UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOTECNIA, ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL

ESTUDO DA INCORPORAÇÃO DE ALTOS TEORES DE ARGILA CALCINADA NO CONCRETO COMPACTADO COM ROLO

ADRIANO MENDES RIBEIRO

Área de concentração: Construção Civil
Orientador: Prof. Dr. Oswaldo Cascudo

D0032C2010
GOIÂNIA
2010

ADRIANO MENDES RIBEIRO

ESTUDO DA INCORPORAÇÃO DE ALTOS TEORES DE ARGILA CALCINADA NO CONCRETO COMPACTADO COM ROLO

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás para obtenção de título de mestrado.
Área de concentração: Construção Civil
Orientador: Prof. Dr. Oswaldo Cascudo

D0032C2010
GOIÂNIA
2010

Adriano Mendes Ribeiro

Estudo da incorporação de altos teores de argila calcinada no concreto compactado com rolo

Dissertação de Mestrado, apresentada à Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás pelo programa PPG-GECON, defendida e aprovada em ___ / ___ / 2010

_____

Oswaldo Cascudo, Dr. (UFG)
(ORIENTADOR)

_____

Vladimir Antônio Paulon, Dr. (USP)
(EXAMINADOR EXTERNO)

_____

Helena Carasek, Dra[a]. (UFG)
(EXAMINADORA INTERNA)

À glória de Deus, o Grande Arquiteto do Universo.

Aos meus pais.

À minha esposa e nosso amado filho, Gabriel.

AGRADECIMENTOS

Acima de tudo agradeço a Deus, por sua benevolência e graça demonstrada a cada dia.

Ao professor Dr. Oswaldo Cascudo pela orientação e discernimento para ajudar a lapidar esta pesquisa.

À Engenheira Elizabeth Leopoldina, pelo apoio e amizade ao longo de todo o trabalho, desde a escolha do tema até a conclusão deste estudo.

À FURNAS S/A por permitir o uso de suas instalações bem como pelo fornecimento dos insumos e ensaios necessários para o desenvolvimento deste projeto.

A todos os colaboradores do Departamento de Apoio e Controle Técnico (DCT) de FURNAS que participaram do desenvolvimento deste estudo, em especial aos amigos do Bloco 22 e do Bloco 7.

Ao Engenheiro Alexandre de Castro pelo apoio na escolha das ferramentas estatísticas e na compreensão das mesmas dentro da pesquisa.

Aos professores do Curso de Mestrado em Geotecnia e Construção Civil da Universidade Federal de Goiás, que me ajudaram a trabalhar a pedra bruta através do conhecimento e da dedicação.

À Aparecida, secretária do mestrado, pelo companheirismo fraternal para com os alunos.

Aos amigos Engenheiro Cléter Damasceno e Engenheiro Henrique Penna pelo apoio nas horas incertas, de fundamental importância durante todas as etapas deste estudo.

À toda minha família, por compreender meus momentos de ausência. Ao meu pai e minha mãe que sempre foram exemplos de caráter, trabalho e estudo.

Do fundo do meu coração, agradeço à minha esposa e companheira. Kelly, seu carinho e compreensão durante os vários períodos de ausência, assim como o seu incentivo, foram primordiais para a conclusão desta jornada.

"... não perca tempo correndo atrás de galhos, catando folhas. Vá direto ao tronco ..."

Miyamoto Musashi (1645)

ESTUDO DA INCORPORAÇÃO DE ALTOS TEORES DE ARGILA CALCINADA NO CONCRETO COMPACTADO COM ROLO

RESUMO

O Concreto Compactado com Rolo (CCR) é uma técnica ainda relativamente nova, porém com volume de utilização crescente, fato gerado pelas suas vantagens econômicas e técnicas, requerendo assim mais estudos para embasar o seu uso com maior eficiência, segurança e economia.

O presente trabalho trata do CCR com elevados teores de substituição e de adição de parte do volume de cimento Portland por pozolana de argila calcinada, objetivando analisar e quantificar as melhorias das suas propriedades e chegar a um teor satisfatório de utilização, o qual possibilite melhoria ou manutenção das propriedades avaliadas com um menor consumo de cimento por metro cúbico.

Desta forma foram avaliados os impactos nas propriedades do CCR para este tipo de adição mineral, nos teores adotados, aferindo a influencia nas propriedades do concreto no estado fresco quanto à consistência e massa específica. No estado endurecido algumas propriedades mecânicas e de durabilidade foram analisadas através da resistência à compressão e à tração por compressão diametral, a absorção de água por capilaridade e por imersão, a permeabilidade à água e ensaio de ultrassom.

O uso da argila calcinada vem ao encontro das necessidades da produção de cimento para as usinas em construção na Região Norte do país, como é o caso de Santo Antônio / RO, pois se trata de uma obra muito distante das grandes indústrias cimenteiras e da produção de escória, cinza volante e sílica ativa, o que requer a investigação de materiais para aperfeiçoar a produção de cimento.

Como resultado importante obtido na pesquisa em questão, verificou-se que a substituição oscilando entre 27% a 50% atingiu os melhores resultados quanto à aplicabilidade desse material nas propriedades pesquisadas.

Palavras-chave: CCR, substituição parcial, adição, pozolana, argila calcinada, barragens.

STUDY OF THE INCORPORATION OF HIGH AMOUNTS OF CALCINED CLAY IN ROLLER COMPACTED CONCRETE

ABSTRACT

The rolled compacted concrete (RCC) is a still relatively new technique, but with growing volume of use, a fact generated by its technical and economical advantages, requiring more studies in order to use with greater efficiency, safety and economy.

This work deals with the RCC with high levels of replacement and addition of part of the Portland cement by calcined clay pozzolan, aiming to analyze and quantify the improvements of the concrete properties and reach a satisfactory level of use, which allows for improvement or maintenance of the properties with a lower consumption of cement per cubic meter.

So its impacts on the properties of RCC for this type of mineral addition were studied for the substitution levels adopted, checking the influence on the properties of the fresh concrete in the consistency and the density. For the hardened concrete some mechanical properties and durability were evaluated by compressive and tensile strength, capillarity and immersion by water absorption, test of permeability by water and ultrasound test.

The use of calcined clay come together with the needs of the cement production for the construction of dams in the north of the country, as the case of Santo Antônio / RO, because its place is far removed from major industries and cement production slag, fly ash and silica fume, requiring the study of materials to enhance the production of cement.

As an important result obtained with this research, it was found that substitution ranging from 27% to 50% achieved the best results, regarding the applicability of this material on the surveyed properties.

Key words: RCC, partial substitution, addition, pozzolan, calcined clay, dam.

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Figura 2.1 - Barragem de Willow Creek (US Army Corps of Engineers). 12
Figura 2.2 – Difratograma de uma adição mineral de metacaulinita (LIDUÁRIO, 2003). 25

CAPÍTULO 3 - PROGRAMA EXPERIMENTAL

Figura 3.1 - Fluxograma das atividades desempenhadas na pesquisa. 43
Figura 3.2 – Granulometria a laser do cimento. 48
Figura 3.3 – Aspecto da pozolana de argila calcinada utilizada neste estudo. 49
Figura 3.4 – Granulometria a laser da pozolana. 51
Figura 3.5 – Difratograma da pozolana de argila calcinada. 52
Figura 3.6 – Curva granulométrica do agregado miúdo e os limites das zonas ótimas e utilizável conforme a NBR 7211 / 2005. 54
Figura 3.7 – Fotografia ilustrando a fração do agregado graúdo de maior dimensão. 55
Figura 3.8 – Fotografia ilustrando a fração do agregado graúdo de menor dimensão. 55
Figura 3.9 – Fotografia ilustrando a mistura das frações dos agregados graúdos de maior e menor dimensão. 56
Figura 3.10 – Curva granulométrica do agregado graúdo de fração superior (38 mm). 57
Figura 3.11 – Curva granulométrica do agregado graúdo de fração inferior (19 mm). 58
Figura 3.12 – Pesagem e acomodação dos insumos para o CCR. 63
Figura 3.13 – Homogeneização dos materiais e a raspagem da betoneira pra evitar incrustações. 63
Figura 3.14 – Enchimento do cilindro de acrílico com a mistura seca do CCR. 65
Figura 3.15 – Preparação do CCR para o ensaio *Cannon Time*. 66
Figura 3.16 – Ensaio *Cannon Time* em andamento. 66
Figura 3.17 – Aspecto dos corpos de prova moldados. 68
Figura 3.18 – Aparelhos usados para realizar o ensaio de ultrassom. 76

Figura 3.19 – Granulometria dos agregados aplicados a Curva de Fuller antes do ajuste do traço. 83
Figura 3.20 – Aspecto do concreto antes da correção do traço (A) e após a correção do traço (B). 85
Figura 3.21 – Mudança na cor do concreto após a substituição de 35% do volume de cimento pela pozolana. 85
Figura 3.22 – Granulometria dos agregados aplicados a Curva de Fuller após o ajuste do traço. 86

CAPÍTULO 4 - ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Figura 4.1 – Resultados do *Cannon Time* para os concretos com substituição parcial de cimento por pozolana. 90
Figura 4.2 – Resultados do *Cannon Time* para os concretos com adição de pozolana. 90
Figura 4.3 – Evolução da massa unitária real segundo os teores de substituição propostos. 91
Figura 4.4 – Evolução da massa unitária real segundo os teores de adição propostos. 92
Figura 4.5 – Evolução da resistência à compressão simples em função dos teores de substituição parcial propostos. 96
Figura 4.6 – Evolução da resistência à compressão simples frente à idade e ao teor de substituição parcial. 98
Figura 4.7 – Evolução da resistência à compressão simples para cada traço estudado em substituição parcial. 98
Figura 4.8 – Evolução da resistência à compressão simples segundo os teores de adição propostos. 102
Figura 4.9 – Evolução da resistência à compressão simples frente à idade e ao teor de adição. 103
Figura 4.10 – Evolução da resistência à compressão simples, para a idade de 28 dias e 90 dias, quanto aos teores de substituição e de adição da pozolana de argila calcinada ao volume de cimento Portland. 105

Figura 4.11 – Evolução da resistência à tração por compressão diametral frente à idade e ao teor de substituição parcial. 108
Figura 4.12 – Resistência à tração por compressão diametral frente ao teor de substituição parcial. 109
Figura 4.13 – Resistência à tração por compressão diametral frente ao teor de adição. 110
Figura 4.14 – Evolução da resistência à tração por compressão diametral frente aos teores de adição para a idade de 90 dias de hidratação. 111
Figura 4.15 – Evolução da resistência à tração por compressão diametral, para a idade de 90 dias, quanto aos teores de substituição parcial e de adição da pozolana de argila calcinada ao volume de cimento Portland. 111
Figura 4.16 – Permeabilidade à água frente ao teor de substituição aos 90 dias. 114
Figura 4.17 – Permeabilidade à água frente ao teor de substituição parcial. 115
Figura 4.18 – Permeabilidade à água frente ao teor de adição aos 90 dias. 116
Figura 4.19 – Curva da permeabilidade à água frente ao teor de adição. 117
Figura 4.20 – Evolução da permeabilidade à água, para a idade de 90 dias, quanto aos teores de substituição e de adição da pozolana de argila calcinada ao volume de cimento Portland. 117
Figura 4.21 – Absorção de água por capilaridade frente ao teor de substituição. 120
Figura 4.22 – Evolução da absorção por capilaridade dos traços com substituição. 121
Figura 4.23 – Absorção de água por capilaridade frente ao teor de adição aos 90 dias. 122
Figura 4.24 – Evolução da absorção por capilaridade dos traços em adição. 123
Figura 4.25 – Evolução da absorção de água por capilaridade, para a idade de 90 dias, quanto aos teores de substituição e de adição da pozolana de argila calcinada ao volume de cimento Portland. 124
Figura 4.26 – Evolução da absorção por imersão para os traços com substituição. 127
Figura 4.27 – Evolução do índice de vazios para os traços com substituição. 127
Figura 4.28 – Evolução da massa específica real para os traços com substituição. 128
Figura 4.29 – Evolução da absorção por imersão para os traços em adição. 128
Figura 4.30 – Evolução do índice de vazios para os traços em adição. 129
Figura 4.31 – Evolução da massa específica real para os traços em adição. 129

Figura 4.32 – Evolução da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas pelo ensaio de ultrassom segundo os teores de substituição propostos. 132
Figura 4.33 – Evolução da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas pelo ensaio de ultrassom segundo as idades propostas do concreto para os teores de substituição. 133
Figura 4.34 – Evolução da propagação de ondas de ultrassom no CCR em função do teor de substituição. 134
Figura 4.35 – Evolução da propagação de ondas de ultrassom no CCR em função do teor de substituição. 135
Figura 4.36 – Evolução da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas pelo ensaio de ultrassom segundo os teores de adição propostos. 137
Figura 4.37 – Evolução da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas pelo ensaio de ultrassom segundo as idades propostas do concreto para os teores de adição. 138
Figura 4.38 – Evolução da propagação de ondas de ultrassom no CCR com adição – teor de adição como referencial. 139
Figura 4.39 – Evolução da velocidade de propagação das ondas ultrasônicas pelo ensaio de ultrassom, para a idade de 28 dias e 90 dias, quanto aos teores de substituição e de adição da pozolana de argila calcinada ao volume de cimento Portland. 140
Figura 4.40 – Correlação linear entre a resistência à compressão simples e a resistência à tração por compressão diametral para os teores de substituição, independente da idade de cura. 143
Figura 4.41 – Correlação linear entre a resistência à compressão simples e a absorção de água por capilaridade para os teores de substituição, independente da idade de cura. 141
Figura 4.42 – Correlação linear entre a resistência à tração por compressão diametral e a absorção de água por capilaridade para os teores de substituição, independente da idade de cura. 145
Figura 4.43 – Correlação linear entre a absorção total e o índice de vazios, ambos obtidos pelo ensaio de absorção de água por imersão para os teores de substituição, independente da idade de cura. 146

Figura 4.44 – Correlação entre o ensaio de ultrassom e a resistência à compressão simples para os teores de substituição, independente da idade de cura. 147
Figura 4.45 – Correlação entre o ensaio de ultrassom e a resistência à tração por compressão diametral para os teores de substituição, independente da idade de cura. 148
Figura 4.46 – Correlação entre o ensaio de ultrassom e a absorção de água por capilaridade para os teores de substituição, independente da idade de cura. 149

APÊNDICE B – Correlações entre as variáveis analisadas

Figura B.1 – Resumo das correlações entre as propriedades de resistência à compressão, tração por compressão diametral, permeabilidade à água, absorção capilar e absorção por imersão para os teores de substituição. 170
Figura B.2 – Correlação entre as propriedades de absorção capilar e absorção total, obtida pelo ensaio de absorção por imersão, para os teores de substituição. 171
Figura B.3 – Correlação entre as propriedades de absorção capilar e massa específica real, obtida pelo ensaio de absorção por imersão, para os teores de substituição. 172
Figura B.4 – Correlação entre as propriedades de absorção capilar e índice de vazios, obtida pelo ensaio de absorção por imersão, para os teores de substituição. 172
Figura B.5 – Correlação entre as propriedades de absorção total e massa específica real, obtidas pelo ensaio de absorção por imersão para os teores de substituição. 173
Figura B.6 – Correlação entre as propriedades de absorção total e índice de vazios, obtidas pelo ensaio de absorção por imersão para os teores de substituição. 173
Figura B.7 – Correlação entre a propriedade de absorção total, obtidas pelo ensaio de absorção por imersão, e a propriedade de ultrassom para os teores de substituição. 174

Figura B.8 – Correlação entre as propriedades de resistência à compressão e absorção capilar para os teores de substituição. 174
Figura B.9 – Correlação entre as propriedades de resistência à compressão e absorção total, obtida pelo ensaio de absorção por imersão, para os teores de substituição. 175
Figura B.10 – Correlação entre as propriedades de resistência à compressão e massa específica real, obtida pelo ensaio de absorção por imersão, para os teores de substituição. 175
Figura B.11 – Correlação entre as propriedades de resistência à compressão e índice de vazios, obtida pelo ensaio de absorção por imersão, para os teores de substituição. 176
Figura B.12 – Correlação entre as propriedades de resistência à compressão e resistência à tração por compressão diametral para os teores de substituição. 176
Figura B.13 – Correlação entre as propriedades de resistência à tração por compressão diametral e absorção capilar para os teores de substituição. 177
Figura B.14 – Correlação entre as propriedades de resistência à tração por compressão diametral e absorção total, obtida pelo ensaio de absorção por imersão, para os teores de substituição. 177
Figura B.15 – Correlação entre as propriedades de resistência à tração por compressão diametral e índice de vazios, obtida pelo ensaio de absorção por imersão, para os teores de substituição. 178
Figura B.16 – Correlação entre as propriedades de resistência à tração por compressão diametral e massa específica real, obtida pelo ensaio de absorção por imersão, para os teores de substituição. 178
Figura B.17 – Correlação entre as propriedades de ultrassom e resistência à compressão para os teores de substituição. 179
Figura B.18 – Correlação entre as propriedades de ultrassom e resistência à tração por compressão diametral para os teores de substituição. 179
Figura B.19 – Correlação entre as propriedades de ultrassom e absorção capilar para os teores de substituição. 180

Figura B.20 – Correlação entre as propriedades de ultrassom e massa específica real, obtida pelo ensaio de absorção por imersão, para os teores de substituição. 180
Figura B.21 – Correlação entre a propriedade de índice de vazios, obtida pelo ensaio de absorção por imersão, e a propriedade de ultrassom para os teores de substituição. 181
Figura B.22 – Correlação entre as propriedades de índice de vazios e massa específica real, obtidas pelo ensaio de absorção por imersão, para os teores de substituição. 181
Figura B.23 – Correlação entre as propriedades de permeabilidade e absorção por capilaridade para os teores de substituição. 182
Figura B.24 – Correlação entre as propriedades de permeabilidade e resistência à compressão para os teores de substituição. 182
Figura B.25 – Correlação entre as propriedades de permeabilidade e resistência à tração por compressão diametral para os teores de substituição. 183
Figura B.26 – Correlação entre as propriedades de permeabilidade e absorção total, obtida pelo ensaio de absorção por imersão, para os teores de substituição. 183
Figura B.27 – Correlação entre as propriedades de permeabilidade e índice de vazios, obtida pelo ensaio de absorção por imersão, para os teores de substituição. 184
Figura B.28 – Correlação entre as propriedades de permeabilidade e massa específica real, obtida pelo ensaio de absorção por imersão, para os teores de substituição. 184
Figura B.29 – Correlação entre as propriedades de permeabilidade e ultrassom para os teores de substituição. 185
Figura B.30 – Correlação entre as propriedades de absorção capilar e absorção total, obtida pelo ensaio de absorção por imersão, para os teores de adição. 186
Figura B.31 – Correlação entre as propriedades de absorção capilar e massa específica real, obtida pelo ensaio de absorção por imersão, para os teores de adição. 186

Figura B.32 – Correlação entre as propriedades de absorção capilar e índice de vazios, obtida pelo ensaio de absorção por imersão, para os teores de adição. 187
Figura B.33 – Correlação entre as propriedades de absorção capilar e a permeabilidade à água para os teores de adição. 187
Figura B.34 – Correlação entre as propriedades de absorção total e massa específica real, obtidas pelo ensaio de absorção por imersão para os teores de adição. 188
Figura B.35 – Correlação entre as propriedades de absorção total e índice de vazios, obtidas pelo ensaio de absorção por imersão para os teores de adição. 188
Figura B.36 – Correlação entre as propriedades de resistência à compressão e absorção capilar para os teores de adição. 189
Figura B.37 – Correlação entre as propriedades de resistência à compressão e absorção total, obtida pelo ensaio de absorção por imersão, para os teores de adição. 189
Figura B.38 – Correlação entre as propriedades de resistência à compressão e massa específica real, obtida pelo ensaio de absorção por imersão, para os teores de adição. 190
Figura B.39 – Correlação entre as propriedades de resistência à compressão e índice de vazios, obtida pelo ensaio de absorção por imersão, para os teores de adição. 190
Figura B.40 – Correlação entre as propriedades de resistência à compressão e resistência à tração por compressão diametral para os teores de adição. 191
Figura B.41 – Correlação entre as propriedades de resistência à compressão e permeabilidade à água para os teores de adição. 191
Figura B.42 – Correlação entre as propriedades de permeabilidade e absorção total, obtida pelo ensaio de absorção por imersão, para os teores de adição. 192
Figura B.43 – Correlação entre as propriedades de permeabilidade e índice de vazios, obtida pelo ensaio de absorção por imersão, para os teores de adição. 192

Figura B.44 – Correlação entre as propriedades de permeabilidade e massa específica real, obtida pelo ensaio de absorção por imersão, para os teores de adição. 193
Figura B.45 – Correlação entre as propriedades de resistência à tração por compressão diametral e absorção capilar para os teores de adição. 193
Figura B.46 – Correlação entre as propriedades de resistência à tração por compressão diametral e absorção total, obtida pelo ensaio de absorção por imersão, para os teores de adição. 194
Figura B.47 – Correlação entre as propriedades de resistência à tração por compressão diametral e índice de vazios, obtida pelo ensaio de absorção por imersão, para os teores de adição. 194
Figura B.48 – Correlação entre as propriedades de resistência à tração por compressão diametral e massa específica real, obtida pelo ensaio de Absorção por imersão, para os teores de adição. 195
Figura B.49 – Correlação entre as propriedades de resistência à tração por compressão diametral e permeabilidade à água para os teores de adição. 195
Figura B.50 – Correlação entre as propriedades de ultrassom e resistência à compressão para os teores de adição. 196
Figura B.51 – Correlação entre as propriedades de ultrassom e resistência à tração por compressão diametral para os teores de adição. 196
Figura B.52 – Correlação entre as propriedades de ultrassom e absorção capilar para os teores de adição. 197
Figura B.53 – Correlação entre as propriedades de ultrassom e absorção total, obtida pelo ensaio de absorção por imersão, para os teores de adição. 197
Figura B.54 – Correlação entre as propriedades de ultrassom e índice de vazios, obtida pelo ensaio de absorção por imersão, para os teores de adição. 198
Figura B.55 – Correlação entre as propriedades de ultrassom e massa específica real, obtida pelo ensaio de absorção por imersão, para os teores de adição. 198

Figura B.56 – Correlação entre as propriedades de ultrassom e permeabilidade à água para os teores de adição. 199
Figura B.57 – Correlação entre as propriedades de índice de vazios e massa específica real, obtidas pelo ensaio de absorção por imersão, para os teores de adição. 199

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Tabela 2.1 – Classificação das pozolanas segundo a NBR 12653. 17
Tabela 2.2 – Exigências químicas para a classificação das pozolanas segundo a NBR 12653. 18
Tabela 2.3 – Exigências físicas para a classificação das pozolanas segundo a NBR 12653. 18
Tabela 2.4 – Exigências facultativas para as pozolanas segundo a NBR 12653. 19

CAPÍTULO 3 - PROGRAMA EXPERIMENTAL

Tabela 3.1 – Caracterização química do cimento empregado. 46
Tabela 3.2 – Características físicas e mecânicas do cimento empregado. 47
Tabela 3.3 – Caracterização da pozolana segundo os ensaios químicos. 49
Tabela 3.4 – Caracterização da pozolana segundo os ensaios físicos. 50
Tabela 3.5 – Classificação das pozolanas segundo a NBR 12653 (ABNT, 1992). 50
Tabela 3.6 – Distribuição granulométrica do agregado miúdo utilizado na pesquisa (ensaio realizado conforme a NBR 7217 / 1987). 53
Tabela 3.7 – Caracterização física do agregado miúdo empregado no CCR. 54
Tabela 3.8 – Distribuição granulométrica do agregado graúdo na fração superior (38 mm). Ensaio realizado conforme a NBR 7217 / 1987. 56
Tabela 3.9 – Distribuição granulométrica do agregado graúdo de fração inferior (19 mm). Ensaio realizado conforme a NBR 7217 / 1987. 57
Tabela 3.10 – Caracterização física do agregado graúdo. 59
Tabela 3.11 – Características do aditivo empregado no CCR. 60
Tabela 3.12 – Tipos de ensaios e quantidades de corpos de prova a serem moldados. 69
Tabela 3.13 – Quantidades de corpos de prova a serem moldados e seus teores de substituição. 69

Tabela 3.14 – Quantidade de ensaios e volume de CCR produzido. 78
Tabela 3.15 – Volume de CCR a ser produzido por teor de adição mineral utilizada em substituição. 79
Tabela 3.16 – Volume de CCR a ser produzido por teor de adição mineral utilizada em adição. 80
Tabela 3.17 – Traços adotados no estudo. 87

CAPÍTULO 4 - ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Tabela 4.1 – Resultados da análise de variância executada com os dados de resistência à compressão para os teores de substituição parcial. 94
Tabela 4.2 – Resultados da análise de variância executada com os dados de resistência à compressão para os teores de adição. 95
Tabela 4.3 – Agrupamento pelo Teste de Duncan para o ensaio de resistência à compressão simples nos concretos com substituição parcial de pozolana. 95
Tabela 4.4 – Elevação da resistência dos traços em estudo em substituição com a cura do concreto. 99
Tabela 4.5 – Agrupamento pelo Teste de Duncan para o ensaio de resistência à compressão simples, quanto à idade de hidratação, nos concretos com substituição parcial de pozolana. 100
Tabela 4.6 – Agrupamento pelo Teste de Duncan para o ensaio de resistência à compressão simples, quanto ao valor da resistência à compressão e a idade de hidratação, nos concretos com substituição parcial de pozolana. 101
Tabela 4.7 – Agrupamento pelo Teste de Duncan para o ensaio de resistência à compressão simples nos concretos com adição de pozolana. 101
Tabela 4.8 – Agrupamento pelo Teste de Duncan para o ensaio de resistência à compressão simples, quanto à idade de hidratação, nos concretos com adição de pozolana. 103
Tabela 4.9 – Elevação da resistência dos traços em estudo em adição com a cura do concreto. 104

