



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS RUSSAS
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

DANIEL LIRA LOPES TARGINO

**ANÁLISE DA INTERFERÊNCIA DE SOLUÇÕES ÁCIDAS, BÁSICAS E
SULFATADAS EM ESTRUTURAS DE CONCRETOS E ARGAMASSAS**

RUSSAS
2019

DANIEL LIRA LOPES TARGINO

ANÁLISE DA INTERFERÊNCIA DE SOLUÇÕES ÁCIDAS, BÁSICAS E SULFATADAS
EM ESTRUTURAS DE CONCRETOS E ARGAMASSAS

Monografia apresentada ao curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientador: Prof. Dra. Aliny Abreu de Sousa Monteiro

RUSSAS

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

T192a Targino, Daniel Lira Lopes.

Análise da interferência de soluções ácidas, básicas e sulfatadas em estruturas de concretos e argamassas / Daniel Lira Lopes Targino – 2019.

111 f. : il color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus Russas, Curso de Engenharia Civil, Russas, 2019.

Orientação: Prof. Dra. Aliny Abreu de Sousa Monteiro

1. Alterações de pH. 2. Água de amassamento. 3. Cimento Portland. 4. Resistência. I. Título

CDD 620

DANIEL LIRA LOPES TARGINO

ANÁLISE DA INTERFERÊNCIA DE SOLUÇÕES ÁCIDAS, BÁSICAS E SULFATADAS
EM ESTRUTURAS DE CONCRETOS E ARGAMASSAS

Monografia apresentada ao curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientador: Prof. Dra. Aliny Abreu de Sousa Monteiro

Aprovado em: ____/____/____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dra. Aliny Abreu de Sousa Monteiro (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Antônio Eduardo Bezerra Cabral
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Otávio Rangel Cavalcante
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

Aos meus pais.

A minha família.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me ajudar todos os dias a trilhar essa jornada em busca de ser uma pessoa melhor, querer sempre progredir, pela coragem e perseverança.

Aos meus pais, em especial minha mãe, Lúcia Lira, por me apoiarem na decisão de mudar de cidade e trilhar o árduo caminho da engenharia, me dando o suporte necessário.

A minha segunda família, Diana, pelo seu companheirismo, cuidado e afeto, por ser suporte durante parte dessa jornada. À Anália Muro, pela sua receptividade e acolhimento.

A minha família, por ser minha base e inspiração, aos meus amigos por serem a família que a escolhemos ao longo da vida.

A professora Aliny Abreu, por acompanhar o desenvolvimento deste trabalho desde 2017 e abrir as portas necessárias ao seu desenvolvimento.

Ao corpo técnico do laboratório de química geral da Universidade Federal do Ceará Campus Russas, em especial ao Thiago Correia, pela prestatividade e contínua disponibilidade.

Ao professor Eduardo Cabral, por suas contribuições prestadas a esse trabalho, por viabilizar a realização de parte dos procedimentos junto ao LMCC.

Ao Mibson Michel, aluno de mestrado na época, pelo apoio nos ensaios laboratoriais, com assistência nas aquisições de materiais e contatos, além de suas contribuições diretas.

Ao Laboratório de Saneamento da UFC (LABOSAN), pelo fornecimento de materiais e reagentes utilizados.

Aos técnicos laboratoriais do Laboratório de Materiais e Construção Civil da Universidade Federal do Ceará, em particular ao Helano e ao Emanuel, por nos acompanhar e auxiliar nos procedimentos e pelos suportes prestados.

Aos professores membros da banca, pelo tempo concedido e contribuições para o aperfeiçoamento deste trabalho.

A todos vocês, meu muito obrigado.

“A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu, mas pensar o que ninguém ainda pensou sobre aquilo que todo mundo vê.” (Arthur Schopenhauer)

RESUMO

Em 2016 foram produzidos 4,2 bilhões de toneladas de cimento ao redor do mundo, com perspectiva de alta para os anos seguintes. Patologias em concretos e argamassas são geralmente relacionadas à interação de agentes externos na composição química do cimento Portland, contudo componentes internos podem ter a mesma influência citada. Um componente ainda pouco estudado é a água de amassamento, com poucos critérios de parametrização. Este trabalho se propõe a analisar a influência da água de amassamento com diferentes faixas de pH, presença de sulfatos e cloretos, em aspectos da pasta no estado fresco e endurecido, realizando análises visuais para observação de aspectos qualitativos e ensaios de Slump Test, resistência à compressão e tração, velocidade do pulso ultrassônico (VPU) e fluorescência de Raios X, para determinação de variações quantitativas. Analisou-se também a viabilidade da utilização de uma metodologia experimental capaz de correlacionar resultados normatizados com corpos de prova em escalas reduzidas fora de norma. Para os meios ácidos e sulfatados foi observado tendência destrutiva quanto a resistência interna, com diferença entre os comportamentos de ambos. No primeiro foi observado um retardo no processo de ganho de resistência com modificação da inclinação do ramo de 28 aos 92 dias da curva característica, já no segundo houve apenas a redução escalonada das resistências do meio padrão, sem nenhuma outra observação. Quanto aos meios básicos ou alcalinos, foi observado uma melhoria em todos os aspectos analisados, ocorrendo melhor trabalhabilidade no estado fresco, incrementos de resistência a compressão de até 5,50% e tração em 21,52%, maior uniformidade das peças, melhor qualidade nos teste ultrassônicos e melhor perfil químico, com maior adesão de componentes favoráveis à resistividade eletroquímica.

Palavras-chave: Alterações de pH. Água de amassamento. Cimento Portland. Resistência.

ABSTRACT

In 2016, 4.2 billion tons of cement were produced around the world, with a perspective of growth for the following years. Pathologies in concretes and mortars are generally related to the interaction of external agents in the chemical composition of Portland cement, however the internal components may have the same influence. The mixing water is a component that does not have much researches related to its influence, with just a few parameters of criteria. This paper intend to analyze the influence of mixing water with different pH ranges, presence of sulphates and chlorides, on fresh state and hardened concrete aspects, performing visual analysis to observe qualitative aspects and Slump Test, compression and traction strength, ultrasonic pulse velocity (UPV) and X-ray fluorescence, to determine quantitative variations. The feasibility of use an experimental methodology capable to correlate standardized results of specimens at a reduced non-standard scales was also analyzed. For acid and sulfated solutions, a destructive tendency was observed regarding the internal resistance, with a difference between the behaviors of both. In the first one, was observed a delay in the resistance gain process with modification of the inclination of the 28 to 92 days curve segment, while in the second one was only a staggered reduction in the resistances of the standard medium, without any other observation. Regarding basic or alkaline mixtures, an improvement was observed in all aspects analyzed, with better workability in the fresh state, increases in compressive strength of up to 5.50% and traction in 21.52%, greater uniformity of parts, better quality. in ultrasonic tests and better chemical profile, with greater adhesion of components favorable to electrochemical resistivity.

Key-words: pH interferences. Mixing water. Portland Cement. Resistance.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Observações de causas patológicas na construção civil.	17
Figura 2 - Fluxograma da metodologia não normatizada.	26
Figura 3 - Conjunto utilizado para aferição dos índices físicos.	28
Figura 4 - Correlação entre potencial elétrico e hidrogeniônico.	28
Figura 5 - Medidas do molde de corpo de prova.	29
Figura 6 - Materiais empregados na moldagem.	30
Figura 7 - Aspecto após a desmoldagem.	31
Figura 8 - Aspectos após a desmoldagem.	32
Figura 9 - Adaptações para resistência compressão.	33
Figura 10 - Fluxograma da metodologia normatizada.	34
Figura 11 - Ensaio de composição granulométrica.	37
Figura 12 - Ensaio de determinação de massa unitária.	39
Figura 13 - Fotos do procedimento de moldagem.	42
Figura 14 - Determinação da velocidade do pulso ultrassônico.	45
Figura 15 - Conjunto utilizado na fluorescência de raio X.	47
Figura 16 - Aspectos observados para o sulfato de zinco ($ZnSO_4$).	55
Figura 17 - Dados das forças máximas aplicadas, com dados descritivos.	57
Figura 18 - Gráfico residual versus quantil e resíduos sobre nivelamentos.	58
Figura 19 - Curva granulométrica do agregado miúdo, e limites de distribuição NBR 7211. .	62
Figura 20 - Curva granulométrica do agregado graúdo.	64
Figura 21 - Aferição do Slump Test para T0 e T1.	72
Figura 22 - Aferição do Slump Test para T2 e T3.	73
Figura 23 - Gráfico das medidas de abatimento de n1 e n2.	73
Figura 24 - Taxa de hidratação dos constituintes do cimento.	77
Figura 25 - Ganho de resistência em cada constituinte.	77
Figura 26 - Curva de ganho de resistência à compressão nos diferentes meios.	80
Figura 27 - Distribuição dos resultados de compressão axial.	80
Figura 28 - Gráfico residual do modelo versus nivelamento.	81
Figura 29 - Gráfico normal versus quantil.	82
Figura 30 - Curva de ganho de resistência à tração nos diferentes meios.	86
Figura 31 - Distribuição dos resultados de tração diametral.	86
Figura 32 - Gráfico residual do modelo versus nivelamento.	87

Figura 33 - Gráfico normal versus quantil.....	88
Figura 34 - Representação gráfica resistência à flexão das argamassas.....	91
Figura 35 - Gráfico residual versus quantil e resíduos sobre nivelamentos.	92
Figura 36 - Representação gráfica resistência à compressão das argamassas.	93
Figura 37 - Resistência à compressão axial de argamassas com diferentes teores de AC.	93
Figura 38 - Representação gráfica dos componentes cimentícios.	98

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Adições químicas por etapas do tratamento de água.....	20
Tabela 2 - Componentes percentuais e equivalência ASTM C150.	22
Tabela 3 - Requisitos físicos e químicos.	23
Tabela 4 - Ensaio não-destrutivo, com suas normas nacionais e internacionais.....	24
Tabela 5 - Quantidade de corpos de prova, concentrações e massas dos reagentes.....	27
Tabela 6 - Resumo das características qualitativas observadas por etapa.	32
Tabela 7 - Resumo das principais normas, com respectivos dados gerados.	34
Tabela 8 - Detalhes das soluções para os corpos normalizados.	40
Tabela 9 - Parâmetros físicos de entrada para o método de dosagem.	41
Tabela 10 - Resultado do método de dosagem para os elementos caracterizados.	41
Tabela 11 - Dosagens de argamassas conforme Tabela A.2 da NBR 7215.	42
Tabela 12 - Classificação da qualidade do concreto com base no pulso ultrassônico.....	45
Tabela 13 - Caracterizações das soluções quanto ao pH, condutividade e temperatura.	51
Tabela 14 - Caracterizações quanto à sólidos totais das soluções em escala reduzida.	52
Tabela 15 - Aspectos visuais observados na moldagem.	53
Tabela 16 - Aspectos visuais observados na desmoldagem após 24 horas.	54
Tabela 17 - Aspectos visuais observados no rompimento, aos 28 dias.....	54
Tabela 18 - Resultados dos rompimentos à compressão, aos 28 dias.	56
Tabela 19 - Resultado do teste de Levene e Shapiro para a força máxima aplicada.....	58
Tabela 20 - Resultado do teste de variância ANOVA para força máxima aplicada.	59
Tabela 21 - Teste de aspersão de fenolftaleína.....	59
Tabela 22 - Massas registradas da composição granulométrica, agregado miúdo.....	60
Tabela 23 - Apresentação de resultados conforme NM 248.	61
Tabela 24 - Diâmetros notáveis e coeficientes de curvatura.	62
Tabela 25 - Massas registradas da composição granulométrica, agregado graúdo.	63
Tabela 26 - Diâmetros notáveis e coeficientes de curvatura.	63
Tabela 27 - Registro das massas e procedimento de cálculo.....	65
Tabela 28 - Registro das massas e procedimento de cálculo.....	66
Tabela 29 - Calibração do recipiente.....	66
Tabela 30 - Registro das massas e procedimento de cálculo, agregado miúdo.....	67
Tabela 31 - Registro das massas e procedimento de cálculo, agregado graúdo.....	68
Tabela 32 - Registro das massas e procedimento, agregado graúdo compactado.....	68

Tabela 33 - Resultados de requisitos físicos e químicos.	69
Tabela 34 - Composição Granulométrica.	69
Tabela 35 – Registro do procedimento e cálculo.	70
Tabela 36 - Cálculo da massa específica.	71
Tabela 37 - Resultado do Slump Test, NM 67.	71
Tabela 38 - Compressão axial, água destilada, 28 e 92 dias.	75
Tabela 39 – Compressão axial, ácido nítrico, 28 e 92 dias.	76
Tabela 40 – Compressão axial, hidróxido de potássio, 28 e 92 dias.	78
Tabela 41 – Compressão axial, sulfato de potássio, 28 e 92 dias.	79
Tabela 42 - Resultado do teste de Levene e Shapiro para a compressão axial.	81
Tabela 43 - Resultado do teste ANOVA para resistência à compressão axial.	82
Tabela 44 – Tração diametral, água destilada, 28 e 92 dias.	83
Tabela 45 – Tração diametral, ácido nítrico, 28 e 92 dias.	84
Tabela 46 – Tração diametral, hidróxido de potássio, 28 e 92 dias.	85
Tabela 47 – Tração diametral, sulfato de potássio, 28 e 92 dias.	85
Tabela 48 - Resultado do teste de Levene e Shapiro para a tração diametral.	87
Tabela 49 - Resultado do teste ANOVA para resistência à tração diametral.	88
Tabela 50 – Resistência à flexão e compressão, água destilada, aos 28 dias.	89
Tabela 51 – Resistência à flexão e compressão, ácido nítrico, aos 28 dias.	89
Tabela 52 – Resistência à flexão e compressão, hidróxido de potássio, aos 28 dias.	90
Tabela 53 – Resistência à flexão e compressão, sulfato de potássio, aos 28 dias.	90
Tabela 54 - Verificação de homocedasticidade e normalidade, resistência à flexão.	91
Tabela 55 - Resultado do teste de variância ANOVA para resistência a flexão.	92
Tabela 56 - Verificação de homocedasticidade e normalidade, resistência à compressão.	94
Tabela 57 - Registros individuais do procedimento de ultrassom.	95
Tabela 58 - Resultados estatísticos descritivo de ultrassom aos 28 dias.	96
Tabela 5.47 - Resultados estatísticos descritivo de ultrassom aos 92 dias.	96
Tabela 60 - Registros das colorações após aspersão de fenolftaleína.	97
Tabela 61 – Resultados do FRX, percentuais em massa.	98

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	16
2. OBJETIVOS.....	19
3. REFERENCIAL TEÓRICO.....	20
3.1. Características de potabilidade de águas superficiais e subterrâneas.....	20
3.2. Composição química e normatização do cimento Portland	21
3.3. Tecnologias de ensaios não destrutivos na construção civil	24
4. METODOLOGIA	26
4.1. Corpos de prova em escala reduzida	26
4.1.1. Águas de composição	27
4.1.2. Caracterização das soluções utilizadas	27
4.1.3. Moldes utilizados	29
4.1.4. Aglomerante e agregado miúdo	29
4.1.5. Proporções e moldagem.....	30
4.1.6. Análises visuais qualitativas	31
4.1.7. Rompimento por compressão axial.....	32
4.1.8. Aspersão de fenolftaleína à 1%.....	33
4.2. Corpos de prova normatizados	33
4.2.1. Caracterização dos agregados utilizados no concreto.....	35
NBR NM 26 – Agregados – Amostragem	35
NBR NM 27 – Agregados – Redução de Amostra	36
NBR NM 248 – Agregados – Composição Granulométrica.....	36
NBR NM 52 – Agregado Miúdo – Massa Específica e Específica Aparente.....	37
NBR NM 53 – Agregado Graúdo – Massa Específica, Aparente e Absorção.....	37
NBR NM 45 – Agregados – Massa Unitária e Vazios	38
4.2.2. Caracterização do agregado utilizado nas argamassas.....	39
4.2.3. Caracterização do cimento utilizados nos concretos e argamassas	39
NBR 11579 – Cimento Portland — Determinação do índice de finura.....	39
NBR 16605 – Massa Específica do Cimento Portland	40
4.2.4. Caracterização das águas, reagentes e soluções utilizadas	40
4.2.5. Dosagem dos traços e misturas	41
4.2.6. Caracterização do concreto e a pasta de cimento no estado fresco.....	43
NBR NM 67 – Slump Test.....	43
4.2.7. Procedimentos de moldagem concretos e argamassa	43
NBR 5738 – Concreto – Procedimento para Moldagem e Cura.....	43

NBR 7215 – Cimento Portland – Resistência à Compressão	43
4.2.8. Ensaios destrutivos de resistências características.....	44
NBR 5739 – Concreto – Ensaio de Compressão em Corpos Cilíndricos	44
NBR 7222 – Concreto – Resistência à Tração Diametral.....	44
NBR 13279 – Argamassas – Resistência à flexão e compressão	44
4.2.9. Ensaios não destrutivos e caracterizações químicas	45
NBR 8802 –Velocidade de Propagação de Ultrassom.....	45
Aspersão de fenolftaleína a 1%	46
Fluorescência de Raios X.....	47
4.3. Validação de dados e teste estatísticos	48
4.3.1. Médias do conjunto de dados.....	48
4.3.2. Desvio padrão amostral.....	48
4.3.3. Coeficiente de variação amostral	49
4.3.4. Pressupostos de normalidade e homocedasticidade.....	49
4.3.5. Teste de análise de variância.....	50
5. RESULTADOS DOS ENSAIOS	51
5.1. Análise química das águas e soluções de amassamento.....	51
5.2. Resultados dos corpos de prova em escala reduzida.....	53
5.2.1. Observações dos aspectos visuais	53
5.2.2. Forças máximas dos rompimentos à compressão axial	56
5.2.3. Teste de aspersão de fenolftaleína	59
5.3. Resultados dos corpos de prova em escala normatizada.....	60
5.3.1. Caracterização dos agregados utilizados nos concretos.....	60
NBR 248 – Composição Granulométrica	60
NBR NM 52 - Agregado Miúdo - Massa Específica e Aparente.....	65
NBR NM 53 - Agregado Graúdo - Massa Específica, Aparente e Absorção.....	65
NBR NM 45 - Agregados - Massa Unitária e Vazios.....	66
5.3.2. Caracterização do agregado utilizado nas argamassas.....	69
5.3.3. Caracterização do cimento utilizados nos concretos e argamassas	70
NBR 11579 – Cimento Portland — Determinação do índice de finura.....	70
NBR 16605 – Massa Específica do Cimento Portland	71
5.3.4. Caracterização do concreto e a pasta de cimento no estado fresco.....	71
NBR NM 67 – Slump Test.....	71
5.3.5. Ensaios destrutivos de resistências características.....	75
NBR 5739 – Concreto – Ensaio de Compressão em Corpos Cilíndricos	75

NBR 7222 – Concreto – Resistência à Tração Diametral.....	83
NBR 13279 – Argamassas – Resistência à flexão e compressão	89
5.3.6. Ensaio não destrutivo e caracterizações químicas	95
NBR 8802 –Velocidade de Propagação de Ultrassom.....	95
Aspersão de fenolftaleína a 1%	97
Fluorescência de Raios X.....	97
6. CONCLUSÃO.....	100
6.1. Considerações finais.....	100
6.2. Limitações e sugestões de trabalhos futuros	101
6.3. Contribuições em artigos e periódicos	102
REFERÊNCIAS	103

1. INTRODUÇÃO

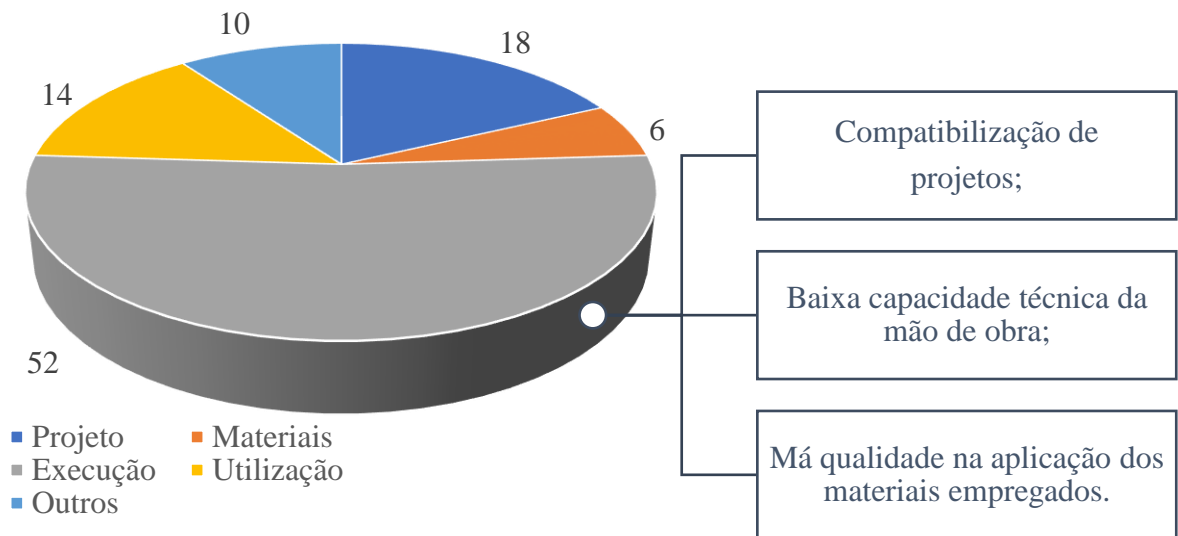
A engenharia civil é uma área do conhecimento em constante evolução, seja do ponto de vista dos materiais utilizados, técnicas construtivas ou métodos de projeto (Souza e Ripper, 1998). Nesse contexto, o concreto de cimento Portland é descrito como um dos materiais de construção mais utilizados no mundo, até como o segundo produto mais consumido mundialmente (Alves, 2017).

Elementos que contém cimento Portland geralmente possuem natureza estrutural, sejam argamassas utilizadas em assentamento de blocos ou estruturas de concreto armado, dentre outros. Sua resistência se dá principalmente à compressão, tendo também leve resistência à tração. No Brasil, a concepção de projetos de estruturas é baseada na utilização do empreendimento, com estimativas de cargas conforme NBR 6120. O dimensionamento dos elementos é realizado em atendimento aos níveis de serviço das estruturas, com base na análise estrutural do conjunto.

Os conceitos acima são muito dentro da área de análise e estabilidade de estruturas, subárea da engenharia civil. A principal norma brasileira que dispõem sobre estruturas de concreto armado é NBR 6118. Nela são abordados os procedimentos de cálculo e diretrizes para as execuções. As estruturas são dimensionadas para atuar apenas no regime elástico, estabelecidos por meio estado limite de serviço (E.L.S.), além dos seus elementos cruciais, tais como momento de projeto, resistência do concreto e do aço, possuem coeficientes de majoração de 10% a 40%, no intuito de aumentar a segurança. Mesmo com as considerações acima, atendendo a todos requisitos normativos, é possível que haja a ocorrência de patologias ou outras interferências, que possam vir a comprometer o desempenho mínimo esperado.

Patologias e recuperações estruturais constituem outra subárea da mesma temática. Se trata do estudo dos danos às edificações, com investigação de suas causas e técnicas de recuperação. Oliveira (2013) apresenta um breve estudo sobre as origens de algumas patologias na construção civil. Os dados são apresentados na Figura 1.

Figura 1 - Observações de causas patológicas na construção civil.



Fonte: Oliveira, 2013.

Como é possível visualizar no gráfico radial da Figura 1, a maior incidência das manifestações patológicas, com percentual de 52%, se origina de erros durante a execução, apresentado como uma das principais causas a má qualidade e incorreta utilização dos materiais empregados. Ao final da cadeia produtiva da construção, o produto pode ser resumido à um conjunto de materiais, dispostos de forma técnica e segura, juntamente à logística de serviços necessária à sua execução. Logo, conhecer a dinâmica e o comportamento dos materiais é imprescindível para a devida utilização, necessário para a correção de patologias e crucial para o desenvolvimento e aperfeiçoamento de materiais.

Conforme disposto anteriormente, concretos e argamassas possuem elevada importância estrutural, sendo produzidos em larga escala mundialmente. Ambos são resultados da mistura de três elementos principais: aglomerante, agregado(s) e água, onde cada item possui sua função e particularidades, onde a não conformidade individual de qualquer desses elementos afetará diretamente o desempenho esperado.

O cimento Portland, é um aglomerante produzido industrialmente, obtidos através de calcinação de elementos primários, posteriormente especificados. Devido a esse caráter industrial, possui elevado controle de qualidade em sua produção. Os agregados, preponderantemente de origem mineral, são resultado da simples extração ou da britagem de rochas, normalmente inertes quimicamente. Já a água de constituição, ou amassamento, não possui muitos critérios para a determinação da sua conformidade para utilização, definido apenas o critério de potabilidade.

Ballarin (2003) define que a água de amassamento deve ser isenta de impurezas, tais como matéria orgânica, resíduos sólidos, açúcares e íons de cloretos e sulfatos. A água potável provida pela rede de abastecimento pública é considerada adequada para utilização conforme Alves (1993) e Dantas (2003). Contudo analisando a legislação vigente para o tema, norteador nacionalmente pelo ministério da saúde, Portaria nº 36, de 19 de janeiro de 1990, é possível visualizar que os padrões de potabilidade, expressos através de limites dos físico químicos e concentrações de íons, contrastam diretamente com os requisitos anteriores.

Com base nessas disposições, é possível visualizar que o estudo da influência de variações físico-químicas das águas de amassamento em concretos e argamassas pode evidenciar aspectos até então não observados, contribuindo para a evidenciar possíveis patologias, antes de suas manifestações, contribuindo possivelmente para a melhoria dos materiais e desempenho das estruturas observados. Dessa forma, esse contexto se torna plausível de maior aprofundamento e investigação.

2. OBJETIVOS

De acordo o panorama apresentado, este trabalho objetiva analisar a interferência de aspectos químicos e substâncias contaminantes nas águas de amassamento de concretos e argamassas, avaliando a interferência do potencial hidrogeniônico nas misturas, simulando meios ácidos e básicos, como também da presença de cloretos e sulfatos sob os mesmos termos.

Como parâmetro de análise utilizou-se aspectos quantitativos, como resistência à compressão e tração, e qualitativos, como análise visual de aspectos pré-definidos, além do emprego de técnicas de avaliação não destrutivas, para estimativas sobre a qualidade e estimativas das resistências internas, e análise analítica direta da composição química dos corpos de prova, através de fluorescência de Raio X. Dentro da análise acima, objetivou-se também evidenciar os seguintes pontos secundários:

- Propor uma metodologia, de escalas reduzidas, para elementos de argamassas de cimento Portland, que possa demonstrar variações quali-quantitativas, relacionando os aspectos visuais observados a resistência interna característica. Validar essa metodologia correlacionando as tendências observadas aos corpos de prova normatizados;
- Analisar a influência do pH das águas de amassamento e soluções de cura, nos corpos de prova analisados, com foco específico nos resultados benéficos obtidos de ganho de resistência e melhoria das propriedades internas das soluções de caráter básico;
- Validar estatisticamente os dados de resistências obtidas, evidenciando alterações de tendências e comportamentos por meio da análise de variância (ANOVA) e verificação dos seus pressupostos;
- Analisar possíveis alterações das reações de hidratação e ganho de resistência nos diferentes meios, com foco em durabilidade e possíveis patologias;
- Correlacionar os dados dos ensaios destrutivos com os métodos não destrutivos, analisando a similaridade das variações entre ambos.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

Uma vez que o presente trabalho se propõe a analisar as interferências de variações da água de amassamento nas resistências e outros aspectos de concretos e argamassas, faz-se necessário contextualizar inicialmente as temáticas concernentes ao entendimento das metodologias e resultados a serem apresentados.

3.1. Características de potabilidade de águas superficiais e subterrâneas

No Brasil, a legislação que estabelece normas e padrões de potabilidade para a água destinada ao consumo humano é regulada pelo ministério da saúde, através da Portaria nº 36, de 19 de janeiro de 1990, complementada por legislações estaduais e regionais. Nela constam disposições sobre fatores físico-químicos como pH, concentrações máximas de elementos como nitratos, cloretos, sulfatos, dentre outros fatores, além de dispor sobre o número e locais de coletas de amostras para controle de qualidade. As margens estabelecidas são simplificadas, e as verificações dos índices são necessárias em pontos mínimos para verificar a qualidade global da rede de distribuição, conforme legislação.

Nas estações de tratamento das concessionárias são adicionadas várias substâncias químicas em cada subprocesso específico.

Tabela 1 - Adições químicas por etapas do tratamento de água.

Etapa	Substância
Pré-cloração	Cloro (Cl_2)
Pré-alkalinização	Cal (CaO) ou soda (Na_2CO_3)
Coagulação	Sulfato de alumínio ($\text{Al}_2\text{SO}_{4.3}$) ou cloreto férrico (FeCl_3)
Desinfecção	Cloro (Cl_2)
Fluoretação	Ácido fluossilícico (H_2SiF_6) ou flúorsilicato de sódio (Na_2SiF_6)

Fonte: Concessionária de água estadual, 2019.

O cloro (Cl_2) é oriundo principalmente dos processos de desinfecção e sulfatos (SO_3^-) decorrentes do processo de coagulação ($\text{Al}_2\text{SO}_{4.3}$). Contudo este último íon pode ser resultado também da contaminação por águas residuais, conforme afirmação de Prado (2010). Comum aos estudos de patologias e materiais, a presença de cloretos e sulfatos é prejudicial à resistência de elementos de cimento Portland, sendo responsável também pela diminuição do tempo de vida útil e de serviço. Já o óxido de cálcio (CaO) é apontado por Souza e Ripper (1998) como resultado de erros durante o processo de fabricação, na má formação do clínquer, sendo prejudicial devido à elevada expansibilidade e variações volumétricas durante o processo de hidratação e ganho de resistência. Este óxido é também adicionado à água na fase de pré-alkalinização.

Alaburda e Nishihara (1997) afirmam que a presença de compostos nitrogenados, geralmente de caráter ácido, é um indicativo de contaminação por águas residuárias, tanto para fontes superficiais quanto subterrâneas. A legislação federal vigente, citada anteriormente, regulamenta um limite máximo para íons nitrato da ordem de 10 mg/L, com verificação de conformidade semestral. Não existem menções à nitrogênio amoniacal, nitritos ou similares, na legislação federal.

Piratoba (et al., 2017) afirma que o potássio dissolvido em mananciais, geralmente na forma de óxido de potássio (K_2O), possui duas origens principais, uma natural, devido ao processo de lixiviação de rochas, e outra antrópica, por meio da contaminação de solos e cursos hídricos, através do uso indevido de defensivos agrícolas. Na legislação mencionada anteriormente não existem menções a este íon nem outros similares, não possuindo assim tratamento para sua remoção em específico.

Vários outros fatores internos e externos podem influenciar na qualidade da água fornecida. As estações de tratamento e rede de distribuição possuem influência direta nos aspectos finais, através dos materiais empregados durante o tratamento, o estado de conservação das tubulações, a deposição de sólidos ao longo dos anos, dentre outros. Outro ponto de relevante é que em alguns locais das redes de abastecimento é necessário realizar a descarga de final de linha, que é um procedimento para limpeza de incrustamentos e sólidos depositados nas tubulações, sendo esses materiais provenientes da água tratada fornecida.

Outro ponto de considerável desvantagem é a periodicidade das aferições. Verificações de pH na rede de distribuição devem ser feita uma vez ao mês, químicos dissolvidos a cada seis meses, dentre outros períodos estipulados. Alguns pontos estabelecidos nessa portaria são alvo de discussão, juntamente às adições químicas durante o processo de tratamento.

3.2. Composição química e normatização do cimento Portland

Concretos e argamassas são componentes base da construção civil. Helene e Andrade (2010) afirmam que o concreto é o material estrutural mais importante para a construção civil da atualidade, sendo depois da água, o material mais consumido pelo homem. Seu principal elemento constituinte é o aglomerante, sendo geralmente o cimento Portland.

Este é definido como aglomerante hidráulico, que ganha resistência em contato com a água. É de natureza inorgânica, e pode ser descrito como um material de propriedades adesivas e coesivas, que o fazem capaz de unir fragmentos minerais na forma de uma unidade compacta (Neville, 2016). Em 2015 a produção mundial foi cerca de 4,6 bilhões de toneladas,

representando um crescimento anual de 7% se comparado à 2010. A China se apresenta atualmente como maior produtor mundial, com 2.410 milhões de toneladas produzidas em 2016, de acordo com dados da *Mineral Commodity Summaries* (2017).

Dentre suas matérias primas destaca-se o calcário (CaCO_3), a sílica (SiO_2), alumina (Al_2O_3) e óxido de ferro (Fe_2O_3), que após as interações em alto forno, denominada clínquerização, é convertido em silicato tricálcico ($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ou C_3S), silicato dicálcico ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ou C_2S), aluminato tricálcico ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ ou C_3A) e ferro-aluminato tetracálcico ($4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ ou C_4AF). O percentual entre esses componentes determinará suas propriedades, como tempo de pega, calor de hidratação, resistência à compressão, dentre outros.

A *American Society for Testing and Materials*, ASTM, normatiza a composição dos cimentos Portland por meio da norma C150, que dispõem sobre as proporções de cada constituintes primários, bem como as adições de cada tipo composto.

Cimentos Portland comuns e compostos, com adições de escória alto forno, pozolana ou filler, são normatizados no Brasil desde 2018 pela ABNT NBR 16697. Ao total são definidos 10 tipos distintos, separados em categorias, em função das misturas, adições, comportamento estrutural e desempenho. Dentre os limites de classificações é estabelecido os percentuais mínimos e máximos em massa de cada componente. A Tabela 2 apresenta a composição percentual dos elementos constituintes de cada tipo, juntamente à equivalência à ASTM C150.

Tabela 2 - Componentes percentuais e equivalência ASTM C150.

Designação Normalizada	Sigla ABNT	Sigla ASTM	Clínquer + Sulfatos de Cálcio	Escória de Alto Forno	Material Pozolânico	Material Carbonáceo
Cimento Portland Comum	CP I	CEM IIA	95 – 100		0 – 5	
	CP I-S	CEM II	90 – 94	0	0	6 – 10
Composto com Escória de Alto Forno	CP II-E	CEM IS	51 – 94	6 – 34	0	0 – 15
Composto com material Pozolânico	CP II-Z	CEM IP	71 – 94	0	6 – 14	0 – 15
Composto com material Carbonáceo	CP II-F	-	75 – 89	0	0	11 – 25
Cimento Portland de Alto Forno	CP III	-	25 – 65	35 – 75	0	0 – 10
Cimento Portland Pozolânico	CP IV	CEM IP (BC)	45 – 85	0	15 – 60	0 – 10
Cimento Portland de Alta Resistência Inicial	CP V	CEM III	90–100	0	0	0 – 10
Cimento Portland Estrutural		-	75 – 100	-	-	0 – 25
Portland Não Branco Estrutural	CPB	-	50 – 74	-	-	26 – 50

Fonte: Laranjeiras (2011), ABNT (2018) e ASTM (2019).

Em ambas as normas também são definidos requisitos de solubilidade, resultados máximos de termo gravimetria, juntamente aos percentuais químicos de óxido de magnésio e trióxido de enxofre, conforme disposto na Tabela 3.

Tabela 3 - Requisitos físicos e químicos.

Sigla ABNT	Sigla ASTM	Resíduo Insolúvel (RI)	Perda ao Fogo (PF)	Óxido de Magnésio (MgO)	Trióxido de Enxofre (SO₃)
CP I	CEM IIA	≤ 5,0	≤ 4,5	≤ 6,5	≤ 4,5
CP I-S	CEM II	≤ 3,5	≤ 6,5	≤ 6,5	≤ 4,5
CP II-E	CEM IS	≤ 5,0	≤ 8,5	-	≤ 4,5
CP II-Z	CEM IP	≤ 7,5	≤ 12,5	-	≤ 4,5
CP II-F	-	≤ 18,5	≤ 8,5	-	≤ 4,5
CP III	-	≤ 5,0	≤ 6,5	-	≤ 4,5
CP IV	CEM IP(BC)	-	≤ 6,5	-	≤ 4,5
CP V	CEM III	≤ 3,5	≤ 6,5	≤ 6,5	≤ 4,5

Fonte: ABNT (2018) e ASTM (2019).

No processo de hidratação do cimento ocorre a formação dos silicatos, aluminatos, monosulfaluminatos de cálcio hidratado, etringita e hidróxidos a partir da reação dos compostos do cimento com a água. Esse processo pode ser avaliado diretamente por técnicas de microscopia ótica ou difração de raio x, ou indiretamente, por determinação do calor de hidratação, análise termogravimétrica (Parrot et al., 1990).

Esse processo evolui com o tempo, tendo aos 28 dias cerca de 70 a 80% de grau de hidratação (Delahaie, 1996) praticamente cessando aos 365 dias (Taylor, 1997). Diversos fatores podem influenciar o processo de hidratação, desde o módulo de finura do clínquer, sua composição química, até a quantidade de água adicionada (Senff et al, 2005). Esse fenômeno envolve vários processos químicos, cada qual com uma cinética e taxa de reação diferenciadas (Ferreira, 2013). Logo, é possível presumir que a presença de fatores químicos externos, durante esse processo complexo, pode certamente ocasionar alterações no produto gerado, por meio de alterações nas reações de formação.

Dentre as principais causas de patologias elencadas por Ripper e Souza (1998) é possível atribuir uma faixa de 5 a 40% de ocorrências devido à materiais, segundo a análise percentual na literatura. Dentre as causas químicas apontadas tem-se as reações de expansibilidade excessiva de certos constituintes, presença de cloretos e sulfatos, presença de ácidos, outros sais gerais e a presença de anidrido carbônico. Além da interação entre esses elementos externos e os constituintes, pode-se também evidenciar que esses elementos são responsáveis por modificar o meio das reações, alterando fatores como pH, cinética da reação, dentre outros.

3.3. Tecnologias de ensaios não destrutivos na construção civil

Ensaio não destrutivo pode ser definido como procedimentos e métodos que não alteram as propriedades físicas, químicas, mecânica ou dimensionais dos objetos ensaiados, implicando em danos imperceptíveis ou nulos.

Malhotra e Carino (2004) afirmam que os ensaios não-destrutivos são práticas consolidadas bem presentes em outras áreas, como a metalurgia por exemplo. Contudo, para a construção civil ainda é algo relativamente novo e pouco utilizado. Ferreira (2011) atribui o desenvolvimento lento da consolidação desses ensaios, aplicado à concreto, devido à natureza anisotrópica do material, à variedade das composições e as diferentes matérias primas disponíveis, dificultando o desenvolvimento de padronizações. Ainda segundo o mesmo autor, houve alguns progressos notáveis com a unificação e normalização de métodos pelas normas americana (ASTM), canadense (CSA), pela organização de norma internacionais (ISO), britânica (BSI), dentre outras.

No Brasil, alguns métodos já contam com norma específica vigente, ensaios esses que são geralmente aplicados à determinação da resistência interna de estruturas de concreto ou similares, analisando conformidade, uniformidade, dentre outros fatores.

Tabela 4 - Ensaio não-destrutivos, com suas normas nacionais e internacionais.

Ensaio	Norma nacional	Norma estrangeira
Esclerometria	NBR 7584	ASTM C805; BS 1881: Parte 202
Resistência à penetração	-	ASTM C900; BS1881: Parte 207
Termografia infravermelha	-	ASTM D4788-03
Velocidade do pulso ultrassônico	NBR 8802	ASTM C597; BS 1881: Parte 203

Fonte: Joffily (2010) e Autor (2019).

Ensaio não destrutivo está em ascensão quanto à sua adoção e utilização, em meios acadêmicos e profissionais, devido ao real potencial que possuem em avaliar a capacidade efetiva da condição estrutural (Manjunath, 2007), bem como a não interferência nas estruturas existentes.

Segundo a NBR 8802, o ensaio de ultrassom é um método de avaliação qualitativa do concreto, utilizado para determinar a velocidade de propagação de ondas longitudinais, por meio de pulsos ultrassônicos, através de um elemento estrutural. Suas principais aplicações são de analisar a homogeneidade do concreto, detectar falhas internas de concretagem, profundidade de fissuras e outras anomalias e monitoramento de variações, decorrentes do meio de agressividade ao qual está inserido.

Neste método determina-se a frequência fundamental de ressonância do corpo de prova, podendo-se calcular o módulo de elasticidade dinâmico do concreto. A vibração pode ser aplicada em modo longitudinal, transversal ou torsional (Evangelista, 2002). O coletor recebe as vibrações simplificadas e sua amplitude é medida por um indicador adequado (Neville, 1997). Algumas metodologias utilizam o parâmetro de velocidade para estimar quantitativamente algumas características físicas, como módulo de elasticidade e resistência a compressão, contudo nem sempre essa estimativa é precisa ou eficaz.

Neste presente trabalho foi executado um ensaio de determinação da velocidade do pulso ultrassônico, conforme NBR 8802, onde os resultados foram utilizados para a classificação da qualidade do concreto analisado, assim como a estimativa do módulo de elasticidade por metodologia específica. Realizou-se também o teste de aspensão de fenolftaleína para determinação do caráter interno dos corpos de prova após o rompimento.

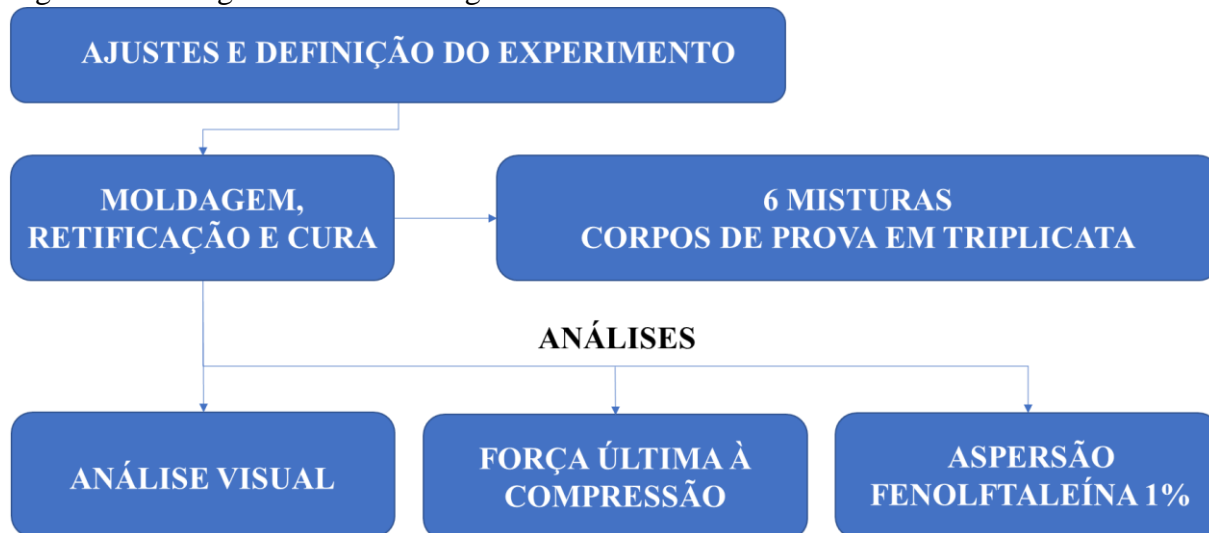
4. METODOLOGIA

A presente metodologia se divide em duas partes principais. A primeira parte é aplicada à corpos de prova em escala reduzida e a segunda aos procedimentos de caracterização e ensaios em corpos de prova normatizados. Os dados iniciais foram utilizados como princípio de evidência, onde foi possível analisar a tendência de algumas hipóteses, sendo no segundo momento correlacionadas ao procedimento normatizado.

4.1. Corpos de prova em escala reduzida

O início da concepção desta metodologia se deu no ano de 2017, durante as atividades de bolsista, do programa de iniciação à docência, aplicado à disciplina de química geral para engenharia. Neste, foi desenvolvido um experimento temático aplicado a materiais da construção civil, sendo adaptado para as escalas laboratoriais de química geral, e ministrado ao corpo discente na forma de experimento piloto. A Figura 2 sintetiza os procedimentos e análises desta etapa de metodologia. Cada item será devidamente detalhado ainda nesta seção.

Figura 2 - Fluxograma da metodologia não normatizada.



Fonte: Autor, 2019.

O experimento se propunha a analisar a interferência de soluções químicas em corpos de prova adaptados de argamassas de Cimento Portland, simulando a ação de contaminantes nas águas de constituição. Como parâmetros comparativos, foram adotados aspectos qualitativos como coloração, rugosidade e desprendimento de partículas ao toque. Como observações quantitativas foi feito o rompimento à compressão, sendo utilizada apenas o parâmetro de força última aplicada.

A análise foi feita com seis meios distintos, em substituição a água de amassamento, com cada substância de interferência, dissolvida na forma aquosa, divididos em três grupos. Em adição foi necessário também um corpo de prova de comparação para servir como padrão, sem interferências, elaborado com água destilada.

4.1.1. Águas de composição

Os corpos de prova (CPs) padrão foram elaborados utilizando apenas água destilada como água de amassamento, os demais, com soluções químicas em substituição. Preparado 500 mL de cada, foi reservada em recipientes de PVC, hermeticamente fechado, guardados em local fechado, longe de intempéries. As análises foram divididas em três grupos principais com duas substâncias cada. Ao total foram preparados três CPs para cada substância, a Tabela 5 mostra a especificação de cada solução, com concentração molar, massa molecular (M.M.), e massa de reagente utilizado.

- Grupo 1 (Interferência do pH): Ácido Nítrico (HNO_3) e o Hidróxido de Potássio (KOH);
- Grupo 2 (Interferência de Cloretos): Cloreto de Sódio (NaCl) e Cloreto de Cálcio (CaCl);
- Grupo 3 (Interferência de Sulfatos): Sulfato de Potássio (K_2SO_4) e Sulfato de Zinco (ZnSO_4).

Tabela 5 - Quantidade de corpos de prova, concentrações e massas dos reagentes.

Ident.	Substância	Quantidade CPs	Concentração (mol/L)	M.M. (g/mol)	Massa Reagente (g)
T0	Destilada	3	-	-	-
T1	HNO_3	3	0,001M	63,01	0,0315
T2	KOH	3	0,001M	56,11	0,0281
T3	NaCl	3	0,5M	58,44	14,6100
T4	$\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	3	0,5M	110,99	27,7475
T5	K_2SO_4	3	0,5M	174,27	43,5675
T6	$\text{ZnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	3	0,5M	179,45	44,8625

Fonte: Autor, 2019.

4.1.2. Caracterização das soluções utilizadas

Após o preparo, cada solução foi caracterizada quanto à pH, condutividade elétrica e sólidos totais dissolvidos, a fim de se obter um parâmetro de reprodutibilidade, a ser comparado com as novas soluções a serem reproduzidas. Para tal foi utilizado um pHmetro digital de bancada, com faixa de mediação de -2 a 20, de calibração automática e um condutímetro com faixa de trabalho 0 a 20000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ calibrado com solução padrão de 146,9 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e leitura de sólidos totais dissolvidos (STD).

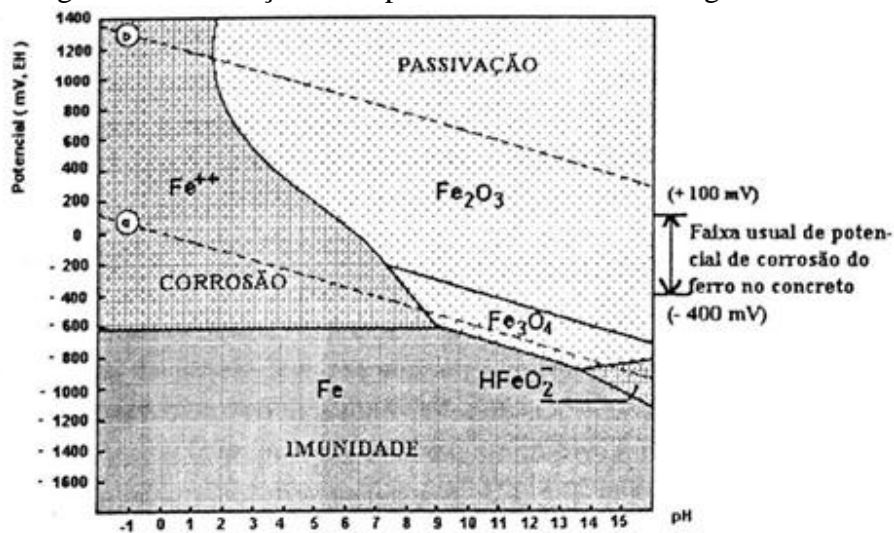
Figura 3 - Conjunto utilizado para aferição dos índices físicos.



Fonte: Fabricante, 2019.

A condutividade elétrica é parâmetro diretamente inverso à resistividade elétrica. Essa, por sua vez, possui relevante importância para o concreto, uma vez que juntamente com a presença de oxigênio, é responsável por controlar o processo eletroquímico de despassivação das armaduras. Também vale salientar que a resistividade está atrelada aos principais estágios de vida útil de uma estrutura, com indícios de uma relação entre ela e a velocidade de corrosão do aço após a despassivação (Silva, 2016). Quanto menor a condutividade elétrica, maior a resistividade, sendo mais benéfico a estruturas de cimento Portland. A Figura 4 mostra as principais correlações descritas acima para as zonas de passivação do concreto.

Figura 4 - Correlação entre potencial elétrico e hidrogeniônico.



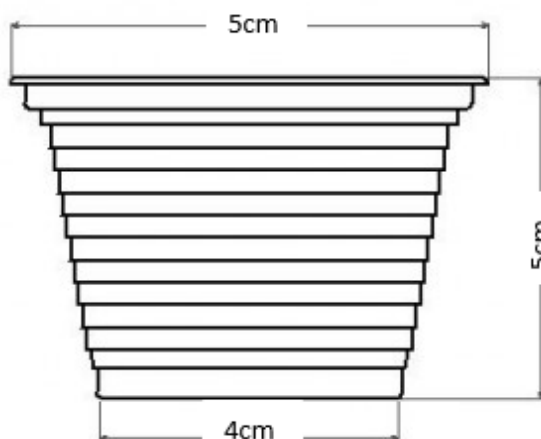
Fonte: Pourbaix, 1974.

A metodologia do diagrama de Pourbaix (1974), mostra entre linhas as regiões de estabilidade das espécies envolvidas, correlacionando o potencial hidrogeniônico no eixo x com o elétrico no eixo y, evidenciando também as zonas de corrosão, passivação e imunidade das interações do concreto com as armaduras, comuns ao concreto armado.

4.1.3. Moldes utilizados

A NBR 7215:2019 é a norma brasileira que dispõe sobre a determinação da resistência à compressão do cimento Portland, aplicável a argamassas. O molde recomendado é de formato cilíndrico, com dimensões de 50 x 100 mm, para a devida execução do ensaio. Contudo, esse volume se mostrou inviável em consideração a capacidade do laboratório e o número de repetições pela quantidade de material necessária. Logo, adotou-se como molde um copo descartável de 50mL, com redução da quantidade de insumos necessários, conforme Figura 5.

Figura 5 - Medidas do molde de corpo de prova.



Fonte: Autor, 2019.

Dado à natureza do formato de tronco de cone, não seria possível determinar a resistência à compressão dos elementos de forma direta, por meio do quociente de força sobre área, e por não ser assegurado que o rompimento interno trabalharia apenas na compressão. Porém, por partilharem do mesmo formato, seria possível elencar correlações das resistências internas, com base no parâmetro de força máxima aplicada. Todos os corpos de prova partilharam do mesmo molde, tiveram suas faces superiores e inferiores regularizadas e possuíam as mesmas dimensões finais.

4.1.4. Aglomerante e agregado miúdo

O aglomerante utilizado foi um cimento Portland, classificação CP II Z 32, conforme NBR 16697. Por se tratar de uma matéria prima laboratorial, sem maiores dados de fornecimento, foi feito um peneiramento através peneira para agregado com abertura 600 μm , normatizado pela NBR NM ISSO 3310-2. Esse procedimento foi para visualizar possíveis grânulos decorrentes da hidratação higroscópica precoce, sendo utilizado apenas o passante. Contudo, não ocorreu a presença de material retido. Todos os corpos foram moldados a partir de uma massa de 1,86 kg, sendo reservado em recipiente fechado, em local seco.

Como agregado miúdo foi utilizado uma areia natural, de diâmetro máximo característico de 4,8 mm, com aspecto visual sedimentar arenítico. Após aquisição de um pequeno volume foi feito a homogeneização do material e retirado uma amostra através de quarteamento por espalhamento, com uma massa final de aproximadamente 2,00 Kg. Mesmo após este processo, ainda era perceptível a presença excessiva de partículas de granulometria elevada. Pela adaptação dos moldes a serem utilizados, tais partículas poderiam ter influência, devido à menor dimensão de 4cm de diâmetro da base.

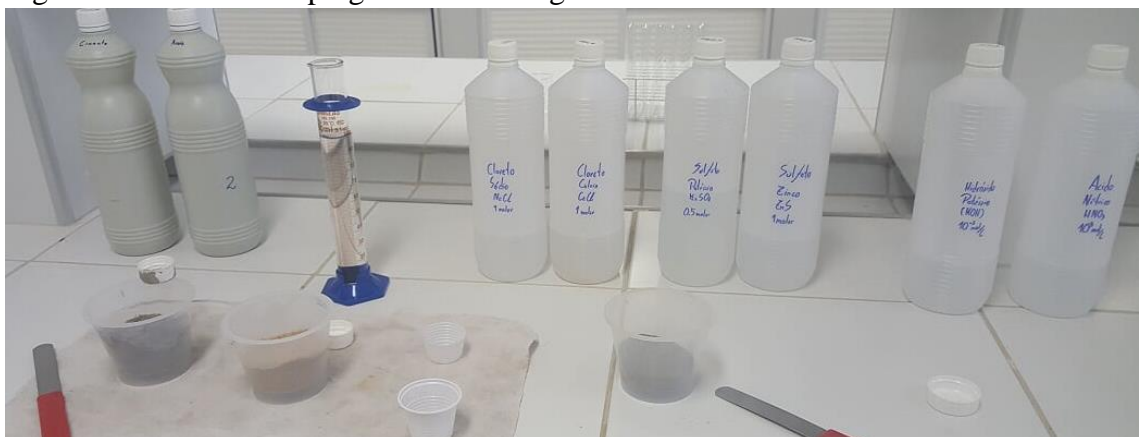
Através do peneiramento, com a peneira de abertura 600 μm , o material retido foi descartado e o passante utilizado, reduzindo a faixa granulométrica da amostra, obtendo uma massa final de 1,60 kg de areia. Destinado à estufa por 24 horas, à temperatura de $105 \pm 5^\circ\text{C}$, foi registrado uma massa seca de 1,55 kg, reservada em recipiente hermético.

4.1.5. Proporções e moldagem

Como último ponto de parâmetro necessário à moldagem, foi definido a proporção entre aglomerante, agregado e água, a dosagem a ser utilizada. Após algumas tentativas de proporções iniciais foi adotado o traço de 50g : 100g : 40mL em massa e volume respectivamente, para cada corpo de prova não normatizado, sendo cada mistura executada em triplicata. Para alcançar a proporção final, foram testadas várias proporções, onde foram visualizados problemas como quantidades incorretas de água, aglomerante dentre outros.

Quanto à moldagem, procedeu-se com a pesagem das massas de cimento e areia, juntamente à separação do volume da solução a ser utilizada. Em um terceiro recipiente foi feito a adição das massas secas e feito a prévia homogeneização, sendo adicionado a água gradualmente, com mistura constante. A Figura 6 apresenta os materiais utilizados.

Figura 6 - Materiais empregados na moldagem.



Fonte: Autor, 2019.

Finalizado o processo acima, a argamassa resultante foi destinada aos moldes adotados, com a ajuda de uma espátula metálica, sendo procedido a acomodação interna, por meio de suaves golpeamentos verticais, até não ser mais visualizados externamente a presença de vazios. Com o molde totalmente preenchido, foi feito o arrasamento da sua superfície superior, sendo cada molde reservado à um local seco, longe de intempéries, para ganho da resistência inicial das primeiras 24 horas, em temperatura ambiente de 27 ± 3 °C.

Após o período mencionado, realizou-se o desmolde das peças, para destinação à cura dos 28 dias iniciais. Também foi realizado nesse momento a retificação das faces superior e inferior, por meio de desgaste superficial, sendo registrada as mesmas alturas em todos os corpos de prova ao final. Na Figura 7 é possível visualizar os diferentes aspectos na imersão.

Figura 7 - Aspecto após a desmoldagem.



Fonte: Autor, 2019.

A NBR 7215 ainda recomenda, em seu item 3.5.3.2, que as peças devem ser imersas em um tanque com água, saturada com cal (CaO), à temperatura ambiente, até o momento do ensaio. Dado às diversas soluções de substituição utilizadas nas águas de amassamento, foi adaptado o processo de imersão, sendo utilizado a própria solução constituinte de cada. Dessa forma, cada peça foi destinada à um béquer de 50 ml, preenchido de solução até a imersão total. Seria analisado também a possível influência da solução de cura nas resistências finais obtidas, dado haveria diferenças entre as soluções a serem utilizadas nas duas metodologias principais.

4.1.6. Análises visuais qualitativas

Durante todos os processos acima, alguns pontos de relevância foram observados referentes às alterações macroscópicas pelos químicos adicionados. Durante a moldagem dos elementos de sulfato, foi observado que para a mesma quantidade de material, comum à todos, foi gerado um volume superior, se comparado aos demais, juntamente um aspecto menos fluido da mistura, bem como após desforma dos CPs com a presença de cloreto de cálcio, foi

perceptível uma coloração mais clara, junto à um menor desprendimento de partículas ao toque, indicando uma possível maior resistência interna.

A Figura 8 apresenta os aspectos visuais após a retirada dos moldes. É possível visualizar diferenças entre texturas, presença de fissuras e outros comportamentos.

Figura 8 - Aspectos após a desmoldagem.



Fonte: Autor, 2019.

Dessa forma, adotou-se os parâmetros qualitativos visualizados na Tabela 6 para observação dos aspectos em cada etapa realizada. Como aspecto quantitativo foi utilizado apenas a força máxima aplicada no rompimento por compressão axial e o teste de fenolftaleína.

Tabela 6 - Resumo das características qualitativas observadas por etapa.

Estado Fresco	Cura Inicial e Desmolde	Rompimentos
Consistência e aspecto da pasta	Desprendimento de partículas ao toque	Desprendimento de partículas ao toque
Volume gerado observado	Visualização de Vazios	Presença de Fissuras
Aspectos de segregação	Coloração	Coloração

Fonte: Autor, 2019.

4.1.7. Rompimento por compressão axial

Para analisar a resistência interna das peças geradas por esse método, submeteu-se o conjunto de corpos de prova de escalas reduzidas ao ensaio de rompimento à compressão axial, com os devidos ajustes, tendo por referência a NBR 5739. Dado a geometria dos elementos, não poderiam ser feitos a determinação da resistência à compressão com base na relação usual do quociente entre força máxima aplicada e seção transversal.

Contudo, dado que todos os corpos de provas de todos os meios partilham das mesmas variáveis e mesmas dimensões, a força máxima aplicada nos rompimentos, ou força última, pode ser utilizada como parâmetro direto relacionado à resistência interna das peças, possibilitando assim elencar a diferentes resistências entre os elementos analisados.

Na Figura 9 é possível visualizar as adaptações realizadas para a compatibilização da altura reduzida dos corpos de prova. Conforme disposto, desse ensaio foi analisado apenas a força última aplicada.

Figura 9 - Adaptações para resistência compressão.



Fonte: Autor, 2019.

4.1.8. Aspersão de fenolftaleína à 1%

Com o rompimento das peças no ensaio anterior, foi coletado amostras dos resíduos, separados em pequenos invólucros de papel, devidamente identificados. Em seguida, realizou-se a aspersão de fenolftaleína 1% a 27 ± 3 °C na superfície interna dos fragmentos. Registrou-se os resultados observados.

4.2. Corpos de prova normatizados

No intuito de correlacionar o método anterior com corpos de prova de concretos e argamassas normatizados, replicou-se novamente a substituição das águas de amassamento, agora em conformidade com as normas de caracterização, moldagem e rompimento pertinentes à cada componente.

Com os ensaios nesta segunda etapa seria gerado dados similares à primeira metodologia, como a trabalhabilidade no estado fresco e a resistência no estado endurecido. A Tabela 7 resume as principais normas utilizadas, juntamente aos tipos de dados, para ambos corpos de prova. Os ensaios inerentes à preparação das amostras e caracterização dos materiais utilizados, estão descritos posteriormente, de forma detalhada, nesta metodologia.

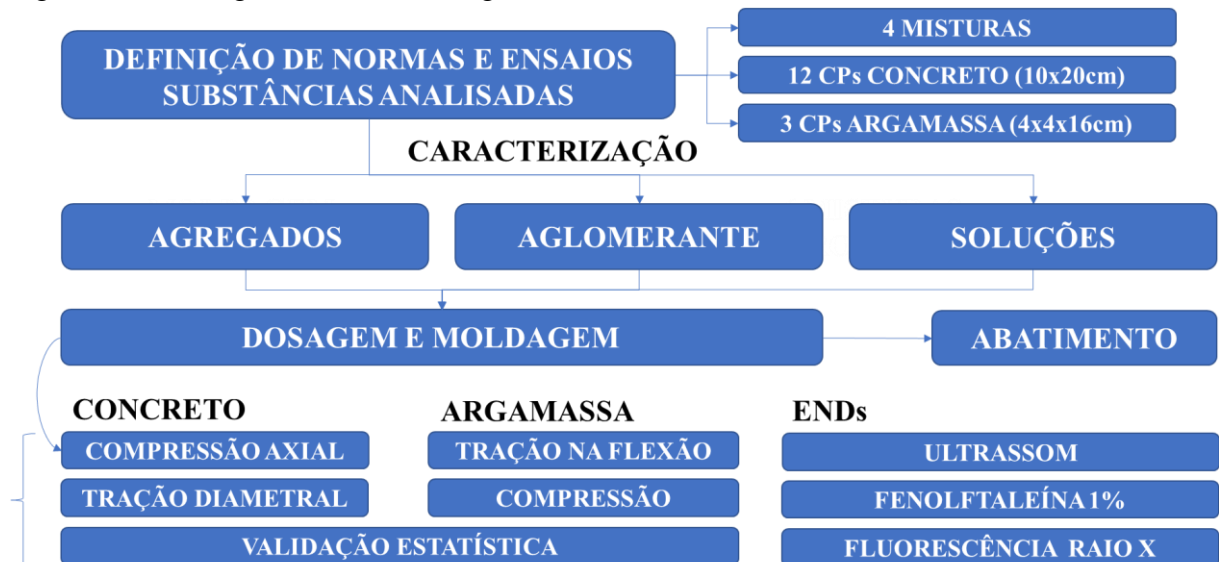
Tabela 7 - Resumo das principais normas, com respectivos dados gerados.

Concretos		Argamassas	
NBR NM 67	Abatimento	NBR 13279	Res. Compressão e Tração
NBR 5739	Resistência à Compressão	NBR 16606	Água de consistência normal
NBR 7222	Resistência à Tração	NBR 16607	Início e fim de pega

Fonte: Autor, 2019.

Como ponto de partida, procedeu-se inicialmente com a caracterização dos agregados, do aglomerante e das soluções a serem utilizadas, acrescentando parâmetros químicos para fornecer uma melhor análise e discussão dos resultados obtidos. A Figura 10 apresenta um breve fluxograma do processo utilizado na segunda etapa.

Figura 10 - Fluxograma da metodologia normatizada.



Fonte: Autor, 2019.

Com base nos resultados da metodologia inicial, as interferências de cloretos e sulfatos demonstraram comportamentos similares, ambos com caráter destrutivo. No caso das interferências de pH houve comportamentos atípicos, com o incremento de resistência interna do meio básico. Logo, nessa segunda etapa, arbitrou-se por analisar as variações de pH, juntamente a um dos outros meios, sendo escolhido o sulfatado devido a sua maior destrutibilidade observada.

Para as análises da interferência em estruturas de concreto, foram moldados ao total 48 corpos de prova cilíndricos, no formato 10 x 20 cm, agrupados em grupos de 12, para cada variação. O primeiro traço, de referência, foi elaborado com o uso de água destilada, para servir como padrão de comparação aos demais. Os seguintes, foram moldados com substituição da água destilada por soluções químicas de hidróxido de potássio (KOH) ácido nítrico (HNO₃) e sulfato de potássio (K₂SO₄).

De cada grupo de 12 corpos de prova, seis peças destinaram-se ao rompimento por compressão axial, conforme NBR 5739, sendo três aos 28 dias e as demais aos 92. As seis restantes, designaram-se ao rompimento por tração diametral, conforme NBR 7222, nas mesmas idades e quantidades.

Para as análises nas argamassas, foram moldados 12 corpos de prova prismáticos, nas dimensões de 4,0 x 4,0 x 16,0 cm, agrupados em grupos de 3 por análise, com um traço de referência em água destilada e demais com as mesmas substituições anteriormente mencionadas. Cada conjunto foi inicialmente destinado ao ensaio de tração direta na flexão, em triplicata. Após o rompimento, cada peça gerava duas peças menores, com cerca de 8 cm de comprimento. Após a retificação das faces realizou-se o ensaio de resistência à compressão, conforme NBR 13279. Por último, também foram moldados 8 corpos de prova cilíndricos, 5 x 10 cm, 2 por variação, para verificação visual das alterações perceptíveis.

4.2.1. Caracterização dos agregados utilizados no concreto

Foi adquirido o total de um metro cúbico de areia natural, com aspecto sedimentar arenítico, diâmetro máximo característico de 4,8mm, e um metro cúbico de brita natural, de aspecto granítico, com D.M.C. de 25mm. No momento do ensacamento para o transporte, foi feito a aferição visual para que todo o material fornecido pertencesse à um mesmo lote de fornecimento. No recebimento, as sacas foram enumeradas e acondicionadas em local seco, longe de intempéries. Nas seções seguintes, com os títulos das normas de ensaio, todos os itens, subseções e tabelas que não discriminados neste trabalho, se referem à norma referente à seção, no intuito de manter a leitura mais limpa, concisa e precisa.

NBR NM 26 – Agregados – Amostragem

De sacas alternadas, definidas pela numeração do fornecimento, foi retirado um total de três amostras, conforme item 5.4.3.1 e 5.4.3.2, que dispõem sobre o procedimento de amostragem de fluxo de descarga de materiais. Após reunidas as amostras, homogeneizadas e

pesadas, obteve-se massa final de 25,00 kg de areia e 50,00 kg de brita, atendendo as massas mínimas dispostas na subseção 5.5, Tabela 1. As respectivas massas constituem as amostras de campo citadas posteriormente, a ser aplicado para cada procedimento ou ensaio que necessite desses tipos de materiais.

NBR NM 27 – Agregados – Redução de Amostra

Com a massa especificada anteriormente, adotou-se o método “A” de redução conforme 5.2.1 e 5.3.1, que dispõe sobre aparelhagem e procedimento respectivamente. Reduziu-se a amostra por meio de separador mecânico de aletas intercaladas, sendo três bandejas de coleta, uma de 50% e duas de 25%, despejado em lances sequenciais. Esse procedimento foi repetido de forma a atingir uma quantidade de material específica de cada ensaio posterior.

Relativo ao disposto no item 5.3.1.4, que dispõem sobre as condições de umidade para ambos, atestou-se que o agregado miúdo apresentava a condição requerida, estando à condição inferior a saturada com superfície seca. Já o gráudo necessitou de uma breve aspensão de água, a fim de evitar o desprendimento de finos, em atendimento ao mesmo requisito. Neles não foi observado a presença excessiva de material pulverulento.

NBR NM 248 – Agregados – Composição Granulométrica

As massas iniciais de 1 kg e 10 kg, de areia e brita respectivamente, em atendimento ao requisito de massas mínimas do item 5.1.2, tabela 2, foram inicialmente destinadas a estufa à temperatura de 105 ± 5 °C por 24 horas.

Feito a separação das amostras m1 e m2, foi procedido com o peneiramento de forma manual, cronometrado dois minutos para cada peneira, cada uma por vez. Utilizou-se peneiras da série normal e intermediária, normatizadas pela NM-ISSO 3310, partes 1 e 2. Na Figura 11 é possível visualizar parte dos utensílios utilizados.

Figura 11 - Ensaio de composição granulométrica.



Fonte: Autor, 2019.

Não foi observado a presença excessiva de finos nem perdas consideráveis durante o procedimento, bem como não houve diferenças entre os resultados das faixas individuais superiores à 4%, conforme disposição do item 6.1.1.

NBR NM 52 – Agregado Miúdo – Massa Específica e Específica Aparente

Foi obtido uma massa de 1,1 Kg para execução de duas leituras, através de estimativa. Após a saturação em água corrente por 24 horas, à temperatura média 27 ± 3 °C, foi retirado o excesso de água, sendo o material depositado para secar com o auxílio de um dessecador elétrico, de leve brisa.

Duas tentativas de moldagem foram executadas, conforme seção de preparação, tendo êxito em atender o critério de desmoronamento do tronco de cone apenas a segunda, disposto 6.3 e 6.4. Para que não se alterasse as condições de umidade, rapidamente foi separado a massa total em duas amostras de 500g cada, sendo adicionadas ao frasco de Chapman.

Aferido o menisco e registrado o peso do conjunto, conforme disposto em 7.1, após uma hora foi repetido o procedimento, conforme item 7.2. Retirado o excesso de água, cada amostra foi destinada a estufa por 24 horas, à temperatura de 105 ± 5 °C, sendo registrada a massa seca, conforme 7.3.

NBR NM 53 – Agregado Graúdo – Massa Específica, Aparente e Absorção

Separou-se uma massa inicial de 8 Kg, conforme disposição do item 5.4, tabela 1, para agregados de diâmetro máximo característico de 25mm. Realizado o peneiramento por meio da

4,75mm, foi constatado que a massa do passante foi inferior à 2% do total, descartando assim o disposto no item 5.2, sobre a retirada do passante na peneira 4,75 m pelo critério de massa.

Feito a lavagem do material, para remoção de finos, foi destinado a estufa à temperatura de 105 ± 5 °C por 24 horas. Resfriou-se em temperatura ambiente por 2 horas, em temperatura ambiente média de 27 ± 3 °C para início do ensaio.

Realizado o processo de imersão por 24 ± 4 horas, item 6.1, foi retirada as amostras da imersão, feito a secagem superficial do material e em seguida separada duas amostras de 4 kg, denominada m1 e m2, sendo a pesagem do agregado saturado com superfície seca, com resolução de 1g, item 6.4. Aferido a tara da cesta ao ar e imerso, foi registrado o peso submerso das amostras do conjunto cesta e agregados, item 6.5 Retirado o material, foi destinado à estufa, à temperatura de 105 ± 5 °C, por 3 horas. Repetido o procedimento para a amostra m2. Após o tempo de secagem, foi registrado o peso do agregado seco.

NBR NM 45 – Agregados – Massa Unitária e Vazios

As amostras de cada agregado foram medidas de forma visual, com aproximadamente 150% do volume a ser preenchido, conforme item 6.1, sendo então destinada a estufa, à temperatura de 105 ± 5 °C por 24 horas. A determinação da massa unitária de ambos agregados foi procedida conforme o “método C”, disposição do item 8.1.1, aplicado para agregados no estado solto. A calibração do volume do recipiente foi realizada com água à temperatura ambiente de 27 ± 3 °C com densidade de $997,54\text{Kg/m}^3$, conforme item 7.3, tabela 2. Registrado a tara do recipiente e massa de água utilizada para o devido preenchimento realizou-se o cálculo do volume do recipiente.

Com o auxílio de uma concha foi feita o despejo do agregado com uma altura média de 50 mm acima da borda do recipiente. Ao final foi feito o arrasamento da camada superior e pesado o conjunto. Na Figura 12 é possível visualizar parte do procedimento.

Figura 12 - Ensaio de determinação de massa unitária.



Fonte: Autor, 2019.

4.2.2. Caracterização do agregado utilizado nas argamassas

Para os traços de argamassa foi utilizado areia padrão normal, nas frações granulométricas grossa (#16), média grossa (#30), média fina (#50) e fina (#100), conforme disposição da NBR 7214, com especificação e caracterização do lote pelo fornecedor. O laudo de controle e os certificados de referência obtidos demonstraram que foram executados os ensaios de teor de sílica (NBR 14656), composição granulométrica (NBR NM 248), teor de umidade (NBR 7214), e matéria orgânica (NBR NM 49), todos atendendo satisfatoriamente aos critérios máximos e mínimos limites de cada disposição, conforme os requisitos do item 4.1 da norma inicial.

4.2.3. Caracterização do cimento utilizados nos concretos e argamassas

Para todos os ensaios desta segunda metodologia, foi utilizado o mesmo aglomerante cimento Portland composto, CP II E 32, conforme requisitos químicos mínimos da NBR 16697 e certificação do material fornecido pelo fabricante. Foi adquirido 250 kg de material, distribuídos em cinco sacas de um mesmo lote, datado de 12/07/2018.

NBR 11579 – Cimento Portland — Determinação do índice de finura

Retirado uma amostra de 50g de cimento de uma saca recém-aberta, realizou-se o peneiramento através da 75 μ m, NBR NM ISO 3310. O ensaio foi executado de forma manual, atendendo aos procedimentos dispostos do item 4.2.1 e 4.2.2, até o limite final, com massa constante igual à 0,05g de cimento, item 4.2.3.

NBR 16605 – Massa Específica do Cimento Portland

Obtida a amostra de cimento com uma massa arbitrária e realizou-se o peneiramento por meio da peneira 150 μm , NBR NM ISO 3310, não sendo visualizado a presença de material retido. Pesado uma amostra de 500 g, permitiu-se que o material descansasse por 15 minutos à temperatura ambiente de 27 ± 3 °C para equilíbrio de temperaturas. Retiradas três amostras similares e reservadas, foi registrado os pesos individuais e iniciado o procedimento.

Foi utilizado como reagente inerte o XILOL PA ACS, de fórmula química C_8H_{10} , peso molecular 106,17 g/mol, concentração 98,5% e densidade de 0,870 g/cm³.

Feita a adição do reagente com o auxílio de funil de vidro até o primeiro intervalo, foi registrado o volume inicial. Secado as paredes do frasco volumétrico, foi feito a adição gradual das 500 g de aglomerante e registrado novamente o volume. Com os dados coletados foram procedidos os cálculos pertinentes.

4.2.4. Caracterização das águas, reagentes e soluções utilizadas

Para o total dos corpos de prova de concretos e argamassas, pela dosagem calculada, foi necessário a preparação de 5 litros de solução de cada substituinte, incluindo uma reserva de 20% prevendo possíveis perdas. Com os volumes estabelecidos foi calculado a quantidade de reagente necessário para cada dissolução, sendo o acréscimo gradual aos volumes totais. Após o preparo, cada solução foi reservada em recipientes próprios, hermeticamente fechado, longe de intempéries, sendo os detalhes apresentados na Tabela 8 com a especificação das respectivas concentrações molares, massas moleculares (M.M.), e total utilizado.

Tabela 8 - Detalhes das soluções para os corpos normatizados.

Identificação	Substância	Concentração (mol/L)	M.M. (g/mol)	Massa Reagente (g)
T0	Destilada	-	-	-
T1	HNO_3	0,1M	63,01	31,505
T2	KOH	0,1M	56,11	28,055
T3	K_2SO_4	0,1M	174,27	87,135

Fonte: Autor, 2019.

As soluções foram caracterizadas, incluindo da água destilada utilizada, a fim de comparar os índices de potencial Hidrogeniônico, condutividade elétrica e sólidos totais dissolvidos entre as soluções utilizadas nos corpos de prova reduzidos, não normatizados.

4.2.5. Dosagem dos traços e misturas

O cálculo do traço foi baseado no método ABCP. Para tal projetou-se um concreto de 25Mpa, fator água/cimento de 0,58 pela curva de Abrams para resistência característica do cimento de 32 MPa a 28 dias e abatimento de 40 a 60mm. A Tabela 9 resume os resultados dos ensaios de caracterização, parâmetros de entrada para o método de dosagem adotado.

Tabela 9 - Parâmetros físicos de entrada para o método de dosagem.

Dados das Caracterizações Utilizados	
Massa Específica do Cimento (Kg/m ³)	3.040,00
Massa Especifica Real do Agregado Miúdo (Kg/m ³)	2.227,43
Módulo de Finura do Agregado Miúdo	3,74
Massa Unitária Compactada Agregado Graúdo (Kg/m ³)	1.419,01
Massa Específica do Agregado Graúdo (Kg/m ³)	2.731,93
Diâmetro Máximo Agregado Graúdo (mm)	25,00

Fonte: Autor, 2019.

Para a mistura dos traços de concreto utilizou-se um misturador de pequena escala. Com o volume de aproximadamente 24 litros por análise, foi feita a divisão em dois traços, 12 litros cada, e calculada as massas de materiais necessárias para cada mistura. Foi calculado também a quantidade de material aplicada ao número de corpos de prova por mistura. A Tabela 10 apresenta o resultado do roteiro de dosagem, com diferentes tipos de representação da dosagem calculada, incluindo a quantidade necessária por material e traço.

Tabela 10 - Resultado do método de dosagem para os elementos caracterizados.

Traço	Cimento	Agregado Miúdo	Agregado Graúdo	Água ou Soluções
Composição Unitária	1,00	2,40	2,60	0,58
Consumo de Materiais (Kg/m ³)	336,21	808,17	872,69	195,00
Quantidades por Traço (Kg)	3,80	9,14	9,86	2,20

Fonte: Autor, 2019.

Com a concepção e os dados necessários, foi feito a rodagem dos traços. Antes da moldagem, procedeu-se ainda com o ensaio de abatimento de tronco de cone, ou Slump Test, conforme NM 67. Foi ajustado a quantidade de água gradualmente, à 1% em massa por tentativa, para que o traço de referência obtivesse abatimento dentro da margem esperada.

Para os demais traços foi mantido a mesma massa de água, na forma de solução, no intuito de investigar a influência das soluções substituintes também no abatimento registrado. Na Figura 13 é possível visualizar parte do processo de mistura.

Figura 13 - Fotos do procedimento de moldagem.



Fonte: Autor, 2019.

Relativo às argamassas, o traço utilizado foi retirado da NBR 7215, de acordo com as faixas de granulometria da areia normal. Para tal foram registradas as massas de cada componente utilizado, atentando para as margens de erro nas leituras. A Tabela 11 apresenta o traço utilizado, através dos registros de massa.

Tabela 11 - Dosagens de argamassas conforme Tabela A.2 da NBR 7215.

	Cimento (g)	Água (g)	Ar. Grossa #16(g)	Ar. Grossa #30(g)	Ar. Grossa #50(g)	Ar. Grossa #100(g)
Peso	624,0 ± 0,4	300,0 ± 0,2	468,0 ± 0,3	468,0 ± 0,3	468,0 ± 0,3	468,0 ± 0,3

Fonte: Tabela A.2 da NBR 7215, 1996.

4.2.6. Caracterização do concreto e a pasta de cimento no estado fresco

NBR NM 67 – Slump Test

Em posse do instrumental descrito dos itens 4.1 a 4.3, foi feito o umedecimento do das peças e aferido a planicidade do local para que fosse dado início ao procedimento. Conforme normativa, o preenchimento ocorreu em três camadas, com 25 golpes de adensamento cada, não atingindo as camadas precedentes, sendo feito o arrasamento superior, itens 5.1, 5.2 e 5.3 respectivamente.

Todos os procedimentos foram realizados em um período menor que 150 segundos, conforme item 5.4. Retirado o molde lentamente, sendo invertido ao lado do tronco de concreto fresco e utilizado a haste como nível de referência, foi feita a medição com régua graduada da haste até o centro da face superior do tronco, com precisão de 5mm, conforme item 5.5. O ensaio foi executado em cada mistura, sendo exibida a média para cada substituição.

4.2.7. Procedimentos de moldagem concretos e argamassa

NBR 5738 – Concreto – Procedimento para Moldagem e Cura

Conforme especificado anteriormente, foi adotado os moldes cilíndricos de dimensões 10x20 cm para os ensaios de compressão axial e tração diametral, conforme item 4.1.1. Após conferido as características gerais dispostas em 4.1.3 e demais aparelhagens necessárias, deu-se início ao procedimento. O preenchimento do molde foi realizado em duas camadas, com 12 golpes de adensamento em cada, item 7.4.1.3, Tabela 3.

Durante o golpeamento das camadas superiores buscou-se fazer o transpasse na camada anterior, conforme 7.4.2.2, sendo também a última camada em excesso, para possibilitar o arrasamento superior, item 7.4.2.4. Sem a ocorrência de transporte, as peças permaneceram as primeiras 24 horas ao ar livre.

A água do tanque de cura foi saturada com hidróxido de cálcio à 23 ± 2 °C. Desmoldados e identificados as peças, foram destinadas à imersão até a execução dos ensaios, conforme 8.2.3 e 8.3.5 respectivamente.

NBR 7215 – Cimento Portland – Resistência à Compressão

Atendido aos requisitos de materiais e aparelhagem necessárias e a preparação da argamassa conforme NBR 7215, foi procedido com a preparação dos moldes, conforme 5.2 e 5.4 respectivamente. Imediatamente após a finalização do preparo da pasta, com o molde

posicionado à mesa de adensamento, foi dado início ao preenchimento em duas camadas, sendo a acomodação auxiliada pelo nivelador de camadas. Ao final foi feito o arrasamento da camada superior e procedido com o golpeamento vertical pela mesa. Relativo ao reagente também houve as mesmas considerações anteriores, em substituição da água destilada por soluções.

4.2.8. Ensaios destrutivos de resistências características

NBR 5739 – Concreto – Ensaio de Compressão em Corpos Cilíndricos

Previamente à execução do ensaio, realizou-se a preparação das bases através da retificação mecânica das faces, com condição de cura inicial. As medições finais foram realizadas com o auxílio de um paquímetro, sendo aferido o diâmetro constante de 10cm para todos e alturas variáveis da ordem de 3,0 mm. Foi adotada a velocidade de carregamento de 0,5 MPa/s atendendo ao critério do intervalo de $(0,45 \pm 0,15)$ MPa/s, item 5.6, sendo todos que os ensaios atingiram o critério de ruptura brusca por decréscimo da força aplicada. O cálculo da resistência se dá pelo quociente entre força máxima aplicada e a área da seção transversal. Obtido as resistências individuais, é considerado como valor nominal da amostra a média entre as três leituras.

NBR 7222 – Concreto – Resistência à Tração Diametral

Com os corpos de provas conforme NBR 5738 e cura por imersão mantido até o início do ensaio, foram registradas as dimensões das peças, com auxílio de um paquímetro e exatidão de 0,1 mm. Traçada a linha de referência, cada peça foi posicionada com o apoio de tiras de madeira superiores e inferiores no aparato específico de ensaio, conforme 3.2, sendo a aplicação de carga à velocidade de 0,05 MPa/s, até ruptura brusca por decréscimo da força aplicada. O cálculo da resistência à tração ocorre por meio do quociente entre força máxima aplicada e a área da seção longitudinal. De forma similar, obtido os valores de individuais, é considerado como valor nominal a média entre três leituras mínimo.

NBR 13279 – Argamassas – Resistência à flexão e compressão

Retirado as peças da cura úmida, foi feita de verificação da planicidade das faces dos corpos de prova, em atendimento aos itens 3.5.5.1 a 3.5.5.3. Adotado a velocidade de carregamento de 50 N/s, conforme intervalo de 50 ± 10 N/s do item 5.5.2.2 para o ensaio de flexão, e 500 N/s, conforme intervalo de 500 ± 50 N/s do item 5.5.3.2 para o ensaio de flexão, foi procedido o incremento até a constatação da ruptura brusca por decréscimo da força aplicada, onde se dá o fim do ensaio.

Ao final os cálculos de resistência são obtidos por meio do quociente entre força máxima aplicada e área da seção trabalhada sendo obtido dois dados de resistência, a compressão e à flexão. O valor nominal também é a média em ambos os casos.

4.2.9. Ensaio não destrutivo e caracterizações químicas

NBR 8802 – Velocidade de Propagação de Ultrassom

No intuito de verificar aspectos como conformidade, qualidade e uniformidade dos corpos de prova no concreto executado, foi procedido com a determinação da velocidade do pulso ultrassônico, conforme NBR 8802. Na Figura 14 é apresentado o conjunto de equipamentos utilizados.

Figura 14 - Determinação da velocidade do pulso ultrassônico.



Fonte: Autor, 2019.

Segundo a norma indiana BIS 13311-92, Parte 1, que dispõem sobre métodos de teste não destrutivos para concretos, é possível fazer inferências sobre aspectos relacionados à qualidade interna das peças, com base nos parâmetros de classificação apresentados. A Tabela 12 apresenta os intervalos com suas respectivas denominações.

Tabela 12 - Classificação da qualidade do concreto com base no pulso ultrassônico.

Qualidade	Excelente	Boa	Duvidosa	Pobre	Muito Pobre
Velocidade (Km/s)	> 4,5	3,5 – 4,5	3,0 – 3,5	2,0 – 3,0	< 2,0

Fonte: BIS 13311-92 Parte 1.

Esse dado de velocidade também pode ser utilizado para estimativas de módulo de elasticidade, conforme ASTM C597-09, disposto na Equação 1. Em consequência pode ser estimado a resistência à compressão, por meio da relação F_{ck}/E_{ci} , contida na NBR 6118, expressa através da Equação 2, utilizando-se da metodologia de Mehta & Monteiro (2014) para relacionar os módulos dinâmico e cinético inicial, para concretos médios, com diferença de 30% entre ambos.

$$E_d = V^2 \cdot \rho \cdot \left(\frac{(1+\nu) \cdot (1-2\nu)}{(1-\nu)} \right) \quad (1)$$

Sendo:

E_d = Módulo dinâmico de elasticidade, (MPa);

ν = Coeficiente de Poisson (adotado como 0,2);

V = Velocidade de propagação do som no concreto, (km/s);

ρ = Densidade do material, (adotado como 2400 kg/m³).

$$E_{ci} = \alpha e \cdot 5600 \sqrt{f_{ck}} \quad (2)$$

Sendo:

αe = adotado para granito e gnaisse 1,0;

f_{ck} = Resistência característica à compressão do concreto, em MPa.

Dessa forma, foi utilizado um aparelho de Ultrassom Proceq Pundit PL-200, com 2 transdutores de 54 KHz e pasta de acoplamento em gel clínico, conforme NBR 8802.

Aspersão de fenolftaleína a 1%

Concretos e argamassas possuem naturalmente um caráter alcalino, com faixa de pH entre 12 e 13,5. Essa característica é benéfica para as estruturas internas de ferro, comum ao concreto armado, por favorecer a formação de uma película passivadora externa de óxido de ferro, impedindo o processo de corrosão. Um dos processos que é responsável por alterar esse parâmetro é a carbonatação, que consiste na interação do concreto com o dióxido de carbono (CO₂), formando o ácido carbônico (H₂CO₃) de caráter ácido.

Dentre as metodologias disponíveis para verificar o pH do concreto, vale ressaltar o ensaio de aspersão de fenolftaleína à 1%, realizado em estruturas em geral, no intuito de investigar patologias. Como o trabalho em questão objetiva a análise apenas do caráter interno da estrutura, desprezou-se o parâmetro de profundidade, analisando apenas o caráter interno.

Logo, tomando três amostras distintas de cada grupo de análise, aos 28 e 92 dias, foi feito a aspersão de fenolftaleína a 1% em três pontos transversais equidistantes.

Fluorescência de Raios X

Trata-se de uma técnica não destrutiva pouco invasiva, que possibilita quantificar os elementos constituintes de uma determinada amostra, bem como suas proporções. É baseada no princípio da excitação de átomos e detecção de seus raios X característicos (BRUKER, 2016). Atualmente a técnica permite identificar elementos de número atômico superior a 10 (UFRGS, 2017).

Dessa forma, após os rompimentos à compressão e tração, parte dos restos dos elementos de concreto foram destinados para essa análise. Para tal, buscou-se amostras de pequeno tamanho, constituídas apenas por argamassa.

Com a ajuda de um britador de mandíbulas, procedeu-se com a moagem do material. Realizado o peneiramento por meio da peneira 600 μm (NBR NM ISO 3310), o material foi destinado à microtubos do tipo ependorfs, de 3,0 ml de capacidade. O espectrômetro de raio X utilizado foi um Rigaku ZSX Mini II e as análises realizadas no laboratório de raios X, departamento de física, campus do Pici, da Universidade Federal do Ceará. O conjunto é apresentado na Figura 15.

Figura 15 - Conjunto utilizado na fluorescência de raio X.



Fonte: Laboratório de Raios X da UFC, 2019

4.3. Validação de dados e teste estatísticos

O processo de validação de dados tem por objetivo avaliar se um determinado processo consegue gerar produtos conformes. Através da estabilidade estatística, ou previsibilidade, com base nos parâmetros de comparação e confiabilidade, é possível analisar tendências e comportamentos de dados não visíveis em um primeiro momento.

Dessa forma, a metodologia desta seção será aplicada a todos os dados de resistência, e outros correlatos, no intuito de validar os conjuntos de dados e analisar estatisticamente as variâncias, para evidenciar as diferenças entre as amostras apresentadas.

As análises serão feitas em pares comparativos, entre cada elemento de substituição com os corpos de prova referência, no intuito de inferir isoladamente sobre cada. Para o procedimento estatístico seguinte, foi utilizado o software R: *A language and environment for statistical computing*, desenvolvido por R Core Team (2019), Vienna, Áustria. Versão 1.2.1335 de abril de 2019.

4.3.1. Médias do conjunto de dados

Normas que tratam de aferições e medições relacionadas à elementos de concreto e argamassas usualmente executam os ensaios em triplicata, onde o valor final nominal apresentado, se trata da média entre eles. Também em contra partida, esse mesmo parâmetro pode ser utilizado como fator de exclusão de amostras, onde a partir de uma determinada margem de diferença, alguns valores podem ser desconsiderados, por excessivo afastamento.

$$f_m = \frac{\sum_1^n f_n}{n} \quad (3)$$

Onde:

f_m = valor médio do parâmetro analisado;

f_n = valor das amostras individuais;

n = total de amostras do conjunto.

4.3.2. Desvio padrão amostral

O desvio padrão é um dos parâmetros do grau de dispersão de amostras, onde tanto menor, implica na homogeneidade do conjunto. Pode ser definida também como a medida de variabilidade em unidades lineares. Possui papel importante para os métodos estatísticos, sendo parâmetro base para outras inferências (WALPOLE et. al., 2009).

$$s = \sqrt{\frac{\sum_1^n (f_i - f_m)^2}{n-1}} \quad (4)$$

Onde:

s = desvio padrão da amostra analisada;

f_m = valor médio do conjunto amostral;

f_i = valor das amostras individuais;

n = número de elemento do conjunto.

Normas de controle tecnológico de elementos de cimento Portland, geralmente aplicados à concretos, utilizam esse parâmetro para classificar o nível de controle da produção. À exemplo tem-se a NBR 7212, norma brasileira, a ACI 214R-11, regulamentada pela *American Concrete Institute* e a EN 206-1 do *European Standard*.

4.3.3. Coeficiente de variação amostral

O coeficiente de variação trata-se de outra medida do grau de dispersão. A leitura é de forma similar, quanto menor ou mais próximo de zero, implica em amostras mais concentradas em torno da média. É útil como parâmetro de análise ou inferência sobre aspectos como a qualidade do concreto, onde quanto menor implica em uma melhor qualidade da amostra.

$$CV = \frac{s}{f_{cm}} \cdot 100 \quad (5)$$

Onde:

CV = coeficiente de variação do lote, expresso em porcentagem;

s = valor de desvio padrão amostral;

f_{cm} = valor de média amostral.

4.3.4. Pressupostos de normalidade e homocedasticidade

O teste de normalidade, ou verificação da conformidade com a distribuição normal, é pressuposto essencial para o ajuste do modelo de regressão linear, que são os conjuntos de leituras de resistência ou outras amostras analisadas. Dentre as metodologias mais utilizadas pode-se ressaltar o gráfico de Papel de Probabilidade, os autores Anderson-Darling e Kolmogorov-Smirnov, dentre outros. Neste trabalho foi adotado a verificação de conformidade com a distribuição normal pelo teste Shapiro, de Shapiro & Wilk (1965).

Já a homocedasticidade é a hipótese de variância constante dos erros experimentais em distintas observações. Em seu pressuposto não sendo atendido, implicará em alguns efeitos no ajuste do modelo, dentre eles a não conformidade da utilização da estimativa dos erros padrões

pelo método dos mínimos quadrados. A homogeneidade da variância, neste trabalho, será testada por meio do teste da metodologia Levene (1960).

Juntamente aos testes acima, também será apresentado os gráficos de resíduos e o modelo ajustado, como para verificações visuais. Além da detecção visual dos pontos heterocedásticos, pode indicar visualmente tendências no comportamento das amostras.

4.3.5. Teste de análise de variância

Análise de variância, ou ANOVA, é uma metodologia utilizada na comparação da distribuição de três ou mais grupos de amostras. Também é uma forma de resumir um modelo linear por meio da decomposição da soma dos quadrados sob cada amostra no modelo.

Dessa forma, adotou-se a metodologia de Kutner (et. al., 2004) para verificação da existência de diferença significativa entre as médias fornecidas pelas amostras analisadas, sendo considerada a hipótese inicial de que cada amostra vem de uma distribuição normal com médias e variâncias iguais, validada pelos testes anteriores.

5. RESULTADOS DOS ENSAIOS

5.1. Análise química das águas e soluções de amassamento

Os resultados das aferições de pH e condutividade elétrica podem ser observados através da Tabela 13. Vale ressaltar inicialmente a diferença das concentrações entre ambos os casos. Relativo às análises de ácido e base (HNO₃ e KOH), objetivou-se aumentar as concentrações nesse conjunto específico, para melhor evidenciar os resultados anteriores. Quanto à solução de sulfato de potássio (K₂SO₄), reduziu-se a concentração devido ao volume de reagente necessário, sendo a concentração adotada necessária para imprimir resultados similares ao primeiro experimento. Todas as medidas foram realizadas em triplicata.

Tabela 13 - Caracterizações das soluções quanto ao pH, condutividade e temperatura.

Ident.	Substância	Concentração (mol/L)	Leitura de pH	Condutividade Elétrica (μS/cm 25°C)	Temp. (°C)
- Escala Reduzida					
T0	Destilada	-	6,93 ± 0,05	4,75 ± 0,05	26,3
T1	HNO ₃	0,001 M	4,02 ± 0,01	326,83 ± 14,43	25,8
T2	KOH	0,001 M	9,01 ± 0,01	118,27 ± 1,07	25,2
T3	NaCl	0,5 M	6,06 ± 0,04	37.063 ± 271,54	24,7
T4	CaCl ₂ .2H ₂ O	0,5 M	11,94 ± 0,04	51,57 ± 0,5	25,2
T5	K ₂ SO ₄	0,5 M	5,80 ± 0,14	70.036 ± 1253,69	25,0
T6	ZnSO ₄ .H ₂ O	0,5 M	5,02 ± 0,01	20.846 ± 105,99	24,8
- Escala Normalizada					
T0	Destilada	-	7,05 ± 0,04	4,81 ± 0,06	26,1
T1	HNO ₃	0,1 M	1,15 ± 0,11	32.670 ± 1449,56	25,9
T2	KOH	0,1 M	12,70 ± 0,21	11.916 ± 98,66	25,8
T3	K ₂ SO ₄	0,1 M	6,69 ± 0,22	14.393 ± 205,26	25,8

Fonte: Autor, 2019.

As soluções de ácido e base, foram elaboradas na intenção da verificação dos comportamentos em meios de pH distintos. Logo, os resultados 4,02 e 9,01 de T1 e T2 para a metodologia de escalas reduzidas, juntamente ao de 1,15 e 12,70 na escala normalizada, já eram esperados por se tratar de ácido e base forte, de completa dissociação. Nos demais, foi possível observar também alterações desse parâmetro, desencadeadas pelo caráter dos ânions e cátions.

A fim de estudar a interferência de sulfatos e isolarmos o efeito do pH do meio, escolheu-se o K₂SO₄ o qual tem pH próximo a 7,0, similar ao caráter da água destilada.

Relativo as leituras de condutividade elétrica, é possível visualizar que os valores se apresentaram de forma dispersa. As maiores variabilidades foram da ordem 70.000 μS/cm 25°C, nas soluções de sulfato de potássio (K₂SO₄). As discrepâncias eram esperadas pois dentre

os químicos dissolvidos existiam eletrólitos fortes, como ácido nítrico (HNO_3), cloreto de sódio (NaCl) e ambos os sulfatos, que para concentrações similares, apresentaram leituras cem vezes superior, em média. Os demais, por não possuírem a mesma característica, apresentaram valores ordinários.

Tabela 14 - Caracterizações quanto à sólidos totais das soluções em escala reduzida.

Ident.	Substância	Concentração (mol/L)	Sólidos Totais Dissolvidos (ppm)	Temperatura (°C)
- Escala Reduzida				
T0	Destilada	-	100,4 ± 2,31	26,3
T1	HNO_3	0,001 M	736,0 ± 2,51	25,8
T2	KOH	0,001 M	258,7 ± 9,01	25,2
T3	NaCl	0,5 M	16.402 ± 42,39	24,7
T4	$\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0,5 M	22.995 ± 43,10	25,2
T5	K_2SO_4	0,5 M	15.745 ± 36,94	25,0
T6	$\text{ZnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	0,5 M	92.917 ± 181,27	24,8
- Escala Normalizada				
T0	Destilada	-	101,7 ± 2,77	26,1
T1	HNO_3	0,1 M	73.597 ± 250,64	25,9
T2	KOH	0,1 M	25.871 ± 901,44	25,8
T3	K_2SO_4	0,1 M	3.150 ± 6,81	25,8

Fonte: Autor, 2019.

As medidas de sólidos totais dissolvidos (S.T.D.) também se apresentaram de forma dispersa, contudo os desvios apresentados indicam boa qualidade e conformidade dos dados coletados. Analisando os valores relativos às águas destiladas, em ambos os momentos é possível visualizar um valor elevado da ordem de 100 ppm, indicando um possível excesso de sólidos inorgânicos do processo de destilação, dado que não foi visualizado alterações de pH.

Nas leituras em geral, foi possível perceber uma relação linear entre as soluções de mesmas substância, considerando as proporções entre as concentrações utilizadas. Tal fato, pode se tomar por um indicativo da qualidade das soluções preparadas, dado que em ambos os casos as leituras aferidas foram correlacionadas linearmente às concentrações utilizadas, indicando ausências de outras interferências.

5.2. Resultados dos corpos de prova em escala reduzida

Nesta seção serão dispostos os resultados relativos às observações qualitativas dos corpos de prova reduzidos, junto ao conjunto de dados das forças máximas aplicadas no rompimento à compressão e o teste de fenolftaleína. Dado que as leituras de força máximas foram feitas em triplicata, será aplicada também a metodologia estatística para validação dos dados coletados e análise de tendências.

5.2.1. Observações dos aspectos visuais

Conforme disposto na metodologia anterior, foram consideradas as observações em três momentos distintos durante o procedimento. O primeiro foi durante a moldagem das peças, sendo observado os aspectos da consistência da pasta, o volume gerado e aspectos de segregação. Foram elencados apenas as observações que divergiam do corpo de prova padrão. Na Tabela 15 são apresentadas as observações registradas.

Tabela 15 - Aspectos visuais observados na moldagem.

Ident.	Substância	Consistência	Volume Gerado	Segregação
T0	Destilada	-	-	-
T1	HNO ₃	Líquida	-	Observado
T2	KOH	-	-	-
T3	NaCl	-	-	-
T4	CaCl ₂	Rígida	Superior	-
T5	K ₂ SO ₄	Líquida	Superior	Observado
T6	ZnSO ₄	Líquida	Superior	Observado

Fonte: Autor, 2019.

Nos corpos de prova de ácido nítrico (HNO₃) foi observado uma consistência mais fluida frente aos demais, sendo no momento da acomodação observado também a presença de uma lâmina de solução excessiva na face superior, indicando alterações nas relações de água/cimento, podendo justificar a maior fluidez.

Relativo ao cloreto de cálcio (CaCl₂), foi observado que para a mesma quantidade de água, comum a todos, a mistura apresentou um aspecto bem mais seco e rígido que os demais, possivelmente por alterar também as citadas relações, necessitando de um volume superior frente aos demais para a mesma consistência. Nos elementos de sulfato, também foi observado que para a mesma quantidade de material, sua mistura gerou um volume superior, sendo observados segregação, com observação também para a substituição de sulfato de zinco (ZnSO₄), que apresentou uma maior fluidez durante a mistura.

O segundo momento analisado foi a desmoldagem das peças, onde foi observado os aspectos de desprendimento de partículas ao toque, presença de vazios e coloração, com a mesma metodologia de classificação e apresentação de dados anterior. Na Tabela 16 são apresentadas as observações registradas.

Tabela 16 - Aspectos visuais observados na desmoldagem após 24 horas.

Ident.	Substância	Desprendimento de Partículas	Presença de Vazios	Coloração
T0	Destilada	-	-	-
T1	HNO ₃	Alto	-	-
T2	KOH	-	-	-
T3	NaCl	-	-	-
T4	CaCl ₂	-	-	Clara
T5	K ₂ SO ₄	Alto	Observado	Escura
T6	ZnSO ₄	Excessivo	Observado	Escura

Fonte: Autor, 2019.

As observações de desprendimento de partículas e presença de vazios do ácido nítrico (HNO₃) podem ser correlacionadas com as disposições anteriores. Com a possível diminuição do percentual de água de consistência normal, utilizando a mesma quantidade de água do corpo de prova referência haveria um excesso de água na mistura, provocando uma menor resistência interna, explicando o alto desprendimento de partículas observados.

Relativo às colorações mais escuras observadas, algumas possibilidades podem ser apontadas. Caso essa característica persista até o momento do ensaio aos 28 dias, pode ser um indicativo de alteração da reação de hidratação, baseado que essa reação é na verdade um conjunto de outras menores, suscetíveis a alterações. Outra possível causa, é a presença de diferentes fases hidratadas (Romano, 2016). A última etapa foi o rompimento por compressão axial, onde pode ser observado dois dos aspectos anteriores, em adição da observação à presença de fissuras, conforme Tabela 17

Tabela 17 - Aspectos visuais observados no rompimento, aos 28 dias.

Ident.	Substância	Desprendimento de Partículas	Presença de Fissuras	Coloração
T0	Destilada	-	-	-
T1	HNO ₃	-	-	-
T2	KOH	Nulo	-	-
T3	NaCl	-	-	-
T4	CaCl ₂	Nulo	-	Clara
T5	K ₂ SO ₄	Alto	Observado	Escura
T6	ZnSO ₄	Excessivo	Excessivo	Escura

Fonte: Autor, 2019.

As observações de desprendimento de partículas do ácido nítrico foram minimizadas nesse segundo momento, sendo ainda observado em menor proporção. Relativo aos elementos de hidróxido de potássio (KOH) e cloreto de cálcio (CaCl_2) foi percebido uma coesão superior aos demais, havendo quase nenhum desprendimento ao toque, além da presença de uma coloração mais clara neste segundo elemento, indicando possivelmente alterações nos produtos gerados ou influência direta dos íons de cálcio.

Em continuidade às tendências observadas anteriormente, para os elementos de sulfatos, ainda foi possível visualizar um forte desprendimento em ambas as peças, com a presença também de fissuras excessivas. A coloração escura também foi mantida, evidenciando as mesmas alterações nos produtos ou, o mais provável, presença de diferentes fases hidratadas.

No último elemento, sulfato de zinco (ZnSO_4) a degradação foi consideravelmente superior. No momento após o desmolde em que ele foi destinado à cura por imersão na própria solução substituinte, foi visualizado a formação instantânea de fissuras no sentido vertical, sendo que após o período de 28 dias de cura, os corpos de prova se encontravam totalmente fragmentados, sem possibilidade de serem ensaiados à compressão. Esses aspectos podem ser observados na Figura 16.

Figura 16 - Aspectos observados para o sulfato de zinco (ZnSO_4)



Fonte: Autor, 2019.

Em linhas gerais, analisando os aspectos qualitativos abordados nas três etapas foi possível visualizar que os corpos de prova de ácido nítrico (HNO_3), do momento da moldagem até o rompimento, apresentaram constantes alterações. Inicialmente foi observado a fluidez

superior da mistura durante a moldagem, sendo refletido no desprendimento de partículas nos momentos seguintes.

Nos corpos de prova T5 e T4, com cloreto não foram observadas maiores alterações, com exceção da coloração mais clara evidente às peças de cloreto de cálcio (CaCl_2), no momento da desmoldagem e rompimento, sendo explicado possivelmente por alterações das reações de hidratação ou por influência direta dos íons de cálcio da coloração final.

A análise que possuiu maiores alterações foi a dos corpos de prova de soluções de sulfatos. Em linhas gerais, apresentaram fluidez superior nas moldagens, indicando alterações das relações de água de consistência normal. Ainda na moldagem, o volume superior observado indica que houve uma menor coesão entre os constituintes. Nas etapas seguintes, o excessivo desprendimento de partículas, juntamente à presença de fissuras, indica a diminuição considerável da resistência interna, bem como a persistência da coloração escura indica alteração das fases hidratadas ou dos produtos.

É possível visualizar que as observações em cada etapa se mostraram correlacionadas apesar de tratarem de aspectos distintos. As degradações decorrentes principalmente dos meios ácido e sulfatado foram visíveis desde a realização da mistura até ao aspecto final, indicando a alteração das frações hidratadas, modificação dos constituintes e alterações nos produtos. Estima-se a correlação direta desses parâmetros com os resultados de compressão axial.

5.2.2. Forças máximas dos rompimentos à compressão axial

Os resultados das forças máximas aplicadas no ensaio de resistência à compressão axial, aos 28 dias, são apresentados na Tabela 18. São apresentados também para cada elemento os valores de média, desvio padrão e coeficiente de variação.

Tabela 18 - Resultados dos rompimentos à compressão, aos 28 dias.

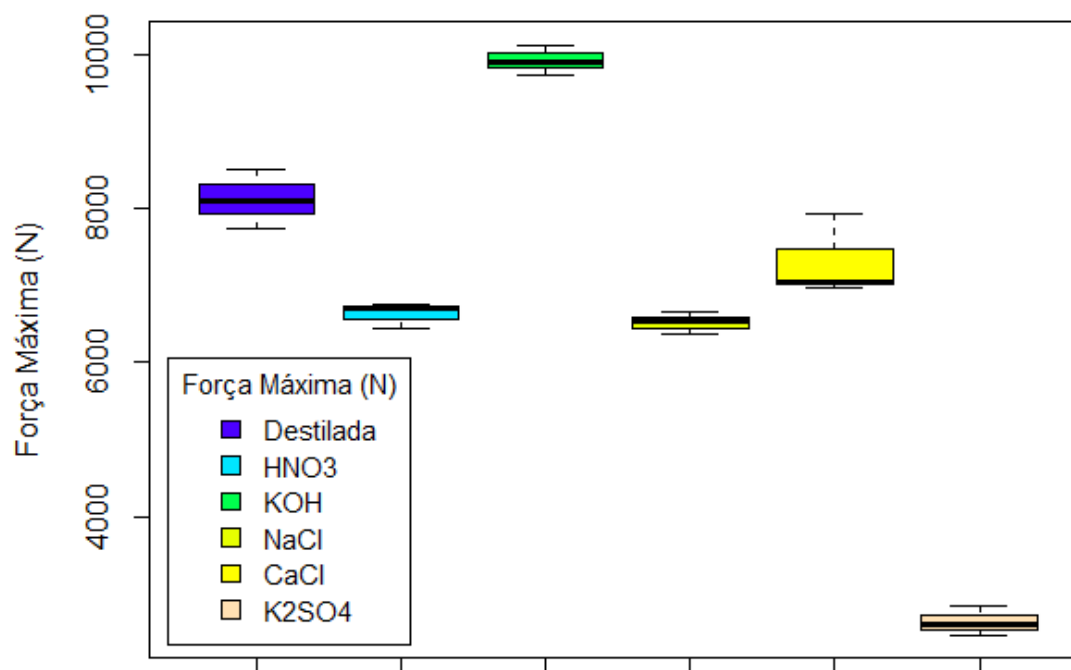
Ident.	Substância	CP 01	CP 02	CP 03	Média (N)	Desvio Padrão (N)	Coefficiente Variacional (%)
T0	Destilada	7.740,31	8.100,71	8.508,61	8.115,54	384,40	4,74
T1	HNO_3	6.434,05	6.700,37	6.759,81	6.631,41	173,48	2,62
T2	KOH	10.120,80	9.730,23	9.898,50	9.916,51	195,91	1,98
T3	NaCl	6.369,45	6.540,03	6.648,09	6.519,19	140,48	2,15
T4	CaCl_2	7.050,32	6.965,74	7.918,79	7.311,62	527,52	7,21
T5	K_2SO_4	2.844,67	2.610,10	2.472,31	2.642,36	188,26	7,12
T6	ZnSO_4	-	-	-	-	-	-

Fonte: Autor, 2019.

Os dados de força máxima aplicada ao rompimento por compressão axial apresentaram-se de forma dispersa, conforme é visualizado nos valores apresentados. Analisando as médias das substituições em comparação à água destilada, constatou-se que as amostras de HNO₃ e NaCl obtiveram perdas de resistência similares, da ordem de 16,70% a 21,51%, enquanto nas amostras de K₂SO₄ ocorreram as maiores interferências, sendo observado decréscimos de 64,94% a 69,53%.

Os maiores desvios padrões e coeficientes variacionais foram visualizados nas amostras de Cloreto de Cálcio (CaCl₂) e Sulfato de Potássio (K₂SO₄), indicando variações de uniformidade ou outros fatores internos inerentes à cada corpo de prova. Na Figura 17 são exibidos de forma gráfica a distribuição da Tabela 18.

Figura 17 - Dados das forças máximas aplicadas, com dados descritivos.



Fonte: Autor, 2019.

Em contra partida às perdas de resistências anteriores, na substituição de hidróxido de potássio (KOH) foi constatado um ganho de resistência e uniformidade. Os valores de força máxima aplicada foram de 19,89% a 24,70% maiores, indicando o caráter benéfico do meio básico para as reações de ganho de resistência e hidratação.

Analisando os aspectos de uniformidade e qualidade das amostras, os menores valores de desvio padrão e coeficiente variacional foram apresentados para este conjunto, podendo ser atribuído uma maior qualidade e confiabilidade nesses dados especificamente.

Tabela 19 - Resultado do teste de Levene e Shapiro para a força máxima aplicada.

	Df	F Value	Pr (>F)		W	P Value
Grupos:	5	0,4602	0,7985	Resíduos:	0.9597	0.5959
	12					

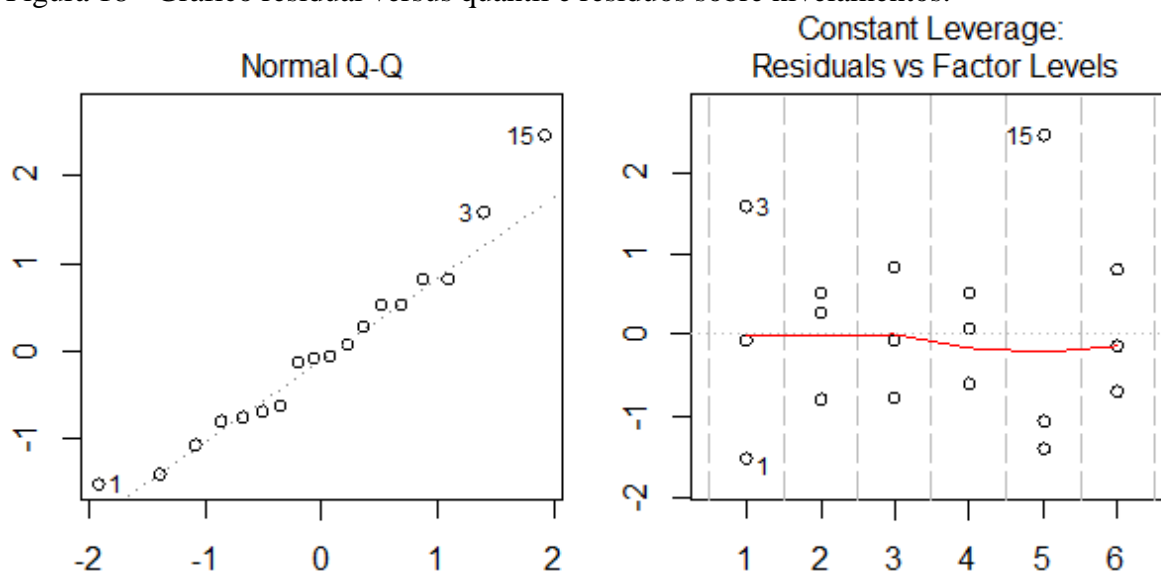
Fonte: Autor, 2019.

Prosseguindo à análise estatística do conjunto apresentado, realizou-se o teste de homogeneidade e normalidade segundo Levene e Shapiro, sendo os resultados apresentados na Tabela 19 respectivamente. Os valores finais de P valor dos resultados estão em destaque.

Com o valor p igual à 0,7985 do teste de Levene, aceita-se a hipótese de homogeneidade da variância. Semelhante ao valor p igual à 0,5959 do teste de Shapiro, aceita-se a hipótese de que os dados vêm de uma distribuição normal. Para ambos os testes, foi considerado um nível de significância de 95%.

Além do teste de normalidade, o gráfico dos resíduos versus o quantil da normal é apresentado na Figura 7, onde pode ser observado que os pontos estão próximos da reta, fornecendo evidências de que os dados vêm de uma distribuição normal. Os pontos mais distantes da curva, enumerados em ambos os gráficos por 1, 3 e 15 são pertencentes aos grupos de água destilada e cloreto de cálcio, e se trata de pontos que possuíram relevantes distanciamentos dos modelos gerados.

Figura 18 - Gráfico residual versus quantil e resíduos sobre nivelamentos.



Fonte: Autor, 2019.

Aferidos a validade dos pressupostos, foi aplicado o teste de análise de variância, sendo os resultados expostos na Tabela 20.

Tabela 20 - Resultado do teste de variância ANOVA para força máxima aplicada.

	Df	Sum Sq	Mean square	F Value	Pr (>F)
Fator	5	87245762	17449152	190,5	5,36e-11
Residual	12	1099395	91616		

Fonte: Autor, 2019.

Como resultado principal do teste, é possível visualizar que o p valor, igual à 5,36e-11, ficou muito abaixo do valor 0,05, com significância de 95%. Dessa forma, rejeita-se a hipótese de que as amostras vêm de médias com variâncias iguais, passando a validar a hipótese de significativamente diferentes.

Conclui-se das análises que os dados apresentaram homocedasticidade e conformidade com a distribuição normal, segundo os testes de Levene e Shapiro, contudo foram reprovados na hipótese de médias com variâncias iguais, implicando que as interferências provocaram mudança efetiva das resistências à compressão, não apenas pela diferença dos valores absolutos.

5.2.3. Teste de aspersão de fenolftaleína

No último ponto de análise da primeira etapa da metodologia, procedeu-se com o teste de aspersão de fenolftaleína à 1% para estimativa do pH interno dos corpos de prova. A partir dos fragmentos coletados do ensaio de rompimento à compressão axial, foi feita a aspersão da solução, à temperatura ambiente. Os registros constam na Tabela 21.

Tabela 21 - Teste de aspersão de fenolftaleína.

Ident.	Substância	Coloração Observada
T0	Destilada	Rosa Claro
T1	HNO ₃	Incolor
T2	KOH	Rosa Claro
T3	NaCl	Rosa Claro
T4	CaCl ₂	Rosa Claro
T5	K ₂ SO ₄	Rosa Claro
T6	ZnSO ₄	Incolor

Fonte: Autor, 2019.

Analisando os dados de pH das soluções de amassamento e cura dos corpos de prova, é possível visualizar que o resultado incolor do ácido nítrico (HNO₃) possui influência do caráter da solução ao qual esteve imerso. Dessa forma, é possível atribuir a alteração do pH para o meio ácido devido a interferência da água de amassamento, sendo possível também a influência da solução de cura, de mesmo caráter.

Para os elementos de sulfato, não houve decréscimo expressivo do valor de pH nas soluções utilizadas. Dessa forma as colorações observadas devem ser atribuídas a alterações nos processos de hidratação, podendo ter ocorrido alterações nos produtos, ou a existência de diferentes fases hidratadas, conforme mencionado anteriormente.

5.3. Resultados dos corpos de prova em escala normatizada

Nesta seção serão dispostos os resultados relativos às observações dos corpos de prova normatizados, junto ao conjunto de dados de resistência à compressão axial, tração diametral, ensaios de caracterização, dentre outros, relativo às peças de argamassas e concretos. Dado que as principais medidas foram feitas no mínimo em triplicata, será aplicada também a metodologia estatística para validação dos dados coletados e análise de tendências.

5.3.1. Caracterização dos agregados utilizados nos concretos

Relativo aos agregados utilizados na composição dos corpos de prova de concreto, serão apresentados nesta seção os resultados de composição granulométrica, massas específicas, massas unitárias, índices de absorção, dentre outros, sendo esses dados necessários para verificação da conformidade dos mesmos, bem como são parâmetros necessários para a metodologia de dosagem do traço de concreto.

NBR 248 – Composição Granulométrica

Na Tabela 22 são apresentados os registros das massas individuais dos ensaios de composição granulométrica para agregados miúdos. O ensaio foi executado em duplicata, com as amostras m1 e m2, de forma manual.

Tabela 22 - Massas registradas da composição granulométrica, agregado miúdo.

Peneiras (mm)	Amostra (m1)			Amostra (m2)		
	Retido (g)	Retido (%)	Acumulado (%)	Retido (g)	Retido (%)	Acumulado (%)
9,5	8,48	0,8%	0,8%	15,45	1,5%	1,5%
6,3	8,90	0,9%	1,7%	8,34	0,8%	2,4%
4,75	10,04	1,0%	2,7%	11,53	1,2%	3,5%
2,36	44,18	4,4%	7,2%	54,97	5,5%	9,0%
1,18	162,32	16,2%	23,4%	126,51	12,6%	21,7%
0,60	339,47	33,9%	57,3%	357,28	35,7%	57,4%
0,30	273,36	27,3%	84,7%	266,66	26,7%	84,1%
0,15	112,60	11,3%	95,9%	107,03	10,7%	94,8%
-	38,58	3,9%	99,8%	51,07	5,1%	99,9%
PERDAS	2,12	0,212%		1,26	0,126%	

Fonte: Autor, 2019.

Durante o procedimento, atentou-se para a quantidade máxima de material em cada peneira exceder a taxa de 7 Kg/m² na superfície de peneiramento, conforme o item 5.2.4. O somatório das massas totais de ambos não excedeu o valor de 0,3% em perdas, tornando admissível os valores ensaiados, item 5.2.9.

Analisando os resultados das amostras apresentadas, não foi visualizados diferenças entre os percentuais retidos superiores à 4%, indicando que não houve divergência no ensaio. São apresentados na Tabela 23 os valores de porcentagem média retida, retida acumulada, dimensão máxima característica e módulo de finura.

Tabela 23 - Apresentação de resultados conforme NM 248.

Peneiras (mm)	Média (%)		
	Simple	Acumulado	Passante (%)
9,5	1,2%	1,2%	98,8%
6,3	0,9%	2,1%	97,9%
4,75	1,1%	3,1%	96,9%
2,36	5,0%	8,1%	91,9%
1,18	14,4%	22,5%	77,5%
0,60	34,8%	57,4%	42,6%
0,30	27,0%	84,4%	15,6%
0,15	11,0%	95,3%	4,7%
-	4,5%	99,8%	0,2%
DMC	4,75		
MF	3,74		

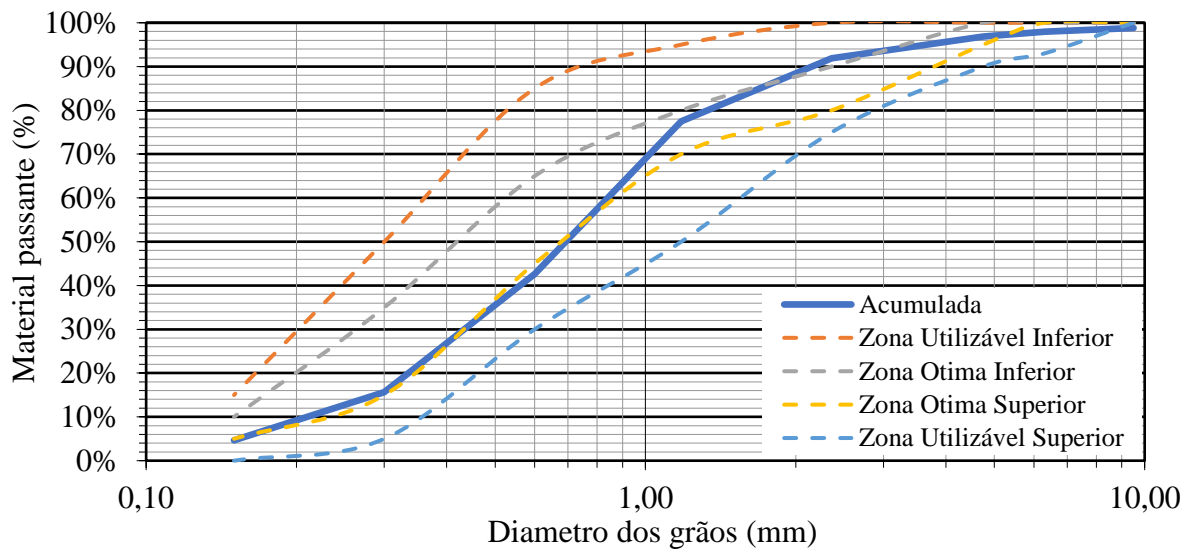
Fonte: Autor, 2019.

De acordo com as especificações de agregados para concretos da NBR 7211, a amostra sem manteve dentro da zona utilizável, com exceção do retido na peneira 9,5 mm, no valor de 1,2%, conforme item 5.1.1.

Analisando o diâmetro máximo característico de 4,75 mm, com base ainda na mesma norma, é possível atribuir a classificação de areia grossa, baseado nas frações limite, dentro do intervalo de 1,2 mm e 4,8 mm. Correlacionado à essa classificação, é possível explicar o valor elevado para o módulo de finura, de 3,74, acima do limite superior utilizável.

Na Figura 19 é apresentado o gráfico da curva de distribuição granulométrica, juntamente aos limites de distribuição da NBR 7211, item 5.1.1. Em todos os casos é utilizado os valores relativos ao passante acumulado de cada conjunto.

Figura 19 - Curva granulométrica do agregado miúdo, e limites de distribuição NBR 7211.



Fonte: Autor, 2019.

Através do gráfico apresentado, é possível visualizar que a curva gerada, correspondente ao percentual acumulado, se situa em quase toda sua totalidade dentro dos limites da zona ótima, com exceção do segmento superior, onde toca o limite inferior de zona ótima em 85% e o limite superior de zona utilizável próximo aos 100%.

Analisando o padrão da curva apresentada, é possível inferir que a amostra apresenta uma boa uniformidade, sem a presença de granulometrias abertas, indicando uma boa graduação dos grãos analisados. Na Tabela 24 é apresentado os valores relativos aos diâmetros característicos, juntamente aos coeficientes de curvaturas calculados.

Tabela 24 - Diâmetros notáveis e coeficientes de curvatura.

Diâmetros Notáveis		Coeficientes de Curvatura	
D10	0,20	CNU	4,10
D30	0,42	CC	1,07
D60	0,82		

Fonte: Autor, 2019.

Com base no valor do coeficiente de não uniformidade (C.N.U.) igual a 4,10 é possível classificar a amostra como muito uniforme, para valores menores que 5, segundo a metodologia de Allen-Hazen (Dantas, 2019). Através do coeficiente de curvatura igual à 1,07, é possível classificar a amostra como bem graduada, com valores entre 1 e 3, conforme mesmo autor.

Na Tabela 25 são apresentados os resultados da composição granulométrica para os agregados miúdo. O ensaio foi executado em duplicata, com as amostras m1 e m2, de forma manual.

Tabela 25 - Massas registradas da composição granulométrica, agregado graúdo.

Peneiras (mm)	Amostra (m1)			Amostra (m2)		
	Retido (g)	Retido (%)	Acumulado (%)	Retido (g)	Retido (%)	Acumulado (%)
50,00	-	0,0%	0,0%	-	0,0%	0,0%
37,50	-	0,0%	0,0%	-	0,0%	0,0%
25,00	150,08	1,5%	1,5%	380,19	3,8%	3,8%
19,00	1.320,66	13,2%	14,7%	1.020,51	10,2%	14,0%
12,50	4.872,44	48,7%	63,4%	5.072,54	50,7%	64,7%
9,50	3.301,65	33,0%	96,4%	3.491,75	34,9%	99,6%
6,30	350,18	3,5%	99,9%	20,90	0,2%	99,8%
4,75	-	0,0%	99,9%	-	0,0%	99,8%
-	12,01	0,1%	100,0%	12,01	0,1%	99,9%
PERDAS	-2,04	-0,020%		7,12	0,071%	

Fonte: Autor, 2019.

Durante o procedimento, atentou-se para o mesmo critério de quantidade máxima de material à taxa de 7 Kg/m² na superfície de peneiramento, conforme item 5.2.4. O somatório das massas totais de ambos ficou bem abaixo do valor de 0,3% em perdas, tornando admissível os valores ensaiados, conforme 5.2.9.

Similar ao agregado miúdo, os resultados das amostras não apresentaram diferenças entre os percentuais retidos superiores à 4%, indicando não divergências ou erros no ensaio. A Tabela 26 apresenta o resumo sintético dos dados obtidos.

Tabela 26 - Diâmetros notáveis e coeficientes de curvatura.

Peneiras (mm)	Média (%)		
	Simple	Acumulado	Passante (%)
50,00	0,0%	0,0%	100,0%
37,50	0,0%	0,0%	100,0%
25,00	2,7%	2,7%	97,4%
19,00	11,7%	14,4%	85,7%
12,50	49,7%	64,1%	36,0%
9,50	34,0%	98,0%	2,0%
6,30	1,9%	99,9%	0,1%
4,75	0,0%	99,9%	0,1%
-	0,1%	100,0%	0,0%
DMC	25,00		
MF	4,79		

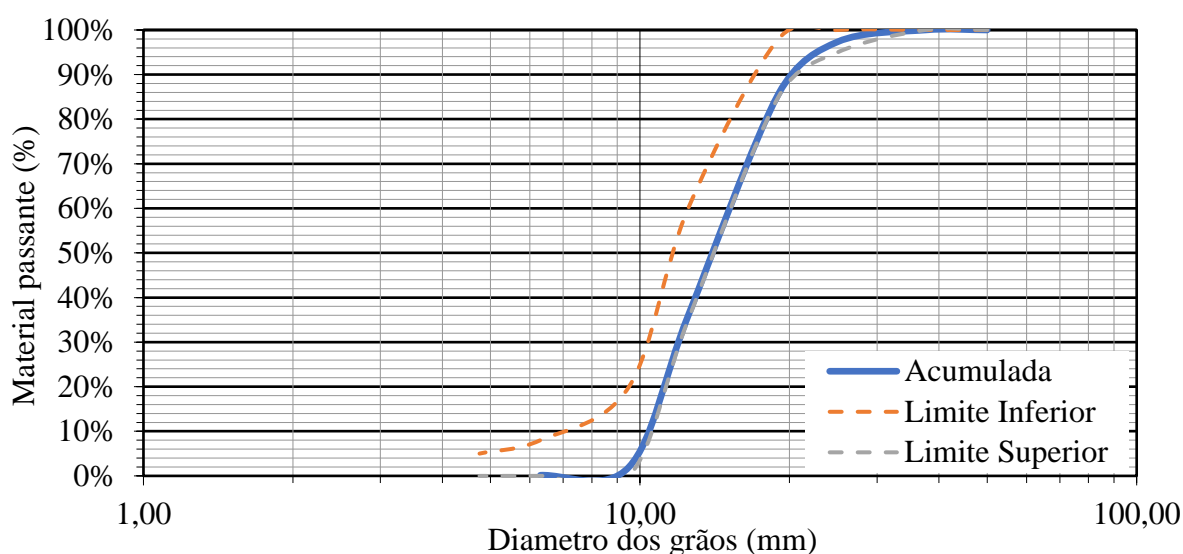
Fonte: Autor, 2019.

De acordo com as especificações de agregados para concretos da NBR 7211, a amostra sem manteve dentro da zona de 9,5 / 25mm, correspondente à relação entre menor e maior dimensões do agregado graúdo, conforme item 6.1.1.

O diâmetro máximo característico foi de 25,0 mm conforme estimado previamente, sendo atribuída a classificação de brita 2. Correlacionado à essa classificação, é possível explicar o valor demasiado elevado para o módulo de finura, no valor de 4,79, não havendo para esse caso valor máximo aplicável.

Na Figura 20 é apresentado o gráfico da curva de distribuição granulométrica, juntamente aos limites de distribuição atribuídos pela NBR 7211, item 6.1.1. Em todos os casos é utilizado o passante acumulado de cada conjunto.

Figura 20 - Curva granulométrica do agregado graúdo.



Fonte: Autor, 2019.

Analisando o gráfico da curva de distribuição do agregado graúdo, é possível visualizar que a curva gerada e o limite superior são praticamente coincidentes, com uma leve divergência no seu ramo superior. Com base no formato da curva apresentada, não foi visualizado saltos ou descontinuidades, permitindo inferir que o material ensaiado apresentou boa uniformidade, sem falhas de continuidades, com boa graduação.

Os dados referentes à distribuição granulométrica dos agregados miúdos e graúdos apresentaram leves divergências em alguns parâmetros dos modelos e metodologias de classificação adotados. Tais divergências não inviabilizariam a utilização dos mesmos em misturas de concretos, sendo aplicáveis aos ensaios em questão.

Como este trabalho visa analisar a influência da água de amassamento na resistência de concretos e argamassas, os fatores divergentes apresentados nestes ensaios não terão influências sobre os resultados alcançados.

NBR NM 52 - Agregado Miúdo - Massa Específica e Aparente

Na Tabela 27 são apresentados os dados relativos aos ensaios de massa específica e massa específica aparente do agregado miúdo, onde consta as anotações dos procedimentos, conforme norma, e os cálculos finais para obtenção dos massa específica, massa específica seca e massa específica saturada. O ensaio foi executado em duplicata, com as amostras denominadas m1 e m2.

Tabela 27 - Registro das massas e procedimento de cálculo.

Etapas do ensaio	Amostras		Média
	m1	m2	
Tara (Frasco de Chapman)	374,59	362,50	
Amostra Pesada (g)	500,00	500,04	
Pesagem P1 (g)	1149,57	1139,43	
Pesagem P2 (g)	1150,32	1140,24	
Volume Ocupado P1 (cm ³)	274,98	276,89	
Volume Ocupado P2 (cm ³)	275,73	277,70	
Volume de Água Adicionado (cm ³)	0,75	0,81	
Peso Seco + Tara (g)	579,20	574,12	
Tara do Recipiente (g)	81,40	80,70	
Peso Seco da Amostra (g)	497,80	493,42	
Massa Específica Aparente (g/cm³)	1,82	1,83	1,83
Massa Específica Seca (g/cm³)	2,23	2,23	2,23
Massa Específica Saturada (g/cm³)	2,24	2,26	2,25

Fonte: Autor, 2019.

Os ensaios realizados com a mesma amostra não divergiram em mais de 0,02 g/cm³ nos valores finais. Como valor definitivo foi adotado a média correspondente, com aproximação de 0,01 g/cm³.

Os resultados de massa específica seca caracterizaram o material como densidade normal, classificação entre 2,0 e 3,0 g/cm³, além de confirmarem as suposições iniciais do aspecto arenítico, com base nos parâmetros médios de 2,1 a 2,3 g/cm³ para materiais dessa classificação.

NBR NM 53 - Agregado Graúdo - Massa Específica, Aparente e Absorção

Na Tabela 28 são apresentados os dados relativos aos ensaios de massa específica, massa específica aparente e absorção do agregado graúdo, com registro do procedimento e os cálculos finais. O ensaio foi executado em duplicata, por meio das amostras m1 e m2.

Tabela 28 - Registro das massas e procedimento de cálculo.

Descrição	Amostras		Média
	m1	m2	
Tara (kg)	0,328	0,328	
Massa Saturada (kg)	4,000	4,001	
Peso Conjunto Imerso (kg)	0,111	0,138	
Peso da Amostra Submersa (kg)	2,519	2,487	
Peso Úmido + Tara (kg)	4,487	5,701	
Peso Seco + Tara (kg)	4,407	5,663	
Tara do Conjunto (kg)	0,437	1,693	
Massa Úmida (kg)	4,05	4,03	
Massa Seca (kg)	3,97	3,97	
Massa Específica Seca (g/cm³)	2,73	2,71	2,72
Massa Específica Superfície Seca (g/cm³)	2,70	2,69	2,70
Massa Específica Aparente (g/cm³)	2,68	2,67	2,68
Absorção (%)	0,76%	0,78%	0,77%

Fonte: Autor, 2019.

Os resultados apresentados demonstraram boa repetibilidade, sendo ambas as amostras ensaiadas por apenas um operador. Obteve-se êxito no ensaio, com diferença de valores menores que 0,02 g/cm³ para os valores de massas específicas, e divergências inferiores à 0,3% para absorção, dado que o material apresentou resultados absolutos inferiores à 2,0% neste quesito. Analisando os parâmetros de massas específicas encontradas, também foi possível confirmar as suposições iniciais de agregado natural, resultado de britagem, de origem granítica, com valores médios de 2,6 a 3,0 g/cm³, juntamente a análise do aspecto visual.

NBR NM 45 - Agregados - Massa Unitária e Vazios

O ensaio é dividido em duas etapas principais, sendo a primeira a calibração do recipiente a ser utilizado. A Tabela 29 apresenta o registro desse procedimento com o resultado alcançado ao final.

Tabela 29 - Calibração do recipiente.

Descrição	Massa
Recipiente + Água + Placa (kg)	17,83
Placa de Vidro (kg)	1,36
Tara do Recipiente (kg)	6,50
Massa de Água (kg)	9,97
Temperatura da Água (°C)	27,00
Densidade da Água (kg/m ³)	996,59
Volume do Recipiente (dm³)	10,01

Fonte: Autor, 2019.

Conforme disposto na seção de aparelhagem desta norma, especificamente nos itens 5.3.1 e 5.3.2., aferiu-se que o recipiente cilíndrico possuía volume interno de 10 dm³, de acordo com a capacidade mínima, sendo a diferença de 0,01 dm³ atribuída à possíveis erros de leitura durante o processo. Dessa forma, prosseguiu-se com o procedimento do ensaio, sendo os resultados dos procedimentos e cálculo apresentados nas Tabelas 30 para o agregado miúdo, estado solto, sem compactação.

Ao final são apresentados os valores de massa unitária, em kg/m³, e índice de volume de vazios em valores percentuais. Cada ensaios foi realizado em triplicata, conforme item 10.1, com as amostras denominadas m1, m2 e m3, onde o valor nominal considerado é a média.

Tabela 30 - Registro das massas e procedimento de cálculo, agregado miúdo.

Descrição	Amostras		
	m1	m2	m3
Tara Recipiente (kg)	6,51	6,51	6,51
Peso + Tara (kg)	20,48	20,72	20,52
Peso Amostra (kg)	13,97	14,21	14,01
Volume Recipiente (m ³)	0,01001	0,01001	0,01001
Massa Específica Seca, NM 52 (kg/m ³)	2.227,00	2.227,00	2.227,00
Massa Unitária (kg/m³)	1.395,60	1.419,18	1.399,50
Índice de Volume de Vazios (%)	37,33%	36,27%	37,16%
Massa Unitária (kg/m³)	1.404,76	Índice de Vazios (%)	36,92%

Fonte: Autor, 2019.

Os resultados individuais não apresentaram desvio maior que 1% de diferença das médias obtidas. Sob os aspectos de repetibilidade do item 11.1, foi visualizado diferenças entre os resultados inferiores ao limite máximo de 40 kg/m³. Dessa forma os resultados foram considerados válidos.

Segundo Basílio (1995) a maioria dos agregados miúdos que produzem concretos normais, com massa específica de aproximadamente 2.400kg, possui massa unitária próxima a 1.500 kg/m³, logo para o valor de massa específica igual à 2.227 kg/m³ encontrado anteriormente é possível justificar e validar o resultado de 1.404,76 kg/m³.

Relativo ao índice de vazios, segundo metodologia de Atterberg (1937 apud Nelson, et al, 2015) índices de vazios para solos entre 0,35 e 0,65 classificam a amostra como areias bem graduadas de grãos uniformes, confirmando os resultados do ensaio de composição granulométrica, anteriormente dispostos.

Na Tabela 32 é apresentado o registro do procedimento e resultados para as amostras de agregado graúdo sem compactação. Ao final é apresentado as médias das triplicatas para ambos os índices.

Tabela 31 - Registro das massas e procedimento de cálculo, agregado graúdo.

Descrição	Amostras		
	m1	m2	m3
Tara Recipiente (kg)	6,51	6,51	6,51
Peso + Tara (kg)	19,78	20,05	19,95
Peso Amostra (kg)	13,27	13,54	13,44
Volume Recipiente (m ³)	0,01001	0,01001	0,01001
Massa Específica Seca, NM 53 (kg/m ³)	2.706,00	2.706,00	2.706,00
Massa Unitária (kg/m³)	1.325,67	1.352,25	1.343,06
Índice de Volume de Vazios (%)	51,01%	50,03%	50,37%
Massa Unitária (kg/m³)	1.340,33	Índice de Vazios (%)	50,47%

Fonte: Autor, 2019.

Dado que a amostra se trata de uma rocha decorrente de britagem, com base no processo de obtenção da massa unitária, pode ser atribuída a classificação normal, para elementos entre 1.000 e 2.000 kg/m³. O índice de vazios elevado é reflexo da natureza angular do material, sendo que quanto mais arredondado esse índice tende a diminuir.

Na Tabela 32 é apresentado o registro do procedimento e resultados para as amostras de agregado graúdo com compactação. Resultado também executado em triplicata pelas amostras m1, m2 e m3.

Tabela 32 - Registro das massas e procedimento, agregado graúdo compactado.

Descrição	Amostras		
	m1	m2	m3
Tara Recipiente (Kg)	6,51	6,51	6,51
Peso + Tara (Kg)	20,74	20,55	20,85
Peso Amostra (Kg)	14,23	14,04	14,34
Volume Recipiente (m ³)	0,01001	0,01001	0,01001
Massa Específica Seca, NM 53 (Kg/m ³)	2.706,00	2.706,00	2.706,00
Massa Unitária (Kg/m³)	1.421,88	1.402,60	1.432,57
Índice de Volume de Vazios (%)	47,45%	48,17%	47,06%
Massa Unitária (Kg/m³)	1.419,01	Índice de Vazios (%)	47,56%

Fonte: Autor, 2019.

Ensaio de massa unitária no estado solto e compactado costumam possuir diferenças da ordem até 25% nos valores de massa unitária e de até 10% em média para o índice de vazios.

Dessa forma, os valores apresentados apresentaram essa tendência, com diferenças de apenas 5,87% entre os valores de massa unitária e 2,91% para os índices de volume de vazios.

No geral, os dados finais obtidos para ambos os materiais foram satisfatórios. Dentro dos pressupostos iniciais de origem sedimentar para o agregado miúdo e origem granítica do agregado graúdo, pode-se inferir que os resultados foram condizentes com os valores médios observados, validando também as hipóteses iniciais. Não foram visualizadas divergências relevantes ou disparidades entre os registros de massa obtidos.

5.3.2. Caracterização do agregado utilizado nas argamassas

Como disposto na metodologia, foi utilizado areia padrão normal para elaboração dos corpos de prova de argamassas, sendo o fornecimento por empresa certificadora. Na Tabela 33 é apresentado os resultados dos ensaios químicos requisitos de norma, fornecido no laudo de materiais apresentados.

Tabela 33 - Resultados de requisitos físicos e químicos.

Determinação		Resultados	Requisito
ABNT NBR 14656:2001	Teor de sílica	96,6	$\geq 95\%$, em massa
ABNT NBR 7214:2015	Teor de Umidade	0,0	$\leq 0,2\%$, em massa
ABNT NBR NM 49:2001	Matéria orgânica	< 100 ppm	≤ 100 ppm

Fonte: Certificado de Material de Referência, n°2209-103, IPT, 2017.

Os dados apresentados foram retirados do certificado de material de referência disponibilizado publicamente, de forma eletrônica, pela empresa fornecedora do material, sendo os testes aplicados para cada fração do conjunto.

Todos os resultados obtiveram valores dentro dos requisitos normatizados. A Tabela 34 apresenta os resultados de composição granulométrica para cada fração ensaiada, conforme NM 248. São apresentados também os requisitos em percentual em massa individual.

Tabela 34 - Composição Granulométrica.

Fração	Material retido entre as peneiras de abertura nominal	Porcentagem em massa %	
		Resultados	Requisito
16	2,4 mm e 2,0 mm	6	≤ 10
	2,0 mm e 1,2 mm	91	≥ 90
30	1,2 mm e 0,6 mm	98	≥ 95
50	0,6 mm e 0,3 mm	98	≥ 95
100	0,3 mm e 0,15 mm	96	≥ 95

Fonte: Certificado de Material de Referência, n°2209-103, IPT, 2017.

Conforme é possível visualizar, todas as frações ensaiadas obtiveram resultados satisfatórios, com percentuais em massa dentro dos limites normativos. Dessa forma, com base na caracterização química e física acima disposta, o material foi considerado viável para uso e incorporado aos procedimentos de elaboração de corpos de prova de argamassas.

5.3.3. Caracterização do cimento utilizados nos concretos e argamassas

Nesta etapa foram realizados os ensaios de determinação do índice de finura e determinação de massa específica, sendo o primeiro fator determinante da velocidade da reação de hidratação, tendo influência sob outras qualidades da pasta, e o segundo ponto determinante para a estimativa do consumo em traços e misturas.

NBR 11579 – Cimento Portland — Determinação do índice de finura

Na Tabela 35 são apresentados os resultados referentes ao registro do procedimento da determinação do índice de finura, bem como seus resultados. O ensaio foi executado de forma manual, em triplicata.

Tabela 35 – Registro do procedimento e cálculo.

Descrição	Amostras		
	m1	m2	m3
Massa Inicial (g)	50,00	50,01	50,01
Tara Recipiente (g)	153,31	153,32	153,32
Tentativas	7	8	7
Leituras Finais (g)	0,05	0,04	0,04
Massa Retida (g)	0,64	0,62	0,67
Fator de Correção*	1,00	1,00	1,00
Índice de Finura (%)	1,28%	1,24%	1,34%
Média (%)	1,29%		

*Análise visual, bom estado de conservação.

Fonte: Autor, 2019.

Conforme metodologia de Abrams (1992), dado um mesmo lote de cimento Portland, sua resistência aumenta conforme ocorre o incremento de sua finura. Dessa forma, quanto menor o índice de finura calculado, melhor será o desempenho e resistência esperado, analisando também o parâmetro de velocidade da reação de hidratação.

A NBR 16697, que estabelece os requisitos para o cimento Portland, não estabelece os parâmetros de índice finura, podendo ser encontrado na NBR 11579 o limite máximo de 12% para a categoria. Valores médios podem ser atribuídos em função do tipo de material, como 10% para CP I e 5% para CP V. Logo, o resultado obtido de 1,29% indica a constituição de um

bom material, analisando apenas esse parâmetro. O resultado encontrado coincide com os dados do relatório de caracterização do material, fornecido pelo fabricante, atribuindo confiabilidade ao procedimento.

NBR 16605 – Massa Específica do Cimento Portland

A Tabela 36 mostra os resultados do ensaio executado, em forma de triplicata. Ao final, o valor nominal é considerado a média das três leituras.

Tabela 36 - Cálculo da massa específica.

Descrição	Amostra		
	m1	m2	m3
Volume Inicial (cm ³)	0,40	0,41	0,40
Volume Final (cm ³)	19,40	24,03	20,60
Peso da amostra (g)	58,12	71,60	61,70
Massa Específica (g/cm³)	3,04	3,03	3,05
Média (g/cm³)	3,04		

Fonte: Autor, 2019.

O valor de densidade, ou massa específica, mais usual para o cimento Portland é de 3,1 g/cm³ ou de 3.100 kg/cm³, podendo esse valor geralmente variar para menos. Esse valor é alterado após a reação de hidratação, ocorrendo um incremento natural por meio do processo de retração. Logo, analisando o valor de 3,04 g/cm³ com base nos parâmetros anteriores, é possível atestar a validade do resultado, pois a margem de variação foi de 1,9% do valor médio padrão, sendo confirmado também pelo valor informado do relatório de caracterização.

5.3.4. Caracterização do concreto e a pasta de cimento no estado fresco

NBR NM 67 – Slump Test

Na Tabela 37 são apresentados os resultados do ensaio de abatimento de tronco de cone, com seus respectivos valores de média e variância em relação ao corpo de prova padrão. As leituras n1 e n2 representam os abatimentos de cada traço em cada substância.

Tabela 37 - Resultado do Slump Test, NM 67.

Ident.	Símbolo	Abatimento (mm)			Var. (%)
		n1	n2	Média	
T0	AD	50	55	52,5	-
T1	HNO ₃	190	180	185,0	252,38%
T2	KOH	70	65	67,5	28,57%
T3	K ₂ SO ₄	175	180	177,5	238,10%

Fonte: Autor, 2019.

A trabalhabilidade é a mais importante propriedade do concreto no estado fresco, que por sua vez possui como componente principal a consistência, segundo Sobral (2000). Segundo Newman (1960) de forma objetiva, este conceito envolve três outros aspectos principais, a compactabilidade, mobilidade e estabilidade dos elementos. A segregação é entendida como o excesso de fluidez, onde ocorre a separação dos constituintes da mistura, impedindo características de uniformidade razoáveis.

A Figura 21 apresenta os resultados dos abatimentos obtidos para o traço padrão em água destilada (T0) e ácido nítrico (T1). À direita, no meio ácido, é visível o aspecto de segregação pela separação da pasta do agregado graúdo e excessivo abatimento, oposto ao aspecto coeso à esquerda.

Figura 21 - Aferição do Slump Test para T0 e T1.



Fonte: Autor, 2019.

A Figura 22 apresenta os abatimentos obtidos para o traço de hidróxido (T2) e sulfato de potássio (T3), com aspectos similares à T0 e T1 respectivamente.

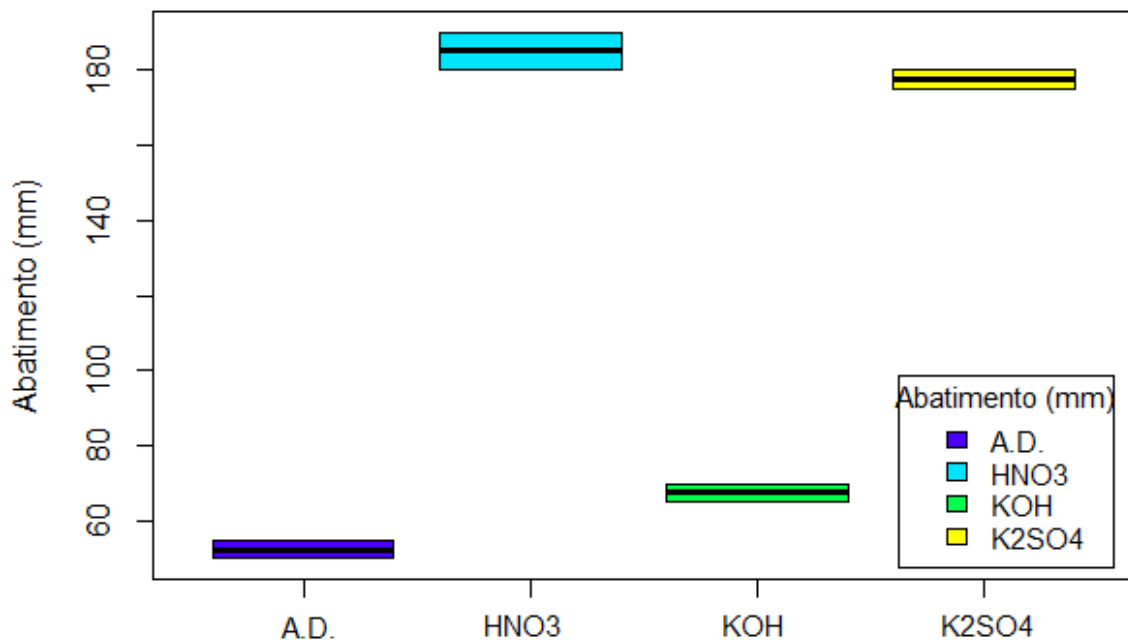
Figura 22 - Aferição do Slump Test para T2 e T3.



Fonte: Autor, 2019.

A Figura 23 apresenta de forma gráfica as medidas dos abatimentos registrados na Tabela 37, também visível nas Figuras 21 e 22.

Figura 23 - Gráfico das medidas de abatimento de n1 e n2.



Fonte: Autor, 2019.

Analisando os resultados apresentados é possível visualizar que todas as interferências dos substituintes foram significativas. Nos corpos de ácido e sulfato, em comparação ao padrão (AD), houve variações da ordem de 250% para os elementos do meio básico (KOH), também houve o aumento do abatimento, porém com menores proporções.

O método de dosagem utilizado adota como abatimento máximo a faixa entre 80 e 100 mm, começando a ser considerado a partir desse limite superior a segregação da pasta de

cimento. Pelos aspectos visuais observados nas substituições do meio ácido e sulfatado e as medições de Slump obtidas, é possível confirmar que houve segregação em ambos os casos. Dado que em todas as misturas foram mantidas as proporções de materiais e soluções, a segregação observada em ambos os casos é atribuída à interferência dos químicos adicionados, por ser a única variável modificada entre eles, em contra partida.

Esse resultado apresentado se correlaciona diretamente aos aspectos visuais qualitativos observados na primeira parte da metodologia, onde nos processos de moldagem dos corpos de prova não normatizados do meio ácido, foi observada alta fluidez junto à presença de uma lâmina de água excessiva na face superior. É possível afirmar que a presença de soluções de pH ácido e sulfatos afetam diretamente elementos de cimento Portland desde seu estado fresco, aumentando a fluidez, favorecendo a segregação e influenciando as resistências finais.

Em contra partida, analisando visualmente os corpos de prova do meio básico (KOH), foi visto que a mistura possuía um aspecto mais coeso, com a pasta de argamassa mais firme e trabalhável que o corpo de prova padrão. Não foi observado aspectos de segregação entre a argamassa e os agregados graúdos. Esses aspectos são refletidos no resultado de abatimento, pelo incremento de 28,57% comparado ao padrão.

Com os aspectos apresentados é possível afirmar que o aumento do caráter alcalino, ou pH básico, contribuiu para uma melhor trabalhabilidade da mistura sem promover aspectos de segregação. Logo, sua contribuição para as resistências finais tenderá a ser positiva, correlato aos dados anteriores da primeira metodologia.

5.3.5. Ensaios destrutivos de resistências características

Os ensaios de rompimento à compressão axial e tração diametral dos corpos de prova de concretos foram executados aos 28 e 92 dias. Os corpos de prova permaneceram em cura por imersão durante o período. Todos os ensaios foram realizados na mesma prensa hidráulica, tipo universal, com capacidade de 20 Ton, célula de carga CCE300KN, junto aos dispositivos auxiliares previstos em cada norma.

NBR 5739 – Concreto – Ensaio de Compressão em Corpos Cilíndricos

Na Tabela 38 é apresentado as cargas de ruptura e resistências à compressão axial calculadas para as idades de 28 e 92 dias, junto aos valores estatísticos descritivos do conjunto, para o padrão de água destilada (AD).

Tabela 38 - Compressão axial, água destilada, 28 e 92 dias.

Identificação da Amostra	Carga de Ruptura, 28 dias (kN)	Carga de Ruptura, 92 dias (kN)	Resistência à Compressão, 28 dias (MPa)	Resistência à Compressão, 92 dias (MPa)
AD.01	198,28	234,15	25,25	29,81
AD.02	191,26	244,30	24,35	31,11
AD.03	185,65	251,39	23,64	32,01
Média	191,73	243,28	24,41	30,98
Desvio Padrão	6,33	8,67	0,81	1,11
C. V. (%)	3,30	3,56	3,31	3,57

Fonte: Autor, 2019.

O concreto foi projetado para 25 MPa aos 28 dias. É possível visualizar que a dosagem e moldagem foi bem-sucedida, obtendo uma média de 24,41 MPa, divergindo 2,36% do valor esperado, estando dentro do desvio de 4 MPa adotado. A mesma tendência de uniformidade foi expressa por meio dos valores de coeficientes variacionais baixos, em ambas idades.

Em concretos em geral, as resistências de 28 e 92 dias apresentam ganhos de resistência da ordem de 15 a 25%, sendo em média um fator de 1,2 ao f_{c28} . A amostra analisada apresentou incremento da resistência de 26,91%, indicando boa qualidade dos materiais, principalmente o aglomerante.

A Tabela 39 apresenta os dados de compressão axial para os corpos de prova com substituição em ácido nítrico e os dados de estatística descritiva.

Tabela 39 – Compressão axial, ácido nítrico, 28 e 92 dias.

Identificação da Amostra	Carga de Ruptura, 28 dias (kN)	Carga de Ruptura, 92 dias (kN)	Resistência à Compressão, 28 dias (MPa)	Resistência à Compressão, 92 dias (MPa)
HNO ₃ .01	126,88	224,22	16,15	28,55
HNO ₃ .02	154,63	200,16	19,69	25,49
HNO ₃ .03	163,51	227,85	20,82	29,01
Média	148,34	217,41	18,89	27,68
Desvio Padrão	19,11	15,05	2,44	1,91
C. V. (%)	12,88	6,92	12,90	6,91

Fonte: Autor, 2019.

Como contraste inicial em relação ao traço de referência, os desvios padrões e coeficientes variacionais foram elevados, indicando menor uniformidade dos elementos ensaiados. Ocorrendo essa observação principalmente aos 28 dias, da ordem de 13%, quatro vezes superior ao padrão, e 7% aos 92 dias, ainda com proporção de duas vezes em relação ao mesmo. Esses resultados se interligam aos aspectos observados no ensaio de abatimento de Slump Test, onde foi visualizado a segregação da mistura gerada. Essa não uniformidade e o início da separação da nata de cimento e agregado graúdo, justificam o aumento relevante do coeficiente variacional, onde esse aspecto pode ser justificado pela alteração das frações hidratadas iniciais por exemplo, dentre outros fatores.

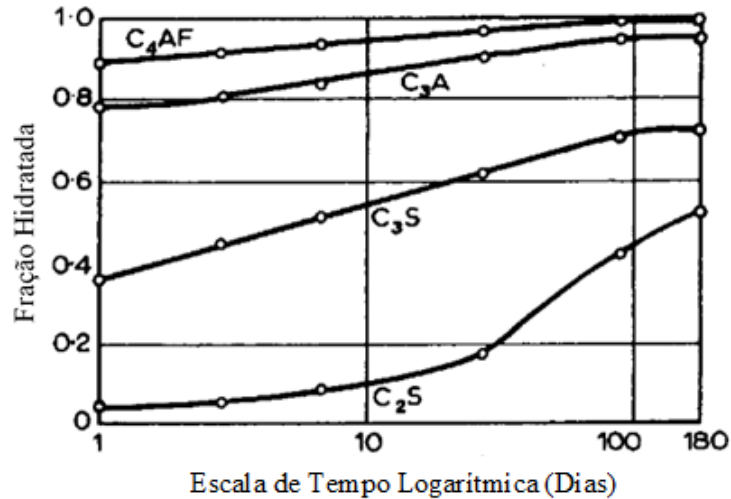
Relativo à resistência a compressão, tanto aos 28 quanto 92 dias houve decréscimos de 22,61 e 10,65% respectivamente. Conforme Sobral (2000) e Newman (1960) os fatores de trabalhabilidade no estado fresco estão intimamente ligados às resistências finais obtidas, conceito esse evidente nos resultados acima, resumido nos decréscimos percentuais.

Parte dos resultados observados se correlaciona também à própria interação do substituto, ácido nítrico (HNO₃), com as próprias reações de hidratação. Segundo Souza e Ripper (1998), no estado endurecido do concreto, o principal problema referente à presença de ácidos diz respeito a formação de produtos solúveis em água, contudo tal aspecto é descrito apenas para esse estado. Ainda segundo o mesmo autor, esse fator é função do tipo de ácido utilizado, pelo seu grau de dissociação, concentração na mistura e solubilidade de sais de cálcio.

Dessa forma, é válido afirmar que existe uma correlação entre ambos os estados, fresco e endurecido, e que a presença do ácido nítrico (HNO₃) afeta diretamente o caminho de reação do ganho de resistência, juntamente a alterações das proporções ou produtos gerados. O último ponto de discussão diz respeito à diferença entre os decréscimos de resistência observados, de

22,61% aos 28 dias e 10,65% para 92 dias. Segundo Gomes (2013) a Figura 24 representa a relação entre as frações hidratadas em função do tempo, este segundo em escala logarítmica.

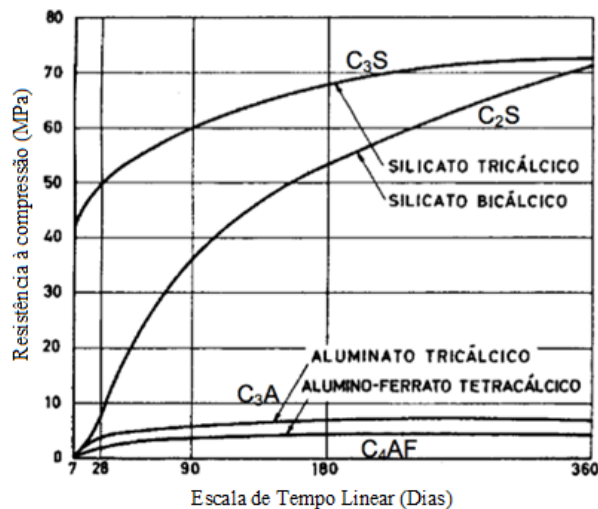
Figura 24 - Taxa de hidratação dos constituintes do cimento.



Fonte: Gomes, 2013.

Como é possível visualizar, o ganho de resistência é função intrínseca do percentual da fração hidratada, logo também função do tempo decorrido. A hidratação da fração de Aluminato-Ferroso Tetracálcico (C₄AF) e Aluminato Tricálcico (C₃A) ocorre quase em toda sua totalidade nas primeiras 24 horas. Até os 180 dias, as variações observadas são pequenas e constantes, atingindo a tendência de 100% após esse período. Logo a variação da hidratação dessas frações entre os 28 e 92 dias são pouco consideráveis. Analisando os silicatos, C₂S e C₃S, é possível visualizar que a maior variabilidade no período é decorrente do primeiro. A Figura 25 relaciona os ganhos de resistências dos constituintes pela variação de tempo.

Figura 25 - Ganho de resistência em cada constituinte.



Fonte: Gomes, 2013.

Contrariamente ao gráfico de fração hidratada apresentado na Figura 11, a Figura 12 demonstra que a hidratação do aluminato-ferroso tetracálcico (C_4AF), aluminato tricálcico (C_3A) e silicato dicálcico (C_2S) não influenciam a resistência inicial, contribuindo apenas em um segundo momento, para o incremento desse parâmetro. Aos sete dias, ponto de início do gráfico, praticamente toda a resistência dos elementos é decorrente do silicato tricálcico, sendo também observado a mesma tendência aos sete dias, com leve contribuição do silicato dicálcico.

A diferença entre os decréscimos percentuais de resistência pode indicar alterações no proporcionamento dos constituintes do cimento, com redução do percentual de C_3S , sendo convertido à C_2S , por solubilização do óxido de cálcio (CaO), justificando a modificação da curva característica. Esta hipótese também poderia justificar o elevado abatimento para essa substituição, baseado na tendência de hidratação instantânea do C_3S após o contato com a água. A Tabela 40 apresenta os dados relativos da solução de hidróxido de potássio.

Tabela 40 – Compressão axial, hidróxido de potássio, 28 e 92 dias.

Identificação da Amostra	Carga de Ruptura, 28 dias (kN)	Carga de Ruptura, 92 dias (kN)	Resistência à Compressão, 28 dias (MPa)	Resistência à Compressão, 92 dias (MPa)
KOH.01	187,92	256,85	23,93	32,70
KOH.02	189,26	248,02	24,10	31,57
KOH.03	190,60	239,18	24,27	30,45
Média	189,26	248,02	24,10	31,58
Desvio Padrão	1,34	8,84	0,17	1,13
C. V. (%)	0,71	3,56	0,71	3,56

Fonte: Autor, 2019.

Analisando os valores estatísticos descritivos, é possível visualizar que o conjunto apresentou uma conformidade superior para 28 dias, da ordem de 2,60%, com valores similares aos 92. Esse fator pode ser explicado tanto pela influência da solução substituta quanto pelo incremento da fluidez, expressa pelo incremento no ensaio de abatimento.

Avaliando as médias obtidas, em comparação ao traço padrão, aos 28 dias não foi visualizado diferenças significativas, obtendo ambos médias similares. Já aos 92 dias houve incremento de 1,93%, com observação também de que apenas uma amostra não obteve leituras de força superior ao padrão.

Com base nos resultados da metodologia não normatizada, aos 28 dias foi possível visualizar que nesse caso, ocorreu uma diferença considerável entre os elementos de água destilada e hidróxido de potássio (KOH) da ordem de 22,19%, não sendo possível realizar uma correlação direta devido à natureza do primeiro experimento. A diferença entre ambos se deu

pela solução de cura utilizada, onde no primeiro momento houve a cura por imersão na própria solução de constituição, no segundo, em solução de Ca(OH)_2 , conforme norma.

Logo, avaliando os resultados de ambas as metodologias, pode-se estimar que houve alterações de resistência decorrentes das soluções de cura utilizada. Para afirmar com maior precisão, outros fatores devem ser analisados especificamente, pois pode ocorrer influência das concentrações utilizadas, do caráter básicos de ambas soluções, dentre outros. Contudo, a presente avaliação serve como indício de evidência para avaliações posteriores.

Por último, na Tabela 41 são apresentados os resultados de compressão axial do sulfato de potássio para os 28 e 92 dias juntamente aos dados estatístico descritivos da série.

Tabela 41 – Compressão axial, sulfato de potássio, 28 e 92 dias.

Identificação da Amostra	Carga de Ruptura, 28 dias (kN)	Carga de Ruptura, 92 dias (kN)	Resistência à Compressão, 28 dias (MPa)	Resistência à Compressão, 92 dias (MPa)
K ₂ SO ₄ .01	112,43	156,18	14,31	19,88
K ₂ SO ₄ .02	129,36	166,54	16,47	21,20
K ₂ SO ₄ .03	107,31	118,49	13,66	15,09
Média	116,37	147,07	14,81	18,72
Desvio Padrão	11,54	25,29	1,47	3,22
C. V. (%)	9,92	17,19	9,93	17,17

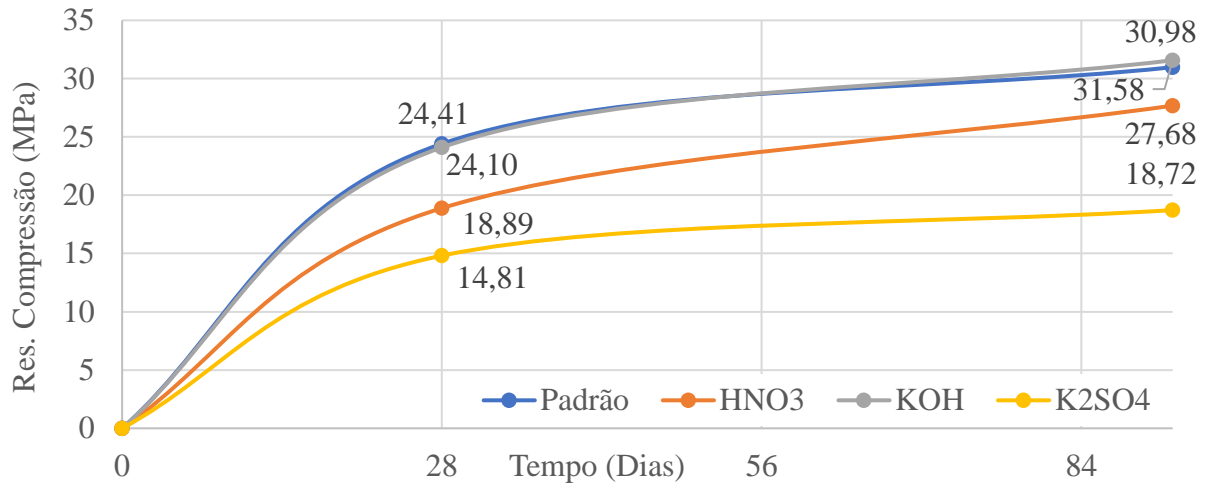
Fonte: Autor, 2019.

Analisando os desvios padrões e coeficientes variacionais, tanto das cargas de rupturas quanto das resistências, é possível visualizar que dentre todas as substituições abordadas esta demonstrou a maior variabilidade, indicando menor uniformidade. Os dados das cargas de ruptura apresentaram grandes espaçamentos entre eles, com influência do abatimento excessivo no ensaio de Slump Test.

Diferente das substituições anteriores de ácido e base, as médias obtidas apresentaram valores de decréscimos similares para ambas as idades, da ordem de 39,32% e 39,56%, em comparação aos corpos de prova padrão. Tal fato fortalece as estimativas de modificação das proporções internas dos silicatos, apresentado na alteração do pH do meio. Tendo em vista que a presença sulfatos é conhecidamente prejudicial ao concreto, em ambas as idades, os mesmos decréscimos foram observados.

A Figura 26 reúne todos os dados de resistência à compressão axial em ambas as idades, com a interpolação das curvas características de ganho de resistência.

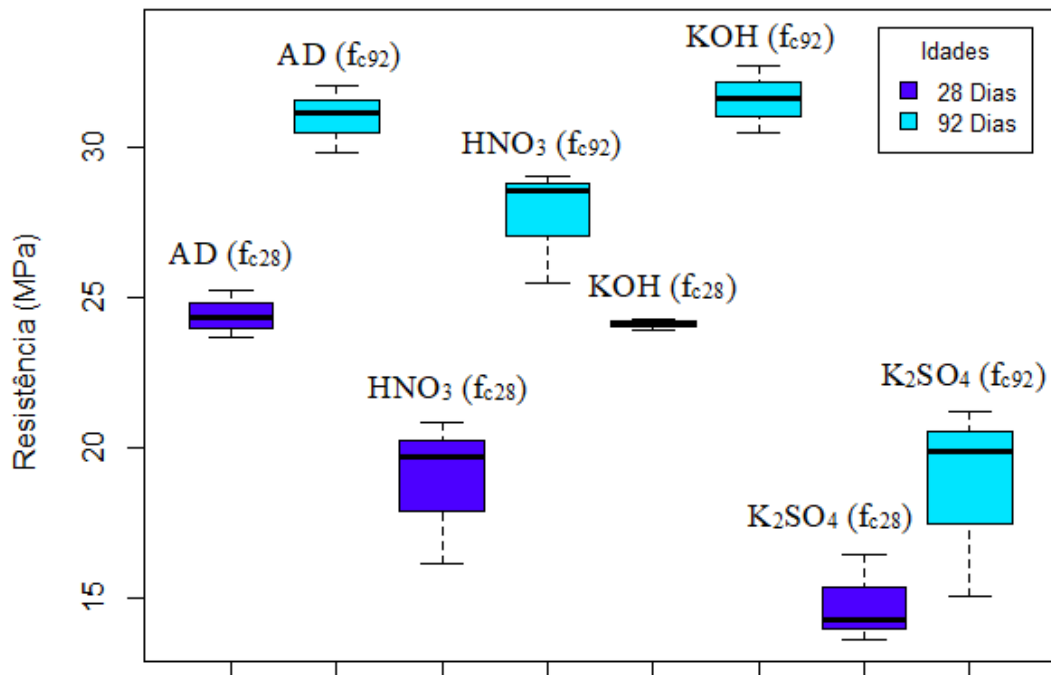
Figura 26 - Curva de ganho de resistência à compressão nos diferentes meios.



Fonte: Autor, 2019.

Graficamente é possível visualizar os mesmos comportamentos dispostos anteriormente nas tabelas individuais. As curvas características de água destilada e do meio básico (KOH), são coincidentes, com exceção do ramo aos 92 dias. A comparação com o meio ácido evidenciou efetivamente uma alteração da curva, visível na inclinação entre 28 e 92 dias, contrastando com a similaridade do meio sulfatado. A Figura 27 apresenta a distribuição de todos os resultados dos rompimentos à compressão axial.

Figura 27 - Distribuição dos resultados de compressão axial.



Fonte: Autor, 2019.

Os dados de rompimento aos 28 dias se apresentaram de forma dispersa, sem similaridades visíveis entre os formatos das distribuições. Já aos 92, a distribuição padrão (AD) e de meio básico (KOH), se apresentaram de forma similar, bem como o par ácido sulfato como é possível visualizar graficamente.

Prosseguindo com a análise estatística, realizou-se o teste de homogeneidade e normalidade segundo Levene e Shapiro, sendo os resultados apresentado na Tabela 42 respectivamente. Os valores finais de P valor dos resultados estão em destaque.

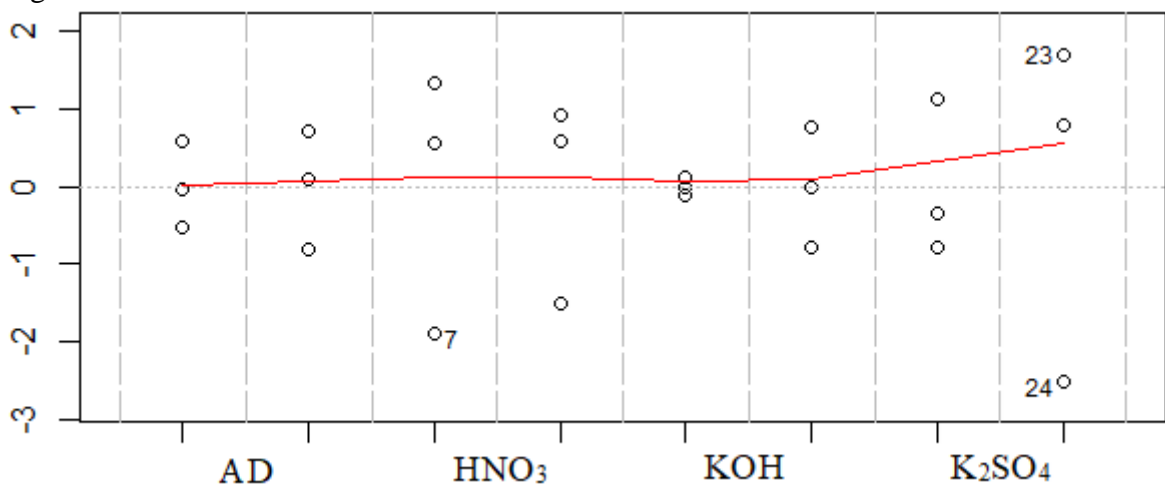
Tabela 42 - Resultado do teste de Levene e Shapiro para a compressão axial.

	Df	F Value	Pr (>F)		W	P Value
Grupos:	7	0,6054	0,7433	Resíduos:	0,9590	0,4194
	16					

Fonte: Autor, 2019.

Com o valor p igual à 0,7433 do teste de Levene, aceita-se a hipótese de homogeneidade da variância. Semelhante ao valor p igual à 0,4194 do teste de Shapiro, aceita-se a hipótese de que os dados vêm de uma distribuição normal. Ambos os testes utilizaram significância de 95%.

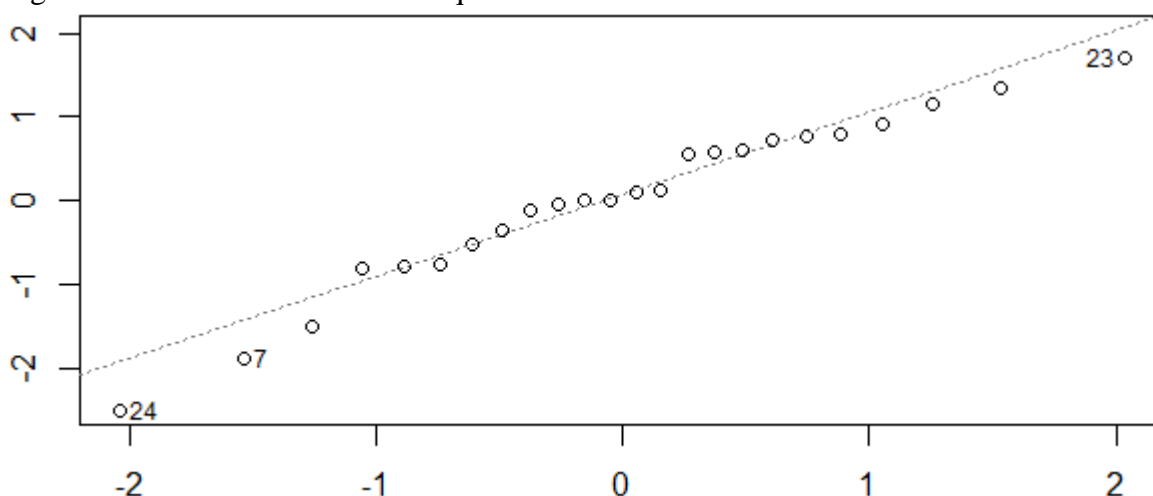
Figura 28 - Gráfico residual do modelo versus nivelamento.



Fonte: Autor, 2019.

No gráfico normal versus quantil das amostras, Figura 29, a maioria dos pontos apresentaram linearidade ao modelo gerado, representado pela reta pontilhada. Os outliers detectados pertencem aos elementos do meio ácido aos 28 dias, observação 7, e sulfatado de 92 dias, observações 23 e 24.

Figura 29 - Gráfico normal versus quantil.



Fonte: Autor, 2019.

Aferidos os pressupostos, foi aplicado o teste de análise de variância, sendo os resultados expostos na Tabela 43.

Tabela 43 - Resultado do teste ANOVA para resistência à compressão axial.

	Df	Sum Sq	Mean square	F Value	Pr (>F)
Fator	7	774,3	110,61	35,02	1,53e-08
Residual	16	50,5	3,16		

Fonte: Autor, 2019.

Como resultado é possível visualizar que o p valor, igual à $1,53e-08$, ficou muito abaixo do valor 0,05, com significância de 95%. Dessa forma, rejeita-se a hipótese de que as amostras possuem médias com variâncias iguais, passando a validar a hipótese de sejam significativamente diferentes.

Conclui-se das análises que os dados apresentaram homocedasticidade e conformidade com a distribuição normal, segundo os testes de Levene e Shapiro, contudo foram reprovados na hipótese de médias com variâncias iguais, implicando que as interferências provocaram mudança efetiva das resistências à compressão, não apenas pela diferença dos valores absolutos.

Resumindo os principais pontos observados da resistência à compressão, com referências aos dados de abatimento anteriores, foi possível reafirmar a relação intrínseca entre a consistência da pasta no estado fresco e a uniformidade das peças moldadas, com relações diretas entre os maiores abatimentos e os maiores coeficientes variacionais. Relativo à análise de pH, dos meios ácidos e básicos, foi visualizado que o caráter da água de amassamento possui influência direta sobre a curva característica de ganho de resistência, expresso principalmente pelos valores apresentados entre 28 e 92 dias.

NBR 7222 – Concreto – Resistência à Tração Diametral

Na Tabela 44 é apresentado as cargas de ruptura e resistências calculadas, do ensaio de tração diametral, para 28 e 92 dias, junto aos valores estatísticos descritivos de cada conjunto.

Tabela 44 – Tração diametral, água destilada, 28 e 92 dias.

Identificação da Amostra	Carga de Ruptura 28 dias (kN)	Carga de Ruptura 92 dias (kN)	Resistência à Tração 28 dias (MPa)	Resistência à Tração 92 dias (MPa)
AD.01	77,75	97,74	3,89	4,89
AD.02	70,39	99,62	3,52	4,98
AD.03	71,9	85,24	3,60	4,26
Média	73,35	94,20	3,67	4,71
Desvio Padrão	3,89	7,82	0,19	0,39
C. V. (%)	5,30	8,30	5,30	8,30

Fonte: Autor, 2019.

Nesta segunda análise os elementos apresentaram coeficientes variacionais superiores em 2% ao rompimento à compressão, indicando menor uniformidade. Visualizando os dados das leituras de cargas de rupturas, tanto aos 28 quanto 92 dias, duas leituras obtiveram valores próximos enquanto uma terceira se manteve distanciada.

A NBR 6118 estabelece uma correlação direta entre a resistência à tração diametral e a tração direta, sendo também correlacionado este último com o parâmetro de resistência à compressão.

$$f_{ct} = 0,90 \times f_{ct,sp} \quad (6)$$

Onde:

f_{ct} é a resistência à tração direta do concreto (MPa);

$f_{ct,sp}$ é a resistência à tração indireta ou por compressão diametral do concreto (MPa).

$$f_{ct,m} = 0,30 \times f_{ck}^{2/3} \quad (7)$$

Onde:

$f_{ct,m}$ é a resistência à tração direta média do concreto (MPa);

f_{ck} é a resistência à compressão direta do concreto (MPa).

Aplicando as correlações acima são obtidos os valores de 2,80 e 3,28 MPa para 28 e 92 dias, com base nos valores de resistência à compressão. Se comparado aos valores das leituras obtidas é possível observar diferenças positivas de 30,74% e 43,24% respectivamente.

Segundo Magalhães (2009) a correlação entre as resistências estabelecidas em norma é muito simplista, sendo confirmado por Mehta e Monteiro (1994) que afirma não haver uma proporcionalidade direta. Logo as médias obtidas podem ser consideradas válidas, com base que as leituras obtidas foram superiores às estimativas da NBR 6118.

Na Tabela 45 são apresentados os resultados do ensaio de tração diametral, da substituição de ácido nítrico (HNO_3), para 28 e 92 dias, juntamente aos valores de estatística descritiva pertinentes.

Tabela 45 – Tração diametral, ácido nítrico, 28 e 92 dias.

Identificação da Amostra	Carga de Ruptura 28 dias (kN)	Carga de Ruptura 92 dias (kN)	Resistência à Flexão 28 dias (MPa)	Resistência à Flexão 92 dias (MPa)
HNO ₃ .01	71,14	87,61	3,56	4,38
HNO ₃ .02	66,23	68,36	3,31	3,42
HNO ₃ .03	74,29	101,08	3,71	5,05
Média	70,55	85,68	3,53	4,28
Desvio Padrão	4,06	16,44	0,20	0,82
C. V. (%)	5,76	19,19	5,76	19,19

Fonte: Autor, 2019.

Aos 28 dias foi apresentada a mesma tendência de variabilidade dos corpos de prova, ocorrendo um aumento expressivo aos 92 dias. As medidas obtidas se mantiveram na faixa dos corpos de prova de referência, sendo observado também tendência de modificação da curva característica de ganho de resistência, com decréscimos de 3,81% e 9,04% aos 28 e 92 dias respectivamente.

Analisando a tendência de modificação da curva característica por compressão axial, é possível perceber que a tendência apresentada nesse caso foi inversa, ou seja, os decréscimos observados foram inversos ao primeiro momento, com a maior perda aos 92 dias. Contudo devido à maior variabilidade apresentada, a segregação na moldagem e possíveis erros de adensamento podem ter influenciado na não repetição dos primeiros resultados. Tendo em vista também que aos 92 dias os desvios foram próximos, da ordem de 20%.

Na Tabela 46 são apresentados os dados da substituição de hidróxido de potássio, juntamente aos dados de estatística descritiva obtida.

Tabela 46 – Tração diametral, hidróxido de potássio, 28 e 92 dias.

Identificação da Amostra	Carga de Ruptura 28 dias (kN)	Carga de Ruptura 92 dias (kN)	Resistência à Flexão 28 dias (MPa)	Resistência à Flexão 92 dias (MPa)
KOH.01	94,68	99,06	4,73	4,95
KOH.02	89,165	104,67	4,46	5,23
KOH.03	83,65	93,45	4,18	4,67
Média	89,17	99,06	4,46	4,95
Desvio Padrão	5,52	5,61	0,28	0,28
C. V. (%)	6,19	5,66	6,19	5,66

Fonte: Autor, 2019.

Aos 28 dias foi observado uma igual tendência de não uniformidade, similar ao padrão, sendo reduzido esse viés aos 92 dias, com coeficientes variacionais menores, com melhor uniformidade dos elementos.

Analisando as médias obtidas, em comparação ao padrão, foi possível visualizar um acréscimo substancial aos 28 dias, da ordem de 21,57%, bem como aos 92, com incrementos menores de 5,16%. Novamente, é apresentado uma tendência de modificação da curva característica, expresso principalmente por esses dois valores, com a diferença neste caso para os incrementos inversos observados nas leituras ensaiadas à compressão.

É apresentado na Tabela 47 os dados de tração diametral do sulfato de potássio.

Tabela 47 – Tração diametral, sulfato de potássio, 28 e 92 dias.

Identificação da Amostra	Carga de Ruptura 28 dias (kN)	Carga de Ruptura 92 dias (kN)	Resistência à Flexão 28 dias (MPa)	Resistência à Flexão 92 dias (MPa)
K ₂ SO ₄ .01	65,47	92,97	3,27	4,65
K ₂ SO ₄ .02	75,30	90,66	3,77	4,53
K ₂ SO ₄ .03	61,71	66,74	3,09	3,34
Média	67,49	83,46	3,37	4,17
Desvio Padrão	7,02	14,52	0,35	0,73
C. V. (%)	10,40	17,40	10,40	17,40

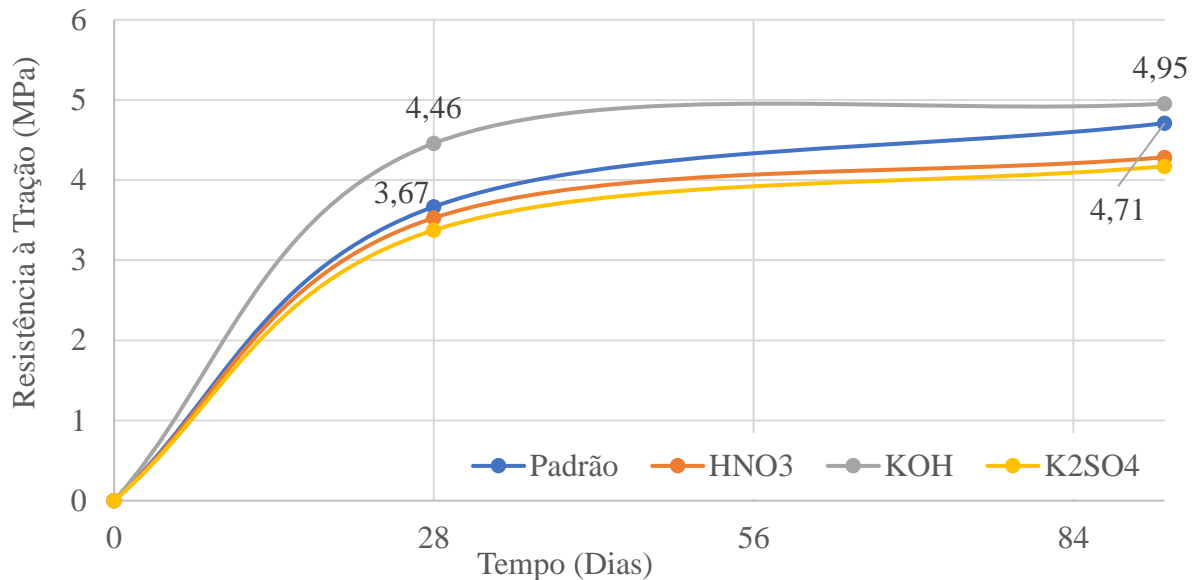
Fonte: Autor, 2019.

O excesso de fluidez e o aspecto de segregação observados no estado fresco foram refletidos em ambos coeficientes variacionais, com acréscimos de 5,10% e 9,10% aos 28 e 92 dias respectivamente, sendo apresentado os maiores valores absolutos dentre todos.

Analisando os resultados das resistências, com base nas variabilidades apresentadas, é possível inferir que ambas as amostras apresentaram decréscimos similares, de 7,98% e 11,40% respectivamente, podendo afirmar que foi apresentado a mesma tendência para ambas as idades.

A Figura 30 apresenta as curvas características de ganho de resistência à tração diametral de todas as soluções utilizadas.

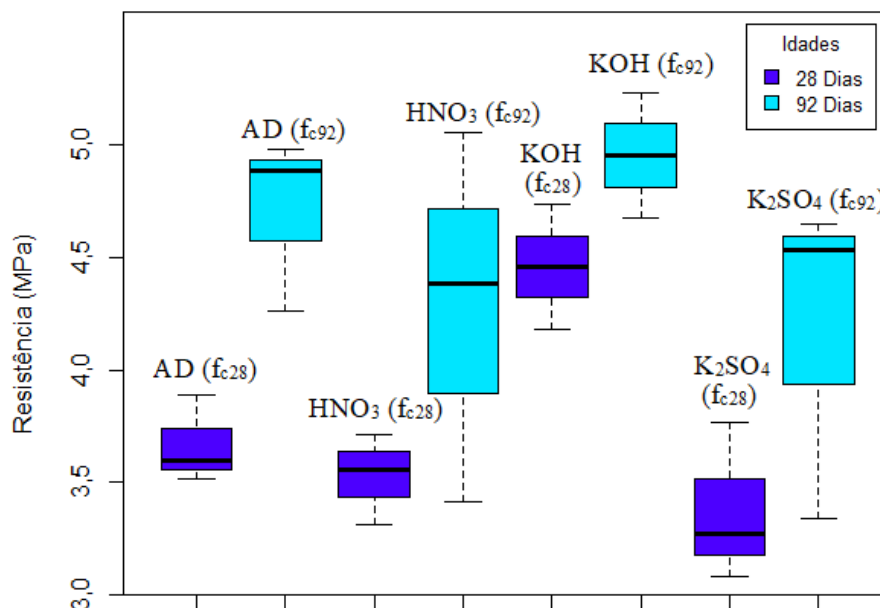
Figura 30 - Curva de ganho de resistência à tração nos diferentes meios.



Fonte: Autor, 2019.

As curvas dos meios ácidos e sulfatados são quase coincidentes, com pequena diferenciação no ramo após os 28 dias. Analisando os formatos individuais, há uma maior similaridade entre as curvas ácido/base e padrão/meio sulfatado, tendência similar dos resultados anteriores. A Figura 31 apresenta os gráficos de distribuição dos resultados da resistência à tração diametral.

Figura 31 - Distribuição dos resultados de tração diametral.



Fonte: Autor, 2019.

Analisando as distribuições individuais, se torna evidente os aspectos variacionais excessivos dos meios ácidos e sulfatados, principalmente aos 92 dias. Apesar das variações, ambos apresentaram todos os valores abaixo dos respectivos corpos de prova padrão (AD). Outro ponto de grande diferença, foram os dados do meio básico (KOH), com maior uniformidade visível graficamente, com valores absolutos elevados.

Prosseguiu-se o teste de homogeneidade e normalidade segundo Levene e Shapiro, sendo os resultados apresentados na Tabela 48 respectivamente. Os valores finais de P valor dos resultados estão em destaque.

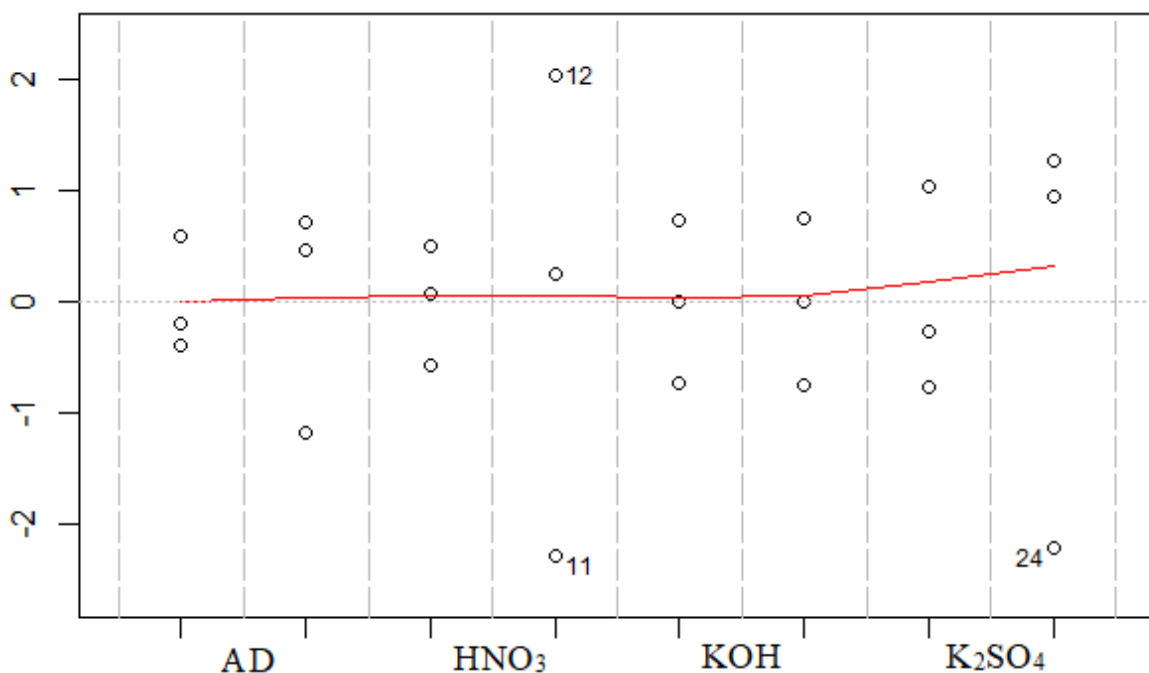
Tabela 48 - Resultado do teste de Levene e Shapiro para a tração diametral.

	Df	F Value	Pr (>F)		W	P Value
Grupos:	7	0,5814	0,7613	Resíduos:	0,9631	0,5040
	16					

Fonte: Autor, 2019.

Com o valor p igual à 0,7613 do teste de Levene, aceita-se a hipótese de homogeneidade da variância. Semelhante ao valor p igual à 0,5040 do teste de Shapiro, aceita-se a hipótese de que os dados vêm de uma distribuição normal. Ambos os testes utilizaram significância de 95%. No gráfico residual versus o nivelamento, apresentado na Figura 32, a maioria dos pontos se apresentam próximos ao modelo gerado, representado pela curva em vermelho. Os outliers detectados pertencem aos elementos do meio ácido aos 28 dias, observações 11 e 12, e sulfatado aos 92 dias, observação 24.

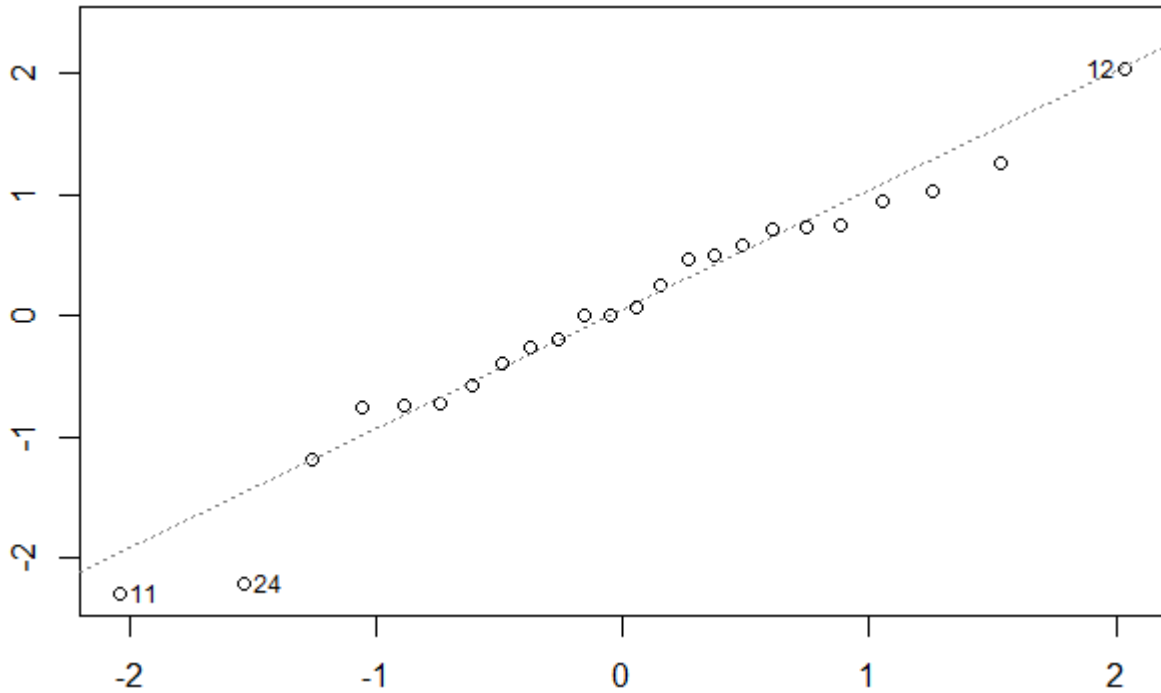
Figura 32 - Gráfico residual do modelo versus nivelamento.



Fonte: Autor, 2019.

No gráfico normal versus quantil das amostras, Figura 33, a maioria dos pontos apresentaram linearidade ao modelo gerado, representado pela reta pontilhada, indicando boa conformidade da amostra.

Figura 33 - Gráfico normal versus quantil.



Fonte: Autor, 2019.

Aferidos os pressupostos, foi aplicado o teste de análise de variância (ANOVA), sendo os resultados apresentados na Tabela 49.

Tabela 49 - Resultado do teste ANOVA para resistência à tração diametral.

	Df	Sum Sq	Mean square	F Value	Pr (>F)
Fator	7	6,879	0,9827	4,59	0,00554
Residual	16	3,426	0,2141		

Fonte: Autor, 2019.

Como resultado é possível visualizar, o p valor igual à 0,00554 ficou abaixo do valor 0,05 para significância de 95%. Dessa forma, rejeita-se a hipótese de que as amostras vêm de médias com variâncias iguais, passando a validar a hipótese de significativamente diferentes.

Conclui-se das análises estéticas que os dados apresentaram homocedasticidade e conformidade com a distribuição normal, segundo os testes de Levene e Shapiro, contudo foram reprovados na hipótese de médias com variâncias iguais, implicando que as interferências provocaram mudança efetiva das resistências à compressão, não apenas pela diferença dos valores absolutos.

Resumindo todas as análises desta seção, pelos gráficos de curva de ganho de resistência e distribuição estatística, é visualizado que os comportamentos foram similares de aos dados apresentados na primeira metodologia e aos de resistência à compressão axial, justificado esse último pela correlação direta entre eles. Um dos resultados de maior expressividade se dá pelo acréscimo da resistência do meio básico aos 28 dias, de 21,57%.

NBR 13279 – Argamassas – Resistência à flexão e compressão

Os ensaios de resistência à flexão e compressão de argamassas foram executados apenas aos 28 dias. Os corpos de prova permaneceram em cura por imersão durante esse período. A Tabela 50 apresenta os resultados de ambos os ensaios.

Tabela 50 – Resistência à flexão e compressão, água destilada, aos 28 dias.

Identificação da Amostra	Carga de Ruptura		Resistência	
	Flexão 28 dias (N)	Compressão 28 dias (N)	Flexão 28 dias (MPa)	Compressão 28 dias (MPa)
AD.01	2678,07	57917,70	6,25	36,20
AD.02	3040,25	58070,74	7,10	36,29
AD.03	2315,89	59315,40	5,40	37,07
Média	2678,07	58434,61	6,25	36,52
Desvio Padrão	362,18	766,61	0,85	0,48
C. V. (%)	13,52	1,31	13,60	1,31

Fonte: Autor, 2019.

Analisando o coeficiente variacional para a resistência à flexão, em comparação às amostras anteriores, é possível visualizar a elevada variabilidade. Relativo à compressão axial foi visualizado um comportamento oposto, com elevada uniformidade, com coeficiente variacional inferior à 1,50%. A relação entre ambas as resistências foi de 17,11%. A Tabela 51 apresenta os resultados do meio ácido à mesma idade.

Tabela 51 – Resistência à flexão e compressão, ácido nítrico, aos 28 dias.

Identificação da Amostra	Carga de Ruptura		Resistência	
	Flexão 28 dias (N)	Compressão 28 dias (N)	Flexão 28 dias (MPa)	Compressão 28 dias (MPa)
HNO ₃ .01	2.509,73	65.528,5	5,90	40,96
HNO ₃ .02	2.764,79	66.773,2	6,50	41,73
HNO ₃ .03	2.509,73	65.640,7	5,90	41,03
Média	2.594,75	65.980,8	6,10	41,24
Desvio Padrão	147,26	688,51	0,35	0,43
C. V. (%)	5,68	1,04	5,68	1,03

Fonte: Autor, 2019.

Os coeficientes variacionais para os dados de resistência à flexão apresentaram maior uniformidade, também na resistência à compressão, em comparação ao padrão em água destilada. A relação entre ambas as resistências foi de 14,79%. A Tabela 52 apresenta os resultados do meio básico, junto a estatística descritiva.

Tabela 52 – Resistência à flexão e compressão, hidróxido de potássio, aos 28 dias.

Identificação da Amostra	Carga de Ruptura		Resistência	
	Flexão 28 dias (N)	Compressão 28 dias (N)	Flexão 28 dias (MPa)	Compressão 28 dias (MPa)
KOH.01	2662,77	58366,60	6,20	36,48
KOH.02	2642,36	55846,66	6,20	34,90
KOH.03	2458,72	58316,59	5,80	36,45
Média	2587,95	57509,95	6,07	35,94
Desvio Padrão	112,38	1440,67	0,23	0,90
C. V. (%)	4,34	2,51	3,81	2,51

Fonte: Autor, 2019.

Relativo ao caráter de meio básico, os coeficientes variacionais das resistências à flexão apresentaram a maior uniformidade dentre todos, ocorrendo em contrapartida uma elevação da variação na resistência à compressão, com coeficientes da ordem de 2,5%. Dado os valores variacionais apresentados, este não indica maiores alterações. A relação entre as resistências foi de 16,88%. Por último, a Tabela 53 apresenta os resultados relativos ao meio sulfatado, com os dados estatísticos descritivos obtidos.

Tabela 53 – Resistência à flexão e compressão, sulfato de potássio, aos 28 dias.

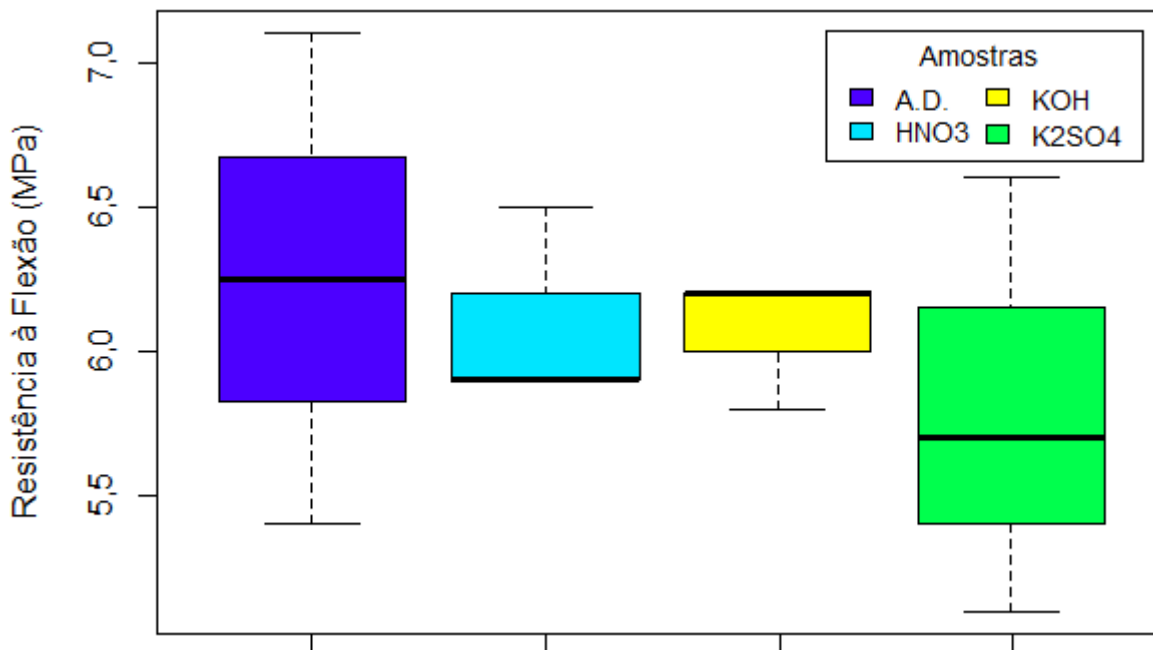
Identificação da Amostra	Carga de Ruptura		Resistência	
	Flexão 28 dias (N)	Compressão 28 dias (N)	Flexão 28 dias (MPa)	Compressão 28 dias (MPa)
K ₂ SO ₄ .01	2.826,00	66.640,55	6,60	41,65
K ₂ SO ₄ .02	2.173,06	55.907,88	5,10	34,94
K ₂ SO ₄ .03	2.438,32	60.162,18	5,70	37,60
Média	2.479,13	60.903,54	5,80	38,06
Desvio Padrão	328,38	5.404,61	0,75	3,38
C. V. (%)	13,25	8,87	13,02	8,88

Fonte: Autor, 2019.

Similar aos corpos de prova referência, os coeficientes variacionais dos dados de ruptura à flexão apresentaram valores elevados, implicando em menores uniformidade das amostras, as maiores leituras obtidas. Para os dados de resistência à compressão houve também um acréscimo elevado, em cerca de 300% dos valores médios anteriores.

Na Figura 34 são apresentados graficamente os dados de resistência à flexão juntamente aos dados de estatística descritiva relacionados.

Figura 34 - Representação gráfica resistência à flexão das argamassas.



Fonte: Autor, 2019.

O gráfico de distribuição, Figura 21, demonstrou alta variabilidade principalmente no meio padrão e sulfatado, não sendo esperado neste primeiro devido ao seu caráter de referência, em conformidade aos dados apresentados nas tabelas anteriores.

As tendências de variação apresentadas se mostraram similares aos dados de compressão axial aos 28 dias, dos corpos de prova de concretos. Foi possível visualizar decréscimos no meio ácido e mais ainda nos meios sulfatados. Para o meio alcalino não houve alterações entre as médias, apresentando médias similares ao padrão, contudo, sua distribuição ocorreu de forma mais concentrada, em uma zona superior.

Prosseguindo com a análise estatística, realizou-se o teste de homogeneidade e normalidade, sendo os resultados apresentado na Tabela 54. Os valores finais dos resultados são mostrados em destaque.

Tabela 54 - Verificação de homocedasticidade e normalidade, resistência à flexão.

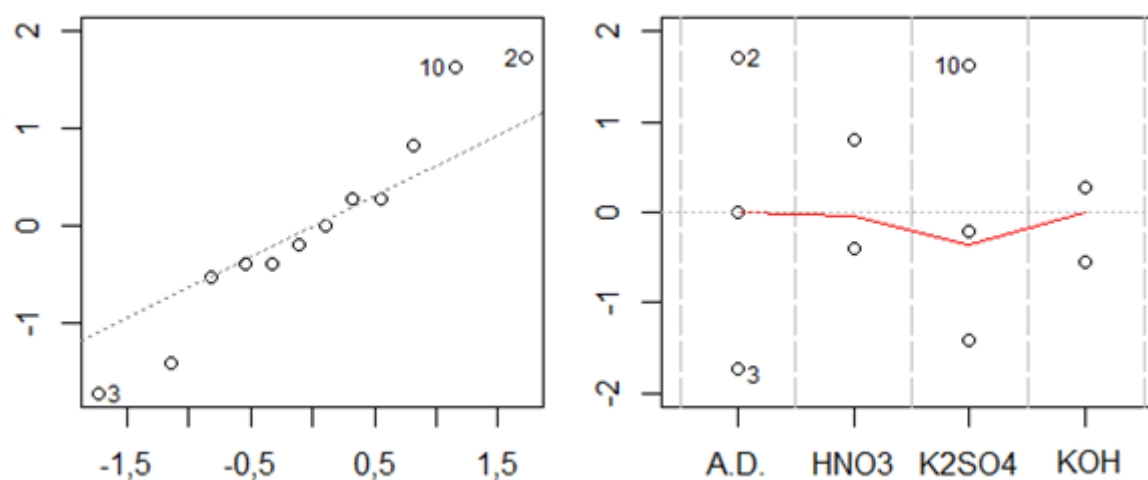
	Df	F Value	Pr (>F)	W	P Value
Grupos:	3	0,8901	0,4867	Resíduos:	0.9543
	8				0.7009

Fonte: Autor, 2019.

Com o valor p igual à 0,4867 do teste de Levene, aceita-se a hipótese de homogeneidade da variância, e para o valor p do teste de Shapiro igual à 0,7009, aceita-se a hipótese de que os dados vêm de uma distribuição normal. Para ambos os testes com nível de significância de 95%.

Além do teste de normalidade, o gráfico dos resíduos versus o quantil da normal é apresentado na Figura 35, onde pode ser observado a linearidade das observações, apresentando graficamente que os dados vêm de uma distribuição normal.

Figura 35 - Gráfico residual versus quantil e resíduos sobre nivelamentos.



Fonte: Autor, 2019.

Dois pontos pertencentes aos corpos de prova padrão em água destilada e uma amostra do meio sulfatado não apresentaram conformidade com o modelo gerado, considerados como pontos fora da curva. Aferidos a validade dos pressupostos, foi aplicado então o teste de análise de variância, sendo os resultados apresentados na Tabela 55.

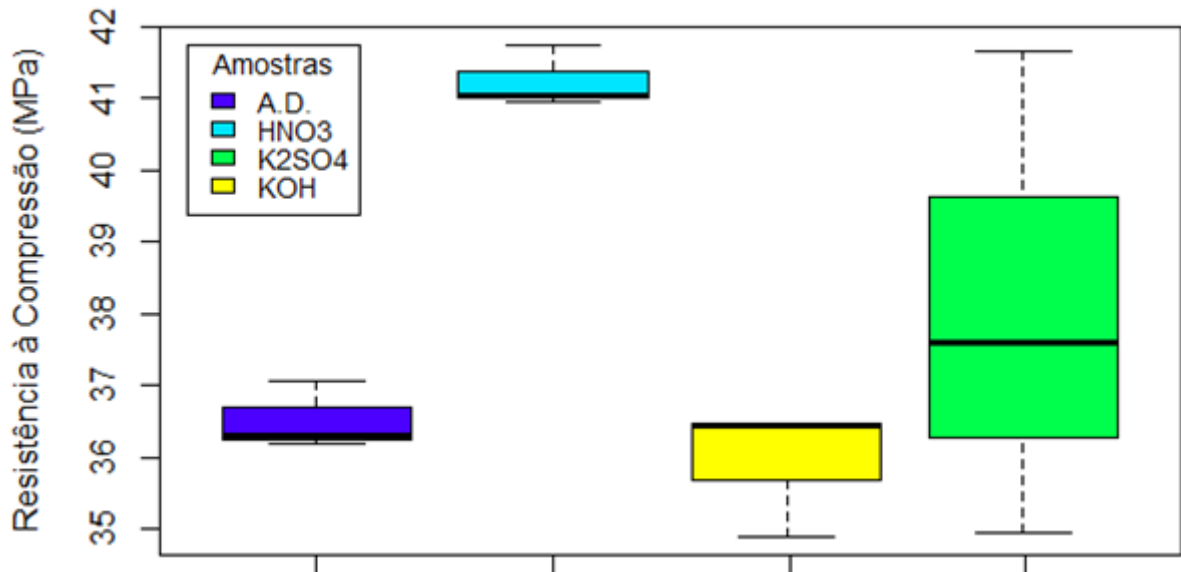
Tabela 55 - Resultado do teste de variância ANOVA para resistência a flexão.

	Df	Sum Sq	Mean square	F Value	Pr (>F)
Fator	3	0,3156	0,1052	0,287	0,834
Residual	8	2,9317	0,3665		

Fonte: Autor, 2019.

Como resultado principal do teste, é possível visualizar que o p valor igual à 0,834, ficou muito acima do valor de 0,05 para significância de 95%. Isso indica que as médias apresentaram variâncias similares, distinguindo esses resultados dos anteriores apresentados nas demais análises. A Figura 36 apresenta a distribuição dos dados de resistência à flexão.

Figura 36 - Representação gráfica resistência à compressão das argamassas.

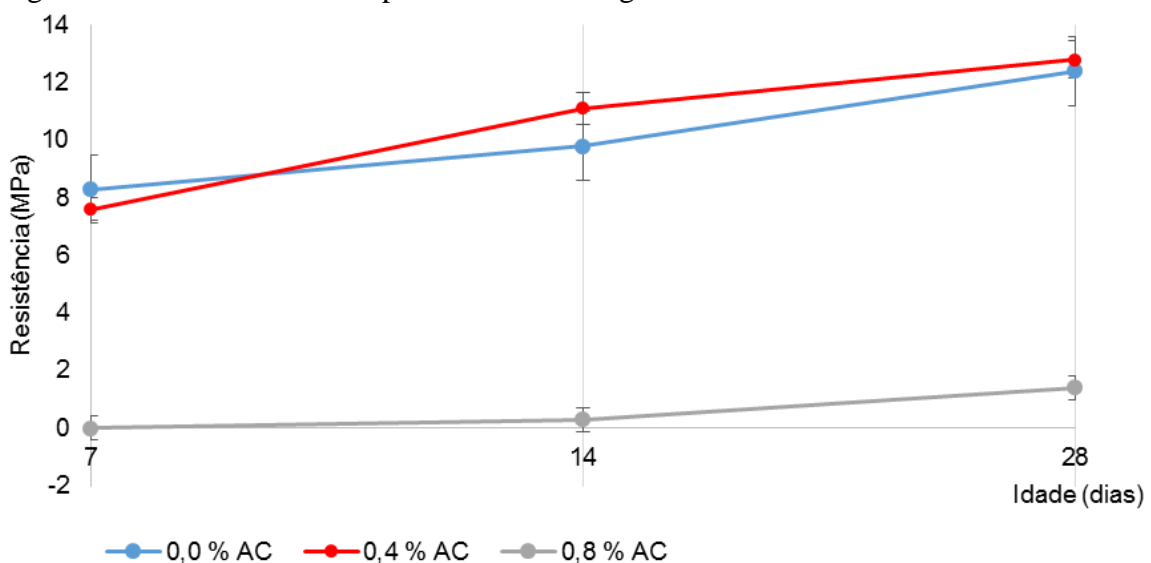


Fonte: Autor, 2019.

Os dados de resistência à compressão apresentaram boa uniformidade, com exceção do meio sulfatado. A média de resistência do meio básico em relação ao padrão se manteve próxima ao padrão, continuando a mesma tendência anterior observada.

Para as tendências de ganho de resistência à compressão dos meios ácidos, Mendes (et al., 2016) apresenta um estudo sobre a influência do ácido cítrico, que demonstra resultados semelhantes. Nessa metodologia foram utilizadas duas dosagens, de 0,4 e 0,8% de ácido em relação ao fator água/cimento, junto ao traço padrão. No primeiro caso houve acréscimo de resistência após os 14 dias, de 11,46% em média, enquanto ao segundo quase não houve ganho de resistência no período analisado. Os dados são apresentados na Figura 37.

Figura 37 - Resistência à compressão axial de argamassas com diferentes teores de AC.



Fonte: Mendes et al., 2016.

Na metodologia utilizada neste trabalho foi utilizado fatores água/cimento diferentes para concretos e argamassas. No primeiro caso, pelo método ABCP, adotou-se 0,58 pelo gráfico da curva de Abrams, e no segundo, pela NBR 13279, o valor de 0,48, ambos com solução de ácido nítrico (HNO_3) à 0,1 molar. Logo, pelos dados apresentados é possível afirmar que a alteração desse parâmetro pode ter produzido comportamento similar neste caso. Outra possível justificativa é baseada na interação das soluções de amassamento com a água de cura do tanque de imersão, provocando reações com alteração dos produtos da reação de hidratação.

Prosseguindo a análise estatística do conjunto, realizou-se o teste de homogeneidade e normalidade segundo Levene e Shapiro, com os resultados apresentado na Tabela 56. Os valores finais dos resultados são apresentados em destaque.

Tabela 56 - Verificação de homocedasticidade e normalidade, resistência à compressão.

	Df	F Value	Pr (>F)		W	P Value
Grupos:	3	2,0114	0,191	Resíduos:	0.8517	0.0385
	8					

Fonte: Autor, 2019.

Com o valor p igual à 0,191 do teste de Levene, aceita-se a hipótese de homogeneidade da variância. Contudo para o valor de p igual à 0,0385 do teste de Shapiro, rejeita-se a hipótese de que os dados vêm de uma distribuição normal, para significância de 95%. Logo, não atendido os pressupostos, não deverá ser procedido com as análises de variâncias (ANOVA).

Analisando o panorama da disposição dos dados de resistência à flexão e compressão, juntamente aos resultados das análises estatísticas, é possível inferir que houve incoerência de parte dos dados, onde a tendência de ganho e perda de resistências se apresentou de forma diferente em comparação aos demais ensaios, refletindo nos teste estatísticos, na não conformidade com a distribuição normal.

Houve diferença também no agregado utilizado em ambos, contudo reações álcalis-agregados são mais comuns a idades posteriores. Dado a certificação da areia normal e os ensaios realizados é pouco provável que a variação observada seja decorrente do mesmo desse aspecto. Sob o aspecto das águas de cura houve uma modificação significativa. Na primeira parte da metodologia os corpos de prova foram imersos na própria solução constituinte, enquanto na segunda todos foram mergulhados na mesma solução saturada de hidróxido de cálcio. Essa diferença pode ter ocasionado reações de interferência.

5.3.6. Ensaios não destrutivos e caracterizações químicas

NBR 8802 – Velocidade de Propagação de Ultrassom

Na Tabela 57 são apresentados os resultados dos ensaios de determinação da velocidade de propagação da onda ultrassônica aos 28 e 92 dias. Em vermelho são destacados os valores com obtidos abaixo de 4.500 m/s. As estimativas de módulo de elasticidade foram obtidas conforme ASTM C597-09. Os corpos de prova em água destilada, são simbolizados pelo prefixo “AD”.

Tabela 57 - Registros individuais do procedimento de ultrassom.

Ident.	Comprimento (mm)	Tempo(μs)		Velocidade (m/s)		Elasticidade (GPa)	
		28 dias	92 dias	28 dias	92 dias	28 dias	92 dias
AD.01	196,00	41,4	40,8	4734,30	4799,57	39,96	41,07
AD.02	196,50	40,9	40,3	4804,40	4881,38	41,15	42,48
AD.03	195,10	42,9	42,5	4547,79	4591,88	36,87	37,59
AD.04	194,25	42,8	42,0	4538,55	4623,02	36,72	38,10
AD.05	195,50	42,1	41,2	4643,71	4742,27	38,45	40,09
AD.06	195,00	42,1	40,7	4631,83	4786,45	38,25	40,85
HNO ₃ .01	199,00	45,1	41,8	4412,42	4760,77	34,71	40,41
HNO ₃ .02	198,30	43,0	42,0	4611,63	4721,43	37,92	39,74
HNO ₃ .03	196,00	42,3	41,6	4633,57	4711,54	38,28	39,58
HNO ₃ .04	196,00	42,7	42,2	4590,16	4644,55	37,56	38,46
HNO ₃ .05	196,00	42,1	42,8	4655,58	4579,44	38,64	37,39
HNO ₃ .06	196,00	43,8	42,1	4474,89	4655,58	35,70	38,64
KOH.01	196,35	41,3	39,9	4754,24	4916,62	40,30	43,10
KOH.02	198,55	42,3	42,3	4693,85	4689,86	39,28	39,21
KOH.03	196,35	42,7	40,0	4598,36	4904,83	37,70	42,89
KOH.04	197,30	41,2	40,9	4788,83	4824,43	40,89	41,50
KOH.05	197,45	42,1	40,4	4690,02	4885,44	39,22	42,55
KOH.06	195,85	41,8	40,5	4685,41	4834,37	39,14	41,67
K ₂ SO ₄ .01	196,60	42,5	42,0	4625,88	4680,95	38,15	39,06
K ₂ SO ₄ .02	196,00	42,9	42,4	4568,76	4622,64	37,21	38,10
K ₂ SO ₄ .03	196,00	43,8	44,0	4474,89	4454,55	35,70	35,38
K ₂ SO ₄ .04	196,40	43,6	42,8	4504,59	4588,79	36,18	37,54
K ₂ SO ₄ .05	196,85	43,5	42,9	4525,29	4588,58	36,51	37,54
K ₂ SO ₄ .06	192,30	43,8	43,2	4390,41	4451,39	34,37	35,33

Fonte: Autor, 2019.

Conforme metodologia disposta na norma BIS 13311-92, Parte 1, apenas 4 amostras, duas do meio ácido (HNO₃.01 e HNO₃.06) e duas do meio sulfatado (K₂SO₄.03 e K₂SO₄.06), foram classificadas como de boa qualidade, sendo todas as demais categorizadas como excelente. Aos 92 dias essa incidência diminuiu pela metade, mantendo-se apenas as incidências do meio sulfatado.

As incidências acima pertenceram aos grupos de ácido nítrico e sulfato de potássio, a idade 28 dias, permanecendo apenas o meio sulfatado aos 92 dias. Os dados acima podem ser correlacionados aos aspectos de segregação discutidos anteriormente, ou possivelmente erros de compactação durante as moldagens.

Comparando os decréscimos das velocidades de 28 a 92 dias, em quase sua totalidade foi observado uma variação média de 2,07%, sendo observado apenas uma incidência no meio sulfatado, que não houve decréscimo. Na Tabela 58 são apresentados os resumos estatísticos descritivos das leituras aos 28 dias, juntamente à média de módulo de elasticidade.

Tabela 58 - Resultados estatísticos descritivo de ultrassom aos 28 dias.

	AD	HNO₃	KOH	K₂SO₄
Média Velocidade (m/s)	4.650,10	4563,04	4701,79	4514,97
Média Elasticidade (GPa)	38,57	37,14	39,42	36,35
Desvio Padrão (m/s)	104,10	97,05	65,57	80,66
C.V. (%)	2,24%	2,13%	1,39%	1,79%

Fonte: Autor, 2019.

A análise da conformidade dos dados, expressa através do coeficiente variacional, indica boa uniformidade dos dados, sendo a melhor amostras nesses termos o meio básico. Analisando as variações entre as médias de velocidades, baseado também na estimativa do módulo de elasticidade, é possível visualizar que as tendências apresentadas foram similares aos dados de compressão axial e tração diametral.

Por se tratar de uma metodologia indireta e a determinação do módulo de elasticidade se tratar de uma estimativa, foi visualizado menores variações de resistência, expresso pelos módulos de elasticidades calculados. Em geral os decréscimos foram de 3,71% e 5,74% para os meios ácidos e sulfatados, respectivamente, proporcional às variações anteriores, onde a interferência foi mais significativa. Quanto a solução de meio básico, hidróxido de potássio, ocorreu um acréscimo na estimativa de módulo da ordem de 2,21%, sendo este bem similar ao incremento observado de 2,60% à mesma idade da resistência à compressão axial. Na Tabela 5.47 são apresentados os resumos estatísticos aos 92 dias, junto ao módulo de elasticidade.

Tabela 5.59 - Resultados estatísticos descritivo de ultrassom aos 92 dias.

	AD	HNO₃	KOH	K₂SO₄
Média Velocidade (m/s)	4737,43	4678,88	4842,59	4564,48
Média Elasticidade (GPa)	38,57	37,14	39,42	36,35
Desvio Padrão (m/s)	86,65	65,10	83,56	92,73
C.V. (%)	1,83%	1,39%	1,73%	2,03%

Fonte: Autor, 2019.

Os coeficientes variacionais foram similares em ambas as idades, próximos a 2%, sendo o menor índice do meio ácido. As mesmas tendências variacionais entre as médias das estimativas do módulo de elasticidade foram acentuadas neste segundo momento. Os decréscimos neste caso foram de 2,48% e 7,18% para os meios ácidos e sulfatados, respectivamente. Para o meio básico, de hidróxido de potássio, houve um aumento de 4,47%.

Aspersão de fenolftaleína a 1%

A Tabela 60 apresenta os registros das colorações observadas após a aspersão de fenolftaleína 1%. Foram adotados apenas os resultados de incolor e rosa. Cada registro foi realizado em triplicata, sendo as primeiras amostras mais externas e as últimas próximas ao centro.

Tabela 60 - Registros das colorações após aspersão de fenolftaleína.

Elemento	Amostra 01	Amostra 02	Amostra 03
Destilada	Rosa	Rosa	Rosa
HNO ₃	Rosa	Rosa	Incolor
KOH	Rosa	Rosa	Rosa
K ₂ SO ₄	Rosa	Incolor	Incolor

Fonte: Autor, 2019.

Concretos e argamassas possuem naturalmente caráter básico, logo não ocorrendo alterações de pH, todas as leituras deveriam apresentar coloração rosa, conforme visualizado no corpo de prova de água destilada e de hidróxido de potássio.

A incidência de registros incolores nos meios ácidos e sulfatados ocorreram mais internamente. Possivelmente a interação da água de cura, que possui caráter básico devido a estar saturada de cal virgem (CaO), em contato com as camadas mais externas, pode ter contribuído para a não manifestação do mesmo aspecto incolor nas camadas mais externas.

Fluorescência de Raios X

Os ensaios de fluorescência foram realizados conforme descrito na metodologia específica. A Tabela 61 apresenta os resultados das medidas de massas percentuais obtidas por meio do procedimento. Ao total, foram encaminhadas ao laboratório quatro amostras, conforme disposto abaixo.

Tabela 61 – Resultados do FRX, percentuais em massa.

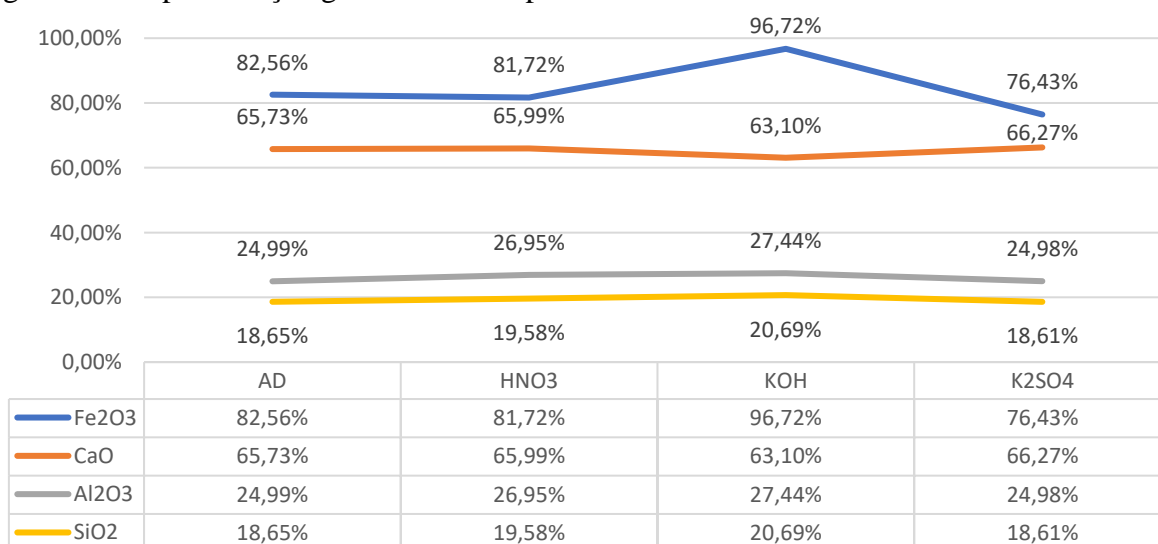
Óxidos	Amostras			
	AD	HNO ₃	KOH	K ₂ SO ₄
Fe ₂ O ₃	82,56%	81,72%	96,72%	76,43%
CaO	65,73%	65,99%	63,10%	66,27%
Al ₂ O ₃	24,99%	26,95%	27,44%	24,98%
SiO ₂	18,65%	19,58%	20,69%	18,61%
SO ₃	15,58%	13,49%	11,44%	17,44%
K ₂ O	13,78%	14,37%	17,58%	15,84%
TiO ₂	10,41%	-	-	10,83%
MnO	0,46%	0,56%	0,47%	0,40%
SrO	0,21%	0,23%	0,18%	0,17%
P ₂ O ₅	0,14%	-	0,17%	-
Cl	0,08%	-	0,07%	-

Fonte: Autor, 2019.

Nos ensaios destrutivos foram separados fragmentos que eram constituídos apenas por argamassa, sem a presença de britas. Óxido de ferro III (Fe₂O₃), óxido de cálcio (CaO) e óxido de alumínio (Al₂O₃) são substâncias predominantemente intrínsecas à composição do cimento Portland. Já o dióxido de silício (SiO₂), possui contribuição percentual proveniente tanto do aglomerante, decorrentes dos silicatos cálcicos, quanto do agregado, por origem natural.

Na Figura 38 é apresentado graficamente as variações entre os quatro componentes principais citados.

Figura 38 - Representação gráfica dos componentes cimentícios.



Fonte: Autor, 2019.

Óxido de ferro III (Fe₂O₃) é um composto do cimento Portland associado ao Ferro-Aluminato Tetracálcico (4CaO.Al₂O₃.Fe₂O₃ ou C₄AF) e nas adições de escórias de alto forno presente no cimento utilizado. Segundo Souza e Ripper (1998), essa substância não possui

maiores contribuições para a resistência do concreto, contudo segundo Castro (2017) a presença desse elemento é correlacionada diretamente à resistividade eletroquímica do concreto. Logo, concretos e argamassas com maiores concentrações desse óxido terão menores tendências a patologias correlacionada ao potencial eletroquímico das estruturas. Analisando os percentuais obtidos para este óxido, é possível perceber um acréscimo significativo de 14,15% no meio básico, e decréscimos de 0,84% e 6,13% para os meios ácidos e sulfatados, respectivamente. Tendência similar às variações das resistências internas apresentadas.

Óxido de cálcio (CaO) é uma das matérias primas de fabricação do cimento Portland. Atua como controlador de pega do cimento, quando incorporado ao processo de fabricação do clínquer. Após a reação de hidratação, quando disposto de forma livre é interpretado como problema de fabricação ou do processo de hidratação, indesejável por possuir reação expansiva. Analisando os percentuais deste elemento é possível perceber uma tendência constante a todos, com decréscimos para o meio básico. Esse comportamento pode ser correlacionado ao aumento do percentual total de potássio devido à solução substituinte (KOH), com tendência similar para o meio sulfatado, onde a presença dos sulfatos dissociados contribuiu para o incremento da contagem do trióxido de enxofre (SO₃).

Por último, analisando os resultados para o trióxido de alumínio (Al₂O₃ ou Aluminatos) e dióxido de silício (SiO₂ ou Silicatos) é possível ver que todas as amostras obtiveram sem maiores significâncias, com atenção para o meio básico de hidróxido de potássio que obteve os maiores resultados, indicando uma melhor fixação nos elementos após o estado endurecido. Os demais resultados são relativos aos elementos secundários segundo classificação de Ripper (1998, apud Souza, 1948), uma vez que o monóxido de potássio (K₂O), dióxido de titânio (TiO₂), dentre outros, não possuem conhecidas relações diretas com resistências das peças, apenas com contribuições quanto à expansibilidade e rápida solubilidade em água.

6. CONCLUSÃO

Avaliando as metodologias utilizadas e os resultados apresentados, foi visualizado a efetividade em correlacionar os vários tipos de dados obtidos, qualitativos e quantitativos, com as tendências e comportamentos em ambos os métodos, nos diferentes meios químicos.

6.1. Considerações finais

A metodologia de argamassas não normatizada se mostrou eficiente em replicar os comportamentos e variações observados nos elementos normatizados, viabilizando assim a utilização dessa metodologia em análises similares posteriores, para estimar variações das resistências internas.

O modelo de análise estatística adotado se mostrou eficaz em evidenciar as alterações de comportamento entre as amostras analisadas, principalmente na metodologia normatizada de argamassas, onde pôde ser evidenciando a não conformidade de parte dos resultados até para a realização do teste de análise de variância.

Os materiais utilizados apresentaram boa qualidade e o processo de dosagem e moldagem foi bem-sucedido, sendo ambos resumidos no ensaio de ultrassom, onde a maioria dos elementos obteve classificação excelente e boa, sendo esse segundo decorrente de interferências destrutivas das soluções ácidas e sulfatadas.

Os ensaios não destrutivos, principalmente de determinação da velocidade do pulso ultrassônico, foram efetivos em demonstrar as mesmas tendências e comportamentos dos resultados de resistência direta. Contudo analisando a relação entre os coeficientes variacionais é possível perceber que a metodologia não foi eficaz em estimar precisamente as variações de resistência, sendo observados elevada disparidade.

Relativo às interferências das águas de amassamento utilizadas é possível concluir:

- O pH da água de amassamento possui influência direta tanto nas resistências de elementos de cimento Portland, com acréscimos e decréscimos, alterando também o formato das curvas característica de ganho de resistência. Nesta conclusão deve ser levado em conta o tipo de elemento químico utilizado para alteração do potencial, com influência também do fator água/cimento.
- O meio ácido apresentou retardamento do ganho de resistência, visível nos valores de resistências internas, à compressão e tração, e no formato das curvas geradas.

- Os elementos do meio básico, com soluções de hidróxido de potássio (KOH), apresentaram os melhores resultados em quase todas as análises executadas. Seus coeficientes variacionais foram os menores, indicando melhor uniformidade, com melhor trabalhabilidade, verificado pelo Slump Test. Houve incremento nas resistências observadas de até 25,71%, na velocidade do pulso ultrassônico de 2,20%, sem variações nas aspersões de fenolftaleína. No resultado de fluorescência de Raio X (FRX), também foi possível visualizar uma maior fixação do óxido de ferro III, conferindo ao mesmo uma maior resistividade elétrica, dentre outras variações.

6.2. Limitações e sugestões de trabalhos futuros

Durante o desenvolvimento do trabalho foi observado pontos de limitação que poderiam ser contemplados em trabalhos futuros, resumidos nos seguintes pontos:

- Verificação da influência do tipo de cimento, utilizando outros como CP II Z, CP II F e CP V, para analisar a influência dos aditivos nos resultados apresentados;
- Aplicação dessa metodologia com o uso de agregados não naturais, ou derivados de resíduo da construção civil (RCD);
- Verificação da durabilidade através de ensaios como percolação de cloretos, teste de carbonatação e reações álcalis-agregados, para averiguar a suscetibilidade a patologias

Frente aos resultados favoráveis apresentados para as soluções de meio básico, sugere-se também a investigação da durabilidade e variações da concentração da solução de amassamento para a determinação do ponto máximo de variação da resistência. Deverá ser investigado também as variações decorrentes do fator água/cimento.

Os resultados obtidos nos ensaios de argamassas deverão ser replicados com a cura sendo por imersão na mesma solução de amassamento, para investigação da influência da solução de cura na resistência final para esses casos.

6.3. Contribuições em artigos e periódicos

Partes do presente trabalho contribuíram para a elaboração de artigos científicos, sob diferentes óticas de estudo, sendo elencados abaixo.

- 2º Simpósio Internacional de Educação em Engenharia da ABENGE e 47º Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia (XLVII COBENGE)

Título: Análise da interferência de Variações de pH e diferentes cloretos e sulfatos em corpos de prova de Argamassa Não Normatizados.

- 23º Congresso de Engenharia e Ciência dos Materiais (23ºCBECIMAT)

Título: Análise de agentes químicos em Composições de Concretos e Argamassas.

- 2º Simpósio Brasileiro sobre Reabilitação das Construções (II SBREB)

Título: Análise estatística comparativa entre métodos de determinação da resistência à compressão de Concretos por Rompimento Axial e Estimativa Ultrassônica

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11579: 2012 Versão Corrigida**: Cimento — Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm (nº 200). Rio de Janeiro: ABNT, 2013. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13279**: Argamassa para assentamento e revestimento - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 2005. 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14656**: Cimento Portland e matérias-primas - Análise química por espectrometria de raios X - Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2001. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16605**: Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2017. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16606**: Cimento Portland — Determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro: ABNT, 2018. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16607**: Cimento Portland — Determinação dos tempos de pega. Rio de Janeiro: ABNT, 2018. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697**: Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018. 12 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738:2015 Versão Corrigida**: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2016. 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018. 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118:2014 Versão Corrigida**: Projeto de estruturas de concreto — Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014. 238 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6120:2019 Versão Corrigida**: Ações para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 2019. 61 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211:2009 Versão Corrigida**: Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2019. 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7212**: Execução de concreto dosado em central — Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2012. 16 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7214**: Areia normal para ensaio de cimento - Especificações. Rio de Janeiro: ABNT, 2015. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2019. 12 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222**: Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2011. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8802**: Concreto endurecido - Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro: ABNT, 2019. 11 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2003. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 26**: Agregados - Amostragem. Rio de Janeiro: ABNT, 2009. 10 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 27**: Agregados - Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório. Rio de Janeiro: ABNT, 2001. 7 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 45**: Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro: ABNT, 2006. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 49:2001 Versão Corrigida**: Agregado miúdo - Determinação de impurezas orgânicas. Rio de Janeiro: ABNT, 2001. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52**: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro: ABNT, 2009. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 53**: Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2009. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67**: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro: ABNT, 1998. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM ISO 3310-1**: Peneiras de ensaio - Requisitos técnicos e verificação Parte 1: Peneiras de ensaio com tela de tecido metálico (ISO 3310-1, IDT). Rio de Janeiro: ABNT, 2010. 20 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM ISO 3310-2**: Peneiras de ensaio - Requisitos técnicos e verificação Parte 2: Peneiras de ensaio de chapa metálica perfurada (ISO 3310-2:1999, IDT). Rio de Janeiro: ABNT, 2010. 13 p.

ABRAMS, Duff A.. **Effect os Fineness of Cement**. Chicago: Structural Materials Research Laboratory, 1922. 86 p.

ALABURDA, Janete; NISHIHARA, Linda. **Presença de compostos de nitrogênio em águas de poços**. Revista de Saúde Pública, São Paulo, Sp., v. 32, n. 2, p.531-537, abr. 1997.

ALVES, José Dafico. **Manual de Tecnologia do Concreto**. 3. ed. Goiânia, GO. UFG, 1993.

ALVES, Rogério. **Resistência Mecânica de Concreto de Cimento Portland: Correlação de Ensaio à Compressão Axil com Esclerometria**. 2017. 100 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Centro Universitário Univates, Lajeado, 2017.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 214R-11**: Guide to Evaluation of Strength Test Results of Concrete. Farmington Hills: Aci, 2002.

AMERICAN STANDART TESTING AND MATERIALS. **ASTM C150M-19A**: Standard Specification for Portland Cement. 04.01 ed. West Conshohocken: Astm, 2019.

AMERICAN STANDART TESTING AND MATERIALS. **ASTM C597-16**: Standard Test Method for Pulse velocity Through Concrete. 04.02 ed. West Conshohocken: Astm, 2016.

BALLARIN, Adriano Wagner. Argamassa armada: tecnologia e aplicações no meio rural. In: FREIRE, Wesley Jorge (Org.). **Tecnologias e Materiais Alternativos de Construção**. São Paulo: Editora da Unicamp, 2003.

BASILIO, E.Santos. **Agregados para concreto ET 41**, ABCP 1995.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS EN 206:2013+A1:2016**: Concrete. Specification, performance, production and conformity. Londres: British Standards Institution, 2013.

BRUKER – **Fluorescência de raios X (XFR)**. Disponível em: <<https://www.bruker.com/>>. Acesso em: 19 maio. 2017.

BUREAU OF INDIAN STANDARDS. **IS 13311 (PART 1): 1992**: Non-Destructive Testing of Concrete - Methods of Test. New Delhi: Bis, 1992.

CASTRO, Beatriz Fernandes de. **Estudo da influência de pigmento de óxido de ferro nas propriedades da camada intermediária de um revestimento orgânico e na proteção contra a corrosão**. 2017. 80 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Desenvolvimento de Tecnologia, Institutos Lactec, Curitiba, Pr, 2017.

DANTAS, Alexon Braga. **Caracterização química e física de solos urbanos de Palmas e da corrosividade destes para o aço API 5L X70**. 2019. 106 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciências na área de Tecnologia Nuclear - Materiais, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2019.

DANTAS, Francisco de Assis Souza. Agregados leves e concretos alternativos. In: FREIRE, Wesley Jorge (Org.). **Tecnologias e Materiais Alternativos de Construção**. São Paulo: Editora da Unicamp, 2003.

EVANGELISTA, Ana Catarina Jorge. **Avaliação da Resistência do Concreto Usando Diferentes Ensaios Não Destrutivos**. 2002. 219 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro Coppe, Rio de Janeiro, 2002.

FERREIRA, Gercindo. **Estudo Sobre Fatores Influentes nos Resultados de Ensaios Não Destrutivos em Concreto Endurecido**. 2011. 198 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2011.

FERREIRA, Ramon Fonseca. **Avaliação da técnica de inspeção por ultrassom phased array em juntas soldadas de aço inoxidável AISI 304L**. 2013. 86 f. Dissertação – Curso de Engenharia Mecânica, CEFET/RJ, 2013.

GOMES, Augusto; PINTO, Ana Paula Ferreira; PINTO, João Bessa. **Cimento Portland e Adições**. Lisboa: Instituto Superior Técnico, 2013.

GUÉNOT-DELAHAIE, I. **Contribution à l'analyse physique et à la modélisation du fluage propre du béton**. 1996. These de doctorat de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, França, 1996.

HELENE, Paulo; ANDRADE, Tibério. Concreto de Cimento Portland. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciências e Engenharia dos Materiais**, p.905-944, IBRACON, 2010.

JOFFILY, Irene de Azevedo Lima. **Avaliação do Ensaio de Penetração de Pino para Mensuração Indireta da Resistência à Compressão do Concreto**. 2010. 139 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, 2010.

KUTNER, M. H., NACHTSHEIM, C. J., & NETER, J. (2004). **Applied linear regression models** (4th ed.). New York: McGraw-Hill Irwin.

LARANJEIRAS, Antonio C. R.. **Normas ASTM para os Cimentos Americanos**. Salvador, 2011.

LEVENE, H. (1960). **Robust testes for equality of variances**. In Contributions to Probability and Statistics (I. Olkin, ed.)278–292. Stanford Univ. Press, Palo Alto, CA.

MAGALHÃES, Fábio Costa. **Estudo Probabilísticos da Resistência à Compressão e da Resistência a Tração na Flexão dos Concretos Utilizados na Construção do Dique Seco do Estaleiro Rio Grande, no Superporto, em Rio Grande - RS**. 2009. 181 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Oceânica, Fundação Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 2009.

MAGALHÃES, Fábio Costa. **Materiais Componentes do Concreto: Especificações e Ensaios**. Rio Grande: Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul, 2009. 57 p.

MALHOTRA, V. M.; CARINO, J. N. **Handbook of nondestructive testing of concrete**. 2. ed. CRC Press, 2004.

MANJUNATH, R. P. D. R. **Review of Nondestructive Evaluation Techniques for Composite Structural Components**. 2007. 235p. Dissertação (Mestrado) – Virginia University, Morgantow, EUA, 2007.

MENDES, B. C. et al. Influência do Ácido Cítrico como Retardador de Pega em Pastas e Argamassas de Cimento Portland CPV ARI. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 22., 2016, Natal. **Anais...** Natal: CBECIMAT, 2016. p. 1803 - 1813.

METHA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 1.ed. São Paulo: Pini, 1994. 573 p.

METHA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 2. ed. São Paulo: Pini, 2014.

MINISTÉRIO DA SAÚDE. Constituição (1990). Portaria nº 36, de 19 de janeiro de 1990. Brasília, DF.

NELSON, J. D. et al. **Foundation engineering for expansive soils**. 1. ed. New Jersey, EUA: John Wiley & Sons, 2015. 416 p.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 2. ed. São Paulo Bookman Editora Ltda, 1997.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 5. ed. São Paulo: Bookman Editora Ltda, 2016.

NEWMAN, k. The use of workability test for concrete mix design and quality control. London: Imperial College of Science and Technology, 1960. (Research Report n.6)

OLIVEIRA, Daniel Ferreira. **Levantamento de Causas de Patologias na Construção Civil**. 2013. 107 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

PARROT, L. J.; GEIKER, M.; GUTTERIDGE, W. A.; KILLOH, D. Monitoring Portland cement hydration: comparison of methods. *Cement and Concrete Research*, v. 20, p. 919-926, 1990.

PIRATOBA, Alba Rocio Aguilar et al. Caracterização de parâmetros de qualidade da água na área portuária de Barcarena, PA, Brasil. **Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal Of Applied Science**, Taubaté, v. 12, n. 3, p.435-456, 03 mar. 2017.

PORTO ALEGRE. Ufrgs. Instituto de Geociências da Ufrgs. **Geoquímica - Fluorescência de Raios X e Difração de Raios X**. 2017. Disponível em: <<https://www.ufrgs.br/geoquimica/frx-2/>>. Acesso em: 04 out. 2017.

POURBAIX, M. **Atlas of Electrochemical Equilibria in Aqueous Solutions**. Houston, NACE, 1974. p.63-70.

PRADO, Eliane Leão. **Água Destinada ao Consumo Humano: Riscos Para a Saúde Humana Resultantes da Exposição a Sulfatos**. São Paulo: Grupo Técnico Regional, 2011.

R Development Core Team. **R: A language and environment for statistical computing**. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2011.

ROMANO, R.C.O. et al. Acompanhamento da hidratação de cimento Portland simples com resíduo de bauxita. **Cerâmica**, São Paulo, v. 62, n. 363, p.215-223, jul. 2016.

SEFFF, L.; FOLGUEIRAS, M. V.; HOTZA, D.. Hidratação do Cimento CP V ARI - RS: Influência da Água nas reações de Hidratação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 49., 2005, São Pedro. **Anais...** . São Pedro: CBC, 2005. p. 1 – 12.

SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B.. An Analysis of Variance Test for Normality (Complete Samples). **Biometrika**, Great Britain, v. 52, n. 3/4, p.591-611, dez. 1965. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/2333709?seq=1#page_scan_tab_contents>. Acesso em: 13 out. 2019.

SILVA, Leandro Melo Andrade e. **Resistividade Elétrica Superficial do Concreto: Influência da Cura**. 2016. 68 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Escola de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2016.

SOBRAL, Hernani Sávio. **Estudo Técnico: Propriedades do Concreto Fresco**. 6. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Cimento Portland, 2000. 32 p.

SOUZA, V. C.; RIPPER, T. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. São Paulo: Pini, 1998. 255 p.

SOUZA, Vicente Custódio Moreira de; RIPPER, Thomaz. **Patologia, Recuperação e Reforço de Estruturas de Concreto**. São Paulo: Pini Ltda., 2009.

TAYLOR, H. J. W. **Cement Chemistry**. 2. ed. Londres: Academic Press, 1997.

WALPOLE, Ronald E. et. al. Probabilidade e estatística para engenharia e ciências. Tradução Luciane F. Pauleti Vianna. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009.