

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Guilherme Cunha Guignone

**DESEMPENHO DE CONCRETOS COM A UTILIZAÇÃO DE
RESÍDUOS DA LAPIDAÇÃO DO VIDRO COMO
SUBSTITUTOS PARCIAIS AO CIMENTO**

Vitória
2017

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Guilherme Cunha Guignone

**DESEMPENHO DE CONCRETOS COM A UTILIZAÇÃO DE
RESÍDUOS DA LAPIDAÇÃO DO VIDRO COMO
SUBSTITUTOS PARCIAIS AO CIMENTO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, na área de concentração Construção Civil.

Vitória
2017

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

**DESEMPENHO DE CONCRETOS COM A UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS
DA LAPIDAÇÃO DO VIDRO COMO SUBSTITUTOS PARCIAIS AO
CIMENTO**

Guilherme Cunha Guignone

Dissertação apresentada ao curso de Mestrado em Engenharia Civil do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de Construção Civil

Aprovado no dia _____ por:

Profa. Dr^a. Geilma Lima Vieira
Doutora em Engenharia Civil
Orientadora - UFES

Prof. Dr^a. Jamilla Emi Sudo Lutf Teixeira
Doutora em Engenharia Civil
Membro Interno - UFES

Profa. Dra. Claudia Rodrigues Teles
Doutora em Engenharia Ambiental
Membro Externo – UFES

Vitória – ES, setembro de 2017

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Biblioteca Central da Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

G951d Guignone, Guilherme Cunha, 1984-
Desempenho de concretos com a utilização de resíduos da lapidação do vidro como substitutos parciais ao cimento / Guilherme Cunha Guignone. – 2017.
286 f. : il.

Orientador: Geilma Lima Vieira.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Resíduos de vidro. 2. Durabilidade (Engenharia). 3. Cloretos – Corrosão. 4. Reações químicas. I. Vieira, Geilma Lima. II. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. III. Título.

CDU: 624

AGRADECIMENTOS

À professora Geilma Vieira, pela orientação e pelo incentivo à pesquisa durante toda a minha caminhada como pesquisador. Foi de fundamental importância para a concepção e conclusão desta pesquisa e, com certeza, de outras ainda que estão por vir.

Ao professor João Luiz Calmon, pelos ensinamentos e contribuições à organização e levantamento do estudo bibliográfico da pesquisa. É inspirador absorver a sua motivação pela pesquisa.

À professora Cláudia Rodrigues Teles, pelos ensinamentos, conselhos e disponibilidade para conversar e planejar possibilidades de obtenções de materiais e equipamentos para pesquisa.

À professora Jamilla, pelos conhecimentos, disponibilidade para pesquisas e interesse pelos meus trabalhos em desenvolvimento.

Aos professores do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil do Centro Tecnológico da UFES, pelos ensinamentos ao longo de todo o curso de mestrado.

Aos colaboradores do Laboratório de Materiais de Construção do Centro Tecnológico da UFES. Destaco aqueles que pela sua dedicação e companherismo guardarei sempre lembranças e agradecimentos, Henrique, Marcio, Loriato e Felipe. Esta equipe foi de fundamental importância para a execução de meus projetos experimentais.

Aos meus queridos amigos pesquisadores, Sergio, Max, Gercyr, Priscila, Gustavo e Julia. Agradeço pela motivação, risadas e discussões acerca da elaboração dos procedimentos experimentais e elaboração dos artigos. Levarei comigo como importante legado ter conhecido estas pessoas admiráveis.

Aos meus pais, Rosana e Heriberto, pelo incentivo e pela ajuda em todos os momentos.

À minha vó Leopoldina, pelo carinho e pela presença em todos os momentos importantes de minha vida.

As empresas Holcim, Viminis e Metacaulim do Brasil pelo fornecimento dos materiais necessários ao procedimento experimental desta pesquisa.

À Infraero por me incentivar no desenvolvimento das atividades do mestrado de maneira conciliada com as atividades do trabalho, nas pessoas de Simone Wally, Heuriê Marcelo e Giuliano Capucho.

À UFES pela estrutura disponibilizada.

Finalmente, a todos que de uma maneira ou de outra, contribuíram ao longo desta caminhada.

RESUMO

GUIGNONE, Guilherme Cunha. **DESEMPENHO DE CONCRETOS COM A UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DA LAPIDAÇÃO DO VIDRO COMO SUBSTITUTOS PARCIAIS AO CIMENTO**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2017.

O desempenho das estruturas de concreto está relacionado com a conservação das propriedades mecânicas e propriedades vinculadas com a durabilidade. No que tange à durabilidade, identificam-se os íons cloreto como um dos principais agentes responsáveis pela redução da vida útil das estruturas de concreto armado, pois ao ingressar no interior das estruturas, são capazes de despassivar a armadura ocasionando corrosão, comprometendo a capacidade de carga. Uma importante solução para mitigar o ingresso destes agentes agressivos é a utilização de sistemas compostos por cimento Portland e pozolanas, capazes de interagir com os compostos do cimento melhorando o seu desempenho. Neste contexto, pesquisas têm identificado avanços com relação à utilização de resíduos de vidro em matrizes cimentícias, favorecendo destinação sustentável para o resíduo e redução do consumo de cimento, em função de sua substituição parcial. Constatam-se benefícios com relação às propriedades mecânicas e aquelas relacionadas com a durabilidade, entretanto tem-se observado, em alguns casos, suscetibilidade a processos expansivos relacionados à reação álcali-sílica, podendo ser atenuada com a utilização conjunta de outros materiais suplementares, como por exemplo o metacaulim. O objetivo deste trabalho é avaliar o desempenho de concretos produzidos com resíduos da lapidação do vidro. Para a produção dos concretos, utilizou-se como substituição parcial ao cimento, resíduo de vidro com e sem moagem e metacaulim. Foram realizados ensaios de penetração de cloretos (ASTM C 1202), difusão por imersão (NT Build 443), migração em regime estacionário (UNE 83987) e não estacionário (NT Build 492), além da análise da ocorrência de reação álcali-sílica pelo método ASTM C 1260. Os resultados demonstraram que os resíduos da lapidação do vidro, utilizados em substituição ao cimento em até 20%, quando moídos em dimensões de partículas adequadas, podem melhorar o desempenho de concretos, beneficiando os aspectos mecânicos, elevando de modo significativo a resistência aos íons cloretos e ainda mitigar reações álcali-sílica.

Palavras-chave: Resíduos de vidro, durabilidade, penetração de cloretos, reações álcali-sílica.

ABSTRACT

GUIGNONE, Guilherme Cunha. **PERFORMANCE OF CONCRETES WITH THE USE OF WASTE FROM THE GLASS LAPIDATION AS PARTIAL SUBSTITUTES TO THE CEMENT.** 2017. Dissertation (Master in Civil Engineering) - Graduate Program in Civil Engineering, Federal University of Espírito Santo, Vitória, 2017.

The performance of concrete structures is related to the conservation of mechanical properties and properties related to durability. Regarding durability, chloride ions are identified as one of the main agents responsible for reducing the useful life of reinforced concrete structures, because when entering in the interior of the structures, they are able to release the armor causing corrosion, compromising the capacity of charge. An important solution to mitigate the entry of these aggressive agents is the use of systems composed of Portland cement and pozolanas, capable of interacting with the cement compounds, improving their performance. In this context, researches have identified advances in the use of glass residues in cement matrices, favoring sustainable destination for this waste and reducing the consumption of cement, due to its partial replacement. There are benefits related to mechanical properties and those related to durability, however, in some cases, susceptibility to expansive processes related to the alkali-silica reaction has been observed, and can be attenuated with the use of other supplementary materials, such as for example metakaolin. The objective of this work is to evaluate the performance of concrete produced with glass stonework residues. For the production of the concretes, it was used as partial replacement to the cement, waste glass with and without grinding and metakaolin. In addition to the mechanical tests, chloride diffusion tests (NT Build 443), chloride migration tests in stationary conditions (UNE 83987), chloride migration tests in non-stationary conditions (NT Build 492) and analysis of the occurrence of alkali-silica reaction by the Method ASTM C 1260 were performed. The results showed that glass-lapping residues, used in substitution of cement up to 20%, when milled in suitable particle sizes, can improve concrete performance, benefiting mechanical aspects, significantly increasing Resistance to chloride ions and to mitigate alkali-silica reactions.

Keywords: Glass residues, durability, chloride penetration, alkali-silica reactions.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Participação dos principais materiais no total de RSU (resíduo sólido urbano) coletado no Brasil em 2012.....	37
Figura 2. Resistência à compressão aos 28 (a) e 91 (b) dias	44
Figura 3. Permeabilidade rápida a cloretos (ASMT C 1202).....	44
Figura 5. Ganho de resistência com vidro moído.....	45
Figura 6. Expansão devida à reação álcali-sílica.....	46
Figura 7. Expansão devida à reação álcali-sílica após 14 dias em 1N NaOH.....	46
Figura 8. Coeficiente de difusão de cloretos	47
Figura 9. Resistência à compressão aos 90 dias	48
Figura 10. Agregado miúdo com utilização de vidro de cristal líquido.....	49
Figura 11. Resistência à compressão.....	50
Figura 12. Carga passante total	50
Figura 13. Coeficiente de difusão regime não estacionário	51
Figura 14. Penetração de cloretos, migração iônica e condutividade	53
Figura 15. Resistência à compressão.....	54
Figura 16. Projeto Piloto: Estimativa de vida útil - concretos com período de cura de 28 dias	68
Figura 17. Projeto Piloto: Estimativa de vida útil - concretos com período de cura de 91 dias	68
Figura 18. Tipos de vida útil.....	70
Figura 19. Relações existentes entre os conceitos de durabilidade do concreto e desempenho das estruturas	71
Figura 20. Formas de penetração dos íons cloreto no concreto	75
Figura 21. Tipos de corrosão de uma barra de aço imersa em meio concreto	77
Figura 22. Representação esquemática da corrosão por pite.....	78
Figura 23. Formação de semipilha em meio de concreto armado.....	79
Figura 24. Célula de corrosão em meio de concreto armado	79
Figura 25. Formas de penetração dos íons cloreto no concreto	80
Figura 26. Esquema de regimes e coeficiente de difusão de cloreto.....	82

Figura 27. Esquema de teste AASHTO T259	85
Figura 28. Perfil de concentração de cloretos	87
Figura 29. Esquema de teste NT Build 443 (Bulk Diffusion Test).....	88
Figura 30. Amostras rompidas após ensaio de difusão por imersão, concretos contendo metacaulim.....	88
Figura 31. (a) Retirada de amostras em concreto (b) Limitador de profundidade necessário para obtenção das amostras em profundidades progressivas.....	89
Figura 32. Resultados de perfis de concentração de cloretos (0%, 4%, 8% e 12% de metacaulim em substituição ao cimento).....	89
Figura 33. Representação do ensaio de penetração acelerada de cloretos – A- Perspectiva explodida da célula – B-Aparato do ensaio montado.	90
Figura 34. Serragem dos corpos de prova	92
Figura 35. Condicionamento dos corpos de prova e montagem de aparato.....	92
Figura 36. Ensaio ASTM C 1202 – Ensaio de penetração de cloretos (permeabilidade rápida de cloretos)	92
Figura 37. Representação UNE 83987 – Ensaio multiregime.....	93
Figura 38. Representação UNE 83987 – Ensaio multi-regime - execução	94
Figura 39. Identificação de estados estacionário e não estacionário, ensaio Multi- regime (etapa 1: estado não estacionário; etapa 2: estado estacionário e etapa 3: término de período estacionário	94
Figura 40. Execução de ensaio multi-regime	95
Figura 41. Resultado ensaio multi-regime (concretos a/ag 0,55 e cimento CPIII 40 RS).....	95
Figura 42. Identificação do estado estacionário	96
Figura 43. Identificação do estado não estacionário	96
Figura 44. Procedimento adotado no ensaio de penetração de cloretos. (a – corpo de prova, b – serragem de corpos de prova, c – selagem das faces laterais, d – saturação, e – montagem das células, f – aspersão de AgNO ₃).....	97
Figura 45. Rompimento das amostras para aspersão de AgNO ₃	98

Figura 46. Amostras após a realização de aspersão de AgNO_3 - 0,1M (identificação: a – REF, b – ME4 (metacaulim 4%) , c – ME8 (metacaulim 8%) e d – ME12 (metacaulim 12%)).....	98
Figura 47. Sistema de medição em amostra de concreto, conforme NT Build....	98
Figura 48. (a) Amostra em cinta de borracha (b) Procedimento de vedação com silicone.....	100
Figura 49. Utilização de braçadeira.....	100
Figura 50. Fixação de eletrodutos	101
Figura 51. Aparato montado.....	101
Figura 52. Identificação de elementos de ensaio NT Build 492	101
Figura 53. Representação de ensaio rápido de migração	102
Figura 54. Ilustração da medida de profundidade de penetração de cloretos	102
Figura 55. Aspersão de AgNO_3 e sistema de medição.....	102
Figura 56. Perspectiva explodida de aparato experimental NT Build 492.....	103
Figura 57. Programa experimental	107
Figura 58. Estruturação dos ensaios realizados.....	108
Figura 59. Planejamento dos corpos de prova.....	111
Figura 60. Identificação de amostras para ensaios ASTM C 1202	112
Figura 61. Moldagem de corpos de prova para o ensaio de dosagem IPT.....	114
Figura 62. Representação do programa experimental	5
Figura 63. Distribuição granulométrica do agregado miúdo.....	120
Figura 64. Distribuição granulométrica do agregado graúdo.....	121
Figura 65. Curva granulométrica do resíduo de vidro.....	124
Figura 66. Curva granulométrica do resíduo de vidro, cimento e metacaulim. .	124
Figura 67. Retido acumulado do resíduo de vidro, cimento e metacaulim.	125
Figura 68. Moinho de bolas.....	127
Figura 69. Moagem do resíduo de vidro	128
Figura 70. Diâmetro das partículas de metacaulim	129
Figura 71. Fluxograma do processo de obtenção do resíduo utilizado neste estudo	130

Figura 72. Panos de vidros que passam por processo de lapidação e detalhe de ponto de captação de água residual	130
Figura 73. Água residual bombeada até o silo	131
Figura 74. Filtro de decantação de resíduos e o transbordo de água limpa.....	131
Figura 75. Resíduo proveniente do silo de decantação depositado no tanque agitador, para evitar ressecamento da lama.....	132
Figura 76. Armazenamento do resíduo final	132
Figura 77. Resíduo recolhido e submetido a secagem natural	133
Figura 78. Secagem do resíduo em estufa.....	134
Figura 79. Destorroamento do resíduo de vidro - detalhe.....	134
Figura 80. Aparelho para ensaio de granulometria à laser	135
Figura 81. Ensaio de massa específica do resíduo de vidro	136
Figura 82. Ensaio de finura do resíduo de vidro	136
Figura 83. Execução de ensaio no LEMAC	138
Figura 84. Execução de ensaio IAP cal.....	139
Figura 85. Execução de ensaio IAP cimento.....	140
Figura 86. Diagrama de dosagem obtido a partir do método IPT/USP.....	141
Figura 87. Ensaio de resistência à compressão	142
Figura 88. Preparação das amostras	143
Figura 89. Montagem do aparato de migração de cloretos	144
Figura 90. Execução de ensaio de migração de cloretos.....	144
Figura 91. Leituras do ensaio de migração de cloretos	145
Figura 92. Corte das amostras	146
Figura 93. Ensaio ASTM C 1202 em execução	147
Figura 94. Representação do ensaio ASTM C 1202	147
Figura 95. Saturação das amostras com hidróxido de cálcio	148
Figura 96. Ensaio NT BUILD 492 em execução	149
Figura 97. Ensaio de difusão por imersão	150
Figura 98. Amostras rompidas com aspersão de nitrato de prata.....	150
Figura 99. Moldagem das barras de argamassas	151

Figura 100. Processo de execução do ensaio de reação álcali-sílica (a: amostras em estufa; b: retirada de amostras de solução; c: processo de secagem e d: leitura da expansibilidade).....	152
Figura 101. Ensaio de resistividade.....	153
Figura 102. Ensaio de ultrassom	153
Figura 103. Curva granulométrica do resíduo de vidro, cimento e metacaulim.	157
Figura 104. Retido acumulado do resíduo de vidro, cimento e metacaulim.	158
Figura 105. Resultados do ensaio LUXAN'S	159
Figura 106. Resultados do ensaio IAP cal.....	160
Figura 107. Ensaio IAP cimento	161
Figura 108. Resultados abatimento	163
Figura 109. Ensaio de abatimento	164
Figura 110. Resultados ensaio de massa específica	165
Figura 111. Resultados de resistência à compressão.....	167
Figura 112. Alteração em relação ao concreto de referência	168
Figura 113. Efeito isolado do tipo de concreto sobre a resistência do concreto	170
Figura 114. Efeito isolado da idade sobre a resistência à compressão do concreto	171
Figura 115. Efeito interação dos tipos de concretos e idade sobre a resistência à compressão do concreto - Concretos x Idade.....	172
Figura 116. Teste de Tukey da resistência à compressão nos diferentes concretos	173
Figura 117. Efeito isolado do percentual de resíduo de vidro sem moagem e a idade sobre a resistência à compressão	174
Figura 118. Efeito da interação entre o percentual de resíduo de vidro e a idade sobre a resistência à compressão	175
Figura 119. Teste de Tukey para a resistência á compressão dos concretos com resíduo de vidro	176
Figura 120. Efeito isolado do percentual de resíduo de vidro com moagem e a idade sobre a resistência à compressão	177

Figura 121. Efeito da interação entre o percentual de resíduo de vidro moído e a idade sobre a resistência à compressão	177
Figura 122. Teste de Tukey para a resistência à compressão dos concretos com resíduo de vidro moído	179
Figura 123. Efeito isolado do percentual de metacaulim e a idade sobre a resistência à compressão.....	180
Figura 124. Teste de Tukey para a resistência á compressão dos concretos com resíduo de vidro	181
Figura 125. Resultados de resistência à penetração de cloretos.....	183
Figura 126. Alteração em relação ao concreto de referência	184
Figura 127. Efeito isolado do tipo de concreto sobre a carga passante.....	187
Figura 128. Efeito isolado da idade sobre a carga passante	187
Figura 129. Efeito interação dos tipos de concretos e idade sobre a carga passante	188
Figura 130. Teste de Tukey da resistência à penetração de cloretos dos diferentes concretos	189
Figura 131. Efeito isolado do percentual de resíduo de vidro sem moagem e a idade sobre a carga passante.....	190
Figura 132. Teste de Tukey para a resistência à penetração de cloretos dos concretos com resíduo de vidro	191
Figura 133. Efeito isolado do percentual de resíduo de vidro com moagem e a idade sobre a carga passante.....	192
Figura 134. Efeito da interação entre o percentual de resíduo de vidro com moagem e a idade sobre a carga passante	192
Figura 135. Teste de Tukey para a carga passante dos concretos com resíduo de vidro.....	194
Figura 136. Efeito isolado do percentual de metacaulim e a idade sobre a carga passante.....	195
Figura 137. Efeito da interação entre o percentual de metacaulim e a idade sobre a carga passante	195

Figura 138. Teste de Tukey para a resistência à penetração de cloretos dos concretos com metacaulim	196
Figura 139. Penetração de cloretos após aspersão de AgNO_3	197
Figura 140. Regressão linear simples da carga passante e da penetração de cloretos.....	198
Figura 141. Resultados de coeficiente de difusão de cloretos estacionário (ds) e não estacionário (dns).....	201
Figura 142. Alteração em relação ao concreto de referência	203
Figura 143. Resultado de amostra ensaiada conforme método UNE 83987/14.	204
Figura 144. Efeito isolado do tipo de concreto sobre o coeficiente de difusão de cloretos (notação científica)	206
Figura 145. Efeito isolado do percentual de resíduo de vidro sem moagem sobre o coeficiente de difusão de cloretos.....	207
Figura 146. Teste de Tukey para o coeficiente de difusão de cloretos dos concretos com resíduo de vidro	207
Figura 147. Efeito isolado do percentual de resíduo de vidro com moagem sobre o coeficiente de difusão	208
Figura 148. Teste de Tukey para o coeficiente de difusão de cloretos dos concretos com resíduo de vidro moído.....	208
Figura 149. Efeito isolado do percentual de metacaulim sobre o coeficiente de difusão	209
Figura 150. Teste de Tukey para o coeficiente de difusão de cloretos dos concretos com metacaulim	210
Figura 151. Coeficiente de difusão de cloretos não estacionário	212
Figura 152. Alteração em relação ao concreto de referência	213
Figura 153. Efeito isolado do tipo de concreto sobre o coeficiente de difusão de cloretos (notação científica)	215
Figura 154. Efeito isolado da idade sobre o coeficiente de difusão de cloretos (notação científica)	216
Figura 155. Efeito interação dos tipos de concretos e idade sobre o coeficiente de difusão de cloretos	216

Figura 156. Teste de Tukey para o coeficiente de difusão de cloretos dos diferentes concretos	217
Figura 157. Efeito isolado do percentual de resíduo de vidro sem moagem e a idade sobre o coeficiente de difusão de cloretos	218
Figura 158. Efeito da interação entre o percentual de resíduo de vidro e a idade sobre o coeficiente de difusão	218
Figura 159. Teste de Tukey para o coeficiente de difusão de cloretos dos concretos com resíduo de vidro	219
Figura 160. Efeito isolado do percentual de resíduo de vidro com moagem e a idade sobre o coeficiente de difusão.....	220
Figura 161. Efeito isolado do percentual de metacaulim e a idade sobre o coeficiente de difusão	221
Figura 162. Penetração de cloretos em ensaio de difusão por imersão.....	223
Figura 163. Alteração em relação ao concreto de referência	224
Figura 164. Efeito isolado do tipo de concreto sobre a difusão de cloretos por imersão.....	226
Figura 165. Efeito isolado o tempo de exposição sobre a difusão de cloretos por imersão.....	226
Figura 166. Efeito interação dos tipos de concretos e tempo de exposição sobre a penetração de cloretos por difusão	227
Figura 167. Teste de Tukey para a penetração de cloretos em diferentes concretos	228
Figura 168. Efeito isolado do percentual de resíduo de vidro sem moagem sobre a penetração de cloretos.....	229
Figura 169. Teste de Tukey para a penetração de cloretos dos concretos com resíduo de vidro	230
Figura 170. Efeito isolado do percentual de metacaulim sobre a penetração de cloretos.....	231
Figura 171. Resultados de resistividade nos concretos	233
Figura 172. Alteração em relação ao concreto de referência	235
Figura 173. Efeito isolado do tipo de concreto sobre a resistividade.....	236

Figura 174. Efeito isolado da idade sobre a resistividade	237
Figura 175. Efeito interação dos tipos de concretos e idade sobre a resistividade	237
Figura 176. Teste de Tukey da resistividade de concretos.....	238
Figura 177. Efeito isolado do percentual de resíduo de vidro sem moagem sobre a resistividade	239
Figura 178. Teste de Tukey da resistividade de concretos.....	239
Figura 179. Efeito isolado do percentual de resíduo de vidro com moagem sobre a resistividade	240
Figura 180. Efeito da interação entre o percentual de resíduo de vidro com moagem e a idade sobre a resistividade	241
Figura 181. Teste de Tukey da resistividade dos concretos	241
Figura 182. Efeito isolado do percentual de metacaulim e a idade sobre a resistividade (escala).....	242
Figura 183. Teste de Tukey da resistividade de concretos.....	243
Figura 184. Análise de regressão linear simples e estudo de correlação entre resistividade e carga passante	244
Figura 185. Resultados de velocidade de propagação de onda	247
Figura 186. Alteração em relação ao concreto de referência	248
Figura 187. Efeito isolado do tipo de concreto sobre a velocidade de propagação de onda.....	249
Figura 188. Efeito isolado da idade sobre a velocidade de propagação de onda.....	251
Figura 189. Resultados de expansão por reação álcali-sílica	252
Figura 190. Resultados de expansão por reação álcali-sílica	253
Figura 191. Alteração em relação ao concreto de referência	256
Figura 192. Comparação entre os coeficientes de difusão de cloretos.....	259
Figura 193. Vida útil de projeto de concretos localizados a 800 metros do mar.....	260
Figura 194. Vida útil de projeto de concretos submetidos a respingos de maré	261
Figura 195. Resultados referentes às propriedades mecânicas e de durabilidade	265

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Composição química do vidro em distintas pesquisas	39
Tabela 2. Efeitos da utilização de resíduos de vidro em concretos em distintas dimensões de partículas	61
Tabela 3. Tamanho das partículas de vidro e índice de atividade pozolânica	62
Tabela 4. Limite máximo de cloretos	81
Tabela 5. Classificação conforme ASTM C1202 (ASTM 2012).....	91
Tabela 6. Tabela contemplada na NT Build 492.....	99
Tabela 9. Tipos de concretos da pesquisa	109
Tabela 10. Quantificação dos corpos de prova.....	110
Tabela 11. Quantificação dos corpos de prova – traços necessários.....	112
Tabela 12. Traços a serem adotados (com compensação de volumes)	115
Tabela 13. Consumo de materiais (com compensação de volumes).....	116
Tabela 14. Propriedades físicas agregado miúdo	119
Tabela 15. Propriedades físicas agregado graúdo	120
Tabela 16. Caracterização física e química do cimento	122
Tabela 17. Distribuição granulométrica do resíduo de vidro com e sem moagem	125
Tabela 18. Distribuição granulométrica do resíduo em comparação com os outros materiais.....	126
Tabela 19. Caracterização química do resíduo de vidro	126
Tabela 20. Composição química típica dos componentes em porcentagens.....	128
Tabela 21. Diâmetro e densidade dos componentes.....	129
Tabela 22. Avaliação da atividade pozolânica por meio de medida de condutividade.....	137
Tabela 23. Caracterização química do resíduo de vidro em diferentes pesquisas	154
Tabela 24. Caracterização química.....	155
Tabela 25. Caracterização física do resíduo	156

Tabela 28. Resultados do ensaio IAP cal	160
Tabela 29. Resultados da caracterização do resíduo	161
Tabela 30. Resistência à compressão média.....	166
Tabela 31. Análise de variância da resistência à compressão em relação aos diferentes percentuais de utilização-resíduo de vidro	174
Tabela 32. Análise de variância da resistência à compressão em relação aos diferentes percentuais de utilização-resíduo de vidro com moagem.....	177
Tabela 33. Análise de variância da resistência à compressão em relação aos diferentes percentuais de utilização - metacaulim.....	179
Tabela 34. Carga passante total média	182
Tabela 35. Classificação qualitativa contemplada na norma ASTM C 1202 (ASMT, 2012)	183
Tabela 36. Análise da variância do efeito dos fatores controláveis na carga passante.....	186
Tabela 37. Análise de variância da resistência à compressão em relação aos diferentes percentuais de utilização-resíduo de vidro sem moagem	190
Tabela 38. Análise de variância da carga passante em relação aos diferentes percentuais de utilização-resíduo de vidro com moagem	192
Tabela 39. Análise de variância da resistência à penetração de cloretos em relação aos diferentes percentuais de utilização - metacaulim.....	194
Tabela 40. Resultados de análise de regressão múltipla da carga passante	196
Tabela 41. Coeficiente de difusão estacionário de cloretos	199
Tabela 42. Coeficiente de difusão não estacionário de cloretos.....	200
Tabela 43. Classificação qualitativa segundo Gjorv (2001).....	202
Tabela 44. Análise da variância do efeito dos fatores controláveis no coeficiente de difusão em regime não estacionário	205
Tabela 45. Análise da variância do efeito dos fatores controláveis no coeficiente de difusão em regime estacionário	205
Tabela 46. Análise da variância do efeito dos fatores controláveis no coeficiente de difusão em regime não estacionário	206

Tabela 47. Análise da variância do efeito dos fatores controláveis no coeficiente de difusão em regime não estacionário	208
Tabela 48. Análise da variância do efeito dos fatores controláveis no coeficiente de difusão em regime não estacionário	209
Tabela 49. Resultados de coeficiente de difusão de cloretos não estacionário ..	211
Tabela 50. Classificação conforme Gjorv (2001)	213
Tabela 51. Análise da variância do efeito dos fatores controláveis no coeficiente de difusão em regime não estacionário	214
Tabela 52. Análise da variância do efeito dos fatores controláveis no coeficiente de difusão em regime não estacionário	217
Tabela 53. Análise da variância do efeito dos fatores controláveis no coeficiente de difusão em regime não estacionário	219
Tabela 54. Análise da variância do efeito dos fatores controláveis no coeficiente de difusão em regime não estacionário	220
Tabela 55. Resultados médios de difusão de cloretos por imersão	222
Tabela 56. Análise da variância do efeito dos fatores controláveis na difusão de cloretos por imersão	225
Tabela 57. Análise da variância do efeito dos fatores controláveis no coeficiente de difusão em regime não estacionário	229
Tabela 58. Análise da variância do efeito dos fatores controláveis no coeficiente de difusão em regime não estacionário	230
Tabela 59. Análise da variância do efeito dos fatores controláveis no coeficiente de difusão em regime não estacionário	231
Tabela 60. Resultados médios de resistividade	232
Tabela 61. Classificação qualitativa norma AASHTO TP 95.....	234
Tabela 62. Tabela de classificação e resistividade conforme CEB-192 e COST 509	234
Tabela 63. Análise da variância do efeito dos fatores controláveis na resistividade	235

Tabela 64. Análise da variância do efeito dos fatores controláveis no coeficiente de difusão em regime não estacionário	238
Tabela 65. Análise da variância do efeito dos fatores controláveis na resistividade do resíduo de vidro moído.....	240
Tabela 66. Análise da variância do efeito dos fatores controláveis na resistividade dos concretos	242
Tabela 67. Análise de regressão linear simples da resistividade e carga passante	244
Tabela 68. Análise de regressão linear múltipla da resistividade, resistência e velocidade e propagação de onda – y= penetração de cloretos.....	245
Tabela 69. Correlações entre diferentes ensaios	245
Tabela 70. Resultados médios de velocidade de propagação de onda.....	246
Tabela 71. Relação entre a velocidade de propagação e a qualidade do concreto	247
Tabela 72. Análise da variância do efeito dos fatores controláveis na velocidade de propagação de onda	249
Tabela 73. Análise da variância do efeito dos fatores controláveis na velocidade de propagação de onda.	250
Tabela 74. Análise da variância do efeito dos fatores controláveis na velocidade de propagação de onda	251
Tabela 75. Análise da variância do efeito dos fatores controláveis na velocidade de propagação de onda	251
Tabela 76. Alteração em relação ao concreto referência.....	255
Tabela 77. Risco de desenvolvimento de corrosão em aço-carbono, dependendo do conteúdo total de cloreto	257
Tabela 78. Cobrimento nominal relacionado com a classe de agressividade	258
Tabela 79. Avaliação de desempenho dos concretos	266
Tabela 80. Verificação constatado na pesquisa e Estado da Arte	267

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Pesquisas envolvendo a utilização de resíduos de vidro em concretos	41
Quadro 2. Principais pesquisadores envolvendo a utilização de metacaulim em concretos	64
Quadro 3. Agressividade do meio versus qualidade do concreto.....	66
Quadro 4. Classificação da resistência dos concretos frente ao risco de corrosão das armaduras	66
Quadro 5. Identificação de ensaios e regimes	83
Quadro 6. Comparação entre os métodos acelerados de migração de cloretos ASTM C 1202 , UNE 83987 e NT BUILD 492.....	104

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABVIDRO – Associação Técnica Brasileira das Indústrias Automáticas de Vidro
ACI – American Concrete Institute
ANOVA – Análise de Variância
ASTM – American Society for Testing and Materials
C – Carga total passante
CESAN – Companhia Espírito Santense de Saneamento
Cl⁻ – Íon cloreto
C3A – Aluminato Tricálcico
CP II-F-32 – Cimento Portland Composto com filer
CPV ARI – Cimento Portland de alta resistência inicial
C-S-H – Silicato de cálcio hidratado
CV – Coeficiente de variação
Ds – Coeficiente de Difusão no Estado Estacionário
Dns – Coeficiente de Difusão no Estado não Estacionário
EPA – Environmental Protection Agency
ES – Espírito Santo
GL – Graus de liberdade
IAP – Índice de Atividade Pozolânica
IFES – Instituto Federal do Espírito Santo
IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas
LEMAC – Laboratório de ensaios em materiais de construção
LTG-ER – Laboratório de Centro de Tecnologias do Gás e Energias Renováveis
MPa – Mega Pascal
MQ – Média Quadrática
NBR – Norma Brasileira
NE – Não especificado
NT – Nordtest
PF – Perda o fogo
Ph – Potencial hidrogeniônico
SQ – Soma quadrática
UFES – Universidade Federal do Espírito Santo
UNE – Uma Norma Espanola
VUP – Vida Útil de Projeto

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	30
1.1. Objetivos.....	34
1.1.1. Objetivo geral	34
1.1.2. Objetivos específicos	34
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	36
2.1. Utilização de adições minerais e de resíduos de vidro em concretos ..	36
2.1.1. Utilização de resíduo de vidro em estruturas de concreto em benefício das propriedades mecânicas e relacionadas com a durabilidade	40
2.1.1.1. Avaliação da utilização de resíduo de vidro em concretos com relação à resistência a agentes agressivos e à prevenção de manifestações patológicas. .	55
2.1.1.1.1. Resistência à penetração de cloretos	55
2.1.1.1.2. Resistência a reações álcali-sílica (RAS)	57
2.1.1.1.3. Análise de percentuais de substituição ao cimento e dimensões de partículas mais adequadas visando à elevação da vida útil de concretos com resíduo de vidro.	58
2.1.1.2. Dados conclusivos acerca das pesquisas	62
2.1.2. Metacaulim	63
2.1.2.1. Utilização do Metacaulim em benefício do ganho de desempenho e de durabilidade em estruturas de concreto.	64
2.1.2.2. Estudo piloto da influência do metacaulim em concretos	67
2.2. Durabilidade, Vida Útil e Desempenho	69
2.3. Mecanismos de Transporte de agentes agressivos.....	72
2.3.1. Permeabilidade	72
2.3.2. Absorção capilar	73
2.3.3. Difusão de íons	73

2.3.4. Migração de íons	74
2.4. Corrosão de armaduras induzidas por cloretos	76
2.5. Estimativa de Vida Útil de Projeto	80
2.6. Ensaio de avaliação da resistência à penetração de íons cloreto em concretos.....	84
2.6.1. AASHTO T259: Método para obter a resistência à penetração de íons cloreto em concretos (Salt Ponding Test).....	85
2.6.2. Nord Test NT Build 443 (Bulk Diffusion Test).....	86
2.6.3. ASTM C-1202/12 - Ensaio de penetração acelerada de cloretos.....	89
2.6.4. Ensaio rápido de migração em regime estacionário (UNE 83987/14).....	93
2.6.5. Ensaio rápido de migração em estado não estacionário (Luping e Nilson, 1992).....	96
2.6.6. Coeficiente de migração de cloretos por meio de regime não estacionário (Nt Build 492).....	99
3. PROGRAMA EXPERIMENTAL, MATERIAIS E MÉTODOS	105
3.1. Planejamento dos Experimentos	105
3.1.1. Variáveis Dependentes	105
3.1.2. Variáveis Independentes.....	106
3.1.3. Variáveis de Controle	106
3.2. Programa Experimental.....	107
3.3. Materiais.....	119
3.3.1. Agregado miúdo	119
3.3.2. Agregado graúdo	120
3.3.3. Água.....	121
3.3.4. Cimento.....	121

3.3.5. Resíduo do processo de lapidação dos vidros	122
3.3.6. Metacaulim	128
3.4. Métodos.....	129
3.4.1. Processo de obtenção do resíduo de vidro aplicado neste estudo	129
3.4.2. Caracterização do resíduo da lapidação do vidro	134
3.4.2.1. Caracterização química.....	134
3.4.2.2. Composição granulométrica	135
3.4.2.3. Massa específica	135
3.4.2.4. Finura.....	136
3.4.3. Caracterização quanto à atividade pozolânica.....	137
3.4.3.1. Ensaio pelo Método de Luxán.....	137
3.4.3.2. Atividade pozolânica com Cal.....	138
3.4.3.3. Índice de Atividade Pozolânica com Cimento (IAP-CIMENTO).....	139
3.4.4. Método de dosagem dos concretos	140
3.4.5. Determinação da massa específica no estado fresco	142
3.4.6. Resistência à compressão axial.....	142
3.4.7. Ensaio acelerado de migração de cloretos – UNE 83987-14	143
3.4.8. Ensaio acelerado de migração de cloretos – ASTM C1202/12.....	145
3.4.9. Ensaio de migração de cloretos em regime não estacionário – NT BUILD 492-99.....	147
3.4.10. Ensaio de difusão de cloretos por imersão – NT BUILD 443-95	149
3.4.11. Ensaio de álcali sílica pelo método de barras (ASTM C1260/14).....	150
3.4.12. Ensaio de resistividade elétrica do concreto	152
3.4.13. Ensaio de velocidade de propagação de onda ultrassônica.....	153
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	154

4.1. Caracterização do resíduo da lapidação do vidro	154
4.1.1. Caracterização química do resíduo da lapidação do vidro	154
4.1.2. Caracterização física do resíduo da lapidação do vidro	156
4.1.3. Atividade pozolânica do resíduo da lapidação do vidro.....	158
4.1.3.1. Método de Luxán.....	158
4.1.3.2. Atividade Pozolânica com Cal	159
4.1.3.3. Atividade Pozolânica com cimento	160
4.2. Resultados dos Ensaios em Concretos	163
4.2.1. Concreto no estado fresco.....	163
4.2.1.1. Ensaio de consistência pelo abatimento do tronco de cone.....	163
4.2.1.2. Massa específica do concreto no estado fresco	164
4.2.2. Concreto no estado endurecido.....	165
4.2.2.1. Resistência à compressão axial	166
4.2.2.1.1. Análise de variância da resistência à compressão axial em relação aos diferentes concretos.....	169
4.2.2.1.1. Análise de variância da resistência à compressão axial em relação aos diferentes percentuais de substituição	173
4.2.2.2. Ensaio acelerado de migração de cloretos - ASTM C1202-12	181
4.2.2.2.1. Análise de variância da resistência à penetração de cloretos em relação aos diferentes concretos	185
4.2.2.2.1. Análise de variância da resistência à penetração de cloretos em relação aos diferentes percentuais de substituição	189
4.2.2.2.2. Análise de regressão dos resultados de resistência à penetração de cloretos.....	196
4.2.2.3. Ensaio acelerado de migração de cloretos - UNE 83987-14.....	198

4.2.2.3.1. Análise de variância do coeficiente de difusão de cloretos em regime não estacionário (dns) em relação aos diferentes concretos.....	205
4.2.2.3.1.Análise de variância do coeficiente de difusão de cloretos em regime não estacionário (dns) em relação aos diferentes percentuais de substituição ...	206
4.2.2.4. Ensaio acelerado de migração de cloretos no estado não estacionário - NT BUILD 492.....	210
4.2.2.4.1. Análise de variância do coeficiente de difusão de cloretos não estacionário em relação aos diferentes concretos.....	214
4.2.2.4.1. Análise de variância do coeficiente de difusão de cloretos não estacionário em relação aos diferentes percentuais de substituição	217
4.2.2.5. Ensaio de difusão de cloretos por imersão – NT BUILD 443.....	221
4.2.2.5.1. Análise de variância da resistência à penetração de cloretos em relação aos diferentes concretos	225
4.2.2.5.1. Análise de variância da resistência à penetração de cloretos em relação aos diferentes percentuais de substituição	228
4.2.2.6. Ensaio de resistividade elétrica do concreto.....	231
4.2.2.6.1. Análise de variância da resistividade dos concretos em relação aos diferentes tipos de concretos	235
4.2.2.6.1. Análise de variância da resistividade dos concretos em relação aos diferentes percentuais de substituição	238
4.2.2.6.2.Análise de regressão dos resultados de resistividade elétrica dos concretos.....	243
4.2.2.7. Ensaio de ultrassom.....	246
4.2.2.7.1. Análise de variância da velocidade de propagação de onda ultrassônica em relação aos diferentes concretos	248
4.2.2.7.1. Análise de variância da velocidade de propagação de onda ultrassônica em relação aos diferentes percentuais de substituição	250

4.2.2.8. Reação por expansão álcali-sílica.....	252
4.2.2.9. Comparação dos resultados obtidos dos concretos no estado endurecido	254
4.2.3. Estimativa de vida útil dos concretos	257
5. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	263
5.1. Conclusão geral.....	263
5.2. Conclusões específicas	263
5.2.1. Quanto à caracterização do resíduo do processo de lapidação do vidro .	263
5.2.2. Conclusões relativas ao concreto no estado fresco.....	264
5.2.3. Conclusões relativas ao concreto no estado endurecido.....	264
5.3. Recomendações para pesquisas futuras	269
REFERÊNCIAS	270
APENDICES	286

1. INTRODUÇÃO

Verifica-se nos tempos atuais um crescimento do consumo de recursos naturais e de energia. Este fato tem motivado preocupações com relação à finitude de muitos destes recursos e à carga de emissões de CO₂ no planeta. Há, a partir destas problemáticas, crescentes reflexões a respeito do consumo dos recursos de forma consciente, equilibrada e eficiente.

Visando minimizar a utilização destes recursos, tem-se buscado alternativas às tecnologias tradicionais de produção e a substituição nos processos produtivos da utilização de recursos naturais por outros materiais de menor impacto ambiental.

A construção civil é uma das maiores responsáveis pelo consumo de energia e de recursos naturais. O consumo contempla grande parte do ciclo de vida dos materiais envolvidos, desde a obtenção até o descarte. Segundo a agência EPA (2010), aproximadamente 5% das emissões de CO₂ de origem antrópica no mundo provêm da produção de cimento e no Brasil esse valor corresponde a 1,4%.

Ainda como passivo ambiental na construção civil, tem-se a geração de resíduos, motivada, dentre outras, pela preferência da construção não racionalizada, onde se apresenta maiores imprevisibilidades, favorecendo possíveis refazimentos de serviços executados e desperdícios de materiais. Soma-se ainda as reformas, adequações e a vida útil do material que, ao término, poderá ser descartado.

Acrescenta-se que há no país a preferência pelo sistema construtivo em concreto armado e, muitas vezes, não se aplica com correção o conceito de durabilidade nas estruturas projetadas, respeitando as características locais (agressividade do meio) e concebendo um material que seja capaz de cumprir sua via útil de projeto (VUP). Assim, motivam-se reparos e consumo de recursos naturais e energéticos de maneira precoce.

Reforça-se que, conforme a Norma de Desempenho (ABNT NBR 15575:2010), as estruturas de concreto devem ser projetadas para, no mínimo, 50 anos de vida útil. Devem ser consideradas premissas como: estudos e avanços em tecnologia dos materiais - favorecendo concretos de alto desempenho e resistentes a agentes agressivos - e o respeito aos critérios preconizados em

normas, em especial, no Brasil, as normas ABNT NBR 6118 (2014) e ABNT NBR 12655 (2006), considerando a classe de agressividade do meio.

Nota-se, em face do exposto, motivos para o crescimento do volume de resíduos gerados, o consumo de recursos naturais e energéticos e a elevação da emissão de CO₂ oriunda das atividades da construção civil.

Todos estes fatores têm conduzido a discussões a respeito de mitigar o impacto ambiental, favorecendo a sustentabilidade aliada à produção mais limpa, menor utilização de recursos naturais e menor ocupação de aterros (utilizando-se de planejamento para redução responsável ou a proibição de aterros), minimizando a contaminação de lençóis freáticos e impactos no ecossistema.

Soma-se que a maioria das utilizações do concreto origina-se de cimento Portland com base no clínquer e que para a sua fabricação é necessário alto consumo de energia, além ainda da produção de grande quantidade de emissões de gases de efeito estufa, principalmente CO₂ resultante de sua liberação a partir do calcário no processamento do clínquer.

Conforme Bernstein et al. (2007), a decomposição do calcário em fornos de altas temperaturas configura-se como uma relevante fonte de emissão de CO₂ na construção civil, pois cada tonelada de calcário libera 440 kg de CO₂ e gera apenas 560 kg de material. O cimento, material muitas vezes presente nas construções, depende deste processo e foi responsável por, aproximadamente, 30% das emissões de CO₂ de processos industriais em 2012 (BRASIL, 2014).

Objetivando reduzir o consumo de energia e emissão de CO₂, têm-se buscado novos materiais que possam substituir o cimento de forma parcial e produzir concretos mantendo suas propriedades originais, como exemplo tem-se a utilização de materiais cimentícios suplementares, tais como metacaulim, sílica ativa, pozolana natural e a utilização de resíduos e subprodutos industriais. Segundo Helene *et al.* (2011), a incorporação de outros elementos no concreto, como aditivos, adições minerais e o uso de técnicas de execução diferenciadas, permitem a execução de concretos de última geração permitindo a execução de estruturas esbeltas, duráveis e seguras para o usuário final. Entende-se por durável estruturas que resistam com segurança às solicitações externas na sua combinação mais desfavorável, estretanto com desempenho de serviço acima do mínimo.

No que tange à utilização de pozolanas tradicionais para utilização em concretos, destaca-se a adição mineral conhecida como pozolana metacaulim. Esta tem sido objeto de estudos em função de suas elevadas reações pozolânicas e, ao contrário de outras pozolanas, pontua-se por ser um produto primário e não secundário ou subproduto provenientes de rejeitos industriais. Cada vez mais o metacaulim tem sido utilizado para produzir concretos de alto desempenho e com maior durabilidade, ou seja, capaz de atender critérios de eficiência e economia e mitigar o surgimento de manifestações patológicas (LACERDA, 2005; MEDEIROS *et al.*, 2013; BADOGIANNIS E TSIVILIS, 2009; HASSAN *et al.*, 2012).

Uma outra alternativa para minimizar o uso de cimento em concretos é a substituição por resíduos que possam, por exemplo, atuar desencadeando reações pozolânicas ou de preenchimento de vazios de forma a não comprometer as propriedades mecânicas e relacionadas com a durabilidade em estruturas de concreto. Conforme Shi e Zheng (2007), dentre os diversos resíduos sólidos urbanos, o vidro pode ser considerado o mais adequado como substituição ao cimento, devido as suas características físicas e composição química.

No Brasil, o processo de reciclagem dos resíduos de vidro contempla - referente ao total de 1.357.484 t/ano - apenas a parcela de 47% e a reutilização de 33% (ABVIDRO, 2012), logo, para os 20% dos 100%, necessita-se buscar soluções que estejam comprometidas como o desenvolvimento sustentável.

Face ao exposto, pesquisas indicam que a utilização de resíduos de vidro em concretos pode ser uma importante solução, pois, em função de suas características químicas e físicas, quando utilizados em concretos são capazes de melhorar suas propriedades mecânicas e as propriedades relacionadas com a durabilidade - tais como resistência ao ingresso de agentes agressivos. Sua utilização, além de promover benefícios tecnológicos em função de melhorar o desempenho de concretos, promove benefícios ambientais, pois contribui para destinação deste resíduo que em grande parte seria descartado. Além disso, contribui para a redução da utilização de recursos naturais, da emissão de CO₂ e consumo energético em função da redução da utilização do cimento. Acrescenta-se ainda a elevação da vida útil de concretos, minimizando a degradação prematura das construções, elevando o tempo de utilização da edificação, evitando demolições, reparos e outras construções para o mesmo fim.

Pesquisas indicam que a utilização de resíduo de vidro em dimensões de partículas adequadas podem mitigar manifestações patológicas de reações álcalis-sílica e que a utilização combinada com outros materiais suplementares, como o metacaulim, pode potencializar este efeito. Neste aspecto, a utilização de concretos com a substituição parcial ao cimento por estes materiais também será estudada, em função do benefício tecnológico e dos benefícios ambientais (MEYER *et al.*, 1996; SCHWARZ *et al.*, 2008; MATOS E SOUSA-COUTINHO, 2012; SHI, ZHENG, 2007).

A utilização do resíduo de vidro desta pesquisa, resíduos do processo de lapidação de vidros planos (sodo-cálcico), contempla ainda outro benefício ambiental em função do sistema empregado no processo de reúso da água, sendo assim o ciclo sustentável da cadeia sustentável se completa com a preservação de um dos principais recursos do planeta, a água. O reúso da água configura-se benefício para a indústria e para o meio ambiente, devendo-se preservar a água potável exclusivamente para o atendimento de necessidades que exijam a sua potabilidade, preservando assim o meio ambiente.

Visando contribuir com o avanço do conhecimento sobre a potencialidade da utilização de resíduos de vidro em concretos, como substitutos parciais ao cimento, favorecendo o desempenho sob a ótica de suas propriedades mecânicas e de durabilidade, este trabalho avalia a resistência destes concretos às solicitações de ingresso de cloretos - agentes de grande severidade em degradações de estruturas de concreto por corrosão de armaduras, processos expansivos por reação álcali-sílica - em função do aparente elevado teor de álcalis do resíduo de vidro - e a influência da resistência à compressão em função da substituição parcial do cimento.

Serão adotados para avaliação comparativa do desempenho dos concretos em estudo, a incorporação de metacaulim de forma isolada nos mesmos percentuais de utilização, pois desponta como material suplementar consagrado de utilização em concretos como substituto parcial ao cimento e capaz de potencializar os ganhos com relação à resistência à penetração de cloretos e resistência à compressão. A utilização combinada de metacaulim com resíduos de vidro também será adotada em função do estudo bibliográfico demonstrar que a incorporação em concretos de resíduos de vidro com materiais cimentícios suplementares pode mitigar efeitos de reação álcalis-sílica. Outro argumento é a hipótese da substituição parcial do cimento em até

20% com ganhos superiores de desempenho em relação à substituição parcial com apenas o resíduo de vidro.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo geral

O presente trabalho tem o objetivo geral de avaliar o desempenho de concretos produzidos com resíduos da lapidação do vidro.

1.1.2. Objetivos específicos

Com a finalidade de atender ao objetivo geral da pesquisa, são propostos os seguintes objetivos específicos:

Analisar o comportamento do concreto no estado fresco em relação à consistência e à massa específica com a utilização do resíduo de vidro e de metacaulim em substituição parcial ao cimento em diferentes percentuais.

Analisar o comportamento do concreto no estado endurecido em relação à resistência à compressão com a utilização do resíduo de vidro e de metacaulim em substituição parcial ao cimento em diferentes percentuais.

Comparar a resistência à penetração de íons cloreto em concretos com a utilização de resíduo de vidro e de metacaulim com aqueles sem a substituição parcial.

Comparar a suscetibilidade à expansão por reação álcali-sílica em concretos com a utilização de resíduo de vidro em diferentes dimensões de partículas e utilizando-se de materiais suplementares.

Investigar a resistividade de concretos contendo resíduo de vidro em diferentes percentuais, com e sem moagem e com metacaulim.

Estimar a vida útil de concretos com o resíduo de vidro e metacaulim por meio de ensaios acelerados de difusão e de migração de cloretos.

Comparar o desempenho (propriedades mecânicas e relacionadas com a durabilidade) de concretos com a utilização de resíduo de vidro e metacaulim com aqueles sem a substituição parcial.

Verificar o desempenho de concretos com a utilização conjunta de resíduo de vidro e metacaulim por meio de ensaios pertinentes às propriedades mecânicas e relacionadas com a durabilidade (corrosão das armaduras por íons cloretos e suscetibilidade à reação álcali-sílica).

Verificar o desempenho de concretos com resíduo de vidro moído e sem moagem.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Utilização de adições minerais e de resíduos de vidro em concretos

Muitos são os benefícios da utilização de adições minerais e de resíduos de vidro em concretos, dentre eles pode-se destacar a manutenção ou ganho de resistência quando realizada a substituição parcial ao cimento, substituição ao agregado miúdo ou adição à mistura, benefícios favorecidos por suas características pozolânicas.

No que concerne à utilização de adições minerais podem ser destacadas:

- a) Pozolanas comuns: cinza volante com baixo teor de cálcio e Metacaulim.
- b) Pozolanas altamente reativas: sílica ativa e cinza de casca de arroz (atualmente se produz metacaulim de alta reatividade, como o adotado nesta pesquisa)
- c) Cimentantes e pozolanas: escória granulada de alto forno, cinzas volantes com alto teor de cálcio (MEHTA E MONTEIRO, 2014)

Conforme Bauer (2000) e Mehta e Monteiro (2008), pozolanas são substâncias silicosas e aluminosas, que embora não tendo qualidades aglomerantes próprias, são capazes de reagir com o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) na presença de água, formando compostos cimentícios resistentes (C-S-H). A reação consome hidróxido de cálcio em vez de produzi-lo, diferente do que ocorre com a hidratação do cimento Portland. Conforme Mehta e Monteiro (2008), materiais cimentantes são aqueles que necessitam apenas de água para realizar seu processo de hidratação, porém na presença de hidróxido de cálcio aceleram suas reações.

No que se refere à utilização de resíduos em concretos podem ser destacados:

- a) Subprodutos industriais (escória de alto forno, cinza volante)
- b) Reaproveitamento de materiais descartados: dentre eles os resíduos de vidros (lapidação de vidros, garrafas, automotivos).

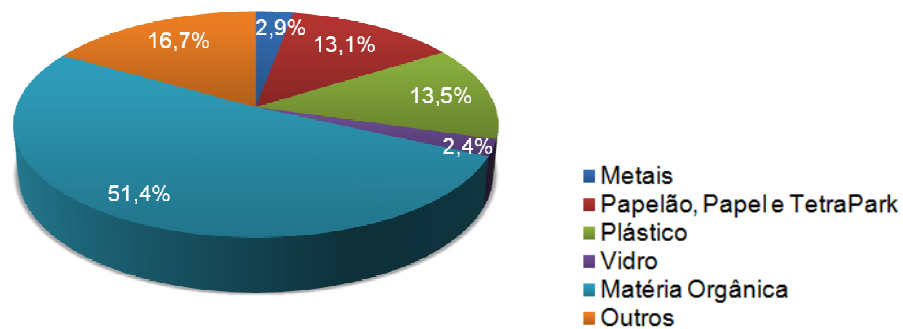
Vislumbra-se, nos tempos atuais, a urgência da adoção sistêmica de medidas sustentáveis nos processos produtivos de impacto ambiental, dentre elas a utilização de vidro reciclado na fabricação do vidro e a reutilização de resíduos de vidro despontam-se como contribuições de

relevância. A utilização de resíduos de vidro em concretos fornece benefício ambiental, pois reutiliza um produto que, em parte, seria descartado e depositado em aterros sanitários. Neste contexto, o material é novamente absorvido na cadeia produtiva.

De acordo com Shi e Zheng (2007) a utilização do vidro reciclado na fabricação do vidro reduz o consumo de energia, matérias-primas e desgaste de máquinas. Entretanto, grande parte do material não é absorvido pelo processo de reciclagem e, em virtude de sua natureza não biodegradável, tende a potencializar poluições ambientais. Neste contexto, os resíduos de vidro apresentam um desafio para os sistemas de gestão de resíduos sólidos no mundo e a sua utilização em concretos configura-se como uma maneira adequada para preservar as matérias-primas naturais, poupar energia e reduzir espaços de aterros (MEYER, 2009; RASHAD, 2014).

De acordo com EPA (2012), o vidro representa 2,4% de participação na composição gravimétrica média dos resíduos urbanos coletados no Brasil (Figura 1). A mencionada quantidade corresponde a um total de 1.357.851 toneladas/ano, contemplando uma reciclagem de apenas 47% (EPA, 2009). Revela-se, por meio dos dados expostos, que o processo de reciclagem brasileiro não absorve nem a metade do resíduo de vidro gerado anualmente, apontando a necessidade da previsão de destinações adicionais para este resíduo.

Figura 1. Participação dos principais materiais no total de RSU (resíduo sólido urbano) coletado no Brasil em 2012



Fonte: EPA (2012)

No que concerne à quantidade de resíduos de vidro em todo mundo, não há informações precisas, em virtude, principalmente, da carência de informações em distintos países, como, aqueles situados no oriente médio. Conforme estimativas das nações unidas, em 2004 havia 200

milhões de toneladas de resíduos sólidos no mundo e 7% destes configuravam-se resíduos de vidro, ou seja, 14 milhões de toneladas (TOPÇU e CANBAZ, 2004). De acordo com Jani e Hogland (2014), a produção total de vidro mundial em 2007 era cerca de 89,4 milhões e espera-se que a sua produção venha a aumentar em virtude do aumento da industrialização e da melhoria do nível de vida.

De acordo com Saito e Shukuya (1996), estima-se que a cada 1 kg de vidro float consumido são utilizadas 1,73 kg de matérias-primas e 0,15 m³ de água. Soma-se a isso à necessidade de elevada temperatura, de até 1.600C° para fundir o vidro, sendo produzido 16,9 MJ de calor a cada 1 kg de folhas de vidro. Ressalta-se que o uso intenso de energia fornece uma alta emissão de CO₂ e outros gases de efeito estufa.

Com relação à sua cadeia produtiva, o setor vidreiro do Brasil é composto por 4 segmentos principais: embalagem, utensílios domésticos, vidros técnicos e vidros planos. A reciclagem do Brasil concentra-se no segmento de embalagens e apenas 20% desse material teve destinação em aterros sanitários ou de forma ignorada. Destaca-se que a parcela reciclada de vidros no Brasil atingiu 47% e a reutilizada totalizou 33% (ABVIDRO, 2012; ABRELPE, 2016).

Visando contemplar a demanda de resíduos de vidro não absorvida pelos processos de reciclagem, a sua utilização em concretos, como substitutos parciais ao cimento, promove destinação ao resíduo e mitigação do impacto ambiental, favorecida pela redução da utilização do cimento na produção de concretos. Face ao exposto, podem ser destacados os benefícios ecológicos ou ambientais destes materiais alternativos que incluem, conforme Frederico e Chidiac (2009):

- a) Desvio de resíduos não reciclados de aterros para aplicações úteis;
- b) Redução dos efeitos negativos da produção do cimento, pertinentes ao consumo de recursos naturais não-renováveis, e
- c) Redução do uso de energia para a produção do cimento e emissão correspondente de gases de efeito estufa.

A produção de cimento anual no mundo atingiu 2,8 bilhões de toneladas e estima-se que a produção de uma tonelada de cimento gere cerca de 0,9 toneladas do CO₂ que é liberado no ambiente (EPA, 2010).

De acordo com Shi e Zheng (2007), a indústria da construção, especialmente a de concreto, pode fornecer solução para o impacto ambiental proveniente dos resíduos de vidro, pois entre os diversos resíduos sólidos urbanos, o vidro pode ser considerado o mais adequado como substituição ao cimento, devido as suas características físicas e composição química. A Tabela 1 apresenta a composição química do vidro em diferentes pesquisas e a média entre elas.

Tabela 1. Composição química do vidro em distintas pesquisas

Composição química	Schwarz et al. (2008)	Limbach iya (2009)	Jain e Neithalath (2010)	Matos e Sousa-Coutinho (2012)	Nassar e Soroushi an (2012)	Antônio (2012)	Sauer (2013)
Sílica (SiO ₂)	72,5	70,13	72,5	70	68	64,29	56,77
Alumina (Al ₂ O ₃)	0,4	1,76	0,4	1,2	7	4,25	6,07
Óxido de ferro (Fe ₂ O ₃)	0,2	0,37	0,2	0,65	<1	0,38	0,29
Óxido de Cálcio (CaO)	9,7	12,08	9,7	8,7	11	13,64	5,64
Óxido de Magnésio (MgO)	3,3	1,55	3,3	3,7	1	4,16	3,67
Óxido de Sódio (Na ₂ O)	13,7	14,56	13,7	16	12	11,49	15,41
Óxido de Potássio (K ₂ O)	0,1	0,55	0,1	0,35	<1	0,53	0,16

Fonte: Produção do autor

De acordo com Miao (2011), com exceção de Al₂O₃ e CaO, as porcentagens dos principais constituintes dos diferentes tipos de vidro são semelhantes. Para o vidro soda-cal, utilização mais comum, a composição do vidro típico é de aproximadamente 70% SiO₂, 12-17% de Na₂O e 10% de CaO.

Neste contexto, a utilização de resíduos de vidro em concretos como substitutos parciais ao cimento torna-se relevante, principalmente, quando estes materiais possibilitam a substituição dos materiais usuais de fabricação sem prejuízo de suas propriedades mecânicas e relacionadas com a durabilidade.

Há atualmente, justificadas por premissas tecnológicas, ambientais e econômicas, uma busca em executar concretos duráveis e com baixa carga de emissão de CO₂. Sendo assim, identifica-se no estado da arte a potencialidade deste resíduo no que concerne à elevação da vida útil de concretos em vista do retardamento da entrada de agentes responsáveis pela sua deterioração,

tais como a degradação por cloretos, o avanço da frente de carbonatação e a expansão por reação alcalí-sílica.

2.1.1. Utilização de resíduo de vidro em estruturas de concreto em benefício das propriedades mecânicas e relacionadas com a durabilidade

Shao et al. (2000) pesquisaram o uso de sílica ativa, vidro finamente moído e cinzas volantes em substituição ao cimento no concreto. Eles utilizaram substituições de até 30% do cimento e partículas com dimensões de 150 μ m, 75 μ m, e 38 μ m. Os autores verificaram que para substituições do cimento por partículas de vidro com granulometria de 38 μ m as propriedades mecânicas foram melhoradas em função das reações pozolânicas, sendo que os concretos com 30% de substituição do cimento por vidro com essa granulometria tiveram um ganho de 120% na resistência até os 90 dias.

Notam-se também pesquisas contemplando a utilização de resíduos de vidro com outras pozolanas, efetuando a comparação e/ou utilização conjunta, tais como cinza volante e sílica ativa. São realizadas ainda pesquisas em diversos tipos de resíduos de vidro, de diversas fontes e características, como vidros claros, castanhos, verdes e misturados, resíduos de fibra de vidro, vidro de cristal líquido esmagado, dentre outros.

No que se referem aos ensaios de durabilidade realizados nestas pesquisas, podem ser destacados os ensaios de atividade pozolânica, difração de raio x, carbonatação acelerada, resistência álcali-sílica, penetração de íons cloretos, absorção capilar e resistência à exposição aos sulfatos. Por meio do Quadro 1 são demonstradas pesquisas de destaque envolvendo a utilização de resíduos de vidro em concretos sob a ótica da durabilidade.

Quadro 1. Pesquisas envolvendo a utilização de resíduos de vidro em concretos

Título e autores	Ensaio de durabilidade	Variáveis principais	Conclusões principais
Influence of fine glass powder on the durability characteristics of concrete and comparison to fly ash – Schwarz <i>et al.</i> (2008)	<ul style="list-style-type: none"> - Ensaio rápido da permeabilidade a cloretos (ASTM C 1202:2012); - Ensaio de carbonatação acelerada (RILEM CPC-18); - Resistência ao ataque de sulfatos (EP-462); - Ensaio de reação álcali-sílica (ASTM C 1260:2014). 	<ul style="list-style-type: none"> - a/c: 0,40; - % de substituição: 5,10 e 20 (cimento); - Origem do resíduo: resíduo obtido da indústria de reciclagem. 	Concretos com resíduos de vidro aos 28 dias apresentaram resistência à compressão maior do que aqueles com cinza volante. Constatou-se também maior resistência à penetração de cloretos e à reação álcali-sílica a partir do percentual de substituição de 10%.
Chloride transport in fly ash and glass powder modified concretes – Influence of test methods on microstructure - Jain e Neithalath (2010)	<ul style="list-style-type: none"> - Ensaio rápido da permeabilidade a cloretos (ASTM C 1202:2012); - Ensaio de Migração de Cloretos em regime não estacionário (NT Build 492:1999). 	<ul style="list-style-type: none"> - a/c: 0,40; - % de substituição: 10 e 20 (cimento); - Origem do resíduo: garrafas de vidro moídas. 	Maiores resistências à penetração de cloretos em concretos com resíduos de vidros que em concretos com cinza volante, apresentando menores cargas passantes no ensaio ASTM C 1202 e menores coeficientes de migração no ensaio NT Build 492.
Utilisation of imploded glass in structural concrete – Cassar e Camilleri (2012)	<ul style="list-style-type: none"> - Ensaio rápido da permeabilidade a cloretos (ASTM C 1202:2012); - Velocidade de propagação de onda ultrassônica (BS 1881-203:1986). 	<ul style="list-style-type: none"> - a/c: 0,60; - % de substituição: 10, 20, 30, 40 e 50 (cimento); - Origem do resíduo: garrafas de vidro utilizadas, sem remoção de contaminação, moídas ou implodidas. 	Concretos com 10% e 20% exibiram uma melhor resistência à penetração de íons cloreto que os concretos de referência. Constataram-se também velocidades de propagação de onda inferiores, conforme se aumentavam o percentual de substituição do cimento por resíduos de vidro.
Strength and durability of recycled aggregate concrete containing milled glass as partial replacement for cement - Nassar e Soroushian (2012)	<ul style="list-style-type: none"> - Ensaio rápido da permeabilidade a cloretos (ASTM C 1202:2012); - Ensaio de reação álcali-sílica (ASTM C 1260:2014). 	<ul style="list-style-type: none"> - a/c: 0,38 e 0,50 - % de substituição: 20 (cimento) 50 e 100 (substituição do agregado original pelo reciclado) - Origem do resíduo: resíduo obtido da indústria de reciclagem. 	Ganho de resistência à compressão aos 56 dias em relação ao concreto de referência e maior resistência à penetração de cloretos. A absorção de água é reduzida com a utilização de resíduos de vidro e ainda redução do volume de vazios. Constatou-se ainda a mitigação de reação álcali-sílica devido à reação pozolânica.
Durability of mortar using waste glass powder as cement replacement – Matos e Sousa-Coutinho(2012)	<ul style="list-style-type: none"> - Teste rápido de barras de argamassas (ASTM 1567:2013); - Ensaio de Migração de Cloretos em regime não estacionário (NT Build 492:1999). 	<ul style="list-style-type: none"> - a/c: 0,50; - % de substituição: 10 e 20 (cimento); - Origem do resíduo: resíduo obtido da indústria de reciclagem. 	Ganho de resistência à penetração de cloretos, resistência a sulfatos, à reação álcali-sílica, sem comprometer a resistência à compressão.

Título e autores	Ensaio de durabilidade	Variáveis principais	Conclusões principais
Effect of glass powders on the mechanical and durability properties of cementitious materials - Kamali e Ghahremaninezhad (2015)	- Ensaio rápido da permeabilidade a cloretos (ASTM C 1202:2012); - Ensaio de Migração de Cloretos em regime não estacionário (NT Build 492:1999).	- a/c: 0,50; - % de substituição: 5, 10 e 20 (cimento); - Origem do resíduo: resíduo obtido da indústria de reciclagem.	Concretos modificados com resíduo de vidro apresentaram melhora na resistência à compressão e à flexão em relação aos concretos de referência em idades tardias de cura. Maiores resistências à penetração de cloretos e menores reações álcali-sílica também foram constatadas.
Bulk engineering and durability properties of washed glass sand concrete - Limbachiya (2009)	- Resistência ao ataque de sulfatos (EP-462); - Ensaio de reação álcali-sílica (ASTM C 1260:2014).	- a/c: 0,52, 0,57 e 0,67; - % de substituição: 15, 20, 30 e 50 (areia); - Origem do resíduo: garrafas de bebidas com diferentes colorações.	Identificaram-se a absorção de água e a densidade do agregado de vidro inferiores às da areia natural. Concretos com 20% de agregado de vidro não apresentaram efeito negativo na resistência à compressão. Concretos com até 15% apresentaram desempenho similar aos concretos de referência, com relação aos aspectos de durabilidade.
Durability of self-consolidation concrete using waste LCD glass – Wang e Huang (2010)	- Resistência ao ataque de sulfatos (EP-462); - Ensaio rápido da permeabilidade a cloretos (ASTM C 1202:2012);	- a/c: 0,28; % de substituição: 10, 20 e 30 (areia); - Origem do resíduo: vidro de cristal líquido.	Aos 90 dias, concretos contendo substituição de cimento por resíduo de vidro com percentual de 30% atingiram 98,4% em relação ao grupo de referência no que tange à resistência à compressão. Notou-se também maior resistência à penetração de cloretos com o uso do resíduo.
Use of waste glass as sand in mortar: Part I – Fresh, mechanical and durability properties - Hwee e Du (2013)	- Ensaio de Migração de Cloretos em regime não estacionário (NT Build 492:1999); - Ensaio de reação álcali-sílica (ASTM C 1260:2014).	- a/c: 0,485; % de substituição: 25, 50, 75, 100 (areia); - Origem do resíduo: garrafas de bebidas, nas cores: verde, marrom e transparente.	Devido à existência de microfissuras, como resultado do processo de moagem, o agregado de vidro transparente demonstrou baixo desempenho mecânico. Entretanto, nota-se ganho de resistência à penetração de cloretos.
Use of waste glass as sand in mortar: Part II – Alkali-silica reaction and mitigation methods - Hwee e Du (2013)	- Ensaio de reação álcali-sílica (ASTM C 1260:2014).	- a/c: 0,485; % de substituição: 25, 50, 75, 100 (areia). - Origem do resíduo: garrafas de bebidas, nas cores: verde, marrom e transparente.	Ao contrário da utilização dos vidros transparentes, as argamassas contendo vidros verdes e castanhos provaram ser inofensivas com relação à expansão por reação álcali-sílica em virtude da ausência de microfissuras.

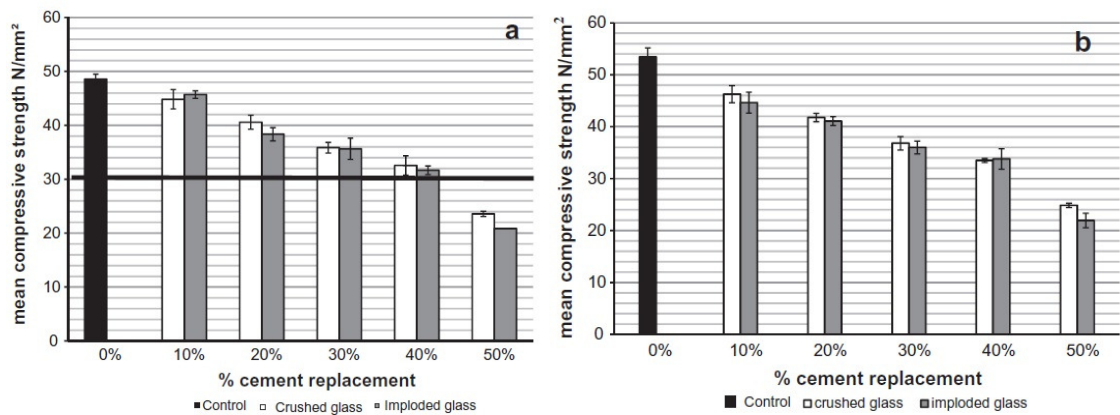
Fonte: produção do autor

Pesquisas utilizando resíduos de vidro podem ser destacadas, dentre elas Jitendra e Neithalath (2010) verificaram que concretos modificados com pó de vidro apresentaram valores inferiores de penetração de cloretos em comparação com os concretos com cinza volante, no mesmo percentual de substituição ao cimento, 10% e 20%. Após 56 e 90 dias de cura, possivelmente como resultado de reação pozolânica e consequente densificação da microestrutura, as misturas com 20% de substituição do cimento por pó de vidro (dimensão média da partícula de 20 μm) apresentam valores mais baixos de permeabilidade rápida (teste rápido de penetração de cloretos - ASTM C 1202) do que aqueles com 10% de substituição ao cimento. Ambos, concretos modificados com pó de vidro e cinza volante, apresentaram-se valores de permeabilidade rápida inferiores em comparação com o concreto de referência, especialmente em idades mais avançadas, indicando a influência destes materiais na microestrutura.

Face ao exposto, mesmo com uma solução de poros apresentando uma condutividade mais elevada (devido à presença de teor alcalino elevado no pó de vidro) concretos com pó de vidro, demonstraram valores inferiores de permeabilidade rápida, comparado com aqueles que utilizaram cinzas volantes, com o mesmo nível de reposição.

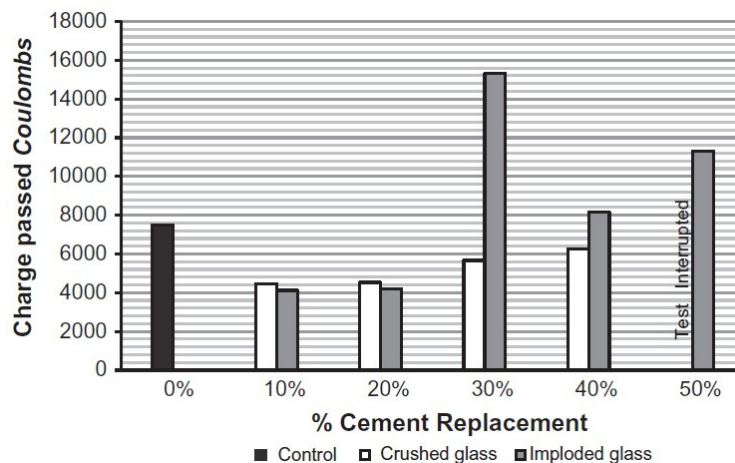
Cassar e Camilleri (2012) apontaram que os concretos que obtiveram 10 e 20% de substituição de cimento por pó de vidro (moídos e implodidos) apresentaram uma melhor resistência à penetração de íons cloreto em comparação ao concreto de referência. A elevada quantidade de sílica, contida nas partículas de vidro, ofereceu maior resistência para a carga passante do que as partículas de cimento que continham igualmente sílica, mas em quantidades menores. As Figuras 2 e 3 demonstram os resultados de resistência à compressão e de penetração de cloretos nos concretos analisados.