Tabela 4.10 – Agrupamento pelo Teste de Duncan para o ensaio de resistência à compressão simples, quanto ao valor da resistência à compressão e a idade de hidratação, nos concretos com adição de pozolana 105
Tabela 4.11 – Resultados da análise de variância executada com os dados de resistência à tração para os teores de substituição parcial. 106
Tabela 4.12 – Resultados da análise de variância executada com os dados de resistência à tração para os teores de adição. 107
Tabela 4.13 – Agrupamento pelo Teste de Duncan para o ensaio de resistência à tração por compressão diametral para os teores de substituição. 107
Tabela 4.14 – Resultados da análise de variância executada com os dados de permeabilidade à água para os teores de substituição parcial. 112
Tabela 4.15 – Resultados da análise de variância executada com os dados de permeabilidade à água para os teores de adição. 113
Tabela 4.16 – Agrupamento pelo Teste de Duncan para o ensaio de permeabilidade à água para os teores de substituição. 113
Tabela 4.17 – Agrupamento pelo Teste de Duncan para o ensaio de permeabilidade à água para os teores de adição. 115
Tabela 4.18 – Resultados da análise de variância executada com os dados de absorção de água por capilaridade para os teores de substituição parcial. 118
Tabela 4.19 – Resultados da análise de variância executada com os dados de absorção de água por capilaridade para os teores de adição. 119
Tabela 4.20 – Agrupamento pelo Teste de Duncan para o ensaio de absorção capilar para os teores de substituição. 119
Tabela 4.21 – Elevação da absorção por capilaridade nos traços com substituição. 121
Tabela 4.22 – Agrupamento pelo Teste de Duncan para o ensaio de absorção de água por capilaridade para os teores de adição. 122
Tabela 4.23 – Redução da absorção por capilaridade nos traços em adição. 123
Tabela 4.24 – Resultados da análise de variância executada com os dados de absorção por imersão para os teores de substituição parcial. 125
Tabela 4.25 – Resultados da análise de variância executada com os dados absorção por imersão para os teores de adição. 126

Tabela 4.26 – Resultados da análise de variância executada com os dados do ensaio de ultrassom para os teores de substituição parcial. 130
Tabela 4.27 – Resultados da análise de variância executada com os dados do ensaio de ultrassom para os teores de adição. 131
Tabela 4.28 – Agrupamento pelo Teste de Duncan para o ensaio de ultrassom nos concretos com substituição de pozolana. 131
Tabela 4.29 – Agrupamento pelo Teste de Duncan quanto à idade dos ensaios de ultrassom nos concretos com substituição de pozolana. 132
Tabela 4.30 – Elevação da propagação de ondas nos traços com substituição. 135
Tabela 4.31 – Agrupamento pelo Teste de Duncan para o ensaio de ultrassom nos concretos com adição de pozolana. 136
Tabela 4.32 – Agrupamento pelo Teste de Duncan quanto à idade dos ensaios de ultrassom nos concretos com adição de pozolana. 136
Tabela 4.33 – Elevação da velocidade de propagação de ondas nos traços em adição. 139
Tabela 4.34 – Principais correlações encontradas para as propriedades analisadas para os teores de substituição. 142
Tabela 4.35 – Principais correlações encontradas para as propriedades analisadas para os teores de adição. 142

APÊNDICE A – Resultados dos ensaios

Tabela A.1 – Resultados obtidos nos ensaios de *Cannon Time* para os teores de substituição. 160
Tabela A.2 – Resultados obtidos nos ensaios de *Cannon Time* para os teores de adição. 160
Tabela A.3 – Resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão, tração por compressão diametral, permeabilidade à água, absorção capilar e absorção por imersão para os teores de substituição. 161
Tabela A.4 – Resultados obtidos no ensaio de ultrassom para os teores de substituição. 164
Tabela A.5 – Resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão, tração por compressão diametral, permeabilidade à água, absorção capilar e absorção por imersão para os teores de adição. 167

Tabela A.6 – Resultados obtidos no ensaio de ultrassom para os teores de adição. 168

APÊNDICE B – Correlações entre as variáveis analisadas

Tabela B.1 – Resultados obtidos quanto à significância entre as correlações para os teores de substituição. 171
Tabela B.2 – Resultados obtidos quanto à significância entre as correlações para os teores de adição. 185

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

abC	–	Absorção capilar.
ABNT	–	Associação Brasileira de Normas Técnicas.
abT	–	Absorção total.
ANOVA	–	Análise de variâncias.
a/c	–	Relação água/cimento.
CCR	–	Concreto compactado com rolo.
CCV	–	Concreto convencional.
cm	–	Centímetro.
CP	–	Cimento Portland.
Cp	–	Corpo de prova.
Dmáx	–	Dimensão máxima característica.
EUA	–	Estados Unidos da América.
fcj	–	Resistência à compressão.
fct	–	Resistência à tração por compressão diametral.
g	–	Grama ou Aceleração da gravidade.
GPa	–	Gigapascal.
h	–	Hora.
In. vaz.	–	Índice de vazios.
kg	–	Quilograma.
kPa	–	Quilopascal.
m	–	Metro.
Mas. Esp. Real	–	Massa específica real.
mm	–	Milímetro.
MPa	–	Megapascal.
NBR	–	Norma Brasileira.
NM	–	Norma Mercosul.
RAA	–	Reação álcali-agregado.
rpm	–	Rotações por minuto.
R	–	Coeficiente de correlação do modelo.
R^2_{mod}	–	Coeficiente de determinação do modelo.
s	–	Segundo.

S.S.S.	–	Saturada superfície seca.
T	–	Temperatura.
t	–	Tempo.
UHE	–	Usina Hidrelétrica.
US	–	Ultrassom.
v	–	Velocidade de propagação da onda.
xij	–	Modelo estatístico com dois fatores a níveis fixos.
αi	–	Influencia do fator A, ou seja, efeito da adição pozolânica.
βj	–	Influencia do fator B, ou seja, efeito da idade de cura do concreto.
$\alpha\beta ij$	–	Influência da interação dos fatores A e B, ou seja, efeito da interação do Teor de pozolana e do tempo de cura do concreto;
εij	–	Medida do erro experimental, onde $\varepsilon ij \rightarrow N(0,\sigma)$
μ	–	Média geral.

SUMÁRIO

RESUMO vii

ABSTRACT viii

LISTA DE FIGURAS ix

LISTA DE TABELAS xix

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS xxiv

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO 1

1.1. JUSTIFICATIVA E IMPORTÂNCIA DA PESQUISA 5

1.2. OBJETIVOS 7

1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO 8

CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 9

2.1. CONCRETO COMPACTADO COM ROLO 9

2.2. POZOLANAS E A ARGILA CALCINADA 14

2.2.1. Pozolanas 14

2.2.2. Argilas e sua calcinação 22

2.2.3. Adição de pozolanas ao cimento Portland 28

2.2.4. Efeitos da pozolana no CCR 32

2.2.5. Efeitos dos agregados no CCR 37

CAPÍTULO 3 - PROGRAMA EXPERIMENTAL 41

3.1. VARIÁVEIS 41

3.2. MATERIAIS EMPREGADOS 44

3.2.1. Cimento 44

3.2.2. Pozolana de argila calcinada 48

3.2.3. Agregados 52

3.2.4. Aditivos 59

3.3. CONCRETOS ESPECIFICADOS 61

3.4. MÉTODOS ADOTADOS 63

3.4.1. Ensaios no concreto no estado fresco 64

3.4.1.1. Consistência e massa específica 64

3.4.2. Ensaios no concreto no estado endurecido 67

3.4.2.1. Resistência à compressão simples 69

3.4.2.2. Resistência à tração por compressão diametral 70
3.4.2.3. Permeabilidade à água 71
3.4.2.4. Ensaio de absorção de água por capilaridade 72
3.4.2.5. Ensaio de absorção de água por imersão 73
3.4.2.6. Ensaio de ultrassom 75
3.4.3. Quantidade de concreto produzido e ensaiado 78
3.5. DOSAGEM DO CCR 80
3.5.1. Ajuste da dosagem de referência 84
CAPÍTULO 4 - ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS 88
4.1. PROPRIEDADES NO ESTADO FRESCO 88
4.1.1 Consistência e massa específica 89
4.2. PROPRIEDADES NO ESTADO ENDURECIDO 92
4.2.1 Resistência à compressão simples 94
4.2.2 Resistência à tração por compressão diametral 106
4.2.3 Permeabilidade à água 112
4.2.4 Ensaio de absorção de água por capilaridade 118
4.2.5 Ensaio de absorção de água por imersão 124
4.2.6 Ensaio de ultrassom 129
4.2.7 Correlações entre as propriedades previstas no programa experimental para os teores de substituição e de adição 141
a. Correlação entre a resistência à compressão simples e a resistência à tração por compressão diametral para os teores de substituição 143
b. Correlação entre a resistência à compressão simples e a absorção de água por capilaridade para os teores de substituição 144
c. Correlação entre a resistência à tração por compressão diametral e a absorção de água por capilaridade para os teores de substituição 145
d. Correlação entre a absorção total e o índice de vazios, obtidos pelo ensaio de absorção por imersão para os teores de substituição 146

e. Correlação entre o ensaio de ultrassom e a resistência à compressão simples para os teores de substituição 147

f. Correlação entre o ensaio de ultrassom e a resistência à tração por compressão diametral para os teores de substituição 148

g. Correlação entre o ensaio de ultrassom e a absorção de água por capilaridade para os teores de substituição 149

CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS 150

5.1. CONCLUSÕES 150

5.2. CONSIDERAÇÕES FINAIS 153

5.3. PROPOSTAS PARA NOVOS ESTUDOS 153

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 155

APÊNDICE A – Resultados dos ensaios 160

APÊNDICE B – Correlações entre as variáveis analisadas 170

CAPÍTULO 1
INTRODUÇÃO

O concreto compactado com rolo (CCR) tem como características principais a sua forma de adensamento e o seu baixo consumo de aglomerantes. Conseqüentemente, estes fatores tornam esse tipo de material um produto com menor custo, um menor impacto ambiental e uma elevada produtividade quando comparado com o concreto convencional vibrado (CCV).

Conforme relatos de Graça *et al.* (2005), no Brasil é usual o consumo de aglomerante variando entre 65 kg/m³ a 200 kg/m³ de concreto compactado com rolo para barragens de água, sendo também comum o emprego de baixos ou médios teores de material cimentício, da ordem de 70 kg/m³ a 150 kg/m³ (BATISTA *et al.*, 2008). Em outros países, como a Espanha e Japão, diferentemente do Brasil, o consumo de aglomerantes é bastante elevado, da ordem de 200 kg/m³, aproximando do consumo do concreto convencional vibrado.

O aumento do volume de aglomerante melhora as características do CCR, assim o teor de aglomerante por metro cúbico deve ser criteriosamente avaliado para garantir a melhor escolha quanto à viabilidade técnica e econômica, quebrando o paradigma de limites superior e inferior. Nesse sentido, há necessidade de se pesquisar uma maneira de aumentar o teor de pasta para atingir tais melhorias. Uma forma de se promover esse aumento sem uma considerável elevação do consumo de cimento Portland é por meio da incorporação de adições minerais aos traços para o CCR, ou seja, o uso das adições minerais em somatório ao teor de cimento especificado para atingir a quantidade de pasta requerida.

Dentro desse contexto, o presente trabalho trata do uso da pozolana de argila calcinada em substituição a parte do volume de cimento Portland. Os resultados são comparados a um traço de concreto de referência sem o emprego de adições para compor o teor de pasta. Assim, avalia-se o emprego das adições para proporcionar reduções no custo do concreto compactado com rolo sem prejudicar as propriedades deste material.

Analisa-se também o uso da pozolana de argila calcinada em adição ao teor de cimento Portland, somando suas massas e desta forma aumentando o teor de pasta, de forma a avaliar o desempenho da pozolana frente ao concreto de referência, podendo também servir como estimativa para um CCR com teores mais elevados de cimento Portland.

Os mais altos consumos de pasta, com a substituição do cimento Portland por adições minerais, também representam uma ação de grande relevância no sentido de controlar graves problemas técnicos como a produção elevada de calor, visto que este calor possibilita o surgimento de manifestações patológicas indesejáveis para barragens, como as fissuras de origem térmica. Eles igualmente podem propiciar um aumento na resistência à compressão sem os efeitos danosos do calor de hidratação, assim como contribuem para a melhoria da trabalhabilidade do concreto fresco (FARIAS *et al.*, 2003). Essa medida, por diminuir o consumo de cimento Portland, também reduz alguns impactos causados pela produção deste insumo, como a emissão de CO_2 e o consumo de energia, podendo alternativamente dar destino a resíduos de outras indústrias. Tais ações agregam valor ecológico e fomentam a sustentabilidade dos meios de produção.

Em geral as pozolanas adicionadas ao concreto propiciam uma microestrutura mais uniforme, compacta e com poros mais refinados, conferindo ao concreto um desempenho superior se comparado a um concreto similar sem o uso dessas adições minerais (SILVA, 2007). Essa estrutura mais compacta explica o aumento da resistência à compressão, assim como a maior durabilidade do concreto, visto que a estrutura de poros geralmente é mais fina, mais tortuosa e menos interconectada, o que dificulta o transporte de agentes agressivos através do concreto (ISAIA, 1995). Segundo Nita *et al.* (2007), o efeito fíler também provoca densificação da região da zona de transição nas primeiras idades quando ainda é baixo o índice das reações pozolânicas.

Caso haja a potencialidade de ocorrer manifestações patológicas devidos à expansão do concreto decorrente de reações álcali-agregado (RAA), fato gerado por um possível excesso de álcalis oriundos do cimento e possíveis agregados reativos, esta patologia pode ser prevenida pela redução do teor de cimento Portland e pela substituição por uma adição mineral, como a escória de alto-forno, a argila calcinada, a sílica ativa, a cinza volante, o metacaulim ou a cinza de casca de arroz, entre outras.

No campo da durabilidade, essa redução na reatividade é devida aos álcalis existentes nas adições serem insolúveis ou pouco solúveis, não contribuindo efetivamente para ocorrer a reação álcali-agregado (RAA); assim, ao substituir o cimento pela adição o teor de álcalis disponíveis para promover essa patologia torna-se menor. Caso a única fonte de álcalis seja o cimento, se este teor for menor que 0,6% Na_2O equivalente, a probabilidade de ocorrer RAA é muito reduzida (MEHTA; MONTEIRO, 1994). A ASTM C 311 (2004) descreve que, analisando sobre o peso do material cimentício, seria de 15% o menor teor indicado para as adições de argila calcinada ou cinzas volantes para que essas desempenhem ações consideradas efetivas para o combate das reações expansivas.

Castro (2003), em um estudo sobre a influência do emprego de adições minerais, estas utilizadas substituindo parte do cimento Portland em massa, aferindo a influência quanto à carbonatação do concreto, observou que uma boa performance quanto a esse fenômeno depende do tipo de adição empregada e do impacto que ela provoca na pasta endurecida. Castro (2003) observou que as adições de sílica ativa e metacaulinita melhoram a proteção do concreto frente ao dióxido de carbono comparadas ao concreto de referência.

A pesquisa por materiais alternativos que aprimorem a técnica e as propriedades do concreto compactado com rolo deve ser sempre focada, visando melhoras nas propriedades do concreto no estado fresco e endurecido, satisfazendo assim as necessidades impostas ao material e balizando a sua correta aplicação. Nesse sentido, segundo Farias *et al.* (2003), o estudo de adições pozolânicas de argila calcinada ao CCR é muito promissor, pois este material provou em estudos laboratoriais ser bastante eficiente, melhorando todas as propriedades do concreto no estado fresco e no estado endurecido. Farias *et al.* (2003) deixam claro que, aplicando o teor adequado, a adição de argila calcinada melhora a densidade da microestrutura e da zona de transição, reduz a permeabilidade e a absorção de água e aumenta a resistência à compressão.

Em conformidade com o exposto anteriormente, para empreendimentos aonde o acesso de adições ou pozolanas de outras naturezas sejam difíceis ou inviáveis, a calcinação de argila da própria região da obra pode ser uma solução interessante do ponto de vista econômico, sem prejuízos para a técnica e a segurança, melhorando com isso o desempenho geral do CCR. Ressaltando que no caso da argila calcinada, a quantidade de insumos disponíveis para se realizar a calcinação é potencialmente elevada e independente, por exemplo, da existência de

termelétricas e siderúrgicas próximas ao local de produção do concreto, como é o caso do uso da cinza volante ou escória de alto-forno, respectivamente.

Nesse sentido, a possibilidade de substituir parte do cimento Portland por adições e a disponibilidade de argilominerais calcináveis para uso como pozolana na região do Rio Madeira, no município de Porto Velho - RO, local de construção de um grande empreendimento de barragem de água, revertendo acentuadamente muitas das implicações financeiras, devidas ao elevado custo com o transporte das fontes de origens do cimento e dos insumos pozolânicos até o local de sua efetiva utilização. É importante ressaltar que esse município é maior que o estado de Sergipe e que o local da obra é de difícil acesso. Assim para esse empreendimento há grandes dificuldades de fornecimento de materiais devido às formas de acesso e à distância entre a origem dos insumos e seu local de uso. Dessa forma, todos os esforços devem ser empreendidos para a utilização dos insumos de mais fácil acesso, logo com custos mais acessíveis.

Esse empreendimento no Rio Madeira pertence à empresa Santo Antônio Energia, composto pela associação de sete empresas, sendo duas da área de construção (Construtora Norberto Odebrecht e grupo Andrade Gutierrez Participações), duas do setor de energia (Eletrobras Furnas e CEMIG) e o fundo de investimento FIP (Fundo de Investimentos e Participações Amazônia Energia), formado pelos bancos Santander e Banif e pelo Fundo de Investimento do FGTS.

Para a execução desse empreendimento está previsto um consumo de 167 000 m³ de concreto compactado com rolo com altura máxima de 49,3 metros, sendo prevista para a usina hidrelétrica uma altura de 60 metros, volume de reservamento de água de 2 075,1 x 10^6 m³ e potência de 3 150,4 MW.

1.1. JUSTIFICATIVA E IMPORTÂNCIA DA PESQUISA

O concreto compactado com rolo, seguindo uma tendência já prevista por vários autores, vem sendo cada vez mais aplicado em barragens, fato gerado pelas suas vantagens econômicas e técnicas frente a outros materiais e a outras técnicas construtivas já consolidadas nesse meio.

Toda técnica, assim como os elementos que a compõem, devem ser analisadas quanto aos seus impactos de forma global no empreendimento. Dessa forma, devido ao CCR ser uma técnica relativamente nova utilizada na construção de barragens, ela requer mais estudos para consolidar o conhecimento e embasar seu uso com maior eficiência, segurança e economia, obtendo assim o melhor resultado possível.

No Brasil, o emprego da técnica do CCR é caracterizado pelo baixo consumo de cimento em sua formulação, entretanto há outros países também usuários dessa tecnologia que a empregam com maiores teores de cimento em seus traços, melhorando conseqüentemente as características gerais do concreto. Nestes casos, porém, não somente a resistência do CCR aumentará como também a quantidade de calor liberado na hidratação do cimento será maior, requerendo uma avaliação cuidadosa nos estudos de dosagem e no cálculo térmico.

O presente trabalho trata da técnica do concreto compactado com rolo com o emprego de adições de argila calcinada, essa utilizada em substituição parcial e utilizada também em adição a um volume inicialmente estipulado de referência de cimento Portland. Os ensaios foram realizados com elevados teores de substituição parcial e de adição, ambos em volume.

A escolha do tipo de material a ser empregado para combater possíveis manifestações patologias e melhorar as propriedades do concreto deve atender requisitos técnicos e econômicos. Assim o emprego de uma pozolana mais fácil de ser obtida, como a argila calcinada processada através da calcinação de um material natural próximo do local de utilização, especialmente em obras distantes dos grandes centros onde não se dispõem de facilidades para a obtenção de resíduos industriais empregáveis como pozolana como as escórias de alto-forno ou as cinzas volantes. O processamento da adição mineral próximo ao seu local de utilização também reduz problemas com o transporte, fator que pode ser decisivo quanto à viabilidade para locais de difícil acesso.

As possibilidades de emprego no CCR de teores mais elevados da pozolana de argila calcinada em substituição ao volume de cimento, assim como para o emprego a pozolana em adição ao volume de cimento, contribuem para:

a) Redução do consumo de cimento do concreto, propiciando redução do calor de hidratação e, conseqüentemente, redução dos riscos ao desenvolvimento de manifestações patológicas decorrentes de desse problema;

b) Manutenção dos teores de cimento de um traço de referência original, porém com ganhos significativos de outras propriedades do concreto como as resistências mecânicas à compressão e tração, redução de permeabilidade e absorção de água e melhorias na compacidade da matriz cimentícia;

c) Com a redução do consumo de cimento, tem-se também redução de custos e a obtenção de melhores índices de preservação ambiental, pois a produção do clínquer Portland tem maior gasto energético para a sua produção, implica em maior geração de CO_2 para o ambiente e em maior exploração de insumos naturais do que a calcinação de argila.

d) A possibilidade de dar possíveis reaproveitamentos de resíduos de outras indústrias, como, por exemplo, o resíduo do caulim usado para o clareamento nas indústrias de fabricação de papel.

Desta forma este estudo proporcionará o melhor uso dos recursos naturais, decorrentes da diminuição dos gastos dos insumos ecológicos e impactos ambientais decorrentes da produção do cimento Portland, indústria esta que requer mais matéria prima e polui mais que a indústria que produz de pozolanas. Ou seja, produzirá um concreto equivalente em qualidade, porém com menores quantidades de emissões de carbono à atmosfera, menores gastos energéticos, substituição do beneficiamento de insumos nobres e ser fonte de dados para possíveis comparações para o reaproveitamento de resíduos de outras indústrias. Permitindo também o uso de maiores volumes de aglomerantes frente ao calor de hidratação *versus* as fissuras de origem térmica.

1.2. OBJETIVOS

O objetivo geral deste estudo é verificar a viabilidade técnica do uso de grandes proporções de pozolanas de argila calcinada em substituição ao cimento Portland em concretos compactados com rolo (CCR), verificando a possível economia de recursos financeiros com a redução do volume de cimento consumido e a possível melhoria das propriedades do concreto.

Assim, com o estudo deste tipo de concreto e dos seus materiais constituintes, através dos efeitos das variações dos teores de pozolanas tanto em substituição parcial como em adição ao volume de referência de cimento, pode avaliar os impactos nas propriedades do CCR. Objetiva-se desta forma poder quantificar a real interferência da pozolana no CCR, e através da determinação de teores a serem empregados chegar a um teor ótimo de substituição do cimento Portland pela pozolana em estudo. Os objetivos específicos da pesquisa podem ser enumerados em:

a) Avaliar o efeito da substituição parcial do cimento em um concreto com teor de referência sem o uso de adições minerais, empregando diversos teores de substituição parcial e tendo como respostas a trabalhabilidade do concreto no estado fresco, as propriedades mecânicas do concreto, a absorção de água, a permeabilidade à água e a velocidade de propagação de ondas ultrassônicas;

b) Avaliar o efeito da adição de argila calcinada em um concreto com teor de referência sem o uso de adições minerais, empregando alguns teores de adição e tendo como respostas a trabalhabilidade do concreto no estado fresco, as propriedades mecânicas do concreto, a absorção de água, a permeabilidade à água e a velocidade de propagação de ondas ultrassônicas;

c) Determinar a eficácia e determinar as possíveis correlações entre o ensaio de ultrassom e as propriedades avaliadas neste estudo com o intuito de determinar uma forma mais simples de avaliar e controlar a execução do concreto em barragens, uma vez que a extração de testemunhos de concreto são bem mais onerosas e laboriosas que um acompanhamento através de um ensaio não destrutivo e de fácil execução;

d) Verificar a influência da idade de cura do concreto para a idade de 180 dias nas propriedades mecânicas, na absorção de água e na permeabilidade à água, uma vez que os empreendimentos de construção de barragens consomem um tempo bem maior que o convencionado para análise das reações pozolânicas de 90 dias.

1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O presente trabalho está estruturado em cinco capítulos, sendo que no primeiro é apresentada uma introdução ao tema, tratando das justificativas que respaldam a execução deste estudo e os seus objetivos.

O segundo capítulo contém uma revisão da literatura que discorre genericamente sobre o concreto compactado com rolo. Ele também trata das pozolanas e, em especial, da argila calcinada, abrangendo as adições de pozolanas do cimento Portland e os seus efeitos no CCR.

No terceiro capítulo apresenta-se a metodologia do programa experimental proposto, com a descrição das normas que abrangem todas as etapas que compõem este estudo, a saber, as etapas de materiais e métodos. Inicialmente apresenta-se a caracterização dos materiais, seguida de um estudo sobre a dosagem do CCR empregado. Na seqüência, descreve-se a metodologia empregada para a realização da pesquisa experimental. Por fim, neste capítulo, faz-se uma análise do traço de referência do CCR com um ajuste da dosagem, de forma a garantir que o traço especificado não dificulte ou crie variáveis que interfiram nos resultados.

O quarto capítulo trata da análise e discussão dos resultados obtidos quanto aos ensaios de resistência à compressão, de tração por compressão diametral, de permeabilidade à água, de absorção de água por capilaridade, de absorção de água por imersão e de ultrassom no concreto compactado com rolo para cada um dos traços especificados.

As conclusões do trabalho são apresentadas no quinto capítulo. Ao final deste capítulo, são propostas as sugestões para novos temas a serem estudados complementando o presente estudo.Por fim, após o quinto capítulo, são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas para a confecção deste trabalho e os apêndices que complementam o trabalho.

CAPÍTULO 2
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesse capítulo foi tratado do concreto compactado com rolo, com suas aplicações em barragens para represamento de água e com uma revisão ampla das propriedades das pozolanas, em especial a pozolana de argila calcinada advinda da argila existente na região do município de Porto Velho. O estudo da viabilidade técnica e econômica do uso desta pozolana em grandes teores em substituição do cimento Portland poderá promover uma economia em larga escala de recursos financeiros e ambientais na execução da usina hidrelétrica de Santo Antônio, implantada no rio Madeira, também localizada nesse município.

2.1. CONCRETO COMPACTADO COM ROLO

O concreto compactado com rolo (CCR) é uma tecnologia ainda recente comparada com as demais técnicas construtivas existentes, tais como o concreto convencional vibrado (CCV), técnicas de construção de estradas flexíveis ou rígidas e técnicas tradicionais de construção de barragens. É um material com baixo consumo de aglomerantes e conseqüentemente com menor custo e também um menor impacto ambiental comparado com o concreto convencional vibrado.

Trata-se de um concreto seco e de consistência dura, possuindo uma trabalhabilidade que permita ser executado com equipamentos de terraplanagem, com a vantagem de ter grande disponibilidade dos insumos necessários para sua realização (cimento e agregados), logo há uma enorme facilidade de acesso ao uso dessa técnica, o que possibilita seu emprego até por pequenas prefeituras (PITTA, 1999).

O uso deste material ao longo dos anos, e devido ao sucesso nesta aplicação, o consagrou no meio das construções de barragens, sendo este uso focado grande parte como material de enchimento para promover a força peso necessária para a estabilidade das barragens de gravidade. Andriolo (1989) define que o CCR pode ser aplicado em qualquer lugar onde um concreto de consistência seca possa ser transportado, lançado e compactado utilizando equipamentos usuais em obras de barragens de terra.

Conforme a tecnologia do concreto para barragens, para a seleção do tipo de material a ser utilizado é preconizado: a durabilidade dos elementos a serem executados com o tipo de concreto; a rapidez para a confecção dos seus elementos; possibilidade de proporcionar redução nos custos; liberar calor de hidratação que não prejudique a estrutura; uma relativa impermeabilidade; e massa específica adequada para uso. Dessa forma, a tecnologia do concreto compactado com rolo está em conformidade com estes requisitos. Vale ressaltar que a escolha da técnica a ser empregada também está vinculada a fatores particulares de cada projeto, como o volume de disponibilidade dos materiais, tipos de materiais, balanceamento granulométrico, custo para a sua obtenção e seu beneficiamento, escolha do tipo de barragem, adequação do projeto a demanda de espaço das praças de trabalho, entre outros (BATISTA, 2004).

Andriolo (1989) ressalta que a partir da década de 80 o CCR causou um grande impacto no planejamento, projeto e construções de barragens, permitindo a execução de alguns projetos considerados como não viáveis economicamente. Este fato decorre das vantagens deste material como a aplicação rápida que reduz o tempo da obra e permiti reduzir do custo da obra; custo do CCR inferior ao do CCV, pois, emprega equipamentos de grande produção similares aos de barragens de terra, porém com menor volume de material mobilizado; velocidade de execução maior que de barragens de terra, podendo inclusive trabalhar durante o período chuvoso; reduz o volume de materiais mais onerosos; reduz sensivelmente o volume de formas; permite incorporar o vertedouro ao corpo do barramento; permite o galgamento na barragem; permite maior grau de mecanização se comparado ao CCV; e simplificam o canteiro de obras ao reduzir o número de frentes de serviço.

Segundo Elizabeth L. Batista (2004), o uso do concreto compactado com rolo em obras de barragens por um longo tempo foi limitado a obras de ensecadeiras, recomposição de estruturas e como material de enchimento do interior destas, estando o CCR confinado ou

envelopado por uma camada de concreto convencional vibrado usado na face da barragem. O CCR frente ao CCV, por possuir teores mais baixos de cimento tem um coeficiente de permeabilidade maior, conseqüentemente tal concreto pobre de material cimentício requer este tipo de medida de envelopamento para que seja garantida a estanqueidade da estrutura através de um invólucro menos permeável.

A gama de aplicações para o concreto compactado com rolo é bastante elevada, podendo este ser empregado em conjunto ou em substituição ao concreto convencional vibrado nas proteções de margem de canais, reservatórios e lagos, substituído o uso de gabiões ou rip-rap; pavimentação de áreas ou praças; fundações que requeiram elementos massivos e lajes de fundação; ensecadeiras; enchimentos; reparos de emergência; proteção de cristas de barragens de terra; reabilitação de barragens podendo estas ser tanto de concreto como de terra; alteamento de barragens existentes (ANDRIOLO, 1989; BATISTA, 2004).

Segundo Forbes (2008), existem projetos concluídos de barragens com alturas quase da ordem de 200 metros, como por exemplo as barragens de Miel e Longtan na Colômbia e China com alturas de 190 metros e 192 metros respectivamente. Há também o projeto em andamento da barragem de Daimer Basha no Rio Indus no Paquistão com 272 metros de altura. Forbes (2008) também ressalta que, das várias melhorias que o CCR sofreu ao longo dos anos, as duas mais importantes são a aderência entre as juntas horizontais das camadas de CCR e a qualidade final do concreto compactado com rolo visando dar acabamento para a face da barragem.

Entretanto, por ser um material com relativo pouco tempo de uso em larga escala, o CCR ainda requer maiores estudos para aferir suas peculiaridades e garantir a obtenção um melhor rendimento comparado com seu atual patamar.

Apesar da tecnologia de compactar o concreto com rolos vibratórios ter difundido antes da década de oitenta, foi com a construção de barragem de Willow Creek que foi construída a primeira barragem praticamente toda executada em CCR. Esta barragem foi construída no Estado do Oregon, nos EUA, no ano de 1982, com altura de 52 metros e 329.000 m³ de concreto (ANDRIOLO, 1989), podendo ser visualizada na Figura 2.1. De propriedade do Corps of Engineers, foi gasto cerca de 18 semanas para a conclusão dos serviços com o CCR (MEHTA; MONTEIRO, 1994), confirmando a possibilidade de obter economia e uma construção rápida.

Figura 2.1 - Barragem de Willow Creek (US Army Corps of Engineers; *http://www.nww.usace.army.mil/html/pub/pi/images/willowcr.jpg,* acessado em 19/01/2009).

Após este empreendimento centenas de barragens, tanto as de pequeno quanto as de grande porte, já foram construídas em todo o mundo utilizando esta técnica, além dos serviços de reabilitação de barragens através desse procedimento (US Army Corps of Engineers, consulta em *http://www.nww.usace.army.mil,* acessado em 19/01/2009), Graça (2005, apud KUPERMAN, 1995) relata que havia no Brasil, até o ano de 2005, 52 grandes barragens concluídas ou em andamento utilizando CCR.

O CCR por ser um concreto seco e de consistência dura, comumente comparado no meio de execução como um concreto "farofa", este não pode ter sua trabalhabilidade mensurada pelos testes usuais dos concretos convencionais ou dos concretos alto adensáveis, "slump" e "flow table" respectivamente, sendo esta trabalhabilidade definida através de ensaios próprios para o CCR, como o *Cannon Time*.

Segundo Mehta e Monteiro (1994), o CCR difere dos concretos convencionais principalmente pela forma como são garantidas as exigências quanto a sua consistência, pois, para uma compactação adequada, o CCR deve ser seco o suficiente para prevenir que o equipamento vibratório afunde, e úmido o suficiente para permitir uma distribuição adequada da argamassa de aglomerante por todo o material durante as operações de mistura e compactação por vibração. Da mesma forma, Andriolo (1989) afirma que a consistência do CCR deve ser seca

o suficiente para suportar o peso dos equipamentos empregados na compactação, entretanto a mistura deve ser úmida o suficiente para viabilizar uma distribuição adequada da pasta, assim, a consistência e consequentemente o teor de umidade a ser empregado no traço estão diretamente ligados a trabalhabilidade deste concreto.

Devido esta consistência mais seca e a forma como é realizada a compactação, o aspecto do CCR antes do processo de compactação difere da aparência do concreto após a compactação, quando passa a ser perceptível o teor de pasta frente ao volume dos agregados. Desta forma, as diferenças entre os teores de água entre o CCR e o CCV são decorrentes das diferentes energias de compactação empregadas e dos seus teores de pasta.

O conceito do concreto convencional vibrado de reduzir a relação água / cimento para maximizar a resistência não é totalmente aplicável ao concreto compactado com rolo, pois uma maior resistência advém de uma melhor compactação e esta ocorre para a mistura com umidade adequada, que tenha a capacidade de suporte para o equipamento de vibração especificado e que permita um adequado adensamento, não necessariamente uma mistura com menor teor de água. Assim a exigência pela consistência é da maior importância na seleção dos equipamentos, materiais e na especificação do traço da mistura, pois estas variáveis balizaram a trabalhabilidade desse tipo de concreto (MEHTA; MONTEIRO, 1994). É importante salientar que apesar da relação água / cimento não ser soberano para mensurar a resistência à compressão, conforme a Lei de Abrams, este ainda influência a resistência do CCR, pois para concretos com a mesma trabalhabilidade o valor desta relação pode balizar quais dos resultados tende a ser maior.

Esta trabalhabilidade deve garantir uma adequada compacidade quando o material for compactado com rolos ou outros tipos de equipamento como as placas vibratórias, de forma a assegurar que o grau de compactação do material aplicado ultrapasse 98%. Conforme Graça (2005), para valores superiores a 98% de grau de compactação, o coeficiente de permeabilidade pode chegara a $6{,}0 \times 10^{-10}$ m/s nas juntas horizontais entre as camadas de aplicação e a $7{,}5 \times 10^{-10}$ m/s nas camadas horizontais de CCR, para teores de cimento de 70 kg/m³.

2.2. POZOLANAS E A ARGILA CALCINADA

Para possibilitar uma adequada classificação da argila calcinada como pozolana é necessário compreender a utilização deste termo, assim como os processos de obtenção deste material e seus efeitos, quando usados com o cimento Portland e quando incorporados no CCR.

2.2.1. Pozolanas

A palavra pozolana, muito empregada na engenharia civil, é originária do italiano *pozzolana* ou *pozzuolana*, nome derivado da região de Pozzuoli, nas imediações do Vulcão Vesúvio, também na Itália, onde são encontradas pozolanas naturais de cinzas vulcânicas, conhecidas por cinzas pozolânicas ou *pumicite* (GUILHERMINO, 2008). Entretanto, o termo pozolana também é empregado para referir aos materiais que são resíduos industriais, como a microssílica, aos materiais derivados das cinzas volantes de processos de queima industrial e aos materiais pozolânicos oriundos de tratamento térmico como as argilas calcinadas.

As primeiras utilizações conhecidas das pozolanas datam de mais de vinte séculos, durante o Império Romano, que consistia na utilização de uma mistura de tufo vulcânico rico em sílica amorfa com cal e água. Este tufo quando finamente trituradas e misturados com cal e água produziam uma argamassa resistente e duradoura. Os materiais pozolânicos de então possuíam diversas colorações, variáveis conforme a sua origem (SANTOS, 1992).

Segundo Guilhermino (2008), através dos conhecimentos das possíveis propriedades aglomerantes das pozolanas naturais, os romanos fizeram uso alargado destas, as utilizando para confecção do *opus coementicium* (ou *cementizio*), uma argamassa obtida pela mistura de tufos vulcânicos. Este tipo argamassa constituiu um ligante suficientemente poderoso para permitir a construção de estruturas maiores que as convencionais para a época, tais como pontes, cúpulas e vigas longas, estruturas que perduram até os dias atuais.

A utilização das argamassas pozolânicas a base de tufo vulcânico caiu em desuso com a queda do Império Romano, porém foi retomada a partir do Renascimento europeu, no século XVIII, sendo relacionada com a origem dos cimentos modernos. Com a retomada do uso em larga escala das pozolanas houve a necessidade de procurar por fontes alternativas às naturais, tendo-se descoberto que vários materiais, após tratamento dos materiais iniciais, geram compostos ricos em sílica não cristalina, exibindo as mesmas propriedades de reagir sobre determinados tipos de condições (GUILHERMINO, 2008).

As pozolanas são materiais naturais ou artificiais que podem ser usados em adição ao cimento Portland para a confecção de argamassas ou concretos, resultando em produtos de menor custo e com propriedades tecnológicas superiores aos materiais correlatos sem o uso desta adição. O uso deste tipo de adição é especialmente vantajoso em grandes estruturas maciças de concreto, como por exemplo, barragens (SANTOS, 1992).

As pozolanas, segundo Silva (2007) e Taylor (1997), são todos os materiais silicosos ou silicoaluminatos, naturais ou não, reativos, predominantemente na forma vítrea, que não possuem nenhuma atividade hidráulica quando somente na presença de água. Em meio aquoso com pH elevado tornam-se solúveis e reagem com íons Ca^{2+}, proveniente da dissociação do hidróxido de cálcio (CH), e que a temperatura ambiente, promove a precipitação de compostos aglomerantes de silicatos de cálcio hidratados (C-S-H) semelhantes aos produzidos pelo cimento Portland comum. Para isso as pozolanas devem estar finamente divididas, apresentando granulometria menor que do cimento Portland.

A NBR 12653 (ABNT, 1992), descreve o material pozolânico de forma muito semelhante, tratando porém de forma diversa aos autores acima a questão de reatividade, aceitando também como pozolana materiais com uma baixa atividade aglomerante.

A reatividade de uma pozolana, assim como o grau das reações pozolânicas ocorridas em uma amostra de concreto, é influenciada por suas características físicas, suas características químicas e morfológicas, além da temperatura, da disponibilidade de hidróxido de cálcio e da umidade. Quanto maior a área superficial maior será a facilidade de esta reagir com o hidróxido de cálcio. Também é importante avaliar o grau de pureza com os enquadramentos exigidos pelos compostos químicos. O formato das partículas da pozolana, esférico ou lamelar, pode justificar certas propriedades deste material como o maior consumo de água ou diferença na trabalhabilidade. A temperatura afeta diretamente na velocidade de reação,

modificando a cinética e os produtos hidratados, assim ao elevar a temperatura durante o processo de cura do concreto a velocidade de desenvolvimento das reações pozolânicas também será aumentada. (NITA *et al.*, 2007).

Apesar de algumas pozolanas possuírem teores de Cálcio em suas composições estes não são suficientes para suprir a demanda por cálcio e caso não haja uma fonte suplementar, modernamente o hidróxido de cálcio oriundo do cimento Portland, as reações ficam muito lentas, inviabilizando desta forma o seu emprego isolado, como um aglomerante.

As pozolanas mais comuns são de cor clara, mas em função dos óxidos metálicos que contenham podem ocorrer mudanças nas colorações, variando desde o esbranquiçado até ao cinzento-escuro, incluindo tonalidades avermelhadas e rosa (SILVA, 2007).

Guilhermino (2008) classifica as pozolanas em:

- Pozolanas Naturais, constituídas por rochas consolidadas ou não, com certo grau de intemperismo e friáveis, assim como solos derivados do intemperismo de cinzas vulcânicas. Possuem uma elevada proporção de óxido de silício reativo e óxido de alumínio, podendo conter ainda óxido de ferro e outros óxido, porém com baixos teores de óxido reativo de cálcio. O teor ponderado de óxido reativo de silício deve ser superior a 25%, apresentando assim propriedades pozolânicas intrínsecas, não requerendo qualquer tipo de tratamento para atingir propriedades pozolânicas, exceto o ajuste da granulometria para atingir a finura ideal das partículas, através da conformação mecânica. São exemplos deste tipo de pozolana os tufos vulcânicos, as terras diatomáceas e os pumicitos;
- Pozolanas vulcânicas são rochas originárias do metamorfismo dos tufos vulcânicos, materiais provenientes de erupções vulcânicas ejetados na natureza, sendo constituída pela mistura de minerais vítreos e cristalinos. São exemplos deste tipo de pozolana as cinzas, tufos, pumicito e trass;
- Pozolanas naturais processadas são materiais que, após serem submetidos a tratamentos químico ou térmico adequados para alterar suas propriedades, passam a possuir a capacidade de promover reações pozolânicas. Os materiais mais utilizados são as rochas basálticas (básicas), as rochas silíceas (ácidas), solos argilosos

(montmorilonita, ilita, caolinita e nefelina), as bauxitas e as argilas calcinadas (xistos, metacaolinita e solos residuais);

- Pozolanas artificiais, são obtidas pelo beneficiamento de resíduos ou de subprodutos industriais, desde que apresentem propriedades pozolânicas intrínsecas ou latentes. Os principais tipos destes materiais são as cinzas derivadas da calcinação de materiais orgânicos ou inorgânicos (cinzas de casca de arroz, cinzas de bagaço de cana, cinzas volantes e de turfa), escórias metalúrgicas, resíduos cerâmicos e a sílica ativa.

Segundo a NBR 12653 (ABNT, 1992), as adições minerais podem ser classificadas de forma genérica em pozolanas ou cimentos latentes, sendo que ambos não têm a potencialidade prática de reagir caso misturado sozinhos à água, porém, com uma granulometria adeqüadamente fina e em uma solução com hidróxido de cálcio à temperatura ambiente, podem produzir elementos com propriedades aglomerantes. Foi adotado neste estudo a padronização da nomenclatura conforme a Associação Brasileira de Normas Técnicas, ou seja, as pozolanas de argila calcinadas recebem a nomenclatura de adição mineral. Esta definição não direciona a forma de emprego desse composto, que apesar do nome adição, seu uso neste estudo é predominantemente em substituição a parte do volume de cimento.

Essa norma brasileira também divide as pozolanas em três classes (N, C e E), conforme consta na Tabela 2.1, e define exigências químicas mínimas e máximas para que as pozolanas possam ser enquadradas nestas classificações, conforme consta nos Tabelas 2.2 e 2.3. Há uma grande semelhança entre a NBR 12653 (ABNT, 1992) e a ASTM C 618 (2003), sendo a norma da ASTM um pouco mais rigorosa nos itens de controle.

Tabela 2.1 – Classificação das pozolanas segundo a NBR 12653.

Classe	**Tipo de pozolana**
N	Pozolanas naturais e artificiais que enquadrem nas exigências da norma, podendo ser materiais vulcânicos, de caráter petrográfico ácido, "cherts" silicosos, terras diatomácias e argilas calcinadas.
C	Cinzas de carvão mineral de termelétricas que enquadrem nas exigências da norma.
E	Demais pozolanas que não enquadram nos requisitos das classes N e C, podendo haver nesta classe materiais com propriedades aglomerantes.

Tabela 2.2 – Exigências químicas para a classificação das pozolanas segundo a NBR 12653.

Propriedades	Classes de material pozolânico (%)		
	N	C	E
SiO2 + Al2O3 + Fe2O3 *	70	70	50
SO3 **	4,0	5,0	5,0
Teor de umidade **	3,0	3,0	3,0
Perda ao fogo **	10,0	6,0	6,0
Álcalis disponíveis em Na2O **	1,5	1,5	1,5

* Porcentagem mínima
** Porcentagem máxima

Tabela 2.3 – Exigências físicas para a classificação das pozolanas segundo a NBR 12653.

Propriedades	Classes de material pozolânico (%)		
	N	C	E
Material retido na peneira 45 μm **	34	34	34
Índice de atividade pozolânica:			
- resistência com cimento aos 28 dias em relação ao controle *	75	75	75
- água requerida **	115	110	110

* Porcentagem mínima
** Porcentagem máxima

Por critérios de uniformidade quanto aos materiais pozolânicos, a norma NBR 12653 (ABNT, 1992) descreve que a massa específica e a finura das amostras individuais não podem exceder 5% de variação em relação a dez ensaios consecutivos. Na Tabela 2.4 são ilustrados os requisitos facultativos que a NBR 12653 (ABNT, 1992) permite que sejam exigidos das pozolanas.

Tabela 2.4 – Exigências facultativas para as pozolanas segundo a NBR 12653.

Propriedades	**Classes de material pozolânico**		
	N	**C**	**E**
Fator múltiplo calculado como o produto da perda ao fogo pelo teor retido no peneiramento úmido da peneira n° 325 **	-	255	-
Aumento na retração por secagem de barras a 28 dias **	0,05	0,05	0,05
Reatividade com álcalis do cimento:			
- redução da expansão da argamassa há 14 dias *	75	75	75
- expansão da argamassa há 14 dias **	0,020	0,020	0,020

* Porcentagem mínima

** Porcentagem máxima

Dentre os vários tipos de materiais que apresentam potencial de promover as reações pozolânicas podem ser citados os tufos vulcânicos e pedras pomes, em especial os riolítos; os basaltos ricos em zeolítas; as argilas oriundas do intemperismo de tufos ou cinzas vulcânicas; as rochas sedimentares silicosas, como o diatomito, trípoli e folhelhos silicosos; os diatomitos; as argilas cauliníticas; argilas montmoriloníticas; argilas ilíticas, micas hidratadas; argilas de camadas mistas e com vermiculita; argilas paligorsquíticas; argilas e folhelhos calcinados. Devendo as argilas passar por tratamento térmico para produzir propriedades pozolânicas satisfatórias (SANTOS, 1992 apud MIELENZ, 1950).

Grande parte das pozolanas naturais são de origem vulcânica, geralmente de caráter petrográfico ácido (teores de SiO_2 acima de 65%), havendo também pozolanas de origem sedimentar. Muitos materiais resultantes de processos industriais, ou que apesar de não ter características pozolânicas, quando submetidos a tratamento térmico adquirem tais propriedades, recebendo através da NBR 12653 (ABNT, 1992) a nomenclatura de pozolanas artificiais. Esta reatividade é resultante de um rearranjo molecular ocasionada pela mudança dos seus compostos básicos e ao grau de energia retido em suas fases cristalográficas amorfas (VAN VLACK, 1970).

Os depósitos vulcânicos podem ter passado por processos de alteração dos seus constituintes ou estar em estado ainda não alterado. Para serem pozolânicos estes requerem ter adequado teor de vidro rico em sílica e ter porosidade adequada. As pozolanas naturais podem apresentar elevado teor de impurezas, como contaminações de argilas ou matéria orgânica, também podem ter teores de materiais não reativos que não ganham propriedades pozolânicas com aquecimento (SANTOS, 1989).

As terras diatomáceas são formadas de esqueletos de microorganismos, ricos em silício. Apesar de ter propriedades pozolânicas, seu uso é restrito devido à elevada fina, o que eleva consideravelmente o consumo de água e reduz a trabalhabilidade do concreto.

As pozolanas, nos elementos que fazem parte de sua constituição, possuem óxidos de silício e óxidos de alumínio, assim como, óxido de ferro, óxido de cálcio e anidrido sulfúrico (SO_3), sendo que o teor deste último é limitado em 5% a fim de evitar problemas de expansão devido à formação de etringita ainda nas primeiras idades (SILVA, 2007; NEVILLE, 1982).

Conforme a ASTM C 618 (2005), a soma dos elementos; óxido de silício; óxido de ferro; e óxido de alumínio deve ser igual ou superior a 70% de todos os elementos presentes nas pozolanas de *Classe N*. Esta norma ASTM também prescreve que as cinzas volantes, tidas como de Classe E pela NBR 12653 (ABNT, 1992), podem conter valores superiores a 10% de cálcio, justificando as propriedades aglomerantes destes compostos. Segundo a norma ASTM C 311 (2005), a resistência de um corpo de prova com substituição de 20% do cimento Portland pela pozolana em estudo deve atingir um valor mínimo de 75% do corpo de prova de referência, sendo esse com massa total do aglomerante a base de cimento Portland. O teor de óxido de magnésio deve ser inferior a 4% (SILVA, 2007; NEVILLE, 1982).

Segundo a NBR 5752 (ABNT, 1992), a preparação dos corpos de prova para o ensaio de caracterização quanto ao índice da atividade pozolânica com cimento, devem ser confeccionadas duas argamassas com traço diferentes, sendo um realizado tendo somente cimento Portland como material aglomerante, e outro traço com o uso de pozolana em substituição do cimento. Desta forma, seguindo a norma de determinação de atividade pozolânica com cimento, 35% do volume absoluto do aglomerante deve ser substituído pela pozolana a ser verificada.

A presença dos álcalis, sódio e potássio, dissolvidos na água dos poros, devem ser limitados em 1,5% a fim de controlar as eflorescências e a possível reação alcalí-agregado (NEVILLE, 1982). Também no sentido de garantir uma pozolana de melhor qualidade, com maiores teores de materiais pozolânicos reagentes em relação à massa dos compostos existentes nesta, o teor de carbono deve ser limitado em no máximo 5% (MEHTA; MONTEIRO, 1994). Neville (1982), contudo, descreve que o teor máximo de carbono nas pozolanas deve ser limitado em 12%.

As adições minerais têm elevados teores de óxido de silício (SiO_2) e freqüentemente também possuem óxido de alumínio (Al_2O_3), podendo apresentar outros produtos em menores quantidades. Contudo, por serem carentes de hidróxido de cálcio, as adições devem ser empregadas em conjunto com uma fonte de hidróxido de cálcio, usualmente o cimento Portland, em quantidades suficientes para que essa fonte consiga suprir a demanda por cálcio na produção dos elementos aglomerantes, como os silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), os aluminatos de cálcio hidratados e os ferro-aluminatos de cálcio hidratados (TAYLOR, 1997).

A NBR 12653 (ANBT, 1992) descreve as argilas calcinadas como material oriundo da calcinação de certos tipos de argilas entre a faixa de temperatura de 500°C a 900°C, e que apresentem reatividade com hidróxido de cálcio.

Segundo Barata *et al.* (2002), além da metacaulinita obtida pela calcinação de argilas cauliníticas este tipo de pozolana pode ser obtido pela calcinação de subprodutos da indústria da clareamento de papel.

Devido à amplitude do termo pozolana e como citado anteriormente, por essa nomenclatura ser também ser empregado para: referir aos materiais que são resíduos industriais; referir aos materiais derivados de cinzas volantes de processos de queima industrial; e referir aos materiais pozolânicos oriundos de tratamento térmico, foi convencionado para este trabalho que o uso do termo pozolana é referente aos materiais provenientes de tratamento térmico, em especial aos obtidos pela calcinação de argila.

2.2.2. Argilas e sua calcinação

Conforme Santos (1989), o termo "tecnologia da argila" é definido como a aplicação de conhecimentos científicos fundamentais sobre a estrutura, métodos de estudo e as propriedades físico-químicas das argilas e dos argilominerais quanto a suas aplicações. Definindo assim a argila como um material natural, terroso, de granulação fina, que quando misturado a uma quantidade limitada de água geralmente adquire certa plasticidade. Do ponto de vista químico as argilas são formadas essencialmente por silicatos hidratados de alumínio, ferro e magnésio. O termo *argila* não tem um significado genérico, e é empregado para uma faixa granulométrica aonde se enquadram um grupo de partículas de solo, sendo o limite desta o diâmetro inferior a 2 µm. Esta granulometria dos argilominerais pode ser resultado de intemperismo, da ação hidrotérmica ou resultado de depósitos sedimentares fluviais, aeólicos, lacustres ou marinhos.

A NBR 6502 (ABNT, 1995) determina a faixa granulométrica na qual as argilas estão inseridas, e por esse ser o material mais fino dessa escala ele possui apenas limite superior, assim a argila deve possuir grãos com dimensão inferior a 2 µm. Santos (1989) destaca que materiais compostos por partículas maiores, com ordem de grandeza acima do determinado pela norma desagregam com grande facilidade quando são dispersos em água. Neste sentido muitos estudos sobre o tema mostram que os argilominerais presentes nos sedimentos argilosos tendem a estar contidos na faixa granulométrica inferior a 2 µm de diâmetro. Assim os não argilominerais tendem a ter granulometria superior a 2 µm, justificando o emprego desse graduação das partículas como ponto de referência quanto a mudança do tipo de material entre a argila e o silte.

Segundo a ASTM D 653 (1997), a argila é a porção mais fina de um solo granular que apresenta plasticidade com adição de água e possui considerável resistência quando seca ao ar. Assim como a NBR 6502 (ABNT, 1995), esta norma da ASTM define a granulometria máxima da argila em 2 µm, porém, ao contrario da norma brasileira, prevê a existência em alguns casos de argilas com granulometria de até 5 µm. Esta também descreve que a granulometria não é a forma ideal de definir se o material é uma argila, devendo o material em estudo ser qualificado verificando as suas propriedades como a plasticidade.

Segundo Santos (1992), devido a maior disponibilidade e distribuição das argilas e dos folhelhos argilosos, estes são mais acessíveis para a utilização industrial quando comparados com as pozolanas de origem vulcânica ou de rochas sedimentares ricas em sílica. Entretanto, as matérias primas devem ser ricas em argila, visto que a atividade pozolânica após o tratamento é proporcional ao teor de certos tipos de argilominerais, como a caulinítа ou a montmorinolita.

Os argilominerais, elementos principais das argilas, são compostos por um grupo de partículas cristalinas de dimensão extremamente reduzidas de somente alguns tipos de minerais. As argilas podem tanto ser compostas somente por um tipo de argilominerais, quanto pelo somatório de vários tipos distintos destes. Possuem também teores de variados tipos de materiais e minerais, como matéria orgânica, sais solúveis, materiais não cristalinos (amorfos) e materiais particulados de quartzo, pirita, mica, calcita, dolomito e outros minerais residuais. Quimicamente, como já mencionado, os argilominerais são compostos por silicatos hidratados de alumínio e de ferro, podendo conter também teores de elementos alcalinos ou alcalino- terrosos (SANTOS, 1989).

O caulim, argila com tonalidade geralmente branca, é um elemento resultante da decomposição intempérica ou hidrotérmica de rochas feldspáticas, sendo utilizado como matéria prima ou em parte do processo produtivo em várias indústrias, como por exemplo cargas para tintas ou para o clareamento de papel. Podem ter sofrido em seu processo de formação transporte, lixiviação e sedimentação, tornando material mais fino e com maior teor de impurezas, sendo assim denominado de secundário. Caso o argilomineral não tenha sofrido nenhuma ação de transporte será denominado de primário e, ao contrario dos argilominerais secundários, possuem granulometria mais grossa, menor teor de impurezas e apresentam grades quantidades da rocha matriz. Estes dois tipos de materiais podem ser distinguidos pelos teores de óxido de titânio (TiO_2), sendo que, para as jazidas que não foram provenientes de transporte e sedimentação a quantidade deste composto é maior (SANTOS, 1989).

Além da metacaulinita obtida pela calcinação de argilas cauliníticas, este tipo de pozolana pode ser obtido pela calcinação de subprodutos da indústria da clareamento de papel, podendo obter pozolanas altamente reativas, como nos relatos de Barata *et al.* (2002), onde os resíduos reciclados representavam 26% do volume bruto extraído de caulim e após o beneficiamento e

calcinação apresentou índice de atividade pozolânica de 103% aos 28 dias com argamassa de cimento obtido segundo a NBR 5752 (ABNT, 1992).

As argilas comuns são compostas principalmente por ilita, apresentando também caulinita e montmorinolita, contendo também impurezas como calcário, quartzo, matéria orgânica, entre outros (SILVA, 1989). São usadas na fabricação do cimento Portland, sendo o material responsável por complementar a carência dos materiais calcários quanto aos teores necessários de sílica, alumina e ferro (SiO_2, Al_2O_3 e Fe_2O_3) para a produção dos compostos anidros do cimento Portland. Esses compostos argilosos e os álcalis presentes nas argilas, ao serem misturados as demais matérias primas e levados ao forno rotativo atuam como catalisadores na sinterização do clínquer, promovendo um efeito mineralizante na formação de silicatos de cálcio, assim ajudando a formação do clínquer a temperaturas consideravelmente mais baixas. Estas carências dos materiais calcários também podem ter estes teores complementados através do uso de bauxita e o minério de ferro, resultando estas incorporações, além da formação dos silicatos de cálcio, na formação de aluminatos e ferroaluminatos de cálcio (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

Para proceder a sinterização do clínquer Portland, material base do cimento Portland, deve ser calcinados a mistura íntima de materiais calcários e argilosos, sendo o processo escolhido pelas fábricas usualmente determinados pelas matérias primas disponíveis na região. Segundo Santos (1992), há várias formas de escolher as matérias primas, sendo geralmente feita em função do calcário disponível. Os demais insumos, como a argila, são escolhidos em função da composição química do calcário, assim a fabricação do clínquer Portland é um raro exemplo da utilização da argila dependendo principalmente de suas características químicas, Existe também por parte da indústria a preferência pelas argilas sedimentares, isto devido à maior probabilidade de homogeneidade, reduzindo conseqüentemente as aferições e as intervenções com controles tecnológicos.

Geralmente as argilas empregadas para a produção de pozolanas devem conter de 50% a 65% de SiO_2 e de 17% a 38% de Al_2O_3, sendo a mais reativa com a elevação do teor de Al_2O_3, o que indica que a formação de aluminatos de cálcio melhora a reatividade desse material (SANTOS, 1992).

Algumas argilas naturais possuem características pozolânicas, como a caulinita, entretanto certas caulinítas e os outros tipos de argila, que não possuem propriedades pozolânicas *in*

natura, podem após tratamento térmico normalmente variando entre de 600º C a 900º C, desenvolver propriedades pozolânicas. Assim, pelo processo de calcinação, as estruturas cristalinas dos seus argilominerais adquirem formas moleculares com estrutura amorfa o suficiente para conferir capacidade de reagir e formar compostos aglomerantes quando em solução de hidróxido de cálcio. As argilas que passam por tratamento térmico devem ter nos elementos que as compõem quantidade suficiente de silício passível de se transformar em óxido de silício, além de atender outros requisitos como impurezas (TAYLOR, 1997; SILVA, 2007).

Pode ser constatada na Figura 2.2 a forma do difratograma de uma metacaulinita, apresentando um gráfico sem picos, o que demonstra que este material não possui produtos cristalinos, logo esta pozolana é elevadamente amorfa.

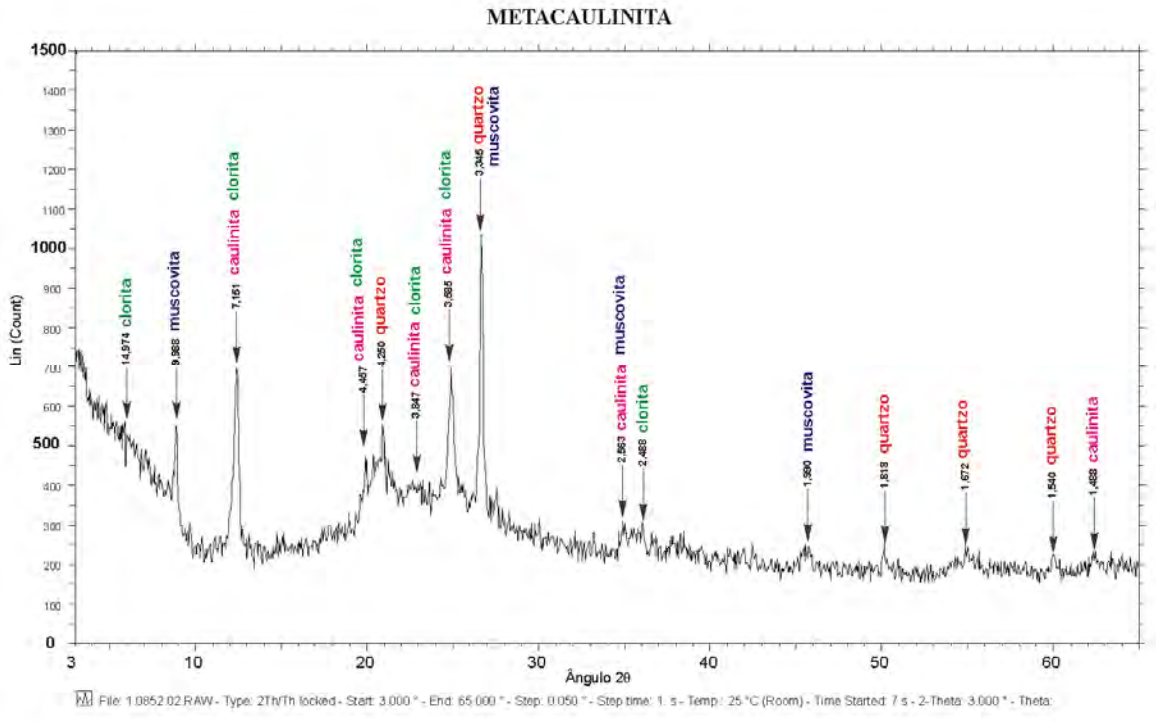


Figura 2.2 – Difratograma de uma adição mineral de metacaulinita (LIDUÁRIO, 2003).

Ao aquecer as argilas cauliníticas e os caulins, na faixa de temperatura de 600ºC a 900ºC, os íons hidroxila das suas moléculas são removidos, alterando o arranjo das moléculas que

passam do arranjo menos energético inicial para um estado amorfo, com elevado grau de energia acumulado em suas moléculas. Estas argilas após o tratamento térmico passam a ser denominadas de metacaulinita ($Al_2Si_2O_7$), elemento termodinamicamente instável responsável pela reatividade desta pozolana (SILVA, 2007; VAN VLACK, 1970).

Caso a calcinação seja realizada em temperaturas superiores a 900°C, a atividade pozolânica será reduzida, podendo tornar este material inativo se a calcinação atingir temperaturas da ordem de 900°C a 1000°C. Esta redução da atividade pozolânica ocorre pela formação de compostos cristalinos, justificando a menores taxas de reações com o uso de tijolos ou telhas moídos como adição mineral ao concreto, pois estes materiais são produzidos a temperaturas de 850°C a 950°C, quando comparadas as pozolanas de argila calcinadas, produzidas a temperatura de até 900°C. Assim a variação da reatividade em função da temperatura está correlacionada com as variações estruturais que ocorrem nos diferentes argilominerais (SANTOS, 1992).

Para a calcinação de argilas montmoriloníticas a faixa de temperatura considerada adequada para a obtenção de pozolanas também varia entre 600ºC a 900ºC, entretanto vidros formados a 1200°C também tem atividades pozolânicas. Ilitas, argilominerais de camadas mistas e vermiculítas desenvolvem atividade pozolânica entre 900°C e 950°C (SANTOS, 1992).

Para a elaboração da pozolana de metacaulinita, obtida pela calcinação de subprodutos da indústria da clareamento de papel, a calcinação deve ser realizada por 60 minutos a 750°C. Com a utilização do mesmo resíduo de Barata *et al.* (2002), Souza *et al.* (2002) relata que, ao empregar 35% da pozolana de metacaulinita obtida pela calcinação de subprodutos da indústria da clareamento de papel, em substituição a parte do volume de cimento Portland, houve um acréscimo de 40% da resistência à compressão em comparação com a argamassa de referência aos 28 dias e com relação água / cimento de 0,64; elevando a resistência de 19,2 MPa para 27,6 MPa, obtendo também 16,00 MPa aos sete dias para ensaio de reatividade com cal segundo a NBR 5751 (ABNT, 1992) e 94,15% de reatividade com o cimento Portland aos 28 dias conforme a NBR 5752 (ABNT, 1992).

Segundo Oliveira *et al.* (2006), para obter uma pozolana reativa de metacaulinita, fabricada a partir de uma argila caulinítica, com calcinação por 2 horas a 800°C e com grãos passando nas peneiras ABNT N° 325 e N° 200, com respectivas aberturas de malha de 44 µm e 75 µm, resultou respectivamente em uma pozolana com 7,5 MPa e 8,5 MPa aos sete dias para ensaio

de reatividade com cal segundo a NBR 5751 (ABNT, 1992), obtendo também respectivamente 99,0% e 99,4% de reatividade com o cimento Portland aos 28 dias conforme a NBR 5752 (ABNT, 1992). A mesma argila caulinítica, sobre as mesmas condições, calcinada a 900°C, resultou respectivamente para as peneiras ABNT N° 325 e N° 200 em uma pozolana com 8,1 MPa e 7,0 MPa aos sete dias para ensaio de reatividade com cal, obtendo também respectivamente 93,6% e 99,0% de reatividade com o cimento Portland aos 28 dias.

Foi obtida com o uso dessas adições minerais, em substituição de 30% de parte do volume de cimento Portland, sendo esta pozolana de metacaulinita calcinada a 800°C com diâmetro das partículas de 44 µm, resistência de 67 MPa, houve assim um acréscimo de 31% da resistência em comparação com a argamassa de referência. Com o uso da adição mineral, em substituição de 40% de parte do volume de cimento Portland, sendo esta pozolana de metacaulinita calcinada a 900°C com diâmetro das partículas de 75 µm, resistência de 63 MPa, houve assim um acréscimo de 24% da resistência em comparação com a argamassa de referência (OLIVEIRA *et al.*, 2006).

Souza *et al.* (2002) também ressaltam a necessidade de observar as composições químicas das matérias primas a serem calcinadas, adequados processos de calcinação e moagem para obter uma pozolana reativa, devendo também prever um traço adequadamente dimensionado para atender as diferenças físicas impostas pela adição mineral ao desempenho do concreto, como o uso de aditivos superplastificantes para combater o maior consumo de água.

Desta forma, pela forte influência ocasionada pela temperatura, pelas condições de calcinação, pela finura da pozolana após a calcinação, bem como pelas características químicas das matérias primas a serem calcinadas, que dependem da natureza e da abundância dos argilominerais, devem ser tomadas medidas de controle que garantam a uniformidade, a qualidade dos compostos empregados como matérias primas, as técnicas empregadas para o beneficiamento e o controle dos produtos obtidos após a calcinação (SOUZA *et al.,* 2002; OLIVEIRA *et al.*, 2006).

2.2.3. Adição de pozolanas ao cimento Portland

A pozolana é um dos componentes usados nas fabricações do cimento Portland composto (CP II - Z), cimento Portland pozolânico (CP IV) e na preparação de argamassas pozolânicas. Desta forma, devido as possíveis alterações das cores das pozolanas a serem empregadas a tonalidade do cimento pode sofrer variações.

O cimento Portland composto é um aglomerante formado pela mistura de uma parte do material proveniente do clínquer Portland e por outros materiais inorgânicos que contribuem significativamente para a obtenção dos produtos de hidratação. Estes materiais inorgânicos são as adições minerais, que podem ser incorporadas no cimento no momento da fabricação ou ser usadas no traço do concreto no momento do uso. As adições mais importantes são as escórias de alto-forno, cinzas volantes, pozolanas naturais ou calcinadas, sílica ativa e cinza da casca de arroz. As adições que são usadas para a fabricação do cimento Portland composto são as pozolanas, as escórias de alto-forno e o fíler calcário.

Os cimentos compostos são justificáveis por razões técnicas e econômicas, pois, com a substituição de parte do cimento pelas adições minerais, algumas propriedades do concreto são melhoradas, como por exemplo, a resistência a sulfatos e cloretos, diminuição da suscetibilidade as reações alcalí-agregado, menores quantidades de liberação de calor na hidratação dos compostos aglomerantes, ganhos de resistência mecânica, refinamento dos poros da matriz cimentícia (LIDUÁRIO, 2003), redução da permeabilidade, melhoria da trabalhabilidade no estado fresco, aumento da durabilidade, entre outras propriedades que também serão estudadas (TAYLOR, 1997; SILVA, 2007; MEHTA; MONTEIRO, 1994).

Segundo Chengzhi (1996), para a pasta fresca de concreto convencional, a água utilizada para o amassamento do concreto pode ser dividida em duas partes. Uma é a água que preenche os vazios entre as partículas sólidas, enquanto a outra é a água adsorvida na superfície das partículas. A água nos poros das partículas sólidas não contribui para a fluidez do concreto, já a água adsorvida forma um filme na superfície das partículas e quanto mais espesso for este filme mais fluido será o concreto. Com o uso de adições pozolânicas, por estas terem menores diâmetros que o cimento Portland, os vazios entre as partículas será menor, assim reduzindo a água que preenche os vazios entre as partículas. Porém, devido a maior área específica

decorrente deste menor diâmetro das partículas das pozolanas, há um aumento da água adsorvida. Caso essa elevação da água adsorvida seja maior que a redução da água entre as partículas, obrigará a incorporação de mais água de amassamento para garantir a mesma trabalhabilidade do concreto.

Este possível aumento do consumo de água devido a maior área específica das adições pozolânicas pode ser combatido com o uso de aditivos redutores de água, sendo que esses reduzem a quantidade de água adsorvida na superfície das partículas constituintes do concreto. Contudo os aditivos redutores de água têm sua ação limitada, não conseguindo reduzir da quantidade de água presente nos poros, dentro das partículas do traço do concreto, sendo assim limitada a redução da relação água / cimento para um traço utilizando como aglomerante somente o cimento Portland a um mínimo de 0,36. Caso seja empregadas adições pozolânicas em conjunto com o cimento Portland, por as pozolanas reduzirem a água nos poros, enquanto o aditivo redutor de água diminui a água adsorvida, pode ser atingido um fator / cimento de no mínimo 0,29. Desta forma, o emprego de adições pozolânicas associado ao emprego de aditivos superplastificantes permite atingir valores muito mais baixos para a relação água / cimento quando comparados com concretos que empregam em sua formulação somente cimento Portland com aditivos superplastificantes (CHENGZHI, 1996).

Assim pode ser explicada a melhoria da trabalhabilidade, decorrente do uso das adições pozolânicas, através deste refinamento da pasta e com o aumento da água adsorvida da superfície das partículas, aumentando a quantidade e possivelmente a espessura do filme de água adsorvido pelas partículas, sendo que através do uso de aditivos redutores de água podem ser atingidos menores valores de consumo de água para os mesmos valores de trabalhabilidade e conseqüente menor demanda de água. Caso sejam mantidos os teores empregados de água ao comparar dois traços de concreto com o uso de aditivos redutores de água, um utilizando como aglomerante cimento Portland e adições pozolânicas enquanto outro somente cimento Portland, por o traço com adições pozolânicas, com o uso de aditivos redutores de água, ter uma capacidade maior de reduzir a demanda de água, este traço apresentará uma trabalhabilidade superior ao traço que utilizasse somente cimento Portland como aglomerante. Com esta condição de teor constante da água, a melhoria nesta propriedade provavelmente terá um ponto ótimo, a partir do qual o acréscimo de adições prejudicaria a trabalhabilidade.

Silva (2007) recomenda que o diâmetro das partículas das adições minerais seja inferior a 35 μm, menor que o diâmetro médio das partículas de cimento Portland, em média 50 μm. Como já citado esta redução promove o refinamento da pasta e redução do tamanho dos poros. Segundo Nita *et al.* (2007), este refinamento dos poros também gera um efeito fíler por provocar uma densificação da região da zona de transição, principalmente nas primeiras idades, quando ainda é baixo o índice das reações pozolânicas e este material pozolânico ainda não completou suas reações. Assim, por ser mais fino que o material cimentício, as adições atuam como elemento físico, através de um melhor empacotamento, para promover melhores propriedades deste material quando comparado a um concreto sem o uso de adições minerais. Andriolo (1989) também elucida que o emprego de adições pozolânicas conduz ao preenchimento dos vazios promovendo um efeito fíler.

Analogamente aos agregados graúdos e miúdos, as adições e seu efeito fíler no período que antecede as reações pozolânicas, podem ser comparados a um agregado com granulometria mais fina que do agregado miúdo, que colmataria fisicamente os poros da matriz enquanto as reações não são processadas. Após as reações pozolânicas serem concluídas este efeito fíler permanecerá através dos produtos de hidratação destas reações (C-S-H).

Outra importante propriedade das adições pozolânicas que podem melhorar as propriedades dos concretos é o baixo calor de hidratação liberado na hidratação do cimento Portland com as adições, esta propriedade advém da hidratação lenta da reação pozolânica, assim, como as reações são processadas gradualmente, o calor das reações exotérmicas também é liberado de forma mais gradual (MEHTA; MONTEIRO, 1994). Logo, com a substituição de parte do cimento por pozolana, serão obtidos concretos que têm menor resistência inicial quando comparado com concreto de referência, sem adições. Esta desvantagem desaparece após cerca de 90 dias de cura, obtendo-se então, resistências cerca de 10% a 15% superiores a dos concretos de referência com características semelhantes nas suas formulações (SILVA, 2007).

Segundo Cizer (2006), é crucial para entender o mecanismo de endurecimento dos cimentos compostos com pozolanas, compreendendo as alterações que as pozolanas causam no progresso de hidratação do cimento e nos compostos hidratados resultantes. Cizer (2006) ainda ressalta que o mecanismo de endurecimento é uma reação combinada composta pela hidratação do cimento e da reação pozolânica, o que é complexo, pois essas seguem vários diferentes processos de reações com taxas de evolução distintas. Assim, uma nova fase de

compostos hidratados é formada pela reação da pozolana com o hidróxido de cálcio, composto liberado pela hidratação do cimento Portland. Esta reação pozolânica, que requer um tempo maior para proceder do que a hidratação do cimento, geralmente se inicia entre 3 dias a 14 dias após o início da hidratação do cimento Portland.

Mehta e Monteiro (1994) atribuem este ganho de resistência ao refinamento dos poros decorrentes das reações pozolânicas e ao aumento da quantidade de C-S-H e outros produtos de hidratação advindos do consumo do CH. A conversão desta substância deletéria em elementos com capacidade de aglomerar melhora a região da pasta de cimento do concreto e também a zona de transição, reduzindo a quantidade e os diâmetros dos vazios capilares. Assim, além da melhoria da resistência do concreto, a permeabilidade também é reduzida, tornando o concreto mais impermeável. Esta menor permeabilidade associada com menores quantidades de hidróxido de cálcio, substância deletéria, eleva a durabilidade do concreto com adições pozolânicas.

Segundo Chengzhi (1996), o uso de pozolana altera o empacotamento do sistema, modificando a estrutura dos poros ao reduzir o número dos poros de diâmetro maiores e aumentando o número de poros com diâmetro menores, sendo que esta mudança é função da maior finura das adições minerais pozolânicas, ou seja, quanto menor for o diâmetro da pozolana maior será o refinamento dos poros. Desta forma, com este refinamento dos poros, também estará sendo reduzido a permeabilidade e elevando a resistência à compressão.

Há também a possibilidade de reduzir os custos através dessa substituição de parte do cimento Portland, material mais oneroso e que agride mais o meio ambiente para a sua produção, por materiais menos "nobres", conseqüentemente menos onerosos e com um passivo ambiental menor, podendo inclusive esse ser rejeitos de outras indústrias que, beneficiados, podem ser incorporados no cimento sem prejuízos para o concreto ou até melhorando suas propriedades. Essa substituição ainda resolve um passivo ambiental ao reduzir o consumo de energia, diminuir a emissão de CO_2 e promover a reciclagem de subprodutos de outras indústrias.

De forma geral, nas reações de hidratação dos compostos constituintes das pozolanas são produzidos em menor escala aluminatos e silicoaluminatos, esses decorrentes dos teores de óxido de alumínio nos compostos que dão origem as adições (TAYLOR, 1997). Contudo, conforme Silva (2007), pozolanas naturais ou decorrentes de argilas calcinadas, assim como as cinzas volantes (ISAIA, 1995), apresentam grandes porções de alumina reativa, o que

propicia o surgimento de reações secundárias de formação de compostos aglomerantes, ocorrendo nestes casos a formação de aluminato de cálcio hidratado (C-A-H).

