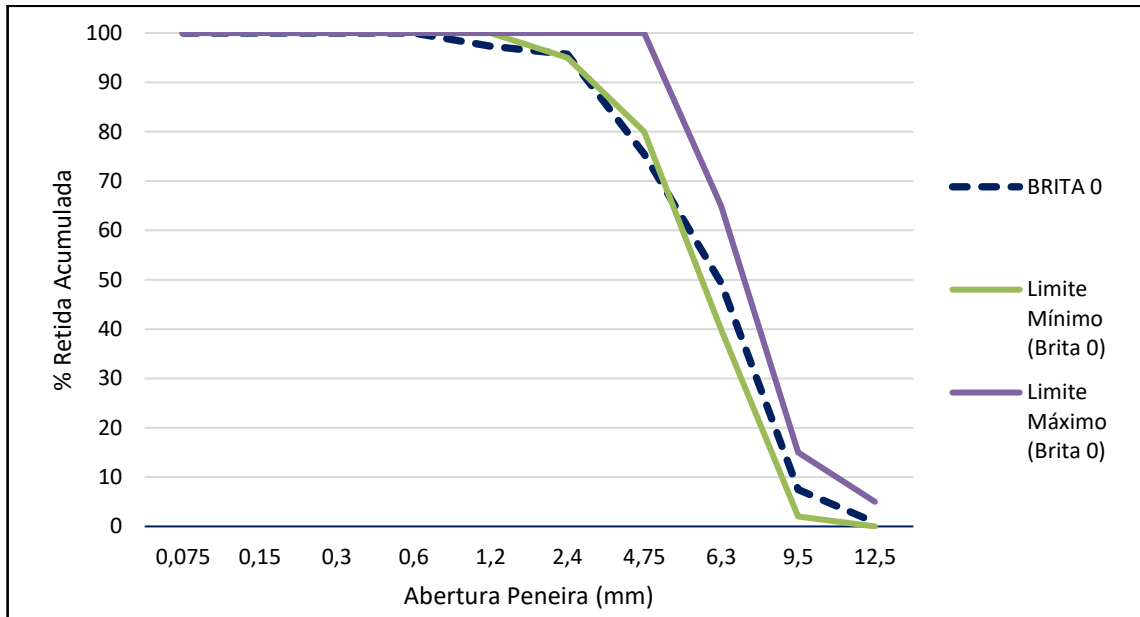


Figura 4.2: Curva granulométrica da brita 0 (Fonte: AUTOR, 2020).

A Figura 4.3 e a Tabela 4.3 apresentam, respectivamente, a curva granulométrica e as características físicas e granulométricas do RBP.

Tabela 4.3: Características físicas e granulométricas do RBP

Abertura da Peneira (mm)	RBP	
	% Retida	% Acumulada
4,8	0	0
2,4	1	1
1,2	18	19
0,6	38	57
0,3	19	76
0,15	11	87
<0,15	13	100
$D_{m\acute{a}x}$ característico	2,4 mm	
Módulo de finura	2,42	
Massa específica	0,781 kg/dm ³	
Massa unitária	0,607 kg/dm ³	
Absorção de água	0	
Classificação	Zona ótima (ABNT NBR 7211:2009)	

Fonte: (AUTOR, 2020).

A distribuição granulométrica dos materiais finos, ou seja, cimento CP LIZ®, sílica ativa e pó de mármore, foi realizada por meio do granulômetro a laser. Os diâmetros estão

demonstrados na Tabela 4.4 e as curvas das respectivas distribuições estão apresentadas na Figura 4.3.

Tabela 4.4: Distribuição granulométrica dos materiais finos

	CP V ARI (μm)	Sílica Ativa (μm)	RCMG (μm)
D10	2,32	6,05	5,68
D 50	12,28	39,78	30,8
D 90	35,23	150,7	88,59

Fonte: (AUTOR, 2020).

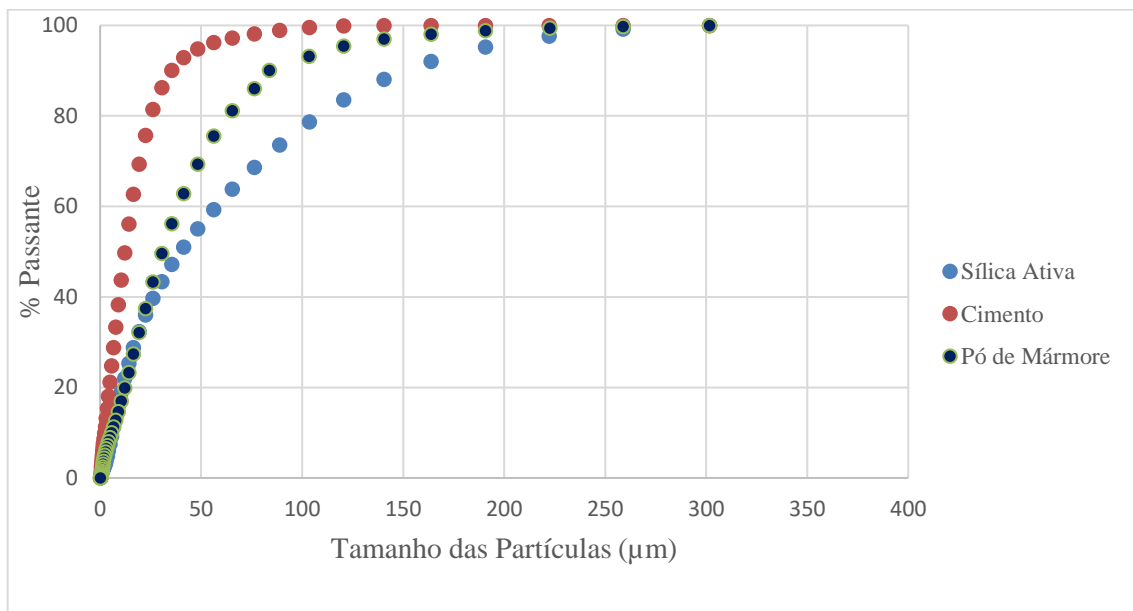


Figura 4.3: Curvas Granulométricas do material fino utilizado nas misturas (Fonte: AUTOR, 2020).

4.2 Determinação do traço e produção do concreto de referência

4.2.1 Definição da composição da pasta e da argamassa

Antes de definir o traço do CAA REF, realizou-se ensaios de pasta e argamassa. Conforme descrito no item 3.2, as composições da pasta e da argamassa do CAA REF foram obtidas com auxílio dos seguintes ensaios: Cone de *Marsh*, mini slump, cone de consistência (tronco de cone) e mini funil V, mostrados nas Figura 4.4 a Figura 4.7.



Figura 4.4: Ensaio de pasta. Cone de Marsh (Fonte: AUTOR, 2020).



Figura 4.5: Ensaio de pasta. Cone de Kantro (mini 93lump) (Fonte: AUTOR, 2020).



Figura 4.6: Ensaio de argamassa. Cone de Consistência (mini tronco de cone) (Fonte: AUTOR, 2020).



Figura 4.7: Ensaio de argamassa. Mini funil V (Fonte: AUTOR, 2020).

A Tabela 4.5 apresenta os resultados dos ensaios. Segundo Gomes (2003), o espalhamento máximo da pasta deve variar entre $180 \text{ mm} \pm 10 \text{ mm}$. O resultado obtido foi de 185 mm.

O tempo obtido no ensaio do mini funil V foi de 5 s e o espalhamento foi de 310 mm. Os limites sugeridos por Repette (2005) são de 3,5 a 10 s para o Funil e 200 a 280 mm para espalhamento. E, segundo Domone e Jin (1999), os limites são de 1,5 a 17 s para o Funil V e 230 a 340 mm para o espalhamento.

Tabela 4.5: Resultados dos ensaios da pasta e da argamassa – CAA REF

	Ensaio	Limites	Resultados
Pasta	Cone de Marsh (s)	-	53 s
	Mini Slump (Kantro) (mm)	180 + 10mm	185 mm
Argamassa	Cone de Consistência (mm)	250 a 320mm	310 mm
	Mini Funil V (s)	2 a 10 s	5 s

Fonte: AUTOR, 2020.

A composição da pasta para o CAA REF foi obtida com 0,8% de SP, 6% de Sílica ativa, 30% RCMG e fator a/c cimentantes igual a 0,35.

Como os valores obtidos encontram-se dentro das faixas dos respectivos limites, conclui-se que o volume do superplastificante e dos materiais finos empregados nos ensaios, estão corretos.

4.2.2 Dosagem do concreto autoadensável de referência (CAA REF)

A Figura 4.8 apresenta as curvas geradas pelo software EMMA. A curva vermelha representa a curva granulométrica ideal segundo o programa, e a curva azul representa a distribuição granulométrica da mistura. Nota-se que a curva em azul está bem próxima da vermelha, o que indica um bom empacotamento da mistura.

Para a construção do gráfico, foram adicionados como dados de entrada as caracterizações granulométricas, a massa específica dos materiais, o modelo de empacotamento, o valor do diâmetro da maior (9500 μm) e da menor (0,8 μm) partícula da mistura e o coeficiente de distribuição ($q = 0,25$).

O teor de argamassa obtido para o traço do CAA REF foi de 66%, que está dentro dos limites de aplicação conhecidos do Gomes (2009) que é de 30% a 90%, suficiente para não deixar vazios dentro do concreto.

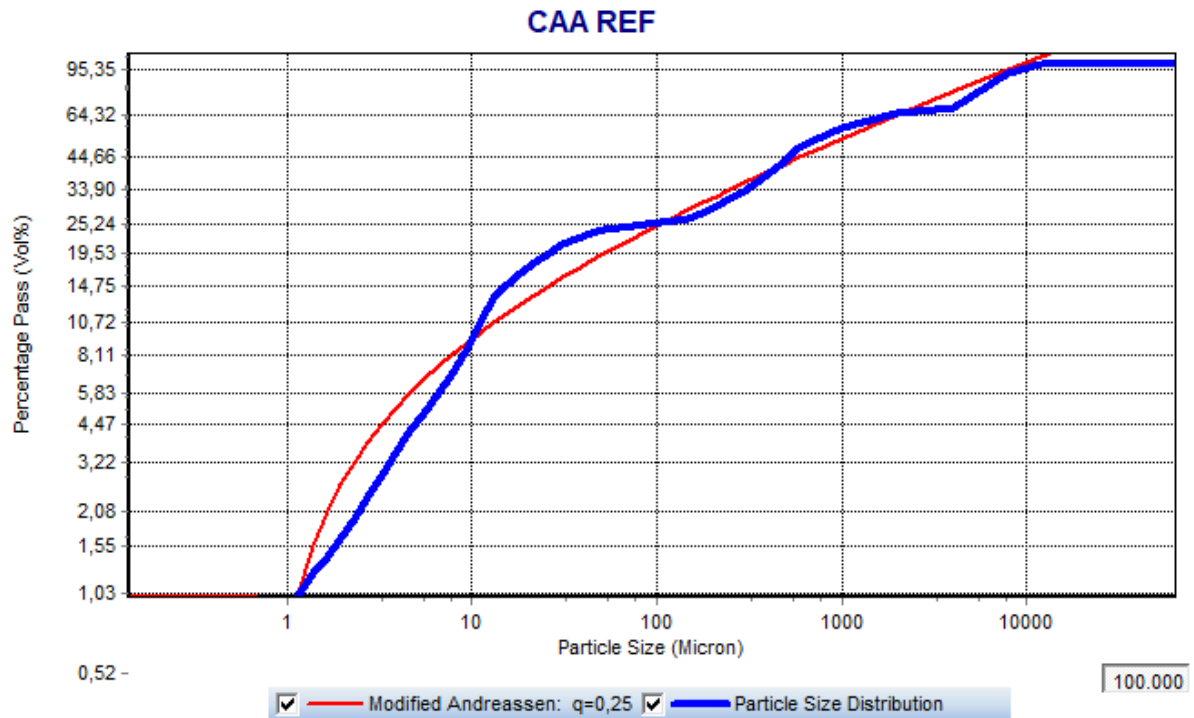


Figura 4.8: Comparação entre a curva ideal (vermelha) obtida pelo modelo de Andreassen modificado, e a curva obtida para o traço referência (azul) (Fonte: AUTOR, 2020).

Com a aplicação deste programa, estimou-se uma proporção entre os agregados que foi ajustada durante a dosagem, mostrada na Tabela 4.6.

Tabela 4.6: Proporção dos componentes para fabricação do CAA REF

Material	Massa Específica (g/cm ³)	Massa (g)	Volume (%)
Brita 0	2,65	750,00	33,65
Pó de Mármore	2,83	135,00	5,67
Cimento	3,04	450,00	17,60
Sílica Ativa	2,20	27,00	1,46
Areia	2,50	875,00	41,62
Parâmetros	q – Value:	0,25	
	Tamanho Máximo da Partícula (µm):	9500,00	
	Tamanho Mínimo da Partícula (µm):	0,80	

Fonte: (AUTOR, 2020).

Para auxiliar na obtenção do traço do CAA REF, desenvolveu-se uma planilha baseada no Método de Gomes. Esta ferramenta está preparada para correção do traço em função da umidade da areia e de outras variáveis assim como para permitir a inclusão de outros materiais na composição do concreto.

As quantidades dos materiais obtidas com auxílio do EMMA, as quais geraram a curva azul, foram lançadas na planilha (Tabela 4.7) juntamente com os valores dos fatores a/c (0,35), sp/c (0,80%) e da umidade da areia, obtida pelo Método de *Speedy*.

Tabela 4.7: Planilha (parcial) com dados lançados

Componentes CAA	Massa (g)	Densidade	Volume (ml)	EMMA		Traço Unitário	Volumes
				Massa (kg/m ³)	Volume (m ³)		
Consumo de cimento	450,0000	3,0400	148,0000	444,8370	0,1463	1,0000	0,1463
Consumo de filler	0,0000	2,5500	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Consumo de sílica	27,0000	2,2000	12,3000	26,6900	0,0121	0,0600	0,0121
Consumo de pó de mármore	135,0000	2,8300	47,7000	133,4510	0,0472	0,3000	0,0472
Consumo de adição	0,0000	0,7810	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Consumo de água	166,9500	1,0000	167,0000	165,0350	0,1650	0,3710	0,1650
Consumo de aditivo	3,8000	1,0500	3,6000	3,7720	0,0036	0,0080	0,0036
Consumo de areia média	875,0000	2,5000	350,0000	864,9620	0,3460	1,9440	0,3460
Consumo de areia grossa	0,0000	2,5700	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Consumo de brita 0	750,0000	2,6500	283,0000	741,3960	0,2798	1,6670	0,2798
Total	2407,7660	2,3800	1,0116	2380,1440	1,0000		1,0000

Fonte: (AUTOR, 2020).

Determinou-se um volume de 20 litros de concreto para confecção da quantidade de corpos de prova suficiente para a realização dos ensaios do concreto no estado endurecido.

Com todos os valores lançados na planilha, obteve-se o traço do CAA REF assim como o traço do CAA com substituição, em volume, de 10%, 30% e 50% de RBP mantendo constante a massa do cimento, a sílica ativa, o RCMG, o SP, a brita 0 e a água.

Na Tabela 4.8 estão apresentadas as quantidades dos materiais e a proporção, em massa, dos traços propostos para o CAA REF e o concreto autoadensável com 10%, 30% e 50% de RBP, ou seja, RBP 10, RBP 30 e RBP 50, respectivamente.

Tabela 4.8: Traço do CAA

Materiais	Traço Unitário			
	REF	RBP 10	RBP 30	RBP 50
Cimento	1,000	1,000	1,000	1,000
Areia Média	0,371	1,626	1,338	0,371
Sílica Ativa	0,060	0,060	0,060	0,060
RCMG	0,300	0,300	0,300	0,300
Superplastificante	0,008	0,008	0,008	0,008
RBP	0,000	0,052	0,171	0,289
Brita 0	1,626	1,626	1,626	1,626
Água	0,371	0,371	0,371	0,371

Fonte: (AUTOR, 2020).

4.2.3 Ensaios do Concreto no Estado Fresco

4.2.3.1 Massa Específica, Índice e Teor de ar pelo Método Gravimétrico

Na Tabela 4.9 estão apresentados os resultados dos ensaios realizados no estado fresco do CAA REF e dos CAA com RBP, para determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo Método Gravimétrico, conforme ABNT NBR 9833:2009.

Tabela 4.9: Resultado da Massa Específica, Índice e Teor de Ar dos concretos no estado fresco

Traço CAA	Massa Específica (kg/m ³)	Índice de Ar	Teor de Ar (%)
REF	2405,850	1,038	3,66
*RBP 10 G1	2345,853	1,038	3,66
*RBP 10 G2	2332,484	1,044	4,21
*RBP 30 G1	1965,946	1,170	14,53
*RBP 30 G2	2202,959	1,044	4,21
*RBP 50 G1	1742,365	1,242	19,48
*RBP 50 G2	2050,998	1,055	5,21

Fonte: (AUTOR, 2020).

*RBP 10 G1: 10% de Resíduo de Borracha de Pneu de Granulometria 1 (G1 < 0,6mm)

*RBP 10 G2: 10% de Resíduo de Borracha de Pneu de Granulometria 2 (4,8mm > G2 ≥ 0,6mm)

*RBP 30 G1: 30% de Resíduo de Borracha de Pneu de Granulometria 1 (G1 < 0,6mm)

*RBP 30 G2: 30% de Resíduo de Borracha de Pneu de Granulometria 2 (4,8mm > G2 ≥ 0,6mm)

*RBP 50 G1: 50% de Resíduo de Borracha de Pneu de Granulometria 1 (G1 < 0,6mm)

*RBP 50 G2: 50% de Resíduo de Borracha de Pneu de Granulometria 2 (4,8mm > G2 ≥ 0,6mm).

Pela Figura 4.9, pode-se observar que todas as massas específicas diminuíram com relação ao CAA REF, isto já era de se esperar e se explica pela presença do RBP nos outros traços (menor densidade que da areia). Silva (2019) também relata que há uma diminuição na densidade do concreto devido a menor massa específica da borracha em comparação aos agregados convencionais.

Pelo fato do baixo valor da massa apresentada pela granulometria G1 ($< 0,6\text{mm}$), os traços RBP 30 G1 e RBP 50 G1 apresentaram massas específicas abaixo da faixa dos concretos normais (2000 a 2800 kg/m^3), sendo assim classificados como concretos leves, segundo a (NBR 8953, 2014).

Para ambos os grupos de granulometrias, G1 e G2, observa-se que quanto maior a porcentagem de RBP na mistura, menor a massa específica do concreto. Este fato também se explica pela presença do RBP substituindo a areia de maior densidade.

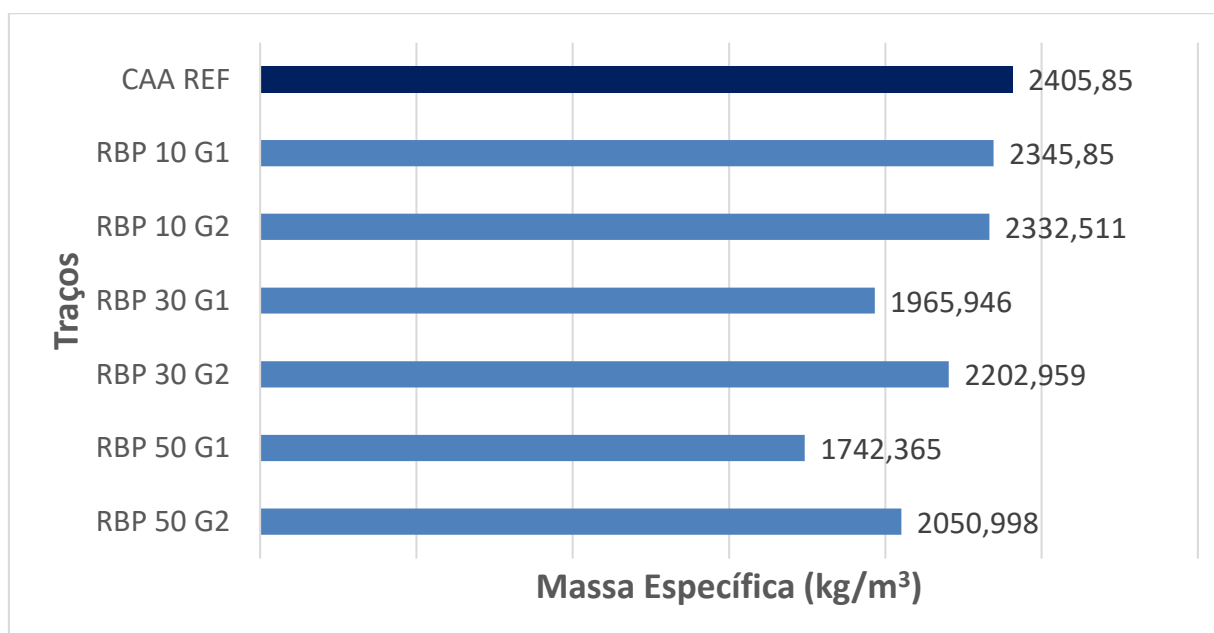


Figura 4.9: Resultado das Massas Específicas dos concretos no estado fresco (Fonte: AUTOR, 2020).

Analisando a Figura 4.10, verifica-se que pelo fato de a presença do RBP incorporar ar nas misturas, estas apresentaram maior teor de ar do que o CAA REF.

Observa-se também que, para os grupos de 30% e 50% de RBP, quanto maior a granulometria do resíduo, menor teor de ar na mistura, ou seja, para o mesmo volume tem-se menos partículas de G2 do que de G1 e consequentemente menor teor de ar.

Era esperado que para o grupo de 10% de RBP, o teor de ar para a mistura com G2 apresentasse valor menor que para a mistura com G1, isso não ocorreu, embora os valores encontrados sejam muito próximos. Mesmo assim, os resultados obtidos foram satisfatórios, demonstrando que a adição de borracha proporciona maior teor de ar na mistura à medida que se aumenta a porcentagem e reduz a granulometria do polímero. Os resultados obtidos são semelhantes aos encontrados por (SILVA, 2019).

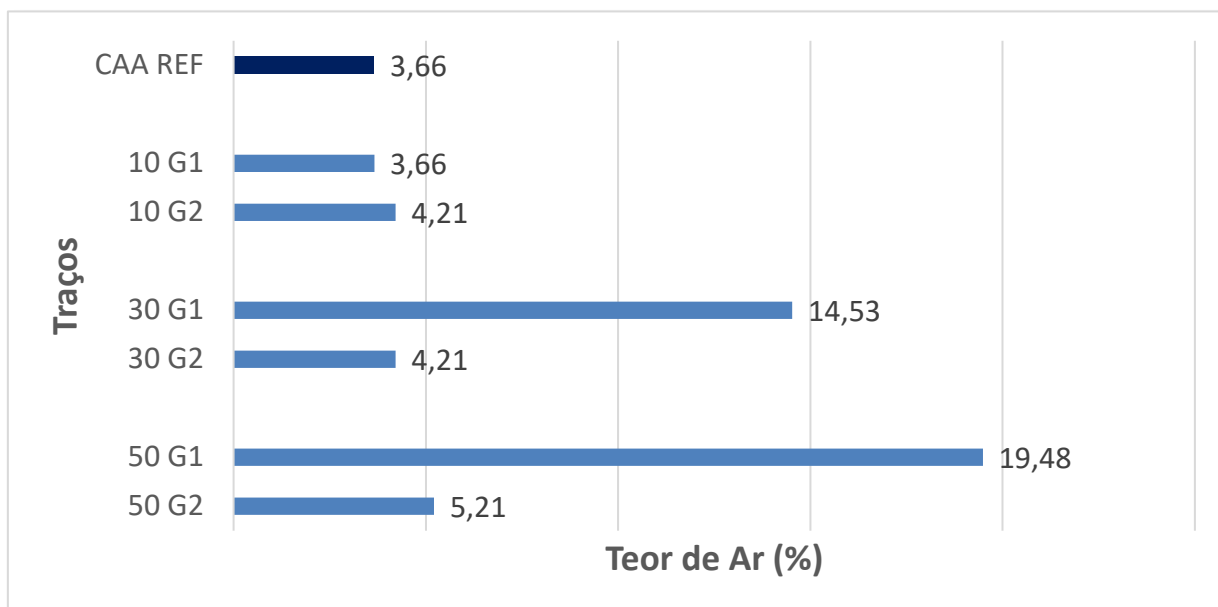


Figura 4.10: Resultado do Teor de Ar dos concretos no estado fresco (Fonte: AUTOR, 2020).

4.2.3.2 *Slump Test, Funil V e Caixa L*

Os ensaios foram realizados para os traços do CAA REF e para os traços do CAA com 10 % G1 e G2, 30 % G1 e G2 e 50 % G1 e G2, conforme prescritos nas partes 2, 4 e 5 da ABNT NBR 15823: 2017 e mostrados nas Figura 4.11 a Figura 4.13.

Os resultados estão apresentados e classificados na Tabela 4.10 juntamente com os limites especificados pela (NBR 15823-1, 2017).



Figura 4.11: Ensaio Slump Flow Test (Fonte: AUTOR, 2020).



Figura 4.12: Ensaio Funil V (Fonte: AUTOR, 2020).



Figura 4.13: Ensaio Caixa L (Fonte: AUTOR, 2020).

Tabela 4.10: Resultados das características do concreto no estado fresco

Traço CAA	Slump Flow test (ABNT NBR 15823-2)		T500 (ABNT NBR 15823-2)		Funil V (ABNT NBR 15823-5)		Caixa L (ABNT NBR 15823-4)	
	Espalhamento (mm)	Classe	Tempo (s)	Classe	Tempo (s)	Classe	H ₂ /H ₁	Classe
REF	825	SF 2	7	VS 2	7	VF 1	0,94	PL 2
RBP 10 G1	730	SF 2	6	VS 2	13	VF 2	0,96	PL 2
RBP 10 G2	770	SF 3	6	VS 2	11	VF 2	0,98	PL 2
RBP 30 G1	715	SF 2	8	VS 2	7	VF 1	0,91	PL 2
RBP 30 G2	715	SF 2	8	VS 2	16	VF 2	0,93	PL 2
RBP 50 G1	575	SF 1	10	VS 2	5	VF 1	0,76	PL 2
RBP 50 G2	720	SF 2	7	VS 2	8	VF 1	0,93	PL 2

Fonte: (AUTOR, 2020).

Para o CAA REF, com espalhamento obtido de 825 mm, o concreto é classificado como SF 2, ou seja, adequado para a maioria das aplicações correntes, como por exemplo, paredes, vigas, pilares e outras. Após cessado o espalhamento, o concreto apresentou-se sem evidência de segregação e uma leve exsudação, classificando-o assim, conforme (NBR 15823-2, 2017), com um índice de estabilidade visual IEV 1.

O traço RBP 50 G1 (50 % de RBP de granulometria menor que 0,6 mm) não atendeu ao ensaio da caixa L, ou seja, pela norma a menor relação H₂/H₁ para um CAA é de 0,8. Observa-se também, que mesmo dentro dos limites estabelecidos pelas normas, obteve-se para o mesmo traço um espalhamento de 575 mm e um T 500 de 10 s, valores estes fora da média

dos demais. Este fato se explica pela presença de um grande teor de RBP de pequena granulometria (menor que 0,6 mm) o que proporciona baixa fluidez à mistura. Todos os outros traços atenderam as características de um CAA, segundo a (NBR 15823-1, 2017). As Figura 4.14 a Figura 4.17, apresentam resumo da Tabela 4.10.

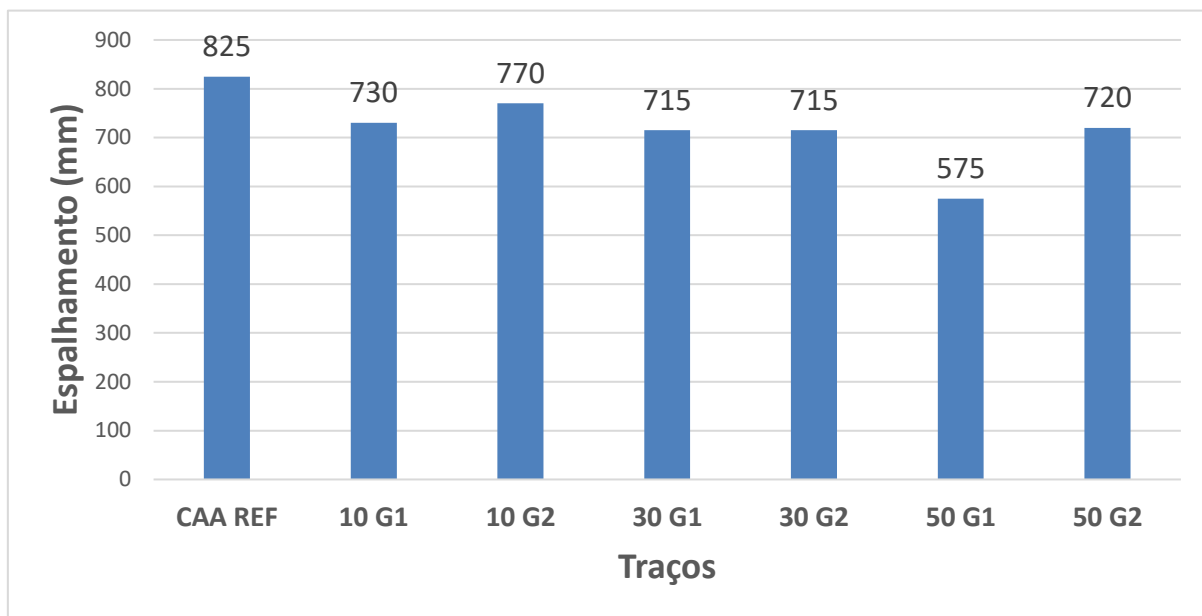


Figura 4.14: Resultado dos Ensaio de Espalhamento (Fonte: AUTOR, 2020).

Todas as misturas enquadram-se na (NBR 15821-1, 2017), ou seja, estão dentro do intervalo entre os limites máximo (850 mm) e mínimo (550 mm) estipulados, para concreto autoadensável.

Segundo Hesami et al. (2016), a presença do RBP tem efeitos negativos nas propriedades reológicas do concreto e este fato também foi constatado nesta pesquisa. Observou-se que todos os concretos apresentaram valores de espalhamento menores que o CAA REF e que de forma geral, para o mesmo volume, quanto maior a porcentagem e menor a granulometria do polímero, menor o espalhamento, ou seja, o polímero resiste ao fluxo da mistura, o que acarretará num menor espalhamento da mesma.

A Figura 4.15 apresenta os resultados que possibilitam classificar os traços de acordo com as classes de viscosidade plástica aparente (sob fluxo livre).

Observa-se que todos os traços se enquadram na classe VS 2, o que significa que o tempo que as misturas levaram para atingir a extremidade do círculo (ensaio de espalhamento), foi maior que 2 segundos.

Pelo fato do maior teor e da menor granulometria do RBP, já era de se esperar que o traço 50 G1 apresentasse maior T500 e o traço 10 G1 menor T500.

Esperava-se também um T500 para o CAA REF menor que os valores encontrados para o grupo 10 G1 e 10 G2, porém os valores encontrados são muito próximos e acredita-se que esta diferença se deve ao momento de acionar o cronômetro logo após o levantamento do cone.

De acordo com De Schutter et al. (2008), o T500 está relacionado com a viscosidade do concreto fresco, mas o ensaio não mede diretamente esta característica reológica.

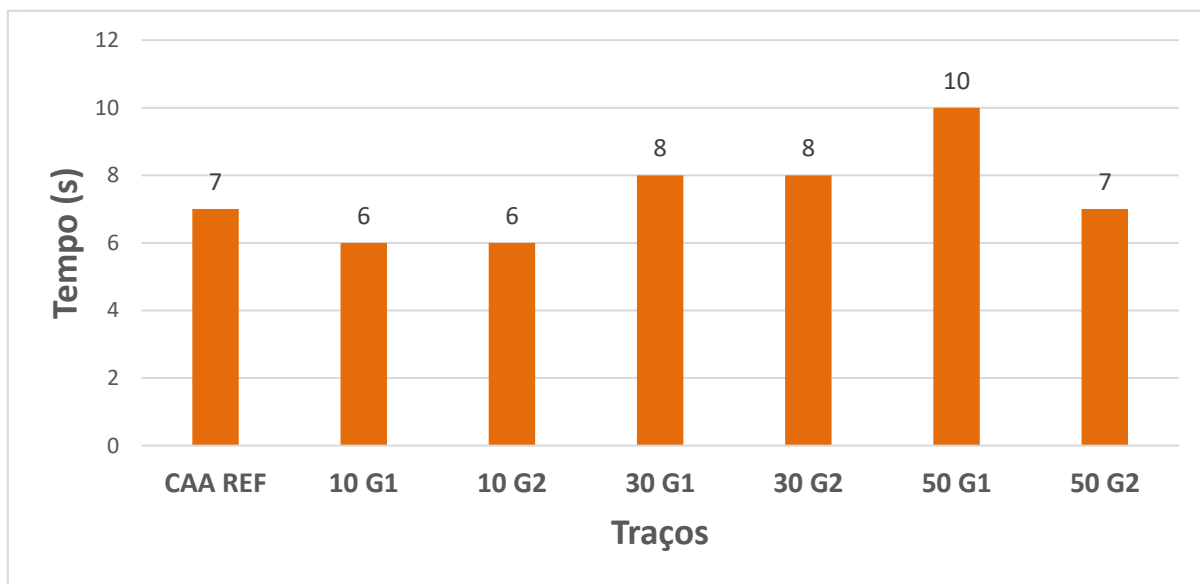


Figura 4.15: Resultado dos Ensaio T 500 (Fonte: AUTOR, 2020).

O objetivo do ensaio do Funil V, baseado na (NBR 15823-5, 2017), é determinar o tempo de escoamento da mistura através do Funil V e assim classificar a mistura quanto à viscosidade plástica aparente (sob fluxo confinado).

O tempo de fluxo do funil V da maioria das misturas variou entre 6 e 12 s, faixa exigida pela EFNARC (2005) para concreto autoadensável. Conforme Figura 4.16, as misturas 10 G1 e 50 G1 apesar de não estarem dentro deste intervalo, obtiveram-se valores muito próximos dos limites superior e inferior respectivamente.

Esperava-se que o CAA REF, por não possuir RBP em sua composição, apresentasse menor tempo de escoamento, ou seja, menor viscosidade. Os demais traços também não apresentaram valores esperados, ou seja, quanto maior o teor e menor a granulometria do RBP, maior deveria ser o tempo de escoamento e menor a viscosidade. Isto não foi observado em todas as misturas.

Boukhelkhal et al. (2016) relata que valores de tempo de fluxo do funil V variando de 6 a 12 s são recomendados para obter o CAA. Para valores de tempo de fluxo do funil em V superiores a 12 s, o CAA pode ser muito viscoso e não pode ter fluxo suficiente para passar

pela área altamente congestionada. Para valores menores que 6 s, o CAA é considerado muito fluido e o risco de sangramento é alto.

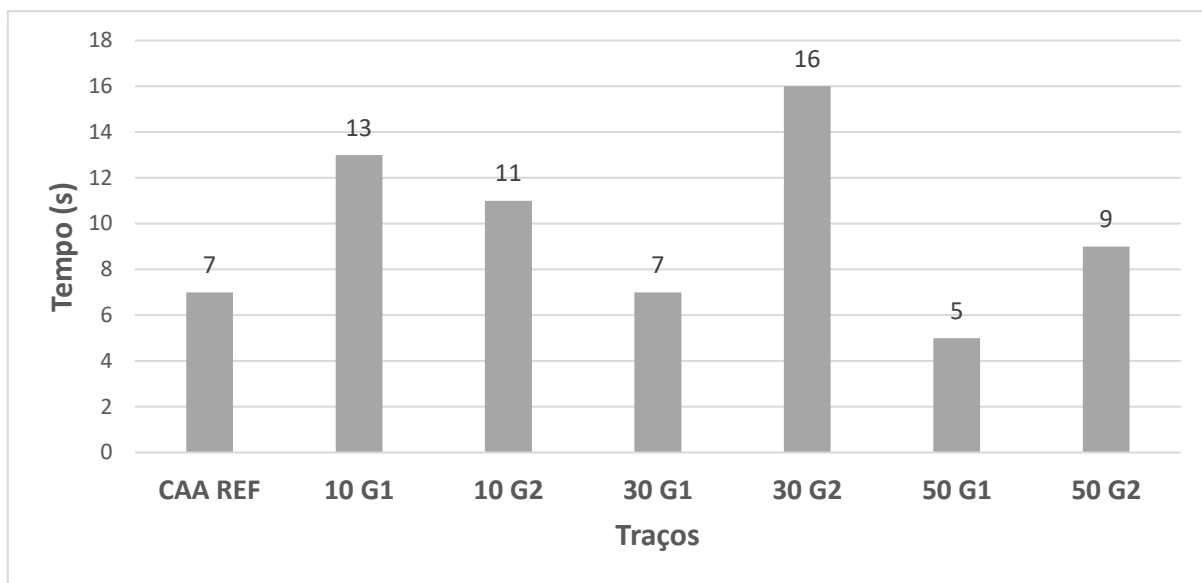


Figura 4.16: Resultado dos Ensaio - Funil V (Fonte: AUTOR, 2020).

Analisou-se também a habilidade passante em fluxo confinado das misturas através do ensaio com a caixa L (NBR 15823-4, 2017). Com exceção do traço 50 G1, todas as misturas excederam ao valor mínimo da norma para concreto autoadensável, ou seja, valores de H_2/H_1 superiores a 0,80. A mistura 50 G1 praticamente atingiu o valor mínimo. Assim, todas as misturas classificam-se como PL 2.

Comparando-se os grupos de 10 %, 30 % e 50 % de RBP isoladamente, observa-se que quanto maior a granulometria do resíduo, maior a habilidade passante. Isto se explica pelo fato de haver menos resíduo por volume de mistura, o que proporciona uma menor resistência a obstáculos.

À medida que se aumenta o teor de resíduo, para a mesma granulometria, a tendência é que há redução da habilidade passante. Angelin et al. (2018), em sua pesquisa, também verificou que com aumento do teor de borracha, houve diminuição da fluidez do concreto e consequentemente redução da habilidade passante por obstáculos. A Figura 4.17, apresenta os resultados do ensaio.

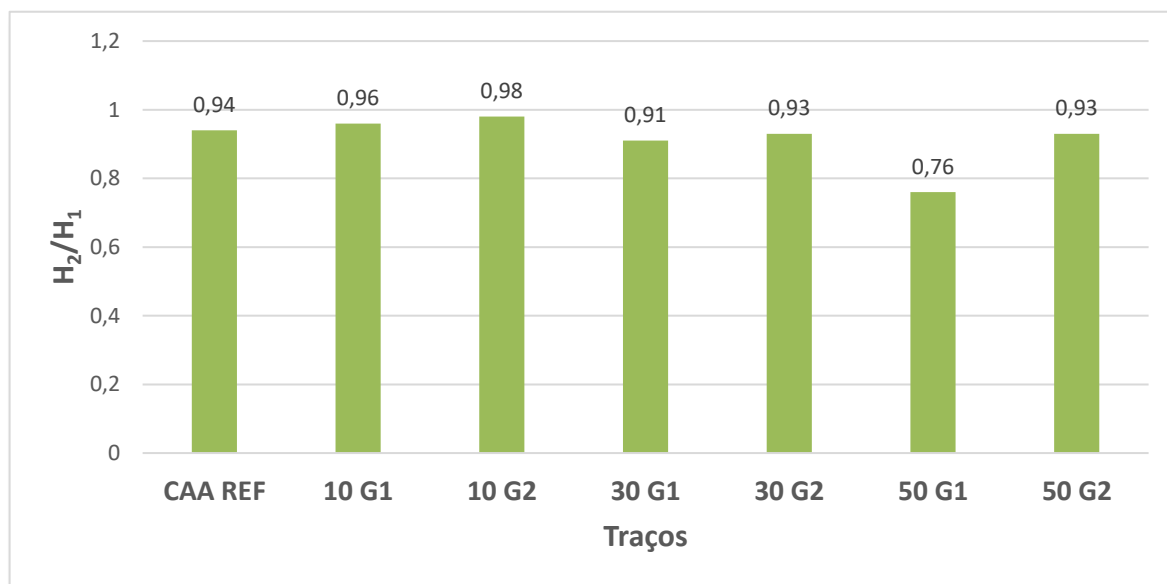


Figura 4.17: Resultado dos Ensaio – Caixa L (Fonte: AUTOR, 2020).

4.2.4 Ensaio do Concreto no Estado Endurecido

4.2.4.1 Compressão Axial

A Tabela 4.11 apresenta a média aritmética dos resultados de compressão axial e as porcentagens de perdas de resistência dos concretos com RBP em relação ao CAA REF.

Tabela 4.11: Resultados dos ensaios de compressão axial

Corpos de Prova	CAA REF		10 G1		10 G2		30 G1		30 G2		50 G1		50 G2	
	7 dias	28 dias	7 dias	28 dias	7 dias	28 dias	7 dias	28 dias	7 dias	28 dias	7 dias	28 dias	7 dias	28 dias
Média (MPa)	56,9	63,3	37,7	48,5	48,5	52,4	18,1	20,8	16,2	31,0	6,0	8,2	7,1	11,5
Perda de Resistência (%)	-	-	33,7	23,5	14,8	17,2	68,1	67,2	71,6	51,1	89,4	87,1	87,5	81,9
Erro Padrão	2,08	3,16	0,87	1,93	1,43	2,03	0,40	0,46	0,01	2,54	0,35	0,38	0,67	0,82

Fonte: (AUTOR, 2020).

As Figura 4.18 e Figura 4.19 seguintes, apresentam os resultados das médias aritméticas dos ensaios de compressão axial realizados aos 7 e 28 dias de cura dos concretos.

Pode-se observar pela Figura 4.18 que o CAA REF, aos 7 dias, já apresentou uma alta resistência a compressão axial (56,911 MPa), o que atende os 40 MPa estabelecido por Gomes (2005) aos 28 dias.

Todos os traços, como esperado, apresentaram maior resistência aos 28 dias de cura do concreto. Mantendo-se o teor e diminuindo a granulometria do resíduo de borracha observa-se

redução na resistência à compressão axial do concreto, tanto aos 7 como aos 28 dias. Este fato pode ser devido à pouca aderência existente entre o polímero e a matriz cimentícia.

Shu e Huang (2014) observaram que pelo fato da borracha ser um material hidrofóbico, há uma redução da aderência entre a pasta e o polímero causando assim vazios ao redor das partículas da borracha o que contribui com o aumento da porosidade e consequentemente redução na resistência à compressão do concreto.

Yung et al. (2013) também verificou que quando o resíduo de borracha incorporado ao concreto possui uma menor granulometria, a resistência à compressão diminui.

De acordo com Hesami et al. (2016), a substituição de 15% de areia por borracha resultou em uma redução de 14,29% na resistência à compressão.

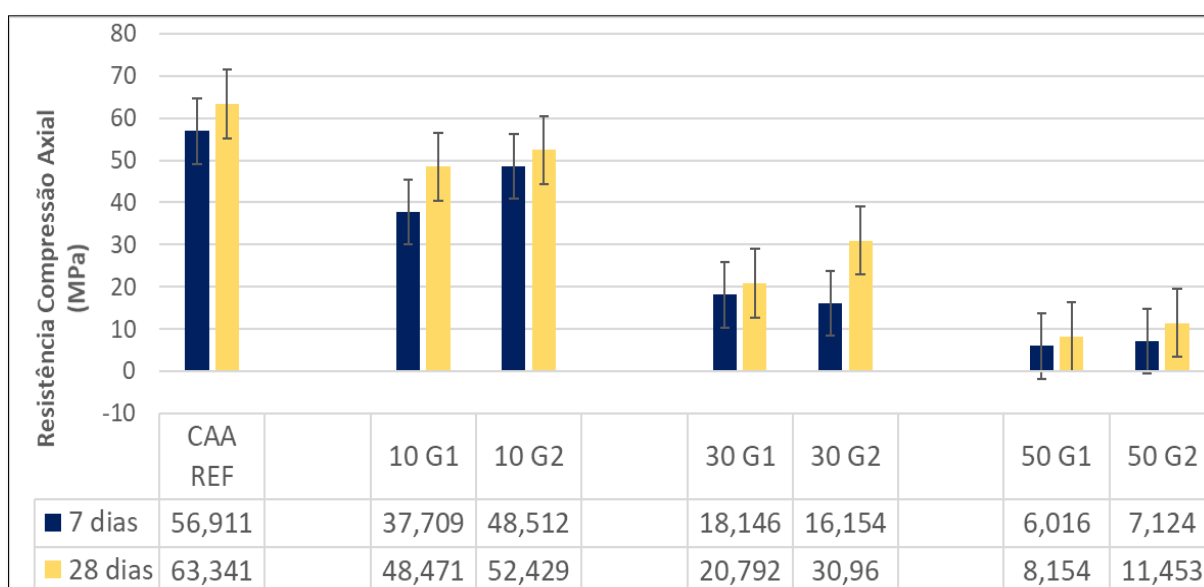


Figura 4.18: Compressão Axial 7 e 28 dias – Resultados separados por teor de RBP (Fonte: AUTOR, 2020).

Em ambos os grupos das granulometrias (G1 e G2), observa-se, pela Figura 4.19, que à medida que se aumentou a porcentagem de RBP, a resistência à compressão diminuiu.

Segundo Hesami et al. (2016), com o aumento do teor de borracha, a resistência à compressão diminuiu pelo fato da borracha suportar um nível mais baixo de carga do que os agregados.

Comparando-se o grupo da granulometria 1 (G1) com o da granulometria 2 (G2), constata-se que o grupo com menor granulometria ($G1 < 0,6\text{mm}$) apresenta-se menor resistência à compressão axial. Hilal (2017) também concluiu que os resultados de força indicaram que a utilização de borracha triturada na fabricação de concreto autoadensável resultou em diminuição sistemática da resistência à compressão.

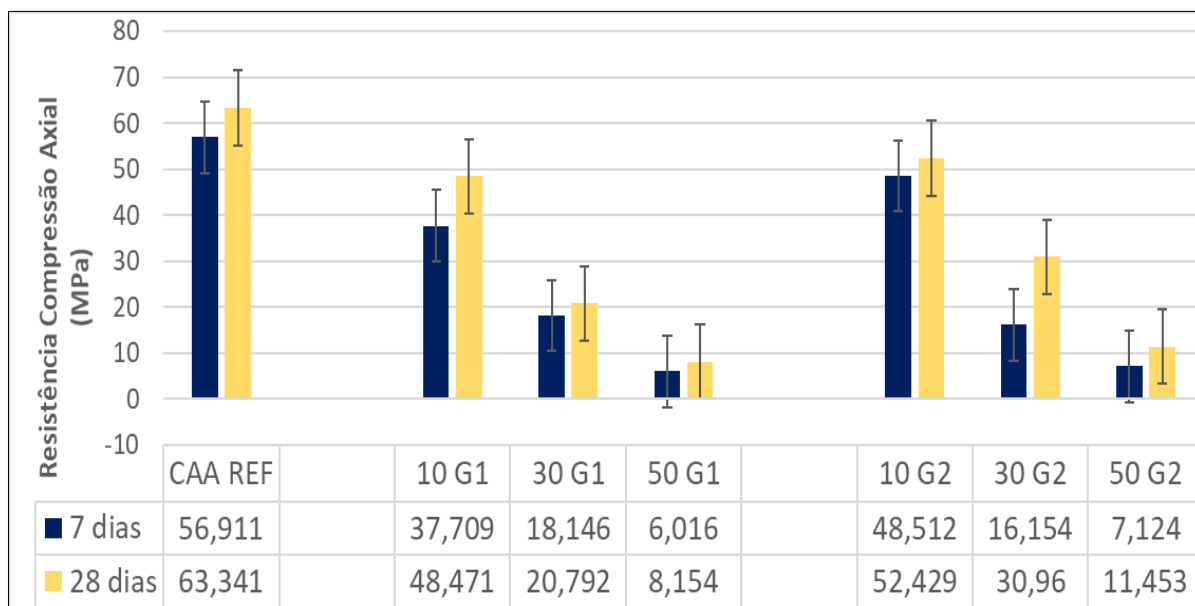


Figura 4.19: Compressão axial 7 e 28 dias – Resultados separados por Granulometrias (Fonte: AUTOR, 2020).

4.2.4.2 Dureza Superficial pelo Esclerômetro de Reflexão

As Figuras de 4.20 a 4.22 apresentam os resultados obtidos dos Índices Esclerométricos Efetivos dos concretos endurecidos aos 7 e 28 dias.

A Figura 4.20 mostra os resultados por grupos de porcentagens de RBP. Com exceção da mistura 50 G2, todas apresentaram valores esperados, isto é, mantendo o teor e aumentando a granulometria do polímero, obteve-se valores maiores para os índices esclerométricos.

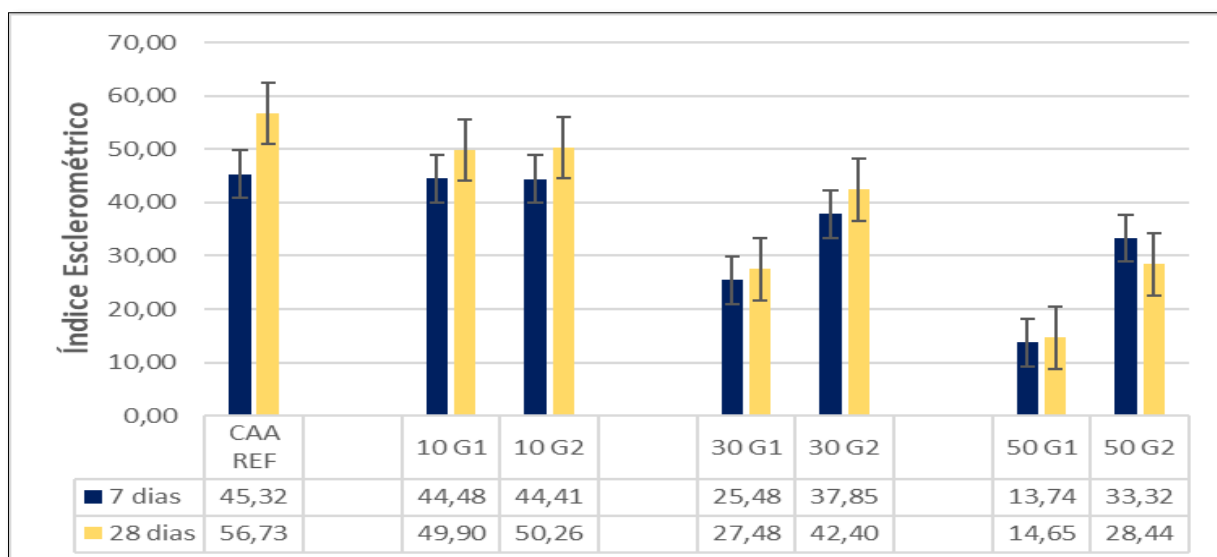


Figura 4.20: Resultado dos Índices Esclerométricos Efetivos aos 7 e 28 dias Separados por teor de RBP (Fonte: AUTOR, 2020).

A Figura 4.21 apresenta também resultados já esperados. Para as mesmas granulometrias, à medida que houve aumento no teor do polímero na mistura, houve acréscimo nos índices esclerométricos.

A mistura 50 G2 não atendeu o esperado em ambas as situações. Acredita-se que pelo fato de o traço conter alto teor de polímero com maior granulometria, os corpos de prova apresentaram algumas deficiências em suas superfícies, fato este que influenciou no momento de realizar o ensaio com o esclerômetro.

De acordo com Medeiros (2012), as leituras através do esclerômetro são bastante sensíveis às variações locais do concreto, especialmente a inertes e vazios próximos da superfície e ainda a descontinuidades próximas da área ensaiada.

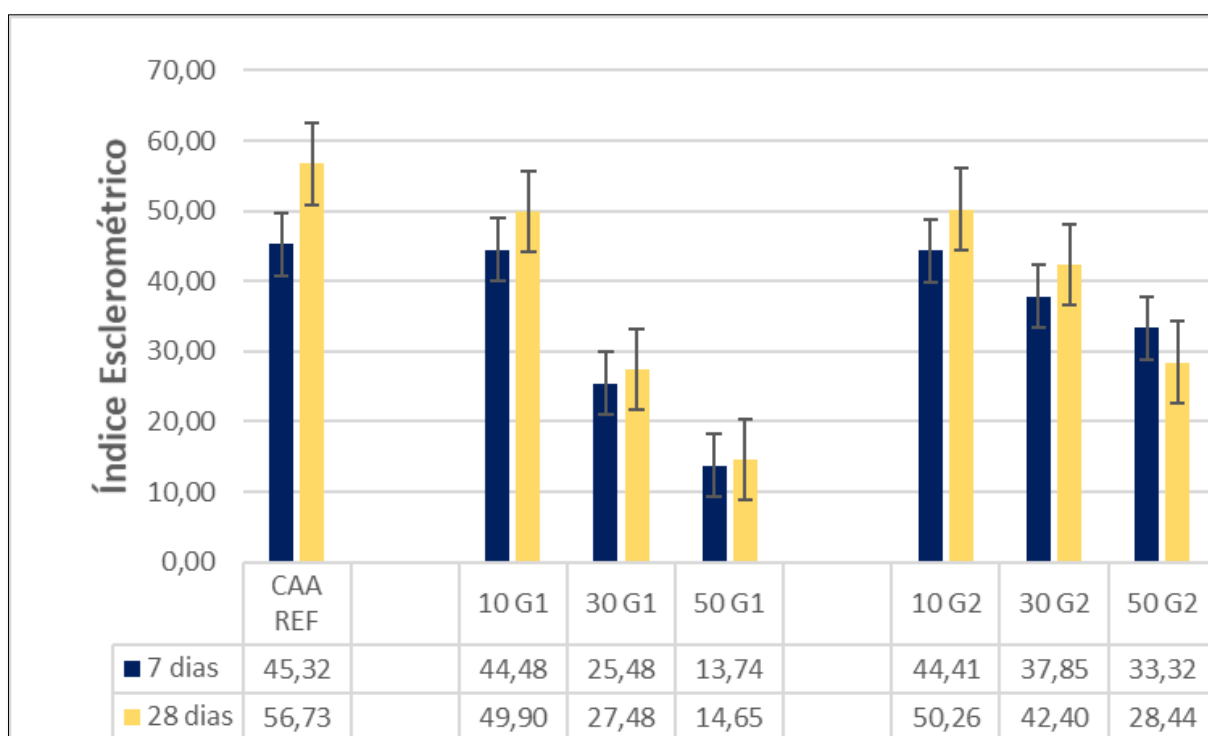


Figura 4.21: Resultado dos Índices Esclerométricos Efetivos aos 7 e 28 dias Separados por granulometrias de RBP (Fonte: AUTOR, 2020).

A seguir, estão apresentados na Figura 4.22 os valores de resistências em função dos índices esclerométricos efetivos aos 28 dias. Como esperado, a resistência do CAA REF foi a maior de todas e quanto maior porcentagem e menor a granulometria, menor a resistência obtida, este fato também é explicado pela presença do polímero nos concretos. O traço 50 G1, em função da grande quantidade e maior granulometria do polímero, proporcionou à superfície

dos corpos de prova regiões frágeis onde não se conseguiu fazer a leitura do índice esclerométrico.

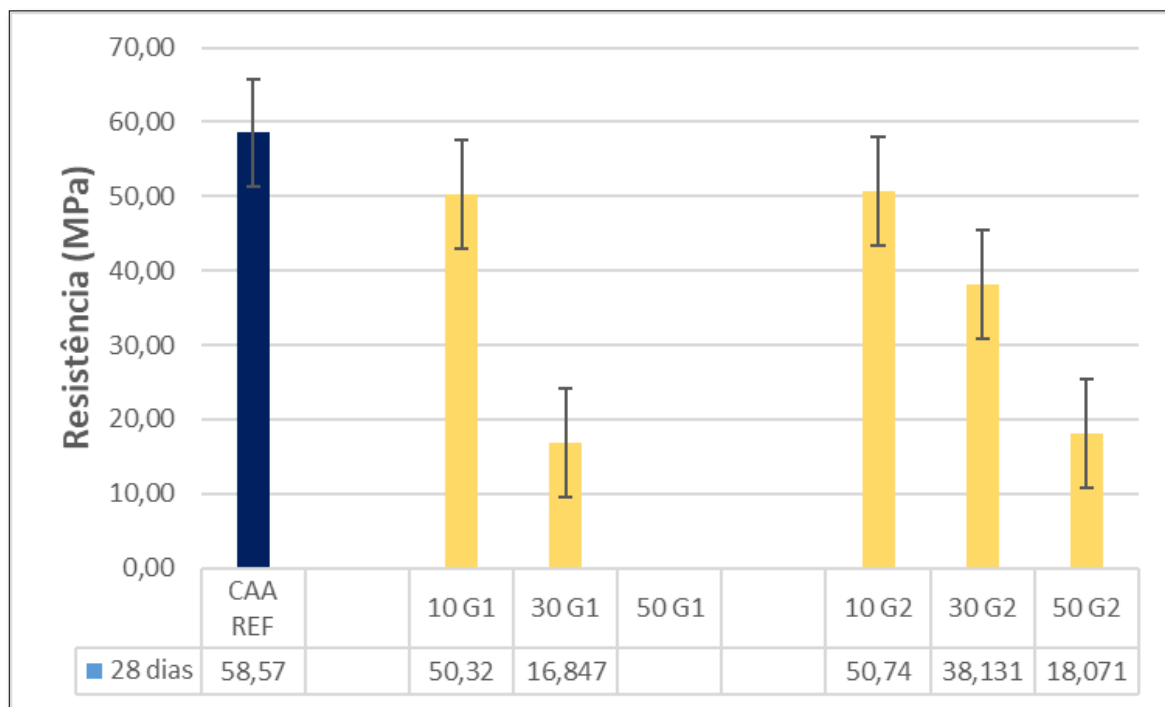


Figura 4.22: Resultado das Resistências Equivalentes aos Índices Esclerométricos Efetivos aos 28 dias (Fonte: AUTOR, 2020).

4.2.4.3 Módulo de Elasticidade Dinâmico e Estático

A Figura 4.23 ilustra os módulos de elasticidade dinâmicos (E_d) obtidos nos ensaios dos corpos de prova aos 7 e 28 dias. Pode-se concluir que para o mesmo teor de RBP, quanto maior a granulometria, maior também é o módulo de elasticidade dinâmico do concreto. Observa-se também que para a mesma granulometria, quanto maior o teor do polímero menor é o módulo dinâmico.

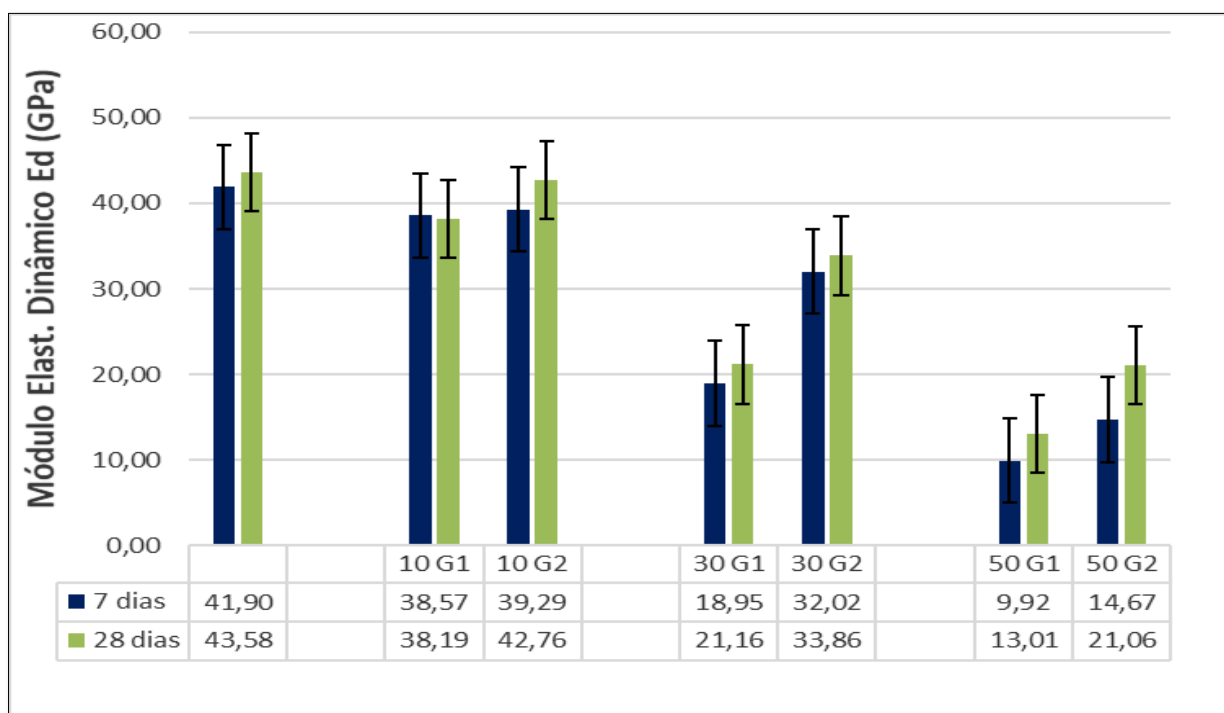


Figura 4.23: Resultado dos Módulos de Elasticidade Dinâmicos aos 7 e 28 dias (Fonte: AUTOR, 2020).

Para obtenção do Módulo de Elasticidade Estático, utilizou-se a expressão de *Popovics* através da Equação 13 a qual correlaciona o módulo estático com o dinâmico.

$$E_c = 0,107 \times E_d^{1,4} \times \rho^{-1} \quad \text{Equação 13}$$

Sendo:

E_c : Módulo de Elasticidade Estático (GPa);

E_d : Módulo de Elasticidade Dinâmico (GPa);

ρ : massa específica do concreto (kg/m^3).

Os resultados dos módulos de elasticidade dinâmicos E_d e estáticos E_c aos 7 e 28 dias, estão apresentados na Tabela 4.12.

Tabela 4.12: Resultado dos ensaios de módulo de elasticidade dinâmico e respectivos módulos de elasticidade estáticos

Traço	Ed (GPa)		Massa Específica do Concreto ρ (kg/m ³)		Ec (GPa)	
	7 dias	28 dias	7 dias	28 dias	7 dias	28 dias
CAA REF	41,90	43,58	2390,01	2374,64	33,28	35,38
10 G1	38,57	38,19	2333,78	2346,13	30,35	29,94
10 G2	39,29	42,76	2372,50	2348,66	30,63	34,85
30 G1	18,95	21,16	1923,78	1898,00	13,61	16,10
30 G2	32,02	33,86	2205,99	2169,62	24,74	26,40
50 G1	9,92	13,01	1737,18	1760,22	6,09	8,24
50 G2	14,67	21,06	1876,05	1980,21	9,75	15,00

Fonte: (AUTOR, 2020).

O módulo de elasticidade estático do concreto é um dos parâmetros utilizados no cálculo estrutural e, sob o aspecto de projeto, é muito importante conhecer as propriedades elásticas do concreto para que se conheçam as deformações dos elementos estruturais que o concreto compõe. Assim, nesta pesquisa, entre os dois tipos de módulos de elasticidade, teve-se apenas para o módulo de elasticidade estático.

O módulo de elasticidade é uma propriedade que está relacionada com a ductibilidade dos materiais, ou seja, as deformações que o material sofre antes da ruptura (TUTIKIAN e ISAIA; HELENE, 2011). Assim, pode-se observar pela Figura 4.24 que os módulos de elasticidade diminuíram quando comparados ao CAA REF, tanto aos 7 como aos 28 dias. Este fato se explica pelo polímero presente no concreto ser mais deformável que a areia substituída.

Hilal (2017) também observou que o módulo de elasticidade estático diminuiu com o aumento do tamanho e conteúdo da borracha de maneira semelhante à observada tanto na tração quanto na compressão.

Segundo LV et al. 2015, o módulo de elasticidade do concreto também é reduzido com a adição de borracha, no entanto, embora a redução da resistência seja altamente significativa, ocorre um aumento na flexibilidade do concreto.

Turatsinze e Garros (2008) também concluíram que o módulo de elasticidade também é afetado com a presença do polímero, mas sua variação não segue a relação empírica clássica com a resistência à compressão.

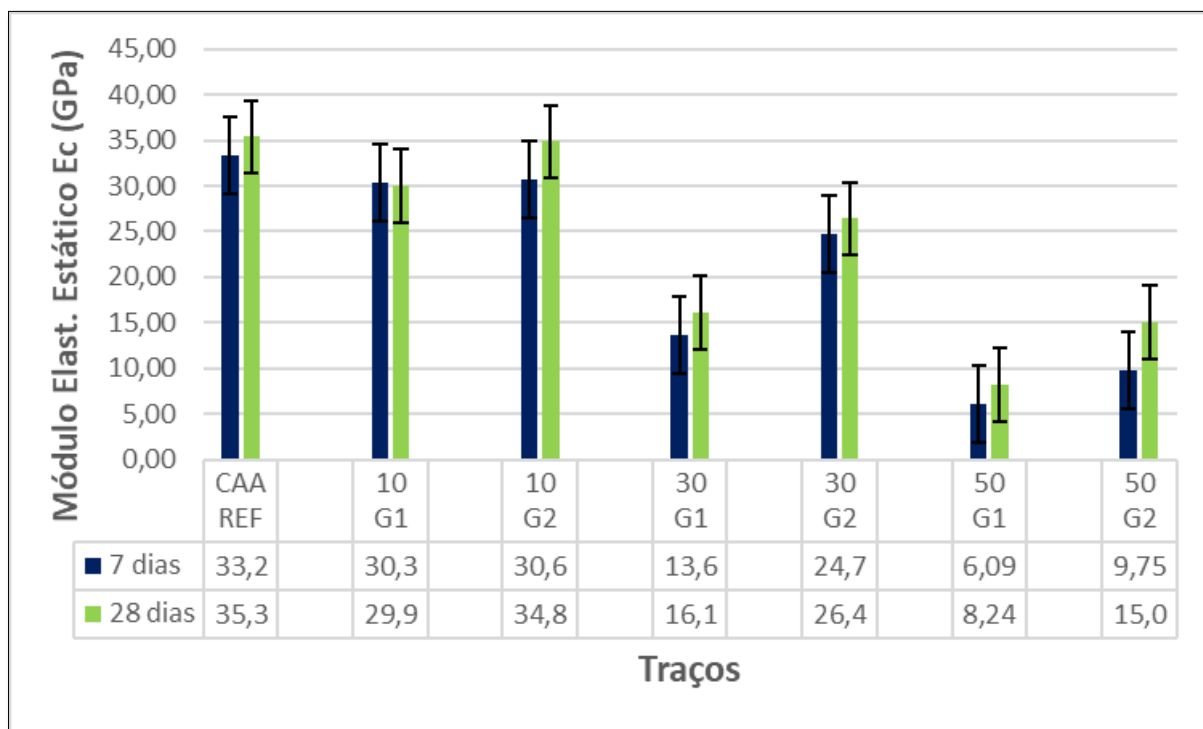


Figura 4.24: Resultado dos Módulos de Elasticidade Estáticos aos 7 e 28 dias (Fonte: AUTOR, 2020).

4.2.4.4 Absorção por Imersão, Índice de Vazios e Massa Específica

Seguiu-se os procedimentos descritos na (NBR 9778, 2009) para a realização dos ensaios para obtenção da absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica.

A Tabela 4.13 e a Figura 4.25 e Figura 4.26 apresentam os resultados obtidos para as três variáveis analisadas aos 28 dias.

O CAA REF por não conter o polímero, apresentou, como esperado, valores menores de massa específica, absorção de água e índice de vazios.

Observa-se também, pelos resultados apresentados, que em função dos maiores teores e granulometrias do polímero, o concreto teve maior índice de vazios proporcionando assim menores massas específicas. Com relação à absorção de água e ao índice de vazios, os resultados obtidos foram esperados, isto é, maiores teores e granulometrias de borracha proporcionaram valores maiores para ambas as variáveis.

Tabela 4.13: Resultados dos ensaios de Massa Específica Seca, Absorção de Água por Imersão e Índice de Vazios

Traço	Massa Específica (kg/m ³)	Absorção de Água (%)	Índice de Vazios (%)
CAA REF	2,32	1,86	4,32
10 G1	2,27	2,09	4,77
10 G2	2,30	2,29	5,27
30 G1	1,84	2,32	4,26
30 G2	2,17	2,68	5,82
50 G1	1,64	3,33	5,47
50 G2	1,82	5,16	9,42

Fonte: (AUTOR, 2020).

Mostrado pela Figura 4.25, todos os traços apresentaram massas específicas inferiores ao do CAA REF. Observou-se o esperado, ou seja, à medida que se aumentou a granulometria para o mesmo teor do polímero na mistura, a massa específica do concreto endurecido aumentou; e à medida que se aumentou o teor para a mesma granulometria do polímero na mistura, a massa específica do concreto endurecido diminuiu. Estes fatos se explicam pela massa específica da borracha ser inferior à da areia.

De acordo com Turatsinze e Garros (2008), o peso unitário do CAA emborrachado diminuiu devido à baixa densidade das partículas de borracha e ao aumento do conteúdo de ar.

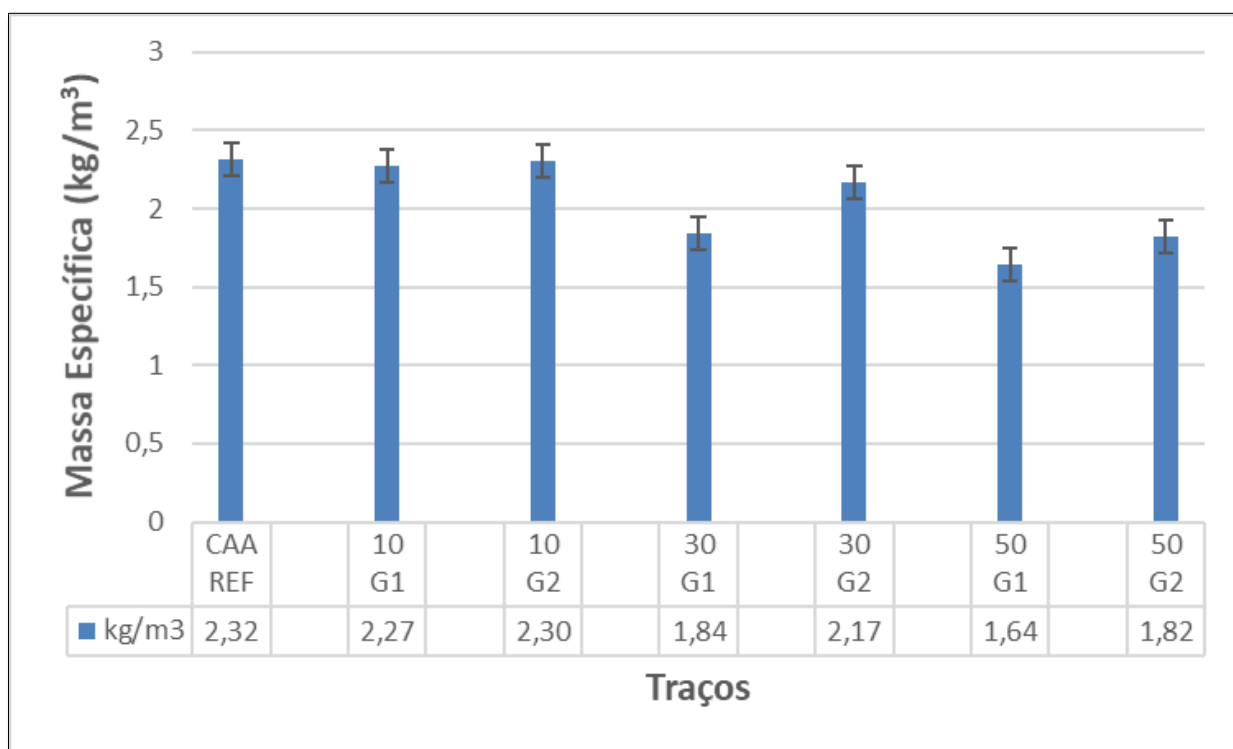


Figura 4.25: Resultado das Massas Específicas Secas (Fonte: AUTOR, 2020).

Observa-se pela Figura 4.26 que todos os concretos com polímero apresentaram maior absorção de água em relação ao CAA REF. Segundo a NBR 9781 (2013), a absorção de água representa a porosidade do concreto.

Ainda na Figura 4.26, também se observa que quanto maior o teor e a granulometria do polímero, maior valor de absorção foi obtido para cada concreto. Isto se explica pela presença do polímero na mistura proporcionando maior porosidade ao concreto endurecido.

Shu e Huang (2014) também verificaram que a presença da borracha proporciona um aumento de vazios no interior do concreto o que aumenta a porosidade e consequentemente a absorção de água no concreto.

Segundo Hesami et al. (2016), aumentar o teor de borracha de 0 para 15%, aumenta a absorção de água em 26,47%.

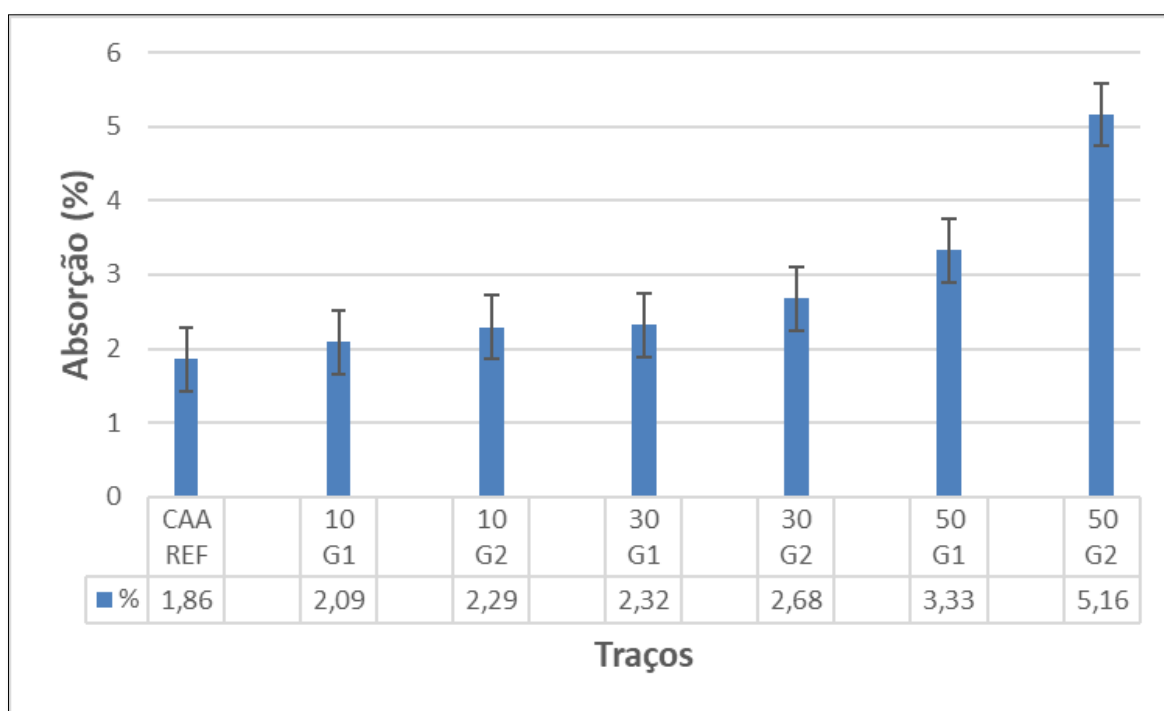


Figura 4.26: Resultado dos Ensaios de Absorção de Água (Fonte: AUTOR, 2020).

No que diz respeito aos índices de vazios, os resultados são parecidos aos da absorção, dada a relação direta entre estas duas variáveis. Verifica-se, pela Figura 4.27, que todos os traços apresentaram maior índice de vazios com relação ao CAA REF, e quanto maior o teor e a granulometria do polímero, maior o índice de vazios no concreto endurecido. Atribui-se este fato a incorporação de ar pelo polímero nas misturas, gerando assim maior índice de vazios nos concretos endurecidos.

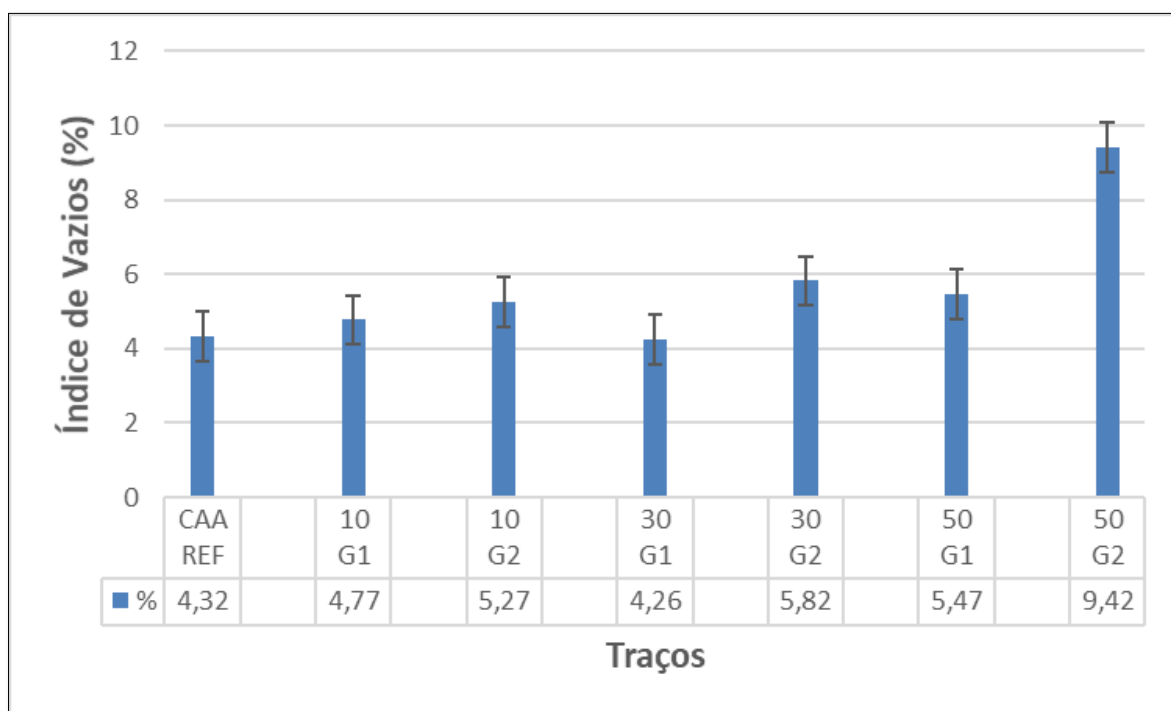


Figura 4.27: Resultado dos Ensaio de Índice de Vazios (Fonte: AUTOR, 2020).

4.2.4.5 *Frequência Natural e Fator de Amortecimento*

A Figura 4.28 e Figura 4.29 apresentam, respectivamente, os resultados das frequências naturais e dos fatores de amortecimento dos corpos de prova aos 7 e 28 dias.

Para a frequência natural, observa-se que todos os valores obtidos foram inferiores a 4 Hz, ou seja, os corpos de prova quando excitados apresentaram valores de frequências naturais em baixas frequências. Isto já era esperado devido ao alto valor da massa dos corpos de prova já que a frequência natural é inversamente proporcional a essa massa.

Pelo fato de os corpos de prova aos 28 dias terem ganho maior rigidez do que àqueles aos 7 dias, esperava-se que a frequência natural aos 28 dias apresentasse valor maior, porém, as diferenças encontradas foram muito pequenas.

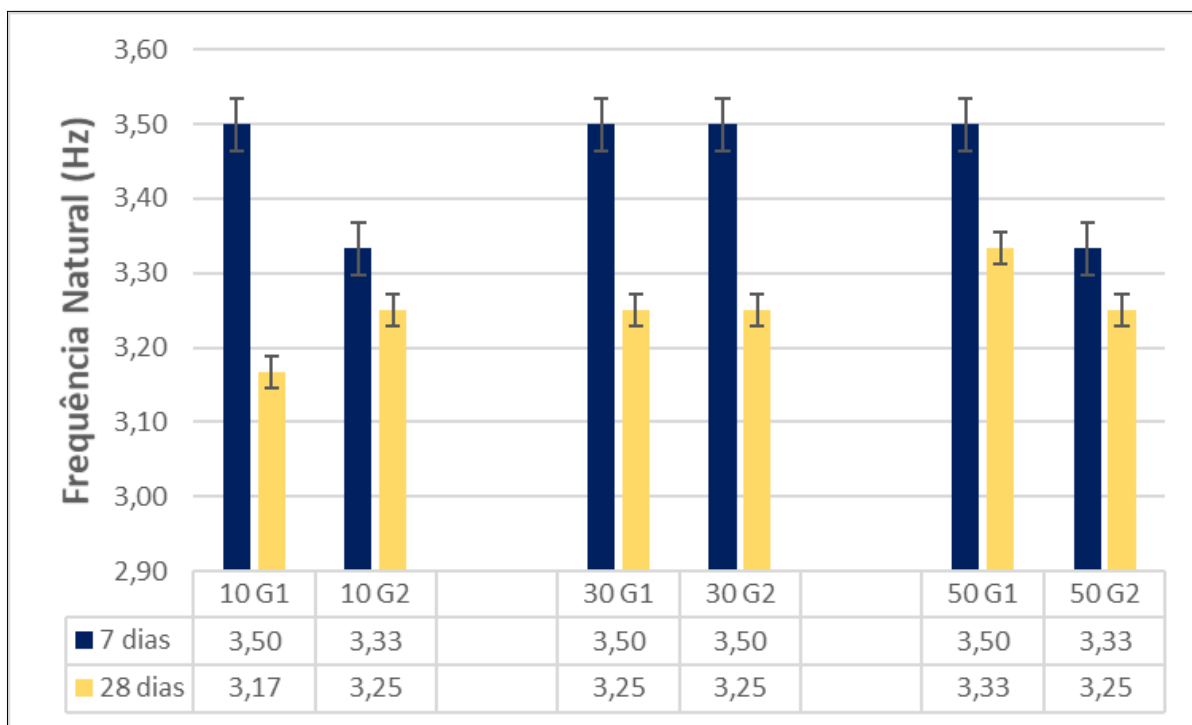


Figura 4.28: Frequência Natural dos concretos endurecidos aso 7 e 28 dias (Fonte: AUTOR, 2020).

Pela Figura 4.29, observa-se que o tempo de cura assim como o teor e a granulometria do RBP influenciaram nos valores do fator de amortecimento, ou seja, quanto maiores essas variáveis, maior também o fator de amortecimento. Isto se explica pelo fato de que quanto mais RBP com maiores granulometrias, maiores serão as possibilidades de amortecimento na peça.

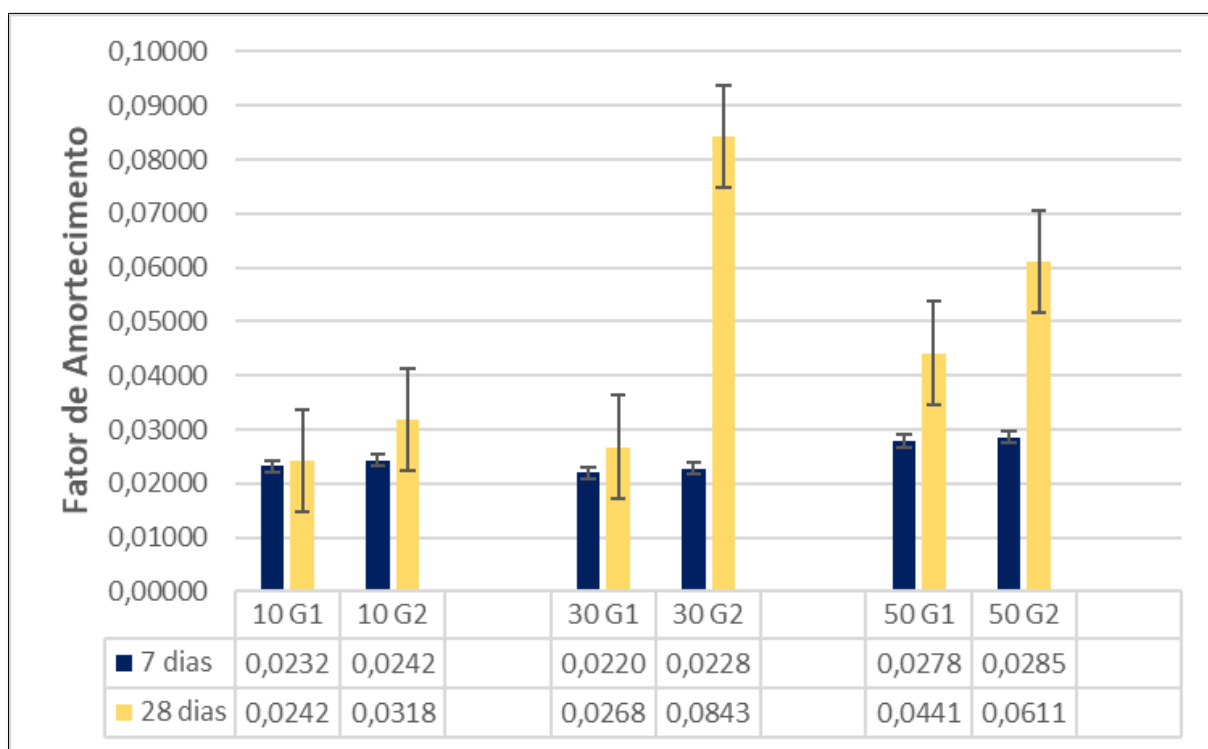


Figura 4.29: Fator de Amortecimento dos concretos endurecidos aos 7 e 28 dias (Fonte: AUTOR, 2020).

4.2.5 Análise da Microestrutura do concreto autoadensável

Com o objetivo de contribuir com os resultados dos ensaios físicos e mecânicos dos vários traços de concreto autoadensável desenvolvidos, foram avaliadas as microestruturas.

Realizaram-se análises topológicas através de microscopia eletrônica de varredura (MEV) em todos os traços desenvolvidos para avaliar a zona de transição (ZTI) entre os agregados e a pasta de cimento, além de observar a localização das fissuras e dos vazios presentes na matriz.

A Figura 4.30 apresenta a morfologia do CAA REF, ou seja, concreto sem adição de borracha. É bastante evidente o descolamento na zona de transição entre o agregado graúdo e a matriz de cimento, o que contribuiu com o surgimento de fissuras.

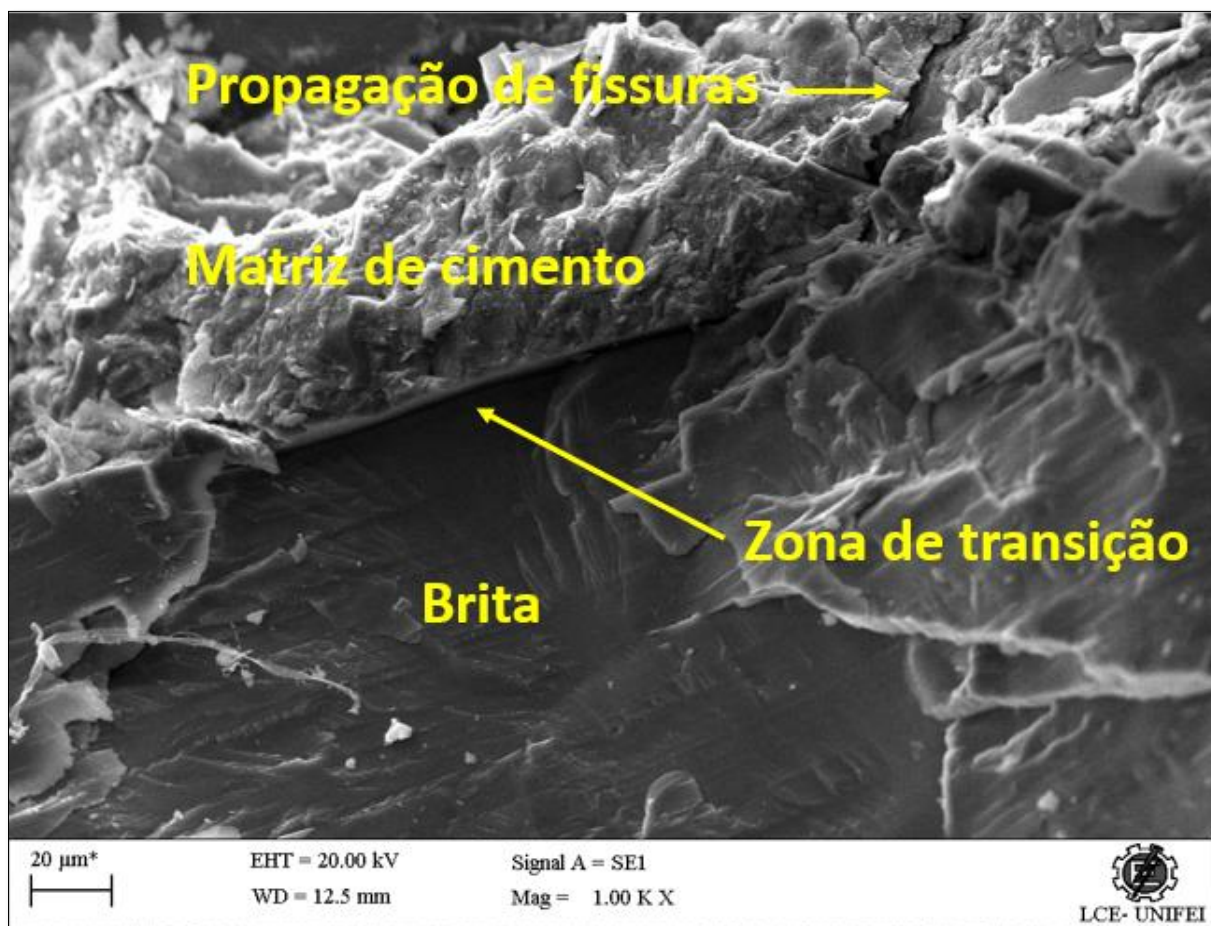


Figura 4.30: Imagens do concreto autoadensável de referência (CAA REF) sem borracha por MEV – modo elétrons secundários.

A Figura 4.31 e Figura 4.32 mostram a microestrutura do concreto autoadensável com 10% de borracha com a granulometria G1. Observa-se uma superfície com alguns vazios e, em função da pouca aderência entre borracha e concreto, percebe-se, claramente, o descolamento (zona de transição) entre as partes.

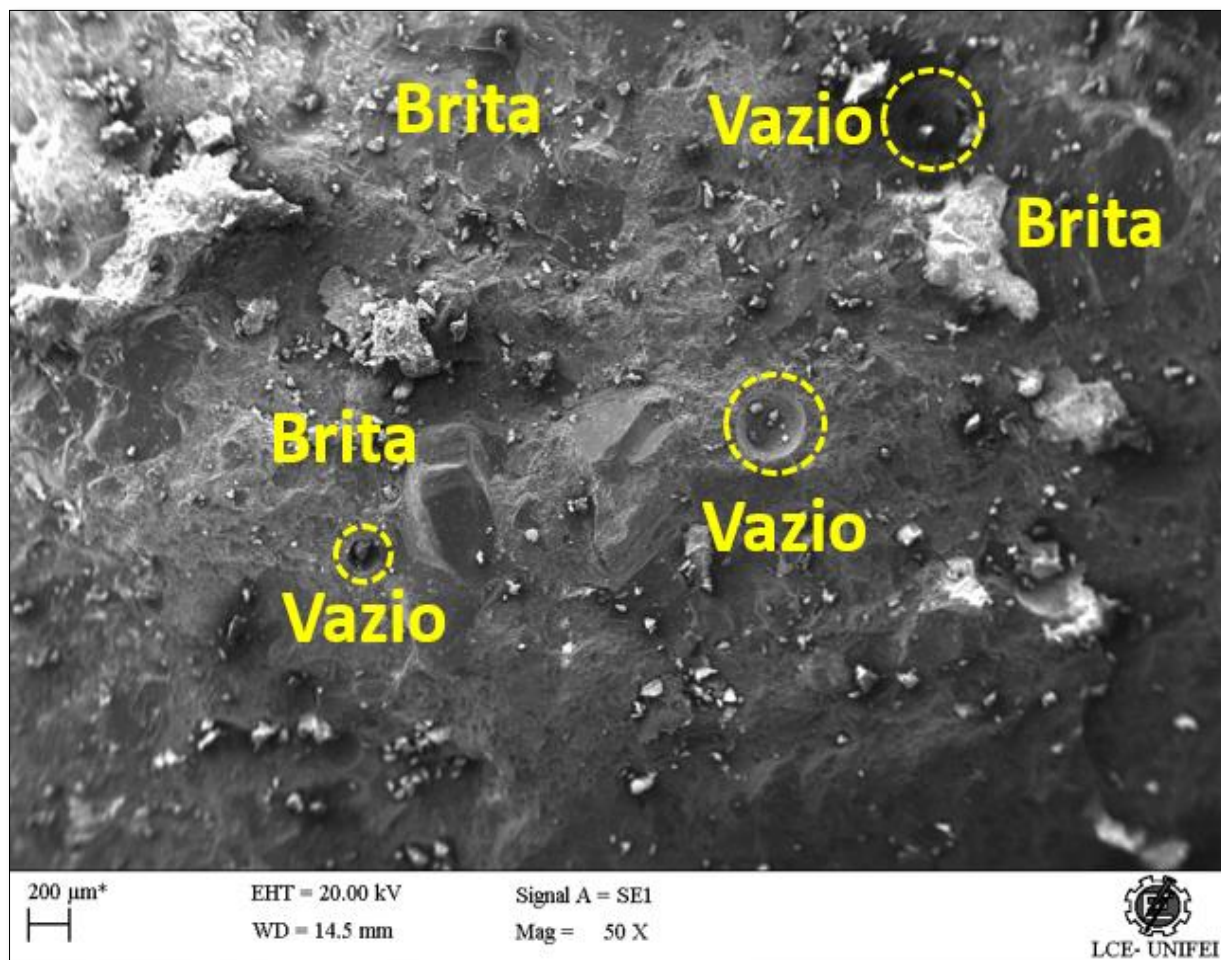


Figura 4.31: Microestrutura do concreto autoadensável com 10% de borracha com granulometria G1(10 G1) por MEV – modo elétrons secundários.

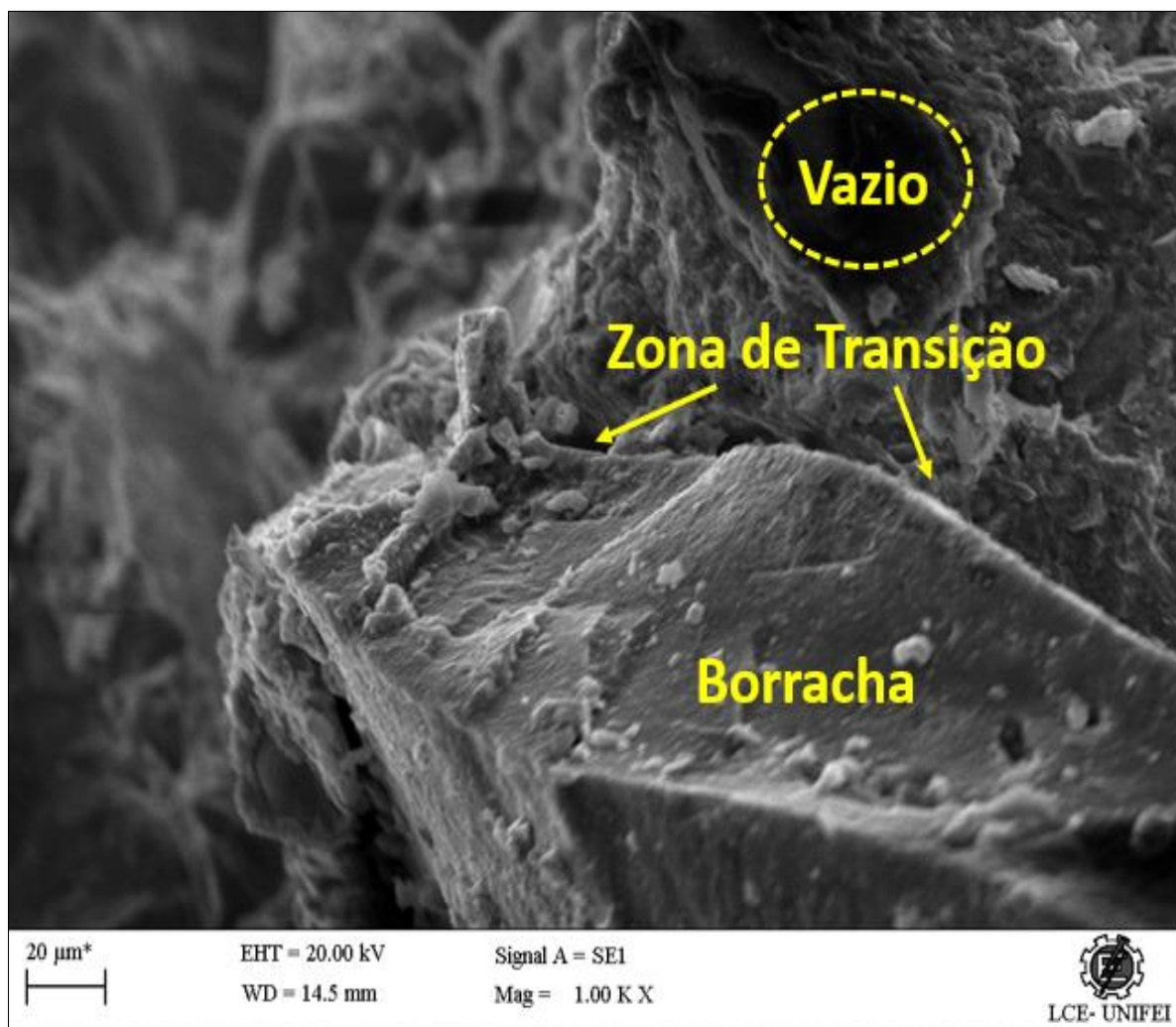


Figura 4.32: Microestrutura do concreto autoadensável com 10% de borracha com granulometria G1 (10 G1) por MEV – modo elétrons secundários

Nas Figura 4.33 a Figura 4.36, com 30% e 50% de borracha, respectivamente, e com granulometria G1, a matriz da pasta de cimento apresenta um aumento significativo de vazios proporcional ao teor de borracha, fato este que contribui com a redução da resistência mecânica dos concretos, facilitando o aparecimento e propagação de fissuras. Segundo Angelin *et al.* (2015), a presença de vazios está diretamente relacionada com as bolhas de ar aderidas à superfície da borracha que são arrastadas durante o amassamento do concreto, tornando a matriz extremamente frágil. Esta é a área mais frágil do concreto e, visto que a borracha possui baixa resistência, pode-se considerar o polímero como um vazio no concreto, reduzindo sua resistência mecânica e facilitando a propagação de fissuras e rupturas.

É possível verificar o aumento da quantidade de poros e de cristais de hidratação, a zona de transição entre o resíduo de borracha e a matriz cimentícia é bastante evidenciada.

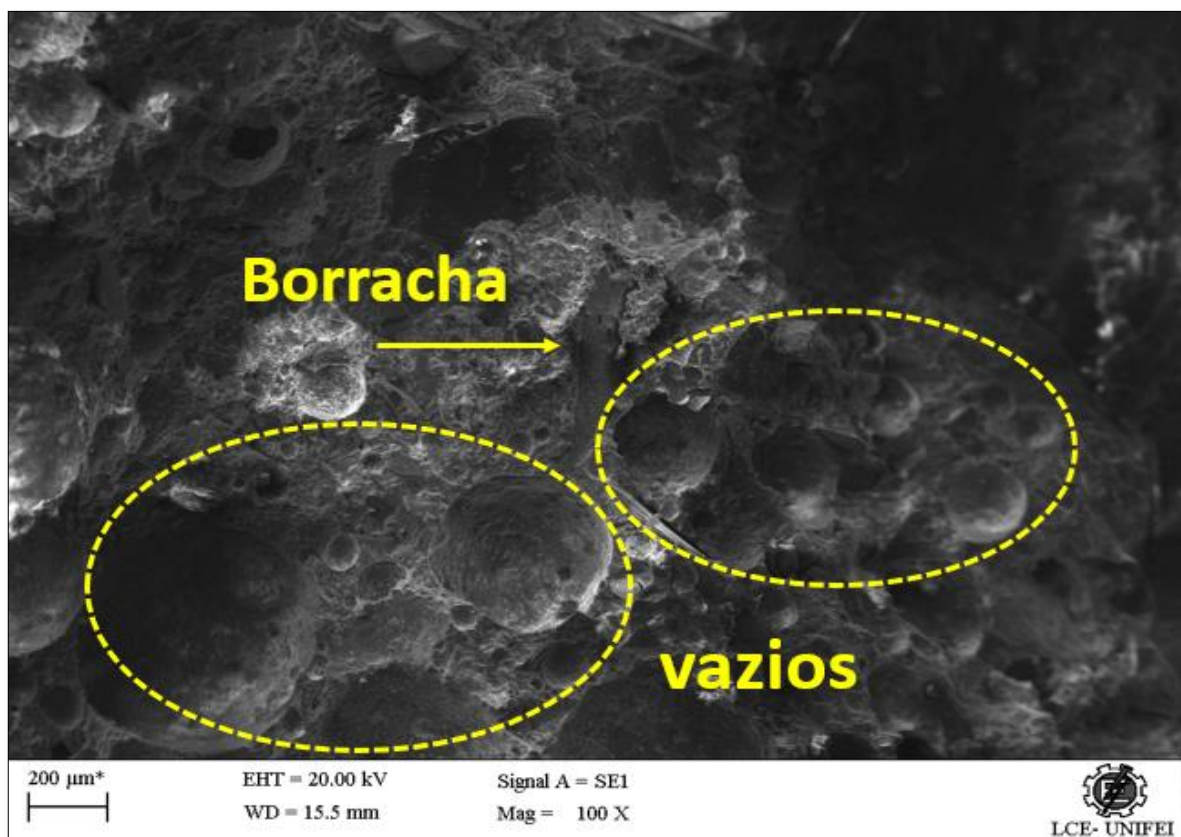


Figura 4.33: Microestrutura do concreto autoadensável com 30% de borracha com granulometria G1 (30 G1) por MEV – modo elétrons secundários.

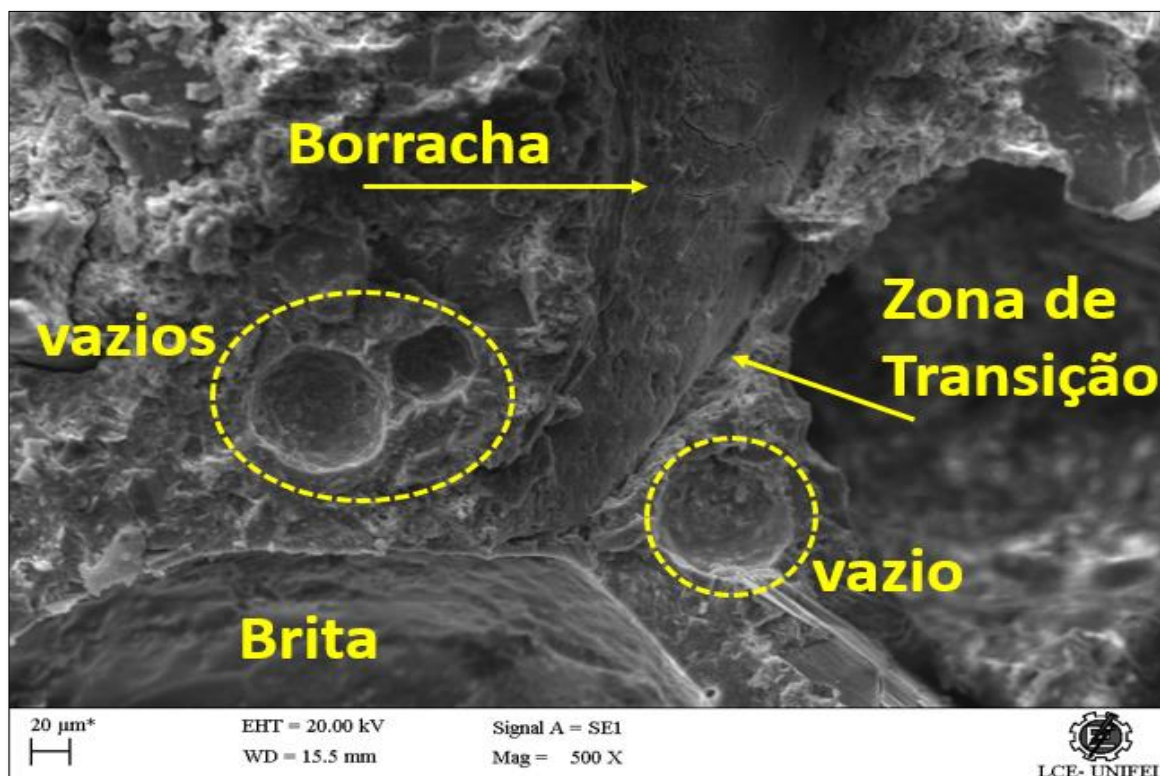


Figura 4.34: Microestrutura do concreto autoadensável com 30% de borracha com granulometria G1 (30 G1) por MEV – modo elétrons secundários.

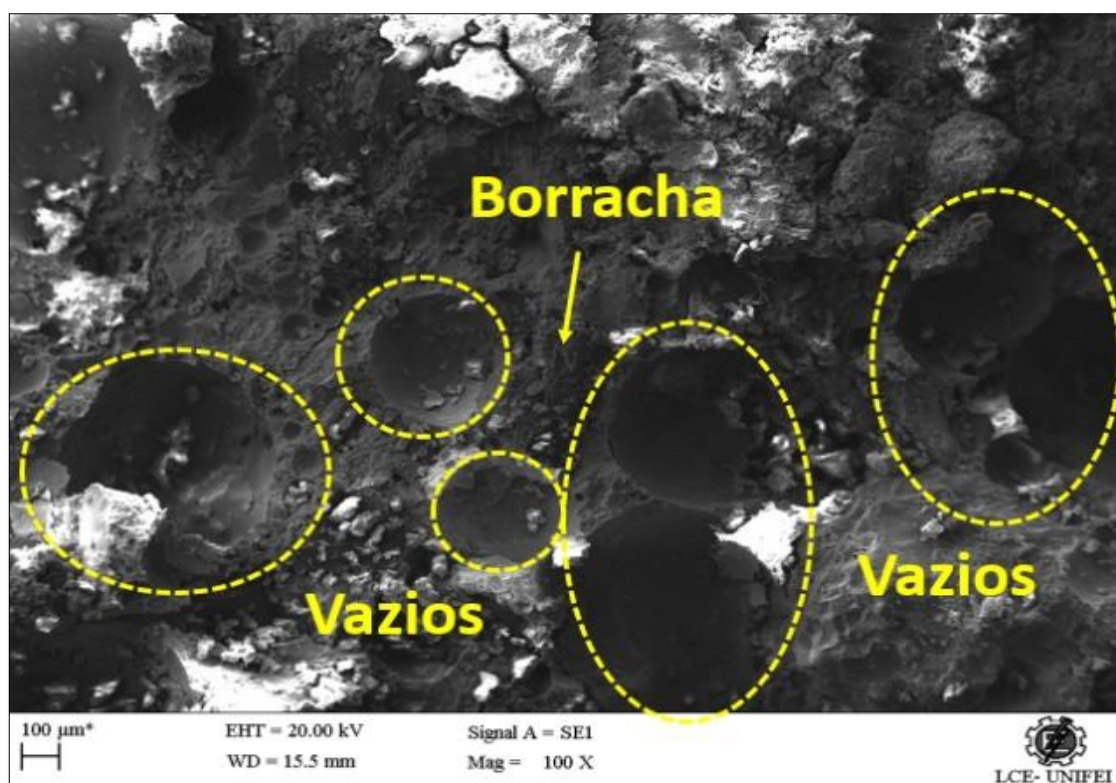


Figura 4.35: Microestrutura do concreto autoadensável com 50% de borracha com granulometria G1 (50 G1) por MEV – modo elétrons secundários.

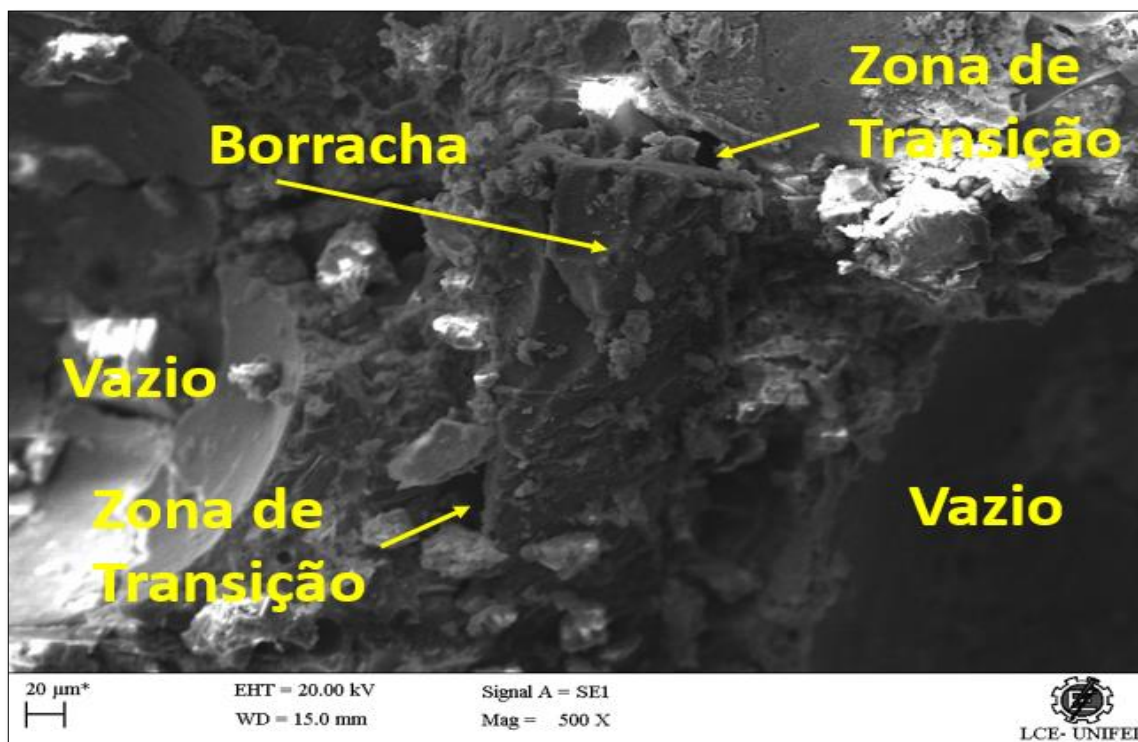


Figura 4.36: Microestrutura do concreto autoadensável com 50% de borracha com granulometria G1 (50 G1) por MEV – modo elétrons secundários.

Nos concretos com 10%, 30% e 50% de borracha com granulometria G2, pode-se notar, pelas Figura 4.37 a Figura 4.39 além do grande número de vazios, as zonas de transições e o total desprendimento da borracha com a matriz de cimento. Este fato ocorre em função da maior granulometria da borracha e da não aderência entre as partes.

É possível verificar que, com teores crescentes de incorporação de resíduos de borracha nas misturas há aumento do número e tamanho dos poros, microfissuras, resultando em uma estrutura menos compacta e marcante zona de transição. Estas evidências justificam a diminuição das resistências à compressão e à tração na flexão.

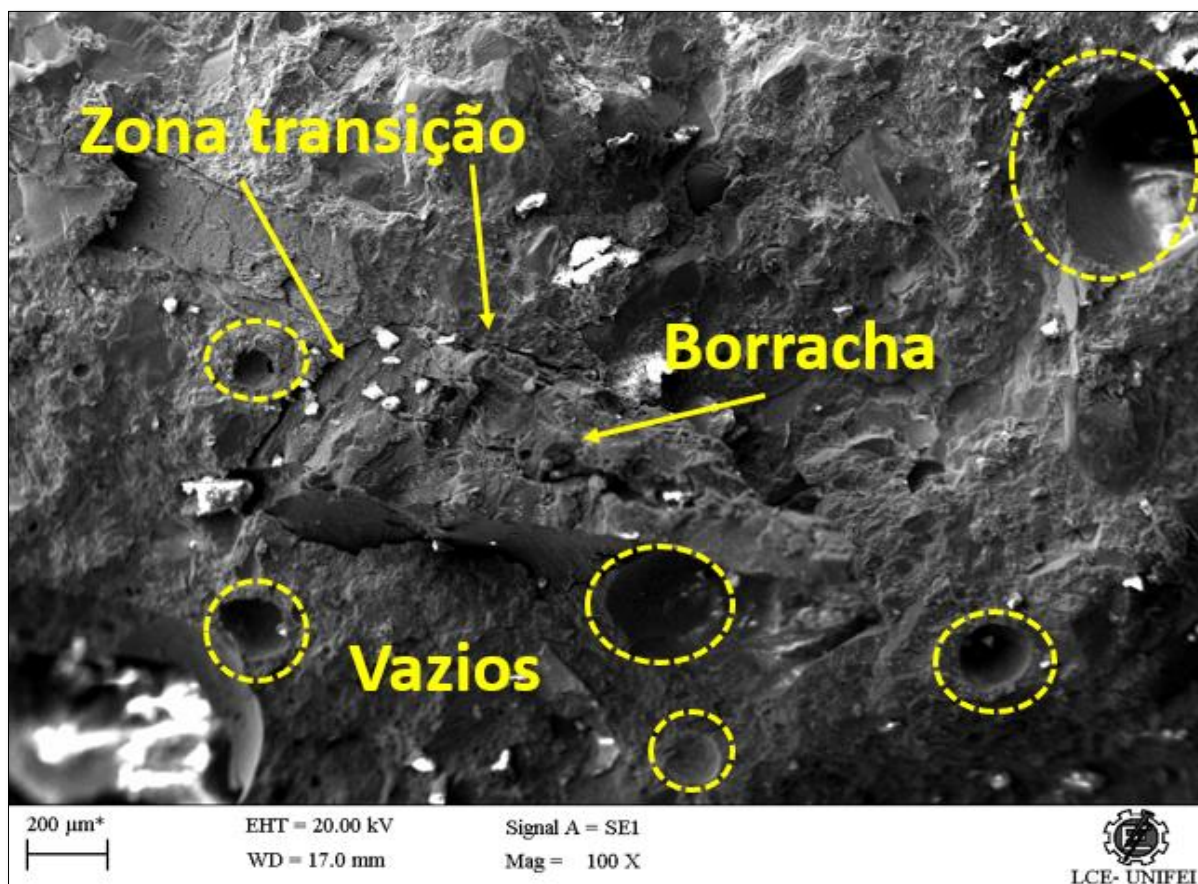


Figura 4.37: Microestrutura do concreto autoadensável com 10% de borracha com granulometria G2 (10 G2) por MEV – modo elétrons secundários.



Figura 4.38: Microestrutura do concreto autoadensável com 30% de borracha com granulometria G2 (30 G2) por MEV – módulo elétrons secundários.

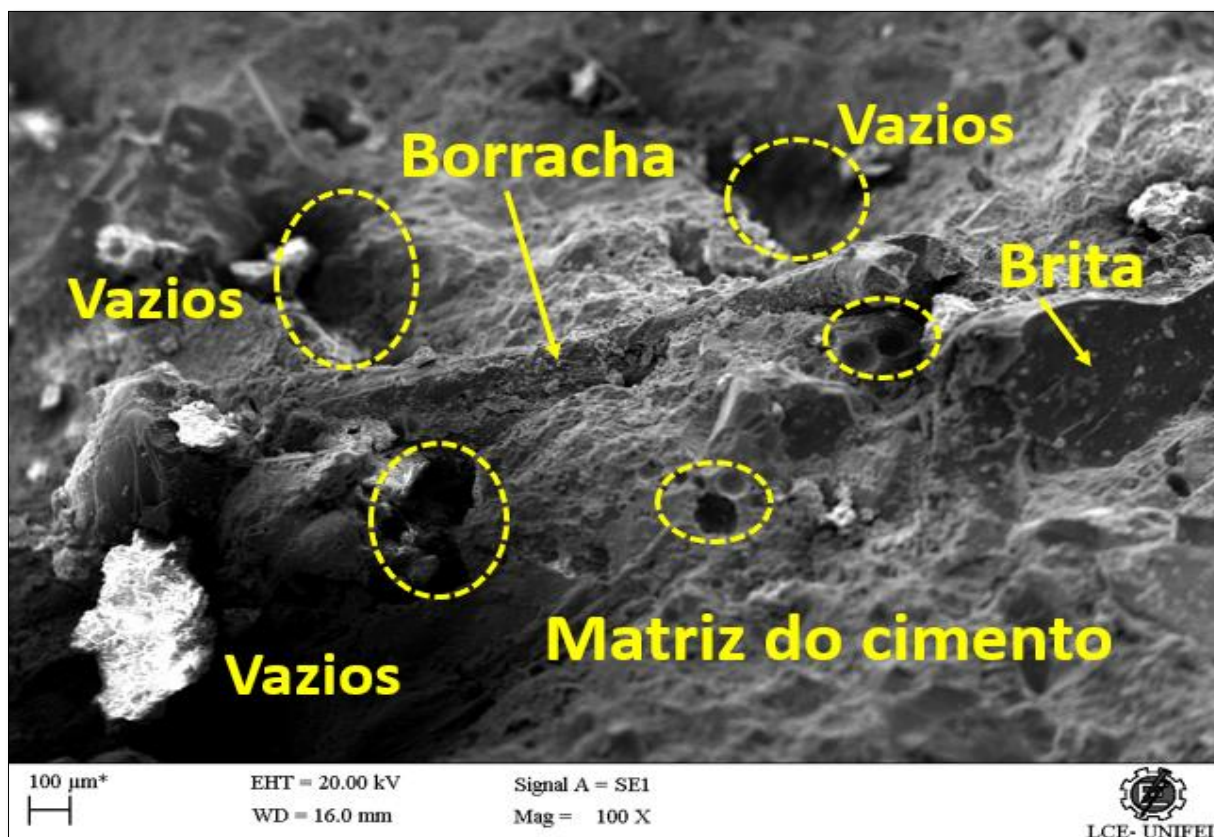


Figura 4.39: Microestrutura do concreto autoadensável com 50% de borracha com granulometria G2 (50 G2) por MEV – módulo elétrons secundários.

4.2.6 Análise Estatística

4.2.6.1 Planejamento de Experimentos

Para determinar as variáveis que exerceram maior influência no desempenho da fabricação dos concretos, a análise estatística desta pesquisa foi realizada com base na técnica DOE. Foram três as variáveis de testes analisadas: uma variável categórica que é o tempo de cura (7 e 28 dias); e duas variáveis contínuas, teor e granulometria da borracha.

Fixou-se quatro ensaios para analisar a influência das variáveis, são elas: frequência natural, fator de amortecimento, compressão axial e módulo de elasticidade estático. A relação destas variáveis, dos ensaios e respectivos valores, está apresentada na Tabela 4.14.

Tabela 4.14: DOE - Relação das variáveis e dos ensaios

Variáveis Contínuas		Variável Categórica		Ensaio		
Teor de Borracha (%)	Granulometria (*)	Tempo de Cura (dias)	Frequência Natural (Hz)	Fator de Amortecimento	Compressão Axial (MPa)	Módulo de Elasticidade Estático (GPa)
10	G1	7	3,50	0,04110	36,567	30,014
10	G1	28	3,25	0,01758	48,790	33,645
10	G2	7	3,25	0,01508	46,734	30,243
10	G2	28	3,25	0,03968	48,504	34,507
10	G1	7	3,50	0,01276	37,134	30,482
10	G1	28	3,00	0,03283	45,563	22,028
10	G2	7	3,50	0,02333	48,555	31,257
10	G2	28	3,25	0,01132	50,713	36,118
10	G1	7	3,50	0,01575	39,426	30,545
10	G1	28	3,25	0,02231	45,703	34,160
10	G2	7	3,25	0,03443	46,225	30,374
10	G2	28	3,25	0,04446	52,496	33,916
30	G1	7	3,50	0,01901	17,927	13,949
30	G1	28	3,25	0,04167	21,499	15,668
30	G2	7	3,50	0,02071	16,157	25,673
30	G2	28	3,25	0,06388	27,788	27,800
30	G1	7	3,50	0,02681	18,920	14,548
30	G1	28	3,25	0,02264	21,626	17,374
30	G2	7	3,50	0,02467	16,151	23,386
30	G2	28	3,50	0,10412	27,273	27,289
30	G1	7	3,50	0,02025	17,590	12,359
30	G1	28	3,25	0,01612	20,308	15,268
30	G2	7	3,50	0,02313	12,707	25,131
30	G2	28	3,00	0,08498	30,481	26,501
50	G1	7	3,50	0,02722	5,666	5,378
50	G1	28	3,25	0,04174	9,978	9,992
50	G2	7	3,25	0,03009	11,115	12,486
50	G2	28	3,25	0,03788	10,632	14,971
50	G1	7	3,50	0,02677	4,730	6,348
50	G1	28	3,25	0,03827	7,124	7,935
50	G2	7	3,50	0,02377	9,978	9,183
50	G2	28	3,25	0,08002	12,274	16,087
50	G1	7	3,50	0,02964	6,366	6,388
50	G1	28	3,50	0,05250	11,115	8,433
50	G2	7	3,25	0,03187	7,124	7,483
50	G2	28	3,25	0,06539	3,801	14,938

Fonte: (AUTOR, 2020).

(*) G1: G1 < 0,6 mm; G2: 4,8 mm > G2 ≥ 0,6 mm.

4.2.6.2 Análise de Variância (ANOVA)

Neste trabalho foi utilizada a técnica estatística ANOVA (*Analisis of Variance*) para comparação dos níveis das variáveis de testes.

A Análise de Variância é uma ferramenta para comparação de vários grupos ou estratos de interesse (MONTGOMERY, 1991). A ANOVA permite investigar a existência de diferenças significativas entre os grupos estudados.

Na Tabela 4.15 estão apresentadas as variáveis de testes e respectivos níveis.

Tabela 4.15: Variáveis de Testes e respectivos níveis

Variáveis de Testes		Níveis
Variável Categórica	Tempo de Cura	7 dias
		28 dias
Variáveis Contínuas	Teor de Borracha	10%
		30%
		50%
	Granulometria da Borracha	G1 < 0,6 mm
		4,8 mm > G2 ≥ 0,6 mm

Fonte: (AUTOR, 2020).

4.2.6.3 Gráficos de Efeitos Principais

As Figura 4.40 a Figura 4.43 apresentam os gráficos de efeitos principais correspondentes a cada ensaio.

Observa-se pela Figura 4.40 que a média da frequência natural dos concretos com teor de 10 % de borracha (média = 3,31 Hz) é a menor e está abaixo da média total dos dados (3,35 Hz). Os concretos com teores de 30 % e 50 % de borracha apresentaram resultados acima da média total, e os concretos com teor de 30 % de borracha demonstram a maior média (3,38 Hz).

Observa-se também que a média do grupo com menor granulometria de RBP (menor que 0,6 mm) apresenta valor de frequência natural acima da média total e acima da média do grupo com maior granulometria de RBP.

Com relação ao tempo de cura, a média da frequência natural apresentou-se maior no grupo de 7 dias de cura.

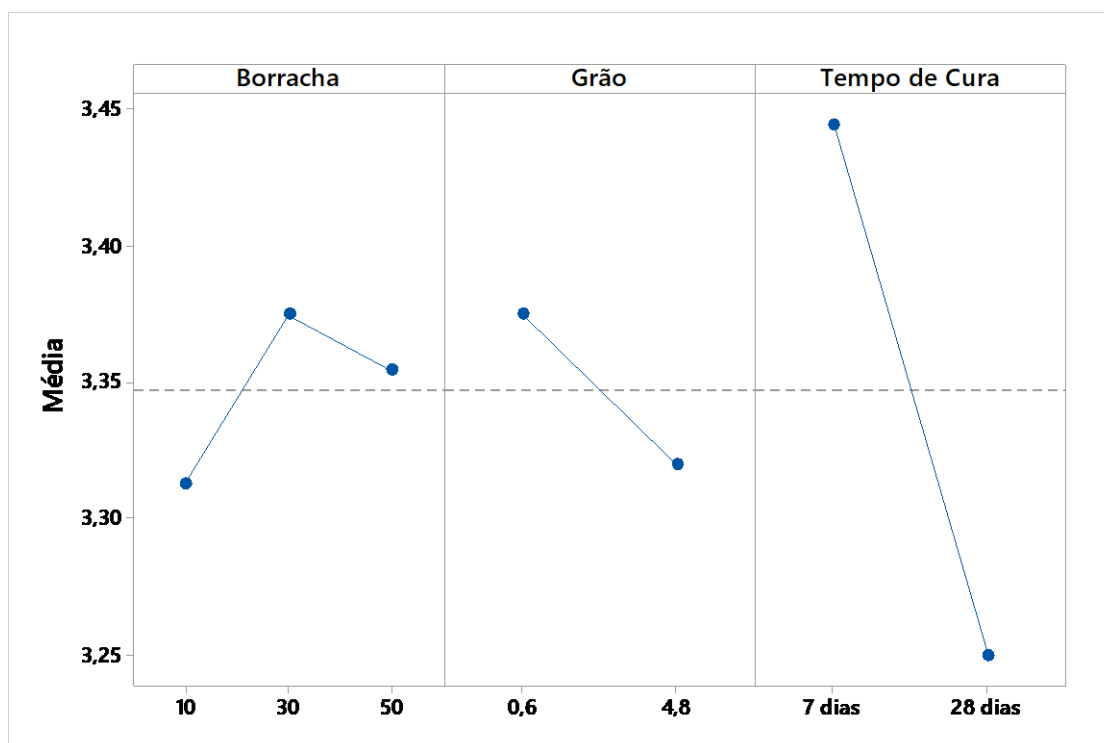


Figura 4.40: Efeitos Principais para Freqüência Natural. Média dos Dados (Fonte: AUTOR, 2020.)

Com relação ao fator de amortecimento (Figura 4.41), observa-se uma influência maior das variáveis, porém, ainda muito pequena. Quanto menor o teor de borracha, observa-se também, uma maior influência no fator de amortecimento. As granulometrias do RBP também não tiveram nenhuma influência significativa, porém, quanto menor esta variável, menor também o fator de amortecimento. Da mesma forma que na freqüência natural, o tempo de cura também é a variável de maior influência no fator de amortecimento, e quanto maior o número de dias, maior o fator de amortecimento.

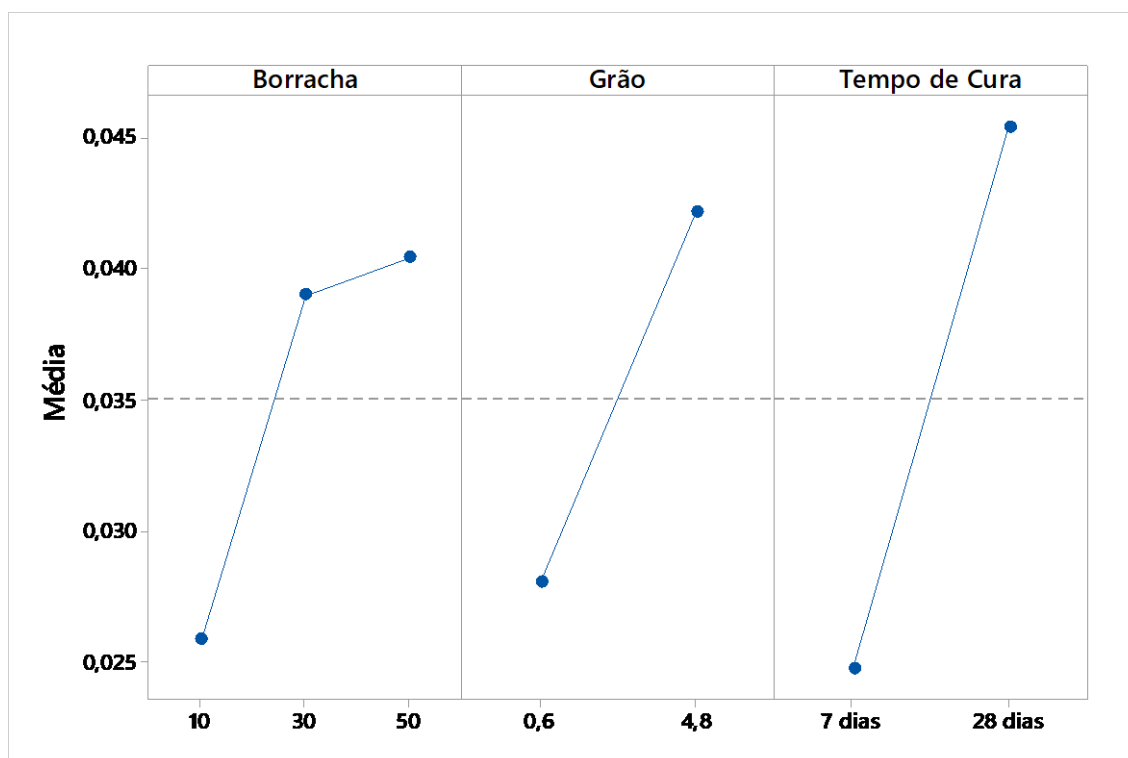


Figura 4.41: Efeitos Principais para Fator de Amortecimento. Média dos Dados (Fonte: AUTOR, 2020).

De acordo com a Figura 4.42, o teor de borracha foi a variável que mais influenciou na resistência à compressão axial dos concretos. A média do grupo com 10% de RBP apresentou maior resistência à compressão enquanto o grupo com 50% apresentou o menor valor. Com relação a granulometria e ao tempo de cura, a média dos grupos ficaram próximas da média total (25 MPa), isto significa que esses fatores não apresentam influência significativa na resistência à compressão axial.

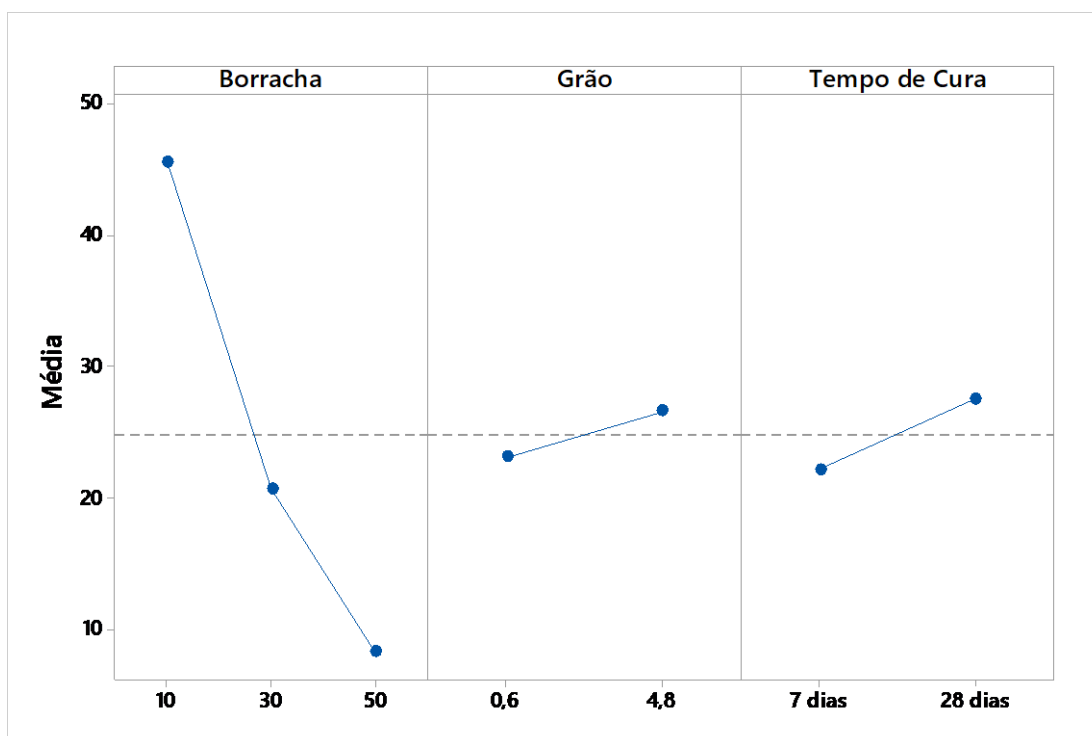


Figura 4.42: Efeitos Principais para Compressão Axial. Média dos Dados (Fonte: AUTOR, 2020).

Analisando a Figura 4.43, conclui-se que o grupo com 10% de RBP apresenta maior média no módulo de elasticidade estático, enquanto o grupo com 30% e 50%, apresentam médias igual e menor que a média total, respectivamente. Estes resultados são compatíveis com os resultados do fator de amortecimento, ou seja, enquanto o módulo de elasticidade estático reduz com o aumento do teor de RBP, o fator de amortecimento aumenta.

Quanto maior a granulometria da borracha e o tempo de cura, observa-se uma média nos grupos acima da média total.

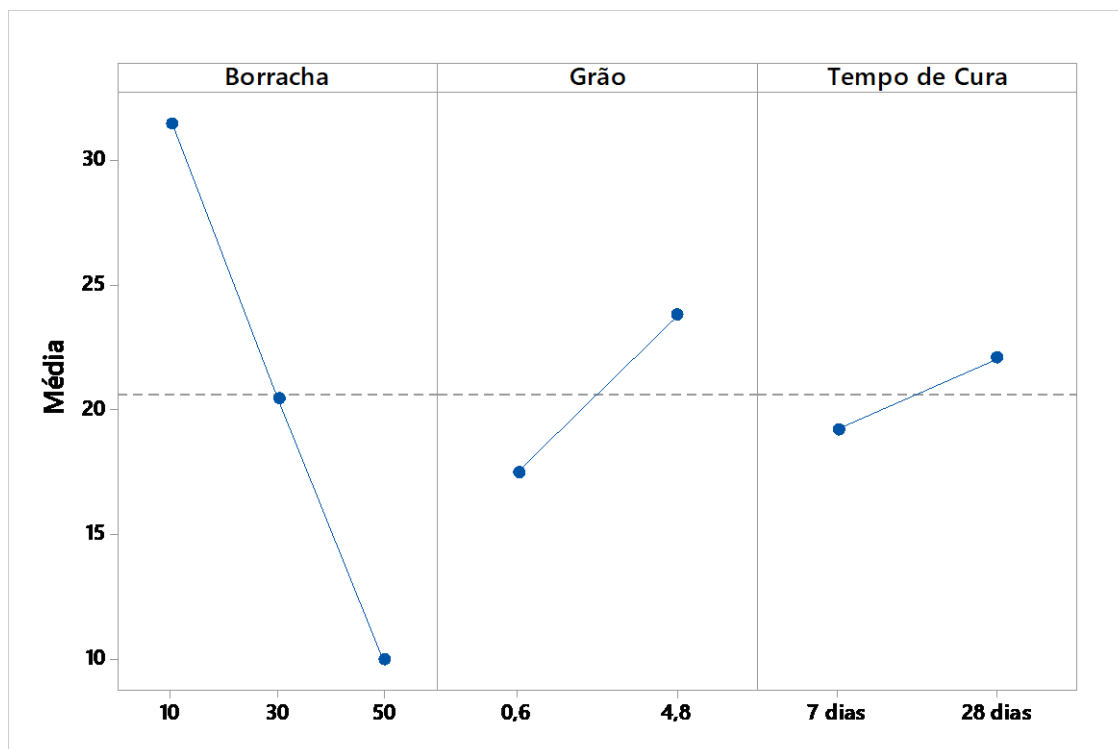


Figura 4.43: Efeitos Principais para Módulo de Elasticidade Estático. Média dos Dados (Fonte: AUTOR, 2020).

4.2.6.4 Gráficos de Pareto

Resultados do gráfico de Pareto mostram os valores absolutos dos efeitos padronizados do efeito maior para o menor efeito. O gráfico também possui uma linha de referência para indicar quais efeitos são estatisticamente significativos, ou seja, as barras que cruzam a linha de referência são estatisticamente significativas. A linha de referência para significância estatística depende do nível de significância (indicado por α), que neste estudo utilizou-se confiança de 95 %, ou seja, $\alpha = 0,05$.

A Figura 4.44 mostra a relevância significativa dos fatores do processo na resposta de frequência natural. Observa-se que somente o fator C (tempo de cura), foi estatisticamente significativo para esta resposta, fato este que não foi observado para os outros fatores nem mesmo na combinação entre eles. Comparando-se estes resultados com aqueles obtidos anteriormente (Figura 4.40 – Efeitos Principais para Frequência Natural), conclui-se que são compatíveis, ou seja, a frequência natural para os fatores A (Teor de borracha) e B (Granulometria da borracha) também variou muito pouco.

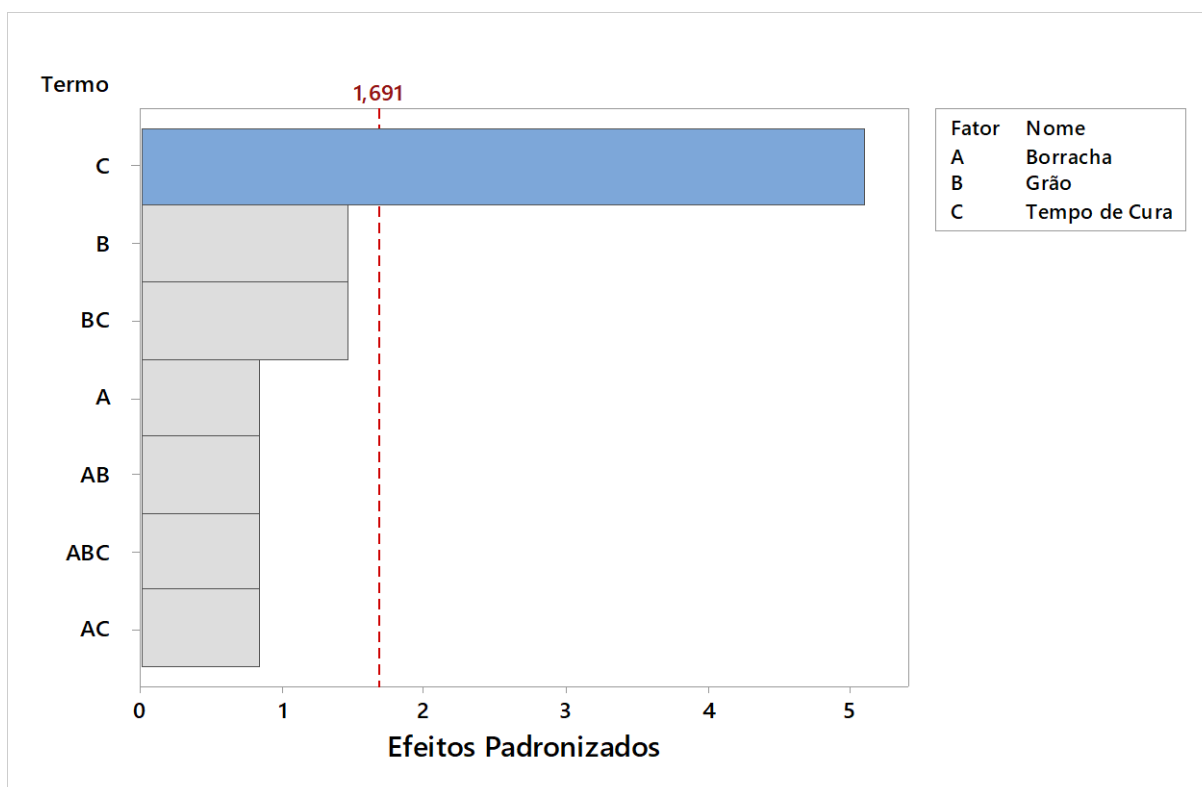


Figura 4.44: Gráfico de Pareto para Frequência Natural (Fonte: AUTOR, 2020).

Com relação ao fator de amortecimento (Figura 4.45), todos os fatores e a combinação entre eles foram estatisticamente significativos, isto é, cruzaram a linha de referência (1,711). Observa-se que o tempo de cura é o fator mais significativo e a combinação entre o teor (fator A) e a granulometria da borracha (fator B), é menos significativa. Estes resultados também confirmam àqueles já apresentados pela Figura 4.41.

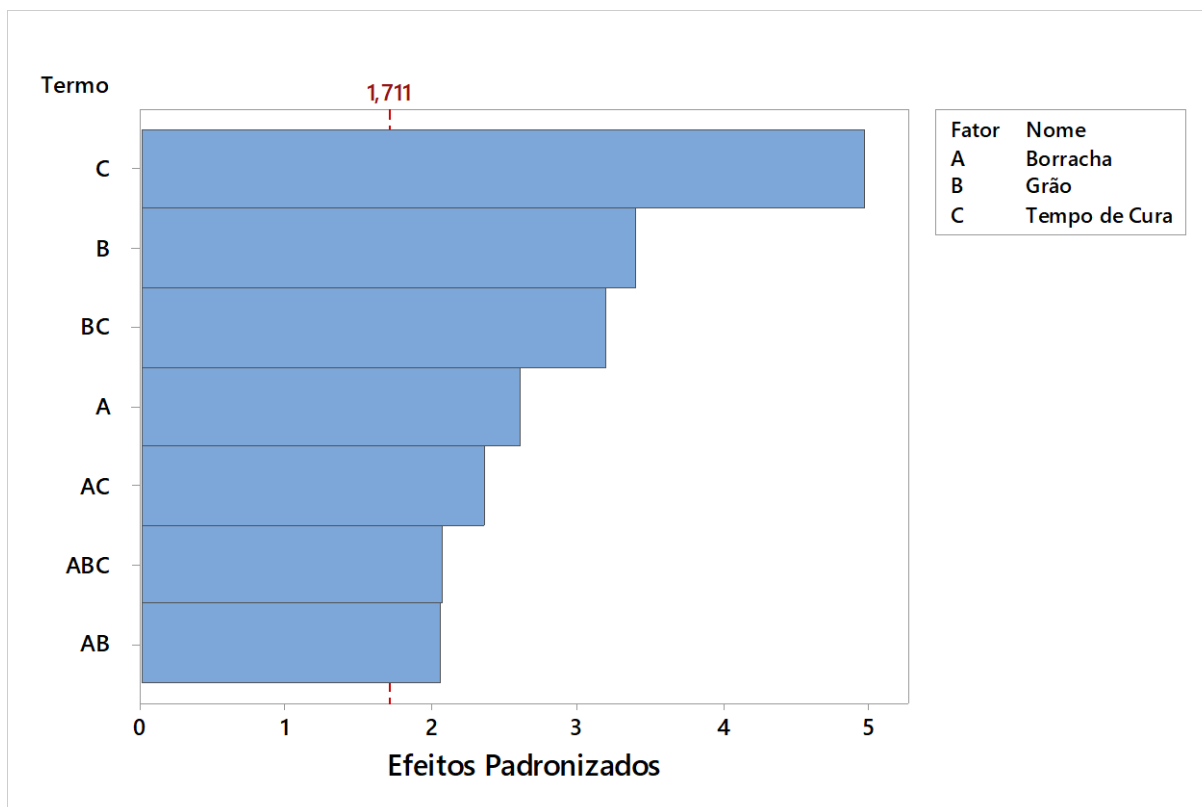


Figura 4.45: Gráfico de Pareto para Fator de Amortecimento (Fonte: AUTOR, 2020).

Pode-se observar pela Figura 4.46 que, com exceção da combinação entre a granulometria da borracha e o tempo de cura, todos os fatores e as combinações entre eles são significativos para os resultados da compressão axial. O teor da borracha é, neste caso, o fator mais significativo, ou seja, a quantidade de borracha tem grande influência na resistência à compressão axial do concreto.

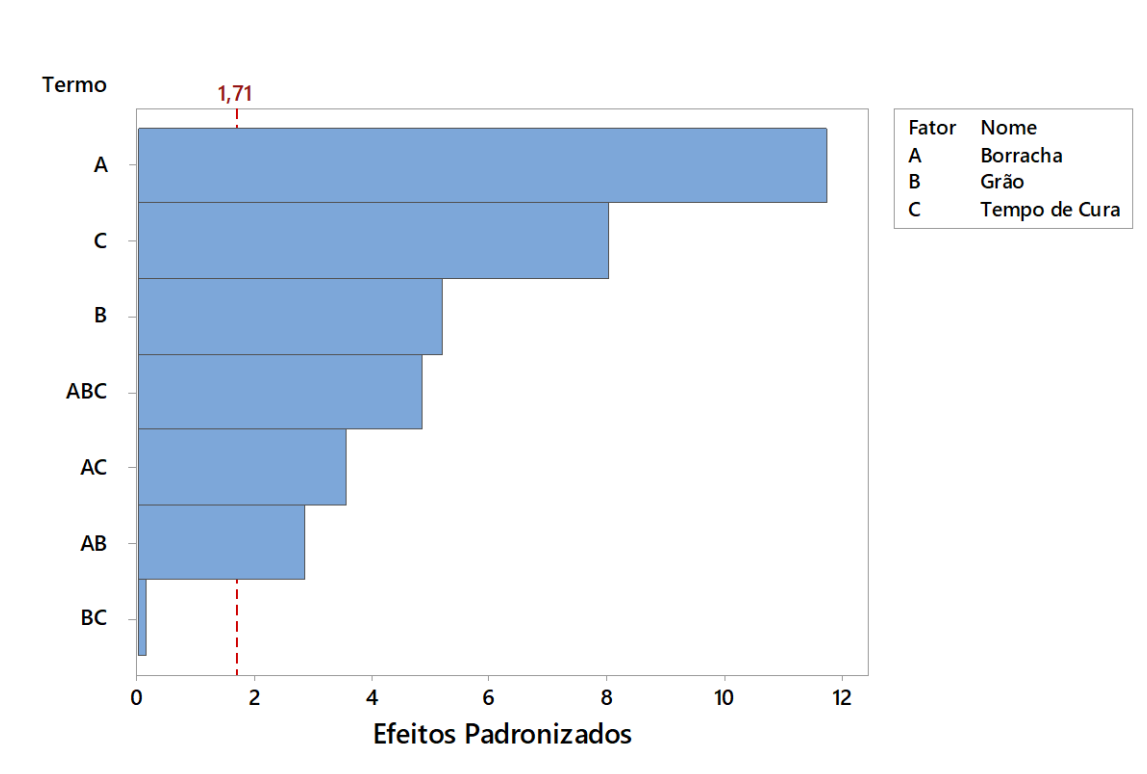


Figura 4.46: Gráfico de Pareto para Resistência à Compressão Axial (Fonte: AUTOR, 2020).

De acordo com a Figura 4.47, os fatores mais significativos para o resultado do módulo de elasticidade estático são, em ordem decrescente, o teor (fator A) e a granulometria da borracha (fator B), a combinação entre eles (fator AB), e o tempo de cura (fator C). O gráfico de efeitos principais para o módulo de elasticidade estático, representado pela Figura 4.43, também apresenta estes resultados.

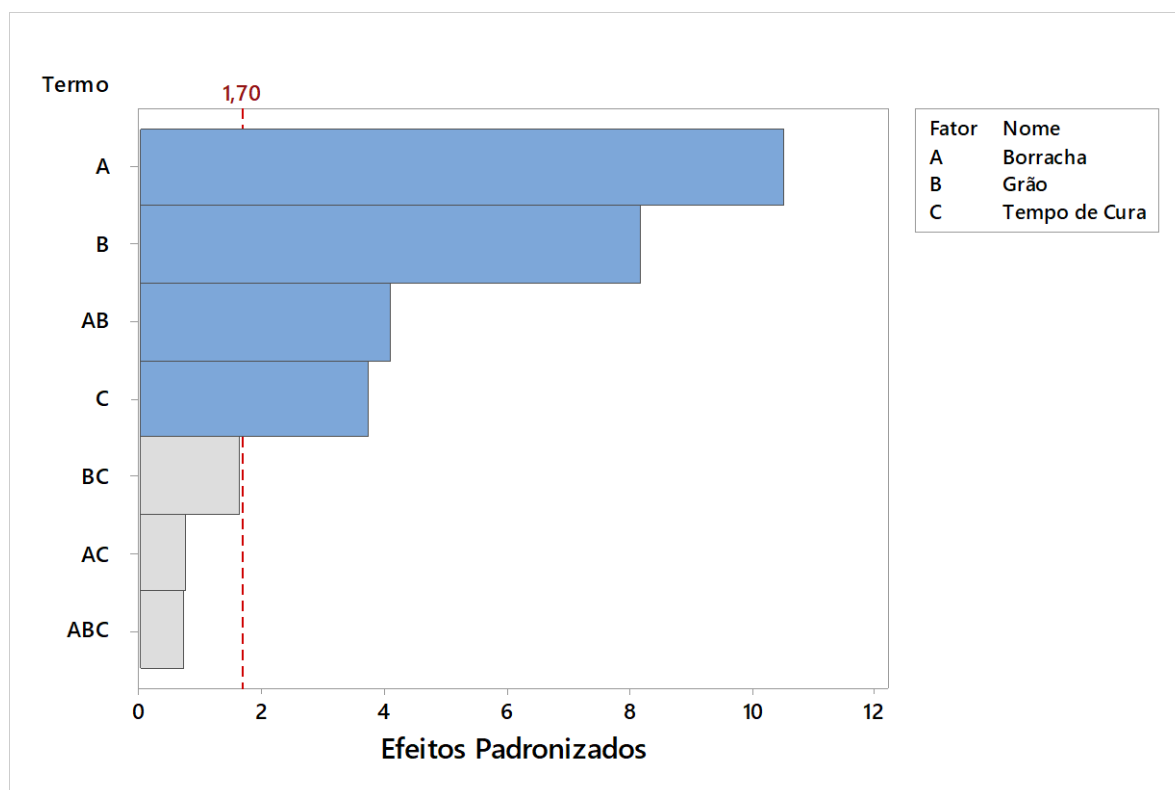


Figura 4.47: Gráfico de Pareto para Módulo de Elasticidade Estático (Fonte: AUTOR, 2020).

4.2.6.5 Valor - p

O valor-p é definido como a probabilidade de se observar um valor da estatística de teste maior ou igual ao encontrado. Tradicionalmente, o valor de corte para rejeitar a hipótese nula (nenhuma diferença estatística entre os grupos) é de 0,05, o que significa que, quando não há nenhuma diferença, um valor tão extremo para a estatística de teste é esperado em menos de 5% das vezes (FERREIRA e PATINO, 2015).

Em outras palavras: se $\text{Valor-p} \leq \alpha (0,05)$, a associação entre a resposta e cada termo no modelo é estatisticamente significativa, ou seja, se o valor-p for menor ou igual ao nível de significância, é possível concluir que há uma associação estatisticamente significativa entre a variável resposta e o termo. Se $\text{Valor-p} \geq \alpha (0,05)$, a associação entre a resposta e cada termo no modelo não é estatisticamente significativa, ou seja, se o valor-p for maior ou igual ao nível de significância, não é possível concluir que há uma associação estatisticamente significativa entre a variável resposta e o termo. Talvez seja necessário reajustar o modelo sem o termo.

Neste trabalho, a variável resposta são os resultados dos ensaios realizados e o termo são as variáveis envolvidas (teor e granulometria da borracha, tempo de cura).

Observa-se pela Tabela 4.16 que alguns valores-p obtidos foram inferiores a 0,05 o que significa que, nestes casos, podemos rejeitar a hipótese nula, ou seja, existe uma diferença

estatisticamente significativa entre os ensaios realizados, as variáveis e as combinações entre elas. A probabilidade é quase nula dos resultados dos ensaios não serem influenciados caso houver alguma alteração nas variáveis.

Tabela 4.16: *P-Value*

Fator	Frequência Natural (ω)	Fator de Amortecimento (ζ)	Compressão Axial (σ)	Módulo de Elasticidade Estático (E_c)
Borracha	0,382	0,026	0,000	0,000
Grão	0,143	0,004	0,001	0,000
Tempo de Cura	0,000	0,000	0,000	0,001
Interação entre dois Fatores				
Borracha x Grão	0,382	0,075	0,081	0,000
Borracha x Tempo de Cura	0,382	0,042	0,028	0,447
Grão x Tempo de Cura	0,143	0,007	0,916	0,108

Fonte: (AUTOR, 2020).

4.2.6.6 Coeficientes de Determinação (R^2)

O R-quadrado é uma medida estatística de quão próximos os dados estão da linha de regressão ajustada.

Nesta parte do estudo, levando em consideração a abordagem estatística, fez-se um arranjo fatorial para planejamento dos experimentos. O arranjo fatorial leva a obtenção de uma equação de regressão linear em função das variáveis de decisão do modelo.

Observando os resultados de R^2 apresentados na Tabela 4.17, conclui-se que, o modelo linear para a frequência natural e fator de amortecimento explica, respectivamente, apenas 43,36% e 45,31% da variabilidade dos dados ao redor de sua média. Em outras palavras pode-se concluir que 43,36% da variação da frequência natural está relacionada linearmente com o teor, a granulometria da borracha e com o tempo de cura. Sendo os 56,64% restantes da variação são resultantes de outros fatores não considerados neste estudo. Isto se explica, provavelmente, pelo fato destas respostas não serem tão significativas e/ou não apresentarem comportamento linear.

Por outro lado, para as respostas estáticas, 97,18% e 95,56% da variação da compressão axial e do módulo de elasticidade estático, respectivamente, está relacionada linearmente com o teor e a granulometria da borracha, e com o tempo de cura. Fato este que se explica pela influência significativa que estes fatores exercem nas respostas.

Tabela 4.17: Valor de R²

Resposta	R²	R² adj	R² pred
Frequência Natural (ω)	43,36	41,70	36,50
Fator de Amortec. (ζ)	45,31	40,18	30,78
Compressão Axial (σ)	97,18	96,59	95,65
Módulo E. Estático (E _c)	95,56	94,64	93,16

Fonte: (AUTOR, 2020).

4.2.6.7 Equações de Regressão

Equação de regressão é a representação algébrica da linha de regressão. Para o modelo linear com mais de um termo, esta equação assume a seguinte forma:

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_nX_n \quad \text{Equação 14}$$

Sendo:

Y: variável de resposta;

b₀: constante

b₁, b₂, ..., b_n: coeficientes do termo linear (também conhecido como inclinação da linha);

X₁, X₂, ..., X_n: termos.

Neste estudo, as equações apresentadas no Anexo I, representam a otimização dos processos, ou seja, ao substituímos valores nos termos, obter-se-á valores ajustados para cada ensaio.

4.2.6.8 Otimização dos Resultados

Estabelecendo algumas condições desejáveis de maximização ou minimização para as variáveis dependentes estatisticamente significativas, empregou-se a metodologia DOE com a finalidade de obter quais valores para o teor e a granulometria da borracha e o tempo de cura são correspondentes às condições desejadas.

A Tabela 4.18 apresenta os resultados otimizados para as variáveis estatisticamente significativas deste trabalho, isto é, módulo de elasticidade estático e tensão de compressão axial.

Conforme a Tabela 4.18, para se obter um CAA com um valor máximo do módulo de elasticidade estático, deve-se utilizar, nas condições apresentadas neste trabalho, um teor de 10% de RBP com granulometria entre 0,6 mm e 4,8 mm e um tempo de cura de 28 dias, e assim, o resultado esperado para o módulo de elasticidade estático será de 38,84 GPa. Para se obter um valor mínimo do módulo de elasticidade (6,03 GPa), o teor de RBP deverá ser de 50 % e granulometria inferior a 0,6 mm e tempo de cura de 7 dias.

No que diz respeito a tensão de compressão axial, o valor máximo deverá ser obtido utilizando na confecção do CAA, 10 % de RBP de granulometria entre 0,6 mm e 4,8 mm e um tempo de cura de 28 dias, obtendo-se assim o valor de 50,57 MPa. Para o valor mínimo da tensão de compressão axial, a mistura deverá ser realizada com 50 % de RBP com granulometria inferior a 0,6 mm e tempo de cura de 7 dias, obtendo-se um valor igual a 5,58MPa.

Tabela 4.18: Otimização dos Resultados

Condição	Objetivo	Teor de Borracha (%)	Granulometria	Tempo de Cura (dias)	Resposta Obtida
Maximizar	Módulo de Elasticidade Estático (E_c)	10	4,8 mm > G2 \geq 0,6 mm	28	38,8470 GPa
Minimizar	Módulo de Elasticidade Estático (E_c)	50	G1 < 0,6 mm	7	6,0380 GPa
Maximizar	Tensão de Compressão Axial (σ_c)	10	4,8 mm > G2 \geq 0,6 mm	28	50,5710 MPa
Minimizar	Tensão de Compressão Axial (σ_c)	50	G1 < 0,6 mm	7	5,5873 MPa

Fonte: (AUTOR, 2020).

As Figuras 4.38 a Figura 4.51 representam graficamente, as respostas da frequência natural, do fator de amortecimento, da tensão de compressão axial e do módulo de elasticidade estático.

Observa-se pelas Figura 4.48 e Figura 4.49 que, em função da não planicidade das superfícies, o teor e a granulometria da borracha não traduzem um modelo experimental real para as respostas da frequência natural e do fator de amortecimento.

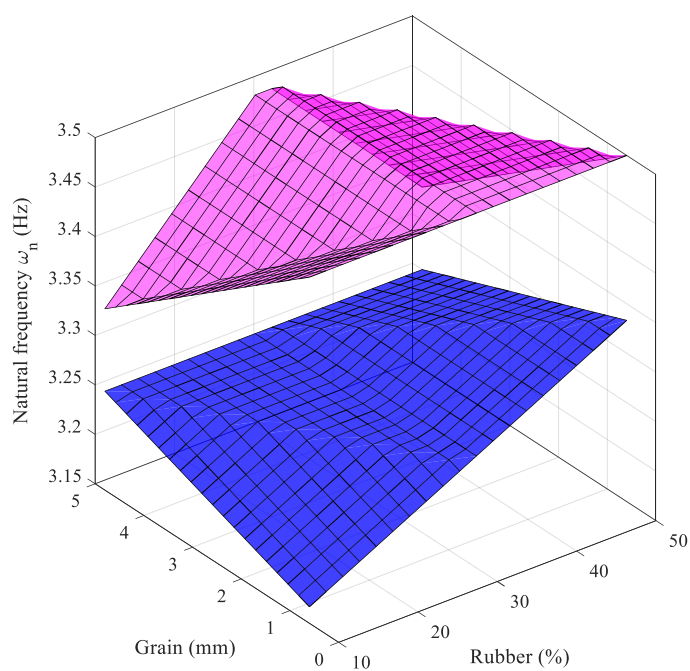


Figura 4.48: Representação gráfica da resposta da frequência natural aos 7 e 28 dias (Fonte: AUTOR, 2020).
(legenda: ■ 7 e ■ 28 dias de cura).

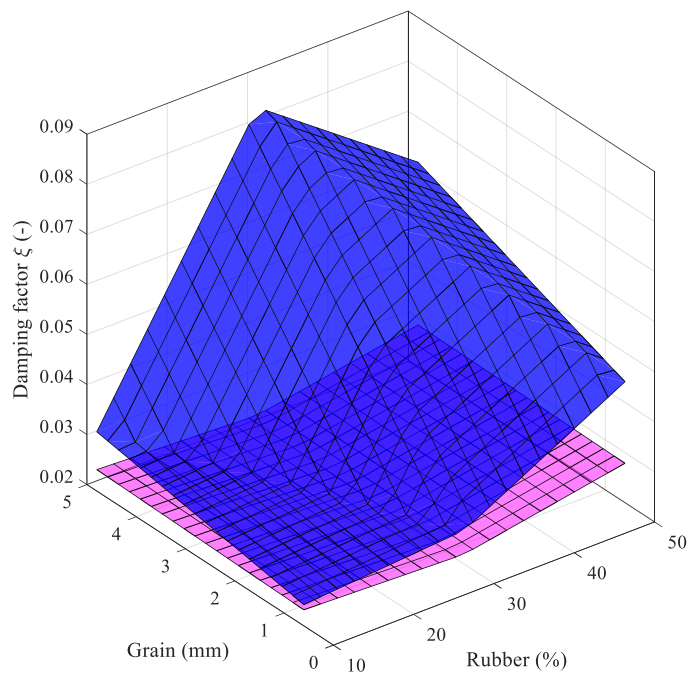


Figura 4.49: Representação gráfica da resposta do fator de amortecimento aos 7 e 28 dias (Fonte: AUTOR, 2020). (legenda: ■ 7 e ■ 28 dias de cura).

Pelas Figura 4.50 e Figura 4.51, observa-se que o teor e a granulometria da borracha, em função da planicidade das superfícies, traduzem um modelo experimental real para as respostas da tensão de compressão axial e do módulo de elasticidade estático.

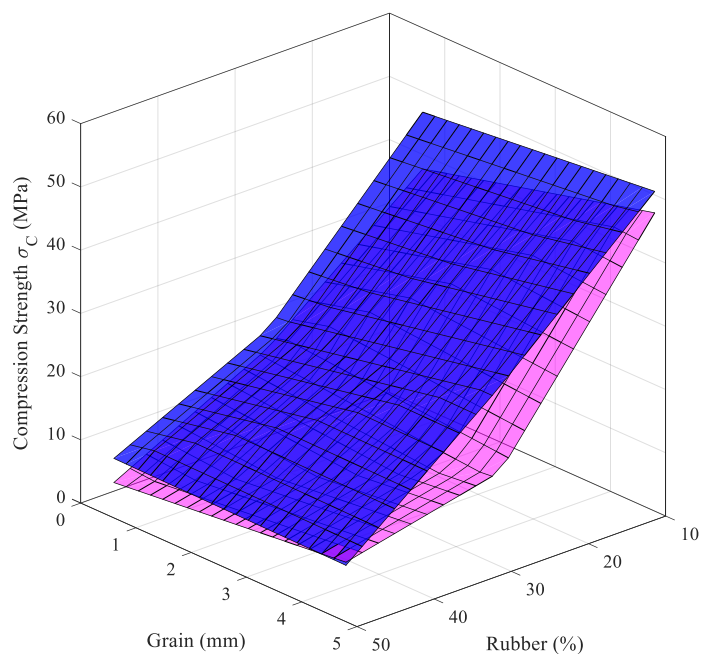


Figura 4.50: Representação gráfica da resposta da t. compressão aos 7 e 28 dias (legenda: ■ 7 e ■ 28 dias de cura). (Fonte: AUTOR, 2020).

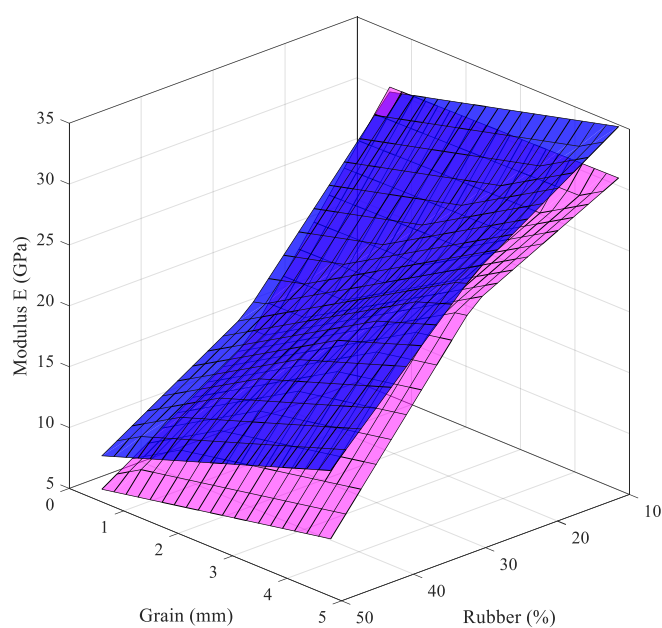


Figura 4.51: Representação gráfica da resposta do módulo de elasticidade estático aos 7 e 28 dias (legenda: ■ 7 e ■ 28 dias de cura). (Fonte: AUTOR, 2020).

5 CONCLUSÕES

Foi analisada neste estudo, a influência do RBP inserido na composição do concreto autoadensável, em substituição parcial da areia, variando o teor (10 %, 30 % e 50 %) e a granulometria da borracha ($G1 < 0,6 \text{ mm}$ e $4,8 \text{ mm} > G2 \geq 0,6 \text{ mm}$) assim como o tempo de cura do concreto (7 e 28 dias). As análises foram realizadas através de ensaios fundamentos por normas técnicas, tanto no estado fresco como no estado endurecido do concreto.

Antes mesmo da confecção do CAA REF, analisou-se, por meio de ensaios, a melhor composição para a pasta e a argamassa do concreto e os resultados encontrados foram 0,8 % de SP, 6 % de sílica ativa, 30 % RCMG e fator água/cimentantes igual a 0,35.

A metodologia para obtenção do traço do CAA foi baseada no Método de Gomes e com auxílio da ferramenta EMMA foi possível a obtenção do melhor empacotamento dos agregados do concreto.

Com relação aos resultados dos ensaios do CAA no estado fresco, foram realizados quatro tipos de ensaios. O ensaio de espalhamento (*Slump flow test*) do CAA REF resultou um valor de 825 mm o que classificou o CAA REF como SF2, isto é, adequado para a maioria das aplicações correntes; para os outros concretos misturados com RBP os resultados do espalhamento, de uma forma geral, diminuíram a medida que se aumentou o teor do polímero na mistura. Este fato se explica pela presença da borracha, o que proporciona baixa fluidez à mistura.

No que diz respeito ao ensaio T 500 o qual está relacionado com a viscosidade do concreto, foi observado que todos os traços se enquadraram na classe VS 2, o que significa que o tempo que as misturas levaram para atingir a extremidade do círculo, no ensaio de espalhamento, foi maior que 2 segundos. Pelo fato do maior teor e da menor granulometria da borracha, o traço 50 G1 apresentou maior T 500 e o traço 10 G1 menor T 500. Outras misturas, já não apresentaram valores esperados, e acredita-se que isto se deve ao momento de acionar o cronômetro no início do ensaio.

Quanto ao Funil V, ensaio que classifica a mistura quanto à viscosidade plástica aparente, o tempo de fluxo da maioria das misturas variou entre 6 e 12 s, faixa exigida pela EFNARC para concreto autoadensável. Esperava-se que o CAA REF, por não possuir RBP em sua composição, apresentasse menor tempo de escoamento, ou seja, menor viscosidade. Os demais traços também não apresentaram valores esperados, ou seja, quanto maior o teor e menor a granulometria do RBP, maior deveria ser o tempo de escoamento e menor a viscosidade. Isto não foi observado em todas as misturas.

A habilidade passante em fluxo confinado das misturas foi analisada através do ensaio da Caixa L. Com exceção do traço 50 G1, todas as misturas excederam ao valor mínimo da norma para concreto autoadensável, ou seja, valores de H_2 / H_1 superiores a 0,80. A mistura 50 G1 praticamente atingiu o valor mínimo. Assim, todas as misturas classificam-se como PL2.

O primeiro ensaio realizado para o concreto no estado endurecido foi o de compressão axial. Por não conter RBP, o CAA REF apresentou aos 7 dias uma alta resistência igual 56,911 MPa, o que atendeu os 40 MPa estabelecido por Gomes aos 28 dias. Todos os outros traços, com RBP, também apresentaram maior resistência aos 28 dias de cura do concreto. Observou-se também que quanto mais borracha com maior granulometria incorporado ao concreto, menor a resistência à compressão encontrada.

Os módulos de elasticidade estáticos diminuíram quando comparados ao CAA REF, tanto aos 7 como aos 28 dias, e isto se explica pelo fato de a borracha, incorporada ao concreto, ser mais deformável que a areia substituída.

Observou-se que os resultados dos ensaios de massa específica, absorção por imersão e índice de vazios apresentaram, de uma forma geral, resultados esperados. Todos os traços apresentaram massas específicas inferiores ao do CAA. À medida que se aumentou a granulometria para o mesmo teor do polímero na mistura, a massa específica do concreto endurecido aumentou; e à medida que se aumentou o teor para a mesma granulometria do polímero na mistura, a massa específica do concreto endurecido diminuiu. Estes fatos se explicam pela massa específica da borracha ser inferior à da areia.

Em função da presença do polímero que proporciona maior porosidade, todos os concretos com borracha apresentaram maior absorção de água em relação ao CAA REF. Para os índices de vazios os resultados foram parecidos aos da absorção, dada a relação direta entre as duas variáveis.

Em função do alto valor da massa dos corpos de prova submetidos aos ensaios de frequência natural e fator de amortecimento, os valores obtidos foram inferiores a 4 Hz. Esperava-se que os concretos com 28 dias de cura apresentassem maior frequência natural pelo fato de terem ganho maior rigidez do que àqueles curados com apenas 7 dias. Este fato não foi observado, porém, as diferenças encontradas foram muito próximas.

A análise estatística deste estudo, fundamentou-se na metodologia DOE e ocupou um importante espaço neste trabalho. Pôde-se observar quais fatores estabelecidos (teor e granulometria de borracha e tempo de cura) e combinações entre eles foram estatisticamente significativos.

Para a frequência natural, o tempo de cura é o único fator estatisticamente significativo para esta resposta. Já para o fator de amortecimento, todos os fatores envolvidos e a combinação entre eles, foram estatisticamente significativos. Estes fatos foram constatados quando se obteve os valores de valor-p e R^2 para cada fator e a interação entre eles.

A análise estatística realizada nesta pesquisa mostrou também que a compressão axial e o módulo de elasticidade estático são variáveis muito influenciadas pelos fatores estabelecidos. Os valores-p obtidos foram, na sua maioria, inferiores a 0,05 com exceção da interação entre o teor de borracha e a granulometria, entre o teor da borracha e o tempo de cura e entre a granulometria e do tempo de cura. Com relação ao coeficiente de determinação (R^2), para a compressão axial e para o fator de amortecimento os valores obtidos foram de 97,18 e 95,56, respectivamente. Fato este que se explica pela influência significativa que estes fatores exercem nas respostas.

APÊNDICE

Frequência Natural = 3,3472 + 0,0972 Tempo de Cura_7 dias – 0,0972 Tempo de Cura_28 dias.

Fator de Amortecimento = 0,03511 – 0,00922 Borracha_10 + 0,00389 Borracha_30 + 0,00532 Borracha_50 – 0,00705 Grão_0,6 + 0,00705 Grão_4,8 – 0,01030 Tempo Cura_7 dias + 0,01030 Tempo Cura_28 dias + 0,00489 Borracha*Grão_10 0,6 – 0,00489 Borracha*Grão_10 4,8 – 0,00753 Borracha*Grão_30 0,6 + 0,00753 Borracha*Grão_30 4,8 + 0,00264 Borracha*Grão_50 0,6 – 0,00264 Borracha*Grão_50 4,8 + 0,00816 Borracha*Tempo de Cura_10 7 dias – 0,00816 Borracha*Tempo de Cura_10 28 dias – 0,00626 Borracha*Tempo de Cura_30 7 dias + 0,00626 Borracha*Tempo de Cura_30 28 dias – 0,00190 Borracha*Tempo de Cura_50 7 dias – 0,00190 Borracha*Tempo de Cura_50 28 dias + 0,00662 Grão*Tempo de Cura_0,6 7 dias – 0,00662 Grão*Tempo de Cura_0,6 28 dias – 0,00662 Grão*Tempo de Cura_4,8 7 dias + 0,00662 Grão*Tempo de Cura_4,8 28 dias – 0,00499 Borracha*Grão*Tempo de Cura_10 0,6 7 dias + 0,00499 Borracha*Grão*Tempo de Cura_10 0,6 28 dias + 0,00499 Borracha*Grão*Tempo de Cura_10 4,8 7 dias – 0,00499 Borracha*Grão*Tempo de Cura_10 4,8 28 dias + 0,00756 Borracha*Grão*Tempo de Cura_30 0,6 7 dias – 0,00756 Borracha*Grão*Tempo de Cura_30 0,6 28 dias – 0,00756 Borracha*Grão*Tempo de Cura_30 4,8 7 dias + 0,00756 Borracha*Grão*Tempo de Cura_30 4,8 28 dias – 0,00256 Borracha*Grão*Tempo de Cura_50 0,6 7 dias + 0,00256 Borracha*Grão*Tempo de Cura_50 0,6 28 dias + 0,00256 Borracha*Grão*Tempo de Cura_50 4,8 7 dias – 0,00256 Borracha*Grão*Tempo de Cura_50 4,8 28 dias.

Compressão Axial = 24,854 + 20,680 Borracha_10 – 4,152 Borracha_30 – 16,529 Borracha_50 – 1,741 Grão_0,6 + 1,741 Grão_4,8 – 2,683 Tempo de Cura_7 dias + 2,683 Tempo de Cura_28 dias – 1,596 Borracha*Grão_10 0,6 + 1,596 Borracha*Grão_10 4,8 + 0,684 Borracha*Grão_30 0,6 – 0,684 Borracha*Grão_30 4,8 + 0,912 Borracha*Grão_50 0,6 – 0,912 Borracha*Grão_50 4,8 – 0,411 Borracha*Tempo de Cura_10 7 dias + 0,411 Borracha*Tempo de Cura_10 28 dias – 1,444 Borracha*Tempo de Cura_30 7 dias + 1,444 Borracha*Tempo de Cura_30 28 dias + 1,854 Borracha*Tempo de Cura_50 7 dias – 1,854 Borracha*Tempo de Cura_50 28 dias + 0,051 Grão*Tempo de Cura_0,6 7 dias – 0,051 Grão*Tempo de Cura_0,6 28 dias – 0,051 Grão*Tempo de Cura_4,8 7 dias + 0,051 Grão*Tempo de Cura_4,8 28 dias – 1,445 Borracha*Grão*Tempo de Cura_10 0,6 7 dias + 1,445 Borracha*Grão*Tempo de Cura_10 0,6 28 dias.

28 dias + 1,445 Borracha*Grão*Tempo de Cura_10 4,8 7 dias – 1,445 Borracha*Grão*Tempo de Cura_10 4,8 28 dias + 2,577 Borracha*Grão*Tempo de Cura_30 0,6 7 dias – 2,577 Borracha*Grão*Tempo de Cura_30 0,6 28 dias – 2,577 Borracha*Grão*Tempo de Cura_30 4,8 7 dias + 2,577 Borracha*Grão*Tempo de Cura_30 4,8 28 dias – 1,131 Borracha*Grão*Tempo de Cura_50 0,6 7 dias + 1,131 Borracha*Grão*Tempo de Cura_50 0,6 28 dias + 1,131 Borracha*Grão*Tempo de Cura_50 4,8 7 dias – 1,131 Borracha*Grão*Tempo de Cura_50 4,8 28 dias.

Módulo de Elasticidade Estático = 20,607 + 10,834 Borracha_10 – 0,195 Borracha_30 – 10,639 Borracha_50 – 3,134 Grão_0,6 + 3,134 Grão_4,8 – 1,428 Tempo de Cura_7 dias + 1,428 Tempo de Cura_28 dias + 1,839 Borracha*Grão_10 0,6 – 1,839 Borracha*Grão_10 4,8 – 2,417 Borracha*Grão_30 0,6 + 2,417 Borracha*Grão_30 4,8 + 0,578 Borracha*Grão_50 0,6 – 0,578 Borracha*Grão_50 4,8.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDELALEEM, B. H.; ISMAIL, M. K.; HASSAN, A. A. A. The combined effect of crumb rubber and synthetic fibers on impact resistance of self-consolidating concrete. **Construction and Building Materials**, v. 162, p. 816–829, 2018.

ADITIBRAS. **Aditivos para concreto e auxiliares para a construção civil**. Disponível em: <<http://www.aditibras.com.br/>>.

AHMED, M. et al. A Comparative Study of Popular Concrete Mix Design Methods from Qualitative and Cost-Effective Point of View for Extreme Environment. **Arabian Journal for Science and Engineering**, v. 41, n. 4, p. 1403–1412, abr. 2016.

ALYAMAC, K. E.; GHAFARI, E.; INCE, R. Development of eco-efficient self-compacting concrete with waste marble powder using the response surface method. **Journal of Cleaner Production**, v. 144, p. 192–202, 2017.

ANDRIETTA, A. J. **Pneus e meio ambiente: um grande problema requer uma grande solução**. Disponível em: <<http://www.reciclarepreciso.hpg.ig.com.br/recipientes.htm>>.

ANGELIN, A. F.; LINTZ, R. C. C.; BARBOSA, L. A. G. Fresh and hardened properties of self-compacting concrete modified with lightweight and recycled aggregates. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 11, n. 1, p. 76–94, 2018a.

ANGELIN, A. F.; LINTZ, R. C. C.; BARBOSA, L. A. G. Propriedades no estado fresco e endurecido do concreto autoadensável modificado com agregados leves e reciclados. **IBRACON Structures and Materials Journal**, v. 11, n. 7, p. 76–94, 2018b.

ANIP: ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA DE PNEUMÁTICOS. **Fabricação do Pneu**.

ARUNCHAITANYA, S.; ARUNAKANTHI, E. Usage of Mineral Admixtures in Self Compacting Concrete - A Review. **International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)**, v. 8, n. 3, p. 58–62, 2019.

AZEVEDO, R. C. D., ENSSLIN, L., JUNGLES, A. A Review of Risk Management in Construction: Opportunities for Improvement. **Modern Economy**, v. v. 05, n. n. 04, p. 367–383, 2014.

BAHORIA, B. V.; PARBAT, D. K.; NAGANAİK, P. B. Replacement of natural sand in concrete by waste products: a state of art. **Journal of Environmental Research And Development**, v. 7, n. 4A, p. 1651–1656, 2013.

BLESSMANN, J. **Introdução as estudo das ações dinâmicas do vento**. 2 ed ed. [s.l.] Porto Alegre: Ed. Universidade/ UFRGS., 2005.

BUCHER, R. et al. Self-compacting concrete using flash-metakaolin: design method. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 48, n. 6, p. 1717–1737, 2015.

BUŠIĆ, R. et al. Recycled rubber as an aggregate replacement in self-compacting concrete-literature overview. **Materials**, v. 11, n. 9, 2018.

CALADO, C. F. D. A. et al. **Concreto autoadensavel (CAA), mais do que uma alternativa ao concreto convencional (CC)**. Recife/PE: Editora Universidade de Pernambuco - EDUPE, 2015.

CAMPOS, R. S. et al. Influence of recycled aggregates on rheological and mechanical properties of self-compacting concrete | Influência dos agregados reciclados nas propriedades reológicas e mecânicas do concreto autoadensável. **Revista Materia**, v. 23, n. 1, 2018a.

CASTRO, A. L.; PANDOLFELLI, V. C. Revisão: Conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil. **Cerâmica**, v. 55, p. 18–32, 2009.

CAVALCANTI, D. J. H. **Contribuição ao Estudo de Propriedades do Concreto auto- adensável visando sua aplicação em elementos estruturais**. 2006. 141p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil): Universidade Federal de Alagoas como, 2006.

CELIK, K. et al. Self-consolidating concretes incorporating high-volume natural pozzolan Goal of the research To compare the effects of Portland cement replacement with natural. **Cement & Concrete Composites**, v. 45, p. 136–147, 2014.

CHAVDA, U. A.; PARIKH, K. B. Self-Compacting Concrete: A Review. **International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET)**, v. 6, n. I, p. 2953–2955, 2018.

CHEN, Z.; YANG, M. The Research on Process and Application of Self-Compacting Concrete. **Journal of Engineering Research and Applications**, v. 5, n. 8, p. 12–18, 2015.

COUTINHO, B. S. **Propriedades e comportamento estrutural do concreto auto-adensável**. [s.l.] Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2011.

DOMONE, P. L. A review of the hardened mechanical properties of self-compacting concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 29, n. 1, p. 1–12, 2007.

EFNARC. Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete. **Report from EFNARC**, v. 44, n. February, p. 32, 2002.

EFNARC. The European Guidelines for Self-Compacting Concrete. **The European Guidelines for Self Compacting Concrete**, n. May, p. 63, 2005.

FERREIRA, J. C.; PATINO, C. M. What does the p value really mean? **Jornal Brasileiro de Pneumologia**, v. 41, n. 5, p. 485–485, out. 2015.

FRANÇA, V. H. **Aderência aço-concreto – uma análise do comportamento do concreto fabricado com resíduos de borracha**. [s.l.] UNESP de Ilha Solteira., 2004.

GANJIAN, E.; KHORAMI, M.; MAGHSOUDI, A. A. Scrap-tyre-rubber replacement for aggregate and filler in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 23, p. 1828–1836, 2009.

GEOCITIES.WS. **CONHECAOSEUPNEU**. Disponível em: <<http://www.geocities.ws/unicariguatu/CONHECAOSEUPNEU.htm>>.

GHOSH, S. K.; BERA, D. K. FUNDAMENTAL PROPERTIES OF SELF-COMPACTING CONCRETE UTILIZING WASTE RUBBER TIRES-A REVIEW. **International Journal of Research in Engineering and Technology**, v. 05, n. 01, p. 254–261, 2016.

GOŁASZEWSKI, J. et al. Mortar as a model to predict self-compacting concrete rheological properties as a function of time and temperature. **Construction and Building Materials**, v. 124, p. 1100–1108, 2016.

GOMES, P. C. C. **Optimization and Characterization of High-Strength Self-Compacting Concrete**. 2002. Tese (Doutorado em Engenharia Civil): Escola Tècnica Superior d'Enginyers de Camins, Universitat Politècnica de Catalunya, 2002.

GOMES, P. C. C.; BARROS, A. R. DE. **Métodos de dosagem de concreto autoadensável**. 1. ed. São Paulo: PINI, 2009.

GRÜNEWALD, S. **Performance-based design of self-compacting fibre reinforced concrete**. 2004. 233. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas e Edificações): Universidade Técnica de Delft, 2004.

GUETTI, P. D. C. Contribuição Ao Estudo Das Propriedades Mecânicas Do Concreto Autoadensável E Do Concreto Autoadensável Reforçado Com Fibras De Aço. p. 395, 2012.

GUPTA, T.; CHAUDHARY, S.; SHARMA, R. K. Mechanical and durability properties of waste rubber fiber concrete with and without silica fume. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 702–711, 2016.

HAN, B.; ZHANG, L.; OU, J. Chapter 2: Self-Compacting Concrete. In: **Smart and Multifunctional Concrete Toward Sustainable Infrastructures**. 1. ed. Singapura: Springer Singapore, 2017. p. 11–36.

HARBI, R.; DERABLA, R.; NAFA, Z. Improvement of the properties of a mortar with 5% of kaolin fillers in sand combined with metakaolin, brick waste and glass powder in cement. **Construction and Building Materials**, v. 152, p. 632–641, 2017.

HESAMI, S.; SALEHI HIKOUEI, I.; EMADI, S. A. A. **Mechanical behavior of self-compacting concrete pavements incorporating recycled tire rubber crumb and reinforced with polypropylene fiber.** [s.l.] Elsevier Ltd, 2016. v. 133

HILAL, N. N. Hardened properties of self-compacting concrete with different crumb rubber size and content. **International Journal of Sustainable Built Environment**, v. 6, n. 1, p. 191–206, 2017.

IBAMA - INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. **Relatório de Pneumáticos: Resolução Conama nº 416/09 2018 (ano-base 2017).** Brasília/DF: IBAMA, 2018.

ISMAIL, M. K.; HASSAN, A. A. A. Influence of Mixture Composition and Type of Cementitious Materials on Enhancing the Fresh Properties and Stability of Self-Consolidating Rubberized Concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 28, n. 1, p. 1–12, 2016.

JALAL, M. et al. Mechanical, rheological, durability and microstructural properties of high performance self-compacting concrete containing SiO₂ micro and nanoparticles. **Materials and Design**, v. 34, p. 389–400, 2012.

JAMKAR, S. S.; RAO, C. B. K. Index of aggregate particle shape and texture of coarse aggregate as a parameter for concrete mix proportioning. **Cement and Concrete Research**, v. 34, p. 2021–2027, 2004.

JÚNIOR, E. R. Propriedades dos materiais constituintes do concreto. **Revista Especialize On-line IPOG**, v. 01, n. 10, 2015.

KARAHAN, O. et al. Effect of metakaolin content on the properties self-consolidating lightweight concrete. **Construction and Building Materials**, v. 31, p. 320–325, jun. 2012.

KHATUN, A.; SINGH, K.; SHARMA, R. Utilization of bagasse ash as a partial replacement of cement in self-compacting concrete. **International Journal of Civil Engineering and Technology**, v. 9, n. 7, p. 1078–1088, 2018.

KHAYAT, K. H.; GHEZAL, A.; HADRICHE, M. S. Factorial design models for proportioning self-consolidating concrete. **Materials and Structures**, v. 32, p. 679–686, 1999.

KHAYAT, K. H.; GHEZAL, A.; HADRICHE, M. S. Utility of statistical models in proportioning self-consolidating concrete. **Materials and Structures**, v. 33, p. 338–344, 2000.

LI, G. et al. Development of waste tire modified concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 34, n. 12, p. 2283–2289, 2004.

LI, X.; LING, T.-C.; HUNG MO, K. Functions and impacts of plastic/rubber wastes as eco-friendly aggregate in concrete – A review. **Construction and Building Materials**, v. 240, 2020.

LISBÔA, E. M. Obtenção do concreto auto-adensável utilizando resíduo do beneficiamento do mármore e granito e estudo de propriedades mecânicas. p. 121, 2004.

LV, J. et al. Fresh and Mechanical Properties of Self-Compacting Rubber Lightweight Aggregate Concrete and Corresponding Mortar. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2019, p. 1–14, 2019.

MA'ARUF, A.; ABBA, S. I.; NURUDDEEN, M. M. Self-Compacting Concrete : A Review. **International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)**, v. 6, n. 8, p. 2278–3075, 2017.

MARINHO, S. R. et al. **Estudo e Análise da Fabricação de Concreto a Partir do Uso De Resíduos de Borracha de Pneus.** 8º EnTec – Encontro de Tecnologia da UNIUBE. Anais...2014

MARQUES, A. C. Concreto Auto Adensável: Caracterização da Evolução das Propriedades Mecânicas e Estudo da Sua Deformabilidade por Solicitações Mecânica, Retração e Fluência. p. 175, 2011.

MASTALI, M.; DALVAND, A.; SATTARIFARD, A. R. The impact resistance and mechanical properties of reinforced self-compacting concrete with recycled glass fibre reinforced polymers. **Journal of Cleaner Production**, v. 124, p. 312–324, 2016.

MEDEIROS, M. H. F. DE et al. Compósitos de cimento Portland com adição de nanotubos de carbono (NTC): Propriedades no estado fresco e resistência à compressão. **Revista Matéria**, v. 20, n. 1, p. 127–144, 2015.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 2. ed. São Paulo: Ibracon, 2014.

MORAES, K. A. DE M. Otimização De Uso De Adições Minerais Para a Produção De Concreto Auto-Adensável. p. 210, 2010.

MOREIRA, J. F.; FIDELIS, V. R. P.; DIAS, J. F. Concreto com borracha de pneus aplicado em ciclovias. **HOLOS Environment**, v. 14, n. 2, p. 185–197, 2014.

NAJIM, K. B.; HALL, M. R. A review of the fresh / hardened properties and applications for plain- (PRC) and self-compacting rubberised concrete (SCRC). **Construction and Building Materials**, v. 24, p. 2043–2051, 2010.

NAJIM, K. B.; HALL, M. R. Mechanical and dynamic properties of self-compacting crumb rubber modified concrete. **Construction and Building Materials**, v. 27, n. 1, p. 521–530, 2012.

NEVILLE, A. M. **Properties of concrete – Fourth and Final Edition**. 4. ed. Harlow/Inglaterra: Pearson Education Limited, 1997.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Concrete Technology**. 2. ed. London: Pearson Education Limited, 2010.

NUNES, B. E. A. U. T. O. **Betão Auto-Compactável: Tecnologia e propriedades**. Porto: Universidade do porto faculdade de engenharia - FEUP, 2001.

OKAMURA, H.; OUCHI, M. Self-Compacting Concrete. v. 1, n. 1, p. 5–15, 2003.

OKAMURA, H.; OZAWA, K. Mix design for self-compacting concrete. **Concrete Library JSCE**, v. 25, p. 107–20, 1995.

ONUAGULUCHI, O.; PANESAR, D. K. Hardened properties of concrete mixtures containing pre-coated crumb rubber and silica fume. **Journal of Cleaner Production**, v. 82, p. 125–131, 2014.

R. GETTU, P. C. C. GOMES, L AGULLO, AND A. J. High-Strength Self-Compacting Concrete with Fly Ash: Development and Utilization. **International Concrete Abstracts Portal**, v. 221, 2004.

RAHMAN, M. M.; USMAN, M.; AL-GHALIB, A. A. Fundamental properties of rubber modified self-compacting concrete (RMSCC). **Construction and Building Materials**, v. 36, p. 630–637, 2012.

REPETTE, W. **Concretos de última geração: presente e futuro**. Concreto: ed. [s.l.: s.n.].

REPETTE, W. **Concreto autoadensável**. 1 ed ed. São Paulo: [s.n.].

SAAK, A. W.; JENNINGS, H. M.; SHAH, S. P. New methodology for designing self-compacting concrete. **ACI Materials Journal**, v. 98, n. 6, p. 429–439, 2001.

SABLE, K. S.; RATHI, M. K. Effect of Different Type of Steel Fibre and Aspect Ratio on Mechanical Properties of Self Compacted Concrete. **International Journal of Engineering and Innovative Technology**, v. 2, n. 1, p. 184–188, 2012.

SAINZ-AJA, J. et al. Self-compacting recycled aggregate concrete using out-of-service railway superstructure wastes. **Journal of Cleaner Production**, v. 230, p. 945–955, 2019.

SCHEEREN, S. C. S. et al. Influência de aditivos superplastificantes a base de policarboxilato na resistência a compressão e propriedades no estado fresco de um cimento Portland tipo I. **Revista de Engenharia Civil IMED**, v. 4, n. 2, p. 129–141, 2017.

SEDRAN, T.; DE LARRARD, F. Optímization of seif-compacting concrete thanks to packing model. In: **First international rilem symposium on self-compacting concrete**. Suécia: RILEM, 1999. p. 321–332.

SHI, C. et al. A review on mixture design methods for self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, v. 84, p. 387–398, 2015.

SIDDIQUE, R.; KHAN, M. I. **Supplementary Cementing Materials**. 1. ed. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011.

SILVA JUNIOR, J. A.; TAKEMOTO, L.; PEREIRA, M. A. C. **Estudo da interação entre lean manufacturing e green manufacturing em uma indústria de reforma e recapagem de pneus**. [s.l.] Anais... Curitiba. Rio de Janeiro: ABEPRO, 2014.

SILVA, L. S. et al. Concreto com borracha de recauchutagem de pneu para uso em pavimentação de baixo tráfego. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 24, n. 2, 2019.

SINGH, N.; SINGH, S. P. Evaluating the performance of self compacting concretes made with recycled coarse and fine aggregates using non destructive testing techniques. **Construction and Building Materials**, v. 181, p. 73–84, 2018.

SKARENDAHL A, BILLBERG P, BEITZEL H, DIERYCK V, GHEZAL A, KHRAPKO M, LEEMANN A, DE SCHUTTER G, SONEBI M, Ö. T. Casting of self-compacting concrete. **RILEM, ISBN 2-35158-001-X, e-ISBN 2-912143-98-5**, p. 26, 2006.

SONEBI, M. et al. Modelling the fresh properties of self-compacting concrete using support vector machine approach. **Construction and Building Materials**, v. 106, p. 55–64, 2016.

SÓSITO, F. DE A.; BERTO, A. B. F. K.; SILVA, B. DO V. Análise da viabilidade técnica do uso do resíduo de borracha de pneus inservíveis incorporado no concreto Análise da viabilidade técnica do uso do resíduo de borracha de pneus inservíveis incorporado no concreto Analysis of the technical feasibility of th. **Revista Científica “ANAP Brasil”**, v. 10, n. 20, p. 73–79, 2017.

TECNOSIL. **Contribuições para sustentabilidade. É nessa pegada que a Tecnosil evolui**. Disponível em: <<https://www.tecnosilbr.com.br/>>.

THOMAS, B. S.; GUPTA, R. C.; PANICKER, V. J. Recycling of waste tire rubber as aggregate in concrete : durability-related performance. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 504–513, 2016.

TUTIKIAN, B. F. **Método para dosagem de concretos auto-adensáveis**. 2004. 148p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil): Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2004.

TUTIKIAN, B. F. Proposição de um método de dosagem experimental para concretos auto-adensáveis. **Tese de doutorado**, p. 0–162, 2007.

TUTIKIAN, B. F.; DAL MOLIN, D. Comparativo das propriedades do concreto autoadensável (CAA) utilizando areia fina e cinza volante. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 4, n. 2, p. 247–276, 2011.

TUTIKIAN, B. F.; DAL MOLIN, D. C. **Concreto Auto-Adensável**. 1. ed. São Paulo: PINI, 2008.

TUTIKIAN, B. F.; HELENE, P. Capítulo 12 - Dosagem dos Concretos de Cimento Portland. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1. ed. São Paulo: IBRACON, 2011.

YOUNIS, K. H.; NAJI, H. S.; NAJIM, K. B. Cracking Tendency of Self-Compacting Concrete Containing Crumb Rubber as Cracking Tendency of Self-Compacting Concrete Containing Crumb Rubber as Fine Aggregate. **Key Engineering Materials**, v. 744, p. 55–60, 2017.

YUNG, W. H.; YUNG, L. C.; HUA, L. H. A study of the durability properties of waste tire rubber applied to self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, v. 41, p. 665–672, 2013.

ZAOIAI, S. et al. Optimization and mechanical characterization of self- compacting concrete incorporating rubber aggregates. **Asian Journal of Civil Engineering (BHRC)**, v. 17, n. 6, p. 817–829, 2016.

ZUO, W. et al. Norm method to define and evaluate robustness of self-compacting concrete due to component quantity variations. **Construction and Building Materials**, v. 161.