Figura 2. Resistência à compressão aos 28 (a) e 91 (b) dias



Fonte: Cassar e Camilleri (2012)

Figura 3. Permeabilidade rápida a cloretos (ASMT C 1202)

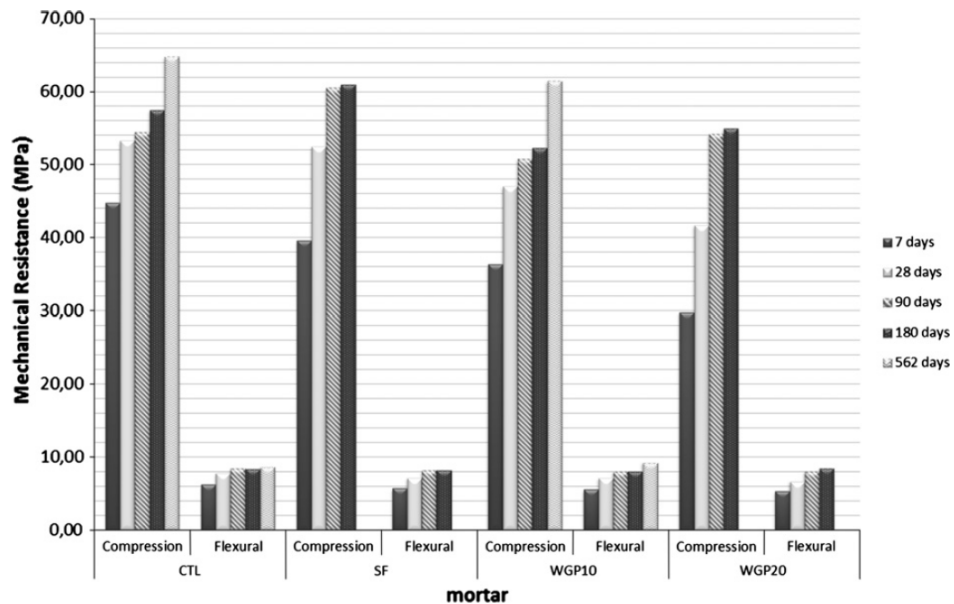


Fonte: Cassar e Camilleri (2012)

Nassar e Soroushian (2012) constataram o efeito significativo na utilização de resíduos de vidro moído (dimensão média da partícula de 13 μ m) na redução da absorção de água e na redução do volume de vazios. A utilização de resíduos de vidro moído como substituto parcial ao cimento obtiveram resultados em concretos com agregados reciclados tendo suas características de durabilidade reforçadas, tais como: absorção, permeabilidade a cloretos, congelamento-descongelamento e resistência mecânica através da melhoria nas características do sistema de poros, além de efeito de preenchimento em decorrência do efeito das partículas de vidro. O aumento significativo da resistência em idade mais avançada foi obtido, possivelmente, através da formação de uma microestrutura mais densa. A melhoria da resistência em 56 dias forneceu uma medida indireta para avaliar a atividade pozolânica dos resíduos de vidro moído.

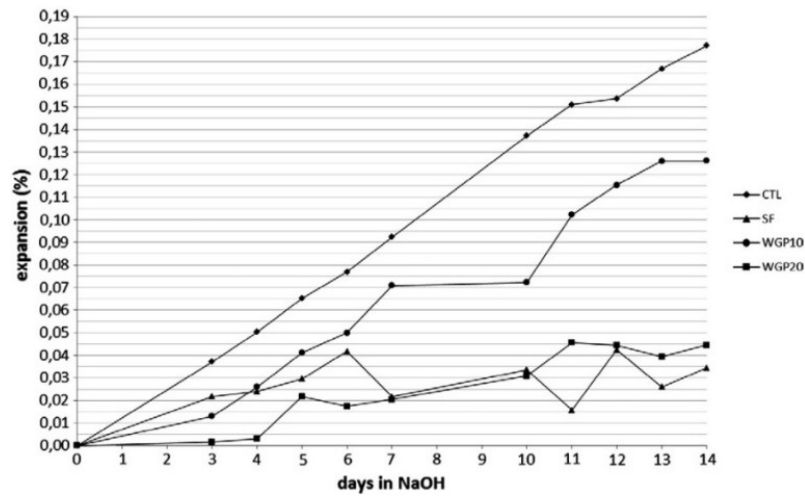
Matos e Coutinho (2012) identificaram que o uso de vidro moído como substituto ao cimento em argamassas melhorou a resistência à penetração de cloretos e à reação álcali-sílica. Portanto, este material pode aumentar a durabilidade e ainda contribuir para a sustentabilidade. Com relação à resistência à compressão, a utilização de resíduo de vidro nos percentuais de 10% e 20% promoveram redução. As Figuras 4-6 apresentam os resultados em ganhos de resistência e de durabilidade.

Figura 4. Ganho de resistência com vidro moído (CTL = concreto de referência, SF= concretos com sílica ativa, WGP10= concretos com resíduos de vidro com 10% de incorporação, WGP20= concretos com resíduos de vidro com 20% de incorporação)



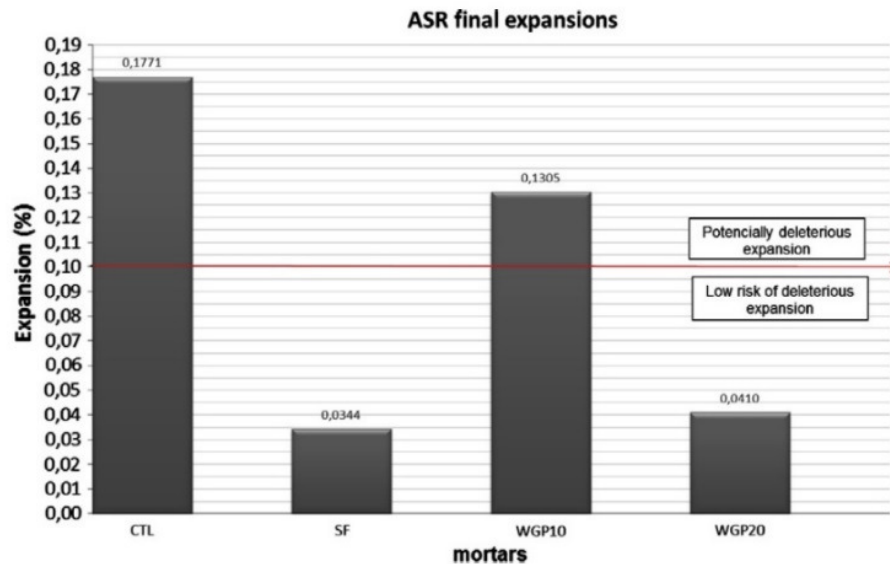
Fonte: Matos e Coutinho (2012)

Figura 5. Expansão devida à reação álcali-sílica (CTL = concreto de referência, SF= concretos com sílica ativa, WGP10= concretos com resíduos de vidro com 10% de incorporação, WGP20= concretos com resíduos de vidro com 20% de incorporação)



Fonte: Matos e Coutinho (2012)

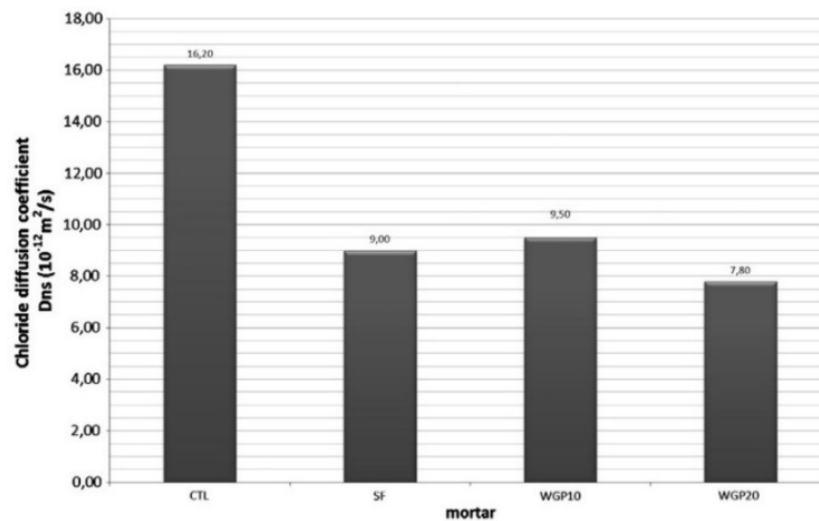
Figura 6. Expansão devida à reação álcali-sílica após 14 dias em 1N NaOH (CTL = concreto de referência, SF= concretos com sílica ativa, WGP10= concretos com resíduos de vidro com 10% de incorporação, WGP20= concretos com resíduos de vidro com 20% de incorporação)



Fonte: Matos e Coutinho (2012)

Conforme a Figura 6, a utilização de resíduo de vidro com a substituição de 20% ao cimento promoveu redução do potencial deletário de expansão por reação álcali-sílica, prescrito pela norma ASTM C 1260 de 0,1% em 14 dias.

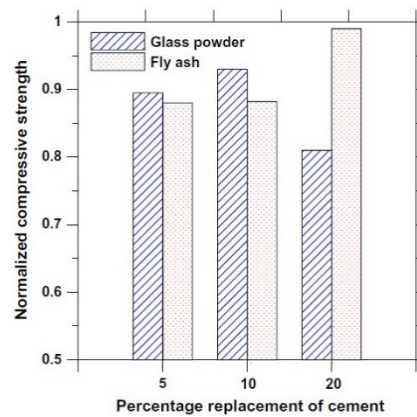
Figura 7. Coeficiente de difusão de cloretos (CTL = concreto de referência, SF= concretos com sílica ativa, WGP10= concretos com resíduos de vidro com 10% de incorporação, WGP20= concretos com resíduos de vidro com 20% de incorporação)



Fonte: Matos e Coutinho (2012)

Schwarz e Cam (2008) relataram que em 28 dias a resistência à compressão em concretos com 10% de pó de vidro, em substituição ao cimento, foi maior do que em concretos com cinzas volantes no mesmo nível de reposição. Os valores de permeabilidade rápida a cloretos (ASTM C 1202) dos concretos modificados foram mais baixos do que os de controle nas primeiras idades, enquanto mostram-se valores essencialmente similares em idades posteriores. Nota-se na Figura 8, valores de resistência superiores à cinza volante com o percentual de substituição de 5 e 10%.

Figura 8. Resistência à compressão aos 90 dias

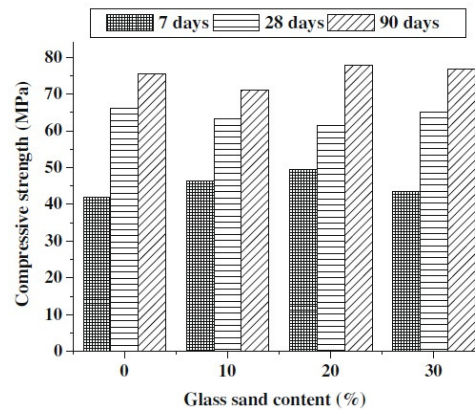


Fonte: Schwars (2008)

Castro e Brito (2013) verificaram que o tamanho das partículas afeta fortemente a trabalhabilidade do concreto. Devido à menor densidade dos agregados de vidro, as misturas feitas com vidro tinham uma densidade mais leve do que o concreto de referência. Segundo os autores, misturas com agregados de vidro são totalmente viáveis, apesar de existirem algumas diferenças no desempenho em função do tamanho de partícula destes usados para substituir o agregado natural. Verificou-se que na maioria dos casos, o agregado de vidro não altera significativamente as propriedades relacionadas com a durabilidade do concreto.

Wang e Huang (2010) observaram que quando o volume de vidro é aumentado para 30% em substituição ao agregado miúdo, a quantidade de penetração de íons cloreto é reduzida e a durabilidade do concreto auto-adensável com resíduos de vidro é melhorada. A durabilidade do concreto curado por três dias foi examinada de acordo com a ASTM C1012 em termos de perda de peso após oito ciclos de secagem alternativos e imersão em solução de sulfato. A resistência à compressão foi aumentada de maneira semelhante em 7 e 28 dias. Aos 90 dias, com uma substituição de vidro de 30%, a resistência à compressão atingiu 98,4% de resistência à compressão do grupo de controle.

Figura 9. Agregado miúdo com utilização de vidro de cristal líquido

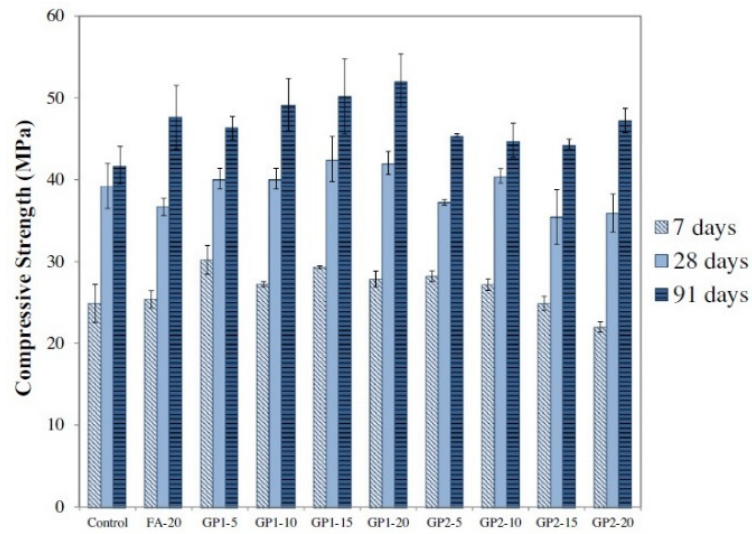


Fonte: Wang (2010)

Mukesh e Limbachiya (2009) constataram que os resíduos de vidro podem ser moídos a fim de fornecer agregados de vidro com propriedades físicas que satisfaçam os requisitos atuais, definidos em normas, de areias naturais para concretos. A absorção de água e a densidade de agregados de vidro foram identificadas inferiores do que a areia natural. Os resultados para o concreto fresco apresentaram uma redução na trabalhabilidade do concreto com o aumento da proporção de agregados de vidro em mais de 20% na mistura, embora as medidas de abatimento fossem mantidas dentro da margem admissível de ± 25 mm. Concretos modificados com 20% de teor de agregados de vidro não tiveram efeito sobre o desenvolvimento da resistência, mas as reduções graduais na trabalhabilidade eram evidentes com o aumento do teor de agregados de vidro.

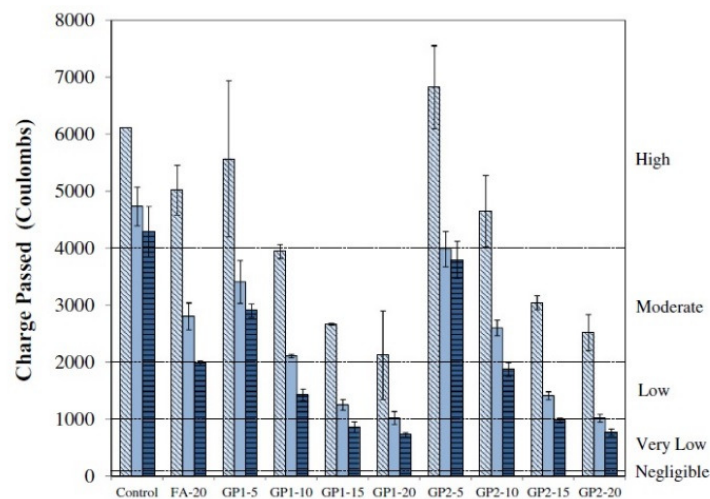
Kamali *et al.* (2015) apresentaram resultados que indicaram que materiais cimentícios modificados com pó de vidro obtiveram melhora na resistência à compressão e à flexão em relação ao concreto de referência em idades tardias da cura. Verificou-se também que a adição de pó de vidro reduziu as expansões de reações álcali-sílica nos materiais de cimento modificados quando misturados com areias reativas e maior resistência à permeabilidade aos íons cloreto. Conforme os autores, a melhoria da resistência mecânica e durabilidade dos materiais de cimento modificados com pó de vidro pode ser atribuída à melhoria da microestrutura, resultante da propriedade pozolânica do pó de vidro.

Figura 10. Resistência à compressão (GP1=subproduto industrial derivado da derivado da fibra de vidro; GP2= subproduto industrial derivado da derivado do vidro reciclado; FA=cinza volante 20%)



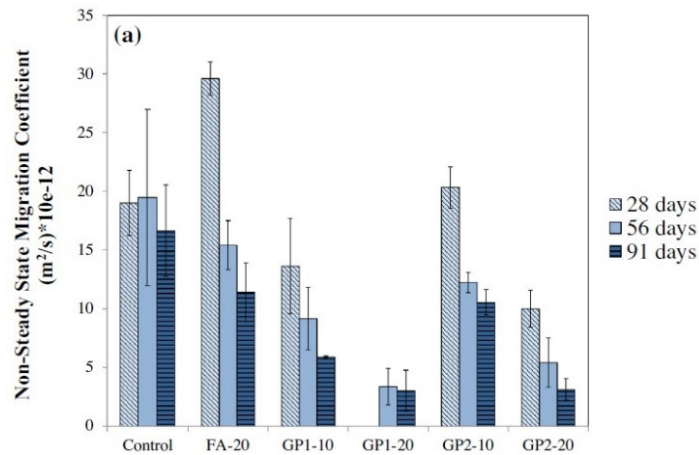
Fonte: Kamali (2015)

Figura 11. Carga passante total (GP1=subproduto industrial derivado da derivado da fibra de vidro; GP2= subproduto industrial derivado da derivado do vidro reciclado; FA=cinza volante 20%)



Fonte: Kamali (2015)

Figura 12. Coeficiente de difusão regime não estacionário (GP1=subproduto industrial derivado da derivado da fibra de vidro; GP2= subproduto industrial derivado da derivado do vidro reciclado; FA=cinza volante 20%)



Fonte: Kamali (2015)

Caijun e Zheng (2007) apontaram que resíduos de vidro podem ser utilizados como matérias-primas de fontes silicosas para a produção de cimento. No entanto, irá aumentar o teor de líquido no clínquer, resultando na formação de alguns compostos e no aumento no conteúdo de álcalis no cimento. O efeito será dependente da quantidade de resíduos de vidro utilizado.

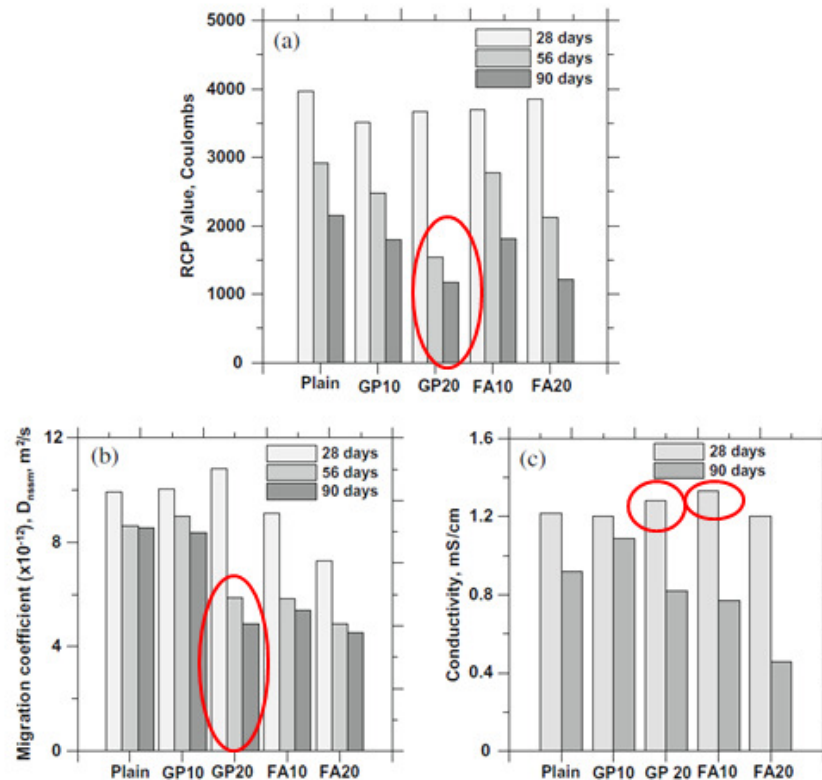
Segundo os autores, o pó de vidro apresenta boa reatividade pozolânica e pode ser usado como substituto ao cimento. Como esperado, o aumento da reatividade pozolânica aumentou com o aumento da finura da partícula de vidro. Os álcalis no pó de vidro podem causar reação e expansão álcali-agregado se os agregados são alcalino-reativos. Os resultados dos testes ASTM C 1260 indicaram que a expansão de reação álcali-agregado diminuiu com o aumento da substituição do vidro, e ficará sob o limite deletério se a substituição de vidro é superior a 50%. De acordo com o autor, a utilização combinada de outros materiais suplementares, tais como cinzas volantes, escória de alto forno e metacaulim pode também diminuir a expansão de reação álcali-sílica. Sal de lítio pode ser um aditivo muito eficaz para evitar a expansão da reação álcali-sílica de concretos que continham pó de vidro.

Hwee e Hongjjan (2013) constataram que a forma irregular e menor densidade das partículas de vidro resultaram em maior teor de ar e menor densidade, independentemente da cor de vidro. O uso de areia de vidro na argamassa resultou em menores resistências à compressão, flexão e diminuição da resistência à tração e módulo de elasticidade em virtude de uma ligação enfraquecida na zona de transição interfacial entre as partículas de vidro e a pasta de cimento. No

entanto, a capacidade de absorção de água desprezível das partículas de vidro conduziu a uma melhor estabilidade dimensional e, portanto, menor retração por secagem. Além disso, devido à existência de microfissuras, como resultado do processo de moagem, o agregado de vidro claro apresentou menor desempenho mecânico. A substituição de areia natural por partículas de resíduos de vidro levou a uma maior resistência à penetração de íons cloretos.

Hwee e Hongjian (2013) (Parte 2) relatam que devido às microfissuras nas partículas de vidro claro durante o processo de moagem, argamassas com areia de vidro transparente apresentaram maiores expansões em virtude de reações álcali-sílica (RAS). Segundo os autores o efeito encontrado será potencialmente prejudicial se as partículas de vidro transparentes forem usadas para substituir mais do que 50% de areia natural. Por outro lado, as argamassas de vidro de areia verde e castanho provaram ser inofensivas, independentemente do nível de substituição, devido à insignificante ou ausência de microfissuração. Além disso, a expansão RAS diminuiu com o menor tamanho areia de vidro, devido à reação pozolânica de partículas de vidro finas. A cinza volante e a areia de vidro verde foram os mais eficazes métodos supressores de RAS, uma vez que poderiam reduzir a alcalinidade na solução dos poros e diminuir a porosidade e a permeabilidade da pasta de cimento, controlando, assim, o mecanismo de RAS. A adição de fibras de aço ou compostos de lítio foram menos eficazes. Ao utilizar materiais de cimento suplementares, a expansão RAS na areia de vidro transparente pode ser reduzida para abaixo dos limites aceitáveis, ou seja, 0,1% em 14 dias.

Figura 13. Penetração de cloretos, migração iônica e condutividade (GP:resíduo de vidro; FA:cinza volante)



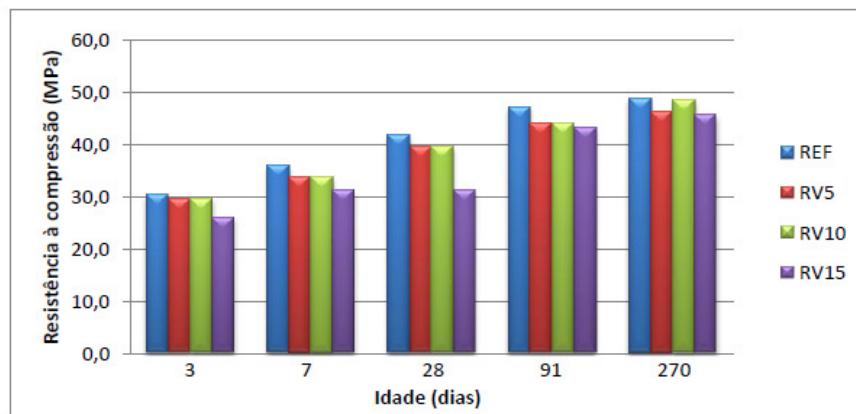
Fonte: Hwee e Hongjian (2013)

Pignaton (2012) pesquisou a utilização de resíduo proveniente da estação de tratamento de efluentes do processo de lapidação de vidros sodo-cálcicos como substituto parcial ao cimento na produção de concretos. As substituições em massa do cimento pelo resíduo empregado na forma de pó, com granulometria aproximada de $38 \mu\text{m}$, seguiram as proporções de 5, 10, 15 e 20%. Os concretos foram submetidos a ensaios de resistência à compressão axial e resistência a tração por compressão diametral nas idades de 3, 7 e 28 dias e de módulo de elasticidade em idade superior a 28 dias. As misturas com a maior quantidade de resíduos (substituição parcial do cimento em 20%) apresentaram redução da resistência mecânica em torno de 8% aos 28 dias, exceto pelo módulo de elasticidade, que apresentou sensível tendência de aumento com os maiores teores de substituição. Segundo a autora, ainda assim, as resistências obtidas atendem à normatização brasileira vigente para concretos de finalidade estrutural.

Jordoni (2013) investigou a potencialidade do uso do resíduo de vidro laminado proveniente dos vidros de pára-brisas de automóveis como substituto parcial ao cimento, enfocando as propriedades mecânicas dos concretos produzidos com diferentes percentuais de substituição. As

proporções de substituições em massa estabelecidas foram de 5, 10 e 15%. No estado endurecido, os concretos foram submetidos aos ensaios de resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral, módulo de elasticidade e microscopia eletrônica de varredura. Os resultados mostraram uma redução nos resultados de resistência à compressão e resistência à tração por compressão diametral à medida que os teores de substituição aumentavam e o consumo de cimento diminuía. Os resultados obtidos no ensaio de determinação do módulo de elasticidade para os concretos com resíduo não apresentaram diferenças significativas quando comparados com os resultados do concreto de referência. A análise microestrutural permitiu verificar a formação de C-S-H em função das reações pozolânicas e a diminuição dos poros em idades mais avançadas.

Figura 14. Resistência à compressão



Fonte: Jordoni (2013)

Sauer (2013) avaliou o potencial de aplicação do resíduo de vidro laminado de pára-brisas em argamassas de recuperação estrutural, analisando a influência da variação do percentual de substituição (em massa) do cimento por este resíduo (7%, 13%, 20% e 26%). A argamassa com 7% de substituição de cimento por resíduo de vidro apresentou os melhores resultados quanto ao desempenho mecânico, com valores próximos aos encontrados para a argamassa referência. A permeabilidade das argamassas tende a diminuir com o aumento do teor de substituição, sendo que a argamassa com 26% de substituição apresentou os menores valores de absorção por capilaridade. Entretanto, a incorporação do resíduo de vidro tornou a estrutura das argamassas mais porosa, mas o tamanho dos poros foi reduzido, havendo indícios da formação de C-S-H adicional por meio de reações pozolânicas.

2.1.1.1. Avaliação da utilização de resíduo de vidro em concretos com relação à resistência a agentes agressivos e à prevenção de manifestações patológicas.

Em face das pesquisas diversas abordando a utilização de resíduos de vidro em concretos sob a ótica da durabilidade, verificam-se resultados no que tange aos principais agentes promotores do decréscimo da vida útil das estruturas de concreto. Neste contexto, pode-se ressaltar a resistência à penetração de íons cloretos, o avanço da frente de carbonatação, e a resistência à reação álcali-sílica.

2.1.1.1.1. Resistência à penetração de cloretos

Considerado como um dos agentes principais responsáveis pelo surgimento das manifestações patológicas em estruturas de concreto os íons cloreto, ao ingressarem o material, podem favorecer processos corrosivos nas armaduras, rompendo o filme de passivação e comprometendo a capacidade de carga do elemento estrutural.

A execução de concretos com elevada compacidade tende a promover maior resistência ao ingresso desses agentes agressivos e a adoção de componentes adicionais - exemplo: pozolânas - tende a potencializar mecanismos de autocicatrização autógena, melhorando assim, a microestrutura desses materiais.

Neste contexto, torna-se relevante a adoção de ensaios acelerados para a previsão da resistência à penetração de cloretos, como o Teste Rápido da Permeabilidade aos Íons Cloretos - Rapid Chloride Permeability (ASTM C-1202, 2012), que se destaca em virtude de sua larga escala de utilização e por avaliar a resistência à penetração de cloretos de maneira rápida e simplificada.

Face ao exposto, podem ser citados Kamali e Ghahremaninezhad (2015) que estudaram a utilização de resíduos de vidro em substituição ao cimento nos percentuais de substituição de 5%, 10%, 15% e 20% e constataram a redução da permeabilidade a cloretos, em relação ao concreto de referência, em todas as idades. Verificaram também redução dos valores conforme se aumentava a substituição de cimento por resíduo de vidro em níveis crescentes. Segundo os autores, a redução nos valores pode ser explicada pela melhoria microestrutural no concreto, proporcionada pelas reações pozolânicas. Este comportamento também foi constatado por Cassar e Camilleri (2012), apontando que os concretos que contemplavam 10 e 20% de substituição de

cimento por pó de vidro exibiram maior resistência à penetração de íons cloreto em comparação aos de referência, independentemente da relação água/cimento.

Matos e Sousa-Coutinho (2012) identificaram que, apesar do resíduo de vidro apresentar um conteúdo alcalino alto – fato que poderia afetar os resultados obtidos por meio de ensaios acelerados de migração – a sua utilização como substituto parcial ao cimento em argamassas melhorou a resistência à penetração de cloretos e ainda melhorou a resistência a sulfatos, sem comprometer a resistência à compressão.

Schwarz et al. (2008) relataram que em 28 dias a resistência à compressão em concretos com 10% de resíduo de vidro, em substituição ao cimento, foi superior à resistência em concretos com cinzas volantes, no mesmo nível de substituição. Os valores de permeabilidade aos cloretos (ASTM C 1202, 2012) dos concretos modificados foram inferiores aos valores dos concretos de referência.

Jain e Neithalath (2010) constataram que concretos modificados com pó de vidro apresentaram valores inferiores de penetração de cloretos em comparação com concretos com cinza volante, utilizando-se o mesmo percentual de substituição ao cimento. As misturas com 20% de substituição do cimento por pó de vidro apresentam valores inferiores de penetração de cloretos do que aquelas com 10% de substituição ao cimento. Shayan e Xu (2006), constataram que a penetração de íons cloretos em concretos com resíduos de vidro com substituição ao cimento de 20% e 30% foi significativamente inferior aos concretos de referência, e análoga ou inferior às amostras que continham sílica ativa.

Com relação, de modo específico, à utilização de resíduos de vidro em concretos em substituição ao agregado miúdo, há controvérsias com relação ao seu benefício. Algumas pesquisas apontam benefício com relação a sua utilização (CHEN et al, 2006, DU e TAN ,2014), entretanto outras apontam prejuízo (CASTRO e BRITO, 2013; SU e SHEN, 2002). Sendo assim, no que tange à resistência à penetração de cloretos a utilização de resíduos de vidro é recomendada para a utilização em concretos como substituto parcial ao cimento, entretanto, com relação à substituição ao agregado miúdo, não há parecer favorável de consenso.

2.1.1.1.2. Resistência a reações álcali-sílica (RAS)

Reações álcali-sílica são mecanismos de degradação das estruturas de concreto. Este tema tem provocado discussões diversas em função da agressividade dos danos que podem ocorrer e pelo pouco conhecimento de suas causas na prática da construção civil. O fenômeno ocorre, principalmente, em virtude de fenômenos expansivos nos concretos causados pelas reações entre álcalis do cimento e agregados reativos.

Kamali e Ghahremaninezhad (2015) pesquisaram a utilização de resíduos de vidro em concretos em percentuais de substituição ao cimento de 5%, 10%, 15% e 20% e constataram que concretos com resíduos de vidro e cinzas volantes apresentam redução na expansão induzida por reação álcali-sílica, sendo que as argamassas com 20% de substituição foram as mais eficazes. De acordo com Matos e Sousa-Coutinho (2012) a utilização de materiais cimentícios suplementares (como cinzas volantes, escória de alto forno e metacaulim) pode reduzir o efeito deletério de expansão por RAS. Isto se atribui à redução de concentrações de hidróxido de cálcio na solução dos poros, como resultado de reações pozolânicas, resultando em densificação da microestrutura e favorecendo menor mobilidade de álcalis, bem como a redução de álcalis disponíveis na solução dos poros. Soma-se ainda a redução de álcalis em decorrência da substituição parcial do cimento. Ainda conforme os autores, sal de lítio também pode ser capaz de prevenir a expansão por RAS.

Conforme Saccani e Bignozzi (2010), a composição química do vidro influencia no comportamento da expansão de argamassas contendo resíduos de vidro. Neste contexto, é necessário identificar as composições dos diferentes tipos de vidro e fazer um controle do processo de tratamento pós-consumo, a fim de evitar manifestações patológicas inesperadas e indesejadas no concreto.

Hwee e Du (2013) verificaram as propriedades relacionadas com a durabilidade de resíduos de vidro utilizados como agregados miúdos em concretos em percentuais de substituição de 0%, 25%, 50%, 75% e 100% em diferentes cores: verdes, castanhos, transparentes e misturados. Os resultados indicaram que, devido às microfissuras nas partículas de vidro transparentes durante o processo de esmagamento, as argamassas com resíduos de vidro transparentes apresentaram maiores expansões induzidas por reação álcali-sílica. Por outro lado, as argamassas contemplando resíduos de vidro verdes e castanhos provaram ser inofensivas,

independentemente do nível de substituição, devido à insignificante ou ausência de microfissuração. Além disso, a expansão por RAS diminuiu com a diminuição da dimensão das partículas de vidro, devido ao desenvolvimento de reação pozolânica. A utilização de cinza volante e resíduos de vidro verde foram os mais eficazes métodos supressores de RAS, uma vez que poderiam reduzir a alcalinidade na solução dos poros, diminuir a porosidade e a permeabilidade da pasta de cimento. Conforme os autores, concluiu-se que os vidros verdes e castanhos não apresentam risco para expansão por RAS.

Segundo Shayan e Xu (2006), a utilização de micropartículas de vidro tende a inibir a reação álcali-sílica. Sendo assim, indica-se que os álcalis presentes no vidro em quantidade superior à indicada para materiais pozolânicos não contribuem necessariamente para a ocorrência de RAS. Justifica-se este comportamento, pois os álcalis tendem a ficarem encapsulados nos géis da pasta, impedidos de reagir e, ainda, o alto teor de sílica seria contornado pelo fato de que a alta superfície específica e a amorficidade fazem com que a sílica presente no vidro reaja com o hidróxido de cálcio logo nas primeiras idades, não sobrando sílica para reações posteriores.

2.1.1.1.3. Análise de percentuais de substituição ao cimento e dimensões de partículas mais adequadas visando à elevação da vida útil de concretos com resíduo de vidro.

a) Percentuais mais adequados

Schwarz et al. (2008), investigaram a utilização de 5%, 10% e 20% de resíduos de vidro (72% de material passante em 45 μm) como substitutos parciais ao cimento e constataram 10% como a porcentagem ótima de utilização de resíduos de vidro, baseando-se em resultados de resistência à compressão. Verificaram também que concretos com resíduos de vidro conduziram a uma resistência à compressão inicial mais elevada que concretos com cinzas volantes, porém aos 90 dias a tendência se inverte, embora a diferença seja de apenas 5%. Com relação aos resultados de durabilidade, os benefícios melhoraram com a crescente adoção dos percentuais. Constataram também que misturas com pó de vidro são tão eficientes quanto cinzas volantes quando compõem um nível de substituição de 20%.

Matos e Sousa-Coutinho (2012) investigaram o uso de diferentes porcentagens de resíduo de vidro (10% e 20%) como substitutos parciais ao cimento, podendo-se constatar redução da resistência à compressão. Entretanto, observou-se redução na expansão por reação álcali-sílica.

Shi et al. (2005) estudaram a morfologia, a finura e a atividade pozolânica de quatro tipos de pó de vidro e verificaram que a substituição de 20% de cimento por resíduo de vidro, com dimensões de partículas inferiores a 100 μm , podem desenvolver resistência à compressão superior que 100% de cimento em 28 dias e, ainda, redução da reação por álcali-sílica. Em estudos anteriores Shi et al. (2004) constataram que um mínimo de 50% de substituição de cimento com esta mesma dimensão de partícula é necessário para controlar a expansão deletéria de argamassas com agregados reativos.

Shao et al. (2000) verificaram resistência a compressão mais elevada em comparação com cinzas volantes em concretos utilizando resíduos de vidro contemplando 30% de substituição ao cimento e dimensões inferiores a 38 μm , porém apresentaram resultados inferiores à utilização de sílica ativa.

Wang e Huang (2010) observaram que quando o percentual de resíduo de vidro é aumentado para 30% a quantidade de penetração de íons cloreto é reduzida e a durabilidade de concretos auto-adensáveis com resíduos de vidro é melhorada. Aos 90 dias, com uma substituição de vidro de 30%, a resistência à compressão atingiu 98,4% de resistência à compressão do grupo de referência.

Pereira-de-Oliveira et al. (2012) constataram que em termos de quantidade de substituição de cimento, 30% de cimento pode ser substituído por dimensões de partículas inferiores a 75 μm , sem qualquer efeito prejudicial causado pela expansividade induzida pela reação álcali-sílica.

b) Análise de dimensões de partículas mais adequadas

Sabe-se que ao reduzir as dimensões das partículas dos resíduos de vidro aumentam-se suas propriedades pozolânicas, proporcionando assim, melhoria nas propriedades mecânicas de concretos em idades tardias, principalmente a partir de 56 dias, e ganho de durabilidade na medida em que favorecem a redução da porosidade do concreto e a suscetibilidade a agentes agressivos.

Meyer et al. (1996) constataram que as propriedades pozolânicas de resíduos de vidro são notáveis em tamanhos de partículas inferiores a 300 μm e a expansão induzida por reação álcali-sílica pode ser reduzida. Shao et al. (2000) verificaram que se os resíduos de vidro forem moídos

em dimensões de partículas inferiores a 75 μm o efeito da expansibilidade por RAS não ocorre. De acordo com Schwarz et al. (2008) dimensões de partículas inferiores a 100 μm podem ter reatividade pozolânica maior do que de cinzas volantes em níveis baixos de substituição ao cimento e após 90 dias de cura. Soma-se a isto que, de acordo com Shi et al. (2005), resíduos de vidro com dimensões de partículas inferiores a 50 μm podem suprimir RAS.

Conforme Matos e Sousa-Coutinho (2012), dimensões de partícula abaixo de 100 μm podem ter efeito pozolânico e reatividade maior do que cinzas volantes a baixa porcentagem de substituição do cimento após 90 dias de cura. De acordo com Shi e Zheng (2007), resíduos de vidro exibem boa reatividade pozolânica e podem ser utilizados como substitutos parciais ao cimento e, ainda, seus efeitos pozolânicos aumentam com o aumento da finura da partícula.

Shao et al. (2000) estudaram o efeito do tamanho das partículas de resíduos de vidro sobre as propriedades dos concretos utilizando um percentual de 30%, como substitutos parciais ao cimento. Diferentes tamanhos foram estudados, 150 μm , 75 μm e 38 μm . Concluiu-se que a utilização de 30% de substituição ao cimento com um tamanho de 38 μm pode melhorar as propriedades de concretos. Indicou-se ainda que partículas com dimensões de 38 μm e tempos de cura de 90 dias eram necessárias para se obter uma resistência equivalente a uma mistura contendo apenas cimento. Pereira-de-Oliveira et al. (2012) determinaram a influencia de pó de vidro contemplando diversas dimensões de partículas (0 - 45 μm ; 45 μm - 75 μm e 75 μm - 100 μm) em argamassas. As misturas foram executadas por meio da substituição de 0%, 20%, 25%, 30% e 40% do cimento. Concluiu-se que argamassas com partículas de vidro entre 45 μm e 75 μm tendem a melhorar a resistência à compressão por favorecerem uma matriz mais densa e são menos suscetíveis à reações expansivas tais como RAS.

Hwee e Du (2013) constataram que a relação entre a expansão por RAS e a dimensão da partícula de resíduo de vidro é significativa. Com base nos resultados, pôde constatar que a expansão induzida por RAS diminui com pequenas partículas de vidro, desde que sejam mais finas do que 2,36mm.

Castro e Brito (2013) verificaram que as dimensões das partículas afetam a trabalhabilidade do concreto. Segundo os autores, misturas com agregados de vidro são totalmente viáveis, apesar de existirem algumas diferenças no desempenho em função das dimensões das partículas destes materiais utilizados para substituir o agregado natural. Verificou-se que, na maioria dos casos, o

agregado de vidro não altera de maneira relevante as propriedades relacionadas com a durabilidade do concreto.

Face ao exposto, pesquisas apontam que em dimensões de partículas adequadas, menores que 100 μm , a utilização de resíduos de vidros em concretos como substitutos parciais ao cimento podem favorecer ganho nas propriedades relacionadas com a durabilidade. A Tabela 2 apresenta as dimensões de partículas utilizadas em distintas pesquisas e os benefícios de sua utilização.

Tabela 2. Efeitos da utilização de resíduos de vidro em concretos em distintas dimensões de partículas

Dimensão das partículas	Percentuais adotados	Resistência à compressão (após 56 dias)	Resistência à Reação álcali-sílica	Resistência à Penetração de cloretos	Pesquisadores
$\leq 100 \mu\text{m}$	5%, 10% e 20%	↓	↑	↑	Schwarz et al. (2008)
$\leq 75 \mu\text{m}$	10% e 20%	↓	↑	↑	Matos e Sousa-Coutinho (2012)
Dimensão média de 20 μm	10% e 20%	↑	↑	↑	Matos (2010)
Dimensão média de 13 μm	20%	↑	↑	↑	Nassar e Soroushian (2012)
Dimensão média de 8,4 μm	5%, 10% e 20%	↑	↑	↑	Kamali e Ghahremaninezhad (2015)

Fonte: Produção do autor

Verificam-se ganhos nas propriedades relacionadas com a durabilidade com a utilização de partículas contemplando dimensões inferiores a 100 μm . Entretanto, com relação à resistência mecânica, constata-se benefícios em concretos contemplando resíduos de vidro com dimensões inferiores, a partir de 20 μm . Torna-se possível também notar a relação existente entre menores dimensões de partículas e índices de atividade pozolânica, conforme Tabela 3.

Tabela 3. Tamanho das partículas de vidro e índice de atividade pozolânica

Pesquisadores	Dimensão das partículas	Índice de atividade pozolânica
Shi et al. (2005)	$\leq 60 \mu\text{m}$	92 e 110%
Paiva (2009)	Dimensão média de $5 \mu\text{m}$	104%
Matos (2010)	Dimensão média de $20 \mu\text{m}$	96 e 103%
Matos e Sousa-Coutinho (2012)	$\leq 75 \mu\text{m}$	97 e 103%
Pereira-de-Oliveira et al. (2012)	$\leq 75 \mu\text{m}$	85%
Khmiri et al. (2012)	$\leq 40 \mu\text{m}$	82%
Sauer (2013)	$\leq 75 \mu\text{m}$	86%
Sales (2014)	Dimensão média de $9,5 \mu\text{m}$	86%

Fonte: Produção do autor

2.1.1.2. Dados conclusivos acerca das pesquisas

Após as idades de 56 e 90 dias de cura, resultado de reações pozolânicas, as estruturas de concreto, com a substituição do cimento por vidro em 20%, apresentaram valores mais baixos de penetração de cloretos do que aquelas com os percentuais de 10%.

Mesmo com uma condutividade ligeiramente mais elevada, devido à presença de um teor alcalino elevado em pó de vidro, concretos com estes materiais demonstraram valores inferiores de carga passante comparado com cinzas volantes na mesma reposição.

Partículas de tamanho de $38 \mu\text{m}$ foram consideradas ideais para a utilização em concretos com atividades pozolânicas. Tamanhos maiores foram relatados como ineficazes.

Concretos com 10% e 20% de vidro em substituição ao cimento exibiram uma elevada resistência à penetração de cloretos.

Resíduos de vidro têm potencial de serem utilizados em concretos em substituição a pozolanas tradicionais como a cinza volante e a sílica ativa

Resíduos de vidro, utilizados como substitutos ao cimento, apresentaram valores inferiores de resistência aos 14 dias em relação a concretos de referência. Aos 56 dias, esta tendência inverte-se e a substituição parcial de cimento beneficia a resistência a compressão do concreto.

Percentuais comumente adotados em pesquisas envolvendo a utilização de pó de vidro em substituição parcial ao cimento: 10% e 20%.

A utilização combinada de outros materiais cimentícios suplementares, tais como cinzas volantes, escória de alto forno e metacaulim, podem diminuir a expansão por reação álcali sílica.

A profundidade de carbonatação para todas as misturas de cimento e pó de vidro é maior do que a mistura apenas com cimento Portland.

Apesar dos vidros apresentarem um teor de alcalis alto, o uso de vidro moído como substituto parcial ao cimento na argamassa melhora a resistência à penetração de cloretos (migração) e resistência ao ataque de sulfatos sem comprometer a resistência.

O nível ótimo de substituição de cimento por pó de vidro é de 10% (propriedades mecânicas e relacionadas com a durabilidade).

Existe uma melhoria global em termos de resistência à carbonatação de concretos com pó de vidro para longo prazo (56 e 91 dias), mas aos 7 e 28 dias a profundidade de carbonatação é maior nessas misturas.

2.1.2. Metacaulim

O metacaulim tem sido utilizado em outros países em concretos a cerca de 30 anos. No Brasil apresenta utilização comercial desde 2002. Produzido a partir do caulim, mineral existente em algumas regiões do Brasil, pontua-se como uma das poucas pozolanas que provém de processo de produção específico para este fim, não sendo um resíduo industrial como outras.

O produto metacaulim é constituído principalmente por compostos à base de sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3) na fase amorfa (vítrea), proporcionando alta reatividade com o hidróxido de cálcio presente no concreto. Este produto é recomendado para uso em concretos de cimento Portland devido às suas características físicas e químicas que melhoram as propriedades mecânicas dos concretos. Sendo um silicato de alumínio, o metacaulim é ainda recomendado em diversas aplicações na indústria de refratários, cerâmica, siderúrgica, química e outras.

O metacaulim é um material amorfo (de estrutura cristalina desordenada) e reativo derivado do argilomineral caulinita quando submetido a tratamento térmico entre 600° C e 900° C.

2.1.2.1. Utilização do Metacaulim em benefício do ganho de desempenho e de durabilidade em estruturas de concreto.

A utilização de metacaulim visa promover concretos de alto desempenho a partir de suas reações pozolânicas e redução da porosidade e permeabilidade. A redução da permeabilidade do concreto propicia maior resistência ao ingresso de agentes agressivos e mitigação dos efeitos deletérios.

A substituição de parte do cimento por metacaulim proporciona mitigação de impactos ambientais em função da redução de emissões de CO₂ correspondente ao clínquer da mistura. Diminui-se a demanda pelo cimento e conseqüentemente a emissão de CO₂, pois sua composição é a base de sílica (SiO₂) e alumina (Al₂O₃), diferente do cimento que tem como base compostos de cálcio constituído por carbono, que liberam CO₂ na produção.

É importante ressaltar que para cada tonelada de cimento Portland fabricada é gerada aproximadamente a mesma quantidade de CO₂, em contraste a produção do Metacaulim gera, durante a calcinação, vapor de água e uma areia quartzosa, usada como agregado miúdo.

Muitos pesquisadores têm voltado suas pesquisas ao estudo dos efeitos da utilização de metacaulim em concretos, visto os benefícios ambientais e tecnológicos que favorecem. Dentre os principais pesquisadores ao redor do mundo podem ser destacados, conforme Lacerda (2005):

Quadro 2. Principais pesquisadores envolvendo a utilização de metacaulim em concretos

Pesquisador	Centro de Pesquisa	País	Assunto
Andrea Boddy	Universidade de Toronto	Canadá	Durabilidade
C. S. Poon, L. Lam, S.C. Kou, Y.L. Wong.	Univ. e Politécnica de Hong Kong	China	Reação pozolânica
M.S. Morsy, A.F. Galal	Centro de Pesquisa de Edificação	Egito	Microestrutura
A. Palomo, F. Puertas, T. Vasquez, M. Frias, M.I. Sanchez de Rojas	Instituto Eduardo Torroja (CSIC)	Espanha	Química das reações Calor de hidratação
W. Aquino, D Lange	Universidade de Ilinóis	EUA	Reação álcali-sílica
J. Olek	Universidade Pudue	EUA	Reação álcali-

Pesquisador	Centro de Pesquisa	País	Assunto
			sílica
E. Moulin, P. Blanc, D. Sorrentino	Laboratório Central de Pesquisa da Lafarge	França	Química do cimento e adições
Vagelis G. Papadakis	Universidade de Patras	Grécia	Reações químicas e modelagem teórica
S. Pagliolico	Politécnico de Torino	Itália	Resistência mecânica
Joaquim Sampaio	Universidade do Porto	Portugal	Resistência mecânica e durabilidade
J.J. Brooks, M. Megat Johari	Universidade de Leeds	Reino Unido	Retração e fluência
S. Wild, J. M. Khatib e A. Jones	Universidade de Glamorgan	Reino Unido	Reatividade pozolânica e resistência mecânica

Fonte: Lacerda (2005)

Lacerda (2005) investigou concretos com a utilização de metacaulim em substituição ao cimento em percentual de 8% e utilização de sílica ativa também com 8%. A utilização da sílica ativa foi motivada por ser à época a adição mineral mais tradicional e largamente utilizada na obtenção de concretos de alto desempenho, no Brasil e no exterior. Os resultados indicaram que o metacaulim melhora as propriedades do concreto em níveis equivalentes aos da sílica ativa não só com relação à resistência mecânica, como também quanto à resistência à penetração de agentes agressivos.

Barata (2008) investigou a utilização de metacaulim e sílica ativa em concretos com teores de adição de 5%, 10%, 15% e 20% de sílica ativa e 10% de metacaulim. Os concretos com adições minerais apresentaram resultados de resistência à compressão significativamente superiores aos dos concretos sem adição para as misturas com baixo a moderado consumo de cimento (relações água/aglomerante elevadas). Com relação à taxa de absorção capilar e à carga elétrica passante, a incorporação das pozolanas reduziu significativamente a permeabilidade das misturas em todas as relações a/agl estudadas. A resistência à compressão dos concretos com 10% de metacaulim foram similares aos dos concretos com sílica ativa e as taxas de absorção foram ligeiramente superiores, dando indícios da potencialidade deste material como adição mineral.

Medeiros *et al.* (2013) avaliaram a vida útil de concretos de alta resistência com adição de metacaulim e sílica ativa em ambientes marinhos e constatou-se que estes são capazes de reduzir

a carga passante no ensaio de migração de cloretos em 76-80% e 85-88%, respectivamente. A vida útil aumentou em 240% para adição do metacaulim e 440% para adição de sílica ativa (substituição de parte do cimento Portland).

Helene (2008) apresentou os requisitos para concretos resistentes à cloretos e ao avanço da frente de carbonatação e as diretrizes encontram-se resumidas, conforme Quadros 3 e 4.

Quadro 3. Agressividade do meio versus qualidade do concreto

Classe de agressividade	Concreto recomendável
I ou fraca	Efêmero, normal, resistente ou durável
II ou média	Normal, resistente ou durável
III ou forte	Resistente ou durável
IV ou muito forte	Durável

Fonte: Helene (2008)

Quadro 4. Classificação da resistência dos concretos frente ao risco de corrosão das armaduras

Classe de concreto	Classe de resistência (ABNT NBR 8953:2009)	Máxima relação a/c	Deterioração por carbonatação / teor de adições	Deterioração por cloretos / teor de adições
Durável	$\geq C50$	$\leq 0,38$	$\leq 10\%$ de pozolana, metacaulim ou escória de alto forno	$\geq 20\%$ de pozolana ou metacaulim, $\geq 65\%$ de escória de alto forno, aço galvanizado ou inox
Resistente	C35	$\leq 0,50$	$\leq 10\%$ de pozolana ou metacaulim, $\leq 15\%$ de escória de alto forno	$\geq 10\%$ de pozolana ou metacaulim, $\geq 35\%$ de escória de alto forno, aço galvanizado ou inox
	C45			
Normal	C25	$\leq 0,62$	Qualquer	Qualquer
	C30			
Efêmero	C10	Qualquer	Qualquer	Qualquer
	C15			
	C20			

Fonte: Helene (2008)

Badogiannis e Tsvilis (2009) investigaram o efeito do metacaulim em substituição à areia e ao cimento na durabilidade de concretos. Utilizou-se percentuais de substituição de 10% e 20% em

peso do conteúdo do cimento de referência. Foram realizados os ensaios de resistência à penetração de cloretos, permeabilidade ao ar, absorção, porosidade e distribuição do tamanho dos poros. Os resultados indicaram que concretos com a utilização de metacaulim produziram menor permeabilidade e menor penetração de cloretos. Conforme o autor a adição de metacaulim refina o sistema de poros do concreto o que leva a uma diminuição significativa do tamanho dos poros e uma melhor uniformidade da distribuição de tamanho dos poros.

Hassan *et al.* (2012) avaliaram o efeito da substituição do cimento por metacaulim sobre a durabilidade de concreto auto-adensáveis. O efeito de sílica ativa em níveis semelhantes de substituição de metacaulim também foi contemplado para efeito de comparação. Os resultados indicaram que misturas altamente duráveis podem ser produzidas utilizando um teor com uma percentagem ótima de cerca de 20%. Os resultados também mostram que a durabilidade de concretos com elevado teor de metacaulim é maior do que a de concretos contendo sílica ativa.

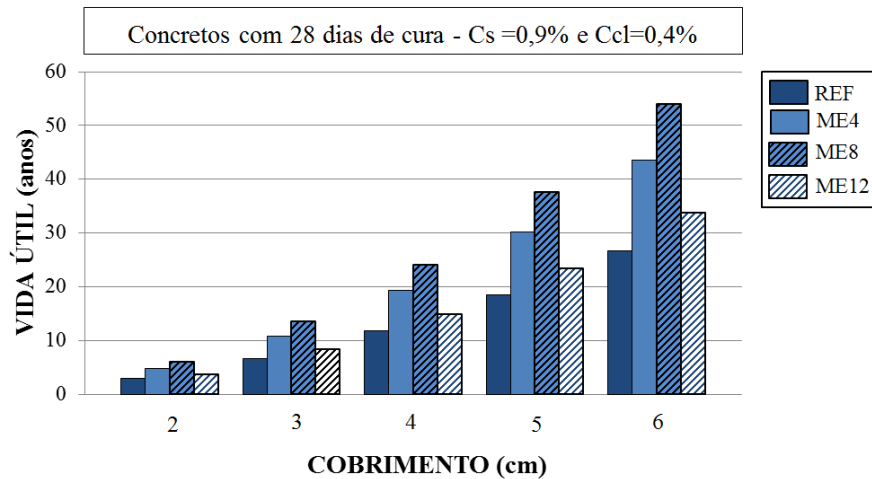
Cassagnabère *et. al* (2013) avaliaram as propriedades reológicas de concretos com metacaulim com taxas de substituição ao cimento de 12,5% e 25% por peso. Os resultados indicaram que a utilização de metacaulim pode produzir diferenças significativas nas propriedades reológicas das argamassas, dependendo das suas propriedades físicas e químicas. Em particular, a natureza e o conteúdo de impurezas do metacaulim são fatores principais que atuam diretamente sobre a morfologia da distribuição da partículas e a demanda de água.

2.1.2.2. Estudo piloto da influência do metacaulim em concretos

Como projeto piloto para esta pesquisa de dissertação foram realizados estudos visando investigar a influência da utilização de metacaulim em concretos. Avaliou-se a resistência à penetração de íons cloreto e a previsão de vida útil. Os seguintes percentuais de substituição em massa por metacaulim foram adotados: 4%, 8% e 12%. Foram realizados ensaios de penetração acelerada de cloretos (ASTM C1202/12) e de aspersão de AgNO_3 para medição de camada contaminada. Após análise efetuada, os resultados demonstraram que a utilização de metacaulim em substituição ao cimento Portland com alto teor de escória de alto forno, pode melhorar as propriedades mecânicas de concretos e elevar a resistência à penetração de íons cloreto. Demonstrou-se também que a utilização de percentual de 8% apresentou-se como o de melhor eficiência, com evolução de resistência mecânica e de resistência à penetração de íons cloreto. A utilização de metacaulim promoveu resistência a agentes agressivos e elevação da vida útil, em

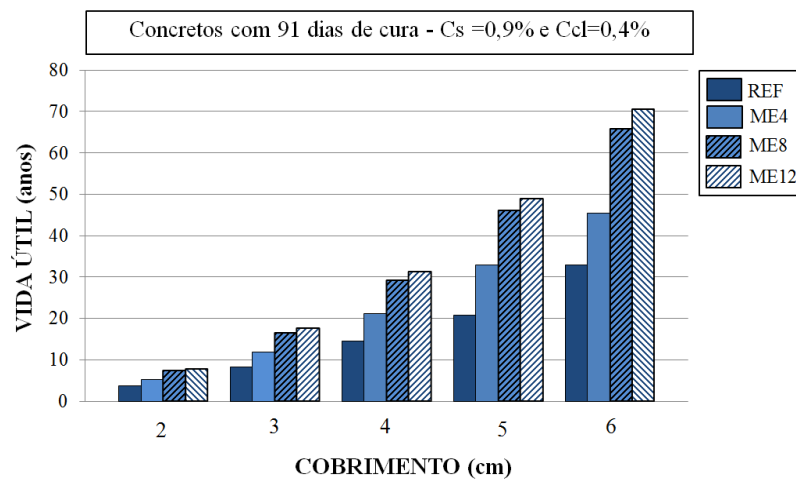
até 100%. Obtém assim benefícios ecológicos, em função de menor utilização de clínquer, mitigando gases de efeito estufa, e econômicos por possibilitar a utilização de menores cobrimentos com a mesma eficiência. As Figuras 15 e 16 apresentam os resultados da estimativa de Vida Útil de Projeto (VUP) pertinentes aos concretos da pesquisa e identificam a elevação de vida útil com a utilização do metacaulim.

Figura 15. Projeto Piloto: Estimativa de vida útil - concretos com período de cura de 28 dias



Fonte: produção do autor

Figura 16. Projeto Piloto: Estimativa de vida útil - concretos com período de cura de 91 dias



Fonte: produção do autor

2.2. Durabilidade, Vida Útil e Desempenho

Conforme Neville (2010), a durabilidade do concreto é uma de suas propriedades mais importantes, pois é essencial que ele seja capaz de suportar as condições para as quais foi projetado durante a vida útil da estrutura.

Sendo assim, torna-se importante definir o termo durabilidade, no contexto das estruturas de concreto. Para efeito, resgata-se o exposto na NBR 6118 (ABNT, 2014) que define durabilidade como a capacidade da estrutura em resistir às influências previstas e definidas em conjunto pelo autor do projeto estrutural e o contratante no início dos trabalhos de elaboração do projeto.

Ainda conforme a supracitada norma, as estruturas de concreto armado devem ser projetadas e construídas de modo que, sob as condições ambientais previstas e quando utilizadas conforme preconizado em projeto, conservem sua segurança, sua estabilidade e sua aptidão em serviço durante o período correspondente à sua vida útil, estabelecida pelo contratante.

Segundo Ribeiro *et al.* (2014) o concreto é considerado durável quando desempenha as funções que lhe foram atribuídas, mantendo a resistência e a utilidade esperada, durante o período previsto.

Mehta e Monteiro (1994) definem durabilidade do concreto de cimento Portland como a sua capacidade de resistir à ação das intempéries, ataques químicos, abrasão ou qualquer outro processo de deterioração; isto é, o concreto durável conservará a sua forma original, qualidade e capacidade de utilização quando exposto ao seu meio ambiente.

Conforme a NBR 15575-1 (ABNT, 2013), a durabilidade do edifício e de seus sistemas é uma exigência do usuário, pois está diretamente associada ao custo global do bem imóvel. A norma explana que a durabilidade de um produto extingue quando ele deixa de cumprir as funções que lhe forem atribuídas, quer seja pela degradação que o conduz a um estado insatisfatório de desempenho, quer seja por obsolescência funcional.

O conceito de durabilidade pode ser mensurado por meio da introdução do conceito de vida útil, correspondendo a um termo operacional que aborda de forma quantitativa a questão da durabilidade das estruturas (ROSTAM, 1994). A vida útil corresponde ao período de tempo,

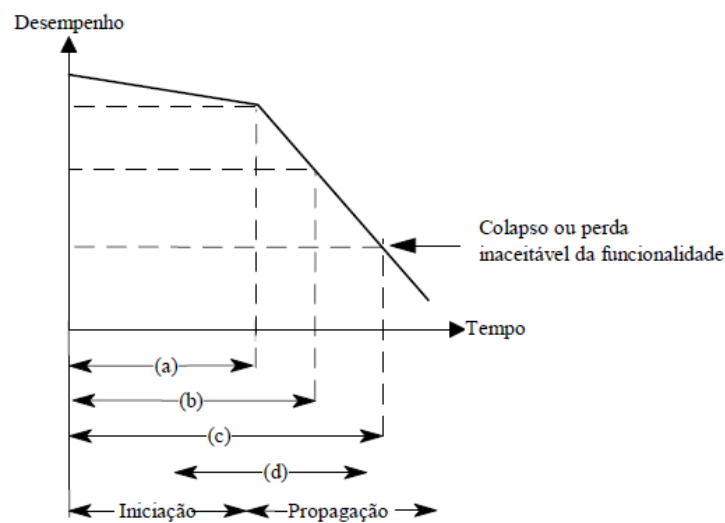
após a instalação de um material, componente ou sistema, em que as propriedades do mesmo permaneçam acima de valores mínimos aceitáveis.

Os modelos de vida útil atualmente propostos consideram a deterioração das estruturas ocorrendo em dois períodos específicos, de acordo com CEB (1993):

- Período de iniciação: nesta fase não há perda de funcionalidade das estruturas, mas parte da camada passivadora foi rompida pela penetração de agentes agressivos. Podem ser citados: avanço da frente de carbonatação, penetração de cloretos, o acúmulo de sulfatos, dentre outros.
- Período de propagação: os fenômenos de degradação ocorrem de maneira efetiva, promovem-se diversos tipos de manifestações patológicas.

Helene (1993) propõe que sejam definidos quatro tipos de vida útil, conforme Figura 17.

Figura 17. Tipos de vida útil



Fonte: Helene (1993)

Vida útil de projeto (a): também denominado por período de iniciação. Os agentes agressivos ainda estão penetrando através da rede de poros das camadas superficiais do concreto e não atingiram níveis de concentrações que possam causar danos à estrutura. O valor usualmente adotado para tal vida útil nas estruturas de concreto armado convencionais é de 50 anos.

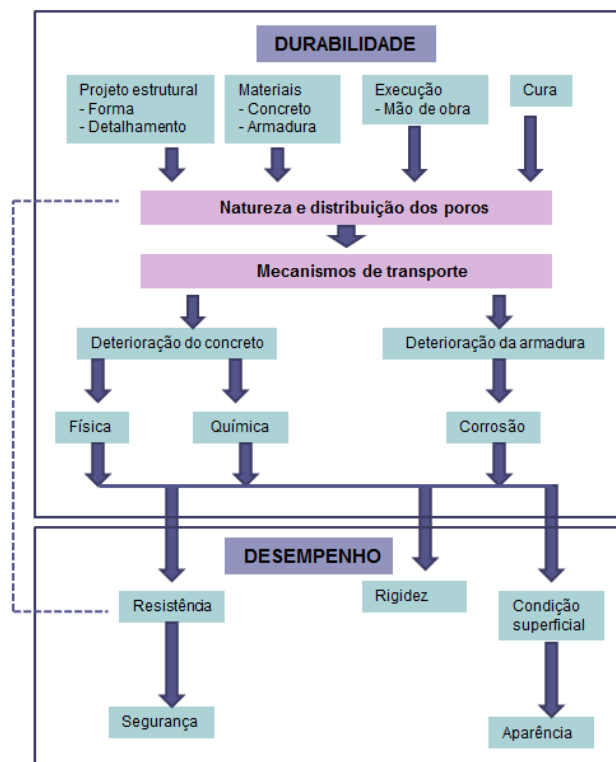
Vida útil de serviço ou de utilização (b): momento em que os efeitos dos agentes agressivos começam a se manifestar originando manifestações patológicas. Vida útil total (c): corresponde à

situação limite de ruptura e colapso parcial ou total da estrutura e Vida útil residual (d): valor correspondente ao período de tempo que a estrutura será capaz de desenvolver as suas funções contado após uma vistoria e/ou uma possível intervenção.

De acordo com Andrade (1997) a durabilidade de uma estrutura pode ser representada pelo binômio desempenho/tempo. No momento de se projetar uma estrutura, deve-se haver a definição da vida útil exigida para a mesma (em função das características do material, do meio ambiente circundante e das condições de utilização quanto dos critérios de desempenho especificados para este período.

Conforme CEB (1992) as relações existentes entre os conceitos de durabilidade do concreto e desempenho das estruturas pode ser representado conforme Figura 18, onde pode ser verificado que a natureza da rede de poros apresenta fundamental relevância para o transporte de agentes agressivos no concreto e, por conseguinte, a suscetibilidade à deterioração tanto do concreto como da armadura determinantes para o seu desempenho.

Figura 18. Relações existentes entre os conceitos de durabilidade do concreto e desempenho das estruturas



Fonte: Adaptado de CEB (1992)

2.3. Mecanismos de Transporte de agentes agressivos

A durabilidade do concreto em muito depende da facilidade com o qual os fluidos, tanto líquidos como gases, podem penetrar no material e deslocar-se no seu interior. Esta característica, conforme Neville (2007), é geralmente, mencionada como permeabilidade do concreto. Este deslocamento depende, basicamente, da estrutura da pasta de cimento hidratado. Face ao exposto, Mehta e Monteiro (1994) salientam que a durabilidade mantém uma relação direta com a estrutura de poros e com as microfissuras da pasta do cimento.

De acordo com Mehta e Monteiro (1994) a água é considerada o principal agente de degradação de materiais, pois é capaz de penetrar em poros extremamente finos, possui elevada temperatura de evaporação e dissolve mais substâncias do que qualquer outro líquido, incluindo íons agressivos que podem causar a decomposição química de materiais sólidos. Os mecanismos de transporte mais importantes são a permeabilidade, a difusão, a absorção capilar e a migração, podendo ainda existir a combinação entre eles.

2.3.1. Permeabilidade

A permeabilidade é definida como o fluxo de um fluído devido a um gradiente de pressão, sendo caracterizada pela facilidade com que esse fluido atravessa um sólido poroso sob uma diferença de pressão (RIBEIRO *et. al.*, 2014 e MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Segundo Neville (2010), a permeabilidade é a facilidade com a qual líquidos ou gases podem se movimentar através do concreto. Esta propriedade é de interesse para a estanqueidade das estruturas destinadas à contenção de líquidos e para o ataque químico.

Ainda de acordo com Neville (2010):

A permeabilidade da pasta de cimento hidratada como um todo é maior devido à presença de poros capilares maiores. Como a porosidade capilar é governada pela relação água/cimento e pelo grau de hidratação, a permeabilidade da pasta de cimento é também, principalmente, dependente desses parâmetros. Para um determinado grau de hidratação, a permeabilidade é menor para pastas de relações água/cimento menores, especialmente abaixo da relação água/cimento próxima a 0,6, na qual os poros se tornam segmentados ou descontínuos. Para uma determinada relação água/cimento, a permeabilidade diminui conforme continua hidratação do cimento e o preenchimento de parte do espaço da água original, sendo a redução da permeabilidade mais rápida quanto menor for a relação água/cimento.

Cascudo (1997) considera que a estrutura porosa da pasta de cimento endurecida é o que influencia decisivamente no transporte de substâncias dentro do concreto, já a distribuição do tamanho dos poros interfere na velocidade do transporte.

Conforme Helene (1986), a permeabilidade da pasta de cimento depende da relação água/cimento e do grau de hidratação do mesmo. A permeabilidade da pasta com 1 dia de idade pode ser dez mil vezes superior à permeabilidade da mesma pasta com 7 dias e cerca de um milhão de vezes maior do que 28 dias. Com 28 dias um cimento Portland comum pode estar ainda com apenas cerca de 70% de fração hidratada, contendo muita água livre e passível de ser transportada por uma forte pressão externa.

Segundo Sousa (1998), a deterioração do concreto pela atuação dos agentes agressivos será tão menor quanto menores forem seus índices de permeabilidade e porosidade. Assim, duas condições principais devem ser satisfeitas: reduzida relação água/cimento e maior tempo possível de impedimento de evaporação da água de hidratação da pasta (cura).

2.3.2. Absorção capilar

Pode-se definir absorção capilar como o fluxo de um fluido devido a um gradiente de umidade. Consiste no transporte de líquidos devidos à tensão superficial atuante nos poros capilares do concreto.

A absorção de água no concreto é um dos fatores mais difíceis de serem controlados. Em princípio, quanto menor o diâmetro dos capilares, maiores as pressões capilares e conseqüentemente, maior e mais rápida a absorção (SOUSA, 1998).

Conforme Helene (1986), reduções na relação água/cimento parecem contribuir para reduzir a absorção capilar (altura da coluna). Em contrapartida, concretos porosos absorvem pouca água por capilaridade, mas acarretam outros problemas insuperáveis de permeabilidade e carbonatação acentuada.

2.3.3. Difusão de íons

Processo no qual ocorre o transporte de substâncias de um meio para o outro devido a uma diferença de potencial químico, muitas vezes de concentração. Caracteriza-se por ser um

processo espontâneo de transporte de massa por efeito de gradientes de concentração, proporcionado por dois diferentes meios em contato íntimo através dos quais as substâncias se difundem para igualar as concentrações.

O supracitado fenômeno ocorre tanto para substâncias presentes em meio líquido como para aquelas em meio gasoso. Os dois principais agentes agressivos que comprometem as armaduras do concreto, os íons cloreto e o dióxido de carbono (CO_2), têm a sua penetração controlada por esse fenômeno (RIBEIRO, 2014).

Neville (1997) define difusão como sendo o deslocamento de um fluido através do concreto, devido a uma diferença de concentração e não de pressão, a difusão é um processo que equilibra as diferentes concentrações.

A difusão de íons cloreto ocorre quando a concentração do lado de fora do concreto é maior do que a do lado de dentro. Havendo umidade suficiente para este movimento, os íons cloreto deslocam-se de regiões de alta concentração (elevada energia) para regiões de baixa concentração (baixa energia).

Pode-se concluir que, conforme Cascudo (1997), a permeabilidade à água e a absorção d'água de um concreto são características que refletem a sua qualidade. Um concreto será de mais baixa qualidade quando ele apresentar maiores índices de permeabilidade e absorção, embora haja o caso de se ter um aumento da absorção capilar, pela diminuição do diâmetro dos capilares, quando se reduz excessivamente a relação água/cimento.

2.3.4. Migração de íons

Conforme Andrade (2001), a movimentação de íons por migração se dá a partir de um estabelecimento de um campo elétrico entre duas partes da estrutura, quando ocorre uma mínima diferença de potencial causada por pequenas e eventuais cargas elétricas (correntes de fuga).

Segundo Helene (1993), consiste no transporte e concentração de íons por meio da ação de um campo elétrico, como aquele gerado pelas células de corrosão eletroquímica.

Medeiros (2008) descreve que o mecanismo de migração consiste na movimentação dos íons provocada por uma diferença de potencial elétrico, de maneira que os íons positivos são atraídos pelo pólo negativo e os íons negativos pelo pólo positivo

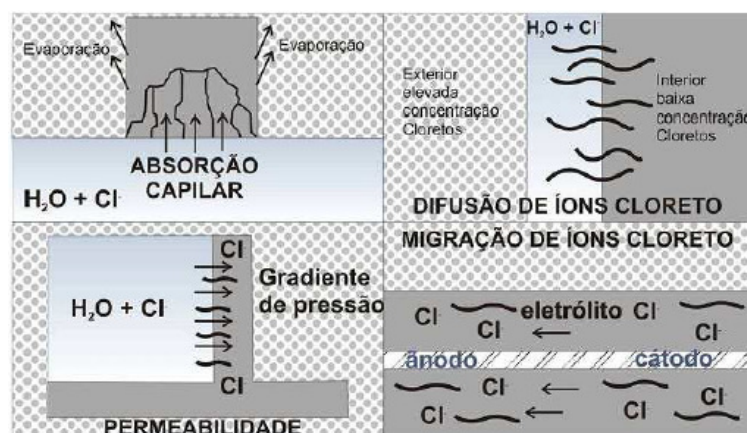
A migração é bem caracterizada no ensaio da ASTM C 1202 que se configura como um dos mais utilizados para avaliar a resistência à penetração de cloretos em concretos. Este procedimento consiste em aplicar uma diferença de potencial de 60V a qual induz os íons cloreto a atravessar a uma fatia de concreto. Neste método há um predomínio do mecanismo de migração iônica, pois a elevada tensão permite desprezar as forças de difusão e com o concreto saturado não existe absorção.

Conforme Cascudo (1997), sendo os cloretos íons com carga elétrica negativa é de se esperar que as ações de campos elétricos promovam uma migração iônica. No concreto a migração pode se dá pelo próprio campo gerado pela corrente elétrica do processo eletroquímico.

Em suma, pode-se afirmar que, na grande maioria dos casos, os mecanismos de transporte dos cloretos presentes no concreto são a absorção capilar e a difusão iônica. A absorção se dá numa camada superficial do concreto, geralmente onde ocorre a molhagem e secagem do cobrimento pela ação das intempéries, mas para o interior do concreto, onde a presença do eletrólito é mais constante, tem se basicamente a difusão (CASCUDO, 1997).

A Figura 19 demonstra, os mecanismos de transporte de íons cloreto nas estruturas de concreto.

Figura 19. Formas de penetração dos íons cloreto no concreto



Fonte: Adaptado de Helene (1993)

2.4. Corrosão de armaduras induzidas por cloretos

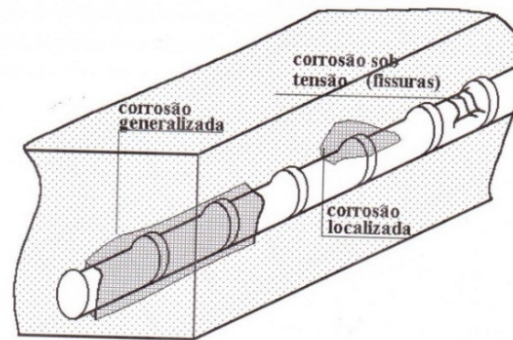
De maneira geral, a corrosão pode ser definida como um processo de deterioração do material devido à ação química e eletroquímica do meio ambiente, resultando na perda de massa do material (RIBEIRO, 2014; SOUSA, 1998).

De acordo com Sousa (1998) no caso das barras de aço imersas no meio concreto, a deterioração é caracterizada pela destruição da película passivante existente ao redor de toda a superfície exterior das barras. Esta película é formada como resultado do impedimento da dissolução do ferro pela elevada alcalinidade da solução aquosa que existe no concreto.

Conforme Sousa (1998), os mecanismos de geração de corrosão, por destruição da camada óxida de revestimento protetor das barras são:

- a) Corrosão por tensão fraturante: é o caso dos aços que são submetidos a grandes esforços mecânicos (protensão) e que, em presença de meio agressivo, podem sofrer fratura frágil, resultando na perda de condição para a sua utilização;
- b) Corrosão pela presença de hidrogênio atômico, que fragiliza e fratura os aços;
- c) Corrosão podendo se revelar segundo duas formas: localizada, caracterizada pela ação de íons agressivos (cloretos, em especial), sempre que haja umidade e presença de oxigênio; generalizada, função da redução do pH do concreto para valores inferiores a 9, pela ação do CO₂ existente no ar atmosférico - transportado através dos poros e fissuras do concreto sobre o cimento hidratado. É a chamada carbonatação. Os três tipos de corrosão são representados na Figura 20.

Figura 20. Tipos de corrosão de uma barra de aço imersa em meio concreto



Fonte: Sousa (1998)

O processo corrosivo é oriundo da necessidade do material em atingir o seu estado de menor energia, que é o seu estado estável.

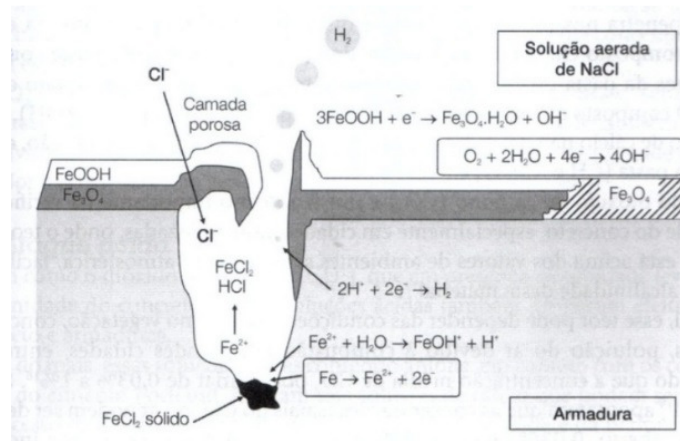
Segundo Ribeiro (2014):

A maioria dos metais é encontrada na natureza na forma de compostos, como óxidos e hidróxidos, já que nessa forma eles apresentam um estado mínimo de energia. Quando esses metais são processados, passam a adquirir o estado metálico, porém ao entrarem em contato com o meio ambiente, passam a reagir espontaneamente, se transformando em composto, que apresenta um menor estado de energia. O ferro, por exemplo, que é o principal componente da armadura de aço utilizada na estrutura de concreto, reage com o meio ambiente, se transformando principalmente em Fe_2O_3 hidratado, conhecido como ferrugem, que apresenta um estado de energia menor e, portanto, mais estável que o do ferro metálico.

Um dos principais agentes causadores da corrosão das armaduras é o íon cloreto, sua corrosão ocorre de forma localizada, rompendo pontualmente o filme de passividade. Esta corrosão é, portanto, do tipo puntiforme ou por pite (Figura 21).

Estas crateras são o ânodo da pilha de corrosão, progredindo em profundidade podendo gerar ruptura pontual das barras (ANDRADE, 1992).

Figura 21. Representação esquemática da corrosão por pite



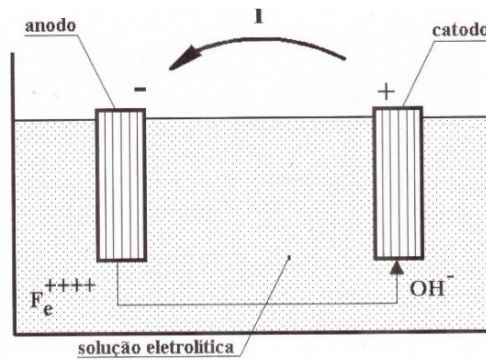
Fonte: Ribeiro (2014)

O efeito dos compostos contendo cloretos na corrosão decorre do fato destes elementos se transformarem em um eletrólito forte, ocasionando, portanto, aumento da condutividade, que é fundamental no mecanismo eletroquímico de corrosão.

O processo de corrosão do aço é eletroquímico (dá-se pela geração de um potencial elétrico, na presença de um eletrólito - solução aquosa existente no concreto em contato com um condutor metálico, a própria barra de aço. A presença de átomos de ferro à superfície aquosa, transformando-se em cátions ferro (Fe^{++}), com o conseqüente abandono da barra de aço à carga negativa, instalam a diferença de potencial (SOUSA, 1998).

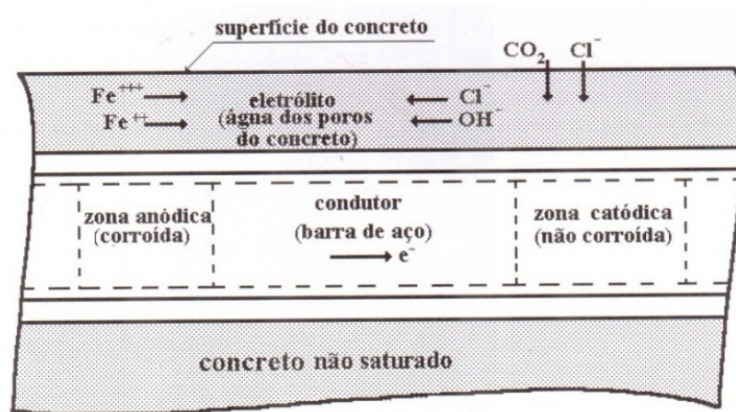
Ainda de acordo com Sousa (1998), desta maneira cria-se um efeito pilha onde a corrosão instala-se pela geração de uma corrente elétrica dirigida do anodo para o cátodo, através da água, e do cátodo para o anodo, através da diferença de potencial (Figuras 22 e 23).

Figura 22. Formação de semipilha em meio de concreto armado



Fonte: Sousa (2014)

Figura 23. Célula de corrosão em meio de concreto armado



Fonte: Sousa (2014)

Segundo Ribeiro (2014), pesquisas indicam que a quantidade de íons cloreto necessária para despassivar uma armadura está relacionada com a concentração de íons hidróxidos presentes nos poros. Fatores como a inexistência de oxigênio dentro dos poros, a elevada resistividade ou a própria qualidade do concreto podem alterar o valor crítico entre as massas de cloretos e de cimento.

Por exemplo, uma pequena variação no pH do concreto pode conduzir a uma enorme variação do número de íons hidróxidos disponíveis dentro dos poros e, conseqüentemente, alterar a relação OH^-/Cl^- . Da mesma forma, concretos com elevada resistividade ou secos não terão água suficiente nos poros para transportar os íons cloretos até a armadura. Por isso mesmo em presença de concentrações muito elevadas de cloretos dentro do concreto, o processo corrosivo tenderá a não ocorrer no caso de o concreto estar seco.

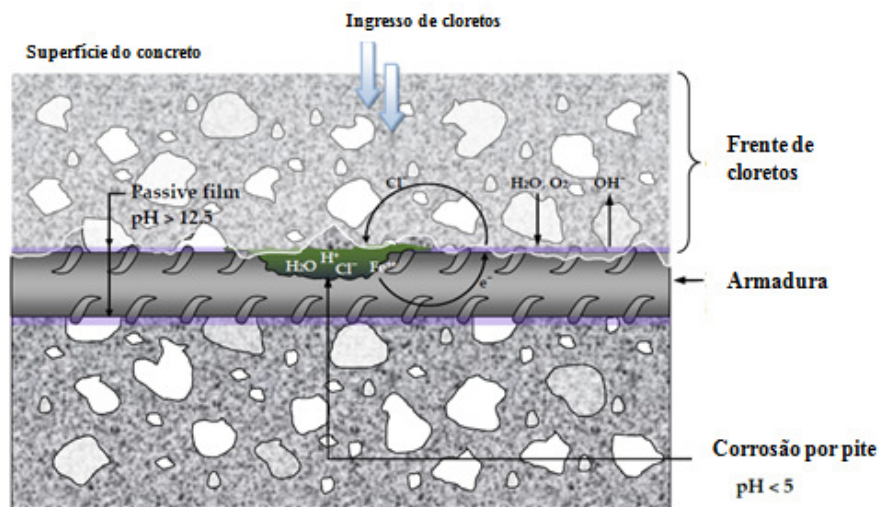
De acordo com Andrade (1992):

O teor de umidade é o fator que mais influi na velocidade de corrosão. Se os poros estão saturados de umidade, ainda que a resistividade seja a menor possível e, portanto, a pilha de corrosão terá seu desenvolvimento muito facilitado, o oxigênio terá primeiro que se dissolver na água para poder alcançar a armadura. Nestas condições diz-se que o processo está controlado pelo acesso de oxigênio, e as velocidades de corrosão não serão as mais elevadas se não moderadas e inclusive muito baixas, como é o caso das estruturas situadas a certa profundidade. Quando os poros contêm pouquíssima umidade, a resistividade é muito elevada e o processo de corrosão fica muito dificultado. Neste caso a velocidade de corrosão será baixa, ainda que o concreto se mostre carbonatado e contaminado de cloretos.

Ainda conforme Andrade (1992), os cloretos podem estar no concreto, seja porque foram adicionados em seus componentes ou porque penetrem desde o exterior através da rede de poros.

O ingresso de cloretos no cobrimento do concreto pode ser melhor compreendido conforme Figura 24, onde se nota a frente de cloretos alcançando a armadura em condições de despassar o filme passivador e causando corrosões pontuais conhecidas como pit.

Figura 24. Formas de penetração dos íons cloreto no concreto



Fonte: Sohawon (2015)

2.5. Estimativa de Vida Útil de Projeto

Estimativas de vida útil são realizadas a fim de se obter medidas quantitativas do conceito de durabilidade. Podem ser realizadas estimativas por meio de modelos matemáticos que verifiquem o tempo do avanço da frente de carbonatação ou da difusão de cloretos em concretos até que se alcance a armadura em concentrações capazes de despássivá-la e de iniciar o período

de propagação, onde se torna suscetível às manifestações patológicas. O período de tempo até que os agentes agressivos percorram a camada de cobrimento do concreto até alcançarem a armadura é considerado como período de iniciação ou vida útil de projeto (VUP).

Há discussões à cerca da concentração limite capaz de despassivar a armadura. Entretanto, normas e pesquisas aproximam do valor limite crítico de cloretos em concreto armado de 0,40% em relação à massa de cimento. Este valor é indicado por EE-88 (Espanha), ENV 206 (Europa), valor próximo à norma americana ACI-318 (0,30%), valor máximo proposto pela NBR 12655 tolerável em condições específicas, dentre outras, conforme Tabela 4.

Tabela 4. Limite máximo de cloretos

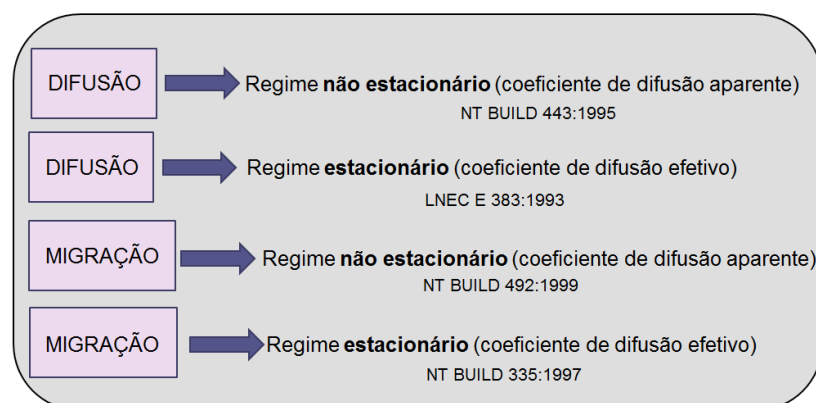
País	Norma	Limite Máximo de Cloretos		Referente a (ao)	
		Concreto armado	Concreto protendido		
Brasil	NBR 6118	0,05%		Água de amassamento	
	NBR 7197		0,05%		
	NBR 9062		0,05%		
	NBR 12655	0,15% (concreto armado exposto a cloretos nas condições de serviço da estrutura) – classe de agressividade III e IV		0,05%	Cimento
		0,30% (concreto armado não exposto a cloretos nas condições de serviço da estrutura) – classe de agressividade II		0,05%	Cimento
		0,40% (concreto armado em brandas condições de exposição (seco ou protegido da umidade nas condições de serviço da estrutura) – classe de agressividade I		0,05%	Cimento
Espanha	EH-88	0,40%		Cimento	
	EP-80		0,10%		
Estados Unidos	ACI-222	0,20%	0,08%	Cimento	
	ACI-201	0,20%	0,08%		
	ACI-318	0,30% ambiente normal			0,06%
0,15% ambiente com cloreto					
1,0% ambiente seco					
Europa	CEB	0,05%	0,025%	Concreto	
	CEB-FIP	0,40%	0,20%	Cimento	
	ENV 206	1,0% concreto simples			0,20%
0,40% concreto armado					
Japão	JSCE SP-2	0,60kg/m ³	0,30kg/m ³	Concreto	

Fonte: Adaptado de Helene (1993)

A fim de melhor compreender os métodos para avaliação do período de iniciação (vida útil de projeto) devem ser considerados modelos matemáticos denominados de até despassivar e após despassivar, conforme Helene (2003). De acordo com Gonçalves (2007), estes métodos podem ser materializados em aparatos experimentais que visam acelerar o processo de transporte de cloretos, por difusão (aumentando a concentração de cloretos) ou por migração de cloretos (utilizando-se a incorporação de corrente elétrica - Gonçalves, 2007).

Estes métodos visam produzir coeficientes de difusão em estado estacionário, parâmetro que caracteriza o transporte de cloretos no concreto em condição de fluxo constante e coeficiente de difusão em estado não estacionário, parâmetro global que considera simultaneamente o transporte de íons cloretos no concreto, assim como a retenção dos mesmos pelas fases sólidas das pastas de cimento (UNE 83987, 2014). A Figura 25 apresenta a relação do mecanismo de transporte com o regime e obtenção do coeficiente de difusão de cloretos.

Figura 25. Esquema de regimes e coeficiente de difusão de cloreto



Fonte: produção do autor

O Quadro 5 apresenta alguns ensaios necessários para obter as medidas de coeficiente de difusão de cloretos.

Quadro 5. Identificação de ensaios e regimes

Difusão	Regime não estacionário – 2ª Lei de Fick por imersão	NT BUILD 443 (NT BUILD, 1995) AASHTO T259 (AASHTO, 2006) ASTM C 1556 (ASTM, 2012)
	Regime estacionário – 1ª Lei de Fick (células)	LNEC E 383 (LNEC, 1993)
Migração	Regime não estacionário Ensaios rápidos de penetrabilidade de cloretos	AASHTO T277 (AASHTO, 2015) ASTM C 1202 (ASMT, 2012) Tang e Nilsom (1992) NT BUILD 492 (NT BUILD, 1999)
	Regime estacionário	Andrade (1993) UNE 83987 (UNE, 2014) NT BUILD 335 (NT BUILD, 1997)

Fonte: produção do autor

Por intermédio da obtenção dos coeficientes de difusão de íons cloreto, obtidos por ensaios de migração e adotando a segunda Lei de Fick da difusão no estado não estacionário, torna-se possível a construção de gráficos que relacionam a profundidade de penetração de cloretos com a vida útil de projeto (VUP) da estrutura (MEDEIROS, 2008). Para efeito, são utilizadas as equações 1 e 1.1 desenvolvidas a partir da Segunda Lei de Fick.

$$P_{Cl} = 2(z)\sqrt{Dt} \quad (1)$$

$$erf(z) = 1 - \frac{C_{cl} - C_0}{C_s - C_0} \quad (1.1)$$

Onde: D é o coeficiente de difusão de cloretos (cm²/ano), t é a vida útil de serviço (anos), erf (z) é a função erro de Gauss, P_{Cl} (penetração de cloretos) é a profundidade onde a concentração de cloretos alcançou o ponto crítico para despassivação do aço (cm), C₀ é a concentração inicial de cloretos no interior do concreto, C_s é a concentração na superfície do concreto (%), C_{Cl} é a concentração de cloretos ao longo da profundidade (P_{Cl}) e do tempo (t) (%).

Para elaboração do gráfico, é necessária a fixação de alguns parâmetros como, por exemplo, a fixação de valor de 0,4% em relação à massa de cimento como valor limite para despassivação das armaduras. Este valor foi adotado, conforme Helene (1993) por configurar-se quantidade

suficiente de cloretos totais para despassivar o aço. Ainda sim, conforme Helene (1993), tem-se encontrado armaduras corroídas em concretos com teores inferiores a esses limites, assim como armaduras não corroídas em concretos com teores superiores a esses limites.

Medeiros (2008) aponta como um valor que possa ser adotado para percentual de cloretos na superfície de 1,8%. Este valor situa-se na média de outros percentuais recomendados por Helene (1993), cujo valor é de 0,9%, e de Guimarães (2000), no qual o valor adotado é de 3,0% de cloretos na superfície de uma estrutura real com 22 anos de idade e submetida a um ambiente contendo névoa salina.

Para Medeiros (2013) a vida útil apresentada somente é válida nas seguintes condições: a estrutura de concreto armado está no começo de sua vida útil de serviço (começando o período de iniciação); o mais rápido agente degradador é o ataque por cloretos; concreto sujeito à imersão em água contaminada com íons cloreto e nenhum outro fator acidental externo afeta as propriedades do revestimento de concreto. De modo que faz-se necessário a adoção de medidas que possam mitigar ou retardar a entrada desses agentes na estrutura de concreto.

2.6. Ensaios de avaliação da resistência à penetração de íons cloreto em concretos

O coeficiente de difusão de cloretos configura-se como um dos parâmetros para caracterizar a resistência do concreto frente à penetração de cloretos. O melhor método para encontrar o coeficiente de difusão de cloretos no concreto é aquele baseado na determinação do perfil de penetração de cloretos exposto em ambiente natural. Entretanto, em face do longo tempo necessário para o desenvolvimento do processo de difusão de cloretos em condições espontâneas, são utilizados ensaios acelerados visando-se obter respostas mais acessíveis. Conforme Gonçalves (1997), os métodos mais utilizados para ensaios de penetração de cloretos são:

- a) Métodos de difusão: que se baseiam na difusão pura dos cloretos no concreto, com ou sem aceleração da velocidade de difusão, aumentando a concentração de cloretos da solução de exposição (exemplos: AASHTO 259, NT BUILD 443, ASTM C 1556)
- b) Métodos de migração: onde a velocidade de penetração de cloretos no concreto é acelerada por imposição de uma corrente elétrica (exemplos: UNE 83987, ASTM C 1202, NT BUILD 337, NT BUILD 492 e AASHTO 297).

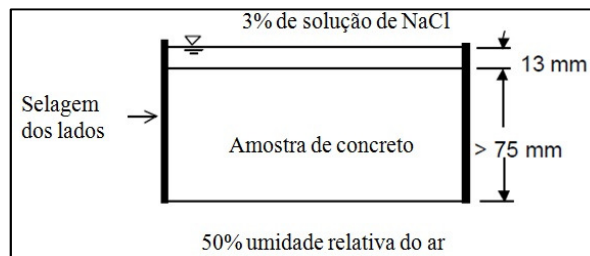
A partir dos métodos de difusão procura-se aumentar a velocidade de difusão, mas o mecanismo físico de transporte é o mesmo de quando ocorre em condições naturais. Nos métodos de migração o mecanismo de transporte deixa de ser a difusão e passa ser resultante da condução induzida pelo campo elétrico (GONÇALVES, 1997)

2.6.1. AASHTO T259: Método para obter a resistência à penetração de íons cloreto em concretos (Salt Ponding Test).

O teste AASHTO T 259 – *Standard method of test for resistance of concrete chloride ion penetration* - conhecido como Salt Ponding Test; é um teste de difusão de longo prazo para medir a penetração de íons cloreto em concretos.

O teste requer três placas de pelo menos 75 mm de espessura contemplando uma área superficial de 300mm. As placas são curadas em câmara úmida durante 14 dias, em seguida, armazenada em sala de secagem a 50% de umidade relativa durante 28 dias. As faces laterais das placas são seladas, deixando-se livres as faces inferior e superior. Após o período de condicionamento, a face superior é exposta a uma lâmina de 13mm de solução de 3% de NaCl por 90 dias, enquanto que a parte inferior é deixada em ambiente externo (conforme Figura 26).

Figura 26. Esquema de teste AASHTO T259



Fonte: Stanish (1997)

Ao término deste intervalo de tempo, as placas são removidas do ambiente de secagem e é obtida a concentração de cloretos em fatias de espessuras de 0,5 polegadas. Normalmente, duas ou três amostras são tomadas em profundidades progressivas.

2.6.2. Nord Test NT Build 443 (Bulk Diffusion Test).

O método *Bulk Diffusion* foi desenvolvido para superar algumas deficiências do método *Podding Salt*. A primeira diferença no procedimento de teste é a condição de umidade inicial da amostra. Em vez de serem secas durante 28 dias, como o *Salt Ponding Test*, as amostras de teste são saturadas com água e cal. Isso impede os efeitos iniciais de absorção quando a solução de cloreto é introduzida. Além disso, em vez de apenas selar os lados da amostra, deixando-se uma face exposta ao ar, a única face descoberta é exposta a uma solução de 2,8 M de NaCl.

Conforme a norma, caso sejam adotados cilindros moldados, a amostra de teste é preparada dividindo o cilindro em duas metades por um corte perpendicular ao eixo do cilindro. Uma metade é utilizada como referência do teor inicial de cloretos e a outra amostra, de teste, com a superfície serrada, é exposta à solução de NaCl. Antes da exposição à solução salina a amostra de teste é imersa em solução de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, a 23°C , em um recipiente de plástico hermeticamente fechado. O recipiente deve ser cheio até o topo para minimizar a carbonatação do líquido. No dia seguinte, a massa em condições de superfície seca é verificada por pesagem da amostra de teste. O armazenamento na solução de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ continua até que não varie em mais de 0,1% de massa por 24 horas. Todas as faces do corpo de prova, exceto a única a ser exposta é seca em temperatura ambiente. Em seguida a água com $\text{Ca}(\text{OH})_2$ deverá ser substituída pela solução salina. A concentração de NaCl da solução deve ser verificada antes e após a sua utilização. A temperatura do banho de água deve ser entre $21\text{-}25^\circ\text{C}$, com um alvo a temperatura média de 23°C . A temperatura deve ser medida pelo menos uma vez por dia.

Etapas:

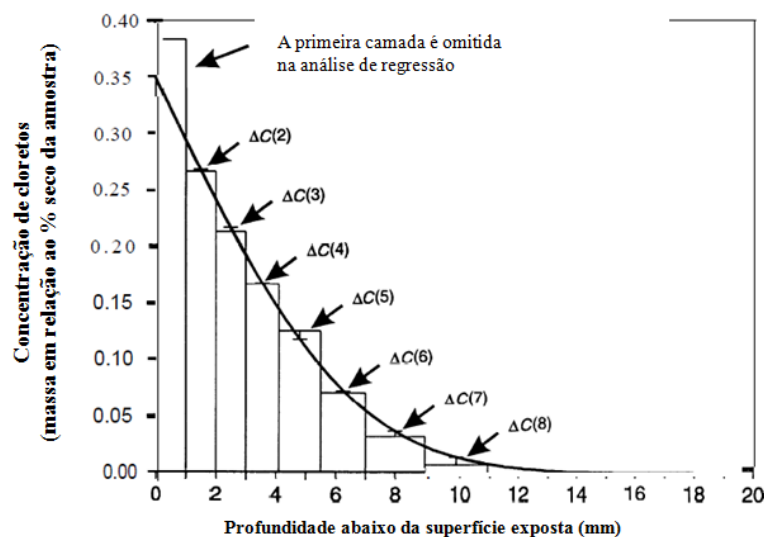
- a) A solução de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ no recipiente utilizado para a saturação da amostra é substituída pela solução de exposição e a amostra de ensaio é imersa na solução salina em condição saturada e superfície seca. É importante que a embalagem seja completamente preenchida com o líquido de exposição e bem fechada. A exposição deve durar pelo menos 35 dias e o recipiente é agitado uma vez por semana. A data e a hora de início da exposição e a interrupção da exposição deverá ser registrada.
- b) Após o período de exposição, o perfil de cloreto é medido por moagem do material em camadas paralelas à superfície exposta. A moagem é realizada dentro de um diâmetro de aproximadamente 10 mm menor que o diâmetro total da amostra. Isto evita o risco de efeitos de

borda e perturbações do impermeabilizante. Pelo menos oito camadas devem ser moídas. A espessura das camadas devem ser ajustadas de acordo com o perfil de cloretos esperado de modo que no mínimo 6 pontos abranjam o perfil entre a superfície exposta e a profundidade alcançada por cloretos. Deve-se garantir que uma amostra de, pelo menos, 5 g de pó de concreto seco seja obtida a partir de cada camada. Para cada uma das amostras de pó de concreto recolhida, a profundidade abaixo da superfície exposta é calculada como a média de cinco medições uniformemente distribuídas utilizando um paquímetro.

c) O teor de cloreto solúvel em ácido nas amostras é determinada a três casas decimais, de acordo com NT BUILD 208 ou por um método semelhante com a mesma ou uma melhor precisão.

d) A partir dos resultados dos testes, valores de C_s e D_a (concentração superficial de cloretos e coeficiente de difusão aparente de cloretos), são determinados através do ajuste da equação (2) para os teores de cloreto medidos por meio de uma análise de regressão não-linear de acordo com o método dos mínimos quadrados. O primeiro ponto do perfil, determinado a partir da face serrada, é omitido na análise de regressão. Os outros pontos são ponderados de forma igual. A Figura 27 exemplifica a análise de regressão não linear a ser realizada.

Figura 27. Perfil de concentração de cloretos



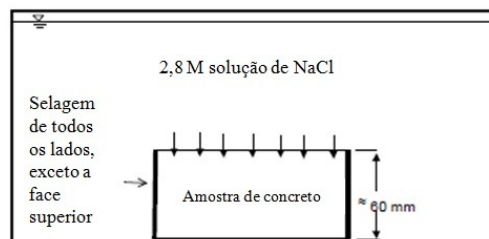
Fonte: NT Build 443 (1995)

$$C(x, t) = C_s - (C_s - C_i) * \text{erf} \left(x / \sqrt{4 * D_a * t} \right) \quad (2)$$

Onde: $C(x, t)$ [% em massa] é a concentração de cloreto, medida na profundidade x no tempo de exposição t ; C_s [% em massa] é a condição de contorno da superfície exposta; C_i [% em massa] é a concentração de cloreto inicial medido na fatia concreto, medido por meio de ensaio de teor de cloretos conforme NT Build 208; X [m] é a profundidade abaixo da superfície exposta (para o meio de uma camada); D_e [m^2/s] é o coeficiente de transporte de cloreto; t [s] é o tempo de exposição (com uma precisão de 5 horas); erf é a função erro de Gauss (as tabelas com os valores da função de erro são obtidos em normas e livros de referência matemáticos).

As Figuras 28-30 demonstram a representação do ensaio de imersão em solução salina e imagens do ensaio desenvolvido em pesquisa utilizando-se concretos com metacaulim e escória de alto forno. Pesquisa esta utilizada como projeto piloto para a dissertação a fim de observação da validade dos ensaios.

Figura 28. Esquema de teste NT Build 443 (Bulk Diffusion Test)



Fonte: Stanish (1997)

Figura 29. Amostras rompidas após ensaio de difusão por imersão, concretos contendo metacaulim



Fonte: produção do autor

Figura 30. (a) Retirada de amostras em concreto (b) Limitador de profundidade necessário para obtenção das amostras em profundidades progressivas



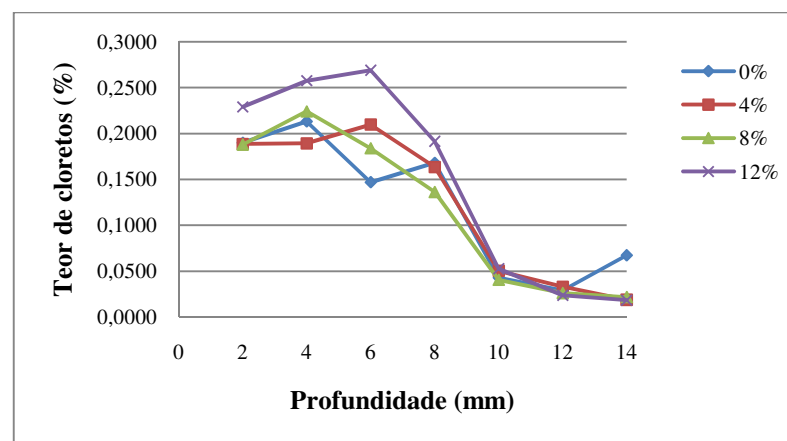
(a)

(b)

Fonte: produção do autor

Em seguida, são apresentados os resultados de teores de cloretos em amostras contendo metacaulim com período de exposição de 150 dias.

Figura 31. Resultados de perfis de concentração de cloretos (0%, 4%, 8% e 12% de metacaulim em substituição ao cimento)



Fonte: produção do autor

2.6.3. ASTM C-1202/12 - Ensaio de penetração acelerada de cloretos

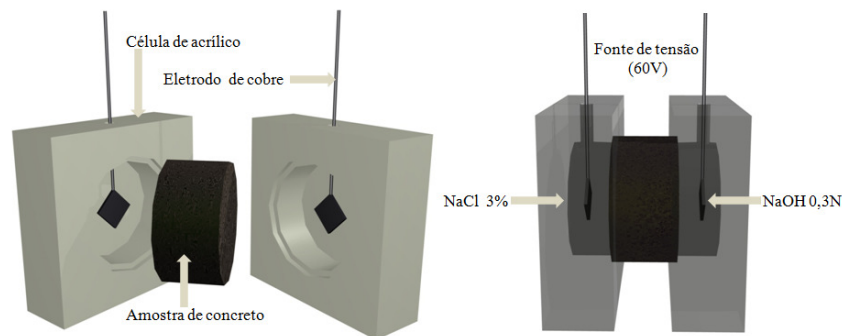
O ensaio é descrito pela norma americana ASTM C 1202 (ASTM, 2012) (*Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration*) e tem por objetivo medir a carga passante em uma amostra de concreto de diâmetro de 10,0 x 5,1cm submetida a uma tensão de 60 +- 0,1V, durante um período de 6 horas.

As faces do cilindro são expostas a uma solução de cloreto de sódio (3% em água deionizada) e a outra à solução de hidróxido de sódio (0,3N em água deionizada), nas quais são submersos eletrodos de cobre conectados em uma fonte de corrente contínua, permitindo a diferença de potencial do concreto.

Anteriormente ao ensaio propriamente dito, a norma preconiza a utilização do processo de saturação a vácuo das amostras antes dos ensaios de penetração. Esse procedimento tem sido adotado para garantir que o ingresso de cloretos na amostra se dê predominantemente por difusão. O processo envolve selar as faces laterais das amostras (com resina epóxi, verniz poliuretânico ou outro produto capaz de cumprir a função seladora) seguido por condicionamento das amostras em vácuo, por meio de bomba dessecadora, em um período de vácuo por 3 horas e em seguida vácuo submerso por 1 hora. Após isto, deverá ser desligada a bomba e as amostras permaneceridas neste processo por 18 +ou- 2h.

Após isto as amostras são retiradas do dessecador, e secas com pano absorvente, para posteriormente serem acopladas às meia-células, fixadas com cola a base de silicone. A Figura 32 apresenta a representação do ensaio em execução.

Figura 32. Representação do ensaio de penetração acelerada de cloretos – A-Perspectiva explodida da célula – B-Aparato do ensaio montado.



Fonte: produção do autor

É aplicada uma diferença de potencial de 60V e realizadas leituras da corrente passante em intervalos de 30 em 30 minutos durante um período de 6 horas. Com a finalização do ensaio é então calculada a carga total passante, verificando a classificação do concreto, quanto ao risco de penetração dos íons cloreto, de acordo com a Norma ASTM C-1202 (ASMT, 2012), e fórmula a seguir:

$$Q = 900 (I_0 + 2_{130} + 2_{I_{60}} + \dots + 2_{I_{300}} + 2_{I_{330}} + I_{360}) \quad (2)$$

Onde:

Q = Carga total passante (Coulombs)

I₀ = Corrente medida após a aplicação da tensão (t em minutos) (âmpères)

I_t = Corrente medida nos tempos “t” quando a tensão é aplicada (t em minutos) (âmpères)

Após o cálculo da carga passante total, o resultado deverá ser relacionado na Tabela de classificação de concretos quanto ao risco de penetração aos íons cloretos de acordo com a carga passante (ASTM C1202 (ASTM, 2012), conforme Tabela 5.

Tabela 5. Classificação conforme ASTM C1202 (ASTM 2012)

Carga Passante (Coulombs)	Penetração dos Íons Cloreto
>4000	Elevada
2000 - 4000	Moderada
1000 - 2000	Baixa
100 - 1000	Muito Baixa
< 100	Desprezível

Fonte: ASTM C 1202 (ASTM 2012)

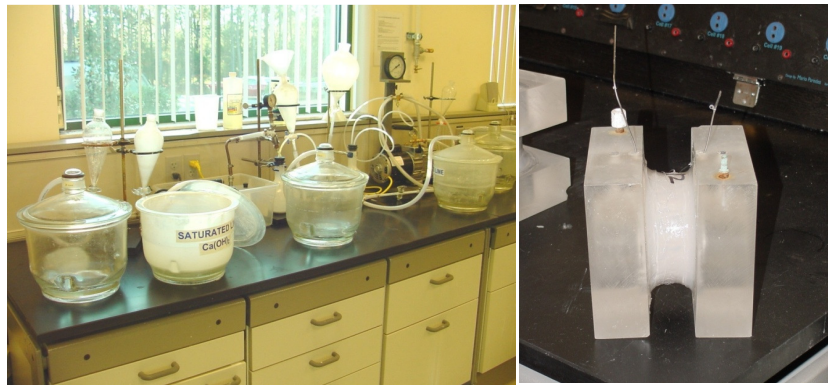
A utilização do ensaio ASTM C1202 é muito comum na indústria da construção dos EUA. O Departamento de Transportes da Virginia está conduzindo um programa para usar a ASTM C1202 como especificação de desempenho e a Autoridade Portuária de Nova York e Nova Jersey usa a ASTM C1202 em suas especificações de desempenho de concretos (BRYANT, 2009). O Departamento de Transporte da Florida e Washington tem utilizado o ensaio como parâmetro resposta para durabilidade de estruturas em concreto (Figuras 33, 34 e 35).

Figura 33. Serragem dos corpos de prova



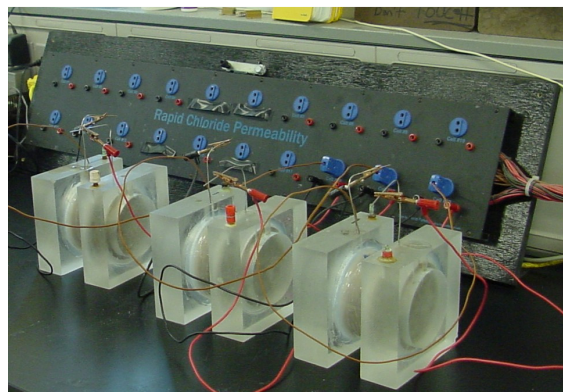
Fonte: Departamento de Transportes da Flórida (2007)

Figura 34. Condicionamento dos corpos de prova e montagem de aparato



Fonte: Departamento de Transportes da Flórida (2007)

Figura 35. Ensaio ASTM C 1202 – Ensaio de penetração de cloretos (permeabilidade rápida de cloretos)



Fonte: Departamento de Transportes da Flórida (2007)

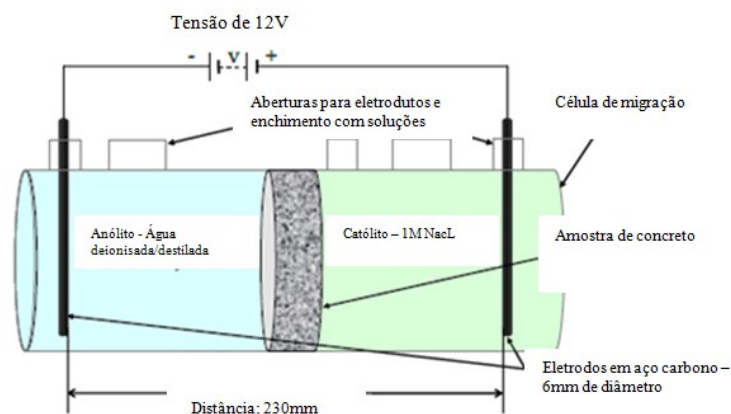
2.6.4. Ensaio rápido de migração em regime estacionário (UNE 83987/14)

O ensaio consiste na migração, como resposta à ação de um campo elétrico, dos íons presentes em um eletrólito até que estes sejam transportados ao polo contrário. Para efeito, utiliza-se uma amostra de concreto entre diferentes soluções. Em uma das soluções, contendo íons cloreto, tem-se imerso eletrodo negativo que ao se aplicar uma diferença de potencial (12 V), os íons cloreto são atraídos pelo eletrodo positivo, alojado em outro compartimento (anólito) e migram até atravessar a amostra de concreto. O incremento na concentração de cloretos no anólito se mede a partir da determinação de sua condutividade elétrica.

A determinação dos coeficientes de difusão de íons cloretos se conclui quando os estados estacionário e não estacionário são finalizados. O estado estacionário se alcança quando o fluxo de íons cloreto no catodo torna-se constante. Em referência, de maneira específica, ao acondicionamento das amostras, estas devem ser saturadas para evitar que o transporte de cloretos seja feito por absorção capilar, o procedimento é similar ao recomendado para o ensaio ASTM C1202 (ASTM, 2012).

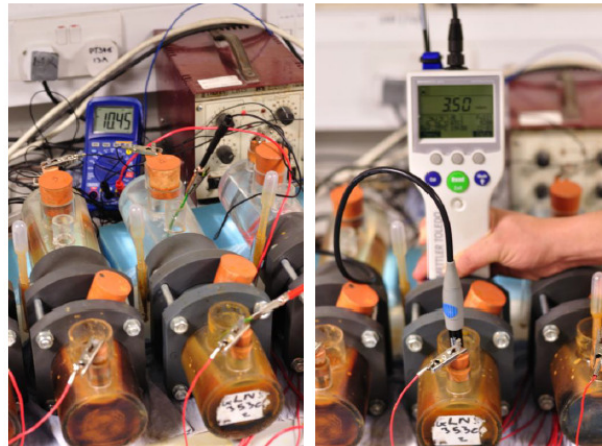
São realizadas leituras diárias na câmara do anólito para verificação da condutividade. A condutividade da câmara anólita é utilizada em fórmula para conversão em concentração de cloretos, visando avaliar esta evolução no tempo. A norma menciona que o período do ensaio em concretos comuns é por volta de 2 semanas, porém em concretos de alto desempenho este tempo pode aumentar significativamente. As Figuras 36, 37 e 38 demonstram, respectivamente, a representação do ensaio, o ensaio em execução e as etapas.

Figura 36. Representação UNE 83987 – Ensaio multiregime



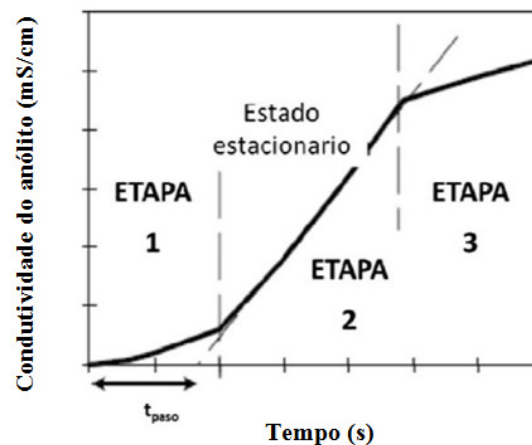
Fonte: Hassan e Fitri (2012)

Figura 37. Representação UNE 83987 – Ensaio multi-regime - execução



Fonte: Hassan e Fitri (2012)

Figura 38. Identificação de estados estacionário e não estacionário, ensaio Multi-regime (etapa 1: estado não estacionário; etapa 2: estado estacionário e etapa 3: término de período estacionário)



Fonte: UNE 83987 (UNE, 2014)

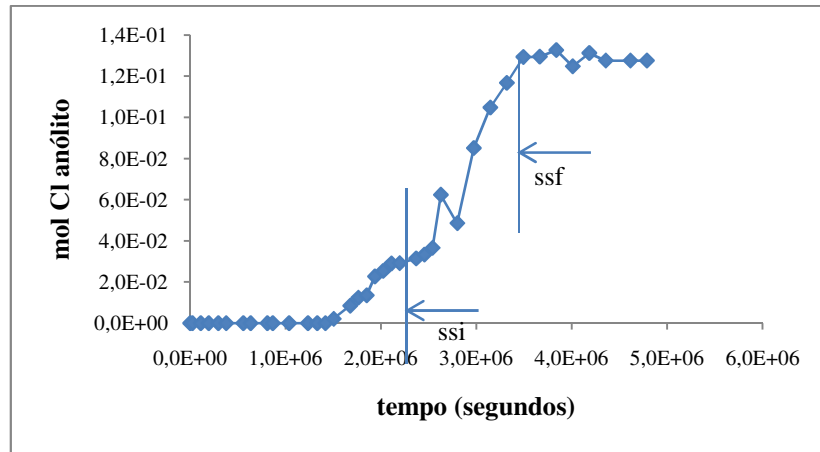
As Figuras 39-42 demonstram o ensaio multiregime em execução, pertinente à pesquisa envolvendo concretos com metacaulim, projeto piloto do trabalho de dissertação, com o intuito de testar a validade do método.

Figura 39. Execução de ensaio multi-regime



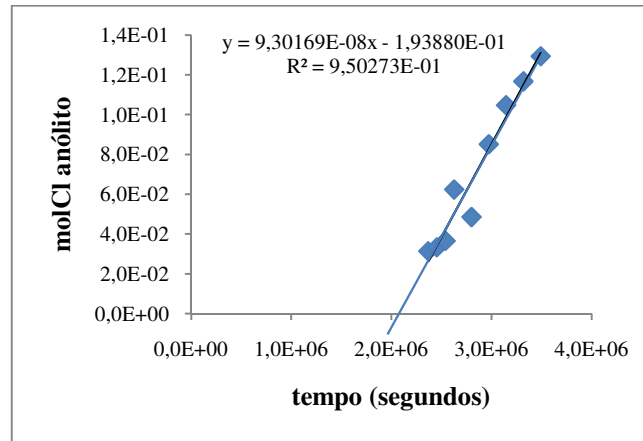
Fonte: produção do autor

Figura 40. Resultado ensaio multi-regime (concretos a/ag 0,55 e cimento CPIII 40 RS)



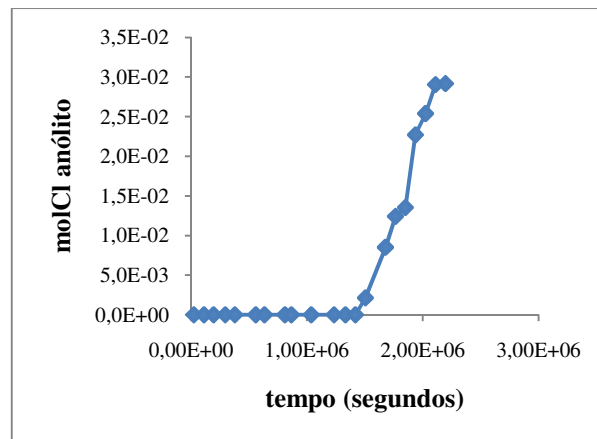
Fonte: produção do autor

Figura 41. Identificação do estado estacionário



Fonte: produção do autor

Figura 42. Identificação do estado não estacionário



Fonte: produção do autor

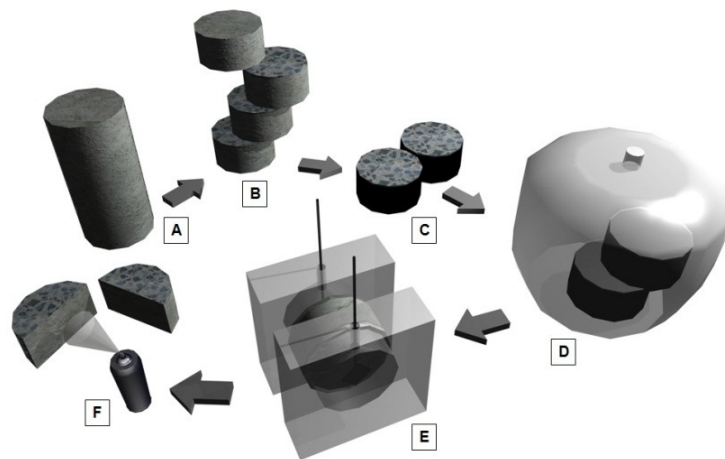
2.6.5. Ensaio rápido de migração em estado não estacionário (Luping e Nilson, 1992)

A fim de se obter, a partir de ensaios de migração no estado não estacionário, além de resultados qualitativos, mas também dados quantitativos como espessura de camada contaminada e coeficiente de difusão de cloretos, foi proposto por Luping e Nilsson (1992), método que se utiliza de aplicação de diferença de potencial e utilização de indicador colorimétrico (aspersão de $\text{AgNO}_3 - 0,1\text{M}$). Conforme este método, o ensaio tem duração de poucas horas para concretos comuns e até 48h para concretos de alto desempenho. Neste experimento, adotou-se 24 horas de ensaio de migração, por configurar-se uma opção intermediária dos ensaios utilizados para a composição do método. Para o cálculo do coeficiente de difusão aparente de íons cloreto deve ser resolvida por meio da Equação 3.

$$D = 1,189 \times 10^{-11} \left(\frac{x_d - ax_d^b}{t} \right) \quad (3)$$

Onde: D = coeficiente de difusão de íons cloreto (m^2/s); x_d = profundidade de penetração de cloretos (mm); t = tempo de ensaio (h); a e b = constantes. Quando, campo elétrico = - 600 V/m e temperatura = 298K, a = 1,061 e b = 0,589. O procedimento proposto é representado conforme Figura 43.

Figura 43. Procedimento adotado no ensaio de penetração de cloretos. (a – corpo de prova, b – serragem de corpos de prova, c – selagem das faces laterais, d – saturação, e – montagem das células, f – aspersão de $AgNO_3$)



Fonte: produção do autor

Após a conclusão do ensaio de penetração de cloretos, as fatias de concreto são seccionadas na direção do fluxo de cloretos e realiza-se a aplicação da solução de $AgNO_3$ - 01M, que em presença de luz, reage preferencialmente com os cloretos livres (presentes na região contaminada pelos cloretos) formando assim um precipitado branco de cloreto de prata ($AgCl$). A região isenta de cloretos, reage com os íons OH^- formando um precipitado marron de óxido de prata (AgO).

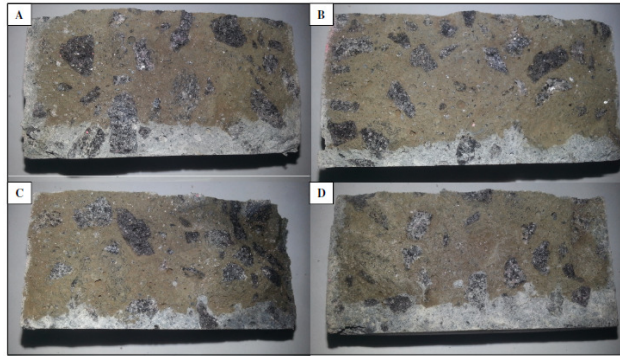
Desse modo, a profundidade de penetração de cloretos é claramente indicada pela mudança de cor, tornando-se visível sua identificação, Figura 45, e a medição da espessura da camada contaminada por íons cloreto, Figura 46.

Figura 44. Rompimento das amostras para aspersão de AgNO_3



Fonte: produção do autor

Figura 45. Amostras após a realização de aspersão de AgNO_3 - 0,1M (identificação: a – REF, b – ME4 (metacaulim 4%), c – ME8 (metacaulim 8%) e d – ME12 (metacaulim 12%).



Fonte: produção do autor

Figura 46. Sistema de medição em amostra de concreto, conforme NT Build



Fonte: produção do autor

2.6.6. Coeficiente de migração de cloretos por meio de regime não estacionário (NT Build 492)

O ensaio rápido de migração (*Nordtest Method – Concrete, mortar and cement-based repair materials: chloride migration coefficient from non-steady migration experiments* - NT Build 492) é adotado para determinar o coeficiente de migração de cloretos em regime não estacionário e se baseia na proposta de Luping e Nilsson (1992), que sugere uma equação matemática para se obter o coeficiente de migração.

Utilizam-se cilindros de 100mm de diâmetro e 50mm de espessura submetidos à tensão inicialmente de 30V a fim de coletar a primeira medida de corrente. Com base neste valor de corrente inicial, verifica-se se há a necessidade de ajustar a diferença de potencial. Este procedimento é realizado por meio de tabela encontrada na norma que vincula a diferença de potencial com o tempo de ensaio (Tabela 6). A diferença de potencial pode variar de 10V a 60V e o tempo do ensaio pode variar de 6 horas a 96 horas, parâmetros que dependem da resistividade do concreto.

Tabela 6. Tabela contemplada na NT Build 492.

Corrente inicial I_{30V} (com 30V) (mA)	Voltagem aplicada (após ajuste) (V)	Possível nova corrente inicial I_0 (mA)	Duração do teste t (horas)
$I_0 < 5$	60	$I_0 < 10$	96
$5 \leq I_0 < 10$	60	$10 \leq I_0 < 20$	48
$10 \leq I_0 < 15$	60	$20 \leq I_0 < 30$	24
$15 \leq I_0 < 20$	50	$25 \leq I_0 < 35$	24
$20 \leq I_0 < 30$	40	$25 \leq I_0 < 40$	24
$30 \leq I_0 < 40$	35	$35 \leq I_0 < 50$	24
$40 \leq I_0 < 60$	30	$40 \leq I_0 < 60$	24
$60 \leq I_0 < 90$	25	$50 \leq I_0 < 75$	24
$90 \leq I_0 < 120$	20	$60 \leq I_0 < 80$	24
$120 \leq I_0 < 180$	15	$60 \leq I_0 < 90$	24
$180 \leq I_0 < 360$	10	$60 \leq I_0 < 120$	24
$I_0 < 360$	10	$I_0 < 120$	6

Fonte: NT Build 492

O condicionamento das amostras é similar ao método da ASTM C 1202. A única diferença é que ao invés de utilizar água fervida para submergir as amostras, a NT Build 492 especifica o uso de água destilada saturada em cal – Ca(OH)_2 .

A seguir é apresentado o procedimento de execução do aparato previsto pela norma NT BUILD 492 (NT BUILD, 1999), conforme pesquisa de Mendes (2009).

Após o período de condicionamento coloca-se a amostra dentro de cinta de borracha selando-a com silicone em todo perímetro lateral, tanto na parte superior como na inferior, conforme Figura 47.

Figura 47. (a) Amostra em cinta de borracha (b) Procedimento de vedação com silicone



Fonte: Mendes (2009)

É verificada a vedação do sistema, encaixa-se o conjunto com uma braçadeira, formando assim um copo. Logo em seguida coloca-se uma solução anódica de 300ml de NaOH (hidróxido de sódio) a 0,3N no copo, na parte superior. Já na parte inferior, que corresponde à solução catódica, prepara-se solução de 10% de NaCl (cloreto de sódio), em massa em relação à água destilada ou deionizada.

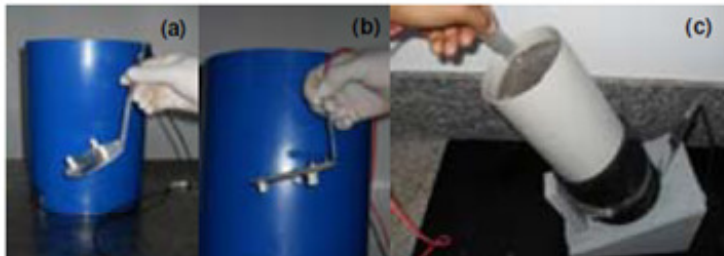
Figura 48. Utilização de braçadeira



Fonte: Mendes (2009)

Por fim, posiciona-se os eletrodos na parte superior (ânodo) e inferior (cátodo), Figuras 49, 50 e 51.

Figura 49. Fixação de eletrodutos



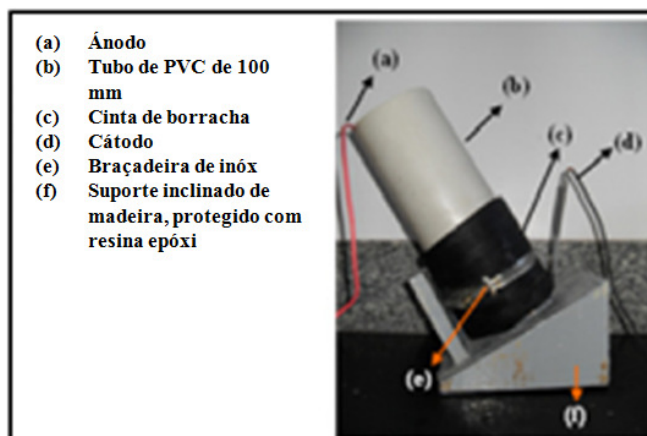
Fonte: Mendes (2009)

Figura 50. Aparato montado



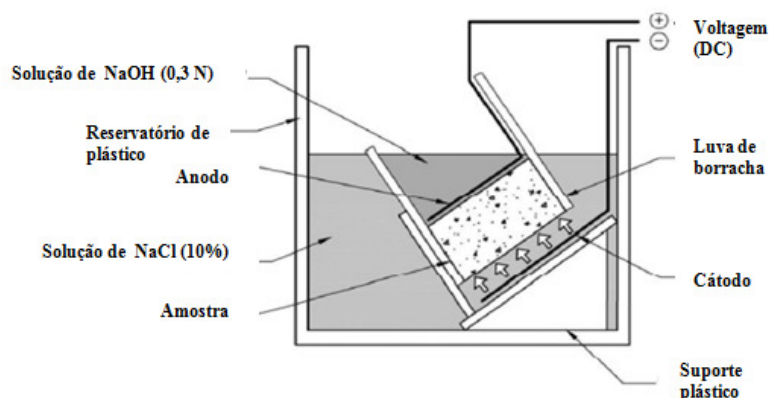
Fonte: Mendes (2009)

Figura 51. Identificação de elementos de ensaio NT Build 492



Fonte: Mendes (2009)

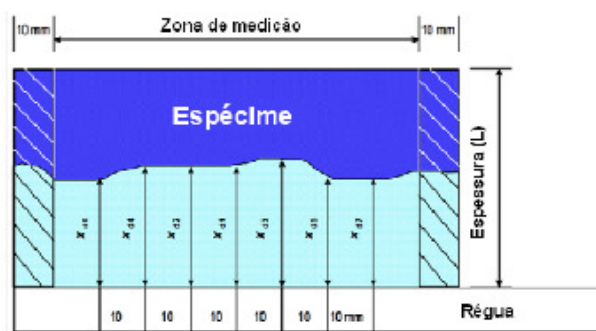
Figura 52. Representação de ensaio rápido de migração (NT BUILD 492)



Fonte: NT BUILD 492 (NT BUILD, 1999)

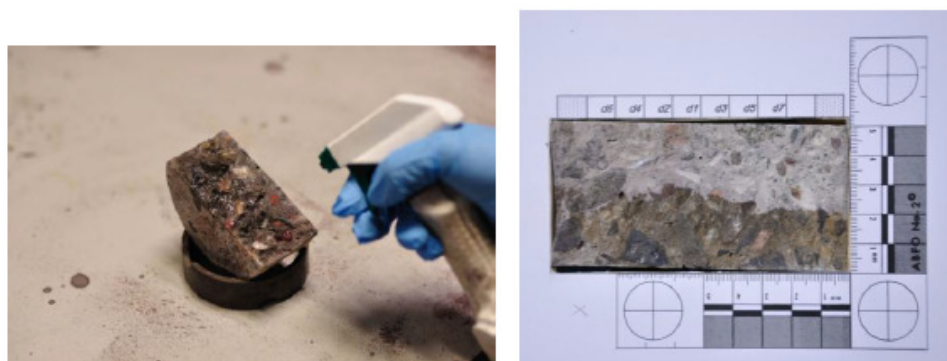
Após o período de ensaio de migração de cloretos as amostras são rompidas e é aspergida solução em nitrato de prata para verificação da camada contaminada. A partir da camada em análise é realizada a média do valores, conforme Figuras 53 e 54.

Figura 53. Ilustração da medida de profundidade de penetração de cloretos



Fonte: Fugementi (2013)

Figura 54. Aspersão de AgNO_3 e sistema de medição

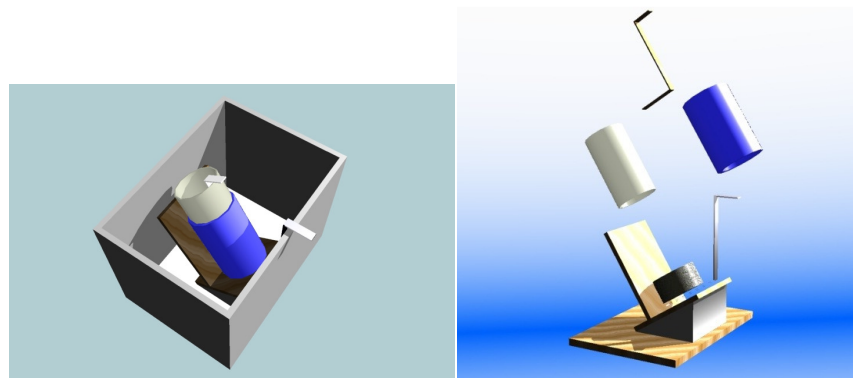


Fonte: Hassan e Fitri (2012)

Check list do ensaio NT BUILD 492:

- a) Após período de cura, colocam-se as amostras dentro de uma câmara de vácuo, sujeitas a pressões entre 10 e 50 mbar, durante 3 horas;
- b) Introduz uma solução de hidróxido de cálcio na câmara, sem desligar a bomba de vácuo, até cobrir completamente as amostras, ao fim desliga-se a bomba de vácuo e as amostras permanecem em contato com a solução de Ca(OH)_2 durante mais 18 ± 2 horas;
- c) Retiram-se as amostras da câmara de vácuo e colocam-se os tubos de borracha e abraçadeiras;
- d) Dá-se início ao ensaio, instalando uma corrente elétrica contínua de 30V em cada célula. Uma vez definida a intensidade de corrente, procede-se à correção da voltagem de acordo com tabela contemplada na norma e através de consulta dessa mesma tabela, determina-se a duração do ensaio;
- e) Ao final do ensaio, mede-se a temperatura da solução anódica e retiram-se as amostras do aparato;
- f) Lavam-se as amostras com água corrente e retira-se o excesso de água com pano úmido;
- g) Finalmente, partem-se as amostras diametralmente, obtendo duas metades, que são pulverizadas por uma solução de nitrato de prata.

Figura 55. Perspectiva explodida de aparato experimental NT Build 492



Fonte: produção do autor

Apesar do método NT Build 492 não especificar a classificação quanto à maior ou menor resistência à penetração de íons cloreto este é amplamente utilizado para determinar o coeficiente de difusão de cloretos. As vantagens mais importantes dos testes acelerados de migração de cloretos, como a NT Build 492, são a simplicidade do seu procedimento e a curta duração do teste. O Quadro 6 apresenta a avaliação comparativa do processo executivo entre os três métodos de análise da resistência à penetração de cloretos em concretos.

Quadro 6. Comparação entre os métodos acelerados de migração de cloretos ASTM C 1202 , UNE 83987 e NT BUILD 492.

Descrição	ASTM C 1202	(UNE 83987)	(NT Build 492)
Preparação das soluções utilizadas nos experimentos	NaCl (3%) – 300g em água destilada, NaOH (0,3N) – 300g em água destilada.	1 NaCl, 58,42g de NaCl por litro de água destilada	NaCl (10%) – 100g de NaCl em 900g de água, em torno de 2 N)
Condicionamento das amostras	Utilização de água potável fervida resfriada	Utilização de água potável fervida resfriada	Solução de Ca(OH) ₂ em água destilada
Procedimento de ensaio	Montagem feita com as meia células, fixadas com selante aos corpos de prova impermeabilizados	Podem ser utilizados em canos de PVC e eletrodos de aço.	Montagem com canos de PVC, fita Silver Tape, suporte inclinado, utilização de chapas e ligações elétricas
Monitoramento do ensaio	Medição da corrente passante Monitoramento realizado a cada 30 minutos, durante 6 horas	Devem ser medidas a tensão efetiva nas faces dos corpos de prova, a temperatura do anólito e sua condutividade duas vezes ao dia	Monitoramento da temperatura inicial e final e dos coeficientes de migração no início e no término do ensaio
Monitoramento das temperaturas durante o ensaio	Opcional – Medição da temperatura no início, durante e após o término do ensaio.	Medição da temperatura 2 vezes ao dia	Deve ser monitorada a temperatura inicial e final da célula contendo solução anódica
Cálculo e interpretação dos resultados	Resultado obtido é aplicado diretamente na fórmula encontrada na norma	Resultado obtido é aplicado diretamente em fórmula	Resultado obtido é acrescido de outros dados para ter o resultado final
Dados	Somente corrente passante, cálculo da carga total e classificação qualitativa	Temperatura, coeficiente de difusão efetivo (estado estacionário), coeficiente de difusão aparente (estado não estacionário).	Tensão inicial, corrente inicial, profundidade de penetração dos íons cloreto, corrente final. Cálculo do coeficiente de migração de cloretos.

Fonte: produção do autor

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL, MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta os principais ensaios utilizados nesta pesquisa, bem como o procedimento detalhado em relação à caracterização dos materiais, metodologia de obtenção do resíduo da lapidação do vidro, procedimentos de dosagem dos concretos, entre outros.

3.1. Planejamento dos Experimentos

Os ensaios de laboratório foram conduzidos de forma a investigar como a substituição de cimento Portland por resíduo de vidro e por metacaulim em distintos percentuais de utilização influenciam no desempenho (resistência à penetração de cloretos, elevação da vida útil, resistência mecânica, atividade pozolânica e mitigação de reação álcali-sílica) dos concretos analisados. Para este trabalho serão considerados três tipos distintos de variáveis, que são: variáveis dependentes, independentes e variáveis de controle, como seguem:

3.1.1. Variáveis Dependentes

As variáveis dependentes são aquelas cujo comportamento se quer avaliar em função das variáveis independentes. Correspondem àquilo que se deseja prever e/ou obter como resultado. São elas:

- a) Consistência pelo abatimento do tronco de cone;
- b) Massa específica do concreto no estado fresco;
- c) Resistência à compressão axial;
- d) Coeficiente de difusão de cloretos em estado estacionário e não estacionário;
- e) Profundidade de penetração de cloretos;
- f) Carga total passante;
- g) Resistividade;
- h) Velocidade de propagação de onda;
- i) Expansibilidade por reação álcali-sílica.

3.1.2. Variáveis Independentes

Aquelas que alteram as propriedades do material cimentante e influenciam a relação sólido/espaço da pasta e seu grau de compactação. São introduzidas de maneira intencional a fim de verificar a relação entre suas variações e a influência que produzem nas variáveis dependentes. São elas:

- a) Idade: 28, 56 e 91 dias.
- b) Utilização de resíduo de vidro em percentuais de 10% e 20% em substituição ao cimento (10% é considerado por alguns pesquisadores como percentual ótimo de desempenho, aquele que concilia bons resultados referente à durabilidade sem comprometimento das propriedades mecânicas e 20% aquele que obtém melhores resultados de resistência à penetração de cloretos e outros agentes agressivos).
- c) Utilização de metacaulim em substituição ao cimento nos percentuais de 10% e 20% (10% refere-se a percentual próximo ao recomendado pelo fabricante, de 8%), estipulou-se 10% e 20% a fim de comparar com os resultados dos concretos com resíduos de vidro.
- d) Utilização conjunta de resíduo de vidro e de metacaulim nos percentuais de 5% (resíduo de vidro) + 5% (metacaulim) e 10% (resíduo de vidro) + 10% (metacaulim), em substituição ao cimento.
- e) Utilização de resíduo de lapidação de vidro contemplando tratamento com moagem e sem moagem.

3.1.3. Variáveis de Controle

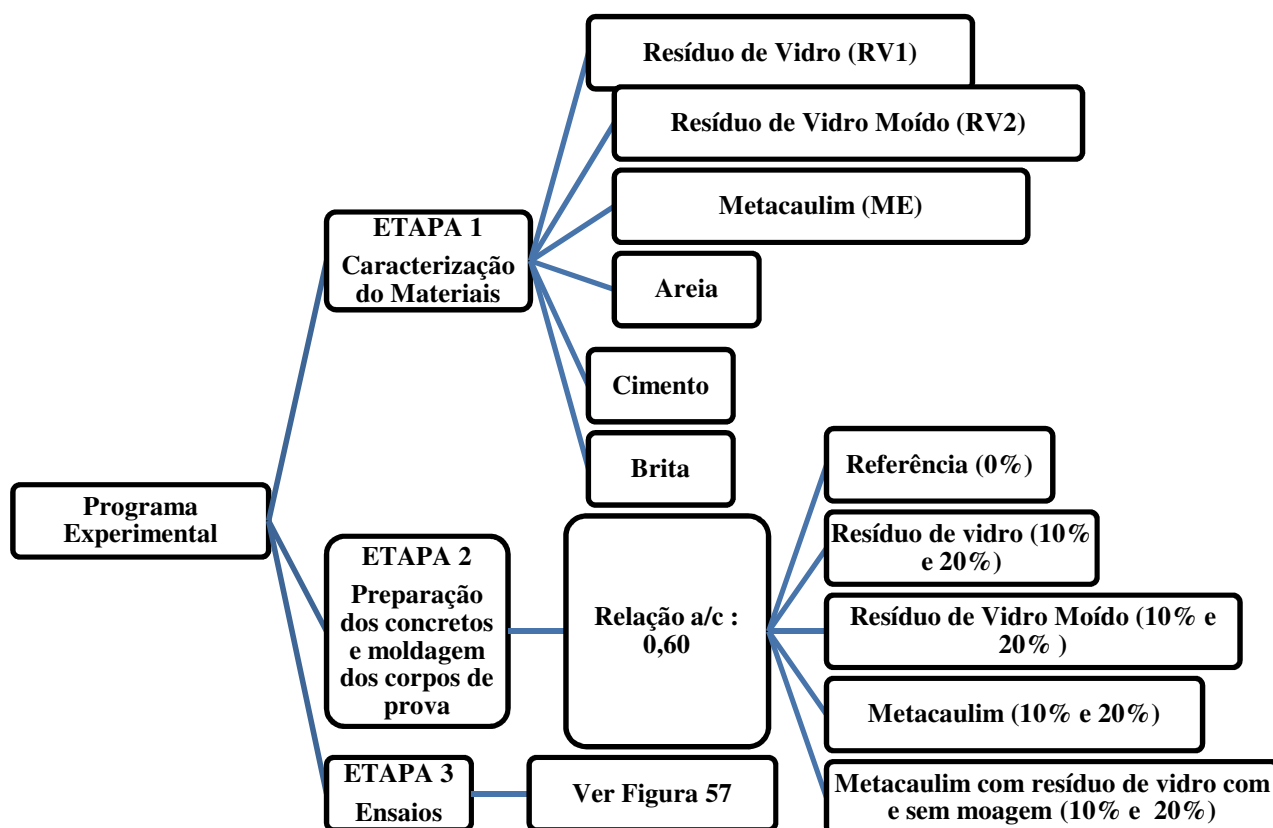
São variáveis que não são diretamente objeto do estudo, mas que também interferem na relação entre as variáveis independentes e dependentes e no resultado dos experimentos, logo devem ser controladas.

- a) Características dos agregados constantes;
- b) Procedimento de mistura constante;
- c) Relação água/aglomerante (a/ag) 0,60 (maior relação água/cimento aceita pela norma ABNT NBR 6118 (ABNT, 2014) em situações urbanas.

3.2. Programa Experimental

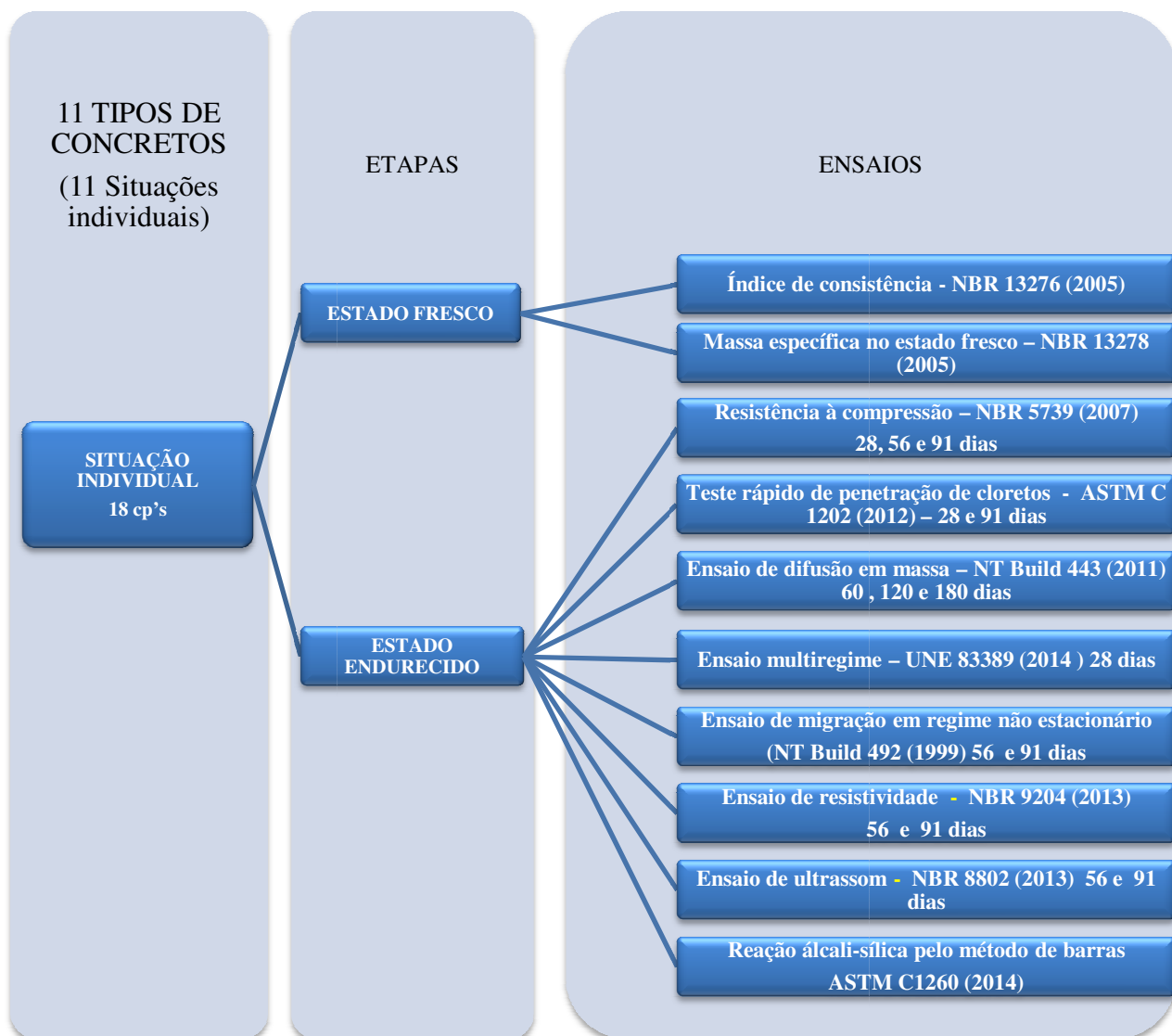
O programa experimental objetiva determinar os ensaios a serem efetuados em laboratório, assim como os materiais utilizados. O programa experimental foi dividido em três etapas, conforme pode ser visualizado na Figura 56.

Figura 56. Programa experimental



Fonte: Acervo próprio

Figura 57. Estruturação dos ensaios realizados



Fonte: produção do autor

A pesquisa objetivou analisar corpos de provas compondo relações a/c de 0,60. Esta relação foi escolhida por ser a maior relação permitida em ambientes urbanos e não submersos (classe de agressividade II segundo a ABNT NBR 6118) com diferentes situações de agentes contaminantes, inclusive cloretos. A utilização de resíduos de vidro e de metacaulim será efetuada na relação 0,60 a fim de verificar o efeito destes materiais em estruturas contemplando porosidade acentuada.

A opção pela utilização dos percentuais de substituição de resíduos de vidro de 10% e de 20% refere-se aos percentuais verificados no estudo bibliográfico que conferem melhores resultados mecânicos e de durabilidade. O percentual de 10% é mencionado como teor ótimo por alguns autores.

A opção pela utilização de metacaulim refere-se, primeiramente, por configurar-se como um parâmetro do efeito da utilização de pozolanas em concretos a fim de comparar com os resultados obtidos com a utilização do resíduo de vidro. A segunda questão corresponde a verificar o desempenho de concretos com a utilização conjunta de resíduo de vidro e metacaulim, tendo em vista que o estado da arte apresentou aconselhável a utilização conjunta a fim de mitigar reações álcali-sílica.

A utilização de diferentes métodos para avaliar à vida útil de concretos com vistas à iniciação da corrosão, refere-se às discussões e incertezas acerca da utilização de métodos acelerados de avaliação da resistência à penetração de cloretos em concretos, utilizando-se métodos de difusão por imersão e métodos com a utilização de diferença de potencial. Pretende-se fomentar ainda, discussão a respeito de ensaios baseados em regimes estacionários (Multiregime UNE 83987) e não estacionário (NT Build 492). O planejamento dos traços foi dividido da seguinte forma (Tabela 7).

Tabela 7. Tipos de concretos da pesquisa

LEGENDA	Substituição ao cimento (%) (RV1= resíduo de vidro sem moagem)	Substituição ao cimento (%) (RV2= resíduo de vidro moído)	Substituição ao cimento (%) (ME= metacaulim)
REF (concreto de referência)	0	0	0
RV1-10 (concreto com 10% de substituição do cimento por resíduo de vidro sem moagem)	10	0	0
RV1-20 (concreto com 20% de substituição do cimento por resíduo de vidro sem moagem)	20	0	0
RV2-10 (concreto com 10% de substituição do cimento por resíduo de vidro com moagem)	0	10	0
RV2-20 (concreto com 20% de substituição do cimento por resíduo de vidro com moagem)	0	20	0
ME-10 (concreto com 10% de substituição do cimento por metacaulim)	0	0	10
ME-20 (concreto com 20% de substituição do cimento por metacaulim)	0	0	20

LEGENDA	Substituição ao cimento (%) (RV1= resíduo de vidro sem moagem)	Substituição ao cimento (%) (RV2= resíduo de vidro moído)	Substituição ao cimento (%) (ME= metacaulim)
RV1ME-10 (concreto com 5% de substituição do cimento por metacaulim e mais 5% de substituição do cimento por resíduo de vidro sem moagem)	5	0	5
RV1ME-20 (concreto com 10% de substituição do cimento por metacaulim e mais 10% de substituição do cimento por resíduo de vidro sem moagem)	10	0	10
RV2ME-10 (concreto com 5% de substituição do cimento por metacaulim e mais 5% de substituição do cimento por resíduo de vidro com moagem)	0	5	5
RV2ME-20 (concreto com 10% de substituição do cimento por metacaulim e mais 10% de substituição do cimento por resíduo de vidro com moagem)	0	10	10

Fonte: produção do autor

No que se refere à quantificação dos corpos de prova, para cada traço, foram executados 18 corpos de prova, conforme representado na Tabela 8.

Tabela 8. Quantificação dos corpos de prova

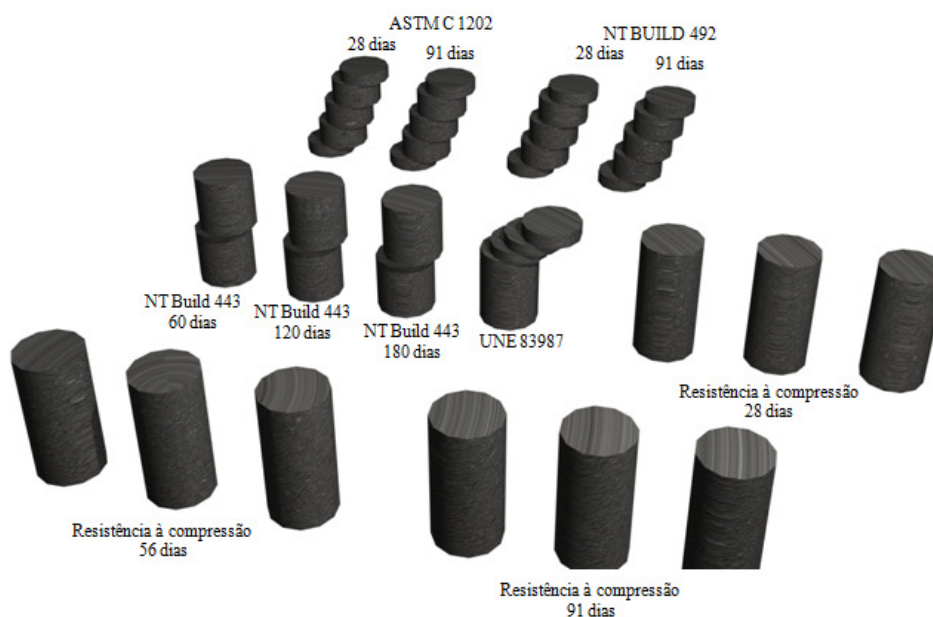
Ensaio	Idade de cura (dias)	Quantidade de corpos de prova -20x10cm (und)	Amostras (dim/quant)
Ensaio de resistência à compressão	28	3	(20x10cm)
ASTM C 1202	28	1	(5x10cm/3und)
UNE 83987	28	1	(2x10cm/2und)
NT Build 492	28	1	(5x10cm/2und)
NT Build 443/ASTM C 1556	28 (tempo de exposição à solução de cloretos = 60 dias)	1	(10x10cm/2und)
NT Build 443/ASTM 1556	28 (tempo de exposição à solução de cloretos = 120 dias)	1	(10x10cm/2und)
NT Build 443/ASTM 1556	28 (tempo de exposição à solução de cloretos = 180 dias)	1	(10x10cm/2und)
Ensaio de resistência à compressão	56	3	(20x10cm)
Ensaio de resistência	91	3	(20x10cm)

à compressão			
ASTM C1202/12	91	1	(5x10cm/3und)
NT Build 492	91	1	(5x10cm/2und)
Total de corpos de prova (20x10cm)		17	

Fonte: Produção do autor

Sendo assim, foram divididos, para a realização do ensaio, 17 corpos de prova para cada traço. Na figura 58 é apresentada a divisão por traço.

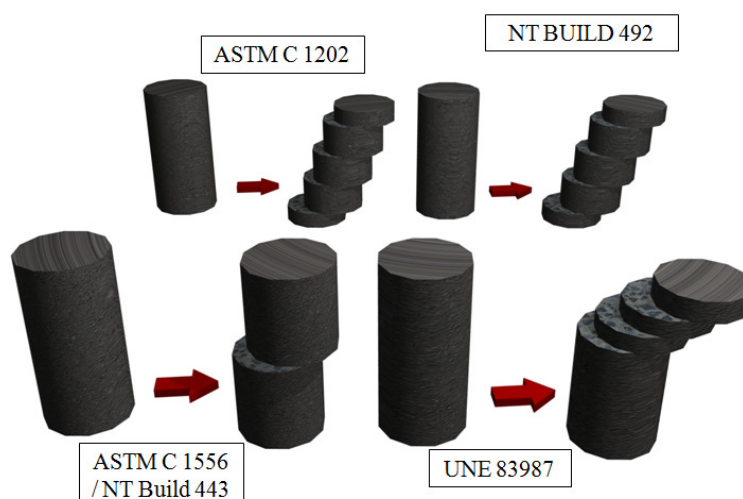
Figura 58. Planejamento dos corpos de prova



Fonte: produção do autor

Ensaio de penetração de cloretos (ASTM C 1202:2012): será adotado 1 corpo de prova por idade sendo retirados 3 fatias do corpo de prova. Este procedimento foi validado estatisticamente por Medeiros (2013). Da mesma forma serão retiradas 2 fatias de 2x10cm para o ensaio multiregime, 2 fatias de 10x10cm para o ensaio de difusão por imersão e 2 fatias de 5x10cm para ensaio de migração em estado não estacionário conforme NT BUILD 492 (Figura 59).

Figura 59. Identificação de amostras para ensaios ASTM C 1202



Fonte: produção do autor

Tabela 9. Quantificação dos corpos de prova – traços necessários

Legenda	Relação a/ag	Percentual de Substituição de cimento (RV1=resíduo de vidro)	Percentual de Substituição de cimento (RV2=resíduo de vidro moído)	Percentual de Substituição de cimento (ME=metacaulim)	Quantidades de corpos de prova de 10x20cm necessários.
REF	0,60	0	0	0	17
RV1 -10	0,60	10	0	0	17
RV1 -20	0,60	20	0	0	17
RV2 -10	0,60	0	10	0	17
RV2 -20	0,60	0	20	0	17
ME -10	0,60	0	0	10	17
ME -20	0,60	0	0	20	17
RV1ME-10	0,60	5	0	5	17
RV1ME-20	0,60	10	0	10	17
RV2ME-10	0,60	0	5	5	17
RV2ME-20	0,60	0	10	10	17
Total de corpos de prova:					187

Fonte: produção do autor

O levantamento do material necessário foi realizado admitindo o rendimento de corpos de prova por betonada (considerando a capacidade da betoneira) em quantidade que possa preencher os moldes de forma plena, em condições satisfatórias de trabalhabilidade e com a menor suscetibilidade a ninhos de concretagem. Para efeito,

estipulou-se valor entre 15-20 corpos de prova. O planejamento dos ensaios chegou ao quantitativo de 17 corpos de prova.

Entretanto, produziu-se 1 corpo de prova a mais por traço, pois havia dúvidas com relação à viabilidade de execução do ensaio NT BUILD 492, logo adotaram-se corpos de prova para possíveis refazimentos de ensaio. Face ao exposto, o quantitativo passou para 18 corpos de prova por traço, totalizando 198 corpos de prova.

Sendo assim Sabendo que serão necessárias 11 betonadas, 1 por traço, e considerado como premissa 40kg de agregado graúdo (capacidade da betoneira) torna-se possível estimar a quantidade necessária de materiais. O estudo de dosagem experimental dos concretos foi baseado no Método do Instituto de Pesquisa Tecnológica – IPT/EPUSP (HELENE e TERZIAN, 1992).

Como mencionado, para conhecer os traços dos concretos a serem estudados executou-se estudo de dosagem, onde, inicialmente, as relações água/aglomerantes e o teor de argamassa (alfa) ideal foram determinados. O teor de argamassa (α), conforme Helene e Terzian (1992) pode ser calculados como:

$$\alpha = \frac{1 + \alpha}{1 + m} \quad (5)$$

Onde: α = teor de argamassa; m = areia + pedra.

Sendo assim, estabeleceu-se o valor de consistência para os concretos através do ensaio de tronco de cone, igual a 20 ± 10 mm.

Estipulou-se um concreto com maior consistência, pois era sabido que o metacaulim contemplava, entre suas propriedades, a redução significativa da consistência dos concretos no estado fresco, principalmente com os percentuais de utilização desta pesquisa.

Foram escolhidos três diferentes traços de concretos, sendo a relação cimento/agregados em massa de materiais secos de 1:3,5, 1:5 e 1:6,5 por abrangerem o campo dos concretos estruturais correntes. Determinou-se, em seguida, a relação a/agl e o teor

ótimo de argamassa para os concretos do traço 1:5 através do estudo de dosagem do método adotado. O teor de argamassa, considerado ótimo para todos os traços foi de 51%. A partir dos dados de consumo de água e fazendo-se uso da Lei de Lyse, que correlaciona a relação água/cimento (a/c) com a relação cimento/agregados em massa de materiais secos (1/m), pôde-se calcular a relação água/aglomerante para os concretos dos outros dois traços em estudo, ou seja 1:3,5 e 1:6,5.

Figura 60. Moldagem de corpos de prova para o ensaio de dosagem IPT



Fonte: produção do autor

Utilizando o consumo de materiais obtido pelo método, tornou-se possível obter os traços da pesquisa e o quantitativo total de material, entretanto foi também necessário a realização de compensação de volumes por conta da variação da massa específica dos materiais – cimento, resíduo de vidro e metacaulim - que são diferentes.

Uma vez que a massa específica do cimento é distinta da massa específica do resíduo de vidro, torna-se necessário calcular a quantidade de massa de resíduo a utilizar de forma que não houvesse diferença no volume na mistura e conseqüentemente variação no volume total do concreto. Para efeito, utilizou-se a Equação 4:

$$M_{\text{resíduo}} = M_{\text{cimento}} \times \frac{\gamma_{\text{resíduo}}}{\gamma_{\text{cimento}}} \quad (4)$$

Onde: $M_{\text{resíduo}}$ = massa do resíduo, em kg; M_{cimento} = massa do cimento, em kg; $\gamma_{\text{resíduo}}$ = massa específica do resíduo (2,51), em kg e γ_{cimento} = massa específica do cimento, em kg (3,07).

Cálculos:

$$M_{\text{res}} = M_{\text{cim}} \times y_{\text{res}} (2,51) / \gamma_{\text{cim}} (3,07) \quad 0,8176 * 0,05 = 0,041 \text{ (para o percentual de 5\%)}$$

$$M_{\text{res}} = M_{\text{cim}} \times y_{\text{metacaulim}} (2,55) / \gamma_{\text{cim}} (3,07) \quad = y_{\text{metacaulim}} = 2,55 / 3,07 = 0,8306$$

$$= y_{\text{res}} = 2,51 / 3,07 = 0,8176 \quad 0,8306 * 0,10 = 0,0831 \text{ (para o percentual de 10\%)}$$

$$0,8176 * 0,10 = 0,0818 \text{ (para o percentual de 10\%)}$$

$$0,8176 * 0,20 = 0,1635 \text{ (para o percentual de 20\%)}$$

$$0,8306 * 0,20 = 0,1661 \text{ (para o percentual de 20\%)}$$

$$0,8306 * 0,05 = 0,042 \text{ (para o percentual de 5\%)}$$

Tabela 10. Traços a serem adotados (com compensação de volumes)

Descrição	Legenda	Cimento	Areia	Brita	a/agl	RVL	Consumo de cimento (Kg/m ³)
Concreto de referência	REF	1	2,89	3,74	0,60	-	302,85
Concreto com 10% de substituição do cimento por resíduo de vidro sem moagem	RV1-10	0,90	2,89	3,74	0,60	0,0818	272,57
Concreto com 20% de substituição do cimento por resíduo de vidro sem moagem	RV1-20	0,80	2,89	3,74	0,60	0,1635	242,28
Concreto com 10% de substituição do cimento por resíduo de vidro com moagem	RV2-10	0,90	2,89	3,74	0,60	0,0818	272,57
Concreto com 20% de substituição do cimento por resíduo de vidro com moagem	RV2-20	0,80	2,89	3,74	0,60	0,1635	242,28
Concreto com 10% de substituição do cimento por metacaulim	ME-10	0,90	2,89	3,74	0,60	0,0831	272,57
Concreto com 20% de	ME-20	0,80	2,89	3,74		0,1661	242,28

Descrição	Legenda	Cimento	Areia	Brita	a/agl	RVL	Consumo de cimento (Kg/m ³)
substituição do cimento por metacaulim					0,60		
Concreto com 5% de substituição do cimento por metacaulim e mais 5% de substituição do cimento por resíduo de vidro <u>sem</u> moagem	RV1ME-10	0,90	2,89	3,74	0,60	0,041 + 0,042 = 0,083	272,57
Concreto com 10% de substituição do cimento por metacaulim e mais 10% de substituição do cimento por resíduo de vidro <u>sem</u> moagem	RV1ME-20	0,80	2,89	3,74	0,60	0,0818 + 0,0831 = 0,1649	242,28
Concreto com 5% de substituição do cimento por metacaulim e mais 5% de substituição do cimento por resíduo de vidro <u>com</u> moagem	RV2ME-10	0,90	2,89	3,74	0,60	0,041 + 0,042 = 0,083	272,57
Concreto com 10% de substituição do cimento por metacaulim e mais 10% de substituição do cimento por resíduo de vidro <u>com</u> moagem	RV2ME-20	0,80	2,89	3,74	0,60	0,0818 + 0,0831 = 0,1649	242,28

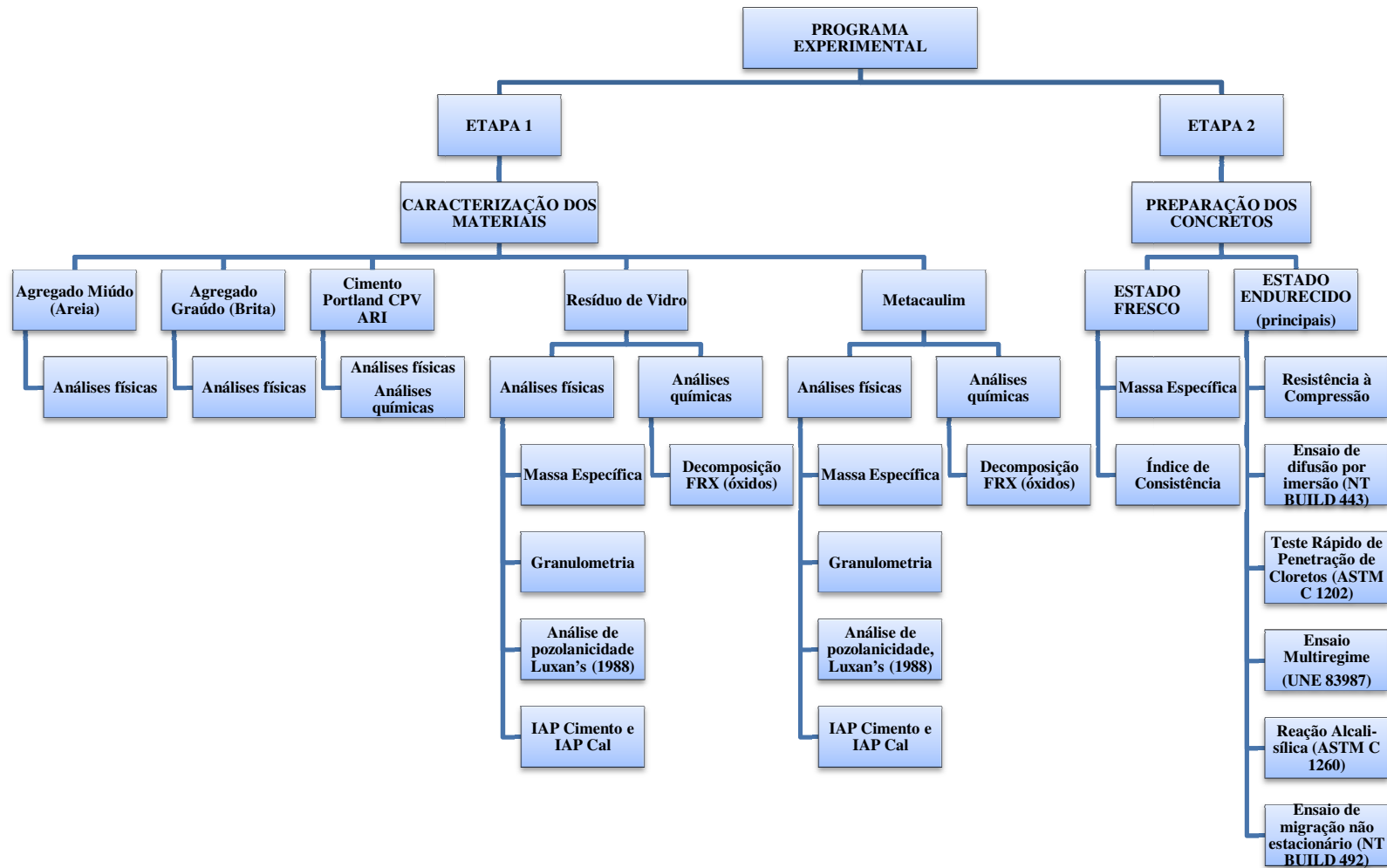
Tabela 11. Consumo de materiais (com compensação de volumes)

Mistura	Cimento (kg)	Areia (kg)	Brita (kg)	Água (l)	Resíduo de vidro (kg)	Metacaulim (kg)
REF	10,70	30,91	40,00	6,42	0	0
RV1-10	9,63	30,91	40,00	6,42	$=(0,0818*10,70)=$ 0,8753	0
RV1-20	8,56	30,91	40,00	6,42	$=(0,1635*10,70)=$ 1,7495	0
RV2-10	9,63	30,91	40,00	6,42	$=(0,0818*10,70)=$ 0,8753	0
RV2-20	8,56	30,91	40,00	6,42	$=(0,1635*10,70)=$ 1,7495	0
ME-10	9,63	30,91	40,00	6,42	0	$=(0,0831*10,70)=$ 0,8892
ME-20	8,56	30,91	40,00	6,42	0	$=(0,1661*10,70)=$ 1,7773
RV1ME-10	9,63	30,91	40,00	6,42	$=(0,041*10,70)=$ 0,4387	$=(0,042*10,70)=$ 0,4494
RV1ME-	8,56	30,91	40,00	6,42	$=(0,0818*10,70)=$	$=(0,0831*10,70)=$

Mistura	Cimento (kg)	Areia (kg)	Brita (kg)	Água (l)	Resíduo de vidro (kg)	Metacaulim (kg)
20					0,8753	0,8892
RV2ME - 10	9,63	30,91	40,00	6,42	$=(0,041*10,70)=$ 0,4387	$=(0,042*10,70)=$ 0,4494
RV2ME - 20	8,56	30,91	40,00	6,42	$=(0,0818*10,70)=$ 0,8753	$=(0,0831*10,70)=$ 0,8892
Total:	101,65	340,01	440	70,62	7,88	5,34
					RV1=3.939 kg	
					RV2=3.939 kg	

A partir do exposto, constatou-se a necessidade de 3 sacos de cimento (40kg), por volta de 2 toneis de brita e 2 toneis de areia para o experimento. Necessitando-se ainda de 7,88 kg de resíduo de vidro e de 5,34kg de metacaulim.

A seguir são demonstrados, por meio de estruturas analíticas, o planejamento dos experimentos.



3.3. Materiais

Os materiais utilizados para o preparo dos 198 corpos de prova de concreto foram: areia natural de jazida, brita de origem granítica, cimento Portland CPV ARI, água fornecida pela concessionária local (CESAN), resíduo de lapidação de vidros após processo de tratamento do efluente e metacaulim da Metacaulim do Brasil.

Foram realizados ensaios de dosagem de concretos pelo método IPT utilizando-se cimento CPV ARI e agregados oriundos de jazidas do município de Serra, abrigados atualmente nas baías do LEMAC.

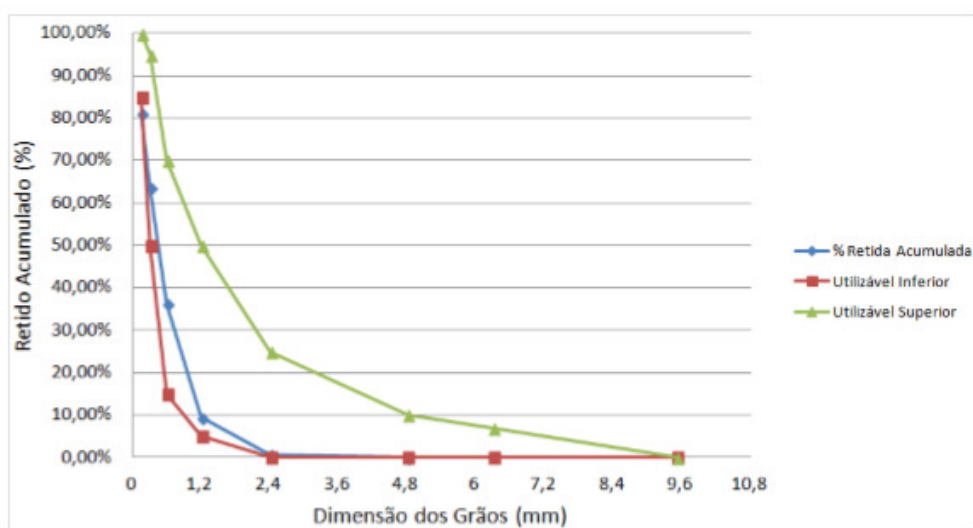
3.3.1. Agregado miúdo

A areia utilizada como agregado miúdo trata-se de uma areia quartzosa proveniente de jazida classificada de acordo com a norma NBR 7211 (ABNT, 2009) dentro do limite da zona ótima com módulo de finura igual a 1,92. Os ensaios de caracterização da areia foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade.

Tabela 12. Propriedades físicas agregado miúdo

Propriedades	Método de ensaio	Resultado
Dimensão máx. característica (mm)	NBR NM 248 (ABNT,2003)	2,40
Módulo de Finura	NBR NM 248 (ABNT,2003)	1,92
Massa específica (g/cm ³)	NBR NM 52 (ABNT,2009)	2,57
Material Pulverulento (%)	NBR NM 46 (ABNT,2003)	6,39
Índice de Volume de Vazios (%)	NBR NM 45 (ABNT,2006)	34,63
Matéria Orgânica	NBM NM 49 (ABNT,2001)	Clara
Teor de Argila e Materiais Friáveis (%)	NBR 7218 (ABNT,2010)	0,11

Figura 62. Distribuição granulométrica do agregado miúdo



Fonte: Mittri (2016)

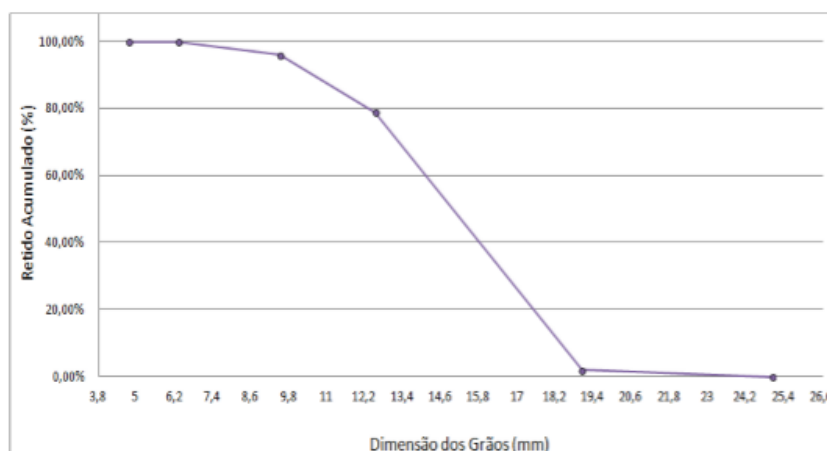
3.3.2. Agregado graúdo

O agregado graúdo utilizado no programa experimental é proveniente do processo de britagem de rochas graníticas e gnáissicas da região da Grande Vitória. Esse agregado foi lavado com o auxílio de uma betoneira de eixo central a fim de remover qualquer impureza que pudesse influenciar nas propriedades do concreto. Após esse procedimento, a amostra foi seca ao ar e acondicionada em tambores plásticos até o momento da utilização. A caracterização da brita foi realizada no LEMAC/UFES e os resultados são apresentados a seguir.

Tabela 13. Propriedades físicas agregado graúdo

Propriedades	Método de ensaio	Resultado
Dimensão máx. característica (mm)	NBR NM 248 (ABNT,2003)	19
Módulo de Finura	NBR NM 248 (ABNT,2003)	6,98
Massa específica (g/cm ³)	NBR NM 53 (ABNT,2009)	2,77
Absorção de água (%)	NBR NM 53 (ABNT,2009)	0,73
Massa unitária no estado solto (g/cm ³)	NBR NM 45 (ABNT,2006)	1,45

Figura 63. Distribuição granulométrica do agregado graúdo



Fonte: Mittri (2016)

3.3.3. Água

A água utilizada foi fornecida pela concessionária de serviço local (CESAN).

3.3.4. Cimento

O cimento utilizado foi o cimento Portland de alta resistência inicial, CPVARI de acordo com a norma NBR 5733 (ABNT, 1991). Este foi adotado por ser um aglomerante que apresenta um alto desempenho e possuir poucas adições entre os disponíveis no mercado capixaba que possam, posteriormente, reagir com o resíduo. Depois de recebido, os sacos de cimento foram ensacados em plásticos, empilhados sobre pallets e armazenados em câmara seca com temperatura e umidade controladas, a fim de manter suas propriedades físicas e químicas. A caracterização química referente ao lote de cimento utilizado foi fornecida pelo fabricante e sua caracterização física foi realizada no laboratório de ensaios em materiais de construção (LEMAC) da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES). A partir da inclusão de resíduos de vidro e metacaulim pretende-se avaliar os resultados de desempenho com a interação com o clínquer. A Tabela 14 apresenta as características do cimento CPV adotado.

Tabela 14. Caracterização física e química do cimento

Propriedade		Resultado	Método de Ensaio	Limite
Massa específica (g/cm ³)		3,07	NBR NM 23 (ABNT, 2001)	N.E.
Finura	Área específica - Blaine (m ² /kg)	4751	NBR NM 76 (ABNT, 1998)	≥ 3000
	Material retido peneira #400 (%)	2,2	Controle Holcim	N.E.
Tempo de pega	Ínicio de Pega (min)	135	NBR NM 65 (ABNT, 2003)	≥ 60
	Fim de Pega (min)	190	NBR NM 65 (ABNT, 2003)	≤ 600
Resistência à Compressão	1 dia (Mpa)	28,4	NBR 7215 (ABNT, 1997)	≥ 14
	3 dias (Mpa)	41,2	NBR 7215 (ABNT, 1997)	≥ 24
	7 dias (Mpa)	46,4	NBR 7215 (ABNT, 1997)	≥ 34
	SiO ₂ (%)	19,42	NBR 14656 (ABNT, 2001)	N.E.
	CaO (%)	63,69	NBR 14656 (ABNT, 2001)	N.E.
	MgO (%)	0,86	NBR 14656 (ABNT, 2001)	N.E.
	Al ₂ O ₃ (%)	-	NBR 14656 (ABNT, 2001)	N.E.
	Fe ₂ O ₃ (%)	2,93	NBR 14656 (ABNT, 2001)	N.E.
	K ₂ O(%)	0,8	NBR 14656 (ABNT, 2001)	N.E.
	SO ₃ (%)	3,02	NBR 14656 (ABNT, 2001)	≤ 4,5
	C ₃ A teórico	7,74	NBR 14656 (ABNT, 2001)	N.E.
	Resíduo Insolúvel - RI (%)	0,92	NBR NM 15(ABNT, 2012)	≤ 1,0

Fonte: Dados do fabricante (Holcim)

3.3.5. Resíduo do processo de lapidação dos vidros

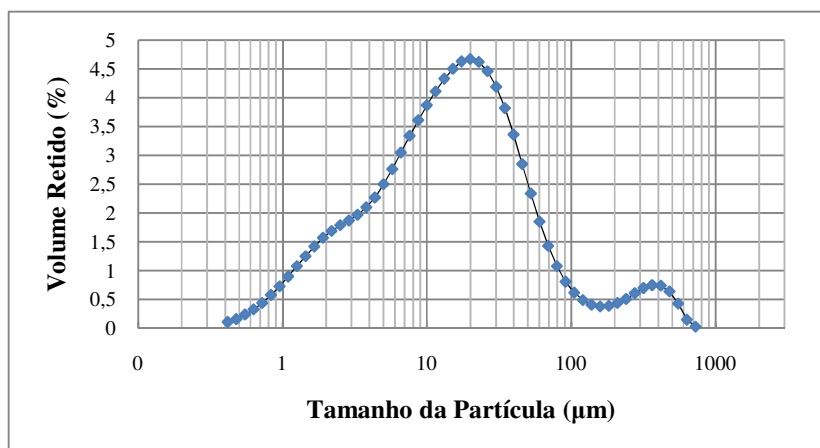
O resíduo utilizado nas misturas de concreto foi coletado na estação de reaproveitamento de água localizada no CIVIT II, município da Serra, região metropolitana da Grande Vitória, estado do

Espírito Santo, Brasil. Este resíduo é proveniente do processo de lapidação dos vidros sodo-cálcicos, mecanismo que apara as extremidades, evitando o acabamento cortante das chapas. É importante salientar que, conforme a Associação Técnica Brasileira da Industrias Automáticas de Vidro, ABVIDRO (2010) o vidro pode ser classificado de acordo com a composição química: vidro sodo-cálcico: utilizado em embalagens, de forma geral (garrafas, potes e etc.) e como vidro plano aplicado na industria automobilística, construção civil e em eletrodomésticos; vidro boro-silicato: utilizado em utensílios domésticos resistentes a choques térmicos e vidro ao chumbo: utilizados em peças que requerem mais brilho, função atribuída à adição de chumbo, como copos, taças, álices, ornamentos, etc.

A água é indispensável no processo de lapidação do vidro, logo o seu reaproveitamento é realizado por meio da estação vertical de tratamento de efluentes, dotada de um filtro prensa em seu processo final de decantação e clarificação da água. O produto final trata-se de um material em forma de lama acinzentada contendo grande quantidade de silício (SiO_2) e óxido de alumínio (Al_2O_3) este material foi coletado e submetido a procedimento de secagem.

A secagem do resíduo foi realizada em área coberta e ventilada, efetuando-se, em seguida, o primeiro processo de destorroamento. Após isso, foi seco o material em estufa a 105°C e novamente procedeu-se o destorroamento. Após este processo, o resíduo foi armazenado em reservatórios vedados. Após este processo, o resíduo foi submetido a ensaio de granulometria a laser (granulometro Symaptech) e apresentou 90% das partículas abaixo de $73 \mu\text{m}$ e partícula média de $42,169 \mu\text{m}$. A Figura 64 apresenta a curva granulométrica do resíduo.

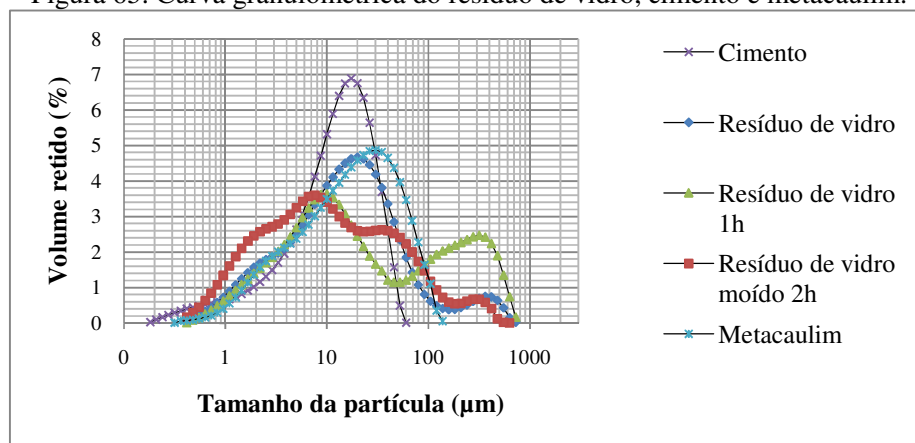
Figura 64. Curva granulométrica do resíduo de vidro.



Fonte: Produção do autor

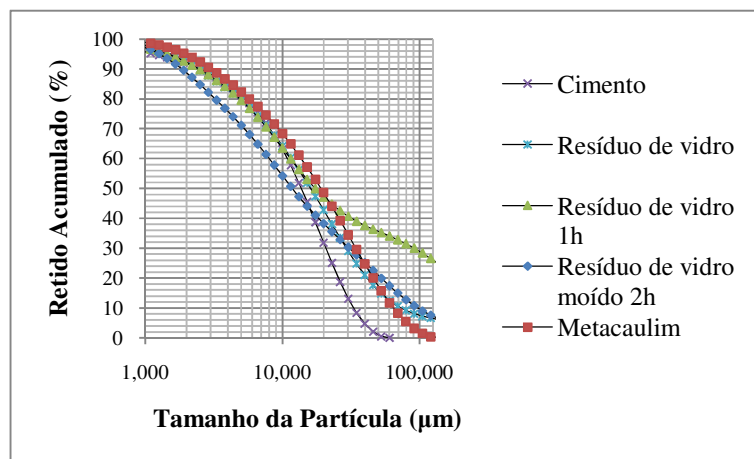
A fim de comparar a distribuição granulométrica do resíduo de vidro sem beneficiamento com o resíduo moído por 2 horas e com o cimento e o metacaulim tem-se as figuras seguintes.

Figura 65. Curva granulométrica do resíduo de vidro, cimento e metacaulim.



Fonte: Produção do autor

Figura 66. Retido acumulado do resíduo de vidro, cimento e metacaulim.



Fonte: Produção do autor

Por meio do exposto, nota-se que o resíduo de vidro apresenta uma composição granulométrica próxima do metacaulim e quando este passa por processo de moagem diminui-se a quantidade de partículas superiores a 10 μm, potencializando a utilização do resíduo em matrizes cimentícias, conforme estado da arte apresentado.

Tabela 15. Distribuição granulométrica do resíduo de vidro com e sem moagem

Resíduo de vidro sem moagem		Resíduo de vidro com moagem	
Material passante (%)	Granulometria (μm)	Material passante (%)	Granulometria (μm)
10	2,411	10	1,612
50	16,059	50	10,28
90	73,053	90	84,56

Fonte: Produção do autor

Tabela 16. Distribuição granulométrica do resíduo em comparação com os outros materiais

Tipo	D(0,1)	D(0,5)	D(0,9)	Dm (μm)
Cimento	2,489	13,75	32,98	16,06
Resíduo de vidro	2,411	16,06	73,05	42,169
Resíduo de vidro moído por 2 horas	1,612	10,28	84,56	35,02
Metacaulim	2,624	16,65	56,16	23,8

Fonte: Produção do autor

Nota-se com a moagem de 2h redução da dimensão média da partícula do resíduo de vidro de 42,17 μm para 35,02 μm . A massa específica do resíduo de vidro de acordo com NBR NM 23 (ABNT, 2001) obteve valor de 2,51g/cm³.

Conforme Pignaton (2012), a massa unitária no estado solto é de 0,627 g/cm³ e a superfície específica pelo método Blaine, conforme norma NBR NM 76 (1998) é de 3685,70 cm²/g. Realizou-se a composição química do resíduo de vidro conforme Tabela 17.

Tabela 17. Caracterização química do resíduo de vidro

Propriedade		Resultado
Composição Química	SiO ₂ (%)	64,77
	CaO (%)	6,92
	MgO (%)	4,49
	Al ₂ O ₃ (%)	2,81
	Fe ₂ O ₃ (%)	0,44
	K ₂ O (%)	0,11
	SO ₃ (%)	0,21
	Na ₂ O (%)	19,36
	P ₂ O ₅ (%)	0,15
	TiO ₂ (%)	0,18
	PbO (%)	0,05
	CuO (%)	0,02
	Cr ₂ O ₃ (%)	0,02
SrO (%)	0,01	

Propriedade	Resultado
MnO (%)	0,01
ZrO ₂ (%)	0,01
ZnO (%)	0,01

Fonte: Laboratório do centro de tecnologias do gás e energias renováveis-Itg-er - Natal/RN.

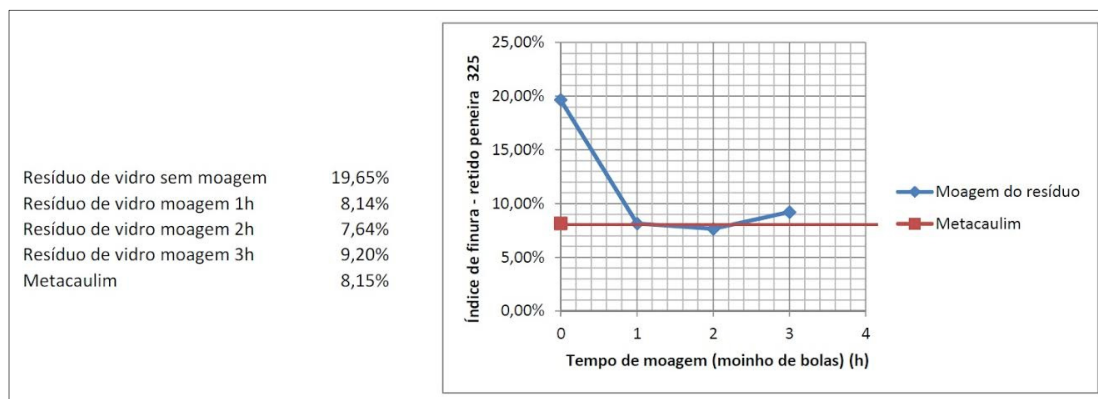
Em função do verificado no estudo bibliográfico e ensaios de índices de pozolanicidade realizados considerou relevante a moagem do resíduo de vidro objetivando a redução da dimensão da partícula e aumento da área específica do resíduo a fim de buscar atendimento aos requisitos da norma pertinente à classificação de materiais pozolânicos. Para efeito, realizou-se estudo para verificação do tempo de moagem necessário para obter melhor a mais adequada dimensão da partícula. Neste contexto, realizou-se a moagem em moinho de bolas (Figura 67) em cada 1 hora de moagem realizando o ensaio de dimensão de partícula na peneira 325 e pôde-se constatar que após 2 horas de moagem não há maiores efeitos (Figura 68) e com duas horas é possível obter um tamanho de dimensão de partícula inferior a pozolana de referência, metacaulim.

Figura 67. Moinho de bolas



Fonte: Produção do autor.

Figura 68. Moagem do resíduo de vidro



3.3.6. Metacaulim

O material utilizado foi o Metacaulim HP da Metacaulim do Brasil. Conforme Tabela 20, observam-se suas características químicas em comparação com o resíduo de vidro e o cimento adotados neste estudo.

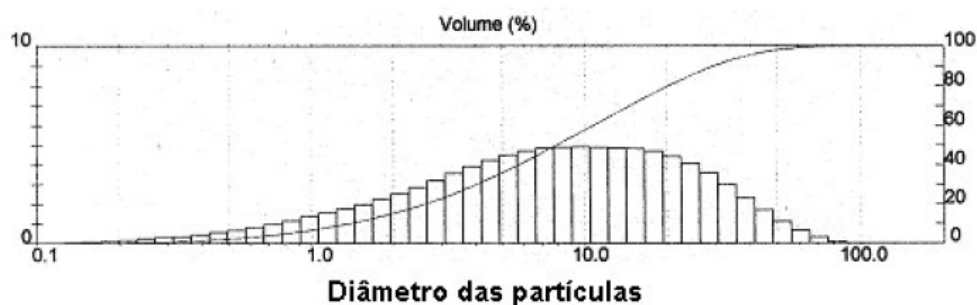
Tabela 18. Composição química típica dos componentes em porcentagens

Componentes	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	Na ₂ O	MgO	SO ₃
Metacaulim	58,7	33,1	1,8	0,2	1,8	0,2	0,2	0,2
Resíduo de vidro	64,77	2,81	0,44	6,92	0,11	19,36	4,49	0,21
CPV ARI	19,42	4,87	2,93	63,69	0,80	-	0,86	3,02

Fonte: Dados do Fabricante e produção do autor

Como se verifica por meio dos resultados da Tabela 20, o metacaulim compõe-se principalmente de sílica, alumina e outros componentes, caracterizando-se como um típico material reativo e de características pozolânicas. Identifica-se a quantidade de sílica similar com o resíduo de vidro e de alumina em valores superiores ao resíduo de vidro e ao cimento. Por meio de trabalho desenvolvido por Helene et. al (2005) tem-se o diâmetro das partículas.

Figura 69. Diâmetro das partículas de metacaulim



Fonte: Helene et. al (2005)

Tabela 19. Diâmetro e densidade dos componentes

Componentes	Diâmetro médio das partículas	Densidade
Metacaulim	12,4 μm	2650 kg/m^3
Resíduo de Vidro Moído	35,02 μm	2510 kg/m^3
CPV ARI	16,06 μm	3070 kg/m^3

Fonte: Lacerda (2005); produção do autor e dados de fabricante

Como se verifica com os resultados obtidos e apresentados na Tabela 21, trata-se de material muito fino com finura superior à dos clínguers moídos de cimento Portland nacionais.

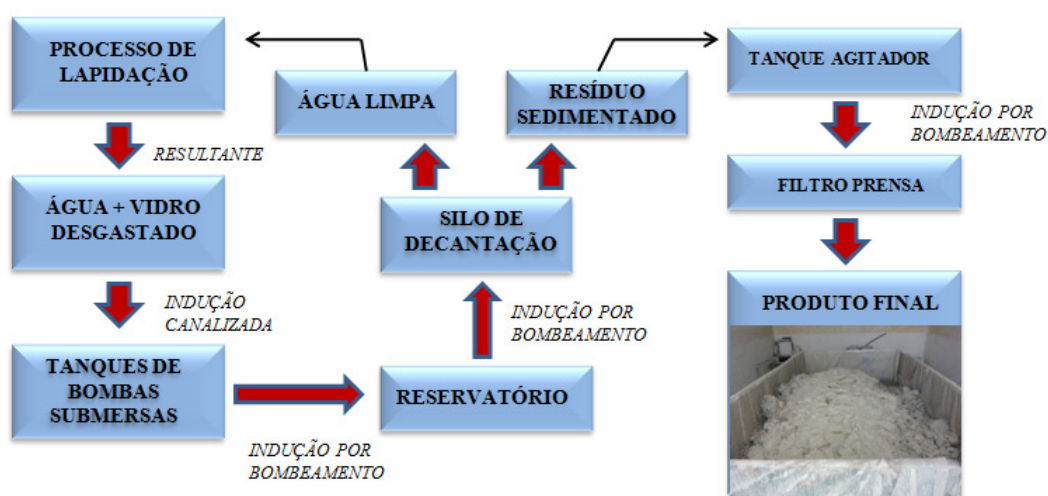
3.4. Métodos

3.4.1. Processo de obtenção do resíduo de vidro aplicado neste estudo

Em decorrência da utilização em larga escala de água proveniente da concessionária, utilizada no processo de lapidação de vidros planos, tornou-se necessário, do ponto de vista ambiental e econômico, o reaproveitamento deste insumo. Para efeito, a empresa fornecedora do resíduo utiliza-se de sistema de estação de tratamento visando o tratamento do efluente da seguinte maneira: a água utilizada no processo de lapidação das chapas de vidro, acrescida do vidro desgastado é despejada em canais que circulam por todo o galpão de manufatura dos vidros. Esta água, juntamente com o resíduo do vidro desgastado, é conduzida por estes canais a tanques de

bombas submersas que por sua vez bombeiam a água até um reservatório, já na porção externa do galpão de processamento de chapas de vidro. Esta água suja é bombeada para um primeiro silo de capacidade igual a 106m³, onde a ela são adicionados produtos químicos para o processo de decantação (PIGNATON, 2012).

Figura 70. Fluxograma do processo de obtenção do resíduo utilizado neste estudo



Fonte: Adequado de Pignaton (2011)

Figura 71. Panos de vidros que passam por processo de lapidação e detalhe de ponto de captação de água residual



Fonte: produção do autor

Figura 72. Água residual bombeada até o silo



Fonte: produção do autor

No silo em que ocorre a decantação a água suja é acumulada até que transborde (Figura 73). Neste momento, a água que transborda já não contém flocos de vidro e é levada a um segundo silo. Deste silo, é bombeada de volta para os galpões para ser utilizada no processo de lapidação das chapas de vidro.

Figura 73. Filtro de decantação de resíduos e o transbordo de água limpa



Fonte: Produção do autor

O resíduo que permanece no fundo do primeiro silo, onde ocorre a decantação, é sugado para um agitador, onde é constantemente misturado para que não endureça (Figura 74). Este material é gradativamente bombeado para o filtro prensa, que está localizado em uma plataforma mais alta.

A partir dali, o material é prensado para que maior quantidade possível de água seja retirada do resíduo e reaproveitada. No entanto, a água resultante do processo de prensagem retorna ao primeiro tanque e passa novamente por todo o ciclo de purificação, para que se garanta que a água que retorna ao processo esteja efetivamente limpa. É possível recuperar entre 95 e 97% da água utilizada no processo.

O material resultante do filtro prensa é uma torta de aspecto acinzentado, levemente úmida, contendo entre 3 e 5% de água (Figura 75). Após a secagem, porém, sua coloração é bem mais clara e possui aspecto acinzentado.

Figura 74. Resíduo proveniente do silo de decantação depositado no tanque agitador, para evitar ressecamento da lama



Fonte: Pignaton (2012)

Figura 75. Armazenamento do resíduo final



Fonte: Produção do autor

É realizada apenas uma prensagem ao dia, na qual são expelidos 290kg deste resíduo e anualmente, 84 toneladas. Parte deste material era recolhido algumas vezes por uma empresa de reciclagem, que utilizava para manufaturar tijolos, atualmente, não há mais o interesse. Porém, a produção da empresa não dá vazão a todo o material e muito dele é encaminhado a aterros sanitários.

O resíduo de vidro foi recolhido e seco a temperatura ambiente. Entretanto, verificou-se que após a secagem por 24 horas o material ainda apresentava regiões com pequena umidade, em função disto optou-se por levar o material em estufa a 100° C até que sua massa tornar-se constante. Em seguida, efetuou-se o destorroamento do mesmo. Após este último procedimento o resíduo de vidro já se encontrava com dimensões de partículas interessantes para a avaliação da sua utilização em concretos.

Figura 76. Resíduo recolhido e submetido a secagem natural



Fonte: Produção do autor

Figura 77. Secagem do resíduo em estufa



Fonte: Produção do autor

Figura 78. Destorroamento do resíduo de vidro - detalhe



Fonte: Produção do autor

3.4.2. Caracterização do resíduo da lapidação do vidro

3.4.2.1. Caracterização química

A caracterização química do resíduo de vidro foi realizada em parceria com o laboratório do Centro de Tecnologias do Gás e Energias Renováveis LTG-ER situado no Rio Grande do Norte. O resíduo de vidro foi analisado pela técnica de Fluorescência de Raio-x utilizando o equipamento EDX-720 da marca Shimadzu. Para a avaliação através do método de perda ao

fogo, o material primeiramente foi seco por 24h em temperatura de 110°C, posteriormente o mesmo material foi aquecido até 1000 °C por 60 minutos.

3.4.2.2. Composição granulométrica

O ensaio foi realizado no Laboratório de Materiais Cerâmicos do Instituto Federal do Espírito Santo – IFES – Campus Vitória. Para determinar a composição granulométrica, utilizou-se um granulômetro a laser da Marca Malvern modelo mastersizer Hydro 2000MU. O equipamento é identificado na Figura 80.

Figura 79. Aparelho para ensaio de granulometria à laser



Fonte: Mittri (2016)

3.4.2.3. Massa específica

O ensaio de massa específica é normatizado pela norma NBR NM 23 (ABNT, 2001) – Cimento Portland e Outros Materiais em Pó – Determinação da Massa Específica. O procedimento do ensaio consiste em encher o frasco com Xileno até a marca zero. Em seguida, pesou-se o resíduo de vidro e adicionou-se ao frasco proporcionando aumento de volume do líquido. O resultado é a divisão da massa (g) pela variação do volume (g/cm^3) e o resultado é a massa específica (g/cm^3).

Figura 80. Ensaio de massa específica do resíduo de vidro



Fonte: Produção do autor

3.4.2.4. Finura

A fim de avaliar a finura por meio da peneira de malha 325 seguiram-se as recomendações da NBR 15894-3 (ABNT,2010) – Metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta – Determinação da Finura por meio da Peneira 45 μ m. A finura do resíduo de vidro por meio da peneira de malha 200 foi determinada a partir da NBR 11579 (ABNT 2013) – Cimento Portland - Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 μ m (n° 200).

Figura 81. Ensaio de finura do resíduo de vidro



Fonte: Produção do autor

3.4.3. Caracterização quanto à atividade pozolânica

A fim de verificar de forma antecipada a potencialidade do resíduo como material pozolânico torna-se necessário a investigação quanto a sua atividade pozolânica. Os ensaios a seguir apresentam procedimentos que relacionam a um nível de desempenho final que deverá ser atendido. Foi verificado se o resíduo em seu estado natural (sem qualquer beneficiamento), sem moagem, atende a estes requisitos e após esta análise foi verificado também a potencialidade deste com o efeito da moagem em moinho de bolas.

3.4.3.1. Ensaio pelo Método de Luxán

Desenvolvido por Luxan, Madruga e Saavreda (1989), consiste em procedimento que fornece resultados de maneira rápida e simplificada.

Objetiva descrever um método para a avaliação da atividade pozolânica, baseado na medição da condutividade ao longo do tempo em solução saturada de hidróxido de cálcio. É realizada uma solução de 200 ml saturada com hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) e mede-se a condutividade desta solução na temperatura de $40 \pm 1^\circ\text{C}$. Após a primeira leitura adiciona-se 5g de material pozolânico, aguarda-se 120 segundos e faz-se uma segunda leitura. A reação da pozolana com os íons Ca^+ e $(\text{OH})^-$ reduz a quantidade de íons livres na solução, conseqüentemente reduz a condutividade.

O método proposto permite a seguinte classificação de materiais com respeito às propriedades pozolânicas:

Tabela 20. Avaliação da atividade pozolânica por meio de medida de condutividade

Classificação do material	Varição na condutividade de acordo com o método proposto (ms/cm)
Sem efeito pozolânico	Menor que 0,4
Efeito pozolânico variável	Entre 0,4 e 1,2
Bom efeito pozolânico	Melhor que 1,2

Figura 82. Execução de ensaio no LEMAC



Fonte: produção do autor

3.4.3.2. Atividade pozolânica com Cal

O ensaio é padronizado pela NR 5751 (ABNT, 2015) - Determinação da atividade pozolânica com cal aos 7 dias e consiste em confeccionar uma argamassa contendo areia normal, hidróxido de cálcio, água e a pozolana que se pretende avaliar. As quantidades de areia, hidróxido de cálcio e pozolana são fornecidas pela norma, entretanto a quantidade de água é referente a manutenção de um índice de consistência de 222 ± 5 mm, procedimento descrito pela norma NBR 7215 (ABNT, 1997). A norma prescreve 104g de hidróxido de cálcio, 936g de areia normal e 228,43g de resíduo de vidro. Este último dependerá da massa específica do material, compreendendo o cálculo de duas vezes a massa específica da pozolana dividido pela massa específica do hidróxido de cálcio, multiplicada pela quantidade do hidróxido de cálcio. A quantidade necessária de água foi de 202g.

Após a confecção da argamassa são moldados três corpos de prova cilíndricos de 5x10cm. Após 24h os corpos de prova são levados para estufa a 55°, permanecendo por 6 dias. Em seguida são

retificados e rompidos por compressão axial. A norma 12653 (ABNT, 2015) – Materiais Pozolânicos – Requisitos recomenda que o resultado das médias das resistências devam ser superiores a 6 MPa a fim de ratificar seu efeito pozolânico.

Figura 83. Execução de ensaio IAP cal



Fonte: Produção do autor

3.4.3.3. Índice de Atividade Pozolânica com Cimento (IAP-CIMENTO)

O ensaio é preconizado pela norma NBR 5752 (ABNT, 2014) – Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias e consiste na confecção de duas argamassas distintas uma contemplando cimento CII-F-32, areia normal e água e outra cimento CII-F-32, substituição parcial pela pozolana, areia normal e água. São fornecidas as quantidades de materiais pela norma. Diferentemente do ensaio com a cal a quantidade de água é fixada.

A fim de avaliar o desempenho do resíduo de vidro foram moldados 6 corpos de prova e aos 28 dias rompidos por compressão axial. A avaliação do desempenho da pozolana é estabelecido pela NBR 12653 (ABNT, 2015) – Materiais Pozolânicos – Requisitos e segundo a norma o índice de desempenho deve ser de no mínimo 90%.

Figura 84. Execução de ensaio IAP cimento



Fonte: Produção do autor

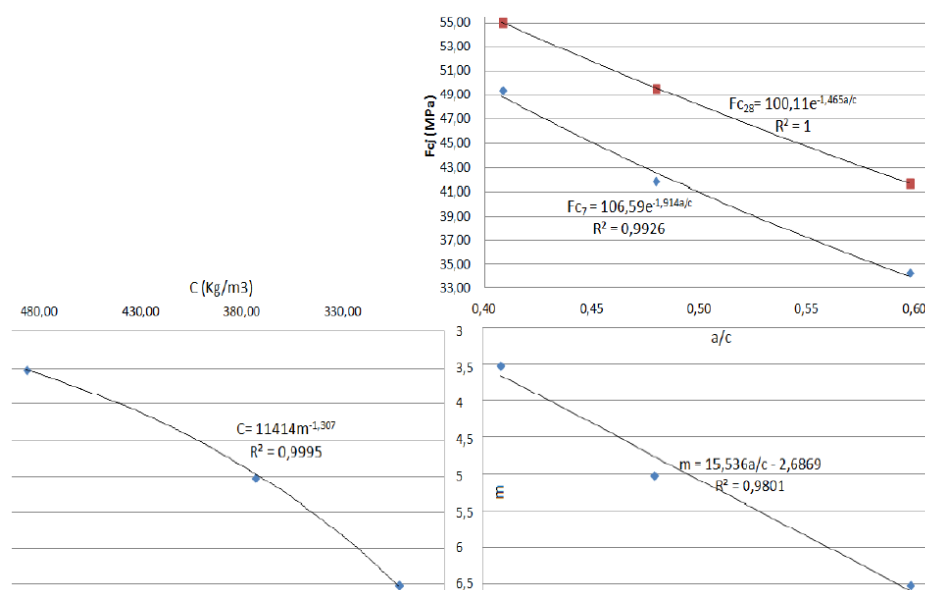
3.4.4. Método de dosagem dos concretos

O método de dosagem aplicado nesta pesquisa foi o método IPT/EPUSP de Helene e Terzian. Método consiste em uma atualização realizada na Escola Politécnica da USP a partir do método desenvolvido inicialmente no IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo.

O método relaciona a resistência à compressão, relação água/cimento, traço e consumo de cimento em um diagrama de dosagem que segue três leis de comportamento, Lei de Abrams, Lei de Lyse e Lei de Molinari. Entende que a melhor proporção entre os agregados disponíveis é aquela que consome a menor quantidade de água para obter um abatimento requerido. Fixado o abatimento requerido, exploram-se diferentes teores de argamassa e relações água/cimento.

Para a elaboração do diagrama, realiza-se uma dosagem experimental fixando o abatimento do concreto e o teor de argamassa. No presente estudo fixou-se 200 ± 20 mm de abatimento e 51% de teor de argamassa. Realizou três traços com diferentes relações água/cimento. As relações encontradas foram de 0,41, 0,48 e 0,60. Foram moldados 6 corpos de prova para cada traço a fim de determinar a resistência à compressão aos 7 e 28 dias. A partir do resultado, tornou-se possível elaborar o diagrama apresentado na Figura 85.

Figura 85. Diagrama de dosagem obtido a partir do método IPT/USP



Fonte: Mittri (2016)

Obtidos os valores de relações água cimento e consumo dos materiais adotou-se para esta pesquisa relação água/cimento 0,60 por configurar-se aquela que proporciona concretos com maior porosidade e maior potencialidade de avaliação dos efeitos de prevenção do ingresso de agentes agressivos com o uso do material pozolânico. Outra justificativa, é esta relação configurar na NBR 6118 (ABNT, 2014) como a maior relação permitida em áreas urbanas.

Este procedimento de dosagem foi realizado também para a pesquisa de Mittri (2016), onde foi necessário trabalhar com as três relações água/cimento a fim de investigar a influência do uso de resíduo de rochas ornamentais após tratamento térmico em estruturas de concreto. A partir deste estudo e de outras pesquisas, constatou que a variação de relação água/cimento produz resultados finais com comportamentos similares e que a inclusão de relações distintas não acrescenta novas percepções à análise individual da utilização do material pozolânico.

3.4.5. Determinação da massa específica no estado fresco

O ensaio foi realizado conforme a norma NBR 9833 (ABNT,2009) e consiste em encher com concreto uma fôrma metálica de massa e volume conhecidos e pesar este recipiente. Após isto realiza-se a subtração do peso da forma somado ao concreto pelo peso da forma. Após divide pelo volume da forma. O ensaio foi realizado no momento da confecção dos corpos de prova, configurando o mesmo material adotado para os demais ensaios da pesquisa.

3.4.6. Resistência à compressão axial

O ensaio é normatizado conforme a norma NBR 5739 (ABNT,2007). Para cada das 11 misturas de concreto foram moldados 9 corpos de prova cilíndricos com dimensões de 10x20cm para o ensaio de resistência à compressão. Separou-se 3 corpos de prova para cada idade, 28, 56 e 91 dias. Os corpos de prova foram retificados e submetidos ao ensaio de compressão axial.

Figura 86. Ensaio de resistência à compressão



Fonte: Produção do autor

3.4.7. Ensaio acelerado de migração de cloretos – UNE 83987-14

O ensaio é normatizado pela norma espanhola UNE 83987 (UNE, 2014) que consiste em um procedimento a fim de estimar o coeficiente de difusão de cloretos do concreto. Primeiramente, foram retiradas fatias dos corpos de prova contemplando 20 mm de espessura. Foram utilizados dois corpos de prova para cada um dos 11 traços. Foram seladas as faces laterais dos corpos de prova com verniz poliuretânico. A Figura 87 apresenta os corpos de prova cerrados e selados para a execução do ensaio, além de outros ensaios que apresentavam procedimentos similares.

Figura 87. Preparação das amostras



Fonte: Produção do autor

Após o procedimento de secagem, as amostras foram imersas em água até que sua massa se tornasse constante. Para a obtenção do coeficiente de difusão executou-se um aparato a fim de que as amostras ficassem de um lado expostas a uma solução de cloreto de sódio (58,42g de NaCl por litro de água) e outra face exposta à água deionizada. O aparato consiste na utilização de tubos de PVC com 100mm de diâmetro, acrescentando-se silicone para melhor estanqueidade do sistema, este procedimento foi adotado por Medeiros (1993).

Figura 88. Montagem do aparato de migração de cloretos



Fonte: Produção do autor

É realizado um teste de estanqueidade em uma das câmaras e depois é acrescentada a outra parte do conjunto. Logo após, são preenchidos os dois lados do sistema, um lado com água deionizada e outro com solução de NaCl. Incluíram-se hastes de aço carbono em cada lado da câmara. Estas funcionam como pólos positivos e negativos onde haverá passagem de corrente elétrica visando acelerar a passagem dos cloretos utilizando-se uma diferença de potencial de 12V.

Figura 89. Execução de ensaio de migração de cloretos



Fonte: Produção do autor

Foram realizadas leituras periódicas de condutividade na câmara que continha a água deionizada convertendo-se, em seguida, esta quantidade para quantidade de NaCl em mol. Realizou-se também leituras utilizando-se de multímetro. A partir destes dados e trabalhando os resultados ao longo do tempo foi possível determinar o início e o término do estado estacionário e não estacionário necessário para a determinação do coeficiente de difusão de cloretos, objeto do ensaio.

Figura 90. Leituras do ensaio de migração de cloretos



Fonte: Produção do autoR

3.4.8. Ensaio acelerado de migração de cloretos – ASTM C1202/12

Realizou-se a determinação da penetrabilidade de cloretos por meio de mecanismo de migração de acordo com o prescrito na norma ASMT C 1202 (ASMT, 2012). Por meio desta norma, torna-se possível classificar os concretos com relação a maior ou menor resistência ao ataque de cloretos. Para efeito, foram serrados os corpos de prova, contemplando 3 amostras por cada mistura e seladas as faces laterais com verniz poliuretânico.

Figura 91. Corte das amostras

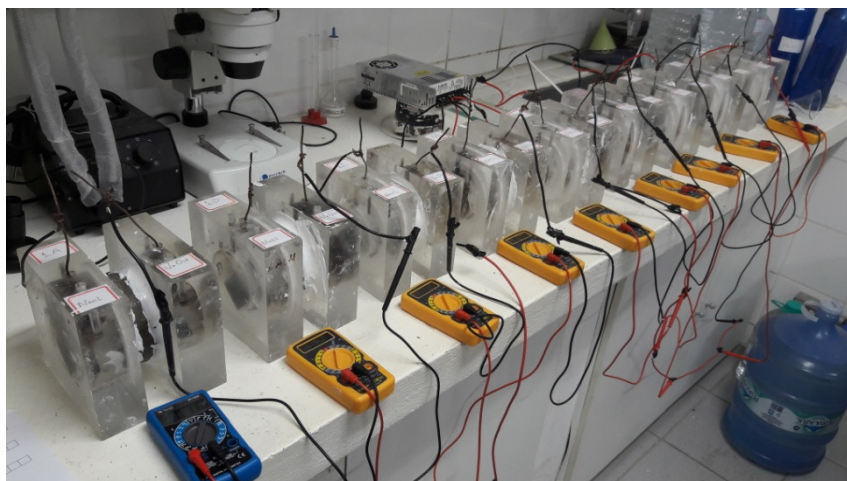


Fonte: Produção do autor

As amostras foram saturadas até que fossem mantidas as suas massas, não foi possível utilizar o equipamento dessecador para exposição à vácuo e saturação das amostras, sendo assim, foi realizado procedimento de imersão em etapas até a saturação completa. Após este procedimento as amostras foram acopladas em células de acrílico onde se faz presente espaços internos para inclusão de um lado hidróxido de sódio (NaOH), pólo positivo, cátion, e do outro cloreto de sódio (NaCl), pólo negativo, anion.

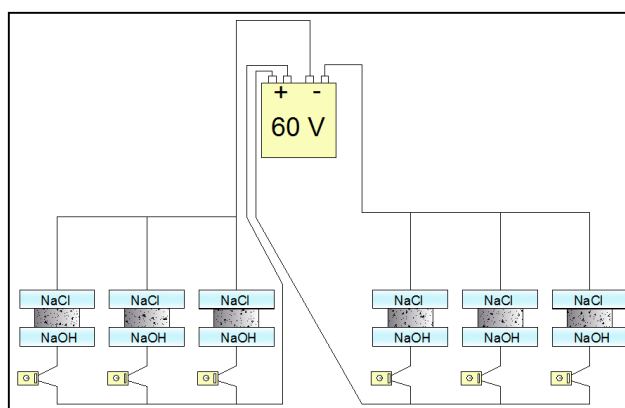
Montadas as células é realizada a montagem do circuito de maneira que passe pelas amostras uma diferença de potencial de $60 \pm 0,1V$. São realizadas leituras da corrente que passa pelas amostras a cada 30 minutos durante seis horas. Por meio da corrente passante total no período de 6 horas e a fórmula estipulada pela norma tornou-se possível a classificação das amostras de concreto.

Figura 92. Ensaio ASTM C 1202 em execução



Fonte: Produção do autor

Figura 93. Representação do ensaio ASTM C 1202



Fonte: Produção do autor

3.4.9. Ensaio de migração de cloretos em regime não estacionário – NT BUILD 492-99

O ensaio é preconizado pela norma NT BUILD 492 (NT BUILD, 1999) e baseia-se na passagem de diferença de potencial nas amostras, entretanto a determinação da voltagem dependerá de um procedimento de leitura inicial e correção da voltagem a partir do resultado da corrente. Neste

contexto, para a realização deste ensaio tornou-se fundamental a utilização de fonte de alimentação variável a fim de regular a passagem de diferença de potencial. O aparato recomendado pelo ensaio assemelha-se em muito com o conceito estipulado pela norma ASTM C1202 (ASTM,12012), logo promoveu-se utilização deste tendo em vista a similaridade com o ensaio preconizado pela NT BUILD 492. Utilizaram duas amostras de 5x10cm retiradas das partes centrais de corpos de prova cilíndricos de 20x10cm. Foram impermeabilizadas as faces laterais e imersas para condicionamento em solução de hidróxido de cálcio. Após a verificação de sua constância de massa, as amostras foram acopladas no aparato para execução do ensaio.

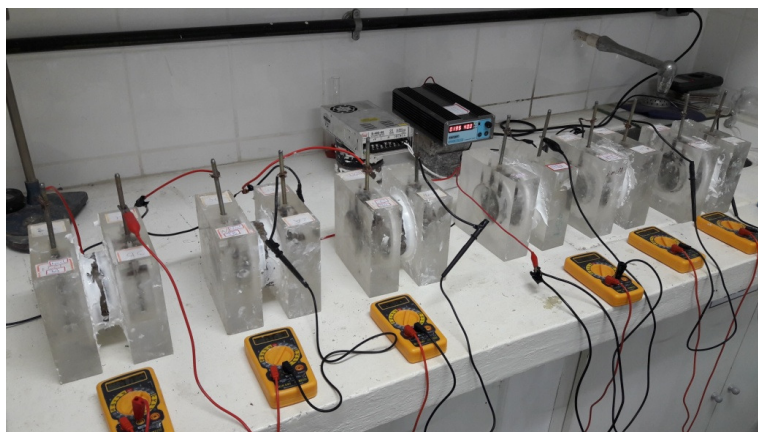
Após a conclusão do período de duração do ensaio, que é relacionado a partir dos valores de corrente da leitura inicial, foi realizado o rompimento diametral das amostras e a aspersão de nitrato de prata. A partir dos valores de profundidade de penetração de cloretos e por meio de equação apresentada na norma é possível obter o coeficiente de difusão de cloretos em regime não estacionário.

Figura 94. Saturação das amostras com hidróxido de cálcio



Fonte: Produção do autor

Figura 95. Ensaio NT BUILD 492 em execução



Fonte: Produção do autor

3.4.10. Ensaio de difusão de cloretos por imersão – NT BUILD 443-95

O ensaio é preconizado pela norma NT BUILD 443 (NT BUILD, 1995) e refere-se na imersão de corpos de prova em solução salina por um período determinado. A sua adoção foi necessária para avaliar a penetração de cloretos por meio de mecanismos de difusão, diferentemente de migração, conforme os métodos anteriormente apresentados. Para efeito, foram utilizados três corpos de prova para cada mistura de concreto (curados por período de 28 dias) que foram serrados ao meio compreendendo amostras cilíndricas de 10x10cm. Foram adotadas 2 amostras para cada idade de exposição a cloretos de 60, 120 e 180 dias. As faces laterais dos corpos de prova foram impermeabilizadas a fim de que o ingresso de cloretos ocorresse apenas em sua face superior. Os concretos foram imersos em solução salina de 165g de NaCl por litro de solução.

Para cada idade, os concretos foram rompidos diametralmente e foi aspergido nitrato de prata. Na idade intermediária, foram realizadas análise de teor de cloretos para obtenção do coeficiente de difusão de cloretos.

Figura 96. Ensaio de difusão por imersão



Fonte: Produção do autor

Figura 97. Amostras rompidas com aspersão de nitrato de prata



Fonte: Produção do autor

3.4.11. Ensaio de álcali sílica pelo método de barras (ASTM C1260/14)

Este método de ensaio proporciona um meio para detectar o potencial de reatividade álcali-sílica em concretos, o que pode resultar numa prejudicial expansão interna e processos de manifestações patológicas, tais como fissuração. É especialmente útil para agregados que reagem lentamente ou produzem uma expansão retardada na reação. Para efeito, foram moldadas 3 barras

de argamassas para cada mistura que foram completamente submersas em água de solução de NaOH.

Conforme a norma, os recipientes devem ser feitos de um material para resistir a uma exposição prolongada a 80 ° C (176 ° F) e deve ser resistente e inerte em relação à solução de NaOH. Os recipientes devem ser construídos de modo que, quando usados para armazenamento das amostras, evitem a perda ou o ganho de umidade, utilizando vedações adequadas. As barras na solução devem ser colocadas e apoiadas de modo que a solução tenha acesso a toda a superfície das barras; portanto, deve-se assegurar que as amostras não toquem os lados do recipiente e não se toquem.

Figura 98. Moldagem das barras de argamassas



Fonte: Produção do autor

Figura 99. Processo de execução do ensaio de reação álcali-sílica (a: amostras em estufa; b: retirada de amostras de solução; c: processo de secagem e d: leitura da expansibilidade)



Fonte: Produção do autor

3.4.12. Ensaio de resistividade elétrica do concreto

Este método de ensaio proporciona um meio para se obter a resistividade elétrica do concreto, conforme a norma NBR 9204 (ABNT,2012) Concreto endurecido – Determinação da resistividade elétrica – Volumétrica – Método de ensaio. Foram utilizados 3 corpos de prova de 10x20cm para cada mistura nas idades de 56 e 91 dias. O procedimento baseia-se na obtenção da resistividade de maneira rápida e simples bastando a calibração do equipamento e acoplamento dos eletrodos na face lateral do corpo de prova.

Figura 100. Ensaio de resistividade



Fonte: Produção do autor

3.4.13. Ensaio de velocidade de propagação de onda ultrassônica

Este método de ensaio proporciona um meio para se obter a velocidade de propagação de onda em concretos, conforme a norma NBR 8802 (ABNT, 2013) Concreto endurecido — Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Esta propriedade foi mensurada com a adoção de um medidor de velocidade de pulso ultrassônico, modelo Pundit Lab da Proceq. Configura-se em um ensaio não-destrutivo que baseia na velocidade da propagação da onda ultrassônica (v), ou seja, depende do tempo de emissão e recepção da onda nos transdutores ao longo do corpo de prova (altura).

Figura 101. Ensaio de ultrassom



Fonte: Produção do autor

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta os principais resultados obtidos no ensaios referentes aos concretos e materiais pozolânicos adotados, assim como a interação entre eles. Análises estatísticas também foram processadas a fim de obter um melhor entendimento dos resultados apresentados.

4.1. Caracterização do resíduo da lapidação do vidro

O resíduo de vidro foi submetido a ensaios a fim de avaliar suas características físicas e químicas. Somam-se ainda, ensaios específicos relacionados à verificação da potencialidade quanto a sua atividade pozolânica, quer seja o resíduo com moagem, quer seja sem.

4.1.1. Caracterização química do resíduo da lapidação do vidro

A caracterização química do resíduo de vidro foi obtida por ensaio de fluorescência de raios-X. De acordo com Shi e Zheng (2007), a indústria da construção, especialmente a de concreto, pode fornecer relevante solução para o impacto ambiental proveniente dos resíduos de vidro, pois dentre os diversos resíduos sólidos urbanos o vidro pode ser considerado um dos mais adequados como substituição ao cimento devido as suas características físicas e composição química. A Tabela 21 apresenta a composição química do vidro em diferentes pesquisas e a média entre elas.

Tabela 21. Caracterização química do resíduo de vidro em diferentes pesquisas

Composição química	Schwarz <i>et al.</i> (2008)	Limbachiya (2009)	Jain e Neithalath (2010)	Matos e Sousa-Coutinho (2012)	Nassar e Soroushian (2012)	Antônio (2012)	Sauer (2013)	Média	Resíduo de lapidação do vidro desta pesquisa
SiO ₂	72,5	70,13	72,5	70	68	64,29	56,77	67,74	64,77
Al ₂ O ₃	0,4	1,76	0,4	1,2	7	4,25	6,07	3,01	2,81
Fe ₂ O ₃	0,2	0,37	0,2	0,65	<1	0,38	0,29	0,35	0,44
CaO	9,7	12,08	9,7	8,7	11	13,64	5,64	10,07	6,92
MgO	3,3	1,55	3,3	3,7	1	4,16	3,67	2,95	4,49
Na ₂ O	13,7	14,56	13,7	16	12	11,49	15,41	13,84	19,36
K ₂ O	0,1	0,55	0,1	0,35	<1	0,53	0,16	0,30	0,11

Atenta-se a proximidade de valores entre os resíduos de vidros utilizados nesta pesquisa e a média adotada em outras pesquisas. De acordo com Miao (2011), com exceção de Al_2O_3 e CaO , as porcentagens dos principais constituintes dos diferentes tipos de vidro são semelhantes. Para o vidro soda-cal, a composição do vidro típico é de aproximadamente 70% sílica, 12-17% de Na_2O e 10% de CaO .

Neste contexto, a utilização de resíduos de vidro em concretos como substitutos parciais ao cimento torna-se viável, principalmente, quando estes materiais possibilitam a substituição dos materiais usuais de fabricação sem prejuízo de suas propriedades mecânicas e propriedades relacionadas com a durabilidade.

A Tabela 22 apresenta os resultados de composição química do resíduo de vidro e do metacaulim em comparação com os requisitos da norma NBR 12653 (ABNT, 2015) que pretende avaliar se o material é pozolânico. Constata-se, com relação à composição química, o atendimento à norma com exceção à quantidade de álcalis disponível, apresentando valores relevantemente superiores. Baseado nesta constatação, motivou-se a execução dos ensaios de reatividade por álcali sílica, pois altas concentrações de álcalis podem ocasionar fenômenos patológicos expansivos no concreto.

Tabela 22. Caracterização química

Propriedades	Método de ensaio	Resíduo de vidro	Metacaulim	Requisitos da NBR 12653 (ABNT, 2014)
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ (%)	Fluorescência de Raios-X	68,02% ($< 70\%$, logo em desacordo com a norma, entretanto muito próximo)	93,6% ($> 70\%$, logo atende à norma)	$\geq 70\%$
SO_3 (%)	Fluorescência de Raios-X	0,21% ($< 4\%$, logo de acordo com a norma)	0,2% ($< 4\%$, logo de acordo com a norma)	$\geq 4\%$
Perda ao fogo (%)	Fluorescência de Raios-X	0,55% ($< 10\%$, logo de acordo com a norma)	2,5% ($< 10\%$, logo de acordo com a norma)	≤ 3

Propriedades	Método de ensaio	Resíduo de vidro	Metacaulim	Requisitos da NBR 12653 (ABNT, 2014)
			norma)	
Álcalis disponíveis em Na ₂ O (%)	Fluorescência de Raios-X	19,36% ((> 1,5%, logo em desacordo com a norma)	0,2% (< 1,5%, logo atende à norma)	≤ 1,5

Fonte: Produção do autor

4.1.2. Caracterização física do resíduo da lapidação do vidro

A caracterização física foi realizada por meio do ensaio de massa específica, finura e composição granulométrica. A Tabela 23 apresenta os resultados de finura e massa específica do resíduo de vidro e do metacaulim.

Tabela 23. Caracterização física do resíduo

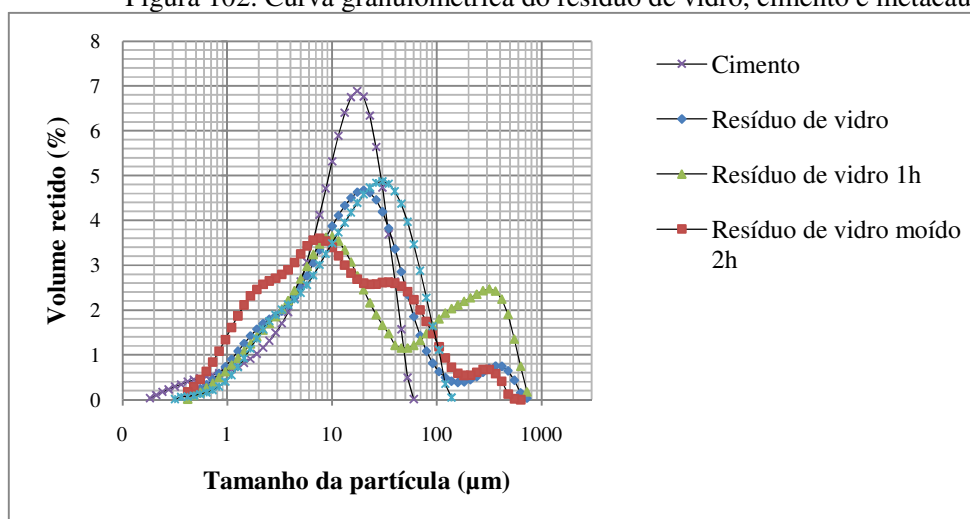
Propriedades	Método de ensaio	Resíduo sem moagem	Resíduo com moagem	Metacaulim	Requisitos da NBR 12653 (ABNT, 2014)
Índice de finura – peneira 75µm	ABNT NBR 11759 (2012)	10,63%	4,08%	0,92%	NE
Massa específica (g/cm ³)	NBR NM 52 (ABNT,2009)	2,51	2,51	2,55	NE
Determinação da finura por meio da peneira 45µm	ABNT NBR 15894-3 (2010)	19,65%, (menor que 20%, logo atende à norma)	7,64% (menor que 20%, logo atende à norma)	8,14% (menor que 20%, logo atende à norma)	< 20 %

Fonte: Produção do autor

A partir dos resultados da Tabela 23 é possível observar redução da finura do resíduo de vidro com o efeito da moagem por 1h e 2h no moinho de bolas. Nota-se, que as dimensões das partículas atingem valores inferiores que as partículas do metacaulim, que consiste em uma pozolana de alta finura e reatividade. Consta-se ainda que os resultados de massa específica entre o resíduo de vidro e o metacaulim são muito próximos, indicando a pozolana metacaulim como uma opção acertada de comparação nesse estudo por apresentar características físicas muito próximas ao do resíduo de vidro objeto de estudo.

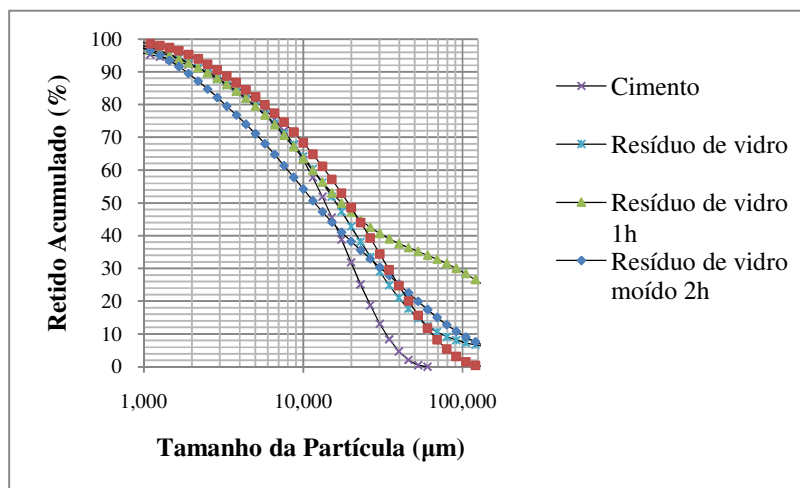
Para ser um material pozolânico a norma NBR 12653 (ABNT, 2015) exige que a porcentagem retida na peneira de malha 325 seja de no máximo 20%. Baseado na Tabela 30 constata-se que o resíduo mesmo sem moagem atende a esta classificação. As Figuras 102 e 103 apresentam a curva granulométrica entre o resíduo de vidro com moagem de 1h e de 2h, além do metacaulim e do cimento.

Figura 102. Curva granulométrica do resíduo de vidro, cimento e metacaulim.



Fonte: Produção do autor

Figura 103. Retido acumulado do resíduo de vidro, cimento e metacaulim.



Fonte: Produção do autor

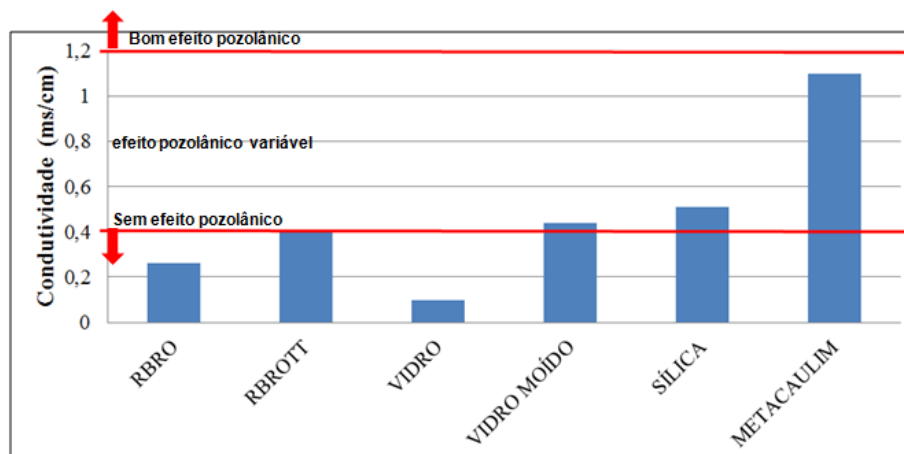
4.1.3. Atividade pozolânica do resíduo da lapidação do vidro

Este capítulo visa apresentar os resultados dos ensaios realizados a fim de verificar a atividade pozolânica do resíduo de lapidação do vidro.

4.1.3.1. Método de Luxán

A partir do ensaio pelo método de Luxán tem-se resultados da pozolanicidade dos materiais em poucas horas. Neste contexto, realizaram-se análises nos materiais pozolânicos dessa pesquisa (resíduo de vidro, resíduo de vidro moído e metacaulim) além de outros a fim de comparar a sua potencialidade pozolânica. Baseando-se na classificação prescrita na norma em relação ao efeito pozolânico tem-se os resultados expostos na Figura 104.

Figura 104. Resultados do ensaio LUXAN'S



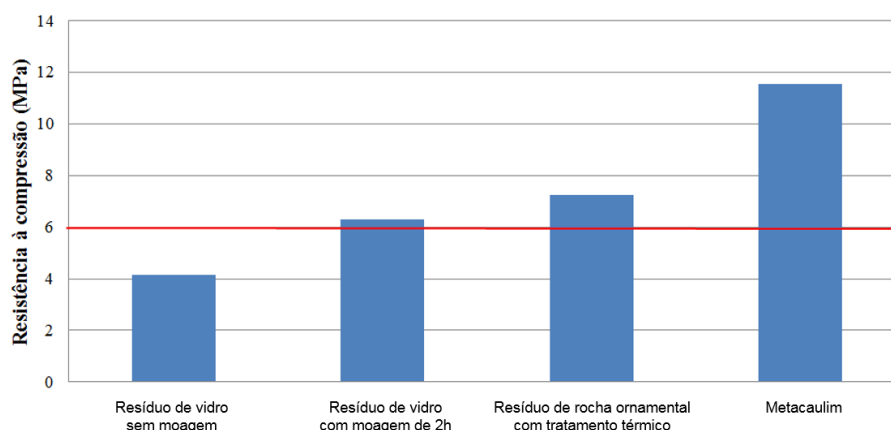
Fonte: Produção do autor

Conforme Figura 104, tem-se como materiais com pozolanicidade variável o resíduo de vidro moído, a sílica ativa e o metacaulim, verificando que o resíduo de vidro sem a moagem não alcança a classificação. Evidencia-se que com a moagem de 2h o resíduo de vidro alcança o patamar de pozolanicidade variável.

4.1.3.2. Atividade Pozolânica com Cal

A fim de atestar a atividade pozolânica com a cal foram moldados 3 corpos de prova e rompidos após 7 dias, conforme preconiza a NBR 5751 (ABNT, 2015). O resultado médio de resistência é apresentado conforme Figura 105.

Figura 105. Resultados do ensaio IAP cal



Fonte: Produção do autor

Conforme a norma NBR 12653 (ABNT, 2015), para que o material seja considerado uma pozolana deverá apresentar valor mínimo de resistência à compressão de 6 MPa após os 7 dias. Baseado na Figura 106, observa-se que o resíduo de vidro sem moagem não alcançou a resistência necessária motivando a moagem do material a fim de buscar potencializar seu efeito pozolânico. Com o a moagem, o material alcança o patamar de 6 MPa. Foi realizado também avaliação para o metacaulim, constatando que, assim como no ensaio de Luxan o seu efeito pozolânico é constatado.

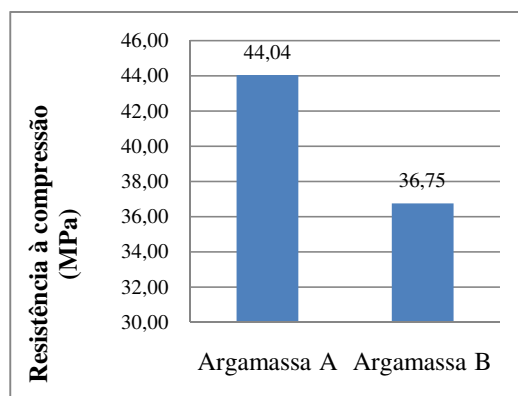
Tabela 24. Resultados do ensaio IAP cal

Propriedades	Método de ensaio	Resíduo sem moagem	Resíduo com moagem	Metacaulim
Determinação da atividade pozolânica com a cal aos 7 dias (MPa)	ABNT NBR 5751 (2015)	4,14MPa (inferior a 6MPa, logo não atende à norma) (NBR 12653:2014)	6,28MPa (superior a 6MPa, logo atende à norma) (NBR 12653:2014)	11,53MPa (superior a 6MPa, logo atende à norma) (NBR 12653:2014)

4.1.3.3. Atividade Pozolânica com cimento

Além dos ensaios de Luxan e do ensaio de atividade pozolânica com a cal foi realizado o ensaio de atividade pozolânica com o cimento. Foram moldados 6 corpos de prova para cada mistura conforme preconiza a norma NBR 5752 (ABNT, 2014). A Figura 106 apresenta os resultados com a argamassa de referência (A) e a argamassa com o resíduo de vidro sem moagem. Neste ensaio foi realizada apenas a verificação do resíduo sem moagem, pois não havia a disponibilidade do cimento CP II 32 F para a realização do ensaio e constatou-se, por meio dos ensaios anteriores, a validade da moagem para potencializar o efeito pozolânico do material.

Figura 106. Ensaio IAP cimento



Fonte: Produção do autor

Nota-se que o resíduo de vidro sem moagem não atinge pelo menos 90% da resistência recomendado pela ABNT NBR 12653 (ABNT, 2014), atingindo apenas 83%, apontando também a necessidade da moagem no material, que tende a atingir o percentual normativo.

A seguir é apresentada a compilação de todos os resultados de caracterização.

Tabela 25. Resultados da caracterização do resíduo

Propriedades	Método de ensaio	Resíduo sem moagem	Resíduo com moagem	Metacaulim	Requisitos normativos
Índice de finura – peneira 75 μ m	ABNT NBR 11759 (2012)	10,63%	4,08%	0,92%	NE

Propriedades	Método de ensaio	Resíduo sem moagem	Resíduo com moagem	Metacaulim	Requisitos normativos
Massa específica (g/cm ³)	NBR NM 52 (ABNT,2009)	2,51	2,51	2,55	NE
Determinação da finura por meio da peneira 45µm	ABNT NBR 15894-3 (2010)	19,65% (menor que 20%, logo atende à norma)	7,64% (menor que 20%, logo atende à norma)	8,14% (menor que 20%, logo atende à norma)	< 20%,
Ensaio de avaliação de pozolanicidade LUXAN'S	LUXAN'S	0,1 (inferior a 0,4 logo sem efeito pozolânico)	0,44 (superior a 0,4 logo com efeito pozolânico variável)	1,10 (superior a 0,4 logo com efeito pozolânico variável)	> 0,40
Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias (%)	ABNT NBR 5752 (2014)	83% (inferior a 90%, logo não atende à norma). Aos 91 dias tem-se 106%, superando o concreto de referência.	-	-	≥ 90%
Determinação da atividade pozolânica com a cal aos 7 dias (MPa)	ABNT NBR 5751 (2015)	4,14MPa (inferior a 6MPa, logo não atende à norma)	6,28MPa (superior a 6MPa, logo atende à norma)	11,53MPa (superior a 6MPa, logo atende à norma)	≥ 6MPa
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ (%)	Fluorescência de Raios-X	68,02% (inferior a 70%, logo em desacordo com a norma)	68,02% (inferior a 70%, logo em desacordo com a norma)	93,6% (superior a 70%, logo atende à norma)	≥ 70%
SO ₃ (%)	Fluorescência de Raios-X	0,21% (menor que 4%, logo de acordo com a norma)	0,21% (menor que 4%, logo de acordo com a norma)	0,2% (menor que 4%, logo de acordo com a norma)	≤ 4%
Perda ao fogo (%)	Fluorescência de Raios-X	0,55% (menor que 10%, logo de acordo com a norma)	0,55% (menor que 10%, logo de acordo com a norma)	2,5% (menor que 10%, logo de acordo com a norma)	≤ 10%

Propriedades	Método de ensaio	Resíduo sem moagem	Resíduo com moagem	Metacaulim (norma)	Requisitos normativos
Álcalis disponíveis em Na ₂ O (%)	Fluorescência de Raios-X	19,36% (maior que 1,5%, logo em desacordo com a norma)	19,36% (maior que 1,5%, logo em desacordo com a norma)	0,2% (menor que 1,5%, logo atende à norma)	≤ 1,5%

Fonte: Produção do autor

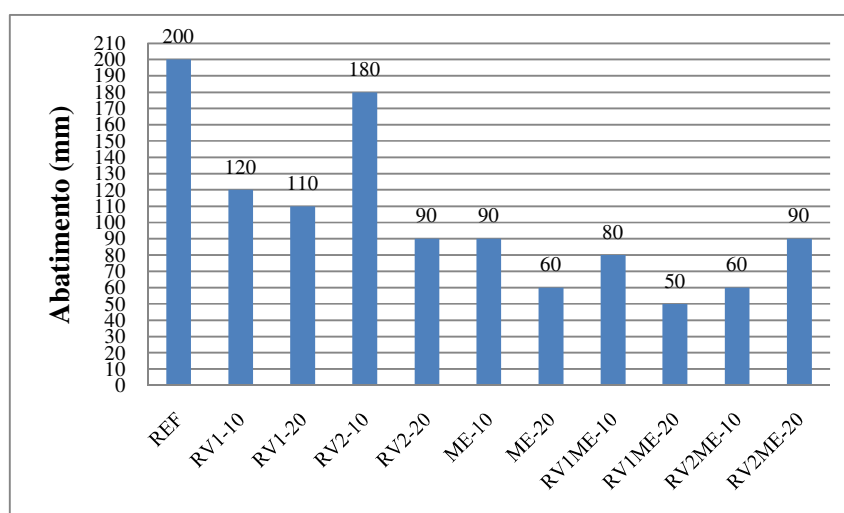
4.2. Resultados dos Ensaio em Concretos

4.2.1. Concreto no estado fresco

4.2.1.1. Ensaio de consistência pelo abatimento do tronco de cone

O ensaio de abatimento do tronco de cone foi executado conforme recomenda a norma NBR NM 67 (ABNT, 1998). Foi fixado o abatimento em 200 ± 10 mm. A Figura 107 apresenta o comportamento dos concretos produzidos com relação à consistência.

Figura 107. Resultados abatimento



Fonte: Produção do autor

Nota-se que com a utilização do resíduo de vidro com ou sem moagem há uma redução do abatimento em relação ao concreto de referência. Entretanto, eles ainda mantiveram uma adequada trabalhabilidade variando entre 100 ± 20 mm. Neville e Brooks (2013) e Mehta e Monteiro (2008) afirmam que para determinada consistência do concreto a utilização de materiais com elevada área superficial - e que não reagem com outros materiais na mistura elevando o teor de finos - aumenta a demanda de água no concreto fresco. Logo, a utilização de materiais muito finos, como é o caso dos resíduos de vidro, cotemplando dimensões médias de partículas entre $35\mu\text{m}$ e $45\mu\text{m}$, corroboram com o mencionado efeito.

Com a utilização do metacaulim, nota-se concretos com a substituição de 20% com abatimento de 60 mm. Entretanto, foi possível obter uma trabalhabilidade suficiente para a moldagem dos 18 corpos de prova.

Figura 108. Ensaio de abatimento

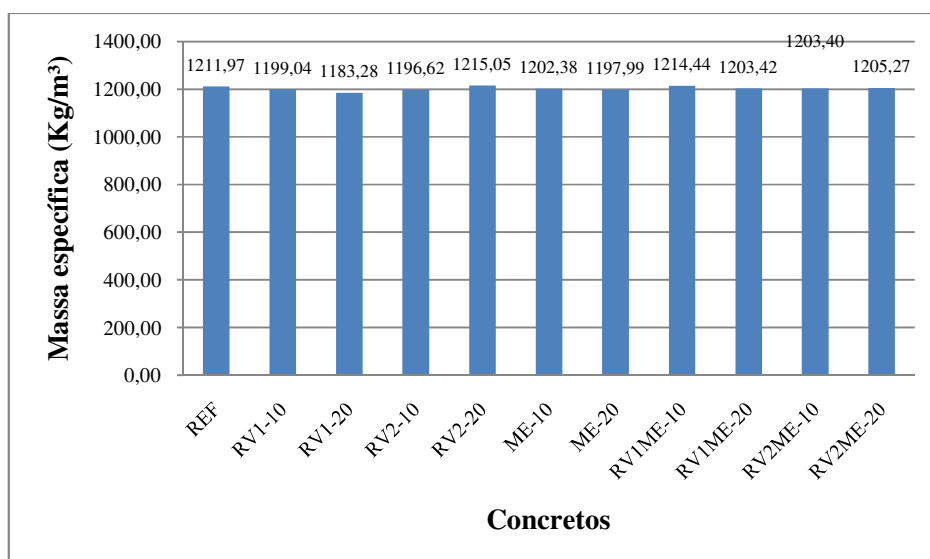


Fonte: Produção do autor

4.2.1.2. Massa específica do concreto no estado fresco

O ensaio de massa específica foi realizado conforme a norma NBR 9833 (ABNT, 2009). A Figura 109, apresenta os resultados de massa específica dos concretos investigados.

Figura 109. Resultados ensaio de massa específica



Torna-se possível verificar valores muito próximos com média de 1202,99 (Kg/m³), mediana de 1203,40 (Kg/m³) e coeficiente de variação de apenas 1%. Logo, a utilização do resíduo de vidro e de metacaulim, nos percentuais adotados nessa pesquisa, não foram suficientes para alterar de forma determinante a massa específica. O constatado pode ser explicado em virtude da adoção de compensação de volumes para as massas, contemplada no momento da dosagem dos concretos.

4.2.2. Concreto no estado endurecido

Os concretos no estado endurecido foram submetidos a ensaios de desempenho investigando suas potencialidades no que se referem às propriedades mecânicas e relacionadas com a durabilidade. Pretende-se comparar os resultados dos ensaios no âmbito das características específicas de cada concreto, tal como se utilizando da substituição parcial de resíduo de vidro, resíduo de vidro moído e de metacaulim, assim como a interação entre estes materiais. Avaliações estatísticas também serão contempladas nessa seção.

4.2.2.1. Resistência à compressão axial

Na análise dos dados desconsideraram-se os concretos que apresentassem resultados que elevassem o coeficiente de variação das amostras acima de 10%. Logo, foi necessário apenas a retirada de alguns resultados pontuais, obtendo-se assim, um coeficiente de variação máximo de 7,99% e médio de 2,43%. Nota-se um coeficiente de variação médio baixo, com concretos diferindo-se muito pouco.

Tabela 26. Resistência à compressão média

Concreto	28 dias			56 dias			91 dias		
	Fc	σ	CV	Fc	σ	CV	Fc	σ	CV
REF	37,4	1,44	3,84%	41,72	1,94	4,64%	41,85	1,72	4,10%
RV1-10	35,7	0,23	0,64%	41,20	1,39	3,37%	41,06	1,30	3,17%
RV1-20	34,2	0,47	1,38%	39,52	0,18	0,46%	39,60	0,38	0,96%
RV2-10	38,0	0,76	1,99%	42,28	0,70	1,64%	42,79	0,44	1,03%
RV2-20	36,5	1,68	4,59%	42,89	0,14	0,34%	42,97	0,14	0,34%
ME-10	45,5	0,92	2,02%	47,76	1,84	3,85%	48,60	1,94	4,00%
ME-20	41,7	1,79	4,28%	46,10	0,22	0,47%	46,10	0,22	0,47%
RV1ME-10	41,9	1,37	3,26%	44,34	2,70	6,09%	44,60	3,56	7,99%
RV1ME-20	37,2	0,31	0,84%	41,46	0,56	1,34%	41,39	0,62	1,49%
RV2ME-10	39,2	0,90	2,29%	44,76	0,39	0,87%	44,68	0,26	0,58%
RV2ME-20	41,8	2,28	5,45%	47,83	0,67	1,41%	47,76	0,52	1,09%

Notas: Fc – Resistência à compressão (MPa).

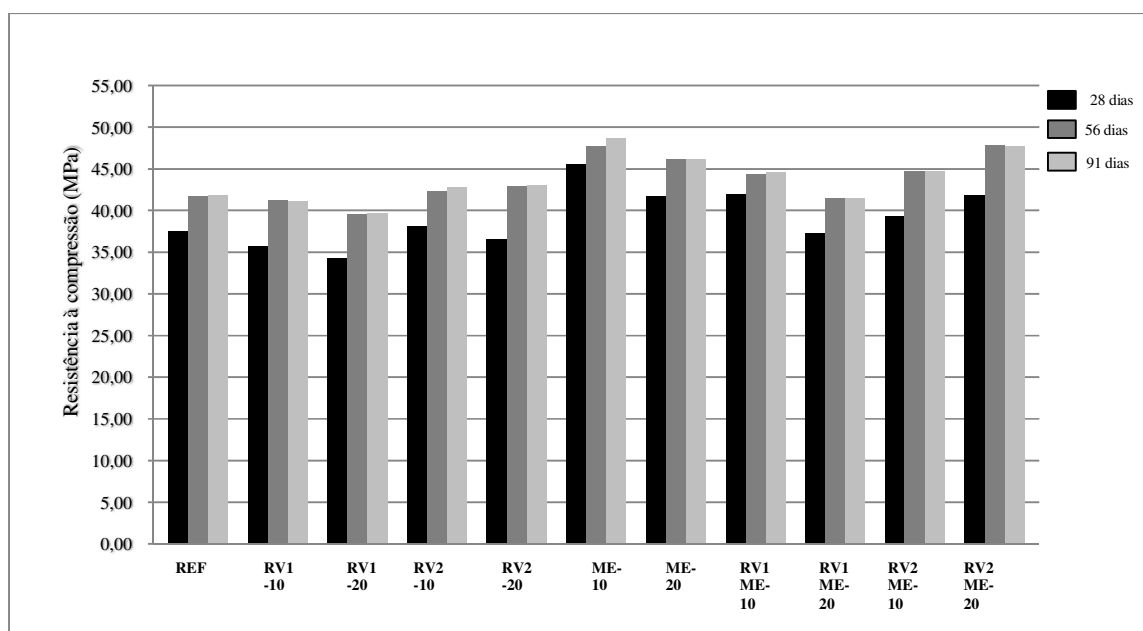
σ – Desvio padrão.

CV – Coeficiente de variação, resultado da divisão do desvio padrão pela média.

Fonte: Produção do autor

É possível também identificar o gráfico com os valores médios de resistência pertinentes aos diferentes concretos investigados, conforme Figura 110.

Figura 110. Resultados de resistência à compressão



Fonte: Produção do autor

Por meio da Figura 110, verifica-se que aos 28 dias no geral há perda de resistência com a substituição por resíduo de vidro, conforme constatado em pesquisas diversas como Nassar e Soroushian (2012), Matos e Coutinho (2012), Schwarz e Cam (2008), Wang e Huang (2010), Kamali et. al (2015) e Jordonni (2013).

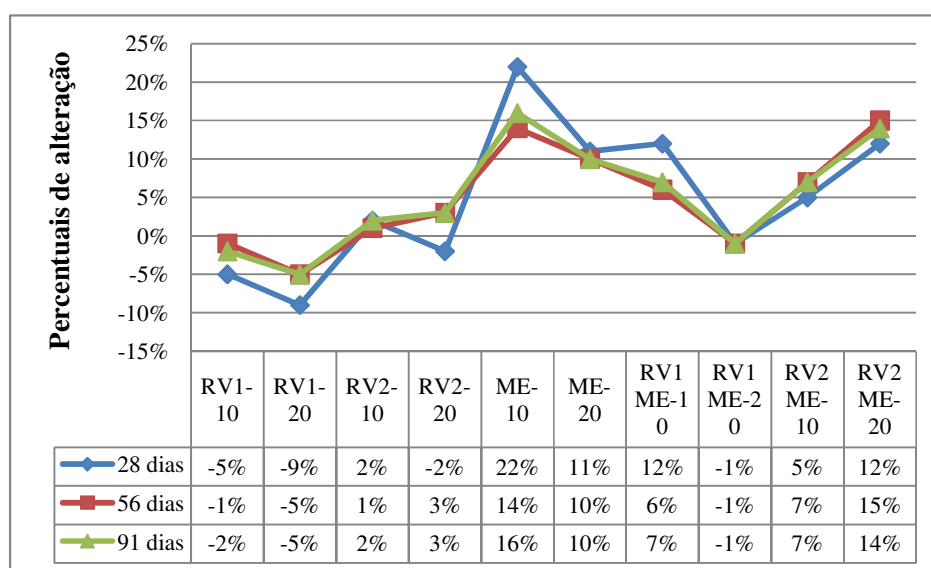
Entretanto, o concreto com resíduo de vidro moído em substituição parcial ao cimento em 10% (RV2-10) promoveu a manutenção da resistência ainda em 28 dias. Nota-se também que os resultados com a substituição de metacaulim com 10% de substituição parcial (ME-10) são os mais expressivos, promovendo ganhos de resistência ainda em 28 dias de até 22%.

Constata-se ainda que a combinação de resíduos de vidro com metacaulim apresentou valores de resistência à compressão superiores ao referênci, podendo utilizar o resíduo de vidro moído com substituição ao cimento de 10% e metacaulim, também com 10%, promovendo ganhos de resistência ainda em 28 dias de 12%.

Constata-se também que aos 56 dias concretos com resíduo de vidro moído com 20% de substituição parcial ao cimento superaram os concretos de referência. O efeito físico pode ter contribuído devido ao pequeno tamanho das partículas de vidro que ocupam os espaços vazios deixados pela pasta de cimento, reduzindo a porosidade e contribuindo para a retenção de água utilizada na mistura, melhorando a hidratação do cimento. Soma-se ainda a hipótese do efeito químico, devido à reação química entre o resíduo de vidro e o cimento em função da formação de compostos mais estáveis (como a produção de C-S-H originário da reação com o hidróxido de cálcio e água) e à diminuição dos vazios na zona de transição entre a pasta de cimento e o agregado graúdo.

É possível verificar os percentuais de alteração de resistência à compressão em relação ao concreto de referência, segundo Figura 111.

Figura 111. Alteração em relação ao concreto de referência



Fonte: Produção do autor

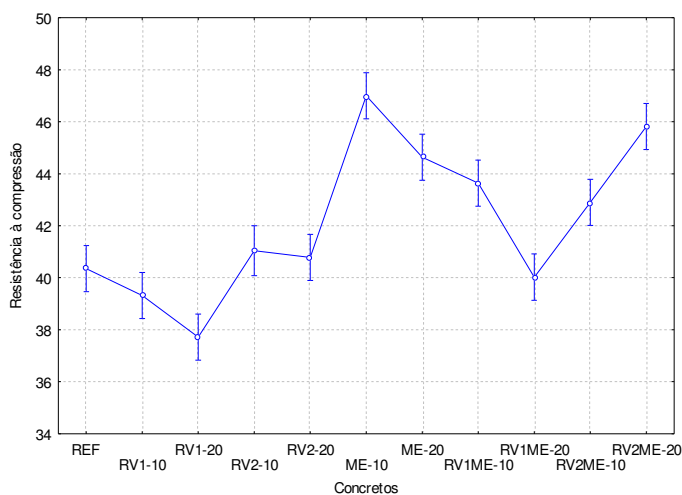
Por meio da Figura 111, verifica-se que aos 56 dias os concretos que utilizaram resíduo de vidro praticamente igualaram a resistência à compressão, com exceção do concreto com 20% de resíduo de vidro sem moagem. Nota-se com o resíduo de vidro moído o ganho de resistência em

decorrência do desenvolvimento das reações pozolânicas ocorridas após 28 dias, conforme previsto no estudo de caracterização. Entretanto, com o resíduo de vidro sem moagem as reações apenas foram suficientes para compensar a substituição do cimento em até 10%. Este comportamento pode ter ocorrido, pois, conforme previsto no estudo de caracterização, o resíduo de vidro sem moagem não apresenta as condições para a ação da atividade pozolânica e o seu efeito, possivelmente, restringiu-se ao preenchimento de poros que só foram suficientes para igualar a resistência em 56 dias contemplando percentual de substituição de 10%.

4.2.2.1.1. Análise de variância da resistência à compressão axial em relação aos diferentes concretos

A fim de investigar se determinada variável, idade ou tipo de concreto, teve influência sobre a resistência à compressão avaliou-se o p-valor fornecido por meio de análise de variância realizada. Caso o p-valor seja inferior a 0,05 a variável é considerada como sendo significativa. Constatou-se que os resultados entre os concretos apresentaram diferenças significativas quer sejam nos grupos (diferentes concretos ao longo das distintas idades) quer sejam entre grupos (entre um tipo de concreto e outro). Assim, as variáveis concreto e idade foram consideradas como tendo influência sobre a resistência do concreto, aumentando quando adotada pozolana metacaulim e diminuindo quando utilizado resíduo de vidro sem moagem. Quando se analisa a interação da idade em relação ao tipo do concreto o resultado não apresenta significância (p-valor= 0,4786) apontando que o comportamento dos diferentes concretos em relação às idades, de maneira geral, apresenta-se um comportamento similar. Neste contexto, torna-se possível verificar, por meio da Figura 112 o efeito isolado do tipo de concreto sobre a resistência à compressão.

Figura 112. Efeito isolado do tipo de concreto sobre a resistência do concreto



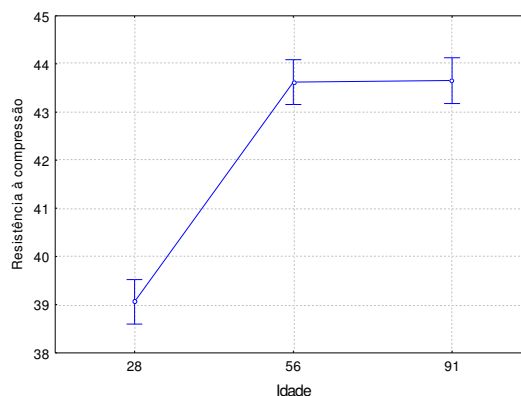
Fonte: Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004)

Por meio do gráfico é possível identificar que a utilização de resíduo de vidro sem moagem (RV1-10 e RV1-20) apresentou um comportamento de redução na resistência à compressão ao contrário do resíduo de vidro com moagem (RV2-10 e RV2-20) que apresentou elevação, constatando assim, o efeito potencializador da moagem para a atividade pozolânica.

Nota-se também que a utilização do resíduo de vidro sem moagem com o metacaulim e com 5% de substituição de cada material provocou aumento significativo da resistência. Este comportamento pode ter ocorrido em função da ação pozolânica do metacaulim somado ao efeito de preenchimento de poros, em especial na zona de transição, do resíduo de vidro sem moagem. Verifica-se também o acréscimo expressivo de resistência nos concretos que utilizaram metacaulim, principalmente naqueles que utilizaram 10% de substituição, valor próximo ao valor de 8% recomendado pelo fabricante. Esta ocorrência foi constatada no ensaio de IAP cal onde a incorporação de metacaulim favoreceu a elevação da resistência à compressão nos corpos de prova ensaiados, podendo deduzir um relevante efeito pozolânico.

É possível também verificar o efeito isolado da idade nos concretos por meio da Figura 113.

Figura 113. Efeito isolado da idade sobre a resistência à compressão do concreto

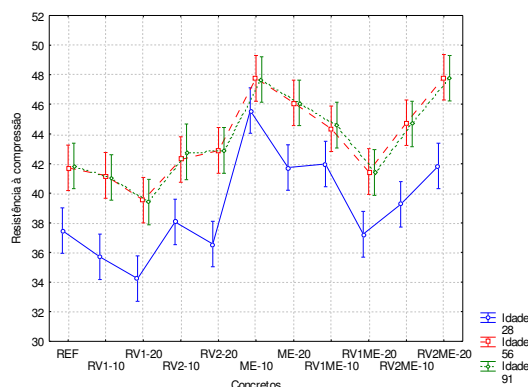


Fonte: Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004)

Verifica-se, por meio da Figura 113, que há um acréscimo significativo da resistência de 28 a 56 dias. Porém, o avanço de 56 a 91 dias ocorre de maneira pouco significativa. Isso ocorre em virtude da ação lenta da pozolana em quase todos os concretos, apenas atingido a sua maturidade aos 56 dias. O aumento da resistência em idade mais avançada foi obtido por meio da formação de uma microestrutura mais densa em virtude da formação de C-S-H em função das reações pozolânicas e da diminuição dos poros.

É possível também verificar o efeito da interação entre tipos de concretos e diferentes idades conforme Figura 114.

Figura 114. Efeito interação dos tipos de concretos e idade sobre a resistência à compressão do concreto -
Concretos x Idade

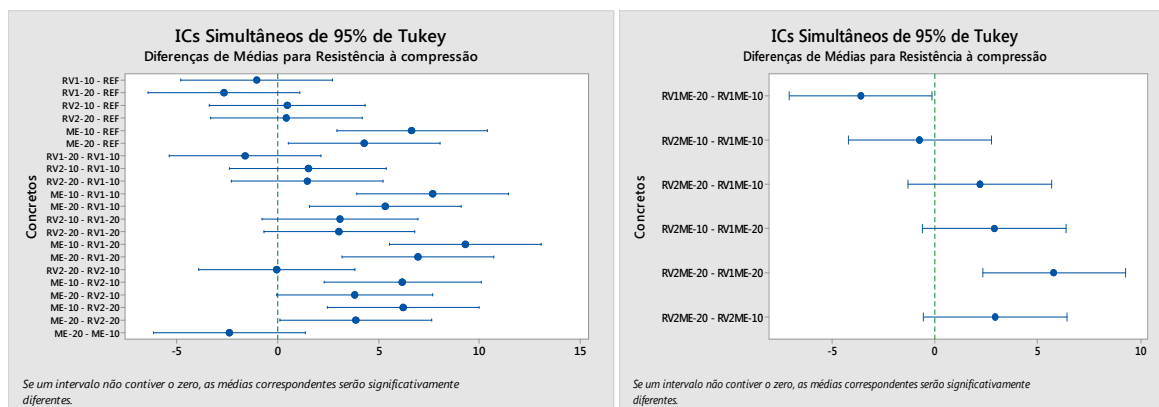


Fonte: Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004)

Por meio da Figura 114, verifica-se a pequena variação dos resultados da idade de 56 para 91 dias, porém esse comportamento ocorre de maneira bastante similar entre os diferentes tipos de concretos.

A fim de realizar avaliação comparativa entre os tratamentos, identificando quais apresentaram diferenças significativas entre eles, adotou-se Teste de Comparação de Médias (Teste de Tukey). A análise é realizada por meio do software Minitab 17 que identifica os intervalos que apresentam ou não zero, critério para identificar se as médias são ou não significativamente diferentes. O intervalo que não contiver zero, as médias correspondentes serão significativamente diferentes. Os resultados de Teste de Tukey para os resultados de resistência à compressão dos diferentes concretos são apresentados na Figura 115.

Figura 115. Teste de Tukey da resistência à compressão nos diferentes concretos



Fonte: Minitab 17

Identifica-se assim que a utilização de resíduo de vidro, quer seja com ou sem moagem, não apresentou diferenças significativas em relação ao concreto de referência no que se refere à resistência à compressão, ou seja pode-se substituir o cimento pelo resíduo de vidro mantendo-se a resistência à compressão. É importante também mencionar que a utilização de metacaulim apresentou diferença significativa na resistência à compressão, elevando esta característica.

4.2.2.1.1. Análise de variância da resistência à compressão axial em relação aos diferentes percentuais de substituição

a) Resíduo de vidro sem moagem

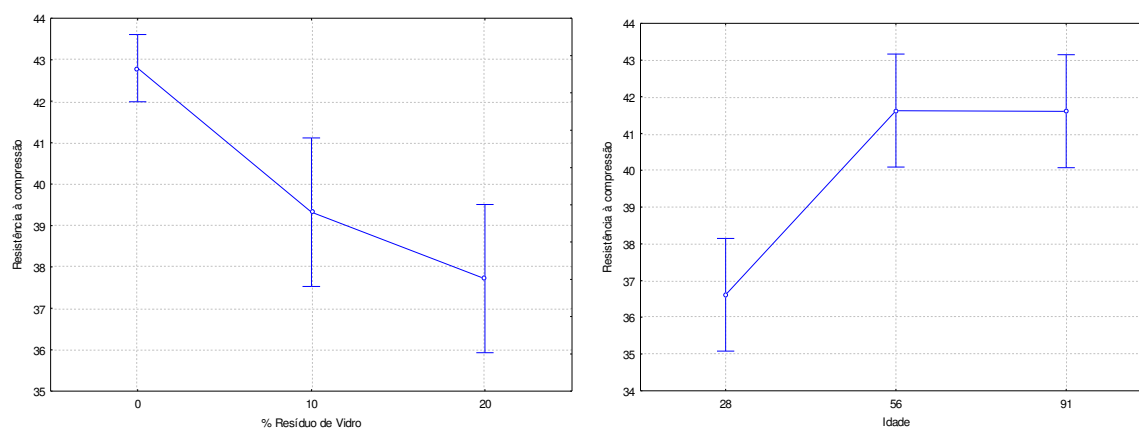
Verificam-se, conforme Tabela 27 e Figuras 116 e 117, os resultados da análise de variância referente à resistência à compressão dos concretos com a utilização de resíduo de vidro sem moagem.

Tabela 27. Análise de variância da resistência à compressão em relação aos diferentes percentuais de utilização-resíduo de vidro

Fatores	SQ	GL	MQ	Fcal	p-valor	Resultado
% Resíduo de Vidro	245,32	2	122,66	17,095	0,000002	Significativo
Idade	204,82	2	102,41	14,273	0,000011	Significativo
% Resíduo de Vidro*Idade	2,86	4	0,71	0,100	0,982124	Não significativo
Error	380,28	53	7,18			

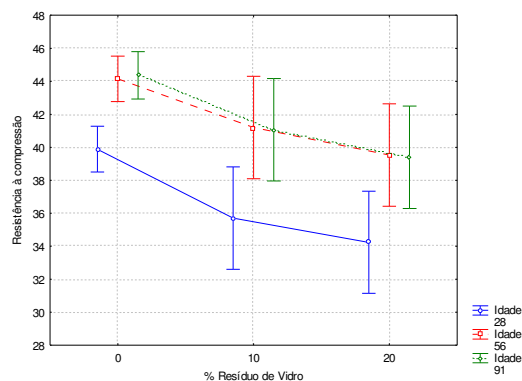
Fonte: Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004)

Figura 116. Efeito isolado do percentual de resíduo de vidro sem moagem e a idade sobre a resistência à compressão



Fonte: Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004)

Figura 117. Efeito da interação entre o percentual de resíduo de vidro e a idade sobre a resistência à compressão



Fonte: Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004)

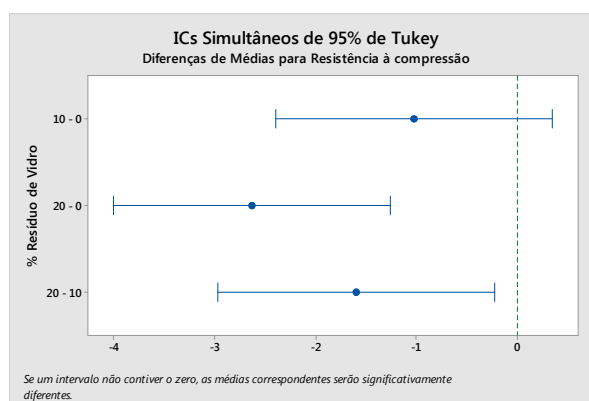
Conforme identificado nas Figuras 116 e 117, à medida que aumenta o percentual de resíduo de vidro sem moagem constata-se redução da resistência à compressão com significância estatística. Logo, segundo os gráficos, a substituição do cimento por resíduo de vidro nestes percentuais não favoreceu a manutenção da resistência à compressão, possivelmente isto tenha ocorrido em função da não pozolânicidade do material e que o efeito de preenchimento dos poros do concreto pelo resíduo de vidro não foi suficiente para compensar a substituição parcial do cimento.

Sabe-se que com a hidratação dos silicatos de cálcio há a produção de um gel de silicato de cálcio, denominado de CSH, responsável pela resistência mecânica da pasta de cimento em função de sua grande área de superfície o que gera intensas forças de Van der Waals. Com a substituição parcial do cimento, parte do potencial de formação de CSH da mistura é comprometido e o refinamento dos poros promovido pelas partículas finas do resíduo de vidro sem moagem não foi capaz de compensar este efeito.

Entretanto, com o avanço da idade de 28 para 56 dias verifica-se aumento da resistência à compressão. Este comportamento pode ter ocorrido em função do mecanismo de preenchimento dos poros do concreto realizado pelo resíduo de vidro sem moagem.

Tornou-se também necessário identificar entre quais tratamentos apresentaram-se as diferenças, sendo assim, o Teste de Tukey identificou que a utilização com 10% de substituição por resíduo de vidro sem moagem apresentou similaridade com o concreto de referência, conforme Figura 118. Assim, conforme verificado no teste, é possível substituir até 10% do cimento por resíduo de vidro sem moagem sem perda da resistência. Para a substituição de 20% do cimento por resíduo de vidro sem moagem, o efeito de preenchimento de poros, proporcionado pelo resíduo de vidro, não foi suficiente para manter a resistência do concreto.

Figura 118. Teste de Tukey para a resistência à compressão dos concretos com resíduo de vidro



Fonte: Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004)

Por meio da Figura 118, constata-se que os concretos com resíduo de vidro sem moagem com 10% de substituição ao cimento não apresentaram diferenças em relação ao concreto de referência, ou seja não houve redução significativa de resistência nestes concretos. Entretanto, os concretos com 20% de substituição ao cimento apresentaram redução significativa da resistência.

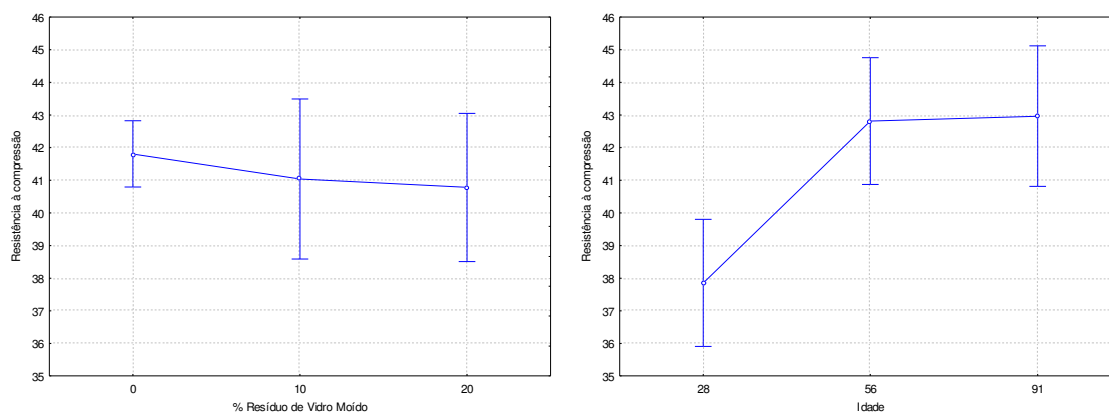
b) Resíduo de Vidro Moído

Verificam-se, conforme Tabela 28 e Figuras 119 e 120, os resultados da análise de variância referente à resistência à compressão dos concretos com a utilização de resíduo de vidro com moagem.

Tabela 28. Análise de variância da resistência à compressão em relação aos diferentes percentuais de utilização-resíduo de vidro com moagem

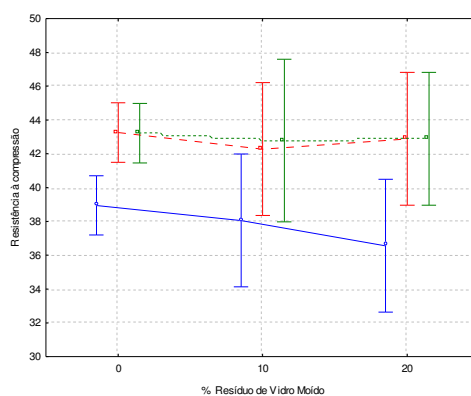
Fatores	SQ	GL	MQ	Fcal	p-valor	Resultado
% Resíduo de Vidro Moído	10,30	2	5,15	0,447	0,641849	Não significativo
Idade	199,92	2	99,96	8,676	0,000550	Significativo
% Resíduo de Vidro Moído*Idade	7,34	4	1,83	0,159	0,957963	Não significativo
Error	610,66	53	11,52			

Figura 119. Efeito isolado do percentual de resíduo de vidro com moagem e a idade sobre a resistência à compressão



Fonte: Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004)

Figura 120. Efeito da interação entre o percentual de resíduo de vidro moído e a idade sobre a resistência à compressão



A partir das Figuras, verifica-se que a utilização de resíduo de vidro moído ocasionou redução da resistência à compressão, porém sem significância estatística, pois o efeito do percentual de resíduo moído na resistência apresentou p-valor de 0,6418, logo maior que o índice de significância de 0,05. Sendo assim, é possível substituir o cimento em até 20% de resíduo de vidro moído sem perda de resistência à compressão.

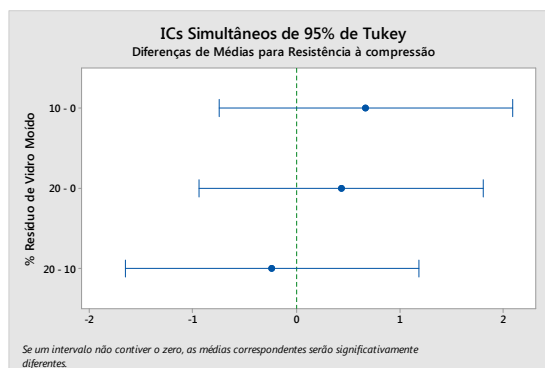
Este comportamento pode ter ocorrido em função das reações pozolânicas com os compostos hidratados do cimento (reforço das ligações químicas primárias e secundárias entre as partículas de resíduo de vidro moído que provocaram o refinamento dos poros e dos grãos, especialmente do silicato de cálcio hidratado - C-S-H), conforme identificado o potencial de atividade pozolânica nos ensaios de caracterização do resíduo de vidro com moagem. Provavelmente a moagem elevou a área específica e a finura do material elevando a sua reatividade.

Neste contexto, as reações pozolânicas com a utilização do resíduo de vidro moído compensaram a retirada do cimento, mantendo a resistência do concreto em função, possivelmente, de melhorar a homogeneização da microestrutura tanto da matriz como da zona de transição do concreto. Com a zona de transição melhorada, em função das alterações em sua microestrutura, melhora-se o comportamento do concreto à compressão.

Nota-se também que há um aumento da resistência com a idade de 28 dias para 56 dias, que também pode ser justificada, principalmente, pela combinação da atuação física das partículas de resíduo de vidro moído de preenchimento de poros do concreto e da atuação química de reação com os compostos hidratados do cimento (atividade pozolânica), esta conhecida pelo seu potencial tardio de atuação.

Por meio do Teste de Tukey, foi possível constatar que as variações entre os concretos não apresentaram alterações significativas, pois todos os intervalos apresentam o valor zero.

Figura 121. Teste de Tukey para a resistência à compressão dos concretos com resíduo de vidro moído



Fonte: Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004)

c) Metacaulim

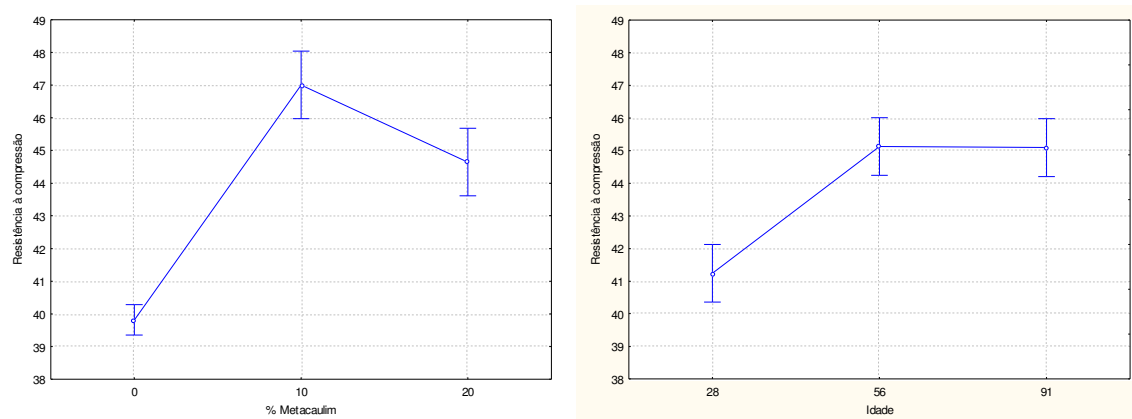
Nota-se, conforme Tabela 29 e Figura 122, os resultados da análise de variância referente à resistência à compressão dos concretos com a utilização de metacaulim.

Tabela 29. Análise de variância da resistência à compressão em relação aos diferentes percentuais de utilização - metacaulim

Fatores	SQ	GL	MQ	Fcal	p-valor	Resultado
% Metacaulim	486,50	2	243,25	101,82	0,000000	Significativo
Idade	122,42	2	61,21	25,62	0,000000	Significativo
% Metacaulim*Idade	14,77	4	3,69	1,55	0,202367	Não significativo
Error	126,61	53	2,39			

Fonte: Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004)

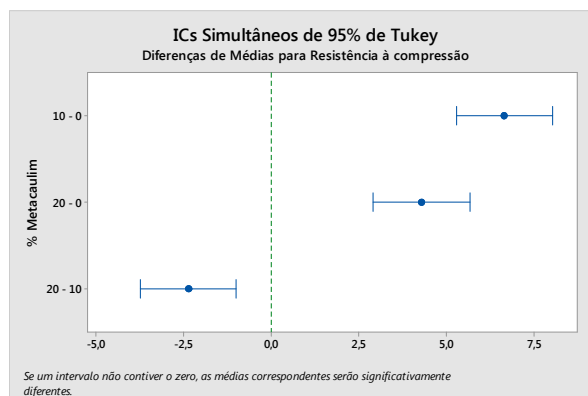
Figura 122. Efeito isolado do percentual de metacaulim e a idade sobre a resistência à compressão



Fonte: Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004)

Verificou-se que a utilização de metacaulim provocou aumento da resistência à compressão com os percentuais de substituição de 10% e de 20% com significância estatística. Verificou-se também que há elevação da resistência de 28 dias para 56 dias. Este comportamento pode ter ocorrido em função do efeito pozolânico do material de reagir com os compostos hidratados do cimento promovendo ganhos de compacidade e resistência. A resistência à compressão com a utilização de metacaulim aumentou enquanto que com a utilização de resíduo de vidro moído se manteve, isto pode ter ocorrido em função de, apesar dos dois materiais apresentarem efeito pozolânico, conforme o estudo de caracterização o metacaulim apresenta maior reatividade, principalmente em função de sua maior área específica e menores dimensões médias de partículas. Por meio do Teste de Tukey, é possível identificar, de maneira específica, a significância estatística entre os tratamentos (Figura 123).

Figura 123. Teste de Tukey para a resistência à compressão dos concretos com resíduo de vidro



Fonte: Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004)

Por meio do Teste de Tukey, foi possível comprovar que a utilização de metacaulim nos percentuais de 10% e 20% elevaram a resistência à compressão em relação ao concreto de referência. Identificando que, tanto a utilização de 10% de metacaulim quanto de 20% em substituição ao cimento, encontram-se no gráfico fora do intervalo de zero, logo são estatisticamente diferentes do concreto de referência.

4.2.2.2. Ensaio acelerado de migração de cloretos - ASTM C1202-12

O ensaio de resistência à penetração de cloretos (conhecido por muitos pesquisadores como teste rápido de penetração de cloretos e como teste da permeabilidade rápida a cloretos) foi realizado conforme a norma ASTM C 1202 (ASTM, 2012). Foram adotadas três amostras de cada mistura para cada idade de cura. As idades adotadas foram de 28 e 91 dias a fim de verificar a influência da utilização dos materiais (resíduo de vidro e metacaulim) ao longo do tempo. Por meio da Tabela 30, é possível identificar os resultados de resistência à penetração de cloretos nas distintas idades e os coeficientes de variação.

Tabela 30. Carga passante total média

Concreto	28 dias			91 dias		
	Carga Passante Total	σ	CV	Carga Passante Total	σ	CV
REF	6489,00	592,36	9,13%	6027,00	888,88	14,75%
RV1-10	5652,00	988,40	17,49%	4236,00	547,77	12,93%
RV1-20	2805,00	463,51	16,52%	1041,00	159,71	15,34%
RV2-10	4875,00	1321,54	27,11%	1896,00	83,62	4,41%
RV2-20	2535,00	243,06	9,59%	1185,00	130,22	10,99%
ME-10	2604,00	136,59	5,25%	969,00	220,52	22,76%
ME-20	1428,00	364,18	25,50%	1239,00	158,55	12,80%
RV1ME-10	3003,00	293,20	9,76%	1860,00	323,54	17,39%
RV1ME-20	2034,00	85,85	4,22%	795,00	178,72	22,48%
RV2ME-10	2976,00	393,16	13,21%	1800,00	179,77	9,99%
RV2ME-20	1866,00	76,54	4,10%	1329,00	287,06	21,60%

Notas: F_c – Resistência à compressão (MPa).

σ – Desvio padrão.

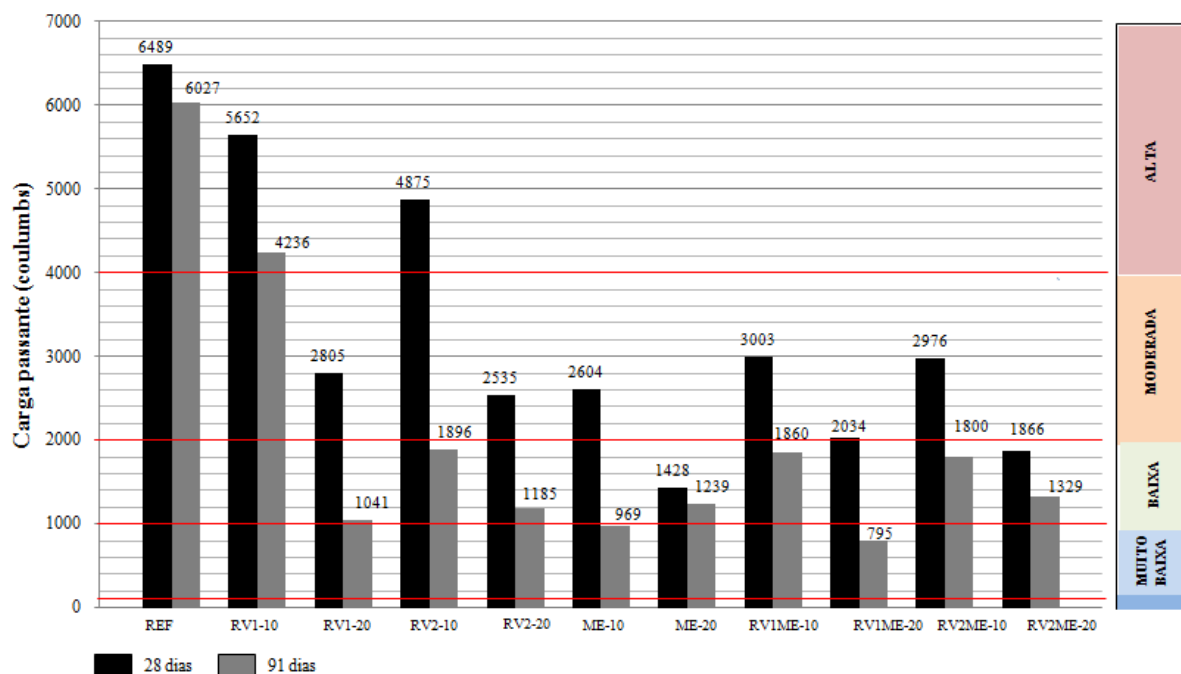
CV – Coeficiente de variação, resultado da divisão do desvio padrão pela média.

Fonte: Produção do autor

Observa-se um coeficiente de variação médio de 13,97%, valor próximo ao valor aceito pela norma referente ao coeficiente de variação máximo para um mesmo laboratório, 12,3%.

É possível verificar os resultados de cargas passantes no tocante à classificação qualitativa contemplada na norma, conforme Figura 124.

Figura 124. Resultados de resistência à penetração de cloretos



Fonte: produção do autor

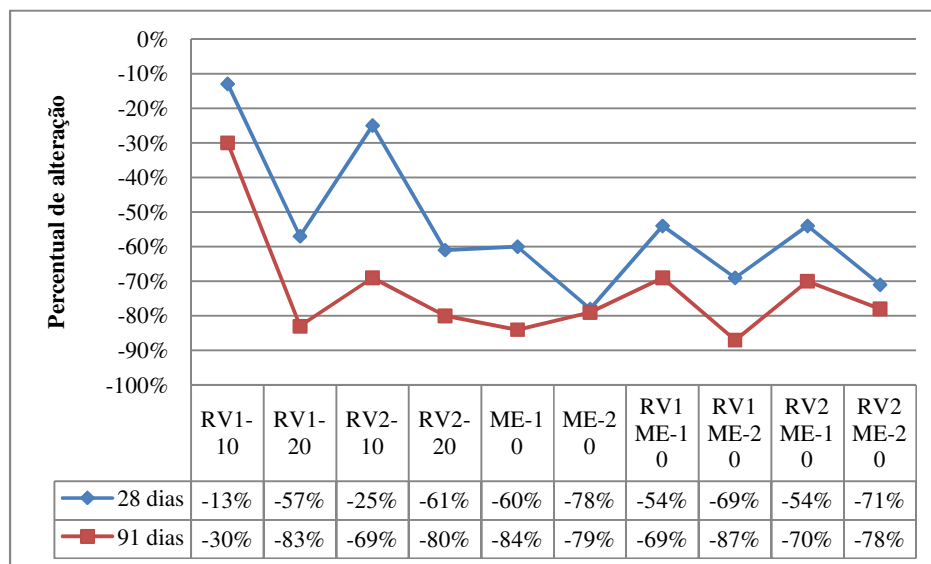
Tabela 31. Classificação qualitativa contemplada na norma ASTM C 1202 (ASMT, 2012)

Carga Passante (coulombs)	Penetrabilidade aos íons cloretos
>4.000	Alta
2.000-4.000	Moderada
1.000-2.000	Baixa
100-1.000	Muito Baixa
<100	Insignificante

Fonte: ASTM C 1202 (ASMT, 2012)

Constatam-se também os percentuais de alteração dos concretos em relação aos concretos de referência (Figura 125).

Figura 125. Alteração em relação ao concreto de referência



Fonte: produção do autor

Por meio da Figura 125, torna-se possível constatar que a utilização de resíduo de vidro sem moagem, 10%, não foi suficiente para atingir a classificação de moderada penetrabilidade de íons cloretos, promovendo uma redução de apenas 13% aos 28 dias e 30% aos 91 dias.

Verifica-se, entretanto, que ao se adotar o mesmo resíduo de vidro sem moagem, porém com o percentual de 20% obtém-se aos 91 dias uma redução de 83%, equivalente à utilização de resíduo de vidro moído (84%) e metacaulim, com 10% (84%) e com 20% (79%). Nota-se que, conforme classificação qualitativa contemplada na norma do ensaio, a utilização de resíduo de vidro sem moagem com 20% de substituição (RV1-20), resíduo de vidro com moagem com 20% de substituição (RV2-20) e metacaulim com 10% de substituição (ME-10) atingiram patamares de muito baixa penetrabilidade aos íons cloretos, logo reduzindo a penetração aos íons cloretos em relação ao concreto de referência de alta para muito baixa.

Destacam-se também os concretos com 10% de metacaulim e 10% de resíduo de vidro sem moagem como o mais eficiente com relação à resistência à penetração aos íons cloretos (RV1ME-20), este comportamento pode ter ocorrido em função da combinação da atuação da

pozolanicidade do metacaulim com o efeito de preenchimento de poros do resíduo sem moagem.

É importante também destacar a utilização de resíduo de vidro com moagem em substituição ao cimento de 10% combinada com o metacaulim também neste percentual de substituição, reduzindo a penetração de cloretos em patamares muito baixos e ainda proporcionando ganhos de resistência à compressão ainda em 28 dias em relação ao concreto de referência. Sendo assim, substituiu-se até 20% do cimento promovendo benefícios nos aspectos tecnológicos, econômicos e sustentáveis.

No geral, constatou-se que a utilização de resíduo de vidro nos percentuais dessa pesquisa promovem redução da penetração de cloretos, conforme constatado nas pesquisas de Kamali e Ghahremaninezhad (2015), Cassar e Camilleri (2012), Matos e Sousa-Coutinho (2012), Schwarz et al. (2008), Jain e Neithalath (2010) e Shayan e Xu (2006). Segundo os autores, a redução nos valores pode ser explicada pela melhoria microestrutural no concreto, proporcionada pelas reações pozolânicas. Verifica-se que tanto o preenchimento de poros, promovido pelo resíduo de vidro sem moagem, quanto a reação pozolânica, promovida pelo resíduo de vidro com moagem, promoveram reduções de cargas passantes em relação ao concreto de referência. Entretanto, o efeito pozolânico em função da ação do resíduos de vidro com moagem promoveu resultados mais expressivos.

Considerando concretos resistentes à compressão e a cloretos, destacam-se aqueles com 20% de resíduo moído, alcançando aos 91 dias ganhos em ambos os aspectos.

4.2.2.2.1. Análise de variância da resistência à penetração de cloretos em relação aos diferentes concretos

A análise de variância da resistência à penetração de cloretos dos concretos desta pesquisa está apresentada na Tabela 32. Adotou-se um nível de confiança de 95% e um nível de significância de 5%.

Tabela 32. Análise da variância do efeito dos fatores controláveis na carga passante

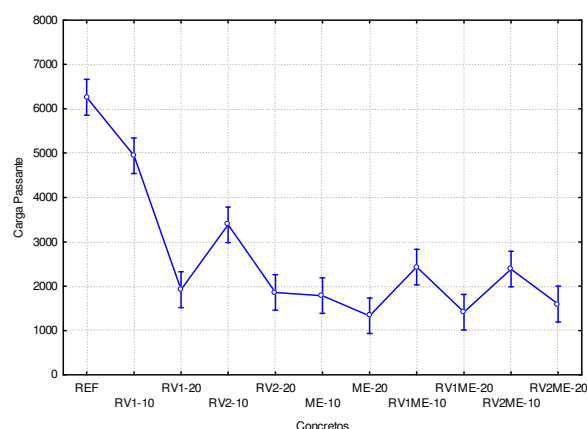
Fatores	SQ	GL	MQ	Fcal	p-valor	Resultado
Concretos	151202442	10	15120244	63,594	0,000000	Significativo
Idade	26308923	1	26308923	110,653	0,000000	Significativo
Concreto - idade	8564574	10	856457	3,602	0,001478	Significativo
Erro	10461474	44	237761			

Fonte: Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004)

Visando também investigar se determinada variável, idade ou tipo de concreto, teve influência sobre a resistência à penetração de cloretos avaliou-se o p-valor fornecido por meio de análise de variância. Caso o p-valor seja inferior a 0,05 a variável é considerada como sendo significativa. A partir da Tabela 36, verifica-se que os resultados entre os concretos apresentaram diferenças significativas quer sejam nos grupos (diferentes concretos ao longo das distintas idades) quer sejam entre grupos (entre um tipo de concreto e outro). Assim, as variáveis concreto e idade foram consideradas como tendo influência sobre a resistência à penetração de cloretos do concretos.

A fim de verificar a influência de cada variável na resistência à penetração de cloretos foram realizadas análises gráficas específicas, tais como retratado na Figura 126, que representa o efeito isolado do tipo de concreto sobre a resistência à penetração de cloretos.

Figura 126. Efeito isolado do tipo de concreto sobre a carga passante

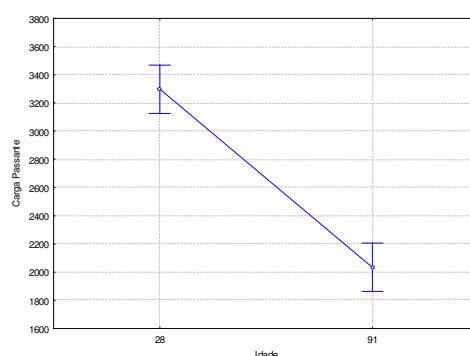


Fonte: Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004)

Por meio do gráfico é possível identificar que a utilização do resíduo de vidro proporcionou melhora na resistência à penetração de cloretos pontuando os valores na faixa de 2.000 Coulombs, pertinente à classificação de baixa penetração de cloretos. Destacam-se os concretos contendo 20% de resíduo de vidro em substituição ao cimento, sem moagem e com moagem, RV1-20 e RV2-20, respectivamente.

É possível também verificar, o efeito isolado da idade nos concretos por meio da Figura 127.

Figura 127. Efeito isolado da idade sobre a carga passante

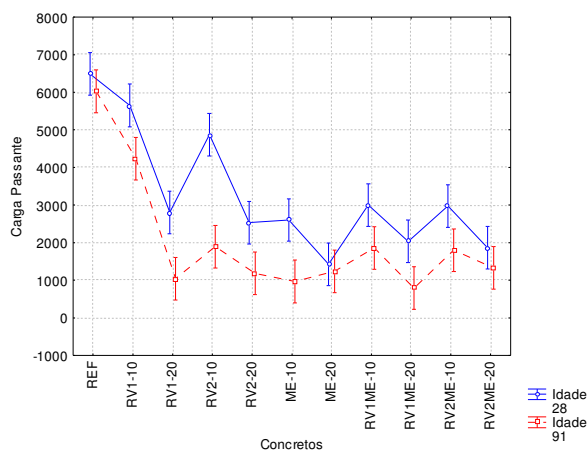


Fonte: Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004)

Verifica-se uma redução significativa da resistência à penetração de cloretos com o avanço da idade de cura. Isso pode ter ocorrido em função da função pozolânica agindo com os compostos hidratado do cimento em períodos tardios de cura, além do efeito de preenchimento dos poros do concreto minimizando a interconexão capilar.

É possível também verificar o efeito da interação entre os tipos de concretos e as diferentes idades conforme Figura 128.

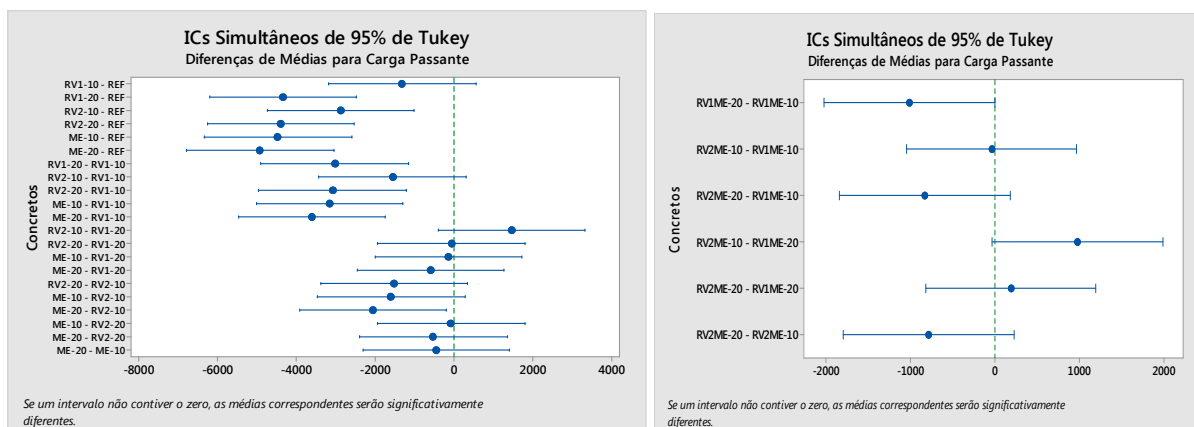
Figura 128. Efeito interação dos tipos de concretos e idade sobre a carga passante



Fonte: Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004)

Por meio da imagem, constata-se a redução da penetração de cloretos nos concretos com o avanço da idade. Constata-se como resultado mais expressivo o resíduo de vidro moído com 20% de substituição. É possível também, por meio de Teste de Tukey, identificar quais os tratamentos apresentaram diferenças, conforme Figura 129.

Figura 129. Teste de Tukey da resistência à penetração de cloretos dos diferentes concretos



Fonte: Minitab 17

Por meio do Teste de Tukey é possível identificar diferenças significativas entre os valores de cargas passantes entre os concretos com resíduo de vidro e os concretos de referência, entretanto a utilização de resíduo de vidro sem moagem com 10% foi a exceção, não apresentando diferenças significativas em relação ao concreto de referência. Este comportamento pode ter ocorrido em função da não atividade pozolânica do resíduo de vidro sem moagem em relação ao com moagem. Neste percentual de substituição, o efeito isolado de preenchimento de poros do concreto não foi suficiente para reduzir de modo significativo a penetração de cloretos. Com o percentual de 20% de resíduo de vidro sem moagem, o efeito filer (efeito de preenchimento dos poros) na microestrutura do concreto foi suficiente para favorecer a resistência à penetração de cloretos.

4.2.2.2.1. Análise de variância da resistência à penetração de cloretos em relação aos diferentes percentuais de substituição

a) Resíduo de vidro sem moagem

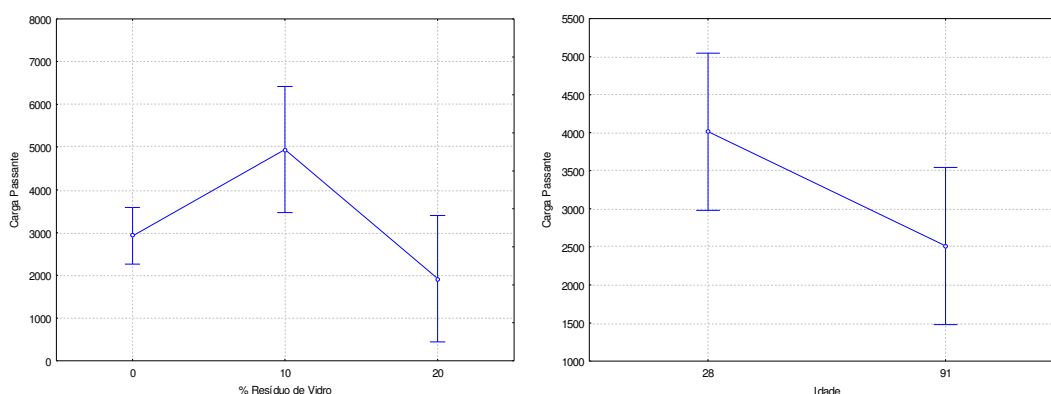
É possível identificar a análise de variância referente à resistência à penetração de cloretos em concretos com utilização de resíduo de vidro sem moagem.

Tabela 33. Análise de variância da resistência à compressão em relação aos diferentes percentuais de utilização-resíduo de vidro sem moagem

Fatores	SQ	GL	MQ	Fcal	p-valor	Resultado
% Resíduo de Vidro	29598272	2	14799136	4,65471	0,015924	Significativo
Idade	13825233	1	13825233	4,34839	0,044195	Significativo
% Resíduo de Vidro*Idade	243590	2	121795	0,03831	0,962456	Não significativo
Error	114458141	36	3179393			

Fonte: Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004)

Figura 130. Efeito isolado do percentual de resíduo de vidro sem moagem e a idade sobre a carga passante

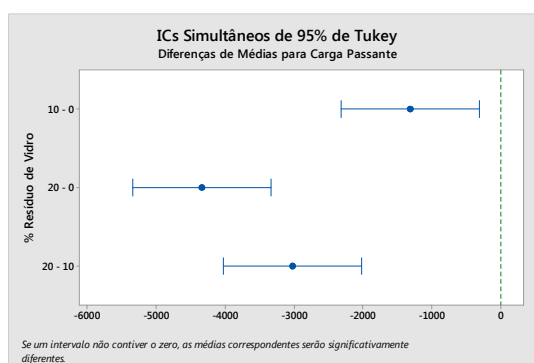


Fonte: Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004)

Pôde-se constatar redução da carga passante com a elevação do percentual de utilização do resíduo de vidro sem moagem com 20% de substituição. Verificou-se também redução da carga passante com o avanço da idade de cura. Conforme previsto no Teste de Tukey, o concreto com 10% de substituição do cimento por resíduo de vidro sem moagem não proporcionou ganhos em resistência à penetração de cloretos e, conforme análise estatística, tende ainda a aumentar a carga passante. Esta tendência pode ser explicada, pois o efeito de preenchimento de poros pode não ser significativo com este percentual de substituição e não haver atividade pozolânica com o resíduo de vidro sem moagem, conforme constatado no estudo de caracterização, com o agravante da redução do abatimento do concreto fresco de 200mm do concreto de referência para

120mm, favorecendo concretos com menor trabalhabilidade e mais suscetíveis à formação de poros que tendem a facilitar o ingresso de cloretos.

Figura 131. Teste de Tukey para a resistência à penetração de cloretos dos concretos com resíduo de vidro



Fonte: Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004)

Nota-se por meio do Teste de Tukey, o efeito significativo das diferenças entre os diferentes concretos com a utilização de resíduo de vidro. Constata-se a redução significativa da penetração de cloretos em concretos com 20% de resíduo de vidro sem moagem, como pode-se notar pelo distanciamento em relação ao intervalo de zero no Teste de Tukey. Este comportamento pode ser atribuído pelo mecanismo físico de proteção que contribui para um refinamento de poros da pasta de cimento endurecida do concreto. Este refinamento tornam os poros menos interconectados.

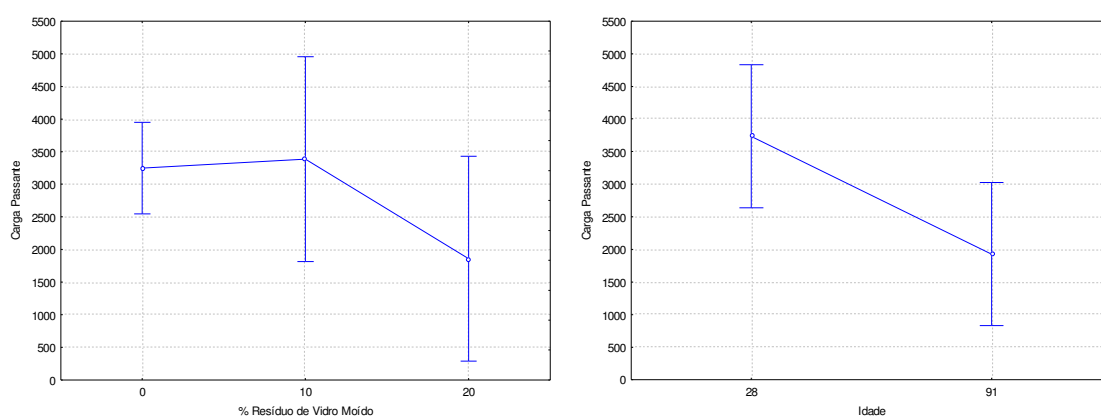
b) Resíduo de vidro moído

Torna-se possível também verificar a análise de variância realizada entre os resultados de cargas passantes com a utilização de resíduo de vidro moído.

Tabela 34. Análise de variância da carga passante em relação aos diferentes percentuais de utilização-resíduo de vidro com moagem

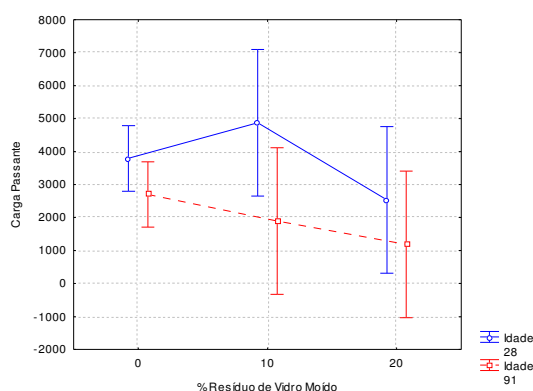
Fatores	SQ	GL	MQ	Fcal	p-valor	Resultado
% Resíduo de Vidro Moído	10343071	2	5171536	1,43757	0,250814	Não significativo
Idade	20045627	1	20045627	5,57221	0,023784	Significativo
% Resíduo de Vidro Moído*Idade	4449553	2	2224776	0,61844	0,544412	Não significativo
Error	129507379	36	3597427			

Figura 132. Efeito isolado do percentual de resíduo de vidro com moagem e a idade sobre a carga passante



Fonte: Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004)

Figura 133. Efeito da interação entre o percentual de resíduo de vidro com moagem e a idade sobre a carga passante

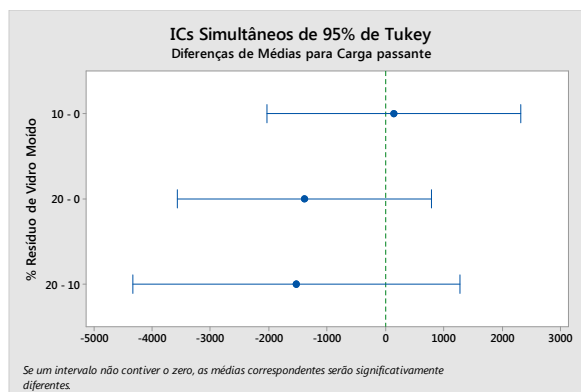


Por meio da análise estatística é possível avaliar de forma isolada se os resultados apresentaram significância estatística, ou seja se há diferenças entre os tratamentos, em outras palavras, por exemplo, se o efeito da utilização do resíduo de vidro moído foi significativo para diferenciar-se do concreto de referência. A análise estatística demonstrou que os resultados não foram significativos. Entretanto, verifica-se, conforme os patamares da norma do ensaio, a redução da penetração de cloretos com a utilização do resíduo de vidro moído, alcançando patamares de muito baixa penetração de cloretos, enquanto que o concreto de referência apresentam alta penetração de cloretos. Estes resultados estão de acordo com Kamali e Ghahremaninezhad (2015), Cassar e Camilleri (2012), Matos e Sousa-Coutinho (2012), Schwarz et al. (2008), Jain e Neithalath (2010) e Shayan e Xu (2006) que constataram o ganho de resistência à penetração de cloretos com a utilização de resíduo de vidro. Neste contexto, a análise estatística identificou que a utilização de resíduo de vidro moído não prejudica a resistência a penetração de cloretos e a análise das médias e classificação qualitativa da norma aponta para ganhos em relação ao concreto de referência. Este comportamento pode ser explicado em função da atividade pozolânica do resíduo de vidro moído, conforme verificado do estudo de caracterização.

Constatou-se redução da penetração de cloretos conforme a idade de cura de 28 dias para 91 dias com significância estatística, verifica-se assim a atuação da pozolâna em períodos tardios de cura.

A fim de verificar, de modo específico, os resultados entre os diferentes tratamentos realizou-se Teste de Tukey. Constata-se que a utilização do resíduo moído não proporcionou prejuízos aos concretos investigados.

Figura 134. Teste de Tukey para a carga passante dos concretos com resíduo de vidro



Fonte: Minitab 17

c) Metacaulim

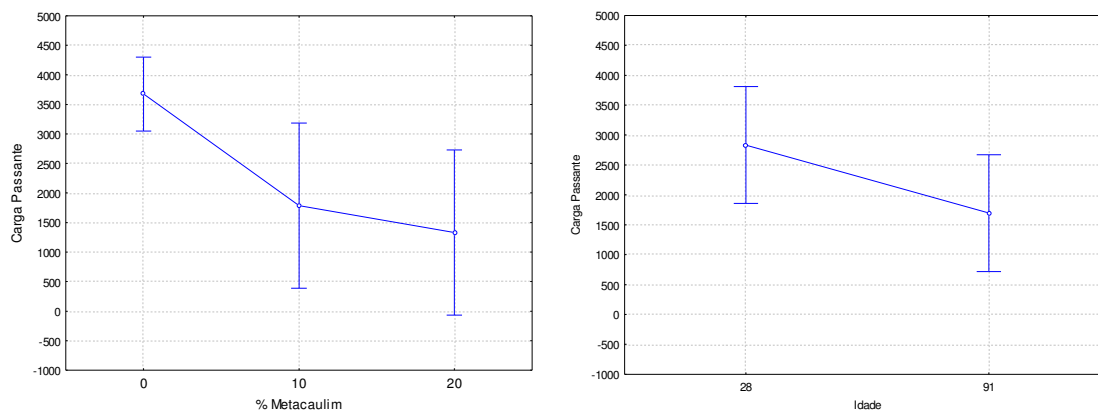
A seguir, é apresentada a análise de variância pertinente aos resultados de carga passante no que se refere ao percentual de metacaulim utilizado.

Tabela 35. Análise de variância da resistência à penetração de cloretos em relação aos diferentes percentuais de utilização - metacaulim

Fatores	SQ	GL	MQ	Fcal	p-valor	Resultado
% Metacaulim	38924931	2	19462466	6,81501	0,003091	Significativo
Idade	7966426	1	7966426	2,78954	0,103555	Não significativo
% Metacaulim*Idade	2565466	2	1282733	0,44916	0,641689	Não significativo
Error	102809606	36	2855822			

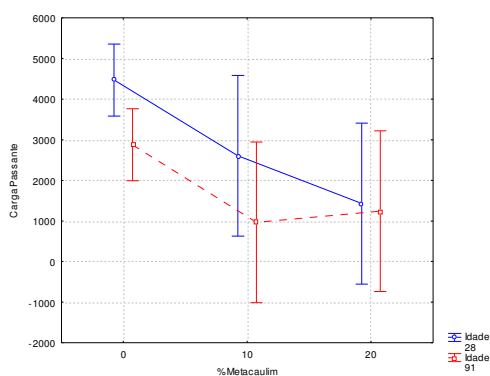
Fonte: Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004)

Figura 135. Efeito isolado do percentual de metacaulim e a idade sobre a carga passante



Fonte: Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004)

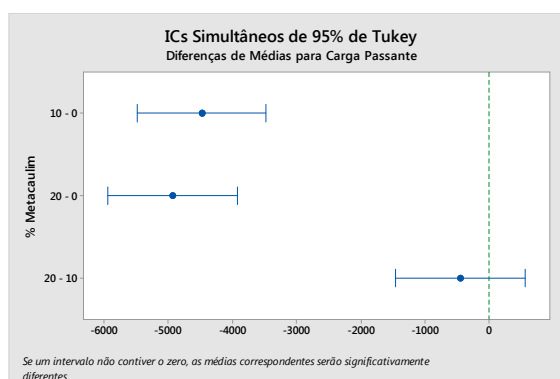
Figura 136. Efeito da interação entre o percentual de metacaulim e a idade sobre a carga passante



Fonte: Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004)

Os resultados apontaram uma redução significativa da carga passante nos concretos com o percentual de utilização de metacaulim, assim como com o avanço da idade de cura. O Teste de Tukey demonstrou que há diferença entre os concretos com metacaulim e o de referência. No que se refere aos concretos com 10% e 20% o teste entendeu que não há diferença entre os resultados. Constata-se o efeito da utilização do metacaulim em benefício da resistência à penetração de cloretos. Este comportamento pode ter ocorrido em função do efeito pozolânico do material.

Figura 137. Teste de Tukey para a resistência à penetração de cloretos dos concretos com metacaulim



Fonte: Minitab 17

4.2.2.2.2. Análise de regressão dos resultados de resistência à penetração de cloretos

A análise de regressão visa investigar se é possível por meio das variáveis dependentes (percentuais de pozolanas e idade) estimar a resistência à penetração de cloretos, variável independente. Sendo assim, tem-se a Tabela 36.

Tabela 36. Resultados de análise de regressão múltipla da carga passante

Preditor	Coefficiente	St. Dev. (desvio padrão)	Estatística T	p-valor	Resultado
Constant.	6495,826	353,4786	18,3769	0,000000	
% Resíduo de Vidro	-151,505	22,8910	-6,6185	0,000000	Faz parte do modelo
% Resíduo de Vidro Moído	-175,877	22,8910	-7,6832	0,000000	Faz parte do modelo
% Metacaulim	-238,026	22,1213	-10,7600	0,000000	Faz parte do modelo
Idade	-20,043	3,7265	-5,3786	0,000001	Faz parte do modelo
R ² = 72%					

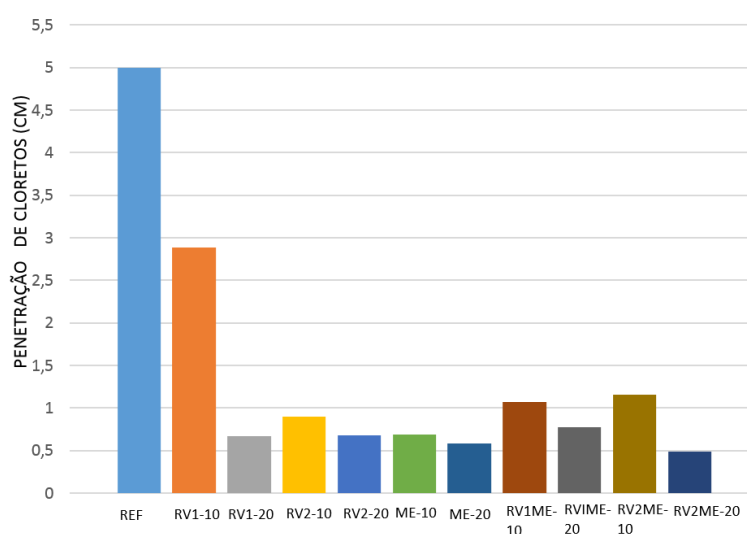
Fonte: Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004)

A análise demonstrou que o modelo de equação existe, explica todas as variáveis, pois $p < 0,05$. O modelo da equação é capaz de explicar a resistência à compressão em 72%. Logo é possível,

por meio do modelo de equação, estimar os resultados de percentuais de substituição do cimento por resíduos de vidro e metacaulim no intervalo entre 0 a 20%.

A fim de verificar a similaridade entre a carga passante nas amostras e a penetrabilidade de cloretos, aspergiu-se AgNO_3 nas amostras com período de cura de 91 dias e os resultados podem ser verificados na Figura 138.

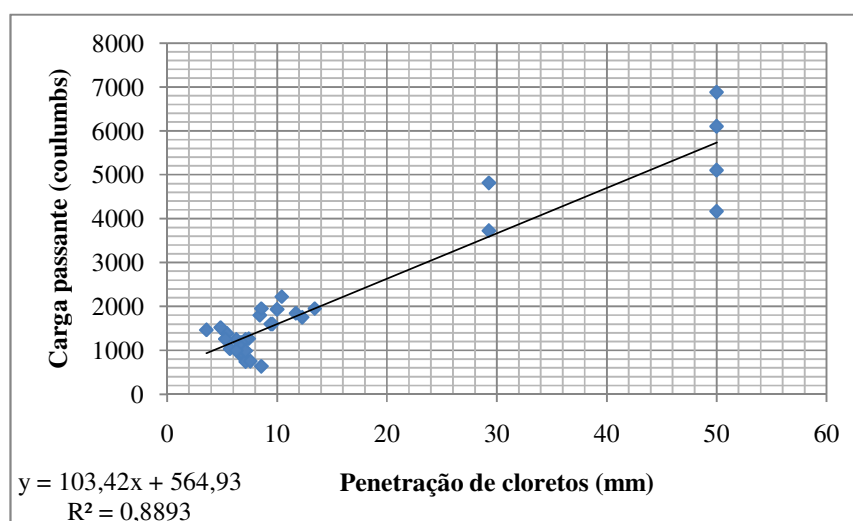
Figura 138. Penetração de cloretos após aspersão de AgNO_3



Fonte: Produção do autor

Torna-se possível também verificar a relação entre os resultados de carga passante e camada contaminada por cloretos, conforme Figura 139.

Figura 139. Regressão linear simples da carga passante e da penetração de cloretos



Fonte: Produção do autor

Nota-se, por meio da Figura 139, uma alta relação entre os resultados com $R^2=0,89$. Verifica-se assim que os resultados de carga passante apresentam confiabilidade com relação à penetrabilidade de íons cloretos nas amostras.

4.2.2.3. Ensaio acelerado de migração de cloretos - UNE 83987-14

O ensaio de migração de cloretos em regime estacionário foi realizado conforme a norma espanhola UNE 83987 (UNE, 2014). O ensaio objetiva obter o coeficiente de difusão de cloretos por meio de regime estacionário. Há uma aplicação de diferença de potencial para acelerar o movimento iônico e se fazem periodicamente coletas no cátodo a fim de avaliar o avanço de cloretos. Neste contexto, identifica-se o coeficiente de difusão em regime estacionário e por meio de equação faz-se a transformação dos resultados para a obtenção do coeficiente de difusão em regime não estacionário.

Configura-se como coeficiente de difusão de cloretos em regime estacionário (D_s) um parâmetro que caracteriza o transporte de cloretos no concreto em condições de fluxo constante, por meio do ensaio é possível identificar este período monitorando a condutividade do cátodo. O

coeficiente de difusão de cloretos em estado não estacionário (D_{ns}) baseia-se em um parâmetro que considera simultaneamente o transporte de íons cloretos no concreto, assim como a combinação destes com as fases sólidas da matriz cimentícia. Este último, é obtido por meio de equação de conversão contemplada na norma de ensaio. O coeficiente de difusão de cloretos no estado não estacionário, justamente por considerar os fatores de transporte e de combinação com as fases sólidas do concreto, é o mais indicado para estimativas de vida útil de projeto (VUP) de estruturas de concreto.

Por meio da Tabela 37 é possível identificar os resultados médios de coeficiente de difusão de cloretos em estado estacionário e os coeficientes de variação.

Tabela 37. Coeficiente de difusão estacionário de cloretos

Concreto	28 dias		
	Coeficiente de difusão estacionário (D_s)	σ	CV
REF	2,80E-08	9,12E-09	32,59%
RV1-10	9,75E-09	1,12E-09	11,46%
RV1-20	2,14E-08	2,65E-09	12,42%
RV2-10	1,68E-08	2,88E-09	17,17%
RV2-20	9,31E-09	4,89E-09	52,55%
ME-10	1,53E-08	7,11E-10	4,66%
ME-20	1,48E-08	5,18E-09	34,99%
RV1ME-10	1,49E-08	0,00E+00	0,00%
RV1ME-20	1,85E-08	7,21E-10	3,90%
RV2ME-10	1,62E-08	1,66E-09	10,22%
RV2ME-20	1,53E-08	2,57E-09	16,74%

Notas: D_s – Coeficiente de difusão de cloretos em estado estacionário (cm^2/s).

σ – Desvio padrão. CV – Coeficiente de variação

Fonte: Produção do autor

Considerando se tratar de um ensaio lento em relação aos outros ensaios de migração de cloretos apresentados nesta pesquisa, durando por volta de 8 semanas, e considerando as dificuldades

próprias da execução do aparato de teste os resultados de coeficiente de difusão em regime estacionário apresentaram coeficiente de variação médio de 17,88%, valor tolerável diante dos fatos expostos. A Tabela 38, apresenta os resultados de coeficiente de difusão em regime não estacionário.

Tabela 38. Coeficiente de difusão não estacionário de cloretos

Concreto	28 dias		
	Coeficiente de difusão não estacionário (dns)	σ	CV
REF	2,58E-07	4,71E-08	18,26%
RV1-10	1,81E-07	1,26E-07	69,65%
RV1-20	2,26E-07	9,48E-08	41,99%
RV2-10	1,39E-07	4,53E-08	32,54%
RV2-20	6,63E-08	2,95E-08	44,44%
ME-10	8,32E-08	1,84E-08	22,13%
ME-20	5,13E-08	1,61E-09	3,13%
RV1ME-10	7,61E-08	7,54E-09	9,91%
RV1ME-20	5,18E-08	1,09E-08	21,12%
RV2ME-10	7,35E-08	1,02E-08	13,82%
RV2ME-20	7,51E-08	4,51E-08	60,00%

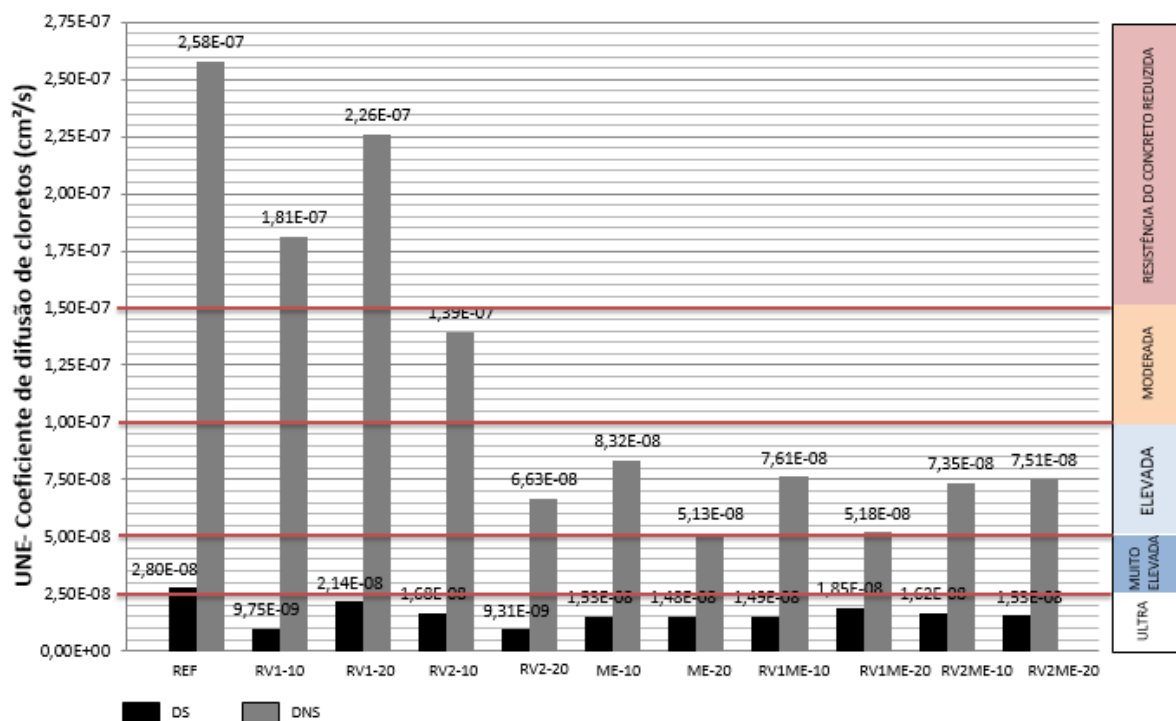
Notas: Dns – Coeficiente de difusão de cloretos em estado não estacionário (cm^2/s).

σ – Desvio padrão.

Fonte: Produção do autor

Identifica-se um coeficiente de variação médio de 30,64%, valor superior ao coeficiente de difusão em regime estacionário. Entretanto, ressalta-se que o coeficiente de difusão em estado não estacionário é obtido por meio de modelo de equação considerando também outras variáveis além daquelas obtidas no ensaio. A partir da Figura 140, tem-se os valores de coeficiente de difusão de cloretos estacionário (Ds) e não estacionário (Dns) representados graficamente.

Figura 140. Resultados de coeficiente de difusão de cloretos estacionário (ds) e não estacionário (dns).



Fonte: Produção do autor

Torna-se possível, por meio de classificação qualitativa segundo Gjorv (2001), classificar os concretos por meio do coeficiente de difusão de cloretos em regime não estacionário (Tabela 43). Constata-se que o concreto de referência e aqueles que utilizaram resíduo de vidro sem moagem foram classificados como concretos de resistência reduzida à penetração de cloretos. Nota-se que a com a moagem do resíduo de vidro obteve-se a classificação de moderada penetração de cloretos com a substituição parcial de 10% de resíduo de vidro moído e com a substituição de 20% obteve-se a classificação de elevada resistência à penetração de íons cloretos, equivalendo aos concretos que adotaram metacaulim. Este comportamento pode ter ocorrido em função das reações pozolânicas reagindo com os compostos do cimento hidratado, tanto com a utilização do resíduo de vidro moído, quanto com a utilização de metacaulim em períodos traidios de cura. O ensaio iniciou-se com concretos com idades de 28 dias, entretanto em face do tempo de execução

do ensaio, por volta de 8 semanas, o processo de desenvolvimento das reações pozolânicas perdurou durante a execução do ensaio, promovendo melhorias na microestrutura dos concretos.

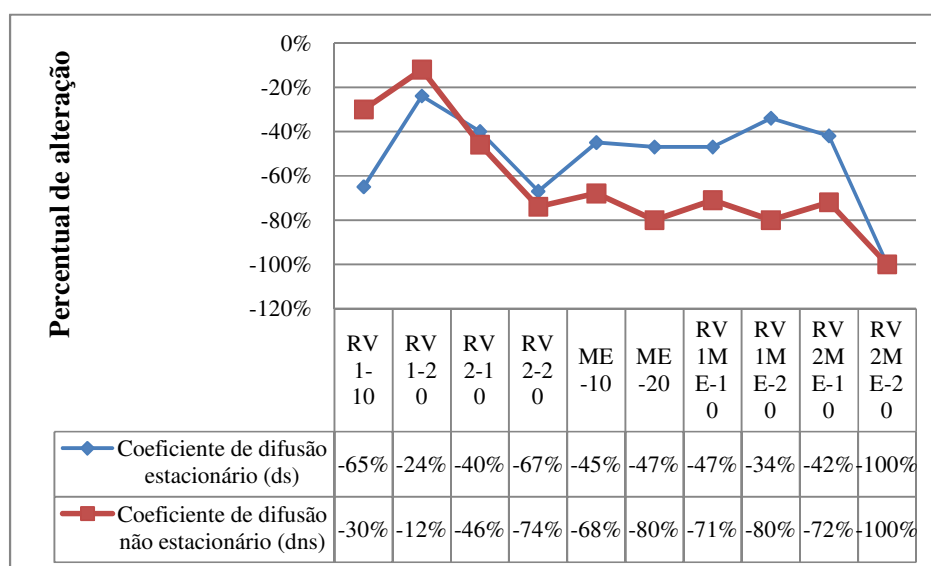
Constata-se o benefício da utilização conjunta de metacaulim e de resíduo de vidro sem moagem e com moagem nos percentuais de utilização de 10% de cada material nos concretos, RV1ME-20 e RV2ME-20. Constata-se assim que é possível substituir até 20% do cimento com ganhos em resistência à penetração de cloretos utilizando-se resíduo de vidro sem beneficiamento (moagem) e metacaulim. A utilização combinada do resíduo de vidro sem moagem e metacaulim, possivelmente promoveu o benefício conjunto do preenchimento de poros do concreto (por meio do resíduo de vidro) e atividade pozolânica, por meio do metacaulim.

Tabela 39. Classificação qualitativa segundo Gjørv (2001)

Classificação conforme Gjørv (2001)	
Dns ($\times 10^{-12}$ m ² /s)	Resistência do concreto
>15	Reduzida
10-15	Moderada
5-10	Elevada
2,5-5	Muito Elevada
<2,5	Ultra Elevada

Fonte: Gjørv (2001)

Figura 141. Alteração em relação ao concreto de referência



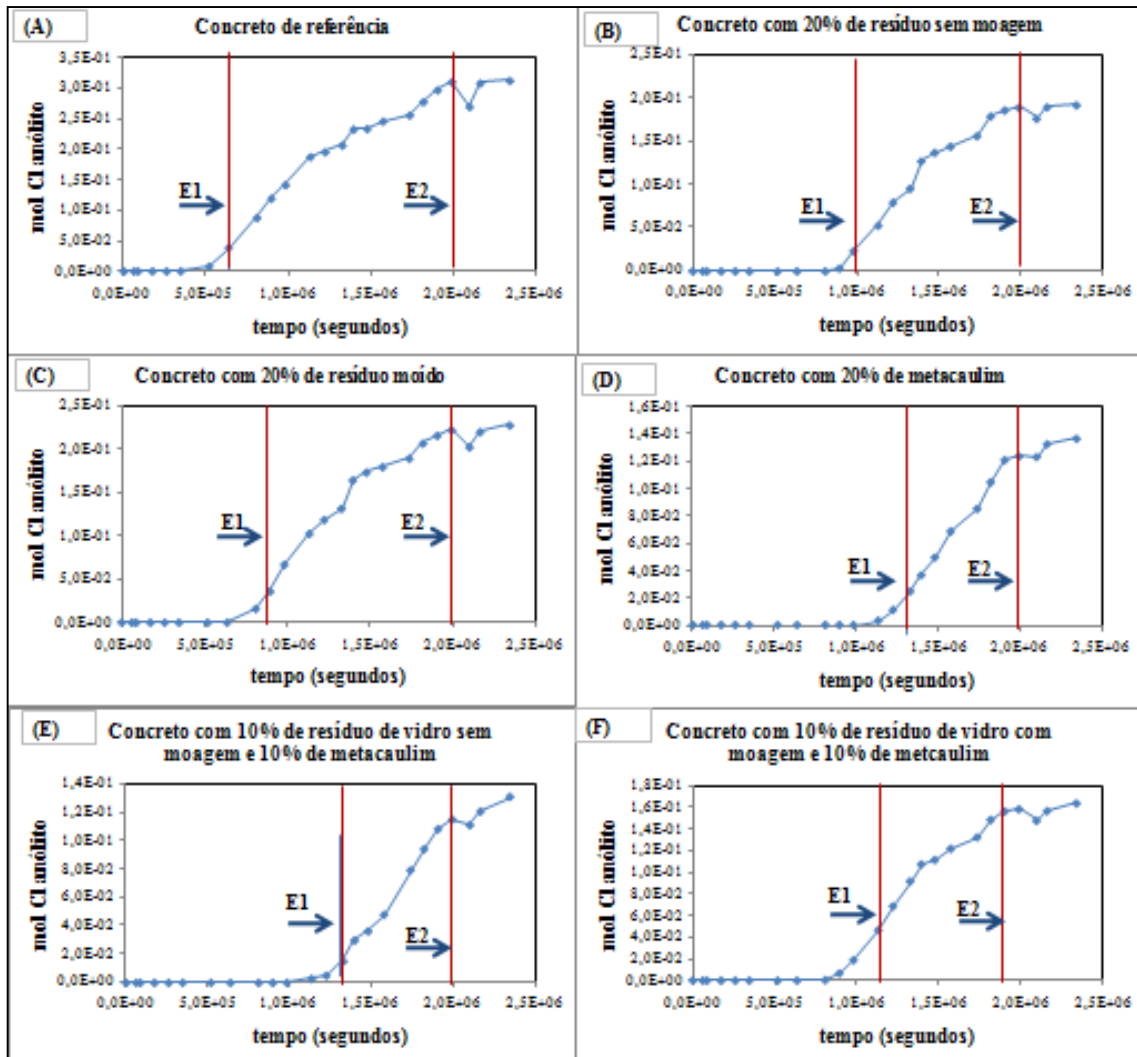
Fonte: Produção do autor

Verifica-se, redução do coeficiente de difusão em regime não estacionário em relação ao concreto de referência nos concretos que utilizaram resíduo de vidro moído alcançando patamares de moderada e elevada penetração de cloretos. Destacam-se os concretos com resíduo de vidro moído com percentual de substituição de 20% (redução de 74%), contemplando elevada resistência à penetração de cloretos, comparando-se aos concretos que se utilizam da substituição parcial do cimento por metacaulim (redução de 80%).

A Figura 142 apresenta o resultado do ensaio de migração de cloretos em regime estacionário com os diferentes tipos de misturas.

É possível constatar que as amostras contendo resíduo de vidro e metacaulim apresentaram maior demora para entrar no período estacionário, configurando maior resistência à penetração de cloretos.

Figura 142. Resultado de amostra ensaiada conforme método UNE 83987/14



(a) Concreto de referência; (b) concreto com 20% de resíduo de vidro sem moagem; (c) concreto com 20% de resíduo de vidro com moagem; (d) concreto com 20% de metacaulim; (e) concreto com 10% de resíduo de vidro sem moagem e 10% de metacaulim; (f) concreto com 10% de resíduo de vidro com moagem e 10% de metacaulim – E1: início do período estacionário; E2: conclusão do período estacionário.

Fonte: Produção do autor

4.2.2.3.1. Análise de variância do coeficiente de difusão de cloretos em regime não estacionário (dns) em relação aos diferentes concretos

A análise de do coeficiente de difusão de cloretos em regime não estacionário dos concretos está apresentada na Tabela 40. Adotou-se um nível de confiança de 95% e um nível de significância de 5%.

Tabela 40. Análise da variância do efeito dos fatores controláveis no coeficiente de difusão em regime não estacionário

Fatores	SQ	GL	MQ	Fcal	p-valor	Resultado
Concretos	0,000000	10	0,000000	3,6297	0,022605	Significativo
Erro	0,000000	11	0,000000			

Fonte: Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004)

A análise individual de que o tipo de concreto foi significativo nos valores de coeficiente de difusão de cloretos apresentou correspondência, pois o valor-p foi inferior ao nível de significância, 0,05. Foi realizada também a mesma análise para os resultados de difusão de cloretos em regime estacionário e constatou-se também significância.

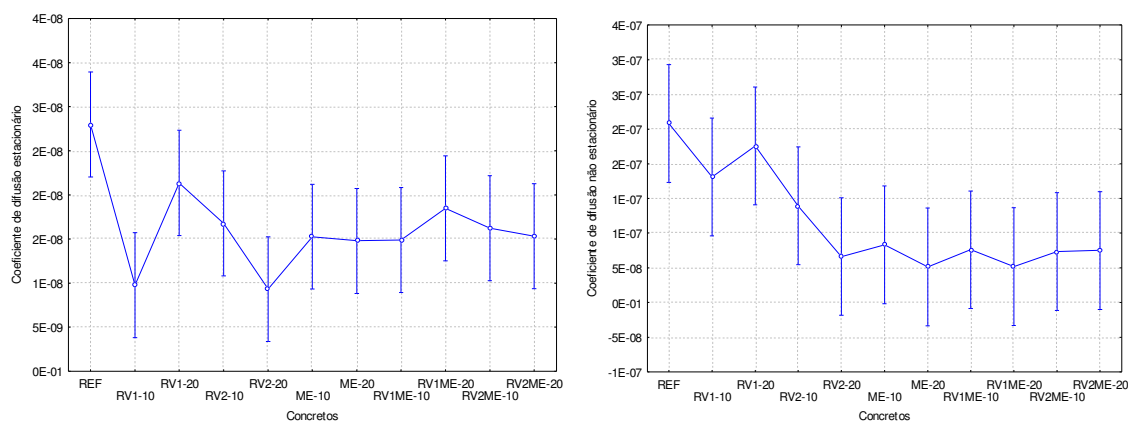
Tabela 41. Análise da variância do efeito dos fatores controláveis no coeficiente de difusão em regime estacionário

Fatores	SQ	GL	MQ	Fcal	p-valor	Resultado
Concretos	0,000000	10	0,000000	3,6259	0,022687	Significativo
Erro	0,000000	11	0,000000			

Fonte: Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004)

A fim de verificar a influência do tipo do concreto em relação ao coeficiente de difusão de cloretos estacionário e não estacionário, é possível representar graficamente os resultados conforme gráfico da Figura 143.

Figura 143. Efeito isolado do tipo de concreto sobre o coeficiente de difusão de cloretos (notação científica)



Fonte: Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004)

A partir dos gráficos, identifica-se redução do coeficiente de difusão de cloretos em relação ao concreto de referência em todos os concretos, destaca-se o concreto com 20% de substituição parcial de resíduo moído.

4.2.2.3.1. Análise de variância do coeficiente de difusão de cloretos em regime não estacionário (dns) em relação aos diferentes percentuais de substituição

a) Resíduo de vidro sem moagem

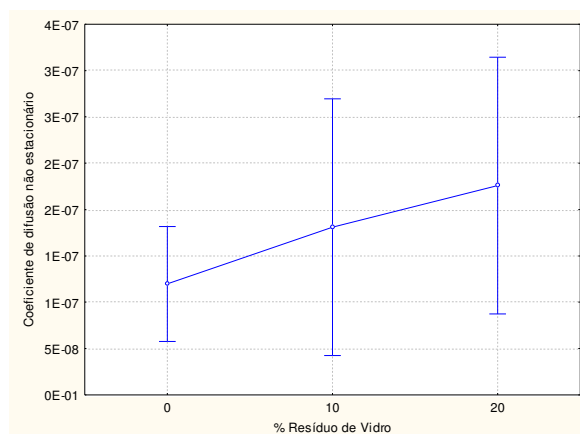
A seguir é apresentada análise de variância específica da utilização de resíduo de vidro sem moagem em relação ao coeficiente de difusão de cloretos em regime não estacionário (dns).

Tabela 42. Análise da variância do efeito dos fatores controláveis no coeficiente de difusão em regime não estacionário

Fatores	SQ	GL	MQ	Fcal	p-valor	Resultado
% Resíduo de Vidro	0,000000	2	0,000000	1,39325	0,288843	Não significativo
Erro	0,000000	11	0,000000			

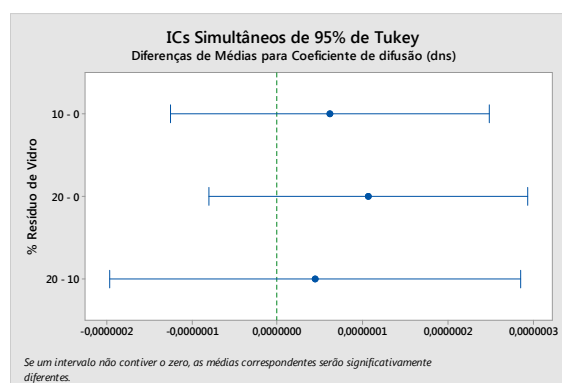
Fonte: Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004)

Figura 144. Efeito isolado do percentual de resíduo de vidro sem moagem sobre o coeficiente de difusão de cloretos



Fonte: Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004)

Figura 145. Teste de Tukey para o coeficiente de difusão de cloretos dos concretos com resíduo de vidro



Fonte: Minitab 17

A análise apresentada demonstrou que não há ganhos nem prejuízos na utilização de resíduo de vidro sem moagem no que se refere ao coeficiente de difusão de cloretos em estado não estacionário. Sendo assim, o efeito de preenchimento de poros do resíduo de vidro sem moagem nos percentuais da pesquisa não foi suficiente para favorecer a resistência à penetração de cloretos.

b) Resíduo de vidro moído

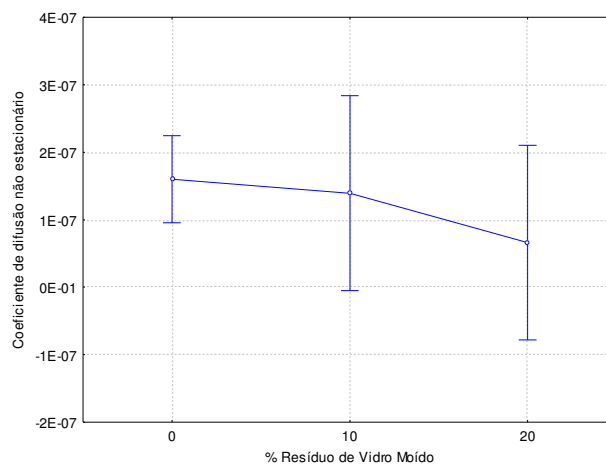
A seguir é apresentada análise de variância específica da utilização de resíduo de vidro com moagem em relação ao coeficiente de difusão de cloretos.

Tabela 43. Análise da variância do efeito dos fatores controláveis no coeficiente de difusão em regime não estacionário

Fatores	SQ	GL	MQ	Fcal	p-valor	Resultado
% Resíduo de Vidro Moído	0,000000	2	0,000000	0,85086	0,453330	Não significativo
Erro	0,000000	11	0,000000			

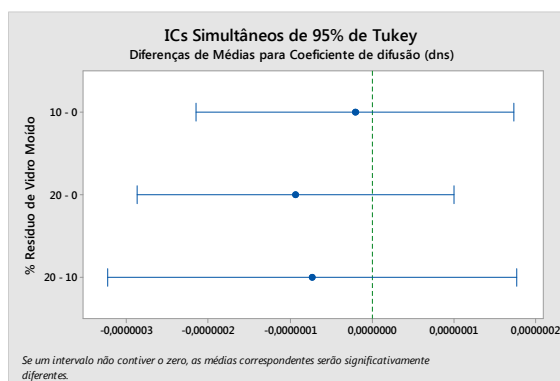
Fonte: Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004)

Figura 146. Efeito isolado do percentual de resíduo de vidro com moagem sobre o coeficiente de difusão



Fonte: Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004)

Figura 147. Teste de Tukey para o coeficiente de difusão de cloretos dos concretos com resíduo de vidro moído



A análise apresentada demonstrou uma redução do coeficiente de difusão de cloretos com a elevação do percentual de utilização de resíduo de vidro com moagem. Porém, ocorreu uma diferença sem significância estatística. Este resultado vai contra ao obtido por meio da análise dos valores médios e a classificação qualitativa segundo Gjørsv (2011) onde, por exemplo, o resíduo de vidro com moagem com substituição parcial ao cimento de 20% obteve melhorias em relação ao concreto de referência, de reduzida resistência à penetração de cloretos para elevada. Este fato pode ter ocorrido em função da atividade pozolânica desempenhada pelo resíduo de vidro moído, característica comprovada conforme métodos de caracterização do material.

c) Metacaulim

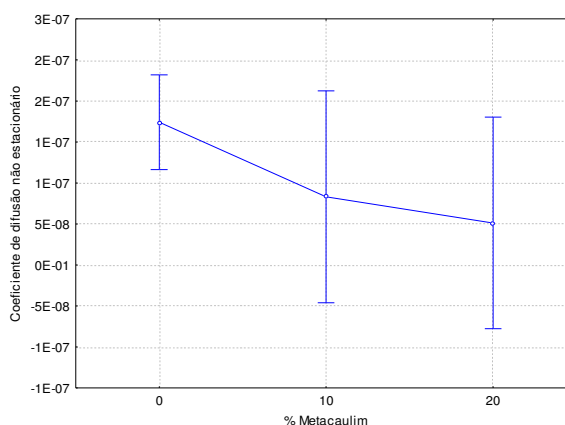
A seguir é apresentada análise de variância específica da utilização de metacaulim em relação ao coeficiente de difusão de cloretos.

Tabela 44. Análise da variância do efeito dos fatores controláveis no coeficiente de difusão em regime não estacionário

Fatores	SQ	GL	MQ	Fcal	p-valor	Resultado
% Metacaulim	0,000000	2	0,000000	2,44891	0,131918	Não significativo
Erro	0,000000	11	0,000000			

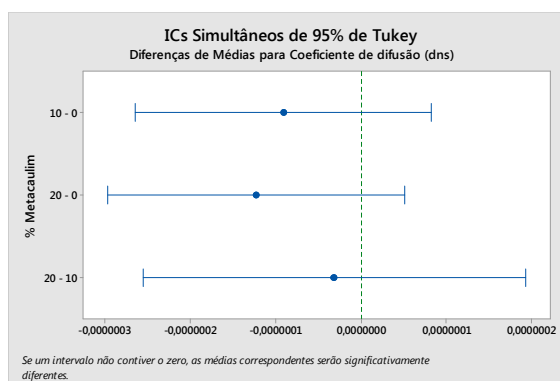
Fonte: Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004)

Figura 148. Efeito isolado do percentual de metacaulim sobre o coeficiente de difusão



Fonte: Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004)

Figura 149. Teste de Tukey para o coeficiente de difusão de cloretos dos concretos com metacaulim



Fonte: Minitab 17

Por meio da análise estatística, verificou-se que a utilização de metacaulim nos concretos não proporcionou diferenças no que tange à resistência à penetração de cloretos. Este fato vai contra o verificado no gráfico de valores médios e classificação qualitativa segundo Gjørv (2011) onde vislumbraram-se melhorias significativas avançando de reduzida resistência à penetração de cloretos para até muito elevada nos concretos. O ensaio

4.2.2.4. Ensaio acelerado de migração de cloretos no estado não estacionário - NT BUILD 492

O ensaio de migração de cloretos em regime não estacionário foi realizado conforme a norma NT BUILD 492 (NT BUILD, 1999). Justifica-se a execução deste ensaio a fim de comparar com os resultados obtidos pelo ensaio UNE 83987 e avaliar, a partir dos coeficientes de variação encontrados em cada ensaio, além de outros parâmetros que indicam a confiabilidade do ensaio, o coeficiente de difusão de cloretos não estacionário a ser adotado para estimativas de vida útil de projeto (VUP) dos concretos.

Foram adotadas duas amostras de cada mistura para cada idade de cura. As idades adotadas foram de 28 e 91 dias a fim de verificar a influência da utilização das pozolâneas ao longo do tempo.

Por meio da Tabela 45, é possível identificar os resultados de coeficiente de difusão de cloretos em estado não estacionário nas distintas idades e os coeficientes de variação.

Tabela 45. Resultados de coeficiente de difusão de cloretos não estacionário

Concreto	28 dias			91 dias		
	Coeficiente de difusão	σ	CV	Coeficiente de difusão	σ	CV
REF	2,98E-07	-	0,00%	3,00E-07	-	0,00%
RV1-10	2,46E-07	7,07E-10	0,29%	2,33E-07	9,42E-08	40,44%
RV1-20	7,00E-08	6,01E-09	8,59%	4,61E-08	2,13E-09	4,63%
RV2-10	3,05E-08	3,61E-09	11,82%	5,91E-08	1,13E-08	19,11%
RV2-20	6,84E-08	8,34E-09	12,20%	3,41E-08	4,27E-09	12,51%
ME-10	8,21E-08	0,00E+00	0,00%	5,88E-08	9,52E-09	16,19%
ME-20	5,70E-08	6,51E-09	11,41%	3,29E-08	4,14E-09	12,58%
RV1ME-10	8,75E-08	5,66E-10	0,65%	5,65E-08	7,80E-10	1,38%
RV1ME-20	7,76E-08	1,77E-09	2,28%	3,63E-08	4,66E-09	12,85%
RV2ME-10	1,10E-07	-	0,00%	5,80E-08	-	0,00%
RV2ME-20	5,97E-08	4,53E-09	7,58%	2,74E-08	3,83E-09	14,00%

Notas: Dns – Coeficiente de difusão de cloretos não estacionário (MPa).

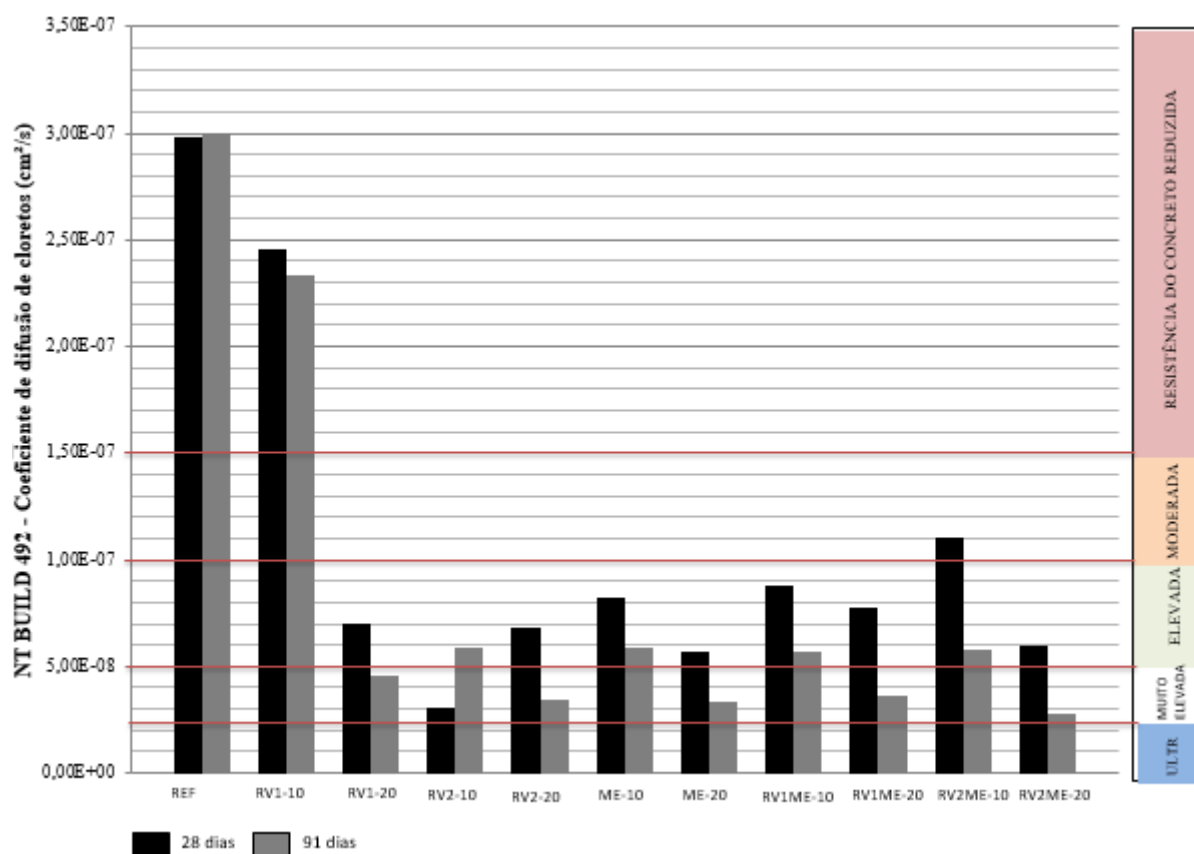
σ – Desvio padrão.

Fonte: Produção do autor

Observa-se um coeficiente de variação médio de 10,60%, valor próximo ao valor aceito pela norma referente ao coeficiente de variação de repetibilidade, ou seja repetição do ensaio no mesmo laboratório e mesmo operador, de 9%.

É possível verificar os resultados de coeficiente de difusão de cloretos não estacionário no tocante à classificação qualitativa contemplada na norma, conforme Figura 150.

Figura 150. Coeficiente de difusão de cloretos não estacionário



Fonte: Produção do autor

Verifica-se, conforme classificação qualitativa proposta por Gjorv (2001), que o resíduo de vidro sem moagem com 10% de substituição ao cimento (RV1-10), assim como no ensaio UNE 83987 (UNE, 2014) e no ensaio de penetração de carga passante, ASTM C 1202 (ABNT, 2012), não foi suficiente para atingir a classificação de moderada resistência à penetração de cloretos. Consolida-se assim o entendimento nesta pesquisa que para uma efetiva resistência à penetração de cloretos em percentuais de substituição de 10% torna-se interessante a moagem do resíduo de vidro ou a utilização combinada com o metacaulim como se notam nos concretos com 10% de resíduo sem moagem e 10% de metacaulim (RV1ME-20), sendo possível substituir até 20% do cimento com ganho em desempenho.

O aumento do percentual de resíduo de vidro sem moagem para 20% promoveu ganhos, avançando para elevada aos 28 dias e ultraelevada aos 91 dias resistência à penetração de cloretos. Este comportamento pode ser atribuído ao mecanismo de preenchimento dos poros do

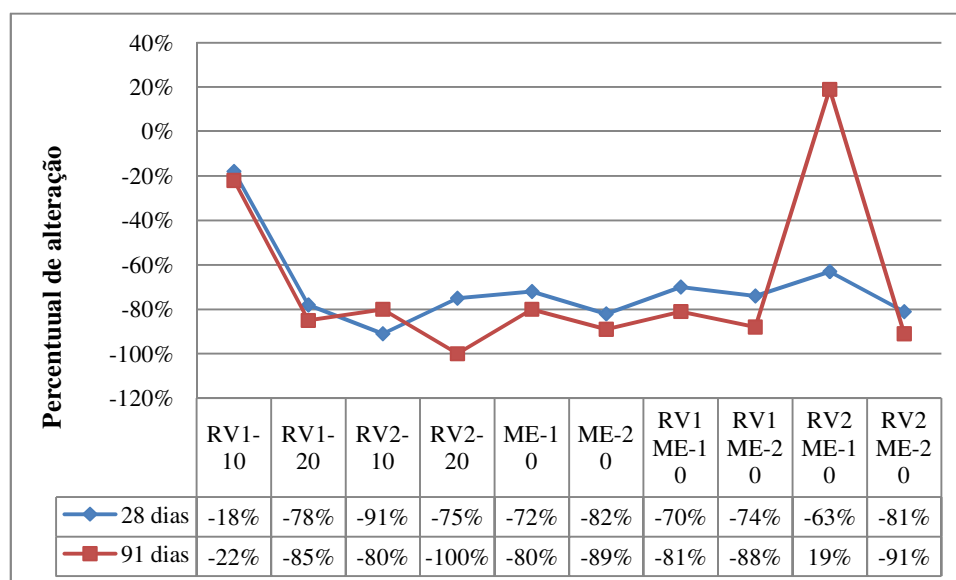
concreto. Ressalta-se também a utilização de resíduo de vidro moído nos percentuais de 10% e de 20% promovendo ganhos equivalentes à pozolana metacaulim.

Tabela 46. Classificação conforme Gjørv (2001)

Classificação conforme Gjørv (2001)	
Dns ($\times 10^{-12}$ m ² /s)	Resistência do concreto
>15	Reduzida
10-15	Moderada
5-10	Elevada
2,5-5	Muito Elevada
<2,5	Ultra Elevada

Fonte: Gjørv (2001)

Figura 151. Alteração em relação ao concreto de referência



Fonte: Produção do autor

Vale ressaltar que a simples elevação do percentual de resíduo de vidro sem moagem, como ocorre nos concretos com 20% de substituição, pode favorecer ganhos expressivos, como se observa o aumento do potencial de resistência à penetração de cloretos do resíduo de vidro sem moagem de 18% com 10% de substituição para 78% com 20% de substituição aos 28 dias e 22% com 10% de substituição para 85% com 20% de substituição aos 91 dias, cerca de uma variação em ambos os casos de 60%. Porém, torna-se necessário também avaliar de maneira conjunta a

influência das propriedades mecânicas dos concreto em função da substituição parcial do cimento.

Constata-se, assim como em Matos e Coutinho (2012), Kamali (2015) e Hwee e Hongjjan (2013) que avaliaram, por meio do ensaio NT BUILD 492 (NT BUILD, 1999) a utilização de resíduos de vidro em substituição ao cimento em percentual até 20%, que a utilização de 20% de resíduos de vidro em concretos promovem redução da penetração de cloretos, principalmente a partir de 56 dias de cura.

4.2.2.4.1. **Análise de variância do coeficiente de difusão de cloretos não estacionário em relação aos diferentes concretos**

A análise de variância da resistência à penetração de cloretos dos concretos está apresentada na Tabela 47. Adotou-se um nível de confiança de 95% e um nível de significância de 5%.

Tabela 47. Análise da variância do efeito dos fatores controláveis no coeficiente de difusão em regime não estacionário

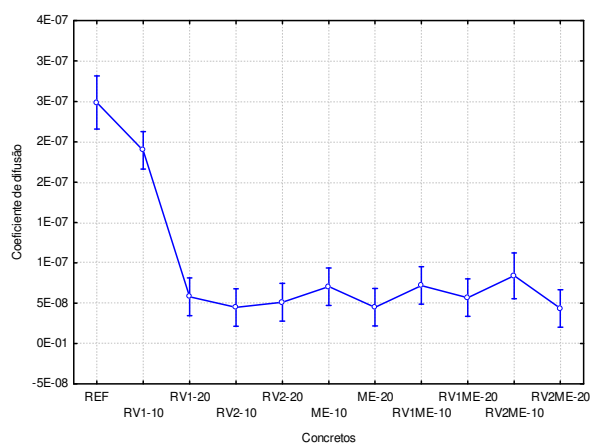
Fatores	SQ	GL	MQ	Fcal	p-valor	Resultado
Concretos	0,000000	10	0,000000	44,3399	0,000000	Significativo
Idade	0,000000	1	0,000000	9,6642	0,005781	Significativo
Concreto - idade	0,000000	10	0,000000	0,8650	0,578540	Não significativo
Erro	0,000000	19	0,000000			

Fonte: Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004)

Visando também investigar se determinada variável, idade ou tipo de concreto, teve influência sobre o coeficiente de difusão de cloretos avaliou-se o p-valor por meio de análise de variância. Caso o p-valor seja inferior a 0,05, a variável é considerada como sendo significativa. A partir da Tabela 47, verificam-se que os resultados entre os concretos apresentaram diferenças significativas quer sejam nos grupos (diferentes concretos ao longo das distintas idades) quer sejam entre grupos (entre um tipo de concreto e outro). A exceção se faz na interação entre tipos de concreto e idades identificando que não há uma variação significativa quando é realizada a interação entre as duas variáveis.

A fim de verificar a influência de cada variável no coeficiente de difusão de cloretos, foram realizadas análises gráficas específicas tais como representado na Figura 152 que representa o efeito isolado do tipo de concreto sobre o coeficiente de difusão de cloreto no estado não estacionário.

Figura 152. Efeito isolado do tipo de concreto sobre o coeficiente de difusão de cloretos (notação científica)

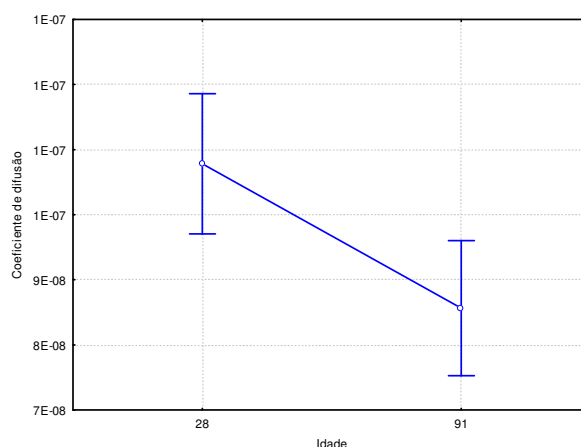


Fonte: Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004)

Por meio do gráfico é possível constatar que a utilização do resíduo de vidro proporcionou melhora na resistência à penetração de cloretos. Destacam-se os concretos contendo 20% de resíduo de vidro em substituição ao cimento, sem moagem e com moagem, RV1-20 e RV2-20, respectivamente.

É possível também verificar o efeito isolado da idade nos concretos por meio da Figura 153.

Figura 153. Efeito isolado da idade sobre o coeficiente de difusão de cloretos (notação científica)

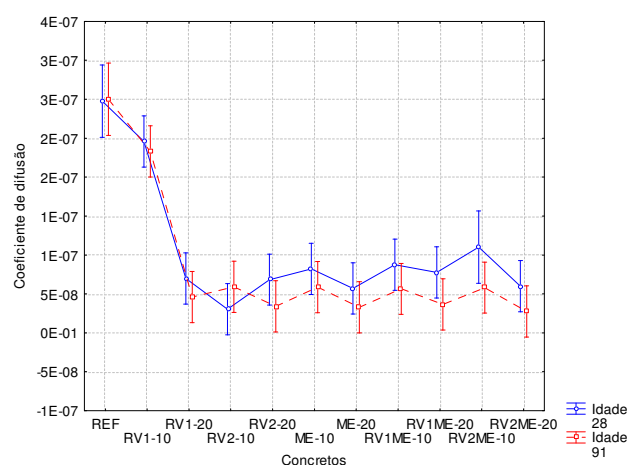


Fonte: Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004)

Verifica-se uma redução significativa do coeficiente de difusão de cloretos com o avanço da idade de cura. Isso pode ter ocorrido em função da ação pozolânica agindo com os compostos do cimento hidratado em períodos tardios de cura, somado ainda com o efeito de preenchimento dos poros dos concretos.

É possível também verificar o efeito da interação entre os tipos de concretos e diferentes idades, conforme Figura 154.

Figura 154. Efeito interação dos tipos de concretos e idade sobre o coeficiente de difusão de cloretos

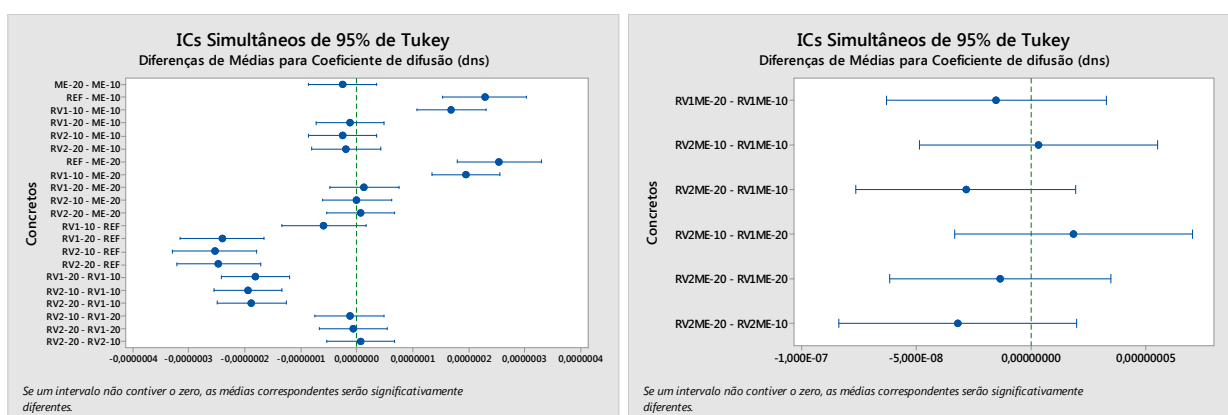


Fonte: Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004)

Por meio da Figura, constata-se que quando se faz a análise da interação entre os tipos de concreto e a idade verifica-se que não há alteração significativa, mantendo um comportamento semelhante.

Identifica-se também, por meio de Teste de Tukey, que os concretos com resíduo de vidro são estatisticamente diferentes com relação ao concreto de referência, com exceção ao concreto com resíduo de vidro sem moagem com percentual de substituição de 10% (RV1-10).

Figura 155. Teste de Tukey para o coeficiente de difusão de cloretos dos diferentes concretos



Fonte: Minitab 17

4.2.2.4.1. Análise de variância do coeficiente de difusão de cloretos não estacionário em relação aos diferentes percentuais de substituição

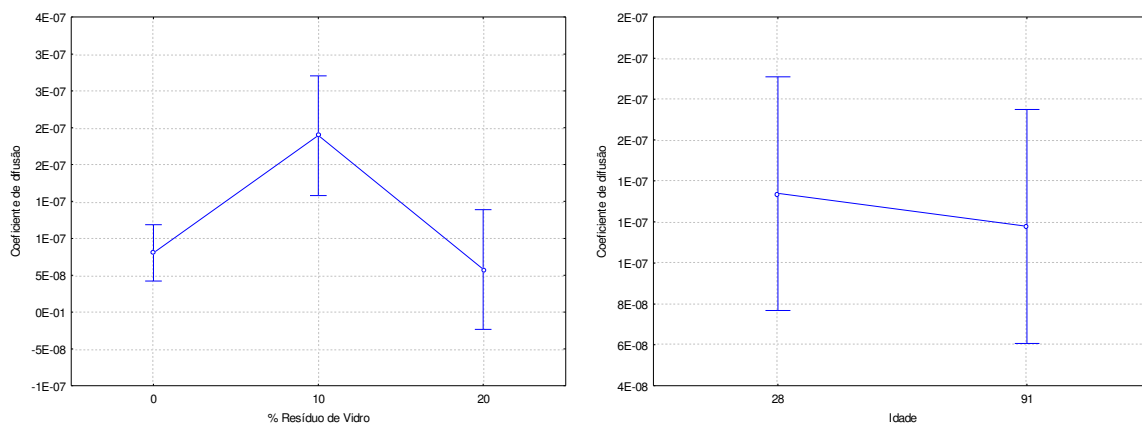
a) Resíduo de vidro sem moagem

A seguir é apresentada análise de variância específica da utilização de resíduo de vidro sem moagem em relação ao coeficiente de difusão de cloretos.

Tabela 48. Análise da variância do efeito dos fatores controláveis no coeficiente de difusão em regime não estacionário

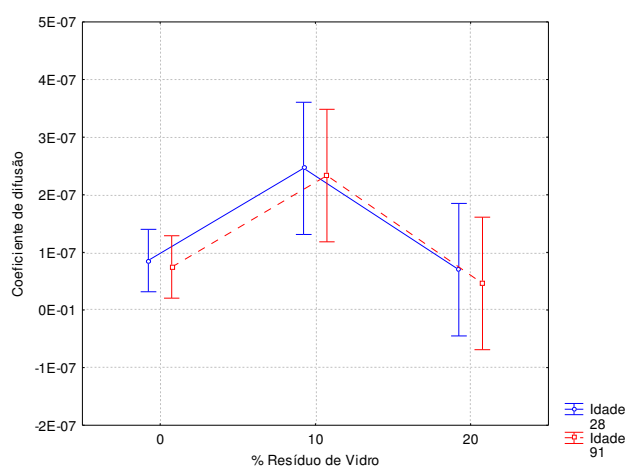
Fatores	SQ	GL	MQ	Fcal	p-valor	Resultado
% Resíduo de Vidro	0,000000	2	0,000000	7,58312	0,003540	Significativo
Idade	0,000000	1	0,000000	0,17225	0,682542	Não significativo
% Resíduo de Vidro*Idade	0,000000	2	0,000000	0,01038	0,989675	Não significativo
Erro	0,000000	20	0,000000			

Figura 156. Efeito isolado do percentual de resíduo de vidro sem moagem e a idade sobre o coeficiente de difusão de cloretos



Fonte: Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004)

Figura 157. Efeito da interação entre o percentual de resíduo de vidro e a idade sobre o coeficiente de difusão



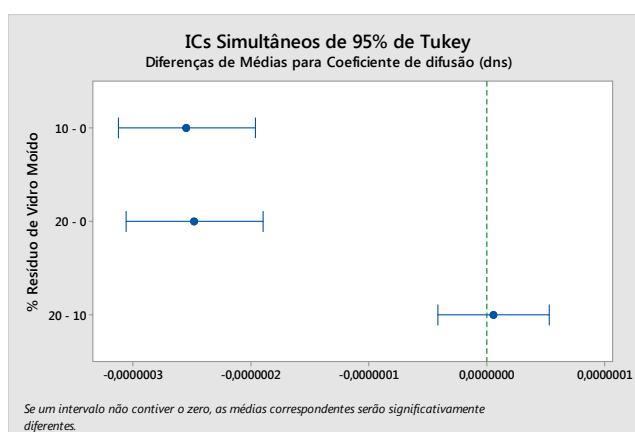
Fonte: Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004)

Por meio da análise, constatou-se redução do coeficiente de difusão de cloretos com a utilização de 20% de resíduo de vidro sem moagem e que este valor apresenta significância estatística. O fato pode ser atribuído ao efeito de preenchimento de poros pelas partículas finas do resíduo de vidro sem moagem. Com relação à utilização de resíduo de vidro com 10% de substituição ao cimento (RV1-10), conforme os gráficos, não há ganhos com relação à resistência à penetração de cloretos, há uma tendência estatística de perdas de resistência. O fato pode ser atribuído em função da quantidade de resíduo de vidro sem moagem, neste percentual, não proporcionar o preenchimento de poros necessário para promover ganhos neste quesito, somada ainda a

diminuição da trabalhabilidade nestes concretos, que podem levar ao aumento de poros nos concretos, facilitando o ingresso de íons cloreto.

Entretanto, não foi identificada alteração no que concerne às diferenças de idade. Por meio de Teste de Tukey foi possível também constatar diferenças significativas entre os concretos com resíduo de vidro com 20% de substituição parcial ao cimento e os concretos de referência, pois não apresentam zero no intervalo de comparação entre as médias.

Figura 158. Teste de Tukey para o coeficiente de difusão de cloretos dos concretos com resíduo de vidro



Fonte: Minitab 17

b) Resíduo de vidro moído

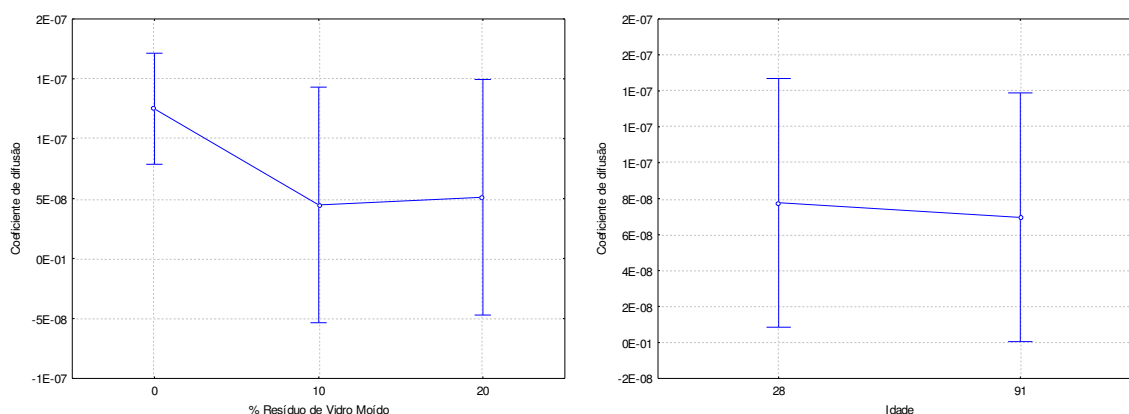
A seguir é apresentada análise de variância específica da utilização de resíduo de vidro com moagem em relação ao coeficiente de difusão de cloretos.

Tabela 49. Análise da variância do efeito dos fatores controláveis no coeficiente de difusão em regime não estacionário

Fatores	SQ	GL	MQ	Fcal	p-valor	Resultado
% Resíduo de Vidro Moído	0,000000	2	0,000000	1,847257	0,183579	Não significativo
Idade	0,000000	1	0,000000	0,029207	0,866019	Não significativo
% Resíduo de Vidro Moído*Idade	0,000000	2	0,000000	0,130181	0,878674	Não significativo
Erro	0,000000	20	0,000000			

Fonte: Statística 7.0 (STATSOFT, 2004)

Figura 159. Efeito isolado do percentual de resíduo de vidro com moagem e a idade sobre o coeficiente de difusão



Fonte: Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004)

Por meio da análise constatou-se redução do coeficiente de difusão de cloretos com a utilização de resíduo de vidro moído, entretanto a análise do p-valor apresentou não significância. Entretanto, por meio do gráfico de valores médios e classificação qualitativa proposta por Gjorv (2001), é possível verificar que o resíduo de vidro moído apresentou benefícios com relação à resistência à penetração de cloretos.

c) Metacaulim

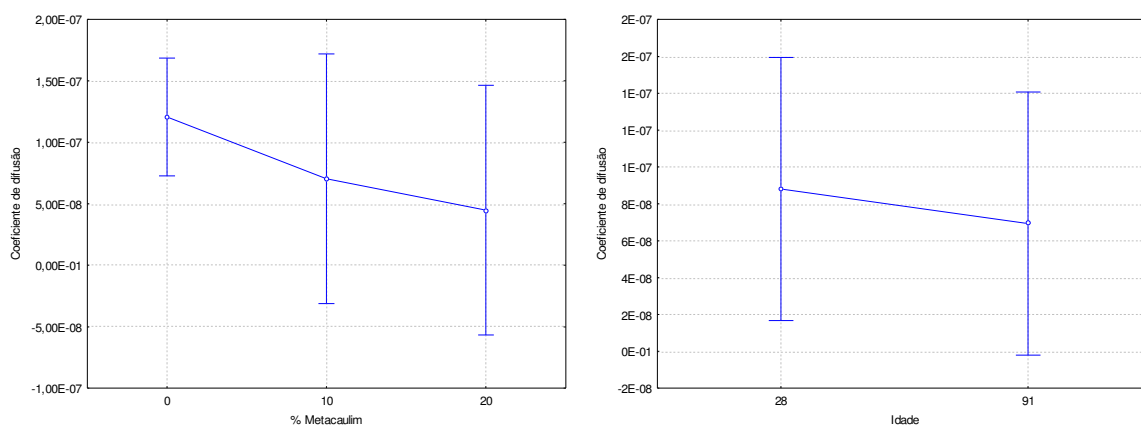
A seguir é apresentada a análise de variância específica da utilização de metacaulim em relação ao coeficiente de difusão de cloretos.

Tabela 50. Análise da variância do efeito dos fatores controláveis no coeficiente de difusão em regime não estacionário

Fatores	SQ	GL	MQ	Fcal	p-valor	Resultado
% Metacaulim	0,000000	2	0,000000	1,22513	0,314836	Não significativo
Idade	0,000000	1	0,000000	0,15143	0,701285	Não significativo
% Metacaulim*Idade	0,000000	2	0,000000	0,01544	0,984690	Não significativo
Erro	0,000000	20	0,000000			

Fonte: Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004)

Figura 160. Efeito isolado do percentual de metacaulim e a idade sobre o coeficiente de difusão



Fonte: Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004)

Os resultados apresentados demonstraram a redução do coeficiente de difusão de cloretos com a elevação do percentual de utilização de metacaulim, assim como com o avanço da idade. Novamente, constata-se a não significância indicada pelo valor-p. Entretanto, conforme classificação de Gjorv (2001), há ganhos na utilização desta pozolana frente ao avanço dos íons cloretos nos concretos ensaiados.

4.2.2.5. Ensaio de difusão de cloretos por imersão – NT BUILD 443

O ensaio de difusão de cloretos por imersão foi realizado conforme a norma NT BUILD 443 (NT BUILD, 1995). Foram adotadas duas amostras de cada mistura para cada idade de exposição à solução salina. As idades de exposição a cloretos adotadas foram de 60, 120 e 180 dias, a fim de verificar a influência da utilização das pozolânas ao longo do tempo.

Por meio da Tabela 51, é possível identificar os resultados de penetração de cloretos por difusão por imersão nas distintas idades e os coeficientes de variação.

Tabela 51. Resultados médios de difusão de cloretos por imersão

Concreto	60 dias			120 dias			180 dias		
	Penetração de cloretos (mm)	σ	CV	Penetração de cloretos (mm)	σ	CV	Penetração de cloretos (mm)	σ	CV
REF	27,35	0,33	1,22%	50,00	0,00	0,00%	50,00	0,00	0,00%
RV1-10	24,50	0,30	1,21%	24,30	0,10	0,41%	50,00	0,00	0,00%
RV1-20	14,70	0,34	2,31%	13,20	0,11	0,86%	15,35	0,11	0,69%
RV2-10	16,35	0,04	0,22%	15,45	0,02	0,14%	19,35	0,01	0,04%
RV2-20	10,55	0,06	0,60%	12,75	0,02	0,17%	18,15	0,08	0,43%
ME-10	13,80	0,07	0,51%	12,70	0,14	1,11%	15,60	0,04	0,27%
ME-20	8,85	0,08	0,88%	13,00	0,01	0,11%	14,50	0,07	0,49%
RV1ME-10	12,20	0,03	0,23%	14,85	0,02	0,14%	16,95	0,13	0,79%
RV1ME-20	10,85	0,08	0,72%	13,60	0,07	0,52%	14,50	0,03	0,20%
RV2ME-10	12,40	0,10	0,80%	15,20	0,07	0,47%	16,45	0,21	1,25%
RV2ME-20	9,60	0,14	1,47%	10,85	0,08	0,72%	11,95	0,01	0,06%

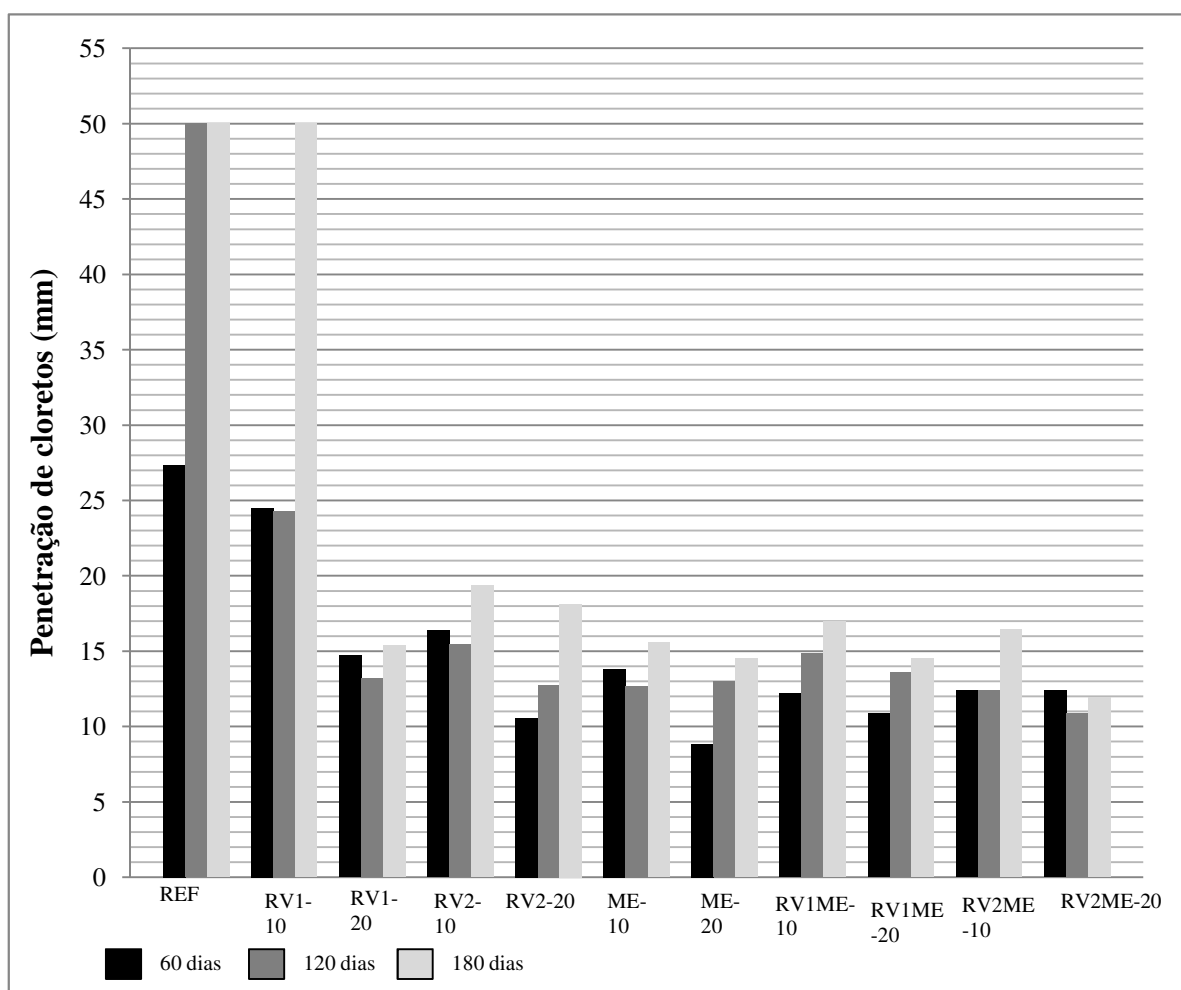
σ – Desvio padrão

CV – Coeficiente de variação

Fonte: Produção do autor

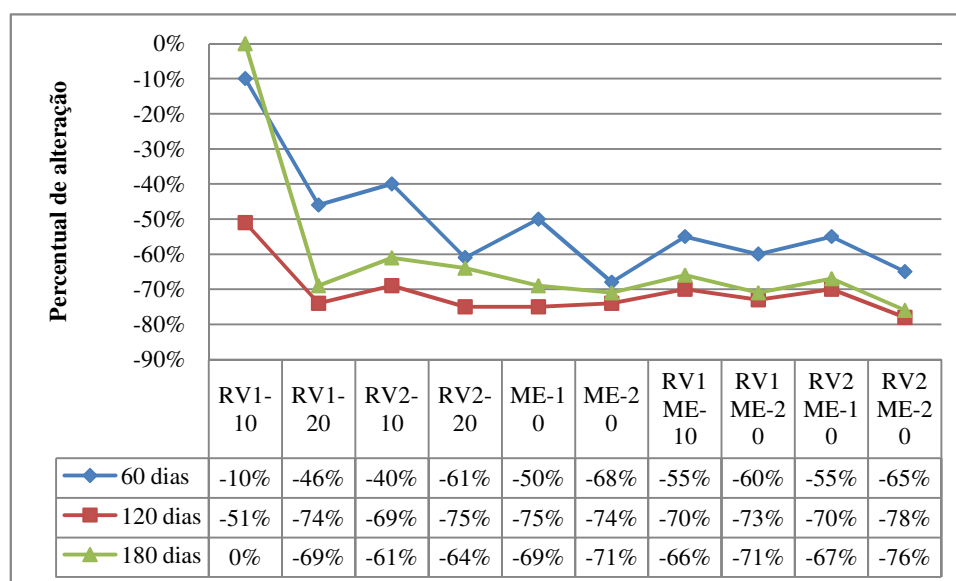
Observa-se um coeficiente de variação médio muito pequeno em torno de 0,58%. É possível verificar os resultados de penetração de cloretos, conforme Figura 161.

Figura 161. Penetração de cloretos em ensaio de difusão por imersão



Fonte: Produção do autor

Figura 162. Alteração em relação ao concreto de referência



Fonte: Produção do autor

Por meio da Figura 162, torna-se possível constatar o avanço da penetração de cloretos com o tempo de exposição. Os valores de penetração de cloretos com a utilização dos resíduos de vidro e metacaulim contemplados nesta pesquisa favoreceram a resistência à penetração de cloretos, com exceção dos concretos com a substituição de 10% do cimento por resíduo de vidro sem moagem.

Concretos com resíduos de vidro com moagem responderam muito bem com relação à proteção ao avanço de cloretos, configurando-se em valores similares aos concretos que utilizaram metacaulim. É importante destacar a redução de 69% da profundidade da camada contaminada por cloretos em concretos com 20% de resíduo de vidro sem moagem aos 180 dias, comparando-se aos concretos que utilizaram metacaulim.

A partir da comparação dos resultados de penetração por difusão com os resultados obtidos por ensaios de migração, verifica-se que ao se adotar um percentual de substituição ao cimento de 20% o resíduo de lapidação de vidro pode ser utilizado sem beneficiamento (moagem) obtendo ganhos com relação à resistência à penetração de cloretos, comparando-se à resistência obtida em concretos que utilizam-se de metacaulim.

4.2.2.5.1. Análise de variância da resistência à penetração de cloretos em relação aos diferentes concretos

A análise de variância da resistência à penetração de cloretos dos concretos está apresentada na Tabela 52. Adotou-se um nível de confiança de 95% e um nível de significância de 5%.

Tabela 52. Análise da variância do efeito dos fatores controláveis na difusão de cloretos por imersão

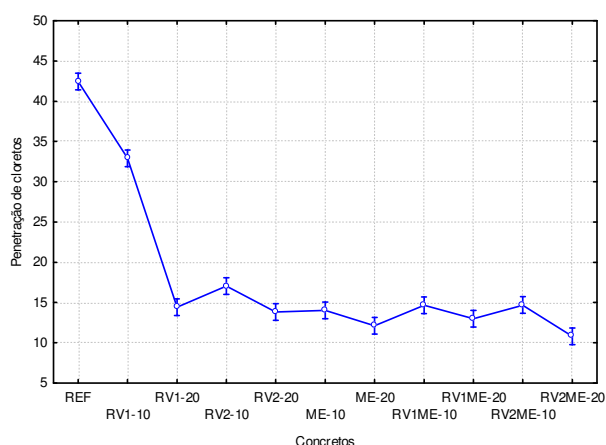
Fatores	SQ	GL	MQ	Fcal	p-valor	Resultado
Concretos	6007,02	10	600,70	387,06	0,000000	Significativo
Idade	610,54	2	305,27	196,70	0,000000	Significativo
Concreto - idade	1132,76	20	56,64	36,49	0,000000	Significativo
Erro	51,22	33	1,55			

Fonte: Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004)

Visando também investigar se determinada variável, idade ou tipo de concreto, teve influência sobre a resistência à penetração de cloretos, avaliou-se o p-valor fornecido por meio de análise de variância. A partir da Tabela 52, é possível constatar que os resultados entre os concretos apresentaram diferenças significativas, quer sejam nos tratamentos (diferentes concretos ao longo das distintas idades), quer sejam entre tratamentos (entre um tipo de concreto e outro). Assim, as variáveis concreto e idade foram consideradas como tendo influência sobre a penetração de cloretos do concreto, reduzindo quando utilizada a pozolana metacaulim e resíduo de vidro.

A fim de verificar a influência de cada variável na penetração de cloretos, foram realizadas análises gráficas específicas tais como a Figura 163 que representa o efeito isolado do tipo de concreto sobre a resistência à penetração de cloretos.

Figura 163. Efeito isolado do tipo de concreto sobre a difusão de cloretos por imersão

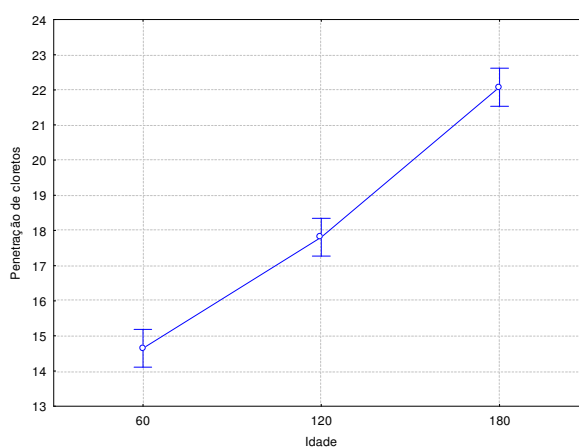


Fonte: Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004)

Por meio do gráfico, é possível identificar que a utilização do resíduo de vidro proporcionou uma melhora na resistência à penetração de cloretos pontuando os valores em torno de 15mm enquanto que o concreto de referência, por volta de um pouco mais que 40mm. Nota-se assim uma redução de mais de 100%.

É possível também verificar o efeito isolado do tempo de exposição a cloretos nos concretos por meio da Figura 164.

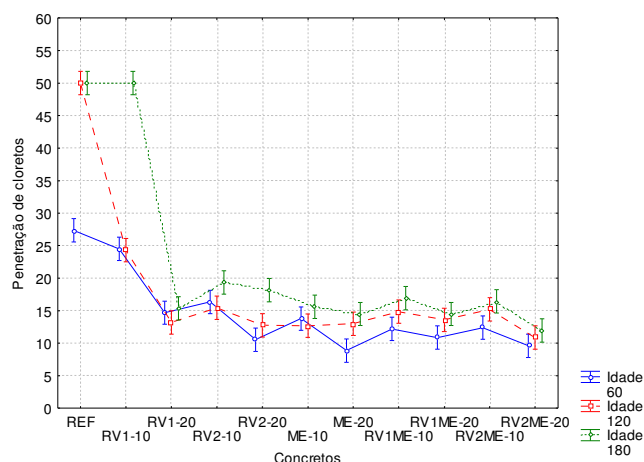
Figura 164. Efeito isolado o tempo de exposição sobre a difusão de cloretos por imersão



Fonte: Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004)

Verifica-se, conforme era previsto, aumento da penetração de cloretos com o avanço da exposição a cloretos. É possível também verificar o efeito da interação entre tipos de concretos e diferentes idades conforme Figura 165.

Figura 165. Efeito interação dos tipos de concretos e tempo de exposição sobre a penetração de cloretos por difusão



Fonte: Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004)

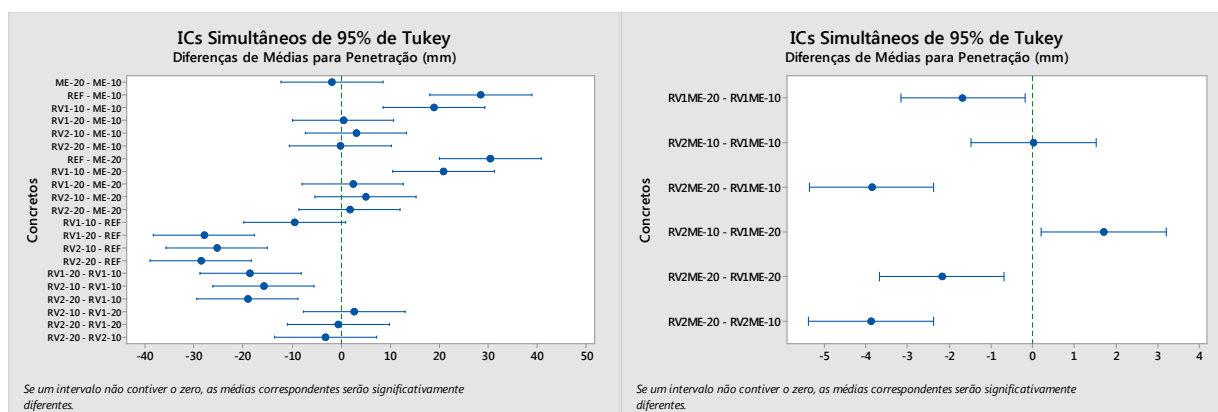
Por meio da Figura 165, constata-se o efeito significativo com a utilização do resíduo de vidro com 20% de substituição ao cimento equiparando aos outros concretos da pesquisa, tais como o resíduo moído e a pozolana metacaulim. Verifica-se com o avanço do tempo de exposição a cloretos, um comportamento similar. É possível verificar o distanciamento entre os resultados dos concretos de referência e os concretos com 10% de resíduo de vidro sem moagem em substituição ao cimento (RV1-10) em relação aos outros concretos do estudo. É possível também observar que é possível utilizar concretos com resíduos de vidro sem moagem desde que o percentual de substituição seja de 20%.

Conforme Zibara et al. (2008), a difusão de cloretos através do concreto depende, principalmente, de sua microestrutura e da capacidade de fixação desses íons. Para misturas de cimento Portland comum, o principal mecanismo de fixação de cloretos é a formação de sal de Friedel e de complexos relacionados aos aluminatos (SAIKIA, KATO, KOJIMA, 2006). O composto anidro do cimento que reage mais rápido quimicamente com os cloretos é o aluminato tricálcico (C3A) e o produto dessa reação é conhecido como sal de Friedel. Nos concretos com materiais cimentícios suplementares estudos indicam que a capacidade de fixação é função do conteúdo de aluminatos. Sendo assim destacam-se os concretos contendo metcaulim, pois

apresentam em sua composição química elementos fundamentais para a formação destes compostos. Estes concretos, conforme apresentado no gráfico de valores médios, apresentaram redução da penetração de cloretos em relação ao concreto de referência.

A fim de identificar de maneira específica quais idades e concretos são estatisticamente diferentes foi realizado Teste de Tukey, conforme Figura 166.

Figura 166. Teste de Tukey para a penetração de cloretos em diferentes concretos



Fonte: Minitab 17

A análise dos diferentes concretos demonstrou que há diferença estatística entre os concretos com resíduos de vidro, com exceção do resíduo de vidro sem moagem com 10% de substituição ao cimento, assim como constatado nos ensaios de migração de cloretos.

4.2.2.5.1. Análise de variância da resistência à penetração de cloretos em relação aos diferentes percentuais de substituição

a) Resíduo de vidro sem moagem

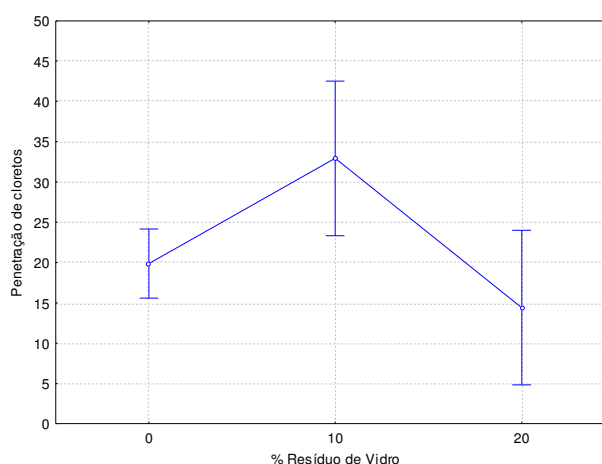
A seguir é apresentada análise de variância específica da utilização de resíduo de vidro sem moagem em relação à profundidade de penetração de cloretos.

Tabela 53. Análise da variância do efeito dos fatores controláveis no coeficiente de difusão em regime não estacionário

Fatores	SQ	GL	MQ	Fcal	p-valor	Resultado
% Resíduo de Vidro	1151,18	2	575,59	4,32360	0,021494	Significativo
Idade	644,01	2	322,01	2,41878	0,104652	Não significativo
% Resíduo de Vidro*Idade	570,82	4	142,70	1,07193	0,386048	Não significativo
Erro	4393,21	33	133,13			

Fonte: Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004)

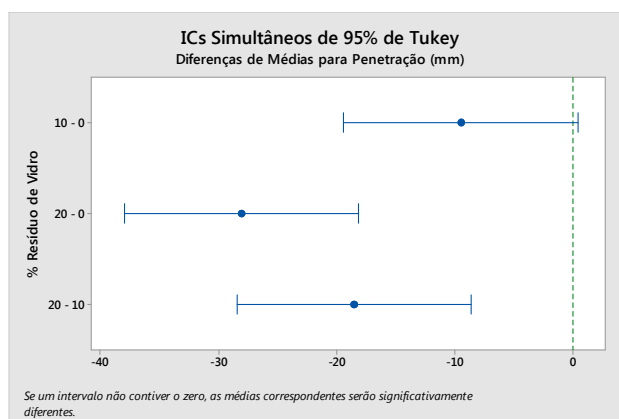
Figura 167. Efeito isolado do percentual de resíduo de vidro sem moagem sobre a penetração de cloretos



Fonte: Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004)

A utilização de resíduo de vidro sem moagem demonstrou-se significativa com relação à diminuição da penetração de cloretos, pois o p-valor foi de 0,0215, logo maior que índice de significância de 0,05, sendo assim o preenchimento dos poros dos concretos promovido pelo resíduo de vidro moído foi capaz de promover ganhos nos concretos com 20% de resíduo de vidro sem moagem. Com relação ao resíduo de vidro sem moagem com 10% de substituição não há ganhos não sua utilização, conforme demonstrado no Teste de Tukey, conforme Figura 168, onde intervalo de Tukey para o RV1-10 apresenta zero.

Figura 168. Teste de Tukey para a penetração de cloretos dos concretos com resíduo de vidro



Fonte: Minitab 17

b) Resíduo de Vidro Moído

A seguir é apresentada análise de variância da utilização de resíduo de vidro com moagem em relação à profundidade de penetração de cloretos.

Tabela 54. Análise da variância do efeito dos fatores controláveis no coeficiente de difusão em regime não estacionário

Fatores	SQ	GL	MQ	Fcal	p-valor	Resultado
% Resíduo de Vidro Moído	547,071	2	273,535	1,64004	0,209389	Não significativo
Idade	231,120	2	115,560	0,69286	0,507270	Não significativo
% Resíduo de Vidro Moído*Idade	64,211	4	16,053	0,09625	0,982950	Não significativo
Erro	5503,927	33	166,786			

Fonte: Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004)

A análise constatou que a utilização do percentual de resíduo moído não apresentou prejuízos aos concretos. Com relação aos ganhos de resistência à penetração de cloretos, identificam-se os concretos com resíduos de vidro moído com 10% e 20% de substituição obtendo redução, respectivamente, de 61% e 64% em relação ao concreto de referência, possivelmente em função de suas reações pozolânicas.

c) Metacaulim

A seguir é apresentada análise de variância específica da utilização de metacaulim em relação à profundidade de penetração de cloretos.

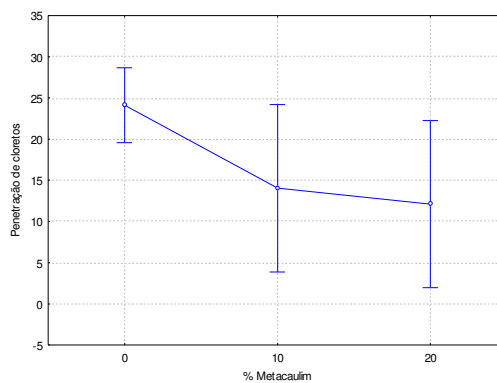
Tabela 55. Análise da variância do efeito dos fatores controláveis no coeficiente de difusão em regime não estacionário

Fatores	SQ	GL	MQ	Fcal	p-valor	Resultado
% Metacaulim	1059,193	2	529,596	3,53514	0,040636	Não significativo
Idade	172,681	2	86,341	0,57634	0,567508	Não significativo
% Metacaulim*Idade	112,317	4	28,079	0,18743	0,943281	Não significativo
Erro	4943,699	33	149,809			

Fonte: Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004)

A análise identificou que a utilização do percentual de metacaulim não apresentou prejuízos aos concretos. Com relação aos ganhos de resistência à penetração de cloretos, identificam-se os concretos com metacaulim contemplando 10% e 20% de substituição obtendo redução, respectivamente, de 69% e 71% em relação ao concreto de referência, possivelmente em função de suas reações pozolânicas. Esta redução pode ser visualizada conforme Figura 169.

Figura 169. Efeito isolado do percentual de metacaulim sobre a penetração de cloretos



Fonte: Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004)

4.2.2.6. Ensaio de resistividade elétrica do concreto

O ensaio de resistividade foi realizado conforme a norma NBR 9204 (NBR, 2012). Foram adotadas três amostras de cada mistura para cada idade de cura. As idades adotadas foram de 28

e 91 dias a fim de verificar a influência da utilização dos materiais (resíduo de vidro e metacaulim) ao longo do tempo. A importância do ensaio de resistividade elétrica do concreto baseia-se que esta propriedade, assim como o acesso de oxigênio, controla o processo eletroquímico que gera o mecanismo de corrosão das armaduras em estruturas de concreto. Está relacionada aos principais estágios da vida útil de uma estrutura e considera-se existir uma relação entre resistividade do concreto e a velocidade de corrosão do aço após a sua despassivação (SILVA, 2016). A resistividade elétrica é uma propriedade que depende, dentre outros fatores, da composição química da solução aquosa dos poros, da estrutura dos poros, da umidade e da temperatura do concreto (HOPE, 2005).

Por meio da Tabela 56 é possível identificar os resultados de resistividades nos concretos nas distintas idades e os coeficientes de variação.

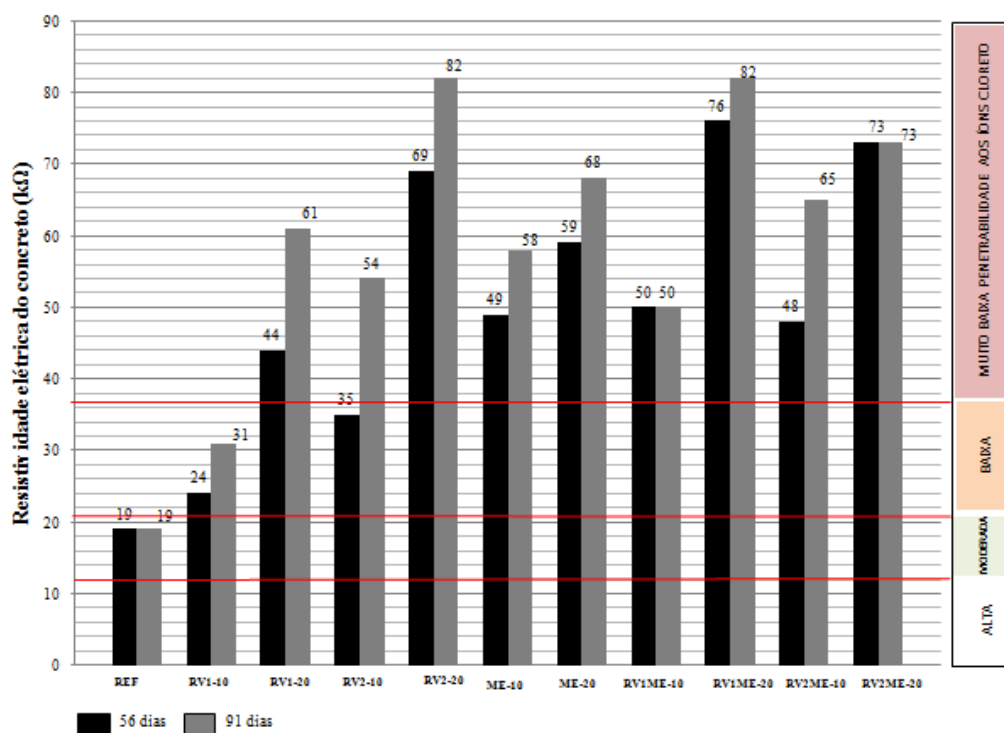
Tabela 56. Resultados médios de resistividade

Concreto	56 dias			91 dias		
	Resist.	σ	CV	Resist.	σ	CV
REF	19,00	0,58	3,04%	19,00	1,53	8,04%
RV1-10	24,00	0,00	0,00%	31,00	1,53	4,93%
RV1-20	44,00	1,73	3,94%	61,00	5,66	9,27%
RV2-10	35,00	1,15	3,30%	54,00	4,95	9,17%
RV2-20	69,00	6,43	9,32%	82,00	4,93	6,02%
ME-10	49,00	3,51	7,17%	58,00	0,71	1,22%
ME-20	59,00	1,41	2,40%	68,00	3,00	4,41%
RV1ME-10	50,00	1,73	3,46%	50,00	2,52	5,03%
RV1ME-20	76,00	3,06	4,02%	82,00	4,93	6,02%
RV2ME-10	48,00	3,61	7,51%	65,00	3,61	5,55%
RV2ME-20	73,00	5,57	7,63%	73,00	1,15	1,58%

Fonte: Produção do autor

Observa-se um coeficiente de variação médio de 5,14%, não significativo. É possível verificar os resultados de resistividade no tocante à classificação qualitativa, conforme Figura 170.

Figura 170. Resultados de resistividade nos concretos



Fonte: Produção do autor

Conforme AASHTO TP 95, é possível obter uma classificação entre a resistividade e a penetrabilidade aos íons cloretos, sendo assim, identificam-se concretos com elevada resistividade e muito baixa penetrabilidade de íons cloretos em concretos com resíduo de vidro moído com 20% de substituição. Nota-se que os concretos de referência, classificados como de moderada penetrabilidade aos íons cloretos, obtiveram melhorias com a utilização de resíduo de vidro e metacaulim galgando patamares de baixa e muito baixa penetrabilidade aos íons cloretos. Isto pode ter ocorrido em virtude do mecanismo de preenchimento dos poros do concreto por meio das partículas finas do resíduo de vidro e da formação de C-S-H por meio das reações dos compostos hidratados do cimento (atividade pozolânica). A Tabela de classificação conforme AASHTO TP 95 utilizada para análise encontra-se melhor detalhada na Tabela 57.

Tabela 57. Classificação qualitativa norma AASHTO TP 95

AASHTO TP 95	Classificação
(kohm-cm)	Penetrabilidade aos íons cloretos
<12	Alta
12-21	Moderada
21-37	Baixa
37-254	Muito Baixa
>254	Insignificante

Fonte: AASHTO TP 95 e ASTM C 1202

Pode-se ainda conforme CEB-192 e o boletim europeu COST 509 apud Polder, é possível estimar a probabilidade de corrosão do concreto conforme Tabela 58.

Tabela 58. Tabela de classificação e resistividade conforme CEB-192 e COST 509

Resistividade (k Ω .cm)		Risco de corrosão
CEB-192	COST 509	
< 20	< 100	Desprezível
10-20	50-100	Baixo
-----	10-50	Moderado
5-10	< 10	Alto
< 5	-----	Muito alto

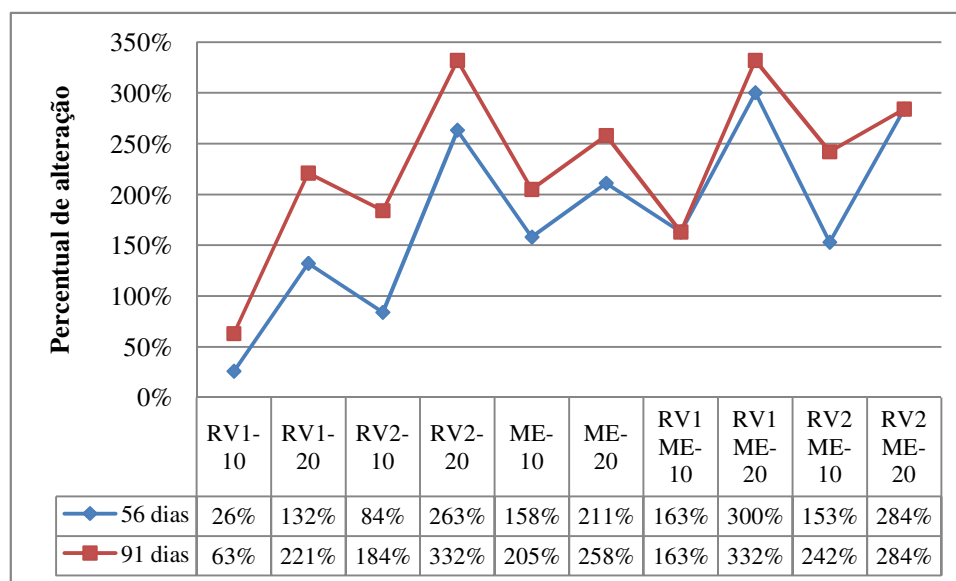
Fonte: CEB-192 e COST 509

Sendo assim, conforme critérios do CEB, todos os concretos apresentaram risco baixo ou desprezível de corrosão. Para os parâmetros do COST 509, concretos com resíduos de vidro e com metacaulim apresentaram moderado e desprezível risco de corrosão (> 50).

Por meio dos resultados de resistividade (Figura 170), torna-se possível constatar que a utilização de resíduo de vidro possibilitou a classificação dos concretos em patamares de baixa e muito baixa penetrabilidade de cloretos. Novamente, destacam-se os concretos com moagem e aqueles sem moagem, porém este último com percentual de substituição de 20%. A utilização de resíduo moído com 20% de substituição ao cimento possibilitou a obtenção de concretos com as maiores resistividades daqueles objetos da pesquisa.

Identificam-se também as alterações em relação ao concreto de referência, conforme Figura 171.

Figura 171. Alteração em relação ao concreto de referência



Fonte: Produção do autor

Nota-se o aumento da resistividade em concretos com resíduo de vidro moído de até 332% em 91 dias de cura, superando os concretos que utilizaram metacaulim. Nota-se que aos 91 dias concretos com resíduos de vidro sem moagem e com 20% de substituição alcançaram 221% de redução, ao passo que o metacaulim com esse mesmo percentual, 258%.

4.2.2.6.1. Análise de variância da resistividade dos concretos em relação aos diferentes tipos de concretos

A análise de variância da resistividade dos concretos está apresentada na Tabela 59. Adotou-se um nível de confiança de 95% e um nível de significância de 5%.

Tabela 59. Análise da variância do efeito dos fatores controláveis na resistividade

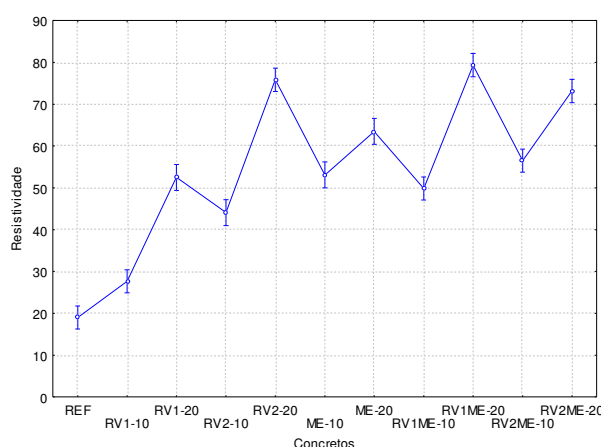
Fatores	SQ	GL	MQ	Fcal	p-valor	Resultado
Concretos	20366,6	10	2036,7	195,56	0,000000	Significativo
Idade	1101,2	1	1101,2	105,74	0,000000	Significativo
Concreto - idade	699,0	10	69,9	6,71	0,000006	Significativo
Erro	406,2	39	10,4			

Fonte: Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004)

Visando também investigar se determinada variável, idade ou tipo de concreto, teve influência sobre a resistividade avaliou-se o p-valor fornecido por meio de análise de variância. A partir da Tabela 63, verifica-se que os resultados entre os concretos apresentaram diferenças significativas quer sejam nos grupos (diferentes concretos ao longo das distintas idades) quer sejam entre grupos (entre um tipo de concreto e outro). Assim, as variáveis concreto e idade foram consideradas como tendo influência sobre a resistividade do concreto.

A fim de verificar a influência de cada variável na resistividade serão realizadas análises gráficas específicas tais como a Figura 172 que representa o efeito isolado do tipo de concreto sobre a resistividade.

Figura 172. Efeito isolado do tipo de concreto sobre a resistividade

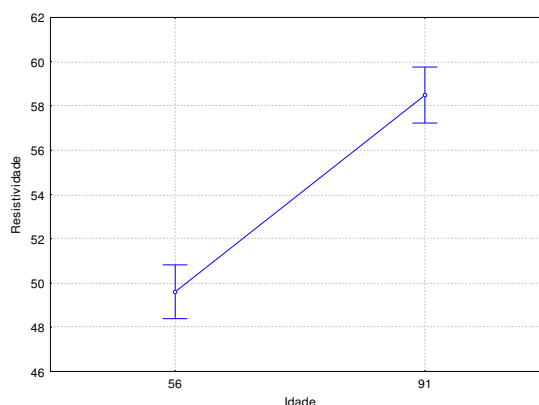


Fonte: Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004)

Por meio do gráfico é possível identificar que a utilização do resíduo provocou aumento da resistividade e melhora na resistência à penetração de cloretos. Os concretos com 20% de resíduo moído e 10% de metacaulim com 10% de resíduo sem moagem obtiveram os maiores valores de resistividade. Mais uma vez, verifica-se a potencialidade da utilização combinada do resíduo de vidro com metacaulim, alcançando os mais eficientes resultados da pesquisa.

É possível também verificar o efeito isolado da idade nos concretos por meio da Figura 173.

Figura 173. Efeito isolado da idade sobre a resistividade

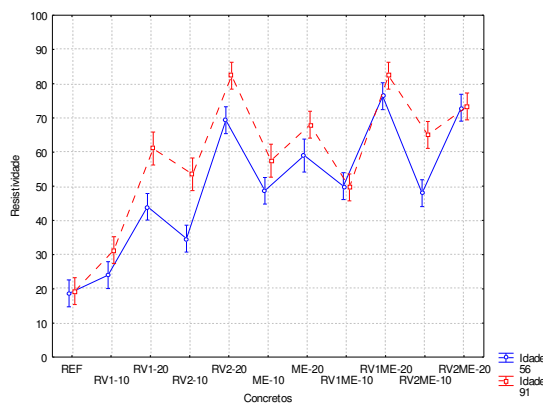


Fonte: Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004)

Verifica-se aumento da resistividade dos concretos com o avanço da idade, que pode ser atribuído ao avanço das reações de retração autógena do concreto (desenvolvimento de sua maturidade), efeito filer das partículas finas do resíduo de vidro sem moagem e atividade pozoalônica do resíduo de vidro com moagem.

É possível também verificar o efeito da interação entre os tipos de concretos e diferentes idades conforme Figura 174.

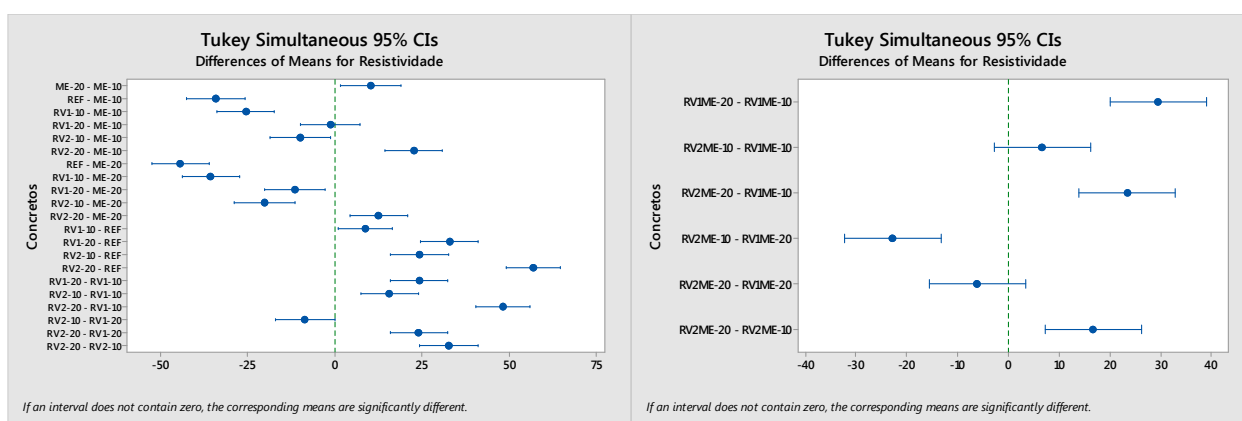
Figura 174. Efeito interação dos tipos de concretos e idade sobre a resistividade



Fonte: Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004)

Por meio da imagem constata-se o aumento da resistividade nos concretos com o avanço da idade. É possível verificar o aumento da resistividade dos concretos em relação ao concreto de referência. A fim de identificar os concretos que apresentaram diferenças em relação aos outros (diferenças entre tratamentos) realizou-se Teste de Tukey, conforme Figura 175.

Figura 175. Teste de Tukey da resistividade de concretos



Fonte: Minitab 17

O Teste de Tukey constatou diferença estatística entre os diversos concretos, constando os benefícios da utilização destes materiais (resíduo de vidro e metacaulim).

4.2.2.6.1. Análise de variância da resistividade dos concretos em relação aos diferentes percentuais de substituição

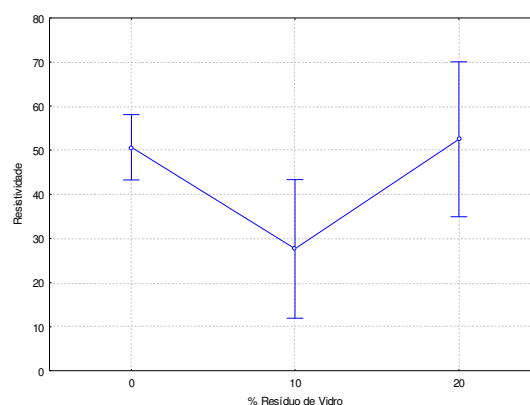
a) Resíduo de vidro sem moagem

A seguir é apresentada análise de variância isolada da utilização de resíduo de vidro sem moagem em relação à resistividade dos concretos.

Tabela 60. Análise da variância do efeito dos fatores controláveis no coeficiente de difusão em regime não estacionário

Fatores	SQ	GL	MQ	Fcal	p-valor	Resultado
% Resíduo de Vidro	2751,82	2	1375,91	3,8545	0,031635	Significativo
Idade	761,16	1	761,16	2,1324	0,153968	Não significativo
% Resíduo de Vidro*Idade	62,86	2	31,43	0,0881	0,915934	Não significativo
Erro	11422,69	32	356,96			

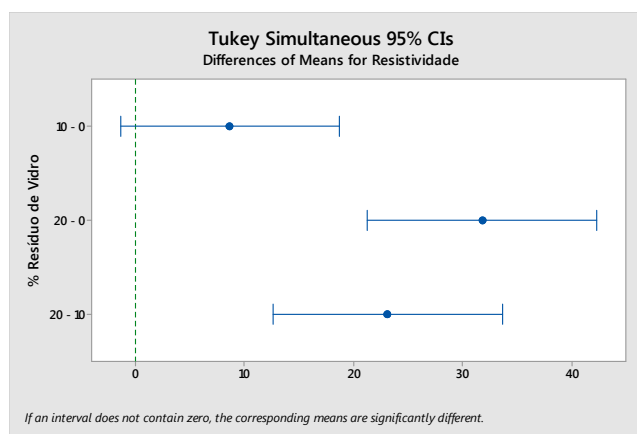
Figura 176. Efeito isolado do percentual de resíduo de vidro sem moagem sobre a resistividade



Fonte: Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004)

Constatou-se aumento da resistividade com a utilização de resíduo de vidro sem moagem no percentual de 20%. A análise do valor-p constatou a significância dos resultados. Realizou-se também Teste de Tukey a fim de verificar a significância entre cada tipo de concreto e melhor entender o comportamento de tendência de redução da resistividade com os concretos com resíduo de vidro sem moagem no percentual de substituição de 10%.

Figura 177. Teste de Tukey da resistividade de concretos



Fonte: Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004)

A partir do Teste de Tukey, verificou-se que a utilização do resíduo de vidro sem moagem com 10% de substituição não promoveu ganhos ou prejuízos aos concretos (contempla o intervalo de zero).

Pôde-se constatar, significância nos resultados referentes aos concretos com 20% de resíduo de vidro sem moagem, este comportamento pode ser explicado em virtude de que com este percentual de utilização foi possível promover com eficiência o mecanismo de preenchimento de poros e resistência ao ingresso aos agentes agressivos, fato que não foi possível com a quantidade de 10% de substituição.

b) Resíduo de vidro moído

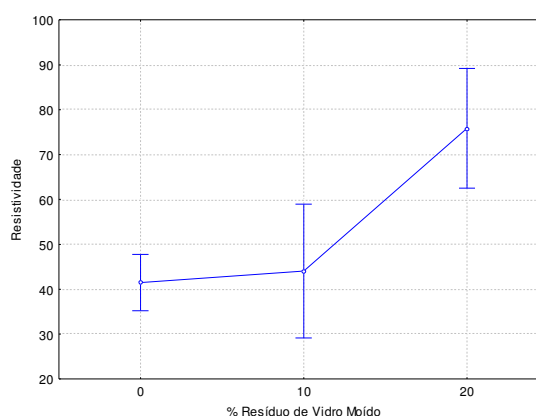
A seguir é apresentada análise de variância isolada da utilização de resíduo de vidro com moagem em relação à resistividade dos concretos.

Tabela 61. Análise da variância do efeito dos fatores controláveis na resistividade do resíduo de vidro moído

Fatores	SQ	GL	MQ	Fcal	p-valor	Resultado
% Resíduo de Vidro Moído	5834,74	2	2917,37	11,3420	0,000189	Significativo
Idade	971,64	1	971,64	3,7775	0,060785	Não significativo
% Resíduo de Vidro Moído*Idade	128,42	2	64,21	0,2496	0,780595	Não significativo
Erro	8231,01	32	257,22			

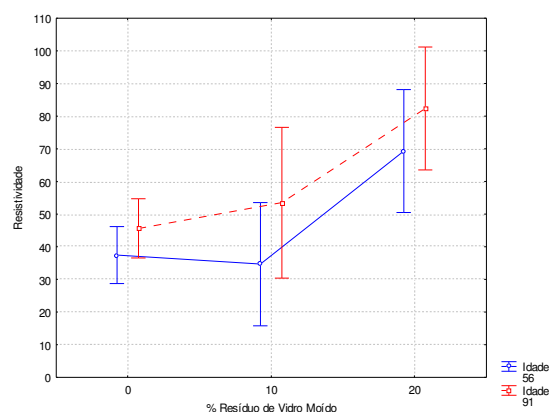
Fonte: Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004)

Figura 178. Efeito isolado do percentual de resíduo de vidro com moagem sobre a resistividade



Fonte: Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004)

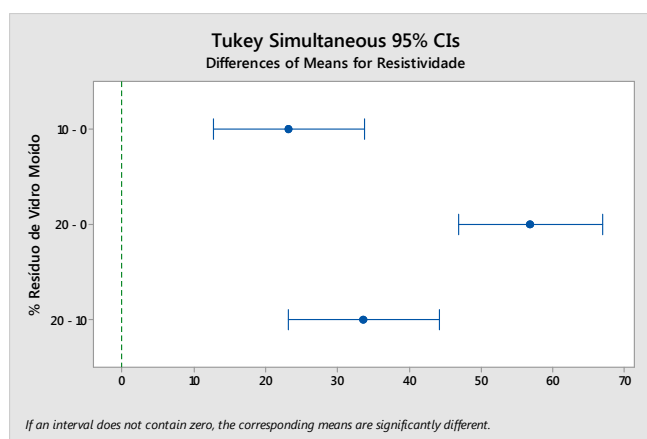
Figura 179. Efeito da interação entre o percentual de resíduo de vidro com moagem e a idade sobre a resistividade



Fonte: Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004)

Constatou-se, por meio da análise da resistividade de concretos com resíduo de vidro moído, aumento da resistividade com o aumento do percentual de substituição, com significância estatística, e elevação da resistividade com o avanço da idade, sem significância estatística. Este fato pode ter ocorrido em função da análise ter sido realizada nas idades de 56 e 91 dias, período que a atuação dos produtos de hidratação do cimento e atividade pozolânicas, comparado ao período de 28 dias a 56 dias tornam-se menos significativos. A fim de avaliar, de maneira específica os resultados, realizou Teste de Tukey que constatou diferenças em relação ao concreto de referência e os concretos com resíduo de vidro moído.

Figura 180. Teste de Tukey da resistividade dos concretos



Fonte: Minitab 17

c) Metacaulim

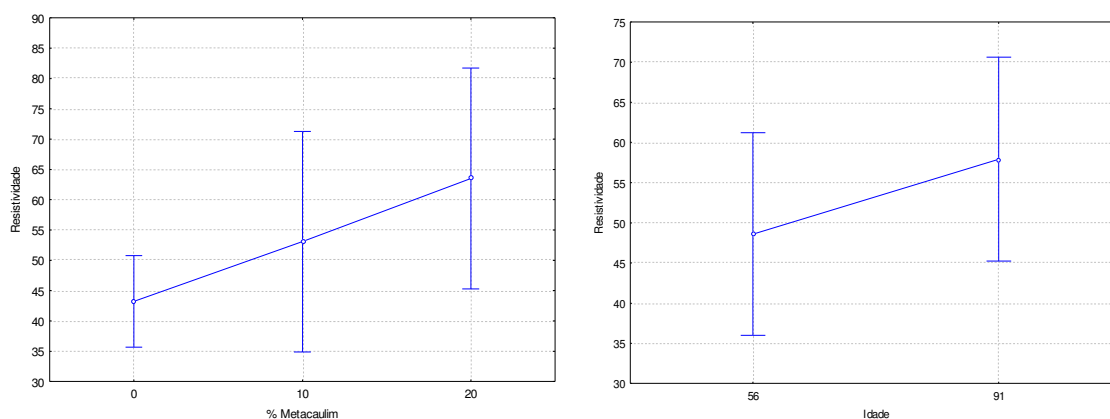
A seguir é apresentada análise de variância específica da utilização de metacaulim em relação à resistividade dos concretos

Tabela 62. Análise da variância do efeito dos fatores controláveis na resistividade dos concretos

Fatores	SQ	GL	MQ	Fcal	p-valor	Resultado
% Metacaulim	1882,10	2	941,05	2,4523	0,102119	Não significativo
Idade	433,33	1	433,33	1,1292	0,295896	Não significativo
% Metacaulim*Idade	2,84	2	1,42	0,0037	0,996307	Não significativo
Erro	12279,67	32	383,74			

Fonte: Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004)

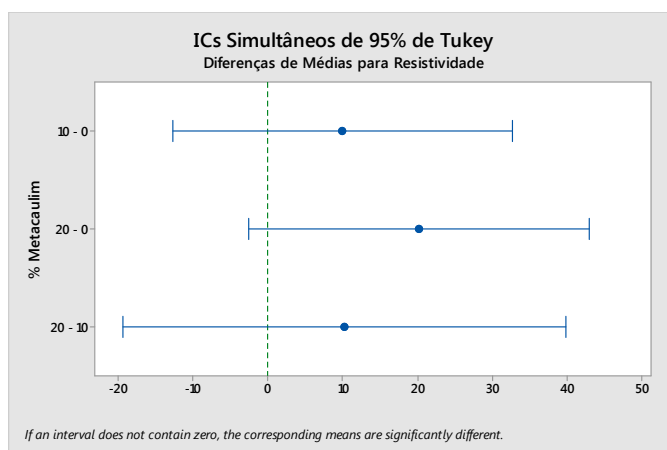
Figura 181. Efeito isolado do percentual de metacaulim e a idade sobre a resistividade (escala)



Fonte: Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004)

Verificou-se aumento da resistividade com a elevação de metacaulim assim como com a elevação da idade de cura. Por meio do Teste de Tukey, constatou-se diferenças entre os concretos que utilizaram metacaulim como substitutos parciais ao cimento.

Figura 182. Teste de Tukey da resistividade de concretos

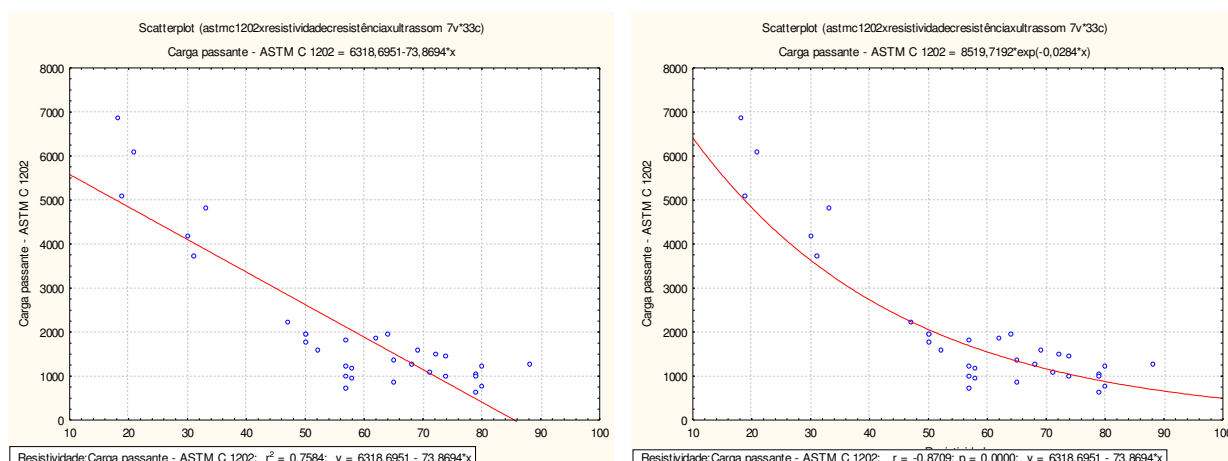


Fonte: Minitab 17

4.2.2.6.2. Análise de regressão dos resultados de resistividade elétrica dos concretos

Tem sido comum a utilização do ensaio de resistividade como medida indireta para se classificar os concretos no que se refere à sua resistência à penetração de cloretos. Para efeito, torna-se necessário, conforme apresentado em Gjørv (2015), realizar uma curva de calibração, ou seja, realizar ensaios de resistividade e de cargas passantes, conforme ASTM C 1202 e realizar a análise de regressão com medidas paralelas de cargas passantes e difusividade. Assim, torna-se possível prever a classificação da resistência à penetração de cloretos de concretos por meio de um ensaio bem mais simples e rápido do que o previsto em ASTM C 1202, o ensaio de resistividade. Neste contexto, foi possível constatar uma relação próxima entre os resultados do ensaio de resistividade e de penetração de cloretos, conforme ASTM C 1202 (ASTM, 2012), representado na Figura 183.

Figura 183. Análise de regressão linear simples e estudo de correlação entre resistividade e carga passante



Fonte: Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004)

Tabela 63. Análise de regressão linear simples da resistividade e carga passante

Preditor	Coefficiente	St. Dev. (desvio padrão)	Estatística T	p-valor	Resultado
Constant.	6318,695	456,0525	13,85519	0,000000	Faz parte do modelo
Resistividade	-73,869	7,4873	-9,86597	0,000000	Faz parte do modelo
$R^2 = 76\%$					

Fonte: Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004)

Identifica-se uma aproximação entre os valores de resistividade e de cargas passantes por meio do ensaio de penetração de cloretos (ASTM C 1202) configurando-se um $R^2 = 76\%$ e uma alta correlação entre os resultados com $r = -0,8709$. Considera-se a correlação máxima de 1,00, logo nota-se a força da relação entre estes resultados.

Por meio da equação: $\text{Carga passante} = 6318,695 - 73,869 * \text{resistividade}$ é possível estimar o resultado de uma variável em relação a outra, podendo estimar a carga passante por meio do ensaio de resistividade, procedimento muito mais simples e rápido.

Torna-se possível também, por meio do ensaio de resistividade, obter o coeficiente de difusão de cloretos da mesma forma obtendo os resultados de coeficiente de difusão, executado pelo ensaio NT Build 492 e realizando a curva de calibração conforme mencionado anteriormente. Sendo assim, por meio de análise de regressão, foi possível identificar um $r^2 = 76\%$ e, conforme estudo

de coorelação um $r= 0,87$, identificando a proximidade entre os resultados. É possível que este valor não seja ainda maior em função do número limitado de amostras adotado no ensaio NT Build 492.

Nota-se que se compararmos os resultados de carga passante referentes ao ensaio de penetração de cloretos, conforme a norma ASTM C 1202 (ASTM, 2012) com os ensaios de resistividade, resistência e velocidade de propagação de onda ultrassônica o único ensaio que os resultados apresentaram relação são os de resistividade com de penetração de cloretos, conforme Tabela 64.

Tabela 64. Análise de regressão linear múltipla da resistividade, resistência e velocidade e propagação de onda – $y=$ penetração de cloretos

Preditor	Coefficiente	St. Dev. (desvio padrão)	Estatística T	p-valor	Resultado
Constant.	18515,84	11088,76	1,66979	0,105723	Não faz parte do modelo
Resistividade	-72,84	7,86	-9,26272	0,000000	Faz parte do modelo
Resistência	-56,43	51,51	-1,09553	0,282301	Não faz parte do modelo
Velocidade de propagação de onda	-2,12	2,25	-0,93991	0,355028	Não faz parte do modelo
$R^2= 77\%$					

Fonte: Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004)

É possível também verificar as correlações entre os resultados dos diferentes ensaios verificando uma alta correlação entre os ensaios de penetração de cloretos e resistividade.

Tabela 65. Correlações entre diferentes ensaios

Variável	Resistividade	Resistência	Velocidade de propagação de onda	Carga passante – ASTM C 1202
Resistividade	1,00000	0,267858	-0,177469	-0,870890
Resistência	0,267858	1,000000	-0,217424	-0,313717
Velocidade de propagação de onda	-0,177469	-0,217424	1,000000	0,088651
Carga passante – ASTM C 1202	-0,870890	-0,313717	0,088651	1,000000

Fonte: Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004)

4.2.2.7. Ensaio de ultrassom

O ensaio de ultrassom foi realizado conforme a norma NBR 8802 (ABNT, 2013), Concreto endurecido – Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Foram adotadas três amostras de cada mistura para cada idade de cura. As idades adotadas foram de 56 e 91 dias. Por meio da Tabela 66 é possível identificar os resultados de ultrassom nas distintas idades e os coeficientes de variação.

Tabela 66. Resultados médios de velocidade de propagação de onda

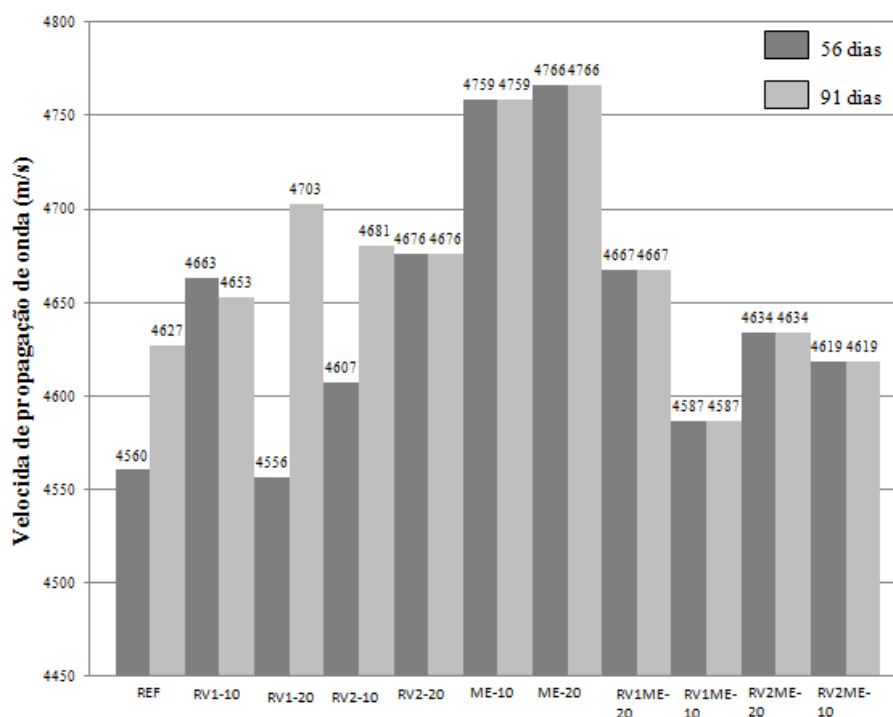
Concreto	56 dias			91 dias		
	Velocidade de propagação de onda	σ	CV	Velocidade de propagação de onda	σ	CV
REF	4560	62,35	1,37%	4627	28,51	0,62%
RV1-10	4663	52,54	1,13%	4653	39,46	0,85%
RV1-20	4556	11,15	0,24%	4703	44,60	0,95%
RV2-10	4607	55,34	1,20%	4681	152,81	3,26%
RV2-20	4676	12,00	0,26%	4641	50,57	1,09%
ME-10	4759	45,98	0,97%	4608	54,96	1,19%
ME-20	4766	45,90	0,96%	4619	58,31	1,26%
RV1ME-10	4667	63,67	1,36%	4635	95,21	2,05%
RV1ME-20	4587	8,14	0,18%	4570	52,41	1,15%
RV2ME-10	4634	57,16	1,23%	4620	69,44	1,50%
RV2ME-20	4619	53,68	1,16%	456	22,62	4,96%

Fonte: Produção do autor

Observa-se um coeficiente de variação médio de 1,32%, valor muito baixo, representando a uniformidade entre os resultados das amostras de cada tratamento (tipos de concretos).

É possível verificar os resultados de velocidade de propagação de onda ultrassônica, conforme Figura 184.

Figura 184. Resultados de velocidade de propagação de onda



Fonte: Produção do autor

A norma EM 12504-4 (2000) propõe uma relação entre a velocidade de propagação de onda e a qualidade do concreto, conforme Tabela 67.

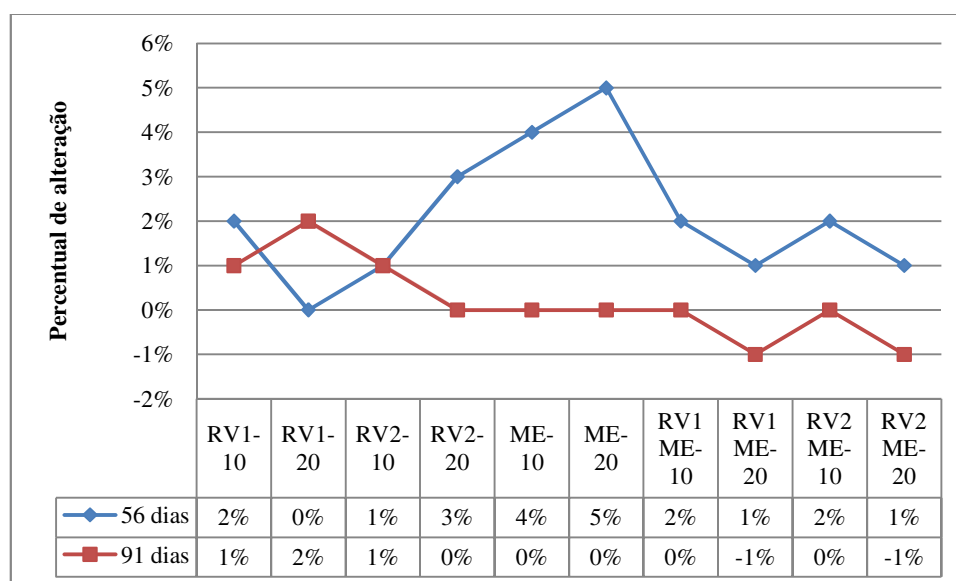
Tabela 67. Relação entre a velocidade de propagação e a qualidade do concreto

Relação entre a velocidade de propagação e a qualidade do concreto (BS EN12504-4:2000)	
Velocidade longitudinal da onda em (m/s)	Qualidade do concreto
$V < 2.000$	Muito fraca
$2.000 < V < 3.000$	Fraca
$3.000 < V < 3.500$	Média
$3.500 < V < 4.000$	Boa
$4.000 < V < 4.500$	Muito boa
$V > 4.500$	Excelente

Fonte: BS EM 12504-4 (2000)

Nota-se por meio de interpretação de possível estimativa da qualidade do concreto com a velocidade de propagação de onda, apresentada pela norma BR EN12504-4 (2000), que todos os concretos estão classificados com a velocidade maior que 4,5 km/s, considerados como de qualidade excelente. Identifica-se também, conforme Figura 185, as diferenças percentuais em relação ao concreto de referência.

Figura 185. Alteração em relação ao concreto de referência



Fonte: Produção do autor

Identifica-se, por meio da Figura 185, maiores velocidades de propagação de onda ultrassônica nos concretos contendo metacaulim, destacam-se também os concretos contendo resíduo de vidro moído com 10% e 20% de substituição ao cimento em relação ao concreto de referência. Nota-se assim, que a utilização do resíduo de vidro moído possibilitou a elevação da velocidade de propagação de onda. A utilização de metacaulim proporcionou ganhos ainda mais significativos. Este comportamento pode ter ocorrido em função da maior reatividade das partículas de metacaulim em relação às partículas de resíduo de vidro, em função de sua área específica superior e menores dimensões de partículas.

4.2.2.7.1. Análise de variância da velocidade de propagação de onda ultrassônica em relação aos diferentes concretos

A análise de variância da resistência à penetração de cloretos o dos concretos está apresentada na Tabela 68. Adotou-se um nível de confiança de 95% e um nível de significância de 5%.

Tabela 68. Análise da variância do efeito dos fatores controláveis na velocidade de propagação de onda

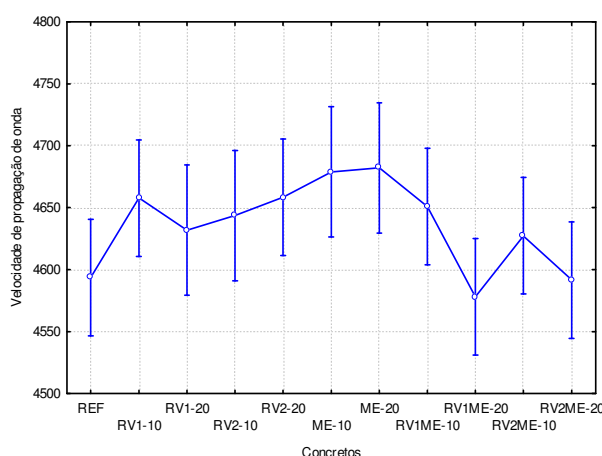
Fatores	SQ	GL	MQ	Fcal	p-valor	Resultado
Concretos	8,369728E+04	10	8,369728E+03	2,7	0,011557	Significativo
Idade	3,885233E+03	1	3,885233E+03	1,3	0,269057	Não significativo
Concreto - idade	1,153566E+05	10	1,153566E+04	3,7	0,001188	Significativo
Erro	1,332548E+05	43	3,098948E+03			

Fonte: Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004)

Visando também investigar se determinada variável, idade ou tipo de concreto, teve influência sobre a velocidade de propagação de onda ultrassônica avaliou-se o p-valor fornecido por meio de análise de variância. A partir da Tabela 68 verificam-se por meio dos resultados entre os concretos que há diferenças significativas quer sejam nos tratamentos (diferentes concretos ao longo das distintas idades) quer sejam entre tratamentos (entre um tipo de concreto e outro). Entretanto, ao avaliarmos a interação entre os tipos de concretos e o ganho em relação à idade nota-se que não há significância. Este comportamento pode ter ocorrido em função de que, conforme já demonstrado nos ensaios anteriores, o ganho de desempenho de 56 dias para 91 dias não é tão significativo quanto de 28 dias para 56 dias, por exemplo.

A fim de verificar a influência de cada variável na velocidade de propagação de onda dos concretos foram realizadas análises gráficas específicas tais como identificado na Figura 186 que representa o efeito isolado do tipo de concreto sobre a velocidade de propagação de onda.

Figura 186. Efeito isolado do tipo de concreto sobre a velocidade de propagação de onda



Fonte: Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004)

Por meio do gráfico é possível identificar que a utilização do resíduo de vidro proporcionou uma melhora na velocidade de propagação de onda. A análise de variância isolada em relação à idade verificou uma pequena redução da velocidade de propagação de onda ultrassônica, entretanto conforme é verificado no valor $p=0,26906$, este valor não é significativo podendo considerar como iguais e que não houve variação.

4.2.2.7.1. Análise de variância da velocidade de propagação de onda ultrassônica em relação aos diferentes percentuais de substituição

a) Resíduo de vidro sem moagem

A seguir é apresentada análise de variância isolada da utilização de resíduo de vidro sem moagem em relação à velocidade de propagação de onda.

Tabela 69. Análise da variância do efeito dos fatores controláveis na velocidade de propagação de onda.

Fatores	SQ	GL	MQ	Fcal	p-valor	Resultado
% Resíduo de Vidro	1818	2	909	0,18	0,839673	Não significativo
Idade	7299	1	7299	1,41	0,243633	Não significativo
% Resíduo de Vidro*Idade	33986	2	16993	3,29	0,050394	Não significativo
Erro	165529	32	5173			

Fonte: Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004)

Nota-se por meio da análise que a utilização de resíduo de vidro sem moagem não promoveu prejuízos aos concretos pela ótica da velocidade de propagação de onda. Considerando todos os concretos como sem distinção.

b) Resíduo de Vidro Moído

A seguir é apresentada análise de variância específica da utilização de resíduo de vidro sem moagem em relação à velocidade de propagação de onda.

Tabela 70. Análise da variância do efeito dos fatores controláveis na velocidade de propagação de onda

Fatores	SQ	GL	MQ	Fcal	p-valor	Resultado
% Resíduo de Vidro Moído	967	2	483	0,08	0,923713	Não significativo
Idade	463	1	463	0,08	0,784336	Não significativo
% Resíduo de Vidro Moído*Idade	9062	2	4531	0,75	0,482395	Não significativo
Erro	194399	32	6075			

Fonte: Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004)

Nota-se por meio da análise que a utilização de resíduo de vidro com moagem não promoveu prejuízos aos concretos pela ótica da velocidade de propagação de onda. Considerando todos os concretos como sem ditinção.

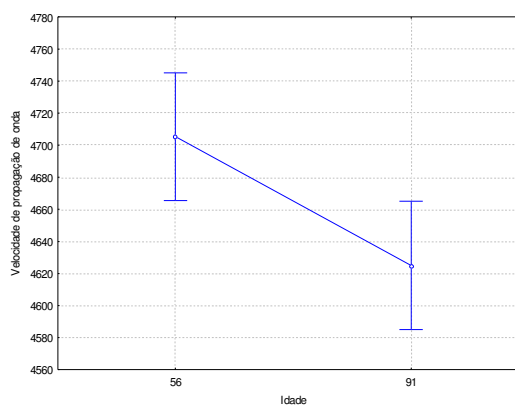
c) Metacaulim

A seguir é apresentada análise de variância específica da utilização de resíduo de vidro sem moagem em relação à velocidade de propagação de onda.

Tabela 71. Análise da variância do efeito dos fatores controláveis na velocidade de propagação de onda

Fatores	SQ	GL	MQ	Fcal	p-valor	Resultado
% Resíduo de Vidro Moído	15111	2	7555	2,0	0,155076	Não significativo
Idade	32064	1	32064	8,4	0,006755	Significativo
% Resíduo de Vidro Moído*Idade	63159	2	31579	8,3	0,001279	Significativo
Erro	122307	32	3822			

Figura 187. Efeito isolado da idade sobre a velocidade de propagação de onda



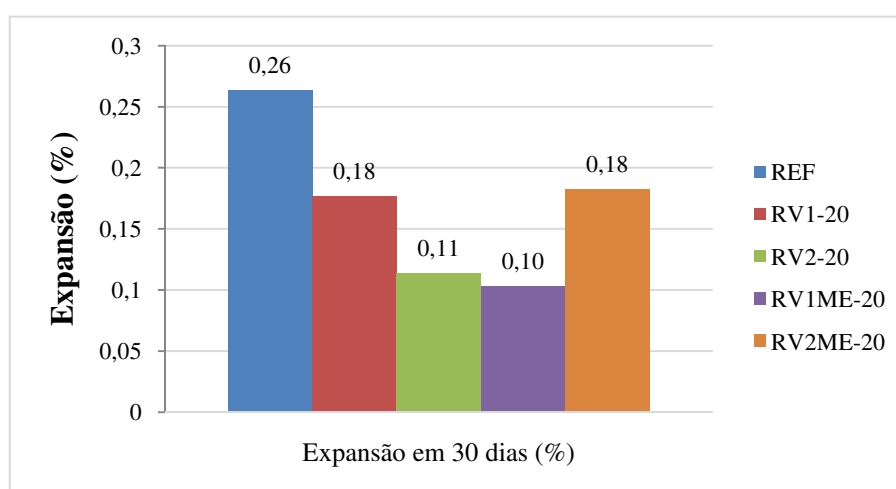
Nota-se por meio da análise que a utilização de metacaulim não promoveu prejuízos aos concretos pela ótica da velocidade de propagação de onda. Considerando todos os concretos como sem distinção. Entretanto, notou-se diferenças com relação ao avanço da idade de cura, este comportamento pode ter ocorrido em função da atividade pozolânica do metacaulim.

4.2.2.8. Reação por expansão álcali-sílica

O ensaio de reação álcali sílica visa verificar se a quantidade de álcalis apontada pelo ensaio de composição química pode ocasionar reação de expansão por álcali-sílica no concreto e ainda se a redução das dimensões das partículas de resíduo de vidro e a utilização combinada com outras pozolâneas pode representar redução da suscetibilidade à reação álcali-sílica.

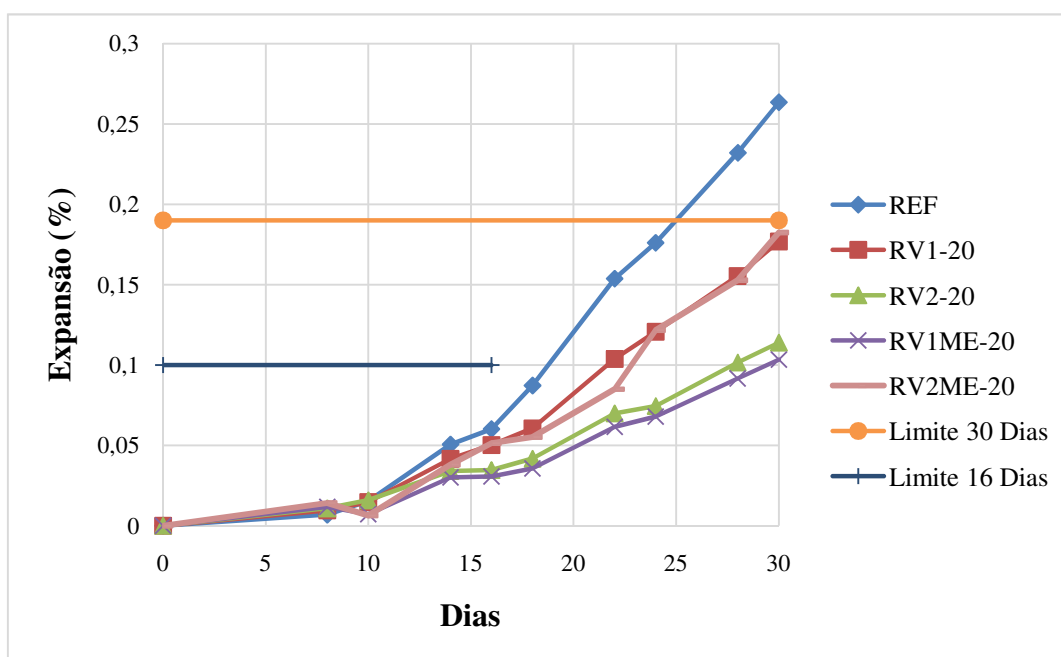
O ensaio foi realizado conforme a norma NBR 15577-4 (ABNT, 2008) Agregados - Reatividade álcali-agregado, Parte 4: Determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado. Utilizaram-se 3 barras de argamassa para cada mistura. Foram consideradas as misturas do concreto de referência (REF), resíduo de vidro sem moagem com o percentual de 20% (RV1-20), resíduo de vidro com moagem com o percentual de 20% (RV2-20), resíduo de vidro sem moagem com o percentual de 10% e metacaulim com 10% (RV1ME-20) e resíduo de vidro com moagem com o percentual de 10% e metacaulim com 10% (RV2ME-20). Os resultados da expansibilidade das barras imersas por período de 30 dias podem ser verificados nas Figuras 188 e 189.

Figura 188. Resultados de expansão por reação álcali-sílica



Fonte: Produção do autor

Figura 189. Resultados de expansão por reação álcali-sílica



Fonte: Produção do autor

Conforme mencionado anteriormente, a determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado, prescrita na NBR 15577 (ABNT, 2008), seguem os mesmos parâmetros da ASTM C 1260 (ABNT, 2005) com pequenas adequações. A classificação do agregado quanto à potencialidade reativa é feita considerando-se um limite de expansão de 0,19% em 30 dias. Para resultados inferiores a 0,19% aos 30 dias o agregado poderá ser considerado potencialmente inócuo e superiores reativo.

Nota-se que apesar do resíduo de vidro apresentar quantidade de álcalis superiores aos requisitos para materiais pozolânicos, não há elevação da expansão por reação álcali-sílica. Ao contrário do que se esperava, houve uma redução nos valores principalmente com a utilização de resíduo moído. Este comportamento corrobora com o constatado em Matos e Coutinho (2012) e Hwee e Hongjjian (2013) que em função da dimensão da partícula do resíduo de vidro poderá ocorrer a mitigação da reação álcali-sílica em concretos.

Ressalta-se também que a utilização do resíduo de vidro sem moagem, em percentual de 10%, combinada com o metacaulim, também no percentual de 10%, favoreceu a redução do potencial expansivo pelo efeito de reação álcali-silica, corroborando com a literatura a respeito dos

benefícios da utilização conjunta de resíduos de vidro e outros materiais cimentícios suplementares.

4.2.2.9. Comparação dos resultados obtidos dos concretos no estado endurecido

Por meio dos resultados, constatou-se que concretos com resíduos de vidro, quando moídos em dimensões de partículas adequadas, podem apresentar ganhos em suas propriedades mecânicas em idades tardias de cura e de durabilidade e ainda mitigar processos expansivos por reação álcali-sílica.

Verificou-se que o resíduo de vidro sem moagem apresentou ganhos em resistência à penetração de cloretos com a utilização de percentual de 20%, entretanto, com o percentual de 10%, os resultados são poucos expressivos. O percentual de 20% de resíduo sem moagem proporcionou uma perda de resistência tanto aos 28 dias quanto aos 91 dias de cura. Logo, o mecanismo de preenchimento de poros dos concretos com resíduo de vidro sem moagem foi eficiente para favorecer a resistência à penetração de cloretos, entretanto para a manutenção da resistência este percentual não conseguiu compensar a propriedades de ganhos de resistência que a presença deste percentual de utilização do cimento acarretaria.

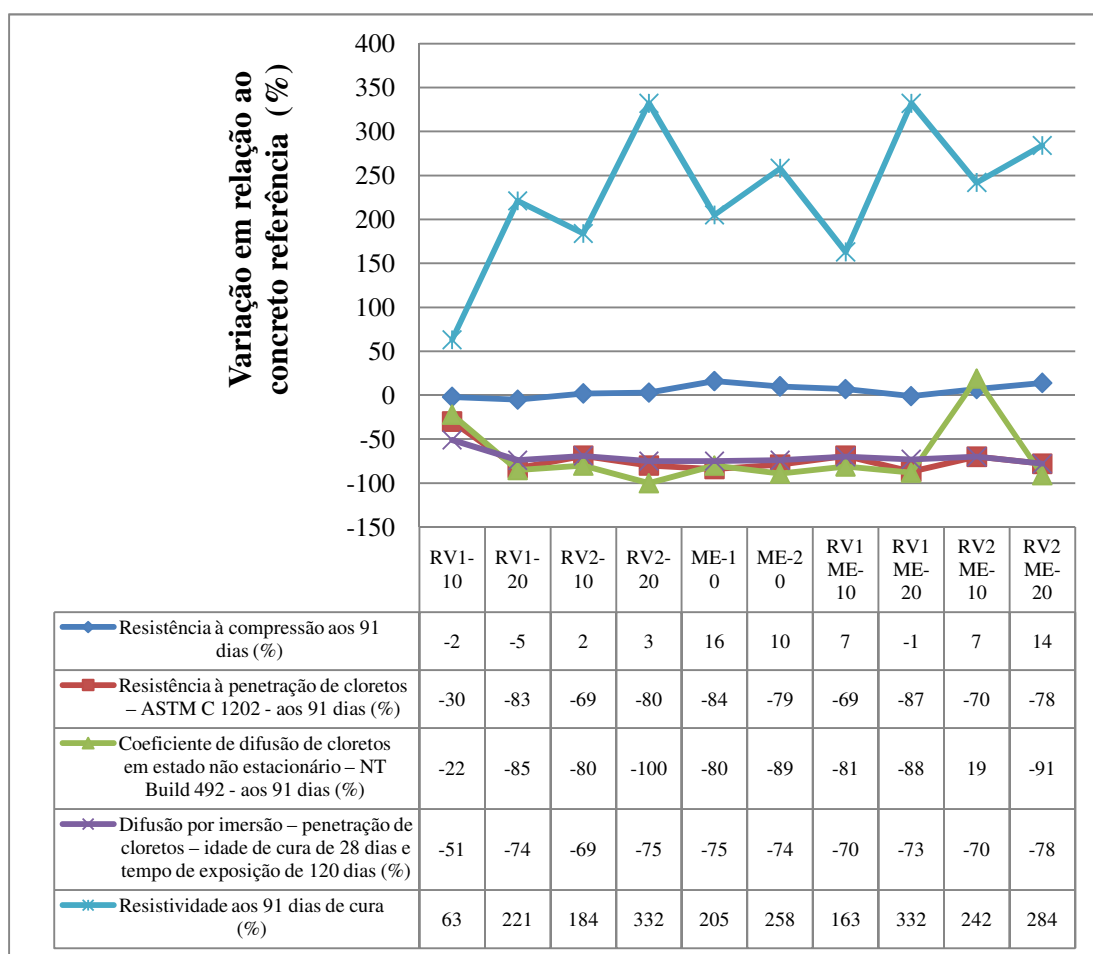
O concreto com 20% de resíduo moído apresentou, além de ganhos de durabilidade equivalência de resistência aos 91 dias com o concreto de referência, isto pode ter ocorrido em virtude das reações pozolânicas deste material em idades tardias de cura. Conforme Tabela 762 e Figura 190, é possível verificar a variação em relação ao concreto de referência em diversos ensaios.

Tabela 72. Alteração em relação ao concreto referência

Concretos	Variação em relação ao concreto de referência				
	Resistência à compressão aos 91 dias (%)	Resistência à penetração de cloretos – ASTM C 1202 - aos 91 dias (%)	Coefficiente de difusão de cloretos em estado não estacionário – NT Build 492 - aos 91 dias (%)	Difusão por imersão – penetração de cloretos – idade de cura de 28 dias e tempo de exposição de 120 dias (%)	Resistividade aos 91 dias de cura (%)
RV1-10	-2	-30	-22	-51	63
RV1-20	-5	-83	-85	-74	221
RV2-10	2	-69	-80	-69	184
RV2-20	3	-80	-100	-75	332
ME-10	16	-84	-80	-75	205
ME-20	10	-79	-89	-74	258
RV1ME-10	7	-69	-81	-70	163
RV1ME-20	-1	-87	-88	-73	332
RV2ME-10	7	-70	-81	-70	242
RV2ME-20	14	-78	-91	-78	284

Fonte: Produção do autor

Figura 190. Alteração em relação ao concreto de referência



Fonte: Produção do autor

Ao serem analisados os resultados da variação dos concretos com resíduos de vidro e metacaulim em relação aos concretos de referência, verificou-se uma menor variação nos resultados de resistência à compressão aos 91 dias. Os ensaios de difusão por imersão e de migração, conforme NT BUILD 492, apresentaram equivalência nas variações, podendo-se constatar que apesar de apresentarem procedimentos distintos, difusão e utilização de corrente elétrica, a tendência de comportamento foi equivalente, demonstrando que a alcalinidade dos resíduos de vidro não foram capazes de alterar de modo significativo a condutividade das amostras, interferindo nos resultados que se utilizam de diferença de potencial. Com relação ao ensaio de resistividade, em função das escalas numéricas serem maiores, houve maior destaque em suas variações.

4.2.3. Estimativa de vida útil dos concretos

A fim de estimar a vida útil de projeto (VUP) dos concretos desta pesquisa, realizou-se análise por meio de Leis Fick e utilizando os coeficientes de migração dos ensaios acelerados de migração de cloretos, conforme NT BUILD 492. Adotou-se este ensaio como referência, pois apresentou menores coeficientes de variação em relação ao ensaio UNE 83987.

A vida útil de projeto corresponde ao tempo que os íons cloretos avançam sobre o cobrimento do concreto e alcançam a armadura em concentrações capazes de despассивá-la. Conforme Helene (1993), a concentração de cloretos com possibilidade de favorecer o início da corrosão de armaduras é de 0,4% em relação ao cimento em massa (concentração crítica – Cr). Browne (1980) recomenda também o valor de 0,4% por massa de cimento como teor de cloreto com risco de corrosão possível, conforme Tabela 73.

Tabela 73. Risco de desenvolvimento de corrosão em aço-carbono, dependendo do conteúdo total de cloreto

Teor de cloreto (%)		Risco de corrosão
Por massa do cimento	Por massa do concreto ^a	
> 2,0	> 0,36	Certo
1,0-2,0	0,18-0,36	Provável
0,4-1,0	0,07-0,18	Possível
< 0,4	< 0,07	Desprezível

^a Com base em 440 kg/m³ de cimento

Fonte: Browne (1980)

O valor de 0,4% também foi adotado em função do contemplado como limite máximo de cloretos em concreto armado orientado em fib (CEB-FIP) (The International Federation for Structural Concrete) e valor médio entre as normas ABNT NBR 6118:2014, 0,50%, e americana ACI-318, 0,30%. Além de despontar como a mdiana dos valores recomendados na NBR 12655 (ABNT, 2015).

A fim de adotar o modelo da equação é necessário também definir a concentração superficial (Cs) e, para efeito, são considerados 0,9% e 1,8%. O primeiro trata-se de percentual recomendado por Helene (1993) como referencial ou orientativo para concretos com relação água/cimento de 0,48 a 0,68, consumo de cimento de 280 a 400kg/m³, submetidos à névoa salina. O segundo foi recomendado por Medeiros (2008) e situa-se na média de outros

percentuais recomendados por Helene (1993), cujo valor é de 0,9%, e de Guimarães (2000), no qual o valor adotado é de 3,0% de cloretos na superfície de uma estrutura real com 22 anos de idade e submetida a um ambiente contendo névoa salina.

Este trabalho considerou, o percentual de 0,9% para uma estrutura localizada a 800 metros do mar e o de 1,8% para estruturas submetidas a respingos de maré.

É importante ressaltar que a vida útil de projeto (VUP), conforme a Norma NBR 15575 (ABNT, 2013), denominada Norma de Desempenho, recomenda pra estruturas como fundações, pilares, vigas lajes e outros, paredes estruturais, estruturas periféricas, contenções e arrimos uma vida útil de projeto mínima de ≥ 50 anos, intermediário de ≥ 63 anos e superior de ≥ 75 anos.

Conforme a norma NBR 6118 (ABNT, 2014), que orienta a classificação de agressividade que os elementos estruturais estão expostos e o cobrimento a se adotar, é possível analisar os resultados considerando as premissas de edificação a 800 metros do mar como classe de agressividade III (agressividade forte, ambiente marinho e com risco grande de deterioração). Para a situação de respingos de maré, classe IV, conforme recomendado pela norma (agressividade muito forte e risco de deterioração elevado). Adotaram-se como premissas de análise, elementos de referência vigas e pilares, estes se apresentam normalmente com maior situação de exposição que as lajes e em maior número de ocorrências que elementos estruturais em contato com o solo, que, inclusive, normalmente utilizam sistema adicional de proteção como mantas e membranas impermeabilizantes. Logo, diante das premissas, será enfocada a análise de vida útil nas classes de agressividade III e IV, cobrimentos de 40mm e 50mm, respectivamente, situações onde a exposição à névoa salina é mais intensa.

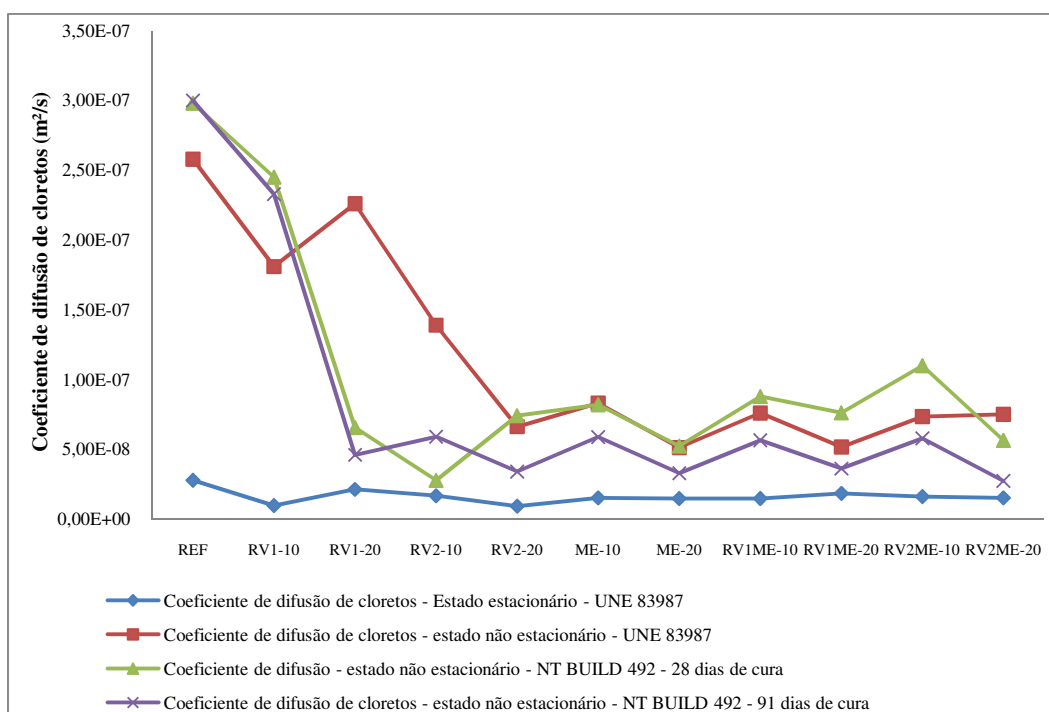
Tabela 74. Cobrimento nominal relacionado com a classe de agressividade

Tipo de estrutura	Componente ou elemento	Classe de agressividade ambiental			
		I	II	III	IV
		Cobrimento nominal (mm)			
Concreto armado	Laje	20	25	35	45
	Viga/pilar	25	30	40	50
	Elementos estruturais em contato com o solo	30		40	50

Fonte: NBR 6118/2014

É importante também salientar que a escolha da utilização dos coeficiente de difusão aos 91 dias, baseado no método NT BUILD 492, decorre do fato de aos 91 dias os concretos já apresentarem período avançado de desenvolvimento de suas propriedades mecânicas e de durabilidade. A utilização do método NT BUILD 492 decorre do fato deste ensaio apresentar menores coeficientes de variação entre as amostras em relação ao método UNE 83987, além de apresentar uma tendência de comportamento próxima ao método UNE 83987 (Figura 191) - considerando que o método UNE 82987 adotou período de cura de 28 dias e duração do teste por volta de 60 dias, logo, o concreto continuava em processo de desenvolvimento de sua maturidade ao longo do teste.

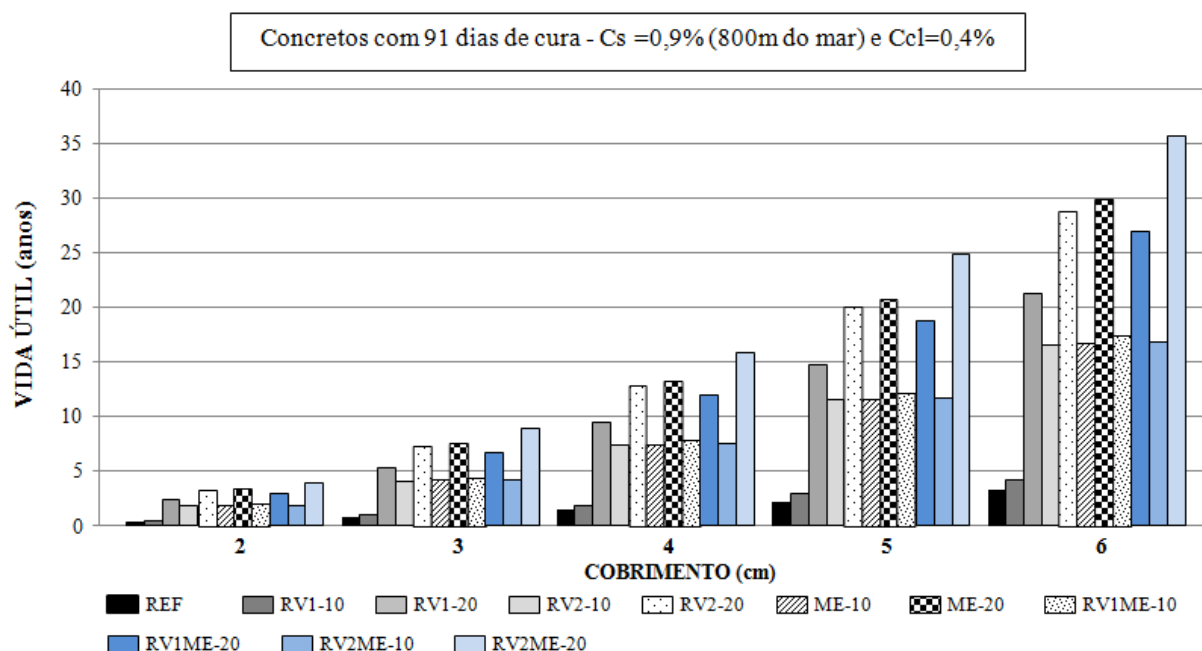
Figura 191. Comparação entre os coeficientes de difusão de cloretos



Fonte: Produção do autor

A Figura 192 apresenta a vida útil de concretos localizados a 800 metros do mar.

Figura 192. Vida útil de projeto de concretos localizados a 800 metros do mar

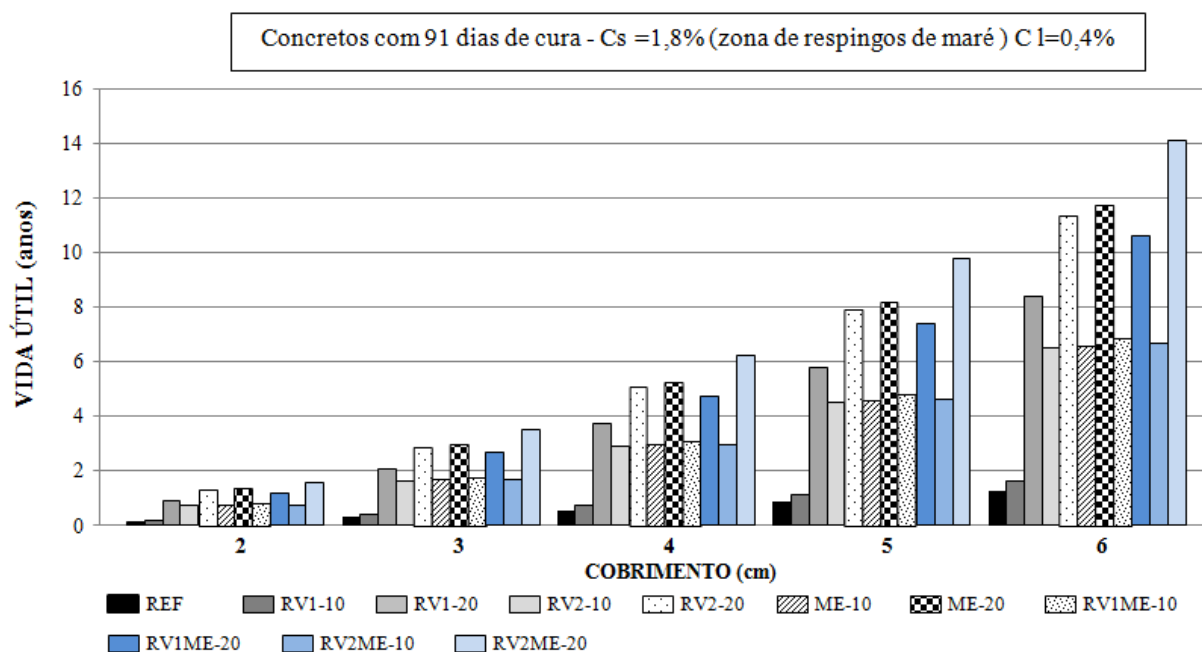


Fonte: produção do autor

Considerando o cobrimento recomendado pela norma para classe de agressividade III e a concentração superficial de cloretos recomendada por Helene de edificação exposta à névoa salina de 0,9 % tem-se com o cobrimento de 4 cm por volta de 1,5 anos até que os íons cloretos atinjam a armadura em concentrações capazes de despassivá-la. Com resíduo de vidro sem moagem com 20% de substituição tem-se em torno de 9,5 anos. Com o resíduo de vidro moído, com 20% de substituição, tem-se mais de 12 anos, correspondendo um aumento de 600% e de 800%, respectivamente. O resíduo de vidro moído apresenta patamares similares aos ganhos da pozolana metacaulim, considerada mundialmente uma pozolana de alta reatividade e com grandes ganhos referentes à resistência ao ingresso de cloretos. Caso seja adotado cobrimento de 5 cm a vida útil de projeto (VUP) de concretos com 20% de resíduo de vidro moído alcança 20 anos. É importante ainda ressaltar que a corrosão da armadura, além da concentração de cloretos dependerá de outros fatores, tais como disponibilidade de oxigênio, diferença de potencial dentre outros e o processo de corrosão, envolve um tempo, considerado por alguns autores por volta de 6 anos.

Torna-se importante também avaliar a vida útil de projeto de concretos submetidos a situações mais agressivas, como zonas de respingos de maré e a análise é apresentada conforme Figura 193.

Figura 193. Vida útil de projeto de concretos submetidos a respingos de maré



Fonte: produção do autor

Apresenta-se como escopo relevante desta pesquisa, o estudo de situações de severa agressividade, pois é importante que os concretos avaliados tenham potencial de resistirem a situações onde os íons cloretos estão presentes de forma intensa e a maior aplicação e aceitação destes concretos investigados tem-se vinculo relevante perante esta análise.

Considerando a zona de respingos de maré e o cobrimento recomendado pela norma de 5cm, tem-se uma VUP por volta de 1 ano para o concreto de referência e 6 anos para o concreto com resíduo de vidro sem moagem com 20% de substituição parcial ao cimento. Para o caso do resíduo de vidro com moagem e 20% de substituição este valor aumenta para 8 anos, correspondendo a uma elevação de vida útil de projeto de 800%. Ao se adotar um cobrimento de 6cm, tem-se em torno de 1,5 ano com o concreto de referência e de até 11,5 anos para o concretos com 20% de substituição do cimento por resíduo moído.

É relevante destacar que com a utilização de metacaulim de alta reatividade nos percentuais próximos ao recomendado pelo fabricante 10% (recomendado pelo fabricante: 8%) tem-se a resistência aos íons cloreto em ambientes de severa agressividade, em concretos com 5 cm de cobrimento, de 4,5 anos e a utilização de resíduo de vidro moído com 20% de utilização é capaz de alcançar maior resistência com quase 8 anos, contemplando quase o dobro do tempo. Constatou-se também que a resistência à compressão com concretos com 20% de resíduo de vidro moído reduziu em apenas 2% aos 28 dias e elevou em 3% aos 56 dias, logo, conforme a análise estatística realizada, a utilização de resíduo moído não apresentou significância estatística que indicaria a redução da resistência à compressão.

Logo, tem-se o aproveitamento do material que seria descartado em aterro ou de outras formas e com ganhos superiores a pozolana de referência visando elevar a resistência aos íons cloreto em concretos. Destaca-se que os custos com a utilização deste material tendem a ser menores que a utilização do metacaulim e o impacto ambiental também, pois a utilização do resíduo envolve apenas a moagem enquanto para a fabricação do metacaulim é necessária a queima, gerando impacto ambiental.

5. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo apresenta as conclusões gerais em relação aos resultados obtidos nos diferentes ensaios referentes à análise das propriedades mecânicas e relacionadas com a durabilidade referentes aos concretos investigados nesta pesquisa.

5.1. Conclusão geral

Por meio da pesquisa, constatou-se que a utilização de resíduo de vidro moído em concretos é justificada com a utilização de até 20% em substituição ao cimento, promovendo ganhos com relação à resistência ao ingresso de cloretos e produzindo efeito mitigador da expansão por reação álcali-sílica. Neste percentual de utilização há perdas de abatimento inferiores à pozolana de referência metacaulim, que podem ser compensadas adotando-se a dosagem de um concreto com maior trabalhabilidade. Destacam-se também, os concretos com resíduo de vidro, com ou sem moagem, com 10% de substituição ao cimento combinado com 10% de utilização de metacaulim, proporcionando redução de 20% do consumo do cimento, pautando-se por uma opção de melhoria em relação aos concretos de referência em todos os parâmetros analisados do concreto endurecido e fornecendo opção sustentável.

5.2. Conclusões específicas

5.2.1. Quanto à caracterização do resíduo do processo de lapidação do vidro

A caracterização física possibilitou concluir que o resíduo da lapidação do vidro sem moagem, contemplando apenas sua secagem, já apresenta dimensões de partículas que atendam aos requisitos para materiais pozolânicos, apresentando material retido com diâmetro maior que 45 µm com quantidade inferior a 20%. Entretanto, com o processo de moagem de 2 horas, foi possível intensificar a redução das partículas do resíduo, afim proporcionar atividade pozolânica a este material.

Os ensaios de atividade pozolânica indicaram que o resíduo de vidro sem moagem não atendeu os requisitos mínimos. Porém, quando moídos atenderam aos requisitos da NBR 12653 (ABNT, 2014).

Com relação aos aspectos químicos, o resíduo de vidro se enquadrou nos requisitos da NBR 12653 (ABNT, 2014) com exceção da quantidade de álcalis disponíveis. Entretanto, este parâmetro, que poderia ser prejudicial ao desempenhos dos concretos, foi avaliado nesta

pesquisa de maneira específica quanto ao seu potencial de expansão por reação álcali-silica, utilizando o método de barras de argamassas.

5.2.2. Conclusões relativas ao concreto no estado fresco

As misturas de concreto com a utilização de resíduo de vidro apresentaram aumento da consistência na medida em que se aumentava a porcentagem de resíduo. As misturas com metacaulim apresentaram o mesmo efeito. Isto se justifica pelas dimensões reduzidas das partículas destes materiais, aumentando os materiais finos e não cimentantes. Entretanto, como o estado da arte já apresentava este aumento de consistência, realizou-se o método de dosagem considerando um concreto de referência com maior abatimento, planejando-se os materiais, quando incorporados à mistura, que produzam um abatimento próximo de 100 ± 10 mm, parâmetro que possa obter trabalhabilidade suficiente para a moldagem os corpos de prova.

Com relação à massa específica, praticamente não houve alteração em relação aos diferentes tipos de concreto. O mencionado fato já era esperado, pois na dosagem dos concretos adotou-se a compensação volumétrica em massa.

5.2.3. Conclusões relativas ao concreto no estado endurecido

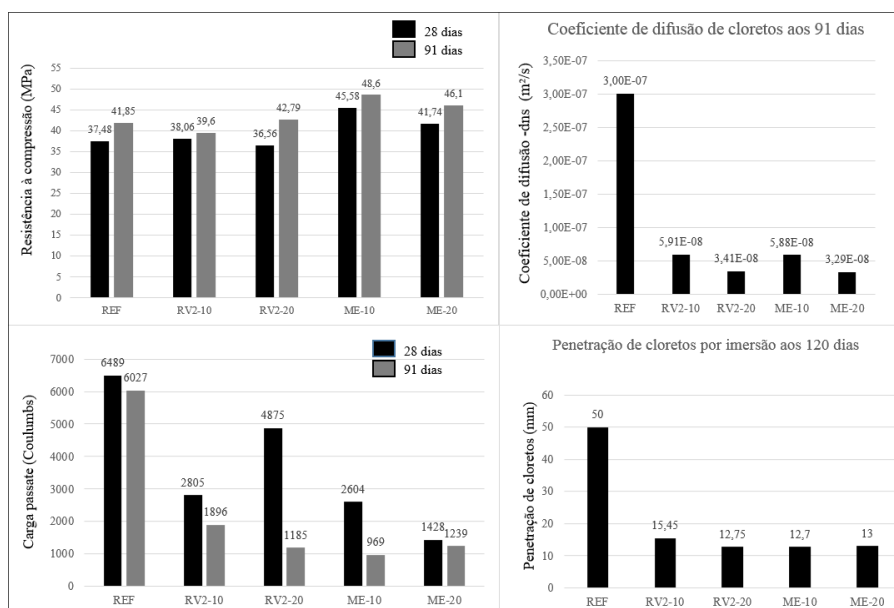
A utilização de resíduo de vidro moído em concretos, nos percentuais desta pesquisa, não proporcionou perda de resistência à compressão com significância estatística e obteve-se ganhos de durabilidade. Houve ganhos com relação à resistência à penetração aos íons cloretos, corroborada tanto por ensaios acelerados de migração de cloretos como de difusão de cloretos.

Percebeu-se que a vida útil dos concretos em ambientes de severa agressividade, como aqueles de respingos de maré, pode ser elevada em até 800%, logo a utilização deste resíduo juntamente com a utilização de cimento com vocação para este fim, como é o caso dos cimentos com alto teor de escória e teores de pozolanas, podem ser alternativas a ser estudadas para estes ambientes.

A utilização combinada de resíduo de vidro moído com 10% de substituição ao cimento e metacaulim, no mesmo percentual de substituição, apresentou ganhos de vida útil e ainda elevou a resistência dos concretos em até 15%. Com relação às situações urbanas com edificações sujeitas à névoa marinha, a utilização do resíduo de vidro moído com 20% de substituição possibilitou uma vida útil de projeto de mais de 12 anos com o cobrimento de 4 cm. Reforça-se que a análise da pesquisa utilizou-se cimento de alta resistência inicial, puro, sem adições,

normalmente em concretos em zonas marinhas utiliza-se cimento com adições, CPIII e CPIV, que tendem a potencializar este efeito ainda mais. A Figura 194 apresenta o efeito da utilização do resíduo moído com 10% e 20% de substituição parcial ao cimento com relação à resistência à compressão, coeficiente de difusão de cloretos, penetração de cloretos (cargas passantes) e penetração de cloretos por difusão por imersão.

Figura 194. Resultados referentes às propriedades mecânicas e de durabilidade



Fonte: Produção do autor

Constata-se assim o benefício da utilização do resíduo de vidro moído com a substituição de até 20% do cimento apresentando conservação da resistência e ganhos frente à resistência ao ataque de cloretos com reduções de 409% em cargas passantes, 292% de penetração de cloretos e 780% de coeficiente de difusão. Soma-se ainda redução da ocorrência de reações álcali-sílica em função das dimensões das partículas de vidro moído em torno de $D_m = 35 \mu m$. A partir dos resultados, é possível sintetizar os ganhos aos 91 dias, conforme Tabela 75.

Tabela 75. Avaliação de desempenho dos concretos

Tipo de pozolana	Percentuais adotados	Resistência à compressão	Penetração de cloretos, resultado de crugas passantes conforme ensaio ASMT C 1202	Coefficiente de difusão em estado não estacionário, conforme UNE	Coefficiente de difusão em estado não estacionário, conforme NT BUILD 492	Penetração de cloretos-Ensaio de difusão por imersão conforme NT BUILD 443	Resistividade	Velocidade de propagação de onda ultrassônica	Expansão por reação álcali-sílica
Resíduo de vidro sem moagem	10%	-	-	-	-	-	↑	↑	*
Resíduo de vidro sem moagem	20%	↓	↓	↓	↓	↓	↑	↑	↓
Resíduo de vidro com moagem	10%	↑	↓	↓	↓	↓	↑	↑	*
Resíduo de vidro com moagem	20%	↑	↓	↓	↓	↓	↑	↑	↓
Metacaulim	10%	↑	↓	↓	↓	↓	↑	↑	*
Metacaulim	20%	↑	↓	↓	↓	↓	↑	↑	*

Fonte: Produção do autor (*= ensaio não realizado)

Conforme Tabela 75, a utilização de resíduo de vidro com moagem apresentou ganhos em todas as propriedades justificando seu uso, inclusive, utilizando-se o percentual de 20%.

Foi constatado que a utilização da dimensão de partícula adotada na pesquisa para o resíduo de vidro moído de $D_m = 35\mu\text{m}$ foi relevante a fim de potencializar uma possível atividade pozolânica e promover ganhos nas propriedades mecânicas e de resistência aos íons cloreto, além de potencializar os ganhos na mitigação da expansão por reação álcali-sílica. A utilização combinada do resíduo de vidro com o metacaulim também promoveu ganhos, inclusive a mitigação da reação álcali-sílica, conforme apresentado no estudo bibliográfico que a combinação do resíduo de vidro com outras pozolanas seria benéfica.

Constatou-se também que a utilização conjunta de metacaulim e resíduo de vidro moído nos percentuais de 10% de metacaulim e 10% de resíduo de vidro pode ser uma alternativa para se obter os mesmos ganhos de resistência à compressão com a utilização de 10% de metacaulim

isoladamente, porém com menor consumo de cimento, promovendo economia e mitigação do impacto ambiental pela utilização do resíduo de vidro e pela redução da produção do cimento e seus impactos ambientais correlatos, tais como utilização de recursos não renováveis e emissão de CO₂.

A análise da vida útil de projeto (VUP), pautada na resistência ao ingresso de íons cloreto, demonstrou que a utilização de resíduo de vidro moído com 20% de substituição ao cimento pode elevar a vida útil de concretos em patamares superiores (próximos a 200%) à utilização de 10% de metacaulim, percentual próximo ao recomendado pelo fabricante. Sabe-se que o metacaulim constitui-se em uma pozolana de conhecido potencial de resistência ao ingresso de íons cloretos, porém a utilização do resíduo de vidro moído em detrimento desta tende a promover ganhos econômicos e comprometimento com o desenvolvimento sustentável.

Por fim, é possível, por meio da Tabela 76, realizar um check-list das constatações apresentadas no estado da arte referentes à utilização de resíduos de vidro em concretos com o identificado nesta pesquisa.

Tabela 76. Verificação constatado na pesquisa e Estado da Arte

Questão identificada no Estado da Arte	Constatado nesta pesquisa
<i>“Após as idades de 56 e 90 dias de cura, resultado de reações pozolânicas, as estruturas de concreto, com a substituição do cimento por vidro em 20%, apresentaram valores mais baixos de penetração de cloretos do que aquelas com os percentuais de 10%.”</i>	Efeito constatado também nesta pesquisa.
<i>“Mesmo com uma condutividade ligeiramente mais elevada, devido à presença de um teor alcalino elevado em pó de vidro, concretos com pó de vidro demonstraram valores inferiores de carga passante comparado com cinzas volantes na mesma reposição.”</i>	Constatado também nesta pesquisa, porém com metacaulim como pozolana de referência.
<i>“Partículas de tamanho de 38 µm foram consideradas perfeitas para a utilização em concretos com atividades pozolânicas ótimas, tamanho maiores foram relatadas como ineficazes.”</i>	A dimensão da partícula média utilizada nesta pesquisa para o resíduo de vidro moído foi de 35 µm, logo próximo a 38 µm e apresentaram promissores resultados.
<i>“Concretos com 10-20% de vidro em substituição ao cimento exibiram uma elevada resistência à penetração de cloretos.”</i>	Constatado nesta pesquisa para o resíduo de vidro sem moagem com 10% de substituição ao cimento e para o resíduo de vidro com moagem com 10% e 20% de substituição.

Questão identificada no Estado da Arte	Constatado nesta pesquisa
<i>“Resíduos de vidro têm potencial de serem utilizados em concretos em substituição a pozolanas tradicionais como a cinza volante e a sílica ativa”</i>	Constatado conforme análise comparativa com o metacaulim. Apesar dos efeitos da pozolanda metacaulim terem sido maiores, principalmente com relação à resistência à compressão, a opção com a relação ao resíduo de vidro, favorece também ganhos de resistência à compressão e de durabilidade e é uma opção mais sustentável.
<i>“Resíduos de vidro, utilizados como substitutos ao cimento, apresentaram valores inferiores de resistência aos 14 dias em relação a concretos de referência. Aos 56 dias, esta tendência inverte-se e a substituição parcial de cimento beneficia a resistência a compressão do concreto.”</i>	Constatado nesta pesquisa. Tendência de melhoria da resistência a partir de 56 dias.
<i>“A utilização combinada de outros materiais cimentícios suplementares, tais como cinzas volantes, escória de alto forno, e metacaulim, podem diminuir a expansão por reação álcali sílica.”</i>	Constatado nesta pesquisa, por meio da utilização conjunta de resíduo de vidro e metacaulim.
<i>“Apesar dos vidros apresentarem um conteúdo alcalino alto o uso de vidro moído como substituto parcial ao cimento na argamassa melhora a resistência à penetração de cloretos (migração) e resistência ao ataque de sulfatos sem comprometer a resistência.”</i>	Constatado nesta pesquisa com relação à resistência à penetração de íons cloreto.
<i>“O nível ótimo de substituição de cimento por pó de vidro é de 10% (propriedades mecânicas e relacionadas com a durabilidade).”</i>	Constataram-se, nesta pesquisa, ganhos em resistência à compressão aos 91 dias e nas propriedades relacionadas à durabilidade, tanto com o percentual de 10% quanto de 20%. Os resultados com de resistência à compressão com a substituição de 10% foram mais expressivos, porém com relação à resistência à penetração de cloretos a substituição de 20% foi mais eficiente.

Fonte: Produção do autor

5.3. Recomendações para pesquisas futuras

No desenvolvimento do trabalho surgiram aspectos que necessitam ser estudados e que, devido às limitações do programa experimental e do tempo disponível, não puderam ser abrangidos. Sendo assim, são apresentadas sugestões para a ampliação e prosseguimento do estudo da incorporação do resíduo do processo de lapidação de vidro em concretos.

- a) Avaliar o desempenho de concretos com resíduos de vidro moído com percentuais de substituição parcial ao cimento superiores a 20%.
- b) Avaliar o desempenho de concretos com resíduos de vidro moído como adição ao concreto.
- c) Avaliar o desempenho de concretos com resíduos de vidro moído e cimentos resistentes a ambientes de severa agressividade, como os cimentos resistentes a sulfatos.
- d) Avaliar o desempenho de concretos com resíduos de vidro em diferentes colorações e diferentes origens, no que tange, principalmente, o potencial de mitigação a expansões por reação álcali-sílica.
- e) Comparar os efeitos da utilização do resíduo de vidro com outros materiais suplementares, tais como outras pozolanas, materiais cimentantes e outros resíduos.
- f) Avaliar a resistência à frente de carbonatação de concretos com resíduos de vidro moídos.
- g) Realizar análise microestrutural de concretos com resíduos de vidro moído.
- h) Avaliar o potencial de redução da partícula média do resíduo de vidro moído abaixo de 35 μ m.
- i) Avaliar o processo de fabricação de cimento composto contendo resíduo de vidro moído, assim como a sua análise econômica.
- j) Análisar o Ciclo de Vida (ACV) a fim de auxiliar no entendimento das práticas de gerenciamento do resíduo de vidro incorporado ao concreto e nos impactos sobre as mudanças climáticas (emissões de gases de efeito estufa). A emissão de gases de efeito estufa deve ser avaliada através de análises do ciclo de vida, incluindo todas as emissões relacionadas ao processo de extração de matéria prima, processo de fabricação do vidro, dentre outros.

REFERÊNCIAS

ABIVIDRO (Associação Técnica Brasileira das Indústrias Automáticas de Vidro). **Índice de Reciclagem do Vidro**. Disponível em: <www.abividro.org.br>. Acessado em: 28 abr. 2016.

ABRELPE (Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais). **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2014**. Disponível em: <http://www.abrelpe.org.br/panorama_apresentacao.cfm>. Acessado em: 03 mai. 2016.

AGOPYAN, V.; JOHN, V. M. **O desafio da sustentabilidade na construção civil**. São Paulo: Editora Edgard Blucher Ltda, 2012.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration: **ASTM C 1202**. Philadelphia, 1992.

ANDRADE, C. **Manual para Diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras**. São Paulo: PINI, 1992.

ANDRADE, J. J. O. **Contribuição da vida útil das estruturas de concreto armado atacadas pela corrosão de armaduras: iniciação por cloretos**. 2001, 256f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

ANDRADE, C.; SANJUAN, M. A. Experimental procedure for the calculation of chloride diffusion coefficients in concrete from migration tests. **Advances in cement research**, v. 6 (23), p. 127-134. 1994.

ANDRADE, C. Calculation of chloride diffusion coefficients in concrete from ionic migration measurements. **Cement and Concrete Research**, v. 23, n. 3, p. 724-742, 1993.

ANDRADE, C.; SANJUAN, M. A.; RECUERO, A.; RIO, O. Calculation of chloride diffusivity in concrete from migration experiments, in non steady-state conditions. **Cement and Concrete Research**, Vol. 24, No. 7, p. 1214-1228, 1994.

ANTÔNIO, A. P. **Potencialidades do aproveitamento do resíduo de estação de tratamento de efluentes do processo de lapidação do vidro sodo - cálcico na produção de concretos.** 2012. 163f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2012.

ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. **NBR 5733:** Cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. **NBR 5739:** Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. **NBR 5751:** Materiais pozolanicos - Determinação de atividade pozolanica com cal aos sete dias. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. **NBR 5752:** Materiais pozolanicos — Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. **NBR 6118:** Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. **NBR 7215:** Cimento Portland - Determinação da resistência a compressão. Rio de Janeiro, 1997.

ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. **NBR 7218:** Agregados – Determinação do teor de argila em torroes e materiais friáveis. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. **NBR 9833**: Concreto fresco - Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. **NBR 11579**: Cimento Portland - Determinação da finura por meio da peneira 75 μm (n° 200) - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. **NBR 12653**: Materiais Pozolânicos - Especificação. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. **NBR 15894-3**: Metacaulim para uso com Cimento Portland em concreto, argamassa e pasta – Determinação da Finura por Meio da Peneira 45 μm . Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. **NBR 16372: 2015**: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da finura pelo método de permeabilidade do ar (método de Blaine). Rio de Janeiro: ABNT, 2015. 11p.

ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. **NBR NM 23**: Cimento Portland - Determinação e massa específica. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. **NBR NM 45**: Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. **NBR NM 46**: Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 μm , por lavagem. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. **NBR NM 49**: Agregado miúdo – Determinação das impurezas orgânicas. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. **NBR NM 52**: Agregado miúdo - Determinação de massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. **NBR NM 53**: Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. **NBR NM 67**: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. **NBR NM 248**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

BJEGOVIC, D.; STIRMER, N.; SERDAR, M. (2010). Ecological Aspects of Concrete. Production. In: Second International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies, Ancona, Italia.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa Brasil. 2. ed. Brasília, 2014.

BRYANT J. J. W.; WEYERS, R. E.; GARZA, J.M. In-place resistivity of bridge deck concrete mixtures. **ACI Material Journal**, v. 106, n. 2, p. 114-122, 2009.

BROOKS, J. J., JOHARI M. M. A. Effects of Metakaolin on creep and shrinkage of concrete. **Cement and Concrete Composites**, Vol. 23, p. 495-502. 2001.

CASCUDO, O. **O controle da corrosão de armaduras em concreto: inspeção e técnicas eletroquímicas**. São Paulo: PINI; Goiânia: UFG, 1997.

CASSAR, J.; CAMILLER, J. Utilization of imploded glass in structural concrete. **Construction and Building Materials**, v. 29, p. 299-307, 2012.

CASTELLOTE, M.; ANDRADE, C.; ALONSO, C. Measurement of the steady and nonsteady-state chloride diffusion coefficients in a migration test by means of monitoring the conductivity in the anolyte chamber - Comparison with natural diffusion tests. **Cement and Concrete Research**. v 31, p. 1411 –1420, 2001

CASTRO, S.; BRITO, J. Evaluation of the durability of concrete made with crushed glass aggregates. **Journal of Cleaner Production**. v. 41, p. 7-14, 2013.

CHEN C.H., WU J.K., YANG C.C. Waste E-glass particles used in cementitious mixtures. **Cement and Concrete Research**, v.36, p. 449–56, 2006.

CHIDIAC, S. D. Waste glass as a supplementary cementitious material in concrete – Critical review of treatment methods. **Cement & Concrete Composites**, v. 31, p. 606-610, 2009.

COMITE EURO-INTERNATIONAL DU BETON. Durable Concrete Structures. Bulletin D'Information n° 183. Suíça, 1992. Florida Method of Test for Concrete Resistivity as an Electrical Indicator of Its Permeability”, (FM5-578) Florida Department of Transportation, 2004.

CYR, M; TRINH, M; HUSSON, B; CASAUX-GINESTET, G. Effect of cement type on metakaolin efficiency. **Cement and Concrete Research**, v. 64, p. 63-72, 2014.

DU, H.; TAN, K. H. Concrete with recycled glass as fine aggregates. **ACI (America Concrete Institute) Material Journal**, v.111, p. 47–58, 2014.

EPA (Environmental Protection Agency). **Available and Emerging Technologies for Reducing Greenhouse Gas Emissions from the Portland Cement Industry**. Washington, 2010.

Florida Method of Test for Concrete Resistivity as an Electrical Indicator of Its Permeability”, (FM5-578) Florida Department of Transportation, 2004.

FREDERICO, L. M.; CHIDIAC, S. E. Waste glass as a supplementary cementitious material in concrete - Critical review of treatment methods. **Cement and Concrete Research**, v. 31, p. 606–610, 2009.

GLEIZE, P. J. P., CYR, M., ESCADEILLAS, G. Effects of Metakaolin on Autogenous Shrinkage of Cements Pastes. **Cement & Concrete Research**, Vol. 29, p. 80-87. 2007.

GJØRV, O. E. Service life of concrete structures and performance-base quality control. In: International Workshop on Innovations in Concrete Materials, Whistler, Canada 2001, pp. 13. 2001.

GRUBER, K. A.; RAMLOCHAN, T.; BODDY, A.; HOOTON R. D.; THOMAS, M. D. A. Increasing concrete durability with high-reactivity metakaolin. **Cement and Concrete Composites**, Vol. 23, pp. 479-84. 2001.

GUIMARÃES, A. T. da C. **Vida útil de estruturas de concreto armado em ambientes marítimos**. 2000. 241 p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2000.

GONÇALVES, A; COUTINHO, A, S. **Fabrico e propriedades do betão**. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 1994.

HELENE, P. R. L. **Corrosão em armaduras para concreto armado**. São Paulo: Pini, 1986.

HELENE, P.; TERZIAN, P. Manual de dosagem e controle do concreto. Pini; Brasília, DF.SENAI, 1992.

HELENE, P. R. L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. São Paulo, 1993. Tese (Livre Docência em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

HELENE, P, R, L; LACERDA, C, S. **Estudo da influência da Substituição de Cimento Portland por Metacaulim em Concretos**. BT/PCC/419.

HELENE, P, L; MEDEIROS, M, H. **Estudo da Influência do MetacaulimHP como adição de alta eficiência em concretos de cimento Portland**. São Paulo. Relatório – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

HENRY, D.; BAROGHEI, V.; CHAUSSADENT, T. Evaluation of chloride penetration into concrete by various methods. Second International RILEM Workshop on Testing and Modelling the Chloride, Vol. 13, p. 471 – 486. 2001.

HISADA, H; NAGATAKI, S; OTSUKI, N. Evaluation of mineral admixtures on the viewpoint of chloride ion migration through mortar. **Cement and Concrete Composites**, Great Britain: Elsevier Science, v. 21, p. 443-448, 1999.

HOPPE, T. **Resistividade elétrica do concreto contendo diferentes teores de cinza de casca de arroz**. Dissertação (Mestrado)- Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

HWEE, K; DU, H. A Use of waste glass as sand in mortar: Part 1 – Fresh, mechanical and durability properties. **Cement & Concrete Composites**, v. 35, p. 109-117, 2013.

HWEE, K; DU, H. Use of waste glass as sand in mortar: Part II –Alkali-silica reaction and mitigation methods. **Cement & Concrete Composites**, v. 35, p. 118-126, 2013.

HUNAG, L.; WANG, H; WANG, S. A study of recycled green building materials in lightweight aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 96, p. 353-359, 2015.

JAIN, A. J.; A.; NEITHALATH, N. Chloride transport in fly ash and glass powder modified concretes – Influence of test methods on microstructure. **Cement and Concrete Composites**, v. 32, p. 148-156, 2010.

JANI, Y.; HOGLAND, W. Waste glass in the production of cement and concrete – A review. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v.2, p. 1767–1775, 2014.

JITENDRA, A; NARAYANAN N. Chloride transport in fly ash and glass powder modified concretes – Influence of test methods on microstructure. **Cement and Concrete Research**, v. 32, p. 148-156, 2010.

KAMALI, M.; GHAHREMANINEZHAD, A. Effect of glass powders on the mechanical and durability properties of cementitious materials. **Construction and Building Materials**, v.98, p. 407-416, 2015.

KHMIRI, A.; SAMET, B.; CHAABOUNI, M. A cross mixture design to optimize the formulation of a ground waste glass blended cement. **Construction and Building Materials**, v. 28, p. 680-686, 2012.

KIM, J; YI, C; ZI, G. Waste glass sludge as partial cement replacement in mortar. **Construction and Building Materials**, v. 75, p. 242-246, 2015.

LACERDA, C. S., HELENE, P. Estudo da influencia da substituição de cimento Portland por metacaulim em concreto. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, BT/PCC/419. 2005.

LI, Z.; DING; Z. Property improvement of Portland cement by incorporating with metakaolin and slag. **Cement & Concrete Research**, Vol. 33, p. 579-84. 2003.

LIMBACHIYA, M. C. Bulk engineering and durability properties of washed glass sand concrete. **Construction and Building Materials**, v. 23, p. 1078-1083, 2009.

LUPING, T.; NILSSON, L. Rapid determination of the chloride diffusivity in concrete by applying an electrical field. **ACI Materials Journal**, v. 89, n.1, p. 49-53. 1992.

LUPING, T.; SORENSEN, H. E. Evaluation of the Rapid Test Methods for Measuring the Chloride Diffusion Coefficients of Concrete. NORDTEST Project N° 1388-98, Swedish National Testing and Research Institute Buildin Technology. 1998.

LUPING, T; SORENSEN, H. E. Precision of the Nordic test methods for measuring the chloride diffusion/migration coefficients of concrete. **Materials and Structures/ Matériaux et Constructions**, vol. 34, p. 479-485. 2001.

LUXAN, M. P.; MADRUGA, F.; SAAVEDRA, J. Rapid evaluation of pozzolanic activity of natural products by conductivity measurement. **Cement and Concrete Research**. v. 19, p. 63-68, 1989.

MATOS, M. A. **Estudo de argamassas com substituição parcial de cimento por resíduos de vidro moídos**. 2010. 157f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2010.

MATOS, A. M.; SOUZA-COUTINHO, J. Durability of mortar using waste glass powder as cement replacement. **Construction and Building Materials**, v. 36, p. 205-215, 2012.

MCCARTER, W. J.; TRAN, D. Monitoring pozzolanic activity by direct activation with calcium hydroxide. **Construction and Building Materials**, v. 10, p. 179-184, 1996.

MCGRATH, P, F; HOOTON, R, D. Re-evaluation of the AASHTO T259 90-day salt ponding test. **Cement and Concrete Research**, v. 29, p. 1239-1248, 1999.

MEDEIROS, M.H.F. **Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos com proteção superficial frente à ação de íons cloretos**. São Paulo: Universidade de São Paulo, Brasil, 2008. (Tese de Doutorado).

MEDEIROS, H, F, M; ANDRADE, J, J, O; HELENE, P, R,L. Durabilidade e Vida Útil das Estruturas de Concreto **Concreto: Ciência e Tecnologia**, IBRACON, 2011.

MEDEIROS, M. H. F. de., et al. Ensaio de migração de cloretos para concreto: influência do número de fatias extraídas. **Revista Escola de Minas**, v. 65, n. 4, p.475-481, 2012.

MEDEIROS, M. H. F., GOBBI, A., Groenwold, J. A., HELENE, P. Previsão de vida útil de concreto armado de alta resistência com adição de metacaulim e sílica ativa em ambientes marinhos. **Revista Escola de Minas**, p. 59-65. 2013.

MEDEIROS M. H. F.; REAL L. V.; RICHTER K.; SOUA W. B.; KLEIN N. B. Ensaio de migração de cloretos em estado estacionário para avaliação de sistemas de Proteção de superfície. **Revista eletrônica de engenharia**. Paraná. v. 8, p 54-63. 2014.

MEHTA, P. K; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais**. São Paulo: Pini, 1994.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto. Microestrutura, propriedades e materiais**. 3 ed. Sao Paulo: PINI, 2008.

MEHTA, P. K.; Monteiro, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**, 2ª Ed., IBRACON, São Paulo, 2014.

MENDES, M, V, A, S. **Avaliação das propriedades de transporte de massa em concreto contendo adições minerais**. Goiânia. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2009.

MEYER, C.; BAXTER, S.; JIN, W. Alkali-silica reaction in concrete with waste glass as aggregate. In: ASCE MATERIALS ENGINEERING CONFERENCE, 1996, Washington. **Anais...** Materials for a new millennium, Washington, Chong KP, p. 1388-1394.

MEYER, C. The greening of the concrete industry. **Cement and Concrete Composite**, v.31, p. 601-605, 2009.

MIAO, L. Incorporating ground glass in self-compacting concrete. **Construction and Building Materials** v. 25, p. 919–25, 2011.

MITTRI, S. H. **Contribuição ao estudo do comportamento de concretos produzidos com resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais tratado termicamente em relação aos aspectos mecânicos e de durabilidade.** 2016. 168f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2016.

MUKESH, C. L. Bulk engineering and durability properties of washed glass sand concrete. **Construction and Building Materials**, v. 23, p. 1078-1083, 2009.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. Tecnologia do concreto. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 448p. 2010.

NAIK, P. **Strength and durability study on recycled aggregate concrete using glass powder.** International Journal of Engineering Trends and Technology, v. 11, number 5, 2014.

NASSAR, R; SOROUSHIAN, P. Strength and durability of recycled aggregate concrete containing milled glass as partial replacement for cement. **Construction and Building Materials**, v. 29, p. 368-377, 2012.

NORDTEST METHOD, Concrete, mortar and a cement-based repair materials: chloride migration coeficiente from non-steady-state migration experiments: **NT BUILD 492.** Oslo, 1999.

NORDTEST METHOD, Concrete, hardened: accelerated chloride penetration, **NT BUILD 443.** Oslo, 1995.

OLIVEIRA, R; BRITO, J; VEIGA, R. Reduction of the cement content in rendering mortars with fine glass Aggregates. **Journal of Cleaner Production**, v. 95, p. 75-88, 2015.

OTSUKI, N; NAGATAKI, S; NAKACHITA, K. Evaluation of AgNO₃ of solution spray Method for measurement of chloride penetration into hardener cementitious matrix materials. **ACI Materials Journal**, v. 89, no 6, 1992.

PAIVA, O. A. **Resíduo industrial de vidro moído em argamassa de cimento Portland**. 2009. 208f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Faculdade de Tecnologia, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2009.

PENA, D. C. **Avaliação da expansibilidade da escória de aciaria LD curada a vapor para a utilização em peças de concreto para a pavimentação**. Dissertação Mestrado UFES. 2004.

PEREIRA-DE-OLIVEIRA, L. A.; CASTRO-GOMES, J. P.; SANTOS, P. M. S. The potential pozzolanic activity of glass and red-clay ceramic waste as cement mortars components. **Construction and Building Materials**, v. 31, p. 197-203, 2012.

RAMEZANIANPOUR, A, A; JOVEIN, H, B. Influence of metakaolin as supplementary cementing material on strength and durability of concretes. **Construction and Building Materials**, v. 30, p. 470-479, 2012.

RASHAD, A. M. Recycled waste glass as fine aggregate replacement in cementitious materials based on Portland cement. **Construction and Building Materials**, v. 72, p. 340-357, 2014.

RIBEIRO, D. V. **Corrosão em Estruturas de Concreto Armado: Teoria, Controle e Métodos de Análise**. São Paulo: Elsevier. 2014.

SABIR, B. B.; WILD, S.; BAI, J. “Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review” **Cement & Concrete Composites**, Vol. 23, p. 441-454. 2001.

SACCANI, A.; BIGNOZZI, M. C. ASR expansion behavior of recycled glass fine aggregates in concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 40, p. 531-536, 2010.

SALES, F. A. **Estudo da atividade pozolânica de micropartículas de vidro soda-cal, incolor e âmbar, e sua influência no desempenho de compostos de cimento Portland**. 2014. 161f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

SAIKIA, N.; KATO, S.; KOJIMA, T. Thermogravimetric investigation on the chloride binding behaviour of MK-lime paste. **Thermochim Acta**, v. 444, p. 16-25, 2006.

SAITO, M.; SHUKUYA M. Energy and material use in the production of insulating glass windows. **Solar Energy**, v. 58, p. 247–252, 1996.

SAUER, A. S. **Estudo do potencial de aplicação do resíduo de vidro laminado em argamassas de recuperação estrutural**. 180 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2013.

SHAO, Y., LEFORT, T., MORAS, S., RODRIGUEZ, D. Studies on concrete containing ground waste glass. **Cement and Concrete Research**, v. 30, p. 91–100, 2000.

SHAYAN, A., XU, A. Performance of glass powder as a pozzolanic material in concrete: a field trial on concrete slabs. **Cement and Concrete Research**, v. 36, p. 457–68, 2006.

SCHNEIDER, J. A. **Penetração de cloretos em concretos com escória de alto forno e ativador químico submetidos a diferentes períodos de cura**. Santa Maria. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

SCHWARZ, N; CAM, H. Influence of fine glass powder on the durability characteristics of concrete and comparison to fly ash. **Construction and Building Materials**, v. 30, p. 486-496, 2008.

SHI, C., WU, Y., SHAO, Y., RIEFLER, C. Alkali-aggregate reaction of mortar bars ground glass powder. In: 12th International Conference On Alkali-Aggregate Reaction In Concrete, 2004, Beijing. **Anais...** Alkali -Aggregate Reaction in Concrete, p. 789-795, 2004.

SHI, C.; WU, Y.; RIEFLER, C.; WANG, H. Characteristics and pozzolanic reactivity of glass powders. **Cement and Concrete Research**, v. 35, p. 987-993, 2005.

SHI, C; ZHENG, K. A review on the use of waste glasses in the production of cement and concrete. **Resources, Conservation & Recycling**, v. 52, p. 234-247, 2007.

SILVA, L, M, A. **Resistividade elétrica superficial do concreto: influência da cura**. Monografia (Graduação)- Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2016.

SILVA, S. H.; LONDERO, C.; MEDEIROS, M. H. F.; PEREIRA, V. C. O.; MONTEIRO, E. C. B. Escolha do tipo de cimento capaz de proteger o concreto quanto à corrosão das armaduras sob ação de íons cloreto através de análise hierárquica, **Revista ALCONPAT**, Volume 5, Número 3, 2015, p. 174 – 189. 2013.

SOUSA, V. C. M. **Patologia, Recuperação e Reforço de Estruturas de Concreto**. São Paulo: PINI, 255 p. 1998.

SOUZA, P. S. L. Verificação da influencia do uso de metacaulim de alta reatividade nas propriedades mecânicas do concreto de alta resistência. 2003.

Standard Method of Test for Resistance of Concrete to Chloride Ion Penetration”, (T259-80), American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C., U.S.A., 1980.

STATE, U.. **Environmental Protection Agency report**, 2009. Disponível em: <<http://www.epa.gov/epawaste/conserva/materials/glass.htm>>. Acesso em: 03 mai. 2016.

STATE, U.. **Environmental Protection Agency report**, 2012. Disponível em: <<http://www.epa.gov/epawaste/conservation/materials/glass.htm>>. Acesso em: 03 mai. 2016.

SU, N.; CHEN, J. S. Engineering properties of asphalt concrete made with recycled glass. **Resources, Conservation and Recycling**, v.35, p. 259–274, 2002.

TOPÇU, B. I.; CANBAZ, M. Properties of concrete containing waste glass. **Cement and Concrete Research**, v.34, p. 267–274, 2004

YANG, C, C; TSAI, Y, M; YANG, K, C. The Relation time in ACMT and Ponding Time in Ponding Test for Cementitious Materials. **Journal of Marine Science and Technology**, Vol. 20, No.3, pp. 281-289 (2012).

WANG, H; HU, W. Durability of self-consolidation concrete using waste LCD glass. **Construction and Building Materials**, v. 24, p. 1008

WANG, H.; HUANG, W. Durability of self-consolidation concrete using waste LCD glass. **Construction and Building Materials**, v. 24, p. 1008-1013, 2010.

WEE, T. H.; SURYAVANSHI, A. K.; TIN, S. S. Evaluation of Rapid Chloride Permeability Test (RCPT) results for concrete containing Mineral Admixtures. **ACI Material Journal**, v. 97, n.2 p. 221-232, 2000.

WHITING, D. Rapid determination of the chloride permeability of concrete. Final Report No. FHWA/RD-81/119, Federal Highway Administration, August 1981, NTIS No. 82140724. 1981.

UNE 83987-14. Durabilidad Del hormigon. Metodos de ensayo. Determinacion de los coeficientes de difusion de los iones cloruro em el hormigon endurecido . Metodo multirregimen, 2014.

VAITKEVICIUS, V; SERELEIS, E. HIBIG, H. The effect of glass powder on the microstructure of ultra high performance concrete. **Construction and Building Materials**, v. 68, p. 102-109, 2014.

ZIBARA, H.; HOOTON, R. D.; THOMAS, M. D. A; STANISH, K. Influence of the C/S and C/A ratios of hydration products on the chloride ion binding capacity of lime-SF and lime-MK mixtures. **Cement and Concrete Research**, v. 38, p. 422-6, 2008.

APENDICES

Em material digital anexado a esta dissertação.