Neste mesmo sentido, Isaia (1995) em seus estudos em concreto de elevado desempenho com incorporação de grandes teores de adições de cinzas volantes, microsílica e cinzas de casca de arroz, obteve respectivamente valores de óxido de alumínio nas amostras estudadas de 27,70%; 1,80%; e 2,30%; sendo para o cimento encontrado teor de 5,80%.

2.2.4. Efeitos da pozolana no CCR

De uma forma geral, durante as reações de hidratação do concreto, nas primeiras idades, as pozolanas reagem com o hidróxido de cálcio, esse liberado pela reação do cimento Portland com a água. Assim há a formação de produtos aglomerantes similares aos deste cimento, porém com relação Cálcio / Sílica ligeiramente menor. Há também grandes semelhanças, entre as pozolanas naturais e as cinzas volantes, sendo similares os seus elementos químicos e as suas fases. Isto sugere que serão obtidos os mesmos produtos após as reações, porém com taxas de desenvolvimento das reações diferentes entre os elementos (TAYLOR, 1997; SILVA, 2007).

Segundo Taylor (1997), em um estudo comparativo entre cinco pozolanas e três cinzas volantes, a taxa de hidróxido de cálcio entre 3 dias e 60 dias foi maior para as cinzas, entretanto esta taxa foi a mesma aos 90 dias, o que sugere que a velocidade das reações que formam os compostos aglomerantes das pozolanas é maior que das cinzas volantes nas primeiras idades, porém menor em idades avançadas.

Ao contrário do concreto convencional vibrado, para as misturas mais secas como o concreto compactado com rolo há uma tolerância maior para o uso de materiais com partículas mais finas que a malha n° 200 e certos materiais friáveis. Contudo devem ser evitados materiais e/ou minerais que venham a provocar expansões ou reações incontroláveis. Esse emprego de materiais mais finos é permitido, pois, em certos níveis elevam o teor de pasta e consequentemente, desde que adequadamente dosados, pode melhorar as propriedades do

concreto como a resistência à compressão. Essa tolerância a materiais mais finos permite inclusive reciclar o rejeito da moagem de areias artificiais. Nesse mesmo sentido, como os requisitos de resistência à compressão para barragens geralmente é baixo, o emprego de materiais friáveis ou deletérios são mais toleráveis (ANDRIOLO, 1989).

As adições minerais também influenciam a viscosidade e a coesão do concreto no estado fresco, especialmente se a finura da adição for maior que a do cimento, esta de aproximadamente 50 μm, sendo para as adições recomendado uma finura, da maior parte das partículas, da ordem de 35 μm ou com uma área específica medida pelo método Blaine de 300 m^2/kg (SILVA, 2007).

O consumo de água também é influenciado pela finura das partículas das adições minerais, e assim como no caso dos agregados, este consumo também sofre influência da forma e quantidade de adição empregada em relação à massa de cimento. Assim, ao elevar a área específica, elevar o volume empregado e/ou elevar a finura das adições empregadas, cada alteração de forma isolada ou em conjunto, o consumo de água será maior para manter as mesmas propriedades reológicas de um concreto sem essas alterações.

Farias *et al.* (2003) descrevem que o aumento do teor de materiais finos no CCR pode melhorar a trabalhabilidade, a permeabilidade e o grau de compactação deste. O emprego de grandes quantidades de adições minerais, em acréscimo ao teor de pasta, podem reduzir de forma significativa a permeabilidade do CCR, sendo os melhores resultados dos experimentos, dispostos em ordem crescente de permeabilidade, obtidos com as adições de escória de alto-forno, cinzas volantes, argilas calcinadas (com ordem de magnitude de 4×10^{-11} m/s - comparável a concretos convencionais) e cinzas de casca de arroz / sílica ativa (com ordem de magnitude de $2{,}7 \times 10^{-10}$ m/s). As adições de metacaulinita e agregado pulverizado, nos teores de 16 kg/m³ e 100 kg/m³ respectivamente, também reduziram a permeabilidade do CCR, entretanto para teores menores de acréscimo dessas adições a permeabilidade do concreto aumentou, atingindo valores de $4{,}7 \times 10^{-9}$ m/s para a adição de 40 kg/m³ de agregado pulverizado e $4{,}8 \times 10^{-10}$ m/s para a adição de 8 kg/m³ de metacaulinita. O concreto usado como referência, sem adições, obteve uma permeabilidade de $4{,}8 \times 10^{-10}$ m/s.

Conforme Liduário *et al*. (2003), em um estudo sobre adições de escória, sílica ativa, metacaulim, cinzas de casca de arroz, pozolanas de argila calcinada, cinzas volantes e

agregado pulverizado empregadas no concreto compactado com rolo observaram que, as adições de argila calcinadas proporcionam maiores reduções no tempo do ensaio *Cannon Time*, caracterizando um melhor ganho de trabalhabilidade que as demais adições para este tipo de concreto.

Segundo Andriolo (1989), o CCR difere dos concretos convencionais vibrados ao permitir o uso de elevados teores de adição, contudo, esse autor afirma que estes altos teores não interferem na trabalhabilidade, contrastando com Liduário *et. al*. (2003), Farias *et al.* (2003), e com os resultados obtidos neste estudo.

Farias *et al.* (2003), em estudos com o CCR, concluíram também que, para o agregado pulverizado com teores de 40 kg/m³ e 50 kg/m³, além de piorar a permeabilidade não apresentaram uma microestrutura, segundo ensaios de microscopia eletrônica de varredura, mais densa comparada ao concreto de referência. Entretanto, uma microestrutura mais densa que a do concreto de referência pode ser constatada nos CCR executados com elevados teores de agregado pulverizado (60 kg/m³, 80 kg/m³ e 100 kg/m³), teores de argila calcinada de 40 kg/m³ e 60 kg/m³, teores de cinzas volantes e escória de alto-forno de 40 kg/m³ e 60 kg/m³ e teores de sílica ativa e cinzas de casca de arroz de 8 kg/m³. Segundo esses ensaios a zona de transição entre o agregado e a matriz cimentícia, para as adições pozolânicas de argila calcinada, tem uma melhora em relação ao concreto de referência, contudo, o grau dessa melhora é pouco significativa com o aumento dos teores da adição pozolânica incorporadas ao concreto, entretanto, diferentemente nas adições de sílica ativa, cinzas de casca de arroz, escória de alto-forno e cinzas volantes, que apresentam melhorias da zona de transição com a elevação dos teores de adições a serem incorporados.

Outro fator observado por Silva (2007) foi que, devido ao maior volume de finos, a segregação do concreto no estado fresco e a exsudação do concreto durante o processo de endurecimento são reduzidas, desta forma, para concreto com teores mais elevados de finos há um maior risco de fissuração ocasionado pela retração do concreto no momento da secagem, conseqüentemente a cura para os concretos com adições é de vital importância.

Segundo Mehta e Monteiro (1994), a resistência à compressão para concretos com uso de determinadas adições também é melhorada, sendo, segundo Silva (2007), as pozolanas de cinzas de casca de arroz, sílica ativa e o metacaulim as que mais elevam esta propriedade. Esse acréscimo na resistência mecânica é atribuído ao refinamento dos poros e a melhoria da

zona de transição. Conforme Isaia (1995), o uso das pozolanas no concreto, através do consumo de hidróxido de cálcio, reduz a reserva alcalina e promove o refinamento dos poros pela conversão do hidróxido de cálcio lixiviável por produtos aglomerantes insolúveis, reduzindo assim a permeabilidade da pasta e reduzindo também a penetração de oxigênio, de dióxido de carbono e de íons cloreto, o que aumenta consideravelmente a durabilidade do concreto.

Através dos estudos de Liduário *et. al.* (2003) também foi observado, conforme os relatos de Taylor (1997), Silva (2007) e Mehta e Monteiro (1994), que concretos com o emprego de escória de alto-forno, sílica ativa, cinza volante e pozolanas de argila calcinada, todas as adições em acréscimo ao teor de cimento do concreto de referência, esse sem nenhum teor de adição, apresentaram melhores resultados de resistência à compressão do que o concreto de referência, sendo esta evolução da resistência proporcional ao aumento do teor de adição incorporado ao concreto compactado com rolo. Para estas adições minerais, com 90 dias de cura, foram obtidos valores de resistência à compressão para a: escória de alto-forno de 19,7 MPa e 32,7 MPa para teores de 100 kg/m³ e 200 kg/m³ respectivamente; pozolana de argila calcinada de 17,0 MPa para teor de 100 kg/m³; cinza volante de 15,7 MPa para teor de 100 kg/m³; agregado pulverizado de 8,5 MPa para teor de 100 kg/m³; sílica ativa de 9,7 MPa para teor de 8 kg/m³; cinza de casca de arroz de 9,9 MPa para teor de 8 kg/m³; metacaulim de 6,4 MPa para teor de 8 kg/m³. Obtendo o concreto de referência resistência à compressão de 5,9 MPa, para a mesma idade de cura.

Esta conclusão de Liduário *et al.* (2003) diverge de Farias *et al.* (2003) que relatam, como citado anteriormente, que há melhoria na zona de transição para o uso de adições de pozolanas de argila calcinada, porém com o aumento dos teores não haveria melhorias significativas. Já Liduário *et al.* (2003) concluem que com o aumento dos teores da adição pozolânica de argila calcinada há acréscimos na resistência do CCR.

Entretanto, nos estudos de Liduário *et al.* (2003) sobre a influência de adições pozolânicas e minerais no CCR, as adições de cinzas de casca de arroz e metacaulinita nos teores adotados contribuíram para a melhoria da resistência somente em alguns dos teores empregados, 8 kg/m³ e 16 kg/m³ respectivamente. Para um teor de 4 kg/m³ de metacaulinita houve uma redução da resistência de 8,5% comparado ao concreto de referência e para os teores de 40 kg/m³, 60 kg/m³ e 80 kg/m³ de agregado pulverizado houve uma redução da resistência de

10,2%, 14,6% e 5,0%, respectivamente. Possuindo, como citado anteriormente, o concreto de referência uma resistência à compressão de 5,9 MPa para a idade de 90 dias de cura.

Esta informação de Liduário *et al.* (2003) contrapõe Silva (2007), com estudos sobre cimento Portland com adições minerais e Traboulsi *et al*. (2003), com estudos sobre concreto convencional vibrado com os mesmos tipos de adições, aonde para o CCV as adições de cinzas de casca de arroz e metacaulinita obtiveram os melhores resultados de resistência à compressão. Liduário *et al.* (2003) relatam também que o agregado pulverizado não possui propriedades pozolânicas, melhorando de forma discreta a resistência à compressão e de forma moderada a trabalhabilidade apenas pelo efeito fíler.

Essa melhoria da resistência através do uso das adições minerais é atribuída a atividade pozolânica que adensa a matriz cimentícia, associada ao efeito fíler que promove o preenchimento dos poros por meio do teor de finos acrescentados ao concreto, tendo este teor a capacidade de influenciar amplamente a resistência do concreto (SABIR *et. al.,* 2001). Essa justifica desse incremento na resistência do concreto através do uso das adições está em consonância a Mehta e Monteiro (1994) e Taylor (1997), descrevendo esses autores que o ganho de resistência decorreria do refinamento dos poros por incorporação do material pulverulento e da melhoria da matriz cimentícia pelo aumento da quantidade dos produtos aglomerantes da microestrutura do concreto (C-S-H).

Todavia deve ser observado que no estudo de Liduário *et al.* (2003) os teores das adições foram incorporados ao concreto somando suas quantidades ao teor de cimento previsto no traço. Neste estudo, ao contrário, os teores da adição de argila calcinada serão incorporados ao concreto em substituição a parte do volume de cimento previsto inicialmente pelo traço, simulando assim o impacto desta substituição no CCR com maior precisão.

Também foram estudados traços com o uso da adição pozolânica de argila calcinada em adição ao volume de cimento Portland de referência. Este complemento ao estudo servirá pra validar a eficácia da adição quando acrescida ao volume de aglomerante e também poderá servir como referência para definir possíveis novos traços, esses mais ricos que o adotado neste estudo.

Desta forma, por a substituição neste estudo ser realizada em volume, a quantidade de produtos aglomerantes por metro cúbico não será alterada, assim poderá ser avaliado a

influência desta substituição e sua potencialidade de utilização. Ocorrerá, entretanto, uma modificação na densidade final do concreto pela troca de parte do cimento pela adição, pois estes elementos têm densidades diferentes. Segundo Chengzhi (1996), a densidade das pozolanas oscila entre 2 000 kg/m³ a 2 400 kg/m³, aproximadamente de 65% a 77% da densidade do cimento Portland.

Caso esta substituição fosse realizada em relação à massa da pozolana de argila calcinada pela massa de cimento, analogamente como descrito para a modificação na densidade final do CCR, a diferença de densidade entre o cimento Portland e a pozolana conduziria a uma alteração entre os volumes empregados pelos aglomerantes nos diferentes traços, promovendo diferenças entre os volumes dos aglomerantes empregados para todos os concretos com substituição e também para o CCR de referência sem substituição.

Com as respectivas variações das propriedades do CCR quanto aos diferentes teores propostos de adições de argila calcinada, pôde ser quantificado a real interferência da metodologia adotada neste estudo, dos materiais especificados e dos teores empregados quanto a um exemplar de concreto de referência sem adições, atingindo um teor ótimo de substituição do cimento pela pozolana em estudo para algumas das propriedades analisadas.

2.2.5. Efeitos dos agregados no CCR

O estudo e a compreensão das características dos agregados são fundamentais para uma boa compatibilização desses com os demais insumos, permitindo assim a concepção de um traço que confeccione um concreto de qualidade. Essa ligação, entre um concreto adequado as necessidades previstas e o conhecimento dos agregados, advém das interferências que os agregados podem provocar nas propriedades no estado fresco do concreto ou durante o seu ganho de resistência, sofrendo o concreto nesses dois estados grandes influências da massa específica aparente, da porosidade, da composição granulométrica, da forma e da textura dos agregados.

Conforme a NBR 7211 (ABNT, 1983), os agregados devem ser compostos de grãos de minerais duros, compactos, duráveis e limpos, não devendo conter impurezas em quantidade que afetem as propriedades ou durabilidade do concreto no estado fresco ou endurecido.

Embora a resistência dos agregados não seja um parâmetro limitador na resistência do CCR, outros fatores intrínsecos desse material, como a granulometria e fator de forma, podem afetar significativamente a quantidade de água e pastas a serem empregadas, e assim como a trabalhabilidade, interferir na resistência e na qualidade do CCR.

Características como a resistência, compressibilidade e sanidade do concreto, no estado endurecido, são afetadas pela composição mineralógica do agregado e pela porosidade. O consumo de cimento Portland também é afetado por características dos agregados, sendo vinculada a superfície específica e a porosidade desses (FARIAS; PALMEIRA, 2007). Outro fator importante a ser analisado durante a especificação do tipo de agregado graúdo a ser empregado é o tipo litológico desse, onde, segundo estudos de Batista e Graça (2007), características como resistência à compressão, impermeabilidade, módulo de deformação e massa específica são fortemente influenciados por essa característica.

Concretos produzidos com agregados de micaxisto apresentam praticamente todas suas propriedades inferiores aos concretos executados com rochas calcárias ou graníticas, tais como resistência à compressão, massa específica e módulo de deformação, exceto pela permeabilidade, que é menor para os CCR produzido com rochas oriundas de micaxistos. Rochas calcárias e graníticas apresentaram bons valores nos ensaios de caracterização do concreto para uso como agregado para o CCR, sendo as rochas calcárias melhores que as graníticas (BATISTA; GRAÇA, 2007).

A maior parte das características dos agregados é oriunda da rocha matriz donde eles foram beneficiados. A microestrutura da rocha matriz, e conseqüentemente dos agregados, dependem da porosidade da rocha sã, sua massa específica, composição mineralógica e grau de intemperismo sofrido pela rocha.

O emprego de materiais mais finos presentes nos agregados graúdos permite a simplificação dos métodos produtivos ao evitar etapas necessárias para a limpeza desses insumos, reduzindo o custo de produção dos agregados para o CCR comparado ao custo dos agregados para o CCV. Segundo Andriolo (1989), os teores de finos a serem empregados no CCR variam entre

5% e 15%, contudo, Batista (2004) após estudar diversos teores de adição de materiais pulverulentos, obtidos de três tipos de rochas, concluiu que os teores de materiais pulverulentos mais adequados foram de 10% para o CCR produzido com agregados provenientes de rocha granito e 20% para o CCR produzido com agregados provenientes das rochas calcárias e micaxisto.

Os agregados também são influenciados pelos processos de fabricação, ou seja, a forma de extração da rocha a ser britada, o tipo de britador empregado para o beneficiamento da rocha extraída em agregado, dentre outras. Mehta e Monteiro (1994) classificaram os agregados em três grupos: características que dependem da porosidade como a massa específica aparente, absorção de água, resistência, módulo de elasticidade e sanidade; características que dependem da composição mineralógica e química como a resistência, módulo de elasticidade, substâncias deletérias presentes e cargas elétricas; e características que dependem das condições de beneficiamento e propriedades *a priori* do material como o tamanho, textura e a forma dos agregados.

Os grãos de areia devem ter preferencialmente diâmetro que permitam quase totalmente a passagem na peneira 4,75 mm e sejam retidos em sua maior parte na peneira 0,075 mm, conforme a NBR MN 52 (ABNT, 2003), ter formato preferencialmente cúbico ou arredondado a fim de não interferir na relação da trabalhabilidade, no consumo de água e de aditivo. Não devem também apresentar películas aderentes, presença de duros, de densos e ser resistentes e isentos de substâncias deletérias.

Para uma adequada distribuição granulométrica, além de obedecer a curva de *Fuller,* deve ser observado a escolha do diâmetro máximo dos agregados graúdos, o teor de pulverulentos e a adição de finos. O uso de granulometrias da ordem de 76 mm conduz a custos elevados para promover a mistura dos insumos, manuseio e prevenção da segregação. Entretanto, apesar da maior tendência à segregação no lançamento para o CCR com agregados de diâmetro maior que 38 mm, há uma economia de aproximadamente 15% do volume de cimento ao elevar o diâmetro do agregado de 38 mm para 76 mm. Desta forma, para determinar o diâmetro máximo a ser adotado deve ser quantificado o custo para processar estes materiais, o custo para beneficiar/lançar o CCR e o custo da economia proporcionada por cada diâmetro. Também deve ser levado em consideração o custo / benefício ao CCR de empregar

separações das frações granulométricas dos agregados, utilizado mais de um tipo de fração de agregado para compor uma curva mais adequada à curva de *Fuller* (ANDRIOLO, 1989).

Alguns fatores delimitam as viabilidades técnicas e econômicas para o emprego dos agregados, assim como as suas corretas quantidades, visando um bom desempenho dos seus produtos quanto à aplicação e a durabilidade. Estes fatores são os índices físicos, sendo os índices mais importantes empregados para balizar os agregados quanto ao seu uso em traços de concreto: a granulometria; a porosidade aparente; a massa específica; a absorção; e a umidade (FARIAS; PALMEIRA, 2007).

CAPÍTULO 3
PROGRAMA EXPERIMENTAL

Adotou-se neste trabalho, a fim de facilitar o acesso às informações do texto, o procedimento de dividir o programa experimental em cinco tópicos centrais. O primeiro trata das variáveis dependentes e independestes envolvidas no estudo. O segundo tópico aborda os materiais empregados, caracterizando os elementos constituintes do CCR conforme determinam as normas. No terceiro tópico estão definidos os parâmetros a serem adotados para os concretos especificados de forma a poderem quantificar as interferências do método proposto no concreto compactado com rolo.

O quarto tópico revisa as técnicas e métodos relacionados com o concreto em estudo e a determinação de suas propriedades, definindo as formas de amostragem para os ensaios do CCR, idades de avaliações, tipos de ensaios a serem realizados e características a serem mensuradas. O quinto tópico aborda a dosagem do CCR estudado, sendo o traço concebido pelo método de dosagem empregado por FURNAS, este com encaixe da curva granulométrica dos agregados miúdo e graúdos segundo a Curva de *Fuller*.

3.1. VARIÁVEIS

Para controlar a qualidade do concreto e certificar a eficácia da moldagem dos corpos-de-prova, foi realizada a aferição do traço inicialmente proposto, antes da sua efetiva utilização, quanto ao requisito da trabalhabilidade, ajustando a dosagem de referência, permitindo assim usar um concreto mais adequado para este estudo.

Para atingir o objetivo principal desta pesquisa, verificando a viabilidade de substituir parte considerável de cimento Portland por pozolana de argila calcinada, foi necessário reduzir e discretizar ao máximo as variáveis que poderiam interferir no resultado esperado. Dessa forma, todos os materiais empregados foram criteriosamente selecionados e caracterizados para reduzir a influência de variáveis e obter resultados representativos ao estudo proposto.

Os métodos propostos também foram determinados objetivando parametrizar melhor as propriedades e as variáveis do concreto estudado, de forma que este alterasse seu comportamento quando houvesse a substituição do cimento proposto pela pozolana especificada, respeitando as limitações impostas pelo material e as interferências passíveis de ocorrer nos ensaios. Podem ser observadas no fluxograma, apresentado na figura 3.1, as atividades desempenhadas na pesquisa.

Visando poder aferir o real desempenho da adição pozolânica de argila calcinada quando empregada no CCR, tanto em substituição quanto em adição ao volume de cimento Portland, foram arbitradas as variáveis independentes:

- ***Teor de pozolana em substituição parcial ao cimento em volume:*** referência (sem pozolana), 35%, 50%, 65% e 80%;

- ***Teor de pozolana em adição ao cimento em volume:*** referência (sem pozolana), 35% e 50%;

- ***Idade de avaliação:*** 90 e 180 dias aplicáveis aos traços com substituição parcial do cimento por pozolana e 90 dias para os traços com adição de pozolana ao cimento. Para os ensaios de resistência à compressão e ultrassom houve também a idade de 28 dias para os teores de adição e de substituição parcial.

As variáveis dependentes foram os ensaios determinados para aferir o desempenho da referida adição no CCR, sendo estes a resistência à compressão simples, resistência à tração por compressão diametral, permeabilidade à água, absorção de água por capilaridade, absorção de água por imersão e ultrassom. Todos os demais fatores foram mantidos e tomados como constantes, como, por exemplo, tempo de vibração *Cannon Time*, o volume de água empregado nos traços, dos agregados miúdo e graúdos, a temperatura de moldagem, a temperatura e a umidade da câmara úmida durante a cura dos concretos especificados, dentre outros.

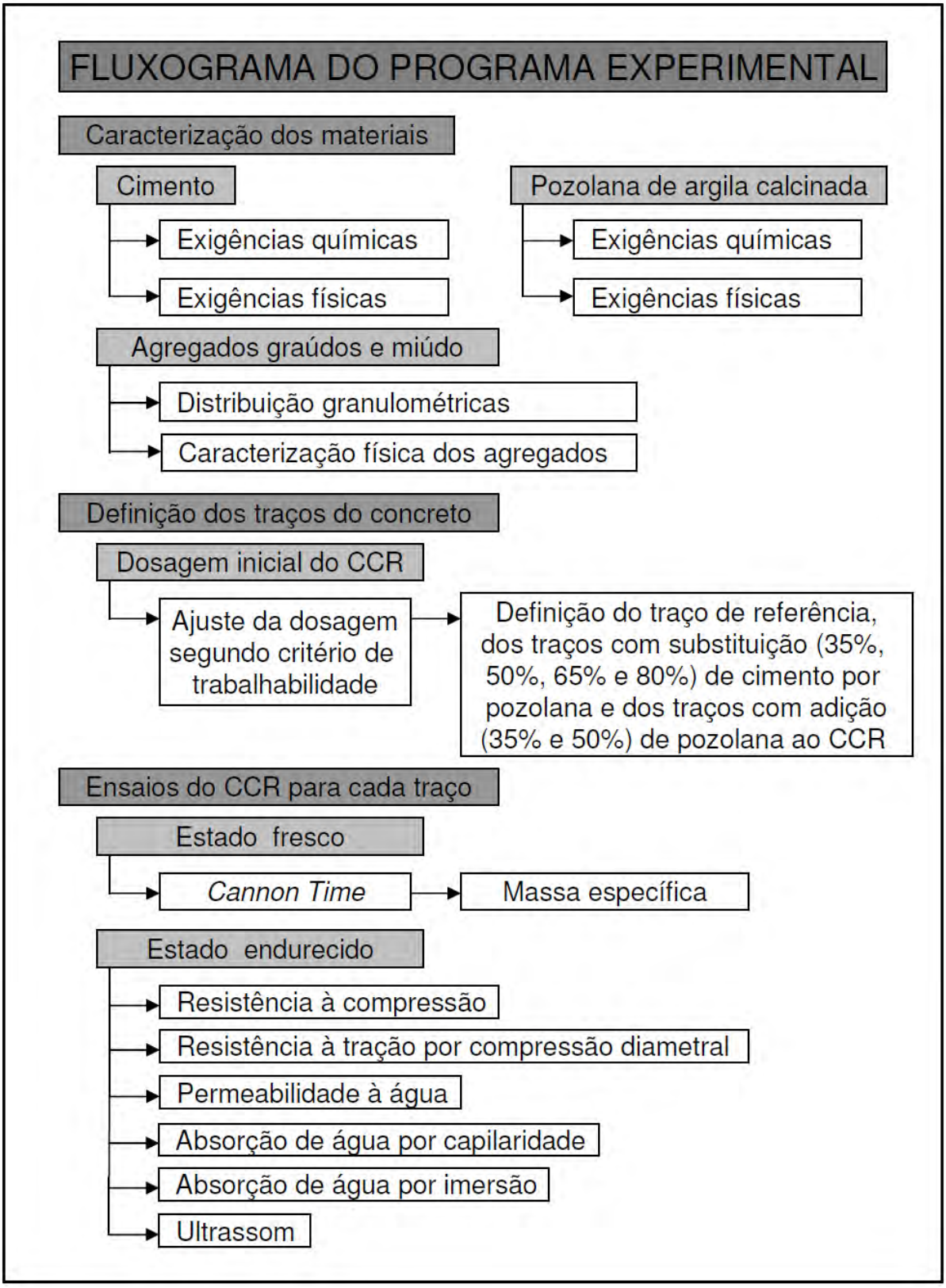


Figura 3.1 - Fluxograma das atividades desempenhadas na pesquisa.

3.2. MATERIAIS EMPREGADOS

Nos subitens a seguir, são apresentadas as caracterizações física e química dos constituintes individuais utilizados neste estudo, permitindo por meio de um maior conhecimento dos materiais empregados e por meio das premissas definidas para o concreto, investigar e balizar as características a serem atingidas pelo CCR com as adições propostas, validando os resultados obtidos nos ensaios realizados no concreto.

Os materiais envolvidos no estudo de dosagem do concreto compactado com rolo com adição de pozolana de argila calcinada, e suas principais características, são apresentados a seguir, subdivididos em: cimento; pozolana de argila calcinada; agregados miúdo e graúdos; e aditivos.

Toda a água usada para a confecção do concreto deste estudo foi isenta de impurezas nocivas ao concreto ou que comprometessem a sua durabilidade, sendo empregada água potável fornecida a FURNAS, garantindo desta forma que a água não interferisse nos resultados esperados para o CCR.

3.2.1. Cimento

Segundo Andriolo (1989), o CCR pode ser dosado com os mesmos cimentos e adições empregados no CCV, sendo a escolha baseada nos requisitos estruturais e de durabilidade, devendo a seleção dos materiais e dos seus teores serem aferidos por meio de ensaios, visando atingir a especificação do projeto.

Com o intuito de reduzir as influências sobre os resultados do estudo, empregou-se um cimento Portland CP II F-32. Este tipo de cimento possui adição apenas de fíler calcário, material quimicamente inerte e que não causa interferência nas ações químicas da pozolana adotada no estudo (argila calcinada).

Tendo em vista a pesquisa utilizar um cimento Portland composto com adição de fíler calcário, CP II F, dessa forma sem a incorporação de adições minerais quimicamente reagentes durante sua fabricação, e considerando a adição da pozolana de argila calcinada nos teores propostos para os concretos especificados, o comportamento das propriedades do CCR poderá ser semelhante a de um concreto executado com cimento contendo adição de pozolanas na fábrica, o CP IV.

As características químicas, físicas e mecânicas do cimento CP II F-32 empregado na pesquisa encontram-se, respectivamente, nas Tabelas 3.1 e 3.2.

O cimento empregado (CP II F-32), segundo a NBR 11578 – Cimento Portland Composto (ABNT, 1991), pode possuir teores de 6% até 10% de fíler calcário incorporado na fábrica. Esse teores proporcionam um melhor refinamento dos poros ao adequar a curva granulométrica do concreto e, como já mencionado, não interferem nos resultados deste estudo por não ter capacidade de desempenhar reações químicas, somente preenchendo os poros. Assim, eles não afetam os resultados de interação do cimento com as adições pozolânicas no CCR em questão. Segundo a referida norma, o material carbonático utilizado como adição ao cimento deverá ter um teor mínimo de 85% de $CaCO_3$.

Tabela 3.1 – Caracterização química do cimento empregado.

Ensaios Químicos do Cimento			Método de Ensaio	Resultado	Limites NBR 11578/91
1	Perda ao fogo (%)		NBR 5743/89	12,00	≤ 6,5
2	Resíduo insolúvel (%)		NBR 5744/89	4,25	≤ 2,5
3	Sulfato de cálcio ($CaSO_4$) (%)		---	2,86	N.E.
4	Trióxido de enxofre (SO_3) (%)		Procedimento FURNAS n. 1.02.135(1)	1,68	≤ 4,0
5	Óxido de magnésio (MgO) (%)			2,07	≤ 6,5
6	Dióxido de silício (SiO_2) (%)			16,82	N.E.
7	Óxido de Alumínio (Al_2O_3) (%)			4,26	N.E.
8	Óxido de ferro (Fe_2O_3) (%)			2,50	N.E.
9	Óxido de cálcio (CaO) (%)			59,86	N.E.
10	Óxido de cálcio livre (CaO) (%)			1,70	N.E.
11	Álcalis Totais	Óxido de sódio (Na_2O) (%)	Procedimento FURNAS n. 1.02.31(2)	0,23	N.E.
		Óxido de potássio (K_2O) (%)		0,34	N.E.
		Equivalente Alcalino (%)		0,46	N.E.
12	Álcalis solúveis em Água	Óxido de sódio (Na_2O) (%)	Procedimento FURNAS IT.DCT.CA.098(3)	0,09	N.E. (4)
		Óxido de potássio (K_2O) (%)		0,18	N.E. (4)
		Equivalente Alcalino (%)		0,21	N.E. (4)

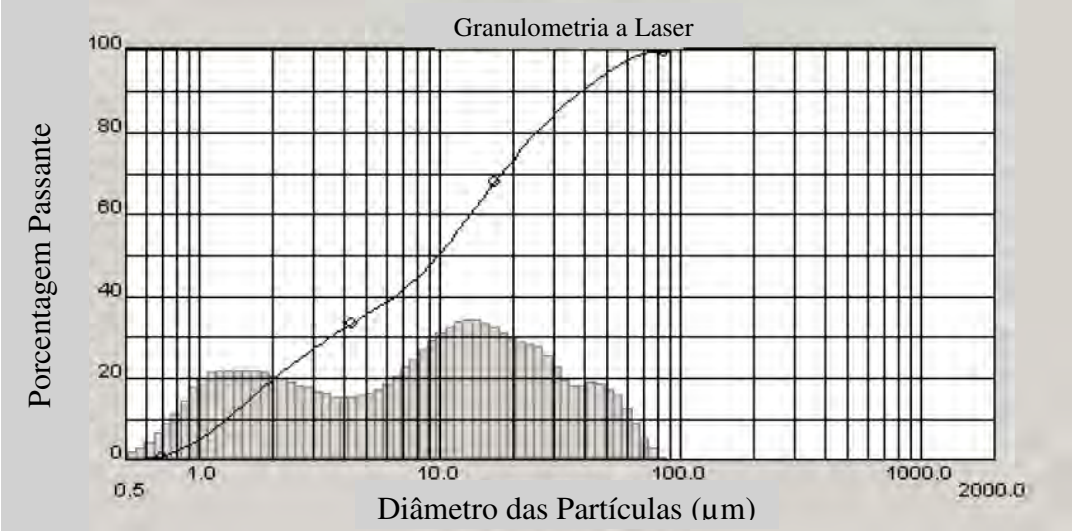
OBS:

(1) - Fluorescência por raios X.
(2) - Espectrofotometria de absorção atômica.
(3) - IT.DCT.CA.098: Determinação dos álcalis totais solúveis em água.
(4) - Resultados devem ser menores ou iguais aos respectivos teores do item 11 desta tabela (Álcalis totais - procedimento FURNAS n. 1.02.31).
N.E.: não especificado.
Teor de Enxofre Sob a Forma de Sulfeto = 0,08%

Tabela 3.2 – Características físicas e mecânicas do cimento empregado.

Ensaios Físicos e Mecânicos do Cimento			Método de Ensaio	Resultado	Limites NBR 11578/91
1	Tempo de início de pega (h, min)		NBR NM65/03	2 h, 05 min	≥ 1 hora
2	Tempo de fim de pega (h, min)			2 h, 50 min	≤ 10 horas
3	Superfície específica Blaine (m²/kg)		NBR NM 76/98	539,2	≥ 260 m²/kg
4	Finura na peneira n° 200-75 μ (%)		NBR 11579/91	1,7	≤ 12,0 %
5	Finura na peneira n° 325-44 μ (%)		NBR 9202/85	5,7	-
6	Água da pasta de consistência normal (%)		NBR NM 43/02	28,5	-
7	Massa específica (g/cm³)		NBR NM 23/01	2,97	-
8	Expansibilidade em autoclave (mm)		ASTM C-151/00	0	≤ 5,0 mm
9	Resistência à compressão (MPa) 3 dias		NBR 7215/96	20,4	≥ 10 MPa
10	Resistência à compressão (MPa) 7 dias			26,8	≥ 20 MPa
11	Resistência à compressão (MPa) 28 dias			35,6	≥ 32 MPa e ≤ 49 MPa
12	Resistência à compressão (MPa) 90 dias			40.8	-
13	Calor de hidratação – Langavant ($J \cdot g^{-1}$)	3 dias	NBR 12006/90	235,8	-
		7 dias		237,6	-

A distribuição de grãos do cimento empregado foi determinada por meio do ensaio de granulometria a laser, cuja faixa granulométrica de medição do aparelho está situada entre 2000 μm a 0,5 μm. A Figura 3.2 apresenta graficamente o resultado deste ensaio.



OBS: 1) Diâmetro abaixo do qual se encontram 10% das partículas (µm): 1,29

2) Dimensão média (µm): 9,84

3) Diâmetro abaixo do qual se encontram 90% das partículas (µm): 38,95

Figura 3.2 – Granulometria a laser do cimento.

3.2.2. Pozolana de argila calcinada

O material pozolânico utilizado neste estudo foi uma argila calcinada, como pode ser observado na Figura 3.3, possuindo essa pozolana uma tonalidade vermelha semelhante à da argila da matéria-prima, proveniente do Estado de Roraima a 20 quilômetros da obra da barragem de Santo Antônio. A argila utilizada como matéria prima para a produção da argila calcinada possui em sua composição mineralógica aproximadamente 45% de caulinita e 55% de impurezas, sendo estas retiradas durante o processo de beneficiamento da matéria prima antes da calcinação.

O processo de calcinação foi realizado em laboratório, com elevado controle de qualidade quanto à homogeneidade da queima e total calcinação da argila, sendo realizada à temperatura de 800°C por aproximadamente uma hora e com resfriamento ao ambiente. Para caracterizar esse material pozolânico empregado foram realizados os ensaios físicos e químicos relatados nas Tabelas 3.3 e 3.4. Os demais requisitos para a classificação da pozolana foram especificados na Tabela 3.5.

Figura 3.3 – Aspecto da pozolana de argila calcinada utilizada neste estudo.

Tabela 3.3 – Caracterização da pozolana segundo os ensaios químicos.

Ensaios Químicos			Método de Ensaio	Resultados	Limites NBR 12653/92
1	Perda ao fogo (%)		NBR 5743/89	0,72	≤ 10,0
2	Óxido de magnésio (MgO) (%)		Procedimento FURNAS n. 1.02.135(1)	0,00	N. E.
3	Dióxido de silício (SiO_2) (%)			52,26	N. E.
4	Óxido de ferro (Fe_2O_3) (%)			13,62	N. E.
5	Óxido de alumínio (Al_2O_3) (%)			30,27	N. E.
6	Óxido de cálcio (CaO) (%)			0,00	N. E.
7	Álcalis Totais	Óxido de sódio (Na_2O) (%)	Procedimento FURNAS n. 1.02.31(2)	0,17	N. E.
		Óxido de potássio (K_2O) (%)		1,34	N. E.
		Equivalente alcalino (%)		1,06	≤ 1,5
8	Sulfato de cálcio ($CaSO_4$) (%)		---	0,00	N. E.

OBS:
(1) - Fluorescência por raios X.
(2) - Espectrofotometria de absorção atômica.
N.E.: não especificado.

Tabela 3.4 – Caracterização da pozolana segundo os ensaios físicos.

Ensaios Físicos		Método de Ensaio	Resultados	Limites
1	Massa específica (g/cm³)	NBR NM 23/01	2,88	N.E.
2	Superfície específica Blaine (m²/kg)	NBR NM 76/98	1621,0	N.E.
3	Índice de atividade pozolânica aos 28 dias com argamassa de cimento (%)	NBR 5752/92	80,0	≥ 75 (1)
4	Índice de atividade pozolânica aos 7 dias com argamassa com cal (MPa)	NBR 5751/92	9,5	≥ 6,0 (1)
5	Ensaio Chapelle - Atividade pozolânica a (90+5)°C (mgCaO/g)	Procedimento IPT: DEC-LQM-PE-041	535	≥ 330 (2)

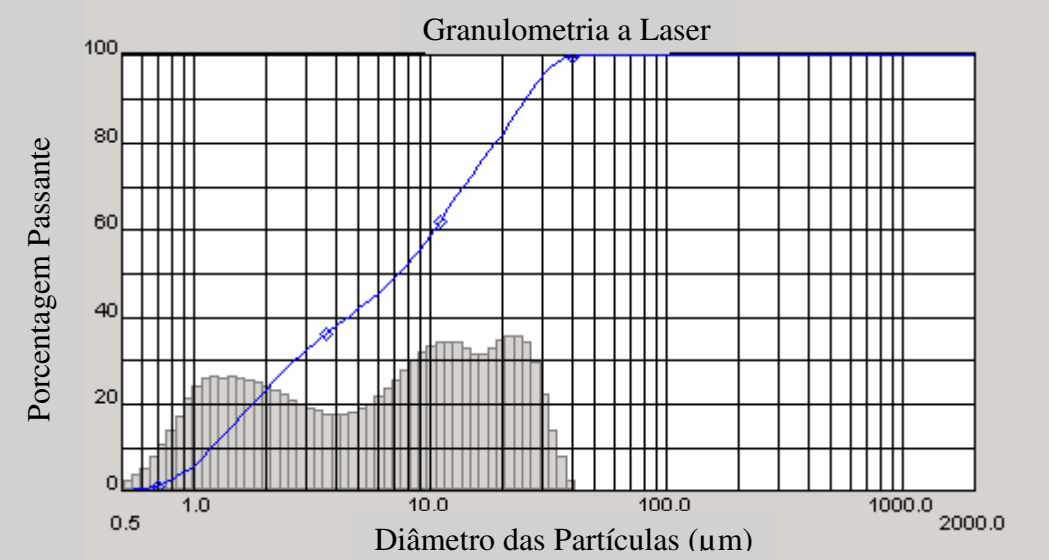
OBS:
(1) – Limites da ABNT: NBR 12653 / 1992
(2) – Limite do procedimento IPT: DEC-LQM-PE-041
N.E.: não especificado.

Tabela 3.5 – Classificação das pozolanas segundo a NBR 12653 (ABNT, 1992).

Itens de classificação		Resultados	Limites NBR 12653 / 92
1	Pozolana avaliada	Classe N	N.E.
2	$SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ (%)	96,15	≥ 70 (1)
3	Material retido na peneira 45μm (%)	0	≤ 34 (1)

OBS:
(1) - Limite da ABNT: NBR 12653 / 1992 para a Classe N
N.E.: não especificado.

A distribuição de tamanho de grãos da pozolana foi determinada por meio do ensaio de granulometria a laser, cuja faixa granulométrica de medição do aparelho está situada entre 2000 μm a 0,5 μm. A Figura 3.4 apresenta graficamente o resultado deste ensaio.



OBS: 1) Diâmetro abaixo do qual se encontram 10% das partículas (µm): 1,19

2) Dimensão média (µm): 7,33

3) Diâmetro abaixo do qual se encontram 90% das partículas (µm): 25,15

Figura 3.4 – Granulometria a laser da pozolana.

Também foi realizado o ensaio de difração de raios X (DRX) pra verificar o quanto a pozolana em estudo era amorfa, objetivando obter informações que permitissem avaliar o seu grau de reatividade. A Figura 3.5 apresenta o difratograma de raios X da amostra de argila calcinada empregada na pesquisa.

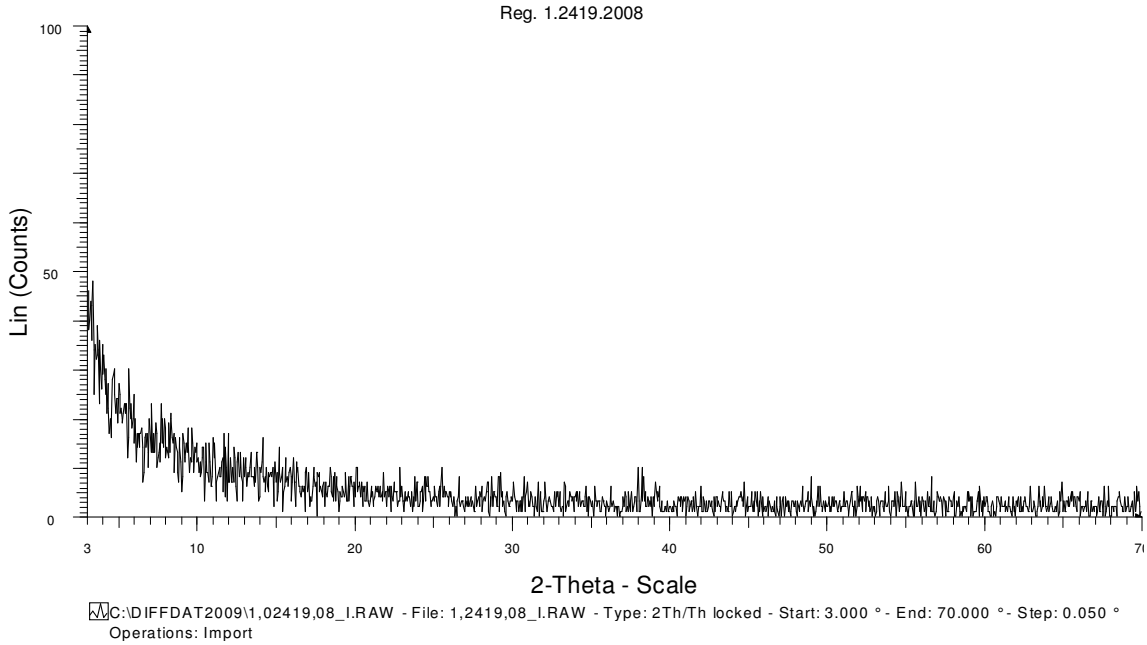


Figura 3.5 – Difratograma da pozolana de argila calcinada.

Segundo a Figura 3.5, pode ser constatado que a pozolana de argila calcinada empregada no estudo apresenta um difratograma sem picos, o que demonstra que este material não possui produtos cristalinos, logo, por esta pozolana ser bastante amorfa, é esperado uma alta capacidade de promover reações com o hidróxido de cálcio e viabilizar os objetivos propostos. O difratograma da pozolana em estudo ao ser comparado com o difratograma de um material correlato na Figura 2.2, uma adição mineral de metacaulinita, demonstra o quanto a pozolana de argila calcinada empregada no presente estudo é amorfa.

3.2.3. Agregados

Os agregados graúdos e miúdo que foram usados neste estudo são provenientes do local de construção da obra da usina hidrelétrica de Santo Antônio, em Porto Velho-RO. Os agregados graúdos foram produzidos a partir do processamento de rochas sãs, oriundas de escavações próximas ao canteiro de obra. Após a britagem, os agregados passaram por um processo de

beneficiamento para promover correções granulométricas de modo a atender às especificações das faixas ideais para a granulometria, eliminando os excessos ou carências das frações individuais dos grãos. Este procedimento foi empregado para adequar a granulometria das amostras, sendo também utilizado para a preparação e adequação dos materiais na obra. A rocha empregada para a produção dos agregados foi um granito com tonalidade rosa.

O agregado miúdo foi obtido através da britagem do agregado graúdo até a obtenção de uma areia artificial; logo, todos os agregados são provenientes da mesma rocha sã. Para caracterizar o agregado miúdo utilizado na pesquisa foram realizados ensaios referentes à composição granulometria e a outras determinações físicas, como se tem nas Tabelas 3.6 e 3.7, e na Figura 3.6.

Tabela 3.6 – Distribuição granulométrica do agregado miúdo utilizado na pesquisa (ensaio realizado conforme a NBR 7217 / 1987).

Peneiras		Resultado (% retida acumulada média)	Limites da NBR 7211/05 (% Retida Acumulada) Limites da Zona:	
nº	Abertura		Utilizável	Ótima
3/8"	9,5 mm	0	0 - 0	0 – 0
1/4"	6,3 mm	0	0 - 7	0 – 0
4	4,75 mm	0	0 - 10	0 – 5
8	2,34 mm	21	0 - 25	10 – 20
16	1,18 mm	43	5 - 50	20 – 30
30	600 µm	57	15 - 70	35 – 55
50	300 µm	70	50 - 95	65 – 85
100	150 µm	82	85 - 100	90 – 95
Fundo (g)		100		
Mód. de finura		2,73	1,55 – 2,2 e 2,9 – 3,5	2,20 – 2,90
Dimensão máxima característica (mm)		2,34		

A curva granulométrica do agregado miúdo utilizado neste estudo está compreendida predominantemente na faixa utilizável, com intervalos compreendidos na faixa ótima, como pode ser observada na figura 3.6.

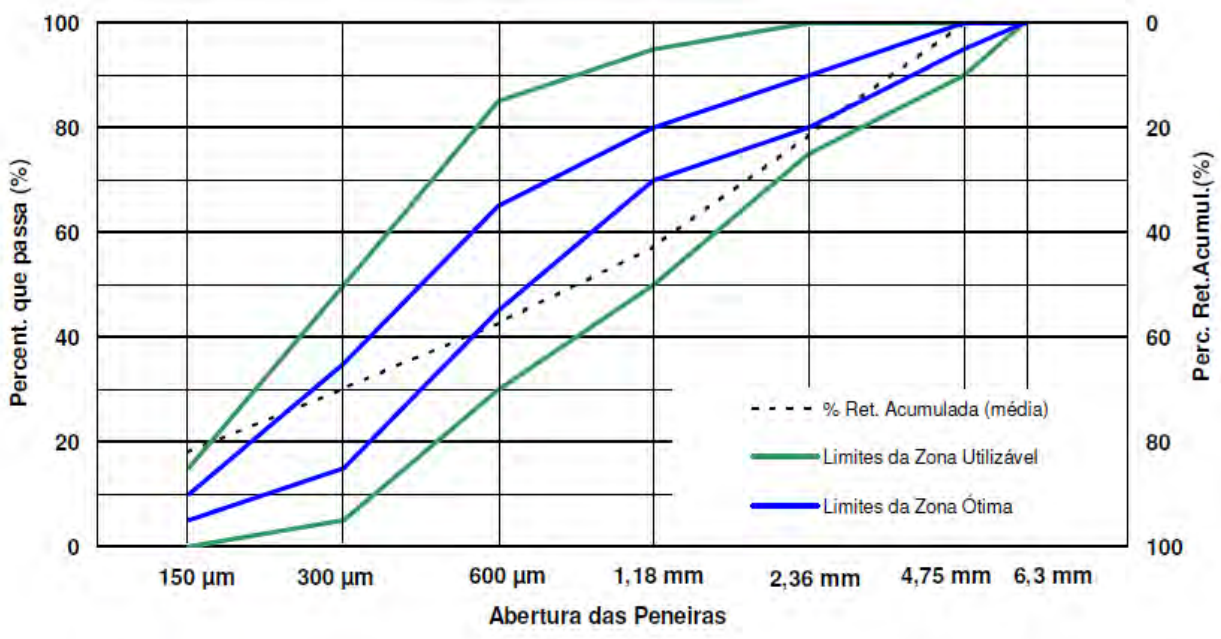


Figura 3.6 – Curva granulométrica do agregado miúdo e os limites das zonas ótimas e utilizável conforme a NBR 7211 / 2005.

Tabela 3.7 – Caracterização física do agregado miúdo empregado no CCR.

Substâncias deletérias dos agregados miúdos		Método	Areia artificial	Limites da NBR 7211/05
1	Absorção (%)	NBR NM 30/01	0,2	-
2	Massa específica S.S.S. (kg/m³)	NBR NM 52/03	2610	-
3	Módulo de finura	NBR MN 248/03	2,73	-
4	Torrões de argila (%)	NBR 7218/87	0	≤ 1,5%
5	Material pulverulento (%)	NBR NM 46/03	20 (1)	≤ 5,0%
6	Matéria orgânica	NBR NM 49/01	Cor mais clara	Cor mais clara que a solução padrão

NOTA:
(1) Tendo em vista a areia empregada ser artificial, o teor de pó de pedra que passa na peneira n° 200 não foi contabilizado como material deletério.

OBS:
Agregado proveniente da britagem de um granito com tonalidade rosa.

Foram empregados nesta pesquisa duas granulometrias de agregados graúdos, baseadas na experiência de FURNAS quanto aos critérios econômicos e técnicos desse insumo no CCR. Um dos agregados graúdos tinha suas dimensões contidas entre 4,8 mm e 25 mm e o outro

agregado entre 25 mm e 50 mm. Eles foram tratados, respectivamente, como agregado de 19 mm e de 38 mm de diâmetro, conforme suas dimensões máximas características, descritas nas Tabelas 3.13 e 3.14. Uma visualização individual desses agregados graúdos consta nas Figuras 3.7 e 3.8, na Figura 3.9 há uma visualização da mistura das frações destes agregados.

Figura 3.7 – Fotografia ilustrando a fração do agregado graúdo de maior dimensão.

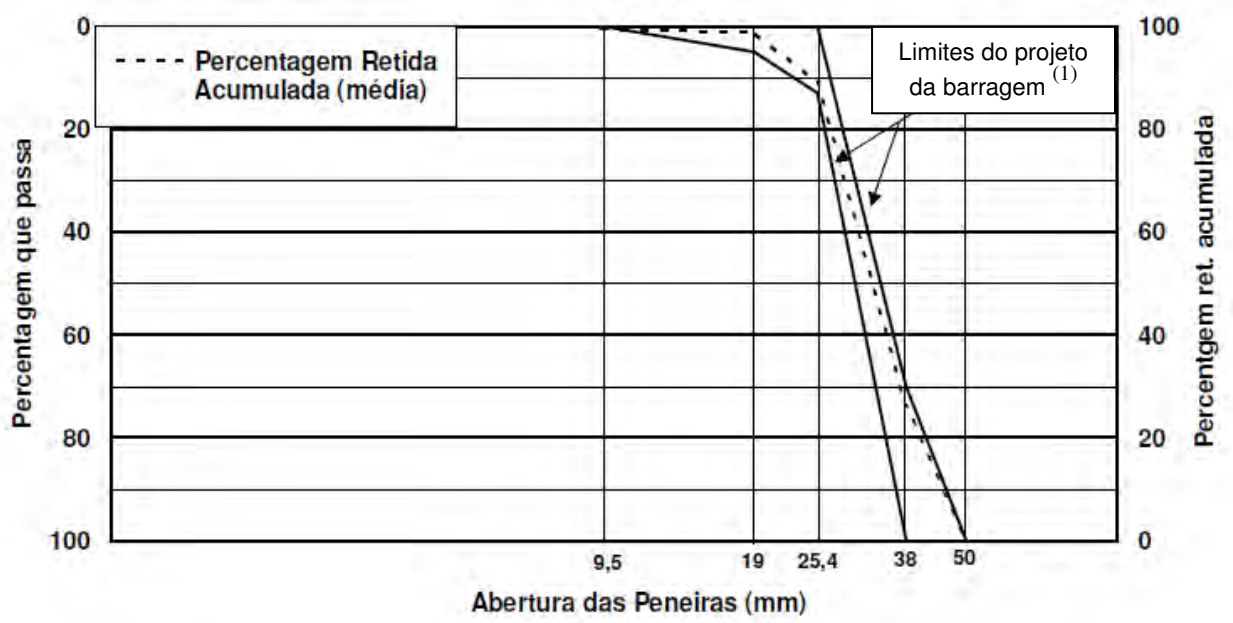
Figura 3.8 – Fotografia ilustrando a fração do agregado graúdo de menor dimensão.

Figura 3.9 – Fotografia ilustrando a mistura das frações dos agregados graúdos de maior e menor dimensão.

Para caracterizar os agregados graúdos utilizados na pesquisa foi realizado o ensaio de determinação da composição granulométrica do agregado, para duas frações consideradas, cujos dados se apresentam nas Tabelas 3.8 e 3.9 e nas Figura 3.10 e 3.11.

Tabela 3.8 – Distribuição granulométrica do agregado graúdo na fração superior (38 mm). Ensaio realizado conforme a NBR 7217 / 1987.

Peneiras		Porcentagem retida acumulada média (%)	Limites da NBR 7211/05		
nº	mm		% retida acumulada		
2"	50	0	0		
1 1/2"	38	26	0	-	30
1"	25,4	89	87	-	100
3/4"	19	99	95	-	100
3/8"	9,5	100			
3/16"	4,8	100			
Fundo (g)		100			
8	2,4	100			
16	1,2	100			
30	0,6	100			
50	0,3	100			
100	0,15	100			
Fundo (g)		100			
Módulo de finura		8,24			
Dimensão máxima característica (mm)		38			

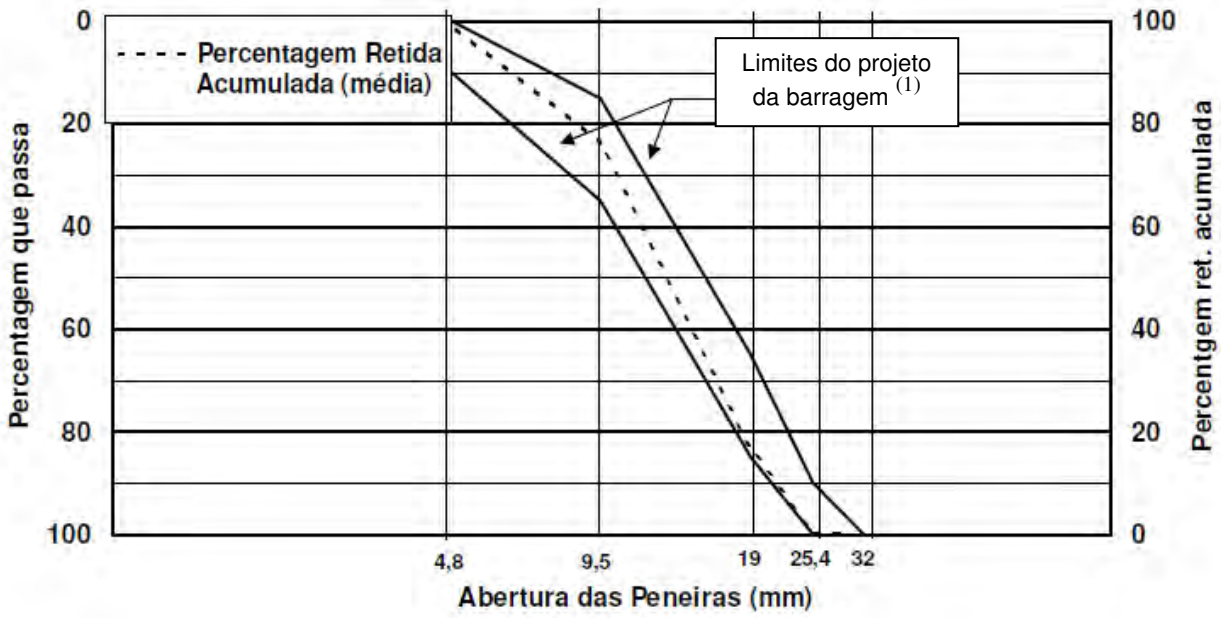


OBS: 1) Limites impostos pelo projetista da barragem de Santo Antônio, sendo estes limites mais rigorosos que o exigido pela norma NBR 7211 / 2005.

Figura 3.10 – Curva granulométrica do agregado graúdo de fração superior (38 mm).

Tabela 3.9 – Distribuição granulométrica do agregado graúdo de fração inferior (19 mm). Ensaio realizado conforme a NBR 7217 / 1987.

Peneiras		Porcentagem retida acumulada média (%)	Limites da NBR 7211/05
nº	mm		% retida acumulada
1 1/4"	32	0,0	0
1"	25,4	0,4	0 - 10
3/4"	19	16,5	15 - 35
3/8"	9,5	76,3	65 - 85
3/16"	4,8	99,3	90 - 100
Fundo (g)		100,0	
8	2,4	100,0	
16	1,2	100,0	
30	0,6	100,0	
50	0,3	100,0	
100	0,15	100,0	
Fundo (g)		100,0	
Módulo de finura		6,92	
Dimensão máxima característica (mm)		19	



OBS: 1) Limites impostos pelo projetista da barragem de Santo Antônio, sendo estes limites mais rigorosos que o exigido pela norma NBR 7211 / 2005.

Figura 3.11 – Curva granulométrica do agregado graúdo de fração inferior (19 mm).

Para os agregados graúdos, assim com nas areias, em especial as areias artificiais, devido às particularidades, às variações dos materiais originais e aos métodos produtivos, as faixas granulométricas ideais dos agregados graúdos e miúdos podem não ser alcançadas. Tais falhas nas faixas como as descontinuidades ou faixas uniformes, tiveram seu impacto aferido e corrigido no estudo do traço do concreto, utilizando a curva de *Fuller* para minimizar os efeitos das falhas e maximizar o empacotamento dos agregados no concreto. As possíveis causas dessas falhas são decorrentes da mineralogia da rocha britada e dos equipamentos de britagem empregados.

A Tabela 3.10, a seguir, apresenta as demais características físicas dos agregados graúdos determinadas na etapa de caracterização dos materiais.

Tabela 3.10 – Caracterização física do agregado graúdo.

Propriedades dos agregados graúdos		Método de ensaio	Agregado de 38 mm	Agregado de 19 mm	Limites NBR 7211 / 2005
1	Torrões de argila (%)	NBR 7211/05	0	0	≤ 3,0%
2	Teor de material pulverulento (%)	NBR 7219/87	0,15	0,4	≤ 1,0%
3	Ciclagem acelerada água/estufa (%)	NBR 12696/92	0,11	0,11	-
4	Granulometria (módulo de finura)	NBR 7217/87	8,24	6,92	-
5	Massa específica S.S.S. (kg/m³)	NBR NM 53/03	2610	2630	-
6	Absorção (%)	NBR NM 53/03	0,2	0,4	-
7	Índice de forma entre partículas lamelares e alongadas	NBR 7809/83	2,4	2,1	≤ 3
8	Índice de trabalhabilidade - *Work Index* (kwh/t)	NBR-11376/90	10,59	10,59	-
9	Abrasão Los Angeles – carga abrasiva "A" para 500 ciclos	NBR NM 51/01	23 %	23 %	≤ 50%

3.2.4. Aditivos

Conforme Traboulsi (2007), para atingir a particular consistência do CCR, com baixo consumo de água e alto teor de finos, é requerida uma avaliação contínua do processo de mistura e transporte. Conseqüentemente, alguns controles são fundamentais no processo, sendo um deles a utilização de aditivos retardadores de pega, prolongando o tempo de trabalhabilidade do CCR na praça de lançamento e, dessa forma, as variações no tempo de compactação em função das possíveis oscilações de temperatura e umidade podem ser minimizadas. Assim, o tempo de espera em que o material e/ou as camadas a serem compactadas poderão ficar aguardando a compactação poderá ser maior, prevenindo a formação de juntas frias ao elevar o tempo de aplicação do concreto fresco (ANDRIOLO, 1989; GRAÇA, 2005).

Portanto, no presente estudo, empregou-se um aditivo plastificante polifuncional retardador à base de sais sulfonados e carboidratos em meio aquoso, com tonalidade castanho escuro e com ação retardadora de pega, cujas características básicas encontram na Tabela 3.11.

Tabela 3.11 – Características do aditivo empregado no CCR.

Requisitos para adequação do aditivo		**Aditivo**
1	pH	4 - 6
2	Densidade	1,2 kg/litro
3	Volume empregado nos traços estudados	1% em relação às massas de cimento e pozolana

Batista *et al.* (2008) constataram que o uso de aditivo polifuncional, quando usado com um cimento CP IV-32 RS, reduz a quantidade de água empregada do amassamento do concreto; proporciona um aumento na resistência mecânica, principalmente para consumos de cimento acima de 110 kg/m³, chegando a ganhos de 30% para consumos de 150 kg/m³ e 1,5% de aditivo comparado ao concreto de referência; e eleva discretamente a massa específica do CCR. Batista *et al.* (2008) constataram também que as melhorias das propriedades mecânicas não são muito acentuadas para os concretos com baixo teor de cimento, 70 kg/m³ a 90 kg/m³, entretanto há para estes teores melhoria na trabalhabilidade e redução no consumo de água.

Apesar do estudo de Batista *et al.* (2008) ter empregado CP IV-RS, este serviu para balizar a definição do tipo de aditivo e a dosagem empregada na presente pesquisa, pois, mesmo o referido cimento sendo de um tipo diferente do adotado neste estudo (CP II-F), com a substituição de parte deste cimento especificado pela adição pozolânica em estudo, a composição final tenderá a ser semelhante à do CP IV.

3.3. CONCRETOS ESPECIFICADOS

O presente trabalho visou o estudo da influência dos altos teores de adições minerais de argila calcinada usadas em substituição parcial ao cimento Portland em um concreto compactado com rolo. O teor de aglomerante do traço de referência (sem substituição da adição mineral) foi de 80 kg/m³ de cimento Portland. A partir deste traço de referência, promoveram-se substituições parciais do cimento por pozolanas, em volume, nos teores de 35%, 50%, 65% e 80%. Também foram estudados traços com o uso da pozolana em adição ao volume de cimento de referência nos teores de 35% e 50%. Dessa forma, além do traço de referência, foram produzidos mais seis traços com argila calcinada, gerando sete traços no total.

Além das variações nas quantidades dos aglomerantes também sofreram modificações as quantidades de água e de aditivo dos traços, isto para tentar manter os mesmos padrões de trabalhabilidade do concreto de referência e poder comparar concretos semelhantes.

Tendo em vista a pozolana ser um material com granulometria fina, quanto maior a quantidade de pozolana empregada maior é a demanda de água para se manter os mesmos padrões de trabalhabilidade. Este aumento na demanda de água é menor entre os traços com adição se comparados aos traços com substituição de pozolana; isso ocorre, pois, nos traços com uso da pozolana em substituição parcial do cimento, ao elevar-se a quantidade de pozolana, apesar da redução da quantidade de cimento, a granulometria muito mais fina da pozolana aliada à quantidade de aditivo praticamente inalterada, eleva a demanda de água para manter a mesma trabalhabilidade. Para os traços com o emprego da pozolana em adição ao volume de cimento, devido ao acréscimo da quantidade de material fino, também há a elevação dos teores de aditivo, o que consequentemente controla a demanda de água nestes traços. Podem ser visualizados nas Tabelas A1 e A2, no Apêndice A, o consumo de água em cada traço executado nesta pesquisa.

A quantidade de aditivo empregado, em massa, foi correspondente a 1% do somatório das massas de cimento e pozolana de cada traço; assim, tendo em vista a densidade do cimento ser maior que a densidade da pozolana, quando parte do cimento Portland foi substituído em relação ao volume, o peso final dos materiais aglomerantes foi menor quando comparado ao

concreto de referência, demandando também uma menor quantidade de aditivo. Para os traços em que a pozolana de argila calcinada foi empregada em adição ao teor de cimento do concreto de referência, o volume de aditivo foi elevado na mesma medida do aumento da massa dos materiais aglomerantes.

As demais variáveis entre todos os traços foram mantidas inalteradas, de maneira que todas as quantidades dos outros insumos empregados (agregados miúdo e graúdos), bem como o tipo do aditivo, não foram modificadas. Assim, por meio dos procedimentos adotados, pôde ser avaliada com maior precisão a influência da argila calcinada e sua potencialidade de utilização no CCR. Apesar do cimento e da pozolana terem densidades diferentes, não houve modificação na densidade do concreto pela troca de parte do cimento pela adição para os diversos traços estudados, contudo há uma tendência à elevação da densidade e redução da trabalhabilidade com a elevação dos teores de pozolana.

Para a confecção em laboratório do concreto compactado com rolo foram seguidos os procedimentos de FURNAS, com a mistura em betoneira dos agregados graúdos e miúdos com metade da água por um minuto. Após esta etapa da mistura foram acrescidos os materiais cimentício e pozolânico, o restante da água e o aditivo selecionado. Misturados os insumos por mais cinco minutos, sendo que no meio da segunda etapa de mistura a superfície interna da betoneira era raspada com uma colher de pedreiro. Esse procedimento visou evitar que as incrustações dos materiais finos na superfície interna da betoneira alterassem o traço em estudo.

Foi assumido que o teor de água a ser empregado no traço seria a variável a ser manipulada para determinar concretos com níveis de trabalhabilidade equivalentes, apesar das variações de cada traço em estudo. Pode ser observada parte das etapas de confecção do concreto compactado com rolo na Figura 3.12, visualizando-se a pesagem de parte dos insumos e a acomodação destes insumos no compartimento de abastecimento da betoneira; na Figura 3.13, pode ser observada a homogeneização dos materiais e a raspagem da betoneira pra evitar incrustações.

Figura 3.12 – Pesagem e acomodação dos insumos para o CCR.

Figura 3.13 – Homogeneização dos materiais e a raspagem da betoneira pra evitar incrustações.

3.4. MÉTODOS ADOTADOS

Para estudar os efeitos da adição de pozolana de argila calcinada no concreto compactado com rolo, foram analisados os impactos destas interações através de ensaios que balizaram as propriedades mecânicas do concreto em conjunto com as propriedades físicas e químicas dos

materiais que o constituem. Desta forma foi analisado o concreto no estado fresco e no estado endurecido.

3.4.1. Ensaios no Concreto no Estado Fresco

Conforme Batista (2004), os procedimentos utilizados para a determinação das propriedades do concreto compactado com rolo no estado fresco são específicos para este material, não sendo ainda regido por normatização nacional. Portanto foi adotado neste estudo a padronização interna e a experiência de FURNAS com este tipo específico de material, assim, os ensaios do concreto no estado fresco seguiram as determinações especificadas no procedimento de ensaio FURNAS N° 01.006.011 de 2004, assim como a instrução de trabalho IT.DCT.TC. 105.

3.4.1.1. Consistência e massa específica

Para a análise do concreto compactado com rolo proposto neste estudo foi verificado as suas propriedades no estado fresco, aferindo a trabalhabilidade e a massa específica através do ensaio *Cannon Time.* Esse consiste em determinar o tempo gasto para que o concreto acomodado e reguado, sem qualquer compactação, em um cilindro de acrílico de 24,2 cm de diâmetro e 20 cm de altura (volume de 9,2 litros), através da compactação proporcionada por uma mesa vibratória, forme um filme de argamassa em todo o perímetro deste cilindro de acrílico, o que caracteriza que o concreto foi adensado com similaridade ao procedimento executivo do concreto *in loco* (BATISTA, 2004; ANDRADE, 1997). A massa específica é uma propriedade muito importante para o CCR, sendo largamente utilizada como elemento para conferir peso em barragens de gravidade.

A seqüência de moldagem e realização do ensaio *Cannon Time* pode ser constatada na Figura 3.14 com o enchimento do cilindro de acrílico com a mistura seca do CCR; na Figura 3.15 com a nivelação do CCR sem adensamento; e na Figura 3.16 com a medição do *Cannon Time* e do tempo de vibração. A medida do *Cannon Time* é realizada durante esse período de 120 segundos, sendo o tempo de vibração compreendido pelo início da vibração até o momento que se forma uma película de argamassa em todo o perímetro do cilindro de acrílico. Após 120 segundos de vibração o cilindro é pesado e descontando a tara do cilindro de acrílico, medindo também o volume do abatimento do CCR pela diferença de peso após o preenchimento com água do cilindro, pode ser obtida a massa unitária real (kg/m³) do concreto.

Figura 3.14 – Preenchimento do cilindro de acrílico com a mistura seca do CCR.

Figura 3.15 – Preparação do CCR para o ensaio *Cannon Time*.

Figura 3.16 – Ensaio *Cannon Time* em andamento.

A massa específica do concreto fresco foi obtida através da continuidade do ensaio *Cannon Time*. Foi realizado o cálculo desta massa específica através do material adensado, obtido após vibração do concreto acomodado e reguado, sem qualquer compactação, no cilindro

descrito acima, por 120 segundos. Após este adensamento o peso do concreto compactado foi determinado. O volume deste concreto foi determinado descontando do volume interno total do cilindro o volume do vazio deixado pelo concreto ao ser adensado. De posse das variáveis acima a massa específica do concreto fresco pôde ser determinada.

3.4.2. Ensaios do Concreto no Estado Endurecido

Os ensaios de caracterização do concreto no estado endurecido foram definidos objetivando parametrizar as propriedades mais relevantes a serem determinadas, assim, possibilitando mensurar a forma e o impacto da substituição de parte do cimento Portland pela pozolana em estudo.

Logo, para o estudo do concreto no estado endurecido, através de corpos de provas cilíndricos com 30 cm de altura e 15 cm de diâmetro, foi seguido as premissas da norma da NBR 5738 (ABNT, 2003) quanto a confecção e cura dos corpos de prova, com algumas particularidades quanto a moldagem e a forma de vibração. Os corpos de prova foram moldados após a firme fixação das formas dos corpos de prova a uma mesa vibratória, procedimento adotado com o intuito de simular a condição de compactação em campo, utilizando duas camadas de igual volume para formar o corpo de prova, sendo cada camada vibrada por dois minutos. Pode ser observado na Figura 3.17 o aspecto dos corpos de prova moldados.

Figura 3.17 – Aspecto dos corpos de prova moldados.

O concreto foi ensaiado quanto à resistência a compreensão simples, resistência à tração por compressão diametral, permeabilidade à água, ensaio de absorção de água por capilaridade, ensaio de absorção de água por imersão e velocidade de propagação de ondas de ultrassom. Cada tipo de ensaio, suas quantidades de corpos de provas e respectivas idades de ensaio estão contidos na Tabela 3.12. Na Tabela 3.13 constam os teores de substituição ensaiados e a quantidade total de corpos de prova envolvidos neste estudo. O processo de cura dos corpos de prova foi controlado, sendo realizado em câmara úmida com umidade de 100% e temperatura oscilando de 22°C a 23°C.

A determinação da idade de noventa dias para os ensaios previstos para o concreto endurecido é proveniente do conhecimento do tempo demandado para o início das reações pozolânicas, já sendo senso comum no meio acadêmico esta idade mínima. Desta forma, para melhorar a abrangência deste estudo quanto à reatividade das pozolanas empregadas, também foi empregado o tempo de ensaio de 180 dias, conforme elucida Batista (2007), aumentando a capacidade do estudo de avaliar este material com maior precisão quanto às propriedades da pozolana.

Tabela 3.12 – Tipos de ensaios e quantidades de corpos de prova a serem moldados.

Ensaios para cada teor de substituição de pozolanas	**Norma reguladora**	**Idades CP's na ruptura**		
		28	**90**	**180**
Resistência à compressão simples	NBR 5739 / 07	3	3	3
Resistência à tração por compressão diametral	NBR 7222 / 94	-	3	3
Permeabilidade à água	NBR 10786 / 89	-	3	3
Ensaio de absorção de água por capilaridade	NBR 9779 / 95	-	3	3
Ensaio de absorção de água por imersão – Índice de vazios e massa específica	NBR 9778 / 09	-	3	3
Ensaio de Ultrassom	NBR 8802 / 94	9(1)	9(1)	9(1)
Total de CP's moldados	33			

(1) – O ensaio de ultrassom, por ser um ensaio não destrutivo, utilizou os mesmos corpos de prova dos outros ensaios previstos de resistência à compressão, tração e permeabilidade à água.

Tabela 3.13 – Quantidades de corpos de prova a serem moldados e seus teores de substituição.

Teores de substituição ensaiados	**0%**	**35%**	**50%**	**65%**	**80%**
Números de corpos de prova	33	33	33	33	33
Total de CP's moldados					165

3.4.2.1. Resistência à compressão simples

A resistência à compressão simples é a propriedade mais estudada no concreto, tanto por sua simplicidade em ser determinada quanto por poder ser usada como correlação com outras propriedades do concreto. Foi utilizada a norma NBR 5739 (ABNT, 2007) para parametrizar os procedimentos seguidos, assim, os corpos de prova foram mantidos em processo de cura úmida até o procedimento do ensaio, obedecendo todas as recomendações quanto ao preparo

destes. As demais recomendações quanto à aplicação da carga e equipamentos também foram observadas.

As idades consideradas para ensaio foram de 28 dias, 90 dias e 180 dias, sendo o ensaio na idade de 28 dias realizado para verificar a qualidade dos corpos de prova, aferindo através da resistência por eles alcançados. Esta idade também é balizadora para comparações com outros estudos de concretos.

3.4.2.2. Resistência à tração por compressão diametral

A resistência à tração por compressão diametral, também conhecido como Ensaio Brasileiro, deve ser usada para mensurar a capacidade do concreto não armado em resistir a esforços de tração oriundos da flexão. Também pode ser obtida por correlação com a resistência à compressão. Esta propriedade também serve para mensurar a capacidade do concreto em resistir a esforços que provoquem a fissuração, como a tração ou a tração na flexão.

Foi utilizada a norma NBR 7222 (ABNT, 1994) para parametrizar os procedimentos seguidos, assim, para promover o esforço de tração foi aplicado um esforço de compressão na geratriz do cilindro com o uso de duas taliscas de madeira posicionadas diametralmente sobre estas geratrizes, situadas entre os pratos da prensa e o corpo de prova, concentrando os esforços e criando uma solicitação por tração transversal ao plano de aplicação de carga.

Os corpos de prova foram mantidos em processo de cura úmida até o procedimento do ensaio, obedecendo todas as recomendações quanto ao preparo destes. As demais recomendações quanto à aplicação da carga e equipamentos também foram observadas. As idades consideradas para ensaio foram de 90 dias e 180 dias.

3.4.2.3. Permeabilidade à água

O ensaio de permeabilidade à água visa aferir o gradiente do fluxo de água pelo concreto compactado com rolo. Apesar de o CCR ser no Brasil tradicionalmente utilizado "envelopado" por uma camada de concreto vibrado (GRAÇA, 2005; BATISTA, 2004), esta característica da permeabilidade é importante para mensurar o CCR, comparando o com os demais tipos de concreto utilizados nas barragens. Caso a permeabilidade do CCR seja reduzida, permitindo comparações com o nível de permeabilidade do CCV, este último poderá, respaldado por outros estudos, ser reduzido ou até suprimido em projetos futuros.

A permeabilidade do CCR a água foi determinada pelo ensaio regulado pela norma NBR 10786 (ABNT, 1989). Este coeficiente, através da Lei de Darcy, quantifica a velocidade de percolação da água no concreto submetido a gradiente de pressão. O ensaio foi realizado com três corpos de prova cilíndricos de 15 cm de diâmetro por 15 cm de altura, obtidos através da serragem da parte central de corpos de prova de 15 cm de diâmetro por 30 cm de altura, obtendo três corpos de provas para cada traço com teor diferente de adição de argila calcinada.

Este tipo de ensaio requer uma montagem diferenciada dos corpos de prova, sendo adotados uma séria de procedimentos para prepará-los para receber o gradiente de pressão. Toda a nata das superfícies dos corpos de prova foi retida, sendo posteriormente cada um destes elementos a serem ensaiados acondicionados em campânulas previamente limpas. Foi utilizado um elemento por campânula, sendo estes recipientes vedados com material que garantiu a estanqueidade do espaço entre a campânula e o corpo de prova, permitindo que o fluxo de percolação de água ocorra apenas ao longo da seção transversal cilíndrica do elemento ensaiado.

Por fim, para terminar de montar os aparelhos para ensaiar os corpos de prova para o experimento, foram colocadas na parte superior da campânula, encima do corpo de prova, duas camadas de cascalho e uma camada de uma manta de algodão, estas camadas foram utilizadas para uniformizar o fluxo. O ensaio foi procedido, após a montagem dos aparelhos, com a utilização de água destilada.

A experiência de FURNAS limita a pressão imposta a campânula pelo permeâmetro em 0,70 MPa para o concreto compactado com rolo, valor esta aquém do preconizado pela norma usada para realizar o ensaio, que prevê o uso de 2,0 MPa de pressão. Esta redução foi feita com intuito de preservar o material e garantir a eficácia do ensaio, medindo a permeabilidade do CCR sem expor o material a tensões elevadas quando comparada com a resistência que este concreto pode alcançar, visando garantir a sanidade do concreto ao longo do ensaio.

Durante o primeiro dia do ensaio a vazão de entrada foi verificada freqüentemente e duas vezes por dia no restante do ensaio, até completar 500 horas. Também foi relacionado o tempo decorrido para o início da vazão de saída.

Os corpos de prova foram mantidos em processo de cura úmida até o procedimento do ensaio, sendo obedecidas todas as recomendações quanto ao preparo destes. As demais recomendações quanto à aplicação do gradiente e equipamentos também foram observadas. As idades consideradas para ensaio foram de 90 dias e 180 dias.

3.4.2.4. Ensaio de absorção de água por capilaridade

Através do ensaio de absorção por capilaridade pôde ser determinada a variação da absorção do concreto, aferindo a quantidade de poros capilares do CCR considerando os diferentes teores de adição empregados. Essa propriedade tem sua importância por ser relacionada ao uso deste material em barragens, assim, pode ser usada para auxiliar a análise dos resultados da permeabilidade do concreto compactado com rolo. Esse ensaio também pode ser correlacionado com a absorção de água por imersão.

O ensaio de determinação da absorção de água por capilaridade foi realizado conforme a NBR 9779 (ABNT, 1995), empregando três corpos de prova cilíndricos de 15 cm de diâmetro por 30 cm de altura, totalizando um volume de concreto de 5.299,0 cm³ por corpo de prova, acima do mínimo de 2500 cm³ previsto para agregados com diâmetro de até 50 mm. Os corpos de prova foram limpos e deixados isentos de quaisquer óleos.

Foi determinada a massa do corpo de prova ao ar e este foi seco em estufa à temperatura de 105°C ± 5°C até se atingir a constância de massa, quando foi determinando a massa deste após o resfriamento em dessecador até a temperatura de 23°C ± 2°C e obtida a massa de água absorvida por unidade de área.

Após secar os corpos de prova, esses tiveram parte de sua altura imersos em água, no recipiente de ensaio, sobre suportes e com o nível de água constante de 5 mm ± 1 mm medidos a partir da base dos corpos de prova. As massas dos corpos de prova foram determinadas com 3 horas, 6 horas, 24 horas, 48 horas e 72 horas, sendo o tempo contado a partir da sua imersão. Para evitar distorções nos resultados das pesagens, os corpos de prova foram previamente enxugados com pano úmido, e retornados imediatamente ao recipiente de ensaio após o procedimento de pesagem.

Os corpos de prova foram mantidos em processo de cura úmida até o procedimento do ensaio, obedecendo todas as recomendações quanto ao preparo destes. As demais recomendações quanto à aplicação do gradiente e equipamentos também foram observadas. As idades consideradas para ensaio foram de 90 dias e 180 dias.

3.4.2.5. Ensaio de absorção de água por imersão

O ensaio de determinação da absorção de água por imersão – Índice de vazios e massa específica foi realizado conforme a NBR 9778 (ABNT, 2009). Visando determinar, através da absorção de água por imersão, o índice de vazios e a massa específica do CCR, este foi realizado com três corpos de prova cilíndricos de 15 cm de diâmetro por 30 cm de altura, totalizando um volume de concreto de 5.299,0 cm³ por corpo de prova, acima do mínimo de 2500 cm³ previsto para agregados com diâmetro de até 50 mm. Os corpos de prova foram ser limpos e deixados isentos de quaisquer óleos.

Foi determinada a massa do corpo de prova ao ar, sendo que esse elemento foi seco em estufa à temperatura de 105°C ± 5°C por 72 horas, quando foram determinadas as massas nos tempos de 24 horas, 48 horas e 72 horas após o início da secagem. Foi utilizada a massa de

72 horas para cálculo da massa específica e índice de vazios, sendo as outras massas utilizadas como parâmetros para avaliar o andamento do ensaio. Também foi determinada a massa deste após o resfriamento em dessecador até a temperatura de 23°C ± 2°C.

Após completa a etapa de secagem em estufa, determinou-se a massa após a imersão da amostra em água à temperatura de 23°C ± 2°C durante 72 horas. A amostra foi mantida com 1/3 de seu volume imerso nas primeiras 4 horas e 2/3 nas 4 horas subseqüentes, sendo completamente imerso nas 64 horas restantes. Determinadas as massas, decorrido 24 horas, 48 horas e 72 horas da imersão. Para evitar distorções nos resultados das pesagens, os corpos de prova foram previamente enxugados com pano úmido, e retornados imediatamente ao recipiente de ensaio após o procedimento de pesagem.

Depois de saturados, os corpos de prova foram colocados num recipiente cheio de água e progressivamente levada à ebulição, sendo que esta começou dentro do intercalo de 15 minutos a 30 minutos do início do processo de aquecimento. Esta ação de exposição à água quente durou 5 horas.

Em seguida, os corpos de prova foram deixados imersos em água para resfriar pela perda natural de calor, por um intervalo de 14 horas, até atingir a temperatura de 23°C ± 2°C. A seguir, foram retiradas as amostras da água, as enxugando e pesando. Os corpos também foram ser pesados imersos através do uso de balanças hidrostáticas.

A massa específica e o índice de vazios foram obtidos através de relações das massas obtidas durante este ensaio.

Os corpos de prova foram mantidos em processo de cura úmida até o procedimento do ensaio, obedecendo todas as recomendações quanto ao preparo destes. As demais recomendações quanto à aplicação dos gradientes e equipamentos também foram observadas. As idades consideradas para ensaio foram de 90 dias e 180 dias.

3.4.2.6. Ensaio de ultrassom

O ensaio de ultrassom foi realizado conforme a NBR 8802 (ABNT, 1994), prescrevendo esta sobre o método de ensaio não-destrutivo que avalia a velocidade na qual se propaga pulsos de ondas ultra-sônicas longitudinais, através de um componente de concreto. O ensaio de ultrassom tem como principais aplicações a verificação da porosidade e da homogeneidade do concreto, com a detecção de eventuais falhas internas de concretagem, avaliação da profundidade das fissuras e outras imperfeições. Por monitorar as variações no concreto, pode ser usada ao longo do tempo para averiguar mudanças decorrentes de agressividade do meio no qual o concreto está exposto.

Objetiva-se com o ensaio de ultrassom determinar a influência da sanidade e das propriedades da estrutura interna do CCR, aferindo a forma como estas propriedades são influenciadas pela alteração do teor de cimento Portland substituído pela pozolana de argila calcinada. Estes parâmetros foram correlacionados com a massa específica do concreto a fim de investigar possíveis parâmetros de controle entre estas propriedades.

As escolhas dos tipos dos agregados graúdos quanto à litologia, a quantidade e a dimensão máxima dos agregados influenciam nos resultados dos ensaios de ultrassom. O uso de rochas mais densas e com menor quantidade de fissuras tende a obter resultados com maior velocidade de propagação das ondas. Por o CCR usar em seu traço elevadas quantidades de agregados graúdos estes podem influenciar o tempo de propagação da onda. Neste estudo foram empregados agregados britados de rocha granítica com dimensões máximas características de 19 mm e 38 mm de diâmetro. Entretanto esta possível melhora em função dos agregados deve ser confrontada com a porosidade do CCR de referência e com a possível melhora da porosidade do CCR com adições minerais.

Segundo Rodrigues (2003), o ensaio de ultrassom pode determinar a uniformidade do concreto; avaliar a existência de fissuras; estimar a resistência à compressão do concreto por meio de curvas de correlação específicas; ser usado como parâmetro de controle da evolução de resistência do concreto; e avaliar a sua deterioração. Atuando em toda a massa de concreto, não sendo limitada somente a superfície.

Para a preparação dos corpos de prova para realização do ensaio não destrutivo de ultrassom, estes tiveram suas superfície limpas, estando também estas superfícies lisas e planas. Foi aplicada uma fina camada de acoplante nas fases dos transdutores do aparelho de ultrassom, sendo utilizado este material para garantir o contato contínuo entre o concreto os transdutores do aparelho de ultrassom. Desta forma permite que o ensaio de ultrassom seja realizado com a menor distância possível entre o concreto e o aparelho.

O ensaio dos corpos de prova de CCR foi realizado com os transdutores de emissão de ondas e de recepção em posição de transmissão direta. Esta medição foi realizada ao longo da altura dos corpos de prova, ou seja, posicionados em faces opostas. Também foi controlando o acoplamento, a pressão e a distância entre estes para minimizar possíveis erros nos ensaios, sendo esta distância aferida por paquímetro eletrônico. O equipamento utilizado para realizar o ensaio de ultrassom foi do Modelo "Tico", da marca Proceq, com freqüência de 54 kHz, podendo ser observado na Figura 3.18 os aparelhos empregados para a realização deste ensaio.

Figura 3.18 – Aparelhos usados para realizar o ensaio de ultrassom.

Conforme define a NBR 8802 (ABNT, 1994), os principais fatores passíveis de causar influência nos resultados dos ensaios com o CCR são: distância entre as superfícies de contato dos transdutores; densidade do concreto, esta depende do traço e das condições de concretagem; tipo, densidade e outras características dos agregados; tipo de cimento e grau de hidratação; direção de ensaio da peça; tipo de adensamento do concreto; e idade do concreto.

Rodrigues (2003) ressalta que o tipo, a quantidade e a dimensão máxima dos agregados também influenciam nos resultados dos ensaios de ultrassom. O uso de rochas mais densas e com menor quantidade de fissuras tende a obter resultados com maior velocidade de propagação das ondas. Por o CCR usar em seu traço elevadas quantidades de agregados graúdos, neste estudo com dimensões máximas características de 19 mm e 38 mm de diâmetro, poderá influenciar o tempo de propagação da onda. Rodrigues (2003) também ressalta que a umidade do concreto também interfere nos resultados, pois a velocidade de propagação das ondas sonoras no meio líquido é maior que nos gases, assim quando os poros do concreto convencional vibrado estão saturados com água a velocidade de propagação e 5% maior quando compara do ao concreto sem umidade nos poros. Todos os corpos de prova ensaiados estavam sob a mesma condição de saturação, ou seja, foram retirados da câmara úmida e secos com pano.

Também é possível expressar a homogeneidade do concreto em forma de parâmetros estatísticos, tais como o desvio padrão (s) ou o coeficiente de variação (δ) para as medidas de velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas no concreto. Contudo, tais parâmetros só podem ser usados para comparar variações entre componentes de concreto similares, devendo ser considerados os fatores expostos acima que podem causar interferência nos resultados.

Devido ao pouco uso deste tipo de ensaio no CCR, para possibilitar obter resultados mais precisos e confiáveis, foi realizado um tratamento estatístico com maior número de elementos, utilizando nove corpos de prova para os ensaios de ultrassom com idades de 28 dias, de 90 dias e de 180 dias.

Os corpos de prova foram mantidos em processo de cura úmida até o procedimento do ensaio, obedecendo todas as recomendações quanto ao preparo destes. As demais recomendações quanto à aplicação das ondas ultra-sônicas e ao equipamento também foram observadas.

3.4.3. Quantidade de Concreto Produzido e Ensaiado

Através dos tipos e das quantidades dos ensaios a serem realizados para cada traço, estes conforme com os seus respectivos teores de substituição do cimento Portland por pozolana de argila calcinada, foi estimado as quantidades dos materiais e serem empregados para a confecção do volume necessário de concreto para a realização deste estudo.

Assim, conforme apresenta a Tabela 3.14, foram necessários aproximadamente 1,41 m³ de concreto para executar os ensaios propostos. As proporções de cada material usadas para compor os traços foram determinadas na "Dosagem do CCR" e calibradas no "Ajuste da dosagem de referência" segundo a medida da trabalhabilidade do concreto.

Tabela 3.14 – Quantidade de ensaios e volume de CCR produzido.

Utilizações previstas para o CCR	Número de ensaios	Volume unitário por ensaio (m³)	Volume total por ensaio (m³)
Cannon time	15	0,0092	0,14
Cp's ensaios	165	0,0053	0,87
Cp's reserva	30	0,0053	0,16
Subtotal CCR a ser produzido			1,17
Perda estimada nos processos		20,00%	
Total CCR a ser produzido			1,41

Para caracterizar adequadamente o CCR produzido neste estudo, e atender estatisticamente o espaço amostral, foi realizado de três ensaios *Cannon Time* para cada teor de adição ensaiado, determinando assim que a consistência atingida estava coerente com o requerido por este tipo de material para a sua execução em obra.

Para a realização dos ensaios *Cannon Time* para cada traço estudado, visando não prejudicar a consistência do concreto no momento do ensaio no estado fresco e reduzir também a variabilidade deste ensaio, foi dividido a moldagem do concreto para cada teor em três etapas. Na primeira e na segunda etapa foram confeccionados 0,087 m³ de CCR, na terceira etapa de

moldagem foi confeccionado 0,106 m³ de CCR. Em todas as etapas foi realizado o ensaio *Cannon Time*. Desta forma cada um dos ensaios foi realizado com o concreto fresco, sem prejuízo para a consistência. Pode ser constatado na Tabela 3.15 e na Tabela 3.16 os volumes do concreto a ser produzido para cada teor de adição e o volume de cada etapa de moldagem.

Tabela 3.15 – Volume de CCR a ser produzido por teor de adição mineral utilizada em substituição.

Moldagem	Volume CCR (l) (1)	Teor substituição (%)	Ensaios	Idades ensaios (dias)
12 C.P.e 1 C.T.	87,00	0,00	Resistência à compressão simples e 3 C.P. de reserva.	28, 90 e 180
12 C.P.e 1 C.T.	87,00	0,00	Resistência à tração e permeabilidade à água.	90 e 180
15 C.P. e 1 C.T.	106,00	0,00	Absorção a água p/ capilaridade, por imersão e 3 C.P. de reserva.	90 e 180
12 C.P.e 1 C.T.	87,00	35,00	Resistência à compressão simples e 3 C.P. de reserva.	28, 90 e 180
12 C.P.e 1 C.T.	87,00	35,00	Resistência à tração e permeabilidade à água.	90 e 180
15 C.P. e 1 C.T.	106,00	35,00	Absorção a água p/ capilaridade, por imersão e 3 C.P. de reserva.	90 e 180
12 C.P.e 1 C.T.	87,00	50,00	Resistência à compressão simples e 3 C.P. de reserva.	28, 90 e 180
12 C.P.e 1 C.T.	87,00	50,00	Ensaios resistência à tração e permeabilidade à água.	90 e 180
15 C.P. e 1 C.T.	106,00	50,00	Absorção a água p/ capilaridade, por imersão e 3 C.P. de reserva.	90 e 180
12 C.P.e 1 C.T.	87,00	65,00	Resistência à compressão simples e 3 C.P. de reserva.	28, 90 e 180
12 C.P.e 1 C.T.	87,00	65,00	Resistência à tração e permeabilidade à água.	90 e 180
15 C.P. e 1 C.T.	106,00	65,00	Absorção a água p/ capilaridade, por imersão e 3 C.P. de reserva.	90 e 180
12 C.P.e 1 C.T.	87,00	80,00	Resistência à compressão simples e 3 C.P. de reserva.	28, 90 e 180
12 C.P.e 1 C.T.	87,00	80,00	Resistência à tração e permeabilidade à água.	90 e 180
15 C.P. e 1 C.T.	106,00	80,00	Absorção a água p/ capilaridade, por imersão e 3 C.P. de reserva.	90 e 180

C.P. = Corpo de Prova. C.T. = *Cannon Time*. (1) – Volume com 20% perdas.

Tabela 3.16 – Volume de CCR a ser produzido por teor de adição mineral utilizada em adição.

Moldagem	Volume CCR (l) (1)	Teor adição (%)	Ensaios	Idades ensaios (dias)
12 C.P. e 1 C.T.	87,00	35,00	Resistência à compressão simples e 3 C.P. de reserva.	28, 90 e 180
12 C.P. e 1 C.T.	87,00	35,00	Resistência à tração e permeabilidade à água.	90 e 180
15 C.P. e 1 C.T.	106,00	35,00	Absorção a água p/ capilaridade, por imersão e 3 C.P. de reserva.	90 e 180
12 C.P. e 1 C.T.	87,00	50,00	Resistência à compressão simples e 3 C.P. de reserva.	28, 90 e 180
12 C.P. e 1 C.T.	87,00	50,00	Resistência à tração e permeabilidade à água.	90 e 180
15 C.P. e 1 C.T.	106,00	50,00	Absorção a água p/ capilaridade, por imersão e 3 C.P. de reserva.	90 e 180

C.P. = Corpo de Prova. C.T. = *Cannon Time*. (1) – Volume com 20% perdas.

3.5. DOSAGEM DO CCR

Para realizar um bom estudo do traço do concreto, visando sua utilização em obra, algumas características das condições em que o concreto estará exposto durante sua confecção e a sua aplicação devem ser consideradas, dessa forma a temperatura e a umidade do ambiente, os equipamentos para a confecção do concreto e para a aplicação deste, os propriedades dos materiais disponíveis, a capacidade técnica da mão de obra envolvida no processo produtivo e a precisão que este somatório de fatores pode proporcionar ao produto final aplicado devem ser mensurados (GRAÇA, 2005).

Outra premissa estabelecida a ser atendida, além das estabelecidas no projeto em estudo, foi que o concreto também deveria prezar pela durabilidade e trabalhabilidade nos estados endurecidos e frescos respectivamente. Permitindo uma maior flexibilidade quanto ao lançamento e ao adensamento. Desta forma a dosagem teve como meta a obtenção de um concreto trabalhável e homogêneo que desse sustentabilidade técnica do traço, entretanto, sem perder de vista os gastos e os custos dos materiais visando também à viabilidade econômica deste traço.

Uma característica do traço de concreto muito importante para o acompanhamento gerencial de uma obra, e que também foi observada nos estudos iniciais para a definição do traço do concreto, foi que a proporção dos materiais que compõem o traço pode ser modificada quando for julgado necessário, assim, o traço definido inicialmente não é absoluto. Desta forma quanto maior a quantidade de traços de concreto estudados sobre determinado concreto e seus materiais constituintes maior será a precisão atingida.

O procedimento adotado para a confecção do concreto compactado com rolo analisado neste estudo foi baseado no procedimento de FURNAS n° 01.006.008, intitulado "Concreto Compactado com Rolo (CCR) – Preparação em Laboratório", também conhecido como Método Pacelli. Segundo este procedimento, para a definição das proporções dos materiais é empregada uma curva cúbica baseada na curva Fuller. Nas dosagens produzidas por esse método, o consumo de cimento a ser empregado é inicialmente definido, sendo então definido um valor inicial para a quantidade de água. Com estas características pode ser determinado o volume de pasta da mistura, composta pela soma dos volumes dos materiais cimentícios, água e ar, e pode também ser determinado o volume e a proporções de agregados a serem empregados no concreto através, sendo estes obtidos através da curva teórica. Assim é possível a determinação da massa, em kg/m³, de cada agregado, permitindo obter uma dosagem, que pode ser ajustada para atingir o *Cannon Time* especificado (FARIAS, 2006).

Os estudos de dosagem foram realizados com os materiais existentes e beneficiados na região da construção da usina hidrelétrica de Santo Antônio, no Rio Madeira. Foram seguidos todos os parâmetros balizados neste estudo quanto às substituições de cimento por vários teores de pozolanas de argila calcinada, assim como as recomendações estabelecidas pelas normas brasileiras já citadas. O estudo da dosagem do CCR foi conduzido objetivando alcançar uma base de dados que permitisse determinar um traço de concreto que atendesse as especificações tanto para o concreto fresco quanto para o concreto endurecido.

Conforme os estudos de Batista (2004) e de Batista e Graça (2007) foi concluído que, para o concreto compactado com rolo, teores de água inferiores a 120 kg/m³ tornam o CCR inadequado, reduzindo o grau de compactação. Assim, foi adotado neste trabalho um teor acima desse valor mínimo para os estudos experimentais do traço.

Em todas as amostras de concretos produzidos para este estudo o teor de umidade presente nos agregados graúdos e no agregado miúdo foram medidos a fim de determinar e corrigir a

quantidade de água de amassamento a ser empregada na confecção do concreto, garantindo que o teor água / cimento não fosse alterado.

Foram empregados dois tipos de agregados graúdos, sendo estes obtidos por britagem de rocha granítica e com dimensões máximas características de 19 mm e 38 mm. Os agregados foram usados na confecção do concreto em condição Saturada com Superfície Seca (SSS). As proporções entre e o agregado miúdo e os agregados graúdos, assim como a proporção entre os agregados graúdos, foram dosadas de forma que a granulometria da mistura destes agregados fosse encaixada na Curva de *Fuller*, possuindo o melhor arranjo entre as granulometrias dos seus elementos constituintes, maximizando assim o empacotamento do concreto.

Para conseguir o melhor ajuste a esta curva a quantidade de cada tipo de agregado a ser empregado para a confecção do concreto foi criteriosamente definida. Neste sentido foram feitos ajustes nesta dosagem teórica de referência, através da confecção de CCR e aferição da trabalhabilidade. Também foi observando o encaixe na Curva de *Fuller* para este traço ajustado, objetivando garantir que as propriedades requeridas pelo concreto, como a segregação e a facilidade de manuseio, fossem atendidas.

É importante salientar novamente que, devido à restrição quanto ao tempo da pesquisa, o ajuste na dosagem do traço de referência teve como critério de avaliação a consistência por meio do ensaio de medida da trabalhabilidade *Cannon Time*. Não foram moldados e rompidos corpos de prova para um estudo mais profundo sobre o traço adotado, pois o tempo requerido para a cura do concreto, a um nível que permitisse que estes elementos fossem rompidos, extrapolaria o tempo que este estudo dispõe.

A Figura 3.19 mostra a forma obtida na Curva de *Fuller* antes do ajuste do traço, sendo a forma desta curva obtida pela proporção empregada dos materiais, permitindo o ajuste da curva granulométrica pela alteração da proporção dos agregados. Ao modificar as quantidades dos agregados graúdos e do agregado miúdo, visando encaixar a granulometria entre os limites máximos e mínimos da curva granulométrica, pode-se obter a melhor proporção que adequara aos limites. Esta proporção ideal gera o empacotamento, com o preenchimento com as partículas menores dos vazios deixados pelas partículas de maiores diâmetro.

Para obter a forma da curva, ilustrada na Figura 3.19, foi adotado para os volumes dos agregados a quantidade de 47% de areia e 53% de agregado graúdo, este composto pela mistura dos agregados graúdos com dimensões máximas características de 19 mm e 38 mm de diâmetro, divididos seu volume em 55% de brita 19 mm e 45% de brita 38 mm. O volume total ocupados pelos agregados em um metro cúbico de CCR foi de 0,813 m³. A quantidade empregada de água foi de 140 l/m³, obtendo um *Cannon Time* médio de 7 segundos para este traço.

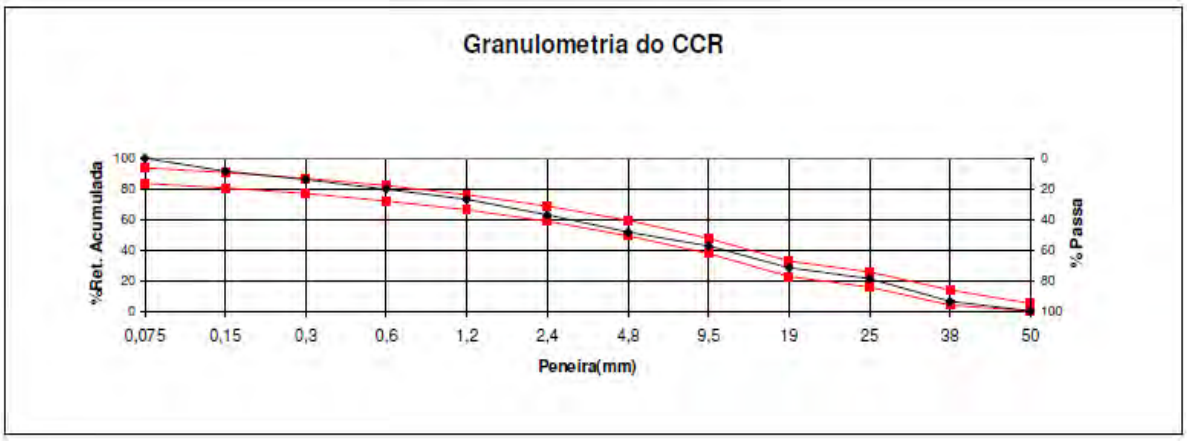


Figura 3.19 – Granulometria dos agregados aplicados a Curva de *Fuller* antes do ajuste do traço.

O valor obtido pelo ensaio *Cannon Time* neste primeiro estudo do traço do CCR foi abaixo do limite inferior para permitir um adequado lançamento e compactação deste tipo de concreto. Foi utilizado inicialmente 140 litros de água por metro cúbico de concreto e através da redução desta quantidade de água o valor obtido para este ensaio foi elevado. Outro problema deste traço foi a segregação elevada, principalmente da brita de 38 mm de diâmetro, fato provável devido ao baixo índice de finos. Com a elevação do teor de agregado miúdo e redimensionamento das proporções entre os agregados graúdos este problema pôde ser solucionado.