

SILVA, N.G.; BUEST, G.; CAMPITELI, V.C. **Argamassas com areia britada: influencia dos finos e da forma das partículas.** *In:* Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas, VI, Florianópolis: 2005.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO (SNIC). **Relatório anual 2005.** Disponível em: <http://www.snic.org.br> Acesso em: 21/07/06 às 14h246min.

TEIXEIRA, W. (Coordenador);. **Decifrando a terra.** São Paulo: Companhia Editora Nacional, 2008.

TERRA, L.E.M. **Finos de pedra para confecção de concretos estrutural - Práticas recomendadas** *In:* Seminário "Desenvolvimento Sustentável Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na Construção Civil: Práticas Recomendadas", III. São Paulo: 2000.

TIECHER, F.; VENQUIARUTO, S.D.; SILVA, L.B.; DAL MOLIN, D.C.C.; GOMES, M.B. **A Reatividade dos Agregados do Sul do Brasil.** Revista IBRACON de Materiais, Volume 3, p. 82-91. São Paulo: 2007.

VALVERDE, F.M. **Agregados para construção civil.** Disponível em: [http://www.dnpm.gov.br/assets/galeriadocumento/sumariomineral2005/Agrega dos%202005rev.doc](http://www.dnpm.gov.br/assets/galeriadocumento/sumariomineral2005/Agrega%202005rev.doc) Acesso em: 28/06/06 às 15h46min.

VIANA, C.E. (2007) **Escoria de fluxo de sondagem como agregado miúdo para a produção de argamassa de múltiplo uso.** Dissertação de mestrado em Engenharia Civil, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF), Campos do Goytacazes: 2007.

WHITAKER, W. **Técnicas de preparação de areia para uso na construção civil.** Dissertação de mestrado, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo: 2001.

ZORDAN, S.E.; HESPANHOL, I. **Proposta de metodologia para avaliação ambiental dos processos de reciclagem de resíduos industriais na construção civil.** *In:* Simpósio Brasileiro de Gestão da Qualidade e Organização do Ambiente Construído, 2º. 2001. Fortaleza: 2001.

Dissertação de mestrado, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo: 2001.

NEVILLE, A.M. **Propriedades do concreto**, São Paulo, PINI. 1982.

PERSSON, A-L. **Image analysis of shape and size of fine aggregates**. Engineering Geology. Nº 50, p. 177 – 186, USA: 1998

PINHEIRO, W.M.G. **Utilização do resíduo da extração da pedra mineira como agregado no concreto**. Dissertação de mestrado. Faculdade de Engenharia Civil da Universidade estadual de Campinas, São Paulo. 2003.

PINTO, T. P. **Metodologia para gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana**. 189 p. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo: 1999.

PRISZKULINK, S. **Inspeção e diagnóstico de estruturas de concreto afetadas pelas reações cimento-agregado**. In: ISAIA, G.C. Concreto: ensino, pesquisa e realizações. São Paulo: IBRACON. V.2, p.1017-1070, 2005.

PRUDÊNCIO, M.L.R.; COELHO, A.H.; GUTSTEIN, D. **Metodologia para obtenção de agregado miúdo artificial a partir do processamento do pó-de-pedra** In: Congresso Brasileiro do Concreto, 40º, 1998. Rio de Janeiro: Anais, 1998.

RODRIGUES, M.I.; IEMMA, A.F. **Planejamento de experimentos e otimização de processos**. Ed. Casa do Pão, São Paulo: 2005.

SABBATINI, F.H. **Desenvolvimento de métodos, processos e sistemas construtivos: formulação e aplicação de uma metodologia**. 336p. Tese de doutorado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo: 1989.

SBRIGHI NETO, C. **Agregados para concreto**. In: ISAIA, G.C. Concreto: ensino, pesquisa e realizações. São Paulo: IBRACON. V.1, p.323-343, 2005.

SILVA, A.S.M. **Dosagem de concretos pelos métodos de empacotamento compressível e Aïtcin-Faury modificado**, Dissertação de mestrado. COPPE - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro: 2004.

SILVA, A.S.R. **Avaliação do desempenho do concreto contendo agregado graúdo de escória de ferro cromo**. Dissertação de mestrado, Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia. Salvador: 2006.

SILVA, I.J. **Contribuição ao estudo dos concretos de elevado desempenho: propriedades mecânicas, durabilidade e microestrutura**. Tese de doutorado do programa interunidades: ciência e engenharia dos materiais, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Paulo: 2000.

Eletrônico sobre Durabilidade das Construções, 1^o, 12 p. São José dos Campos: 2001.

HELENE, P.R.L.; **Estrutura interna do concreto**. Notas de aula do curso de materiais de construção da graduação de Engenharia Civil da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1979.

HELENE, P.R.L.; TERZIAN, P.; **Manual de dosagem e controle do concreto**, São Paulo, PINI. 1993.

ICAR – International Center for Aggregate Research. **The effects of aggregates characteristics on the performance of Portland cement concrete**. The University of Texas. 2004.

JOHN, V.M. **Reciclagem de resíduos na construção civil: contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento**, Tese de Livre Docência, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

LIMA, E.P.; HELENE, P.R.L. **Influência do volume de pasta na zona de transição pasta/agregado com relação às propriedades mecânicas e de durabilidade do concreto**. Boletim técnico da escola politécnica da USP. Nº 270. São Paulo: EPUSP. 2001.

LOPES, L.S. **Caracterização da areia basáltica provenientes de resíduos da britagem do basalto para uso em concretos**. Dissertação de mestrado. Universidade Luterana do Brasil. São Paulo: 2002.

MARTIN, J.F.M. **Aditivos para concreto**. In: ISAIA, G.C. Concreto: ensino, pesquisa e realizações. São Paulo: IBRACON. V.1, p.381-406, 2005.

MATTOS, G.; WAGNER, L. **Consumption of materials in the United States 1900 – 1.995**. US Geolical Survey. 1999. 26 p

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e materiais**. Ibracon, 3ed, São Paulo: 2008.

MOURA, W.A. **A utilização de escoria de cobre como adição e como agregado miúdo para concretos**. Tese de doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre: 2000.

MOURA, W.A. **Aproveitamento do resíduo da produção de agregado graúdo natural (pó-de-pedra) como agregado miúdo para concreto e blocos pré-moldados de argamassa**. Trabalho para mudança de classe para professor titular da Universidade de Feira de Santana. Feira de Santana: 2004.

NEVES, L. **Aplicação dos finos gerados pela produção de pedras britadas graníticas no concreto pré-misturado em substituição às areias naturais**.

econômico. Dissertação de mestrado. Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo. São Paulo: 2000.

CUCHIEARATO, G; SBRIGHI NETO, C.; QUITETE, E.B. **A revisão da norma ABNT de agregados: NBR 7211 e NBR 9935 - quais as alterações nas terminologias e especificações para os finos de pedreiras** *In:* SUFFIB – Seminário: O Uso da Fração Fina da Britagem, II, 2005, São Paulo, 2005.

CUNHA, R.E.; TAVARES, L.M.M.; GONÇALVES, J.P.; TOLEDO FILHO, R.D.; ALMEIDA, S.L.M. **Produção de areia manufaturada em usina piloto.** *In:* SUFFIB – Seminário: O Uso da Fração Fina da Britagem, II., 2005, São Paulo, 2005.

D'AGOSTINO, L.Z.; SOARES, L.; **O uso de finos de pedreira de rocha granítico-gnáissica em substituição as areias naturais na elaboração de argamassa.** Revista Geociências da UNESP, n° 1, p. 65-73, São Paulo, 2003.

DIAS, E.G.C.S.; **Avaliação de impacto ambiental de projetos de mineração no estado de São Paulo: A etapa de acompanhamento.** Tese de doutorado, Programa de pós-graduação em Engenharia Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo: 2001.

EL DEBS, M. K. **Concreto pré-moldado: fundamentos e aplicações.** São Paulo: Ed. EESC-USP, 2000.

FIGUEIRÔA, J.P.; ANDRADE, T. **O ataque da reação álcali-agregado sobre as estruturas de concreto.** Ed. Universitária da UFPE, Recife: 2007.

GONÇALVES, J. P. **Utilização do resíduo de corte de granito (RCG) como adição para produção de concretos.** Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

GONÇALVES, J.P.; MOURA, W.A.; DAL MOLIM, D.C.C. **Avaliação da influência da utilização do resíduo de corte de granito (RCG), como adição, em propriedades mecânicas do concreto** *In:* ENTAC - Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, IX, Porto Alegre: Anais, 2002.

GOUVEIA, L.T.; FERNANDES Jr, J.L. **Avaliação de agregado utilizados em obras viárias no Estado de São Paulo através do ensaio de angularidade da fração fina** *In:* Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte, XV, Campinas: Anais, 2001.

GRATTAN-BELLEW, P.E. **A critical review of ultra-accelerated tests for alkali-silica reactivity.** Cement and Concrete Composites, 19, pg 403-414, Great Britain: Elsevier Science Ltd, 1997.

HASPARYK, N. P.; CARASEK, H.; MONTEIRO, P. J. M. **Estudo comparativo da reação álcali-agregado através de diferentes métodos de ensaio.** *In:* Workshop

BRASIL. **LEI FEDERAL Nº 6.938 de 31 de agosto de 1981**. Dispõe sobre a política nacional de meio ambiente. Legislação Ambiental, Brasília: 1981.

BRASIL. **LEI FEDERAL Nº 7.804 de 1990**. Altera a Lei Federal Nº 6.938 de 31 de agosto de 1981. Legislação Ambiental, Brasília: 1990.

BRASIL. **LEI FEDERAL Nº 9.605 de 12 de fevereiro de 1998**. Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente. Legislação Ambiental, Brasília, 1981.

BRASIL. **RESOLUÇÃO CONAMA Nº 001 de 23 de janeiro de 1986**. Dispõe sobre o estabelecimento de critérios básicos e diretrizes gerais para RIMA. Legislação Ambiental, Rio de Janeiro, 1986.

BRASIL. **RESOLUÇÃO CONAMA Nº 237 de 19 de dezembro de 1997**. Disposição sobre o licenciamento ambiental. Legislação Ambiental, Rio de Janeiro, 1997.

BRASIL. **RESOLUÇÃO CONAMA Nº 307 de 05 de julho de 2002**. Diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão de resíduos da Construção civil. Legislação Ambiental, Rio de Janeiro, 2002.

BUTTNER, A.M. **Concreto com agregados graúdos reciclados de concreto – Influência da idade de reciclagem nas propriedades dos agregados e concretos reciclados**. Dissertação de mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Paulo: 2003.

CALLISTER JR, W. D. **Ciência e engenharia de materiais**. São Paulo, LTC Editora. 2001.

CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO (CBIC). **A construção em números**. Disponível em: <http://www.cbicdados.com.br> Acesso em: 27/03/07 às 15h28min.

CASSA, J.C.S.; CARNEIRO, A.P. **Aplicação de uma escória de ferro-cromo como agregado graúdo de concreto de alto desempenho** In: Congresso Anual da ABMS, 53º, Belo Horizonte: 1998.

ÇELIK, T.; MARAR, K. **Effects of crushed stone dust on some properties of concrete**. Cement and Concrete Research, Vol. 26, Nº. 7, p. 1121-1130, USA: 1996.

CINCOTTO, M. A. **Utilização de subprodutos e resíduos na indústria da construção civil. Tecnologia de Edificações**. São Paulo, PINI. 1988.

COUTINHO, A.S. **Fabrico e propriedades do betão**. 3ª ed. Lisboa: LNEC. 1997.

CUCHIEARATO, G; **Caracterização tecnológica de resíduos da mineração de agregados da região metropolitana de São Paulo, visando seu aproveitamento**

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos**. NBR 10005. Rio de Janeiro. 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos**. NBR 10006. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado**. NBR 9062. Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Resíduos sólidos – Classificação**. NBR 10004. Rio de Janeiro. 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Sistemas de Gestão Ambiental: especificações e diretrizes para uso**. NBR ISO 14001. Rio de Janeiro. 2004.

BAHIA. **DECRETO-LEI Nº 7.967 de 05 de junho de 2001**. Aprova o regulamento da lei 7.799 de fevereiro de 2001. Legislação Ambiental, Salvador, 2001.

BAHIA. **LEI ESTADUAL DELEGADA Nº 31 de 31 de março de 1983**. Cria o Centro de Recursos Ambientais. Legislação Ambiental, Salvador, 1983.

BAHIA. **LEI ESTADUAL Nº 3.163 de 04 de outubro de 1973**. Cria, na Secretaria do Planejamento, Ciência e Tecnologia, o Conselho Estadual de Proteção Ambiental – CEPRAM. Legislação Ambiental, Salvador, 1973.

BAHIA. **LEI ESTADUAL Nº 7.799 de 07 de fevereiro de 2001**. Institui a Política Estadual de Administração dos Recursos Ambientais. Legislação Ambiental, Salvador, 2001.

BAHIA. **RESOLUÇÃO CEPRAM Nº 2.929 de 18 de janeiro de 2002**. Dispõe sobre o processo de avaliação de impacto ambiental. Legislação Ambiental, Salvador, 2002.

BASÍLIO. E.S. **Agregados para concreto**. Associação Brasileira de Cimento Portland, São Paulo: 1980.

BASTOS, S.R.B. **Uso da areia artificial basáltica em substituição parcial a areia fina para produção de concretos convencionais** Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis: 2002.

BRASIL. **DECRETO LEI Nº 99.274 de 06 de junho de 1990**. Licenciamento ambiental de atividades utilizadoras de recursos ambientais, consideradas efetiva ou potencialmente poluidoras, bem como dos empreendimentos capazes, sob qualquer forma, de causar degradação ambiental. Legislação Ambiental, Brasília: 1990.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Apreciação petrográfica de materiais naturais, para utilização como agregado em concreto.** NBR 7389. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Argamassa e concreto – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos:** NBR 7222. Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica.** NBR 9778. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cimento Portland composto - Especificações.** NBR 11578. Rio de Janeiro. 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cimento Portland de alta resistência inicial - Especificações.** NBR 5733. Rio de Janeiro. 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cimento Portland resistente a sulfatos - Especificações.** NBR 5737. Rio de Janeiro. 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto - Determinação do teor de ar em concreto fresco - Método pressométrico.** NBR NM 47. Rio de Janeiro. 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão em corpos-de-prova prismáticos:** NBR 12142. Rio de Janeiro, 1991.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos:** NBR 5739. Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto fresco - Determinação da massa específica e do teor de ar pelo método gravimétrico.** NBR 9833. Rio de Janeiro. 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos ou prismáticos de concreto.** NBR 5738. Rio de Janeiro, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Peneiras de ensaio – Requisitos técnicos e verificação – Parte 1 Peneiras de ensaio com tela de tecido metálico:** NBR NM ISO 3310-1. Rio de Janeiro, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregado – Determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm, por lavagem.** NBR NM 46. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregado – Determinação da composição granulométrica:** NBR NM 248. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregado fino – Determinação de impurezas orgânicas.** NBR NM 49. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente.** NBR NM 52. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregado para concreto.** NBR 7211. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregados – Reatividade álcali-agregado – Parte 1: Guia para avaliação da reatividade potencial e medidas preventivas para uso de agregados em concreto.** NBR 15577-1. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregados – Reatividade álcali-agregado – Parte 2: Coleta, preparação e periodicidade de ensaios de amostra de agregados em concreto.** NBR 15577-2. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregados – Reatividade álcali-agregado – Parte 3: Análise petrográfica para verificação da potencialidade reativa de agregados em presença de álcalis do concreto.** NBR 15577-3. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregados – Reatividade álcali-agregado – Parte 4: Determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado.** NBR 15577-4. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregados – Reatividade álcali-agregado – Parte 5: Determinação da mitigação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado.** NBR 15577-5. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregados – Reatividade álcali-agregado – Parte 6: Determinação da expansão em prismas de concreto.** NBR 15577-6. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Amostragem de resíduos sólidos.** NBR 10007. Rio de Janeiro, 2004.

REFERENCIAS

AFONSO W. M. **Caracterização de resíduo de corte de rochas na produção de argamassa.** Dissertação de mestrado em Engenharia Civil, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF), Campos do Goytacazes: 2005.

AGOYPYAN, V. (Coordenador). **Alternativas para redução do desperdício de materiais no canteiro de obras.** Relatório final. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 5 v., 1998.

ALMEIDA, I.R. **Concretos dosados em central, com areia 100% artificial.** *In:* SUFFIB – Seminário: O Uso da Fração Fina da Britagem, II., 2005, São Paulo, 2005.

ALMEIDA, S.L.M.M.; SILVA, V.S. **Areia artificial: uma alternativa econômica e ambiental para o mercado nacional de agregados.** *In:* SUFFIB – Seminário: O Uso da Fração Fina da Britagem, II, São Paulo, 2005.

AMERICAN STANDARDS FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard guide for petrography examination of aggregates for concrete.** ASTM C 295. West Conshohocken, 2003.

AMERICAN STANDARDS FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard test method for potential alkali reactivity of aggregates (mortar-bar method).** ASTM C 1260. West Conshohocken, 2007.

ÂNGULO, S.C.; ZORDAN, S.E.; JOHN, V.M. **Desenvolvimento sustentável e a reciclagem de resíduos na construção civil.** *In:* Seminário desenvolvimento sustentável e reciclagem na construção civil, IV, São Paulo: 2001.

ARAÚJO, G.S.; BICALHO, K.V.; TRISTÃO, F.A. **Determinação da área específica das areias através da análise de imagens.** *In:* Simpósio Brasileiro de tecnologia das Argamassas, V.1, 2003, São Paulo: Anais V SBTA, 2003. p.149-157.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Guia básico de utilização do cimento Portland.** 7ª ed. São Paulo, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Aditivos para concreto de cimento Portland.** NBR 11768. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregado – Amostragem.** NBR NM 26. Rio de Janeiro, 2001.

- concretos com menor impacto ambiental.

Espera-se também contribuir para o desenvolvimento sustentável da sociedade, através da conscientização das pessoas ligadas ao setor da pré-fabricação e da mineração para construção civil, da importância da prevenção da poluição e do aproveitamento dos resíduos gerados.

5.3. Sugestões para trabalhos futuros

- desenvolver um procedimento para utilização de resíduos de britagem como agregado miúdo em concretos, em que sejam definidos: itens de verificação para recebimento de matéria-prima, tempo de mistura, faixa de valor do abatimento, *etc*;
- estudar a deformabilidade dos concretos quando se faz substituição de agregados naturais por resíduos de britagem;
- executar um levantamento da potencialidade reativa, em relação à RAA, de todos os agregados utilizados em Salvador;
- estudar a influência dos cimentos disponíveis em Salvador sobre a potencialidade de ocorrência da RAA em concretos utilizados em Salvador;
- verificar quanto as adições minerais mitigam a potencialidade de ocorrência da RAA em concretos na região de Salvador.

extração de bens minerais fossem obrigadas a destinar os seus resíduos de maneira sustentável, bem como as construtoras terem que utilizar resíduos industriais em empreendimentos que causassem algum tipo de impacto ambiental, de maneira a minimizá-los.

As licenças ambientais, então, podem se tornar ferramentas poderosas de planejamento de gestão ambiental quando o empreendedor a utilizar, não só como ato administrativo, mas também como fonte de medidas de controle de impactos ambientais.

Dentre as medidas mitigadoras que também podem ser adotadas pelos órgãos governamentais, para estímulo do uso dos resíduos de britagem de rocha, tem-se: criação de tributação ambiental sobre a disposição dos resíduos de britagem em pilhas de estéril, descontos fiscais para empreendimentos que utilizem tecnologias de produção limpa, estabelecimento de metas para redução de resíduos, política de compra de produtos e serviços ambientalmente sustentáveis, criação de um selo verde que ateste para o mercado quais empreendimentos fazem uso de um sistema de gestão ambiental.

5.2. Contribuições da pesquisa

O processo de utilização dos resíduos de britagem em concretos deverá ser implantado em uma unidade de pré-fabricação de estruturas e os resultados obtidos desta prática servirá como uma ferramenta para o aperfeiçoamento do procedimento de utilização dos resíduos de britagem em concretos e, também será útil para a divulgação desta solução no setor industrial da pré-fabricação de concreto.

Como resultado desta pesquisa, espera-se que outras usinas de estruturas pré-fabricadas passem a utilizar os resíduos de britagem em seus processos produtivos, ocasionando:

- destinação para um resíduo, que é gerado em grande quantidade e para o qual não existe alternativa para disposição.
- diminuição do uso de recursos naturais;

Em relação à porosidade do concreto, a substituição da areia pelos resíduos de britagem provoca uma diminuição dos poros permeáveis. A diminuição da porosidade do concreto acarreta em uma redução da sua permeabilidade, o que ocasiona diminuição da possibilidade de substâncias deletérias migrarem para o interior do concreto, provocando sua degradação.

Nos traços de concreto com consumo de 300 kg/m³ de cimento o limite de substituição da areia natural pelos resíduos de britagem foi de 25%, enquanto que no traço com consumo de 365 kg/m³ os limites foram de 25% para o resíduo de britagem seco e 38% para o resíduo lavado.

Em relação à reatividade com os álcalis, o resíduo de britagem tem uma potencialidade de reação maior do que a areia natural, fazendo com que as medidas mitigatórias necessárias para sua utilização em concretos susceptíveis à RAA precisem ser intensificadas.

A viabilidade econômica da substituição de parte da areia natural por resíduos de britagem se mostrou compatível, pois com a substituição não houve aumento do custo do concreto. Existe também resíduo em quantidade suficiente para sua utilização em escala e o processo de recebimento de materiais das unidades de pré-fabricação possui rotinas internas que permitem o seu recebimento com controle de qualidade.

A utilização dos resíduos de britagem na produção de concreto em unidades de pré-fabricação é uma das soluções possíveis para a diminuição dos impactos ambientais gerados pela indústria da mineração de agregados. Esta saída é benéfica por diminuir a necessidade de extração de matérias-primas naturais do meio ambiente, diminuindo o consumo de energia necessária no processo produtivo e disponibilizar uma solução para a deposição de resíduos industriais.

5.1. Sugestões para incentivar o uso de resíduos de britagem

O uso de instrumentos legais como licenciamento ambiental, EIA-RIMAS, poderia fazer com que a substituição dos agregados naturais por resíduos industriais se tornasse viável no setor da construção civil. Para isto, bastaria que as empresas de

5. CONCLUSÕES

As características de granulometria, forma, textura, absorção de água e compacidade dos resíduos de britagem de rocha se mostraram adequadas e os qualificaram para serem utilizados em concretos de estruturas pré-fabricadas.

Os teores de material pulverulento encontrados nos resíduos de britagem são significativamente superiores aos encontrados na areia natural, mas não ultrapassam os limites estabelecidos pela norma NBR 7211 (ABNT, 2005), quando é considerada a definição de agregado total. O teor de material pulverulento deve ser calculado levando-se em conta os critérios de ponderabilidade em massa entre os agregados graúdos e miúdos da mistura granular utilizada no concreto.

O abatimento, medida usada para avaliar a consistência do concreto, aumenta com a substituição da areia natural por resíduos de britagem até uma proporção de aproximadamente 15%, ocasionado pelo aumento do grau de compacidade da mistura granular. A partir deste teor de substituição o valor do abatimento diminui provocado pela predominância da forma angular e textura rugosa dos grãos de resíduo de britagem sobre a forma esférica e textura lisa dos grãos de areia natural.

A diminuição inicial da consistência com a substituição de menos de 15% da areia por resíduos viabiliza uma redução no consumo de cimento por m^3 , pois quando é mantido o valor do abatimento e a relação água/cimento desejadas a quantidade de agregados total no traço de concreto pode ser aumentada.

Os resultados obtidos mostram que a incorporação dos resíduos de britagem no concreto até um percentual de aproximadamente 15% melhora a resistência à compressão, enquanto que substituições de até 25% não provocam perda de resistência à compressão suficiente para inviabilizar o seu uso em concretos utilizados para a fabricação de estruturas pré-fabricadas.

Quanto à resistência à tração, como não há parâmetros limites para os resultados, pode-se afirmar que há uma perda de desempenho nas primeiras idades; já para a idade de 28 dias há um incremento em seu valor.



Figura 54. Impacto ambiental – extração ilegal de areia.

O volume estimado pela indústria legalmente licenciada é que aproximadamente 30% de toda a areia consumida na região metropolitana de Salvador seja proveniente de extrações ilegais.

- degradação das vias rodoviárias, alto consumo de combustíveis fósseis e emissão de partículas sólidas (poeira, fumaça) causados pela maior distância de transporte aos centros consumidores, conforme figura 53;

A distância de transporte é um importante aspecto que deve ser avaliado, pois os impactos ambientais gerados não se limitam a uma área definida, mas se estendem durante todo o trajeto de movimentação das cargas.



Figura 53. Impacto ambiental – degradação de vias rodoviárias devido ao transporte de areia.

- extração ilegal de areia sem os devidos cuidados ambientais, exemplificada na figura 54.

- poluição dos mananciais de águas superficiais, devido ao carreamento de partículas sólidas, que ocorrem, porque o solo se encontra sem a proteção vegetal e não existe um sistema de drenagem de águas pluviais, mostrada na Figura 51;



Figura 51. Impacto ambiental – poluição dos mananciais de água superficiais em areal.

- não-recuperação de áreas degradadas após o final da extração da areia natural, conforme demonstrado na Figura 52;



Figura 52 Impacto ambiental – áreas degradadas em areal.



Figura 49. Impacto ambiental – poluição do ar na pedreira 2.

4.5.2. Impactos na indústria de extração de areia natural

Na visita feita ao areal, uma indústria de extração de bens minerais, foram verificados alguns impactos ambientais, sendo os mais importantes:

- o desmatamento de áreas sem o cuidado de preservação da vegetação original para o uso na recuperação, após o fim da extração da areia, conforme Figura 50;



Figura 50. Impacto ambiental – desmatamento em areal.

- poluição dos recursos hídricos pelo não tratamento da água de lavagem dos agregados, para a devolução ao meio ambiente, mostrada na figura 47;



Figura 47 – Impacto ambiental – poluição dos recursos hídricos.

- poluição do ar causada por poeiras geradas durante os processos de britagem, carregamento e transporte dos agregados e pela não estabilização das pilhas de resíduos, demonstrada nas Figuras 48 e 49.



Figura 48. Impacto ambiental – poluição do ar na pedreira 1.

O setor de extração mineral é um das atividades econômicas que mais geram danos ambientais durante a sua operação e provocam um grande passivo ambiental após a sua extinção, deixando grandes áreas devastadas.

4.5.1. Impactos da indústria de britagem de rocha

É necessária a classificação dos resíduos de britagem em uma classe de agressividade ambiental através de ensaios de lixiviação e solubilização, para que sejam definidos os riscos ambientais da sua disposição em pilhas não-estabilizadas no meio ambiente.

Em visitas realizadas nas pedreiras foram constatados vários impactos ambientais negativos, sendo que os principais são:

- geração de ruídos e vibrações no solo, devido ao uso de explosivos para o desmonte da rocha;
- poluição dos mananciais de água superficial por carreamento de partículas sólidas devido a não-existência de sistemas de drenagem e tratamento de águas pluviais, conforme Figura 46;



Figura 46. Impacto ambiental – carreamento de partículas sólidas na pedreira.

O alto consumo de cimento e o rigoroso controle de qualidade fazem com que os concretos utilizados em unidades industriais de pré-fabricação tenham grande capacidade de absorverem resíduos, pois além dos mesmos terem uma folga na resistência final, o processo utilizado para a dosagem possui elementos de controle que permitem a introdução de mais uma matéria-prima sem que haja perda na qualidade do produto final.

O procedimento de recebimento de matérias-primas na unidade de pré-fabricação se mostrou adequado, pois neste procedimento se encontra as instruções para a verificação periódica da granulometria dos agregados.

Porém, é necessária a inclusão de limites máximos para a quantidade de material pulverulento e limites de módulo de finura para os resíduos de britagem no recebimento.

4.5. Avaliação dos impactos ambientais

Segundo ZORDAN e HESPANHOL (2001), um aspecto que nem sempre é considerado nas pesquisas sobre a reutilização de resíduos industriais, mas que está se tornando cada vez mais um requisito para o sucesso de qualquer atividade, é a avaliação dos impactos ambientais gerados no processo.

O uso de grande quantidade de agregados minerais como areia e brita na construção civil gera a necessidade de extração da natureza de um volume enorme de bens minerais e, como consequência, causa grandes impactos ambientais negativos nos meios físico, biótico e antrópico.

A substituição do uso de bens minerais naturais por resíduos industriais contribui para a preservação do meio ambiente, dando um destino adequado a um agente poluidor e contribuindo para o desenvolvimento sustentável (GONÇALVES; MOURA; DAL MOLIN, 2002). Além de prolongar a vida útil das reservas naturais, diminuindo a destruição das paisagens, fauna e flora.

Quadro 33 – custo do concreto de referência com consumo de cimento de 365 kg/m³.

TRAÇO	365		
Materiais	Quantidade	Preço unitário (R\$)	Preço total (R\$)
Cimento (t)	0,37	330,00	120,45
Areia natural (t)	0,76	27,00	20,45
Resíduos de britagem (t)	0,00	21,00	0,00
Brita 19 mm (t)	1,24	34,50	42,63
Aditivo (L)	5,00	4,09	20,45
Subtotal			203,98
Perda (%)	5		10,20
Total (R\$)			214,18

Quadro 34 – custo do concreto com de cimento de 365 kg/m³ e uso de resíduo de britagem seco.

TRAÇO	365-P1-25		
Materiais	Quantidade	Preço unitário (R\$)	Preço total (R\$)
Cimento (t)	0,37	330,00	120,45
Areia natural (t)	0,57	27,00	15,42
Resíduos de britagem (t)	0,19	21,00	4,00
Brita 19 mm (t)	1,24	34,50	42,87
Aditivo (L)	5,00	4,09	20,45
Subtotal			203,19
Perda (%)	5		10,16
Total (R\$)			213,35

Quadro 35 – custo do concreto com de cimento de 365 kg/m³ e uso de resíduo de britagem lavado.

TRAÇO	365-P2-38		
Materiais	Quantidade	Preço unitário (R\$)	Preço total (R\$)
Cimento (t)	0,37	330,00	120,45
Areia natural (t)	0,47	27,00	12,76
Resíduos de britagem (t)	0,29	21,00	6,12
Brita 19 mm (t)	1,25	34,50	43,02
Aditivo (L)	5,00	4,09	20,45
Subtotal			202,81
Perda (%)	5		10,14
Total (R\$)			212,95

Os custos dos concretos que utilizam finos de britagem não sofreram grandes alterações, sendo que a variação do custo não chegou a 1% do valor sem estes.

- 4º critério: verificar a necessidade da alteração nos procedimentos de recebimento das matérias-primas nas unidades de pré-fabricação.

Quadro 30. Custo do concreto de referência com consumo de cimento de 300 kg/m³.

TRAÇO	300		
Materiais	Quantidade	Preço unitário (R\$)	Preço total (R\$)
Cimento (t)	0,30	330,00	99,00
Areia natural (t)	0,79	27,00	21,38
Resíduos de britagem (t)	0,00	21,00	0,00
Brita 19 mm (t)	1,29	34,50	44,58
Aditivo (L)	3,00	4,09	12,27
Subtotal			177,24
Perda (%)	5		8,86
Total (R\$)			186,10

Quadro 31. Custo do concreto com consumo de cimento de 300 kg/m³ e uso de resíduo de britagem seco.

TRAÇO	300-P1-25		
Materiais	Quantidade	Preço unitário (R\$)	Preço total (R\$)
Cimento (t)	0,30	330,00	99,00
Areia natural (t)	0,60	27,00	16,12
Resíduos de britagem (t)	0,20	21,00	4,18
Brita 19 mm (t)	1,30	34,50	44,81
Aditivo (L)	3,00	4,09	12,27
Subtotal			176,37
Perda (%)	5		8,82
Total (R\$)			185,19

Quadro 32. Custo do concreto com de cimento de 300 kg/m³ e uso de resíduo de britagem lavado.

TRAÇO	300-P2-25		
Materiais	Quantidade	Preço unitário (R\$)	Preço total (R\$)
Cimento (t)	0,30	330,00	99,00
Areia natural (t)	0,60	27,00	16,12
Resíduos de britagem (t)	0,20	21,00	4,18
Brita 19 mm (t)	1,30	34,50	44,81
Aditivo (L)	3,00	4,09	12,27
Subtotal			176,37
Perda (%)	5		8,82
Total (R\$)			185,19

1,34 milhões de toneladas de resíduos de britagem. A este valor devem ser adicionados os volumes utilizados em pavimentação, 30% de acordo com Valverde (2005), e as perdas que podem chegar a 44% segundo estudo de Agopyyan (1998), Totalizando uma quantidade de aproximadamente 2,5 milhões de tonelada de resíduos de britagem gerados na Bahia em 2005.

- 2º critério: verificar se as distâncias de transporte dos resíduos de britagem são competitivas quando comparadas com as das areias naturais;

Em Salvador, as pedreiras estão localizadas em média a menos de 1/3 da distância do maior centro consumidor, quando comparadas com os locais de extração de areia natural.

- 3º critério: identificar qual a eficiência da alocação dos recursos no processo, permitindo alterar procedimentos em busca da melhoria da eficiência e maximização dos ganhos;

Os custos dos agregados utilizados nos concretos estão detalhados no Quadro 29:

Quadro 29. Custo dos agregados utilizados.

	Unidade	Areia natural	Finos de britagem	Britas
Custo FOB	R\$/t	11,00	19,00	32,50
Custo transporte	R\$/km	0,32	0,50	0,50
Distância transporte*	km	50,00	4,00	4,00
Custo total	R\$/t	27,00	21,00	34,50

* Foi considerada a distância do local de extração dos agregados até a indústria de pré-fabricação onde foram feitos os ensaios.

O preço do cimento utilizado é de R\$ 330,00 por tonelada.

O preço do aditivo é de R\$ 4,09 por litro.

Os custos dos concretos que utilizarão os finos de britagem estão detalhados nos quadros 30 a 35.

Os traços utilizados para esta avaliação econômica são os propostos para a 3ª fase de avaliação do desempenho do concreto e estão detalhados no Quadro 09. Foi também considerada uma perda de 5% para todos os materiais utilizados.

ação preventiva como forte, é necessária à introdução de um material inibidor de RAA.

Os materiais inibidores de RAA mais indicados para a utilização em unidades de pré-fabricação são adições minerais do tipo sílica ativa ou metacaullim, pois não retardarem o início de pega do cimento.

O teor de necessário de sílica ativa ou metacaullim e sua eficiência em mitigar a RAA devem ser estabelecidos pelos ensaios prescritos pela NBR 15577-5 (ABNT, 2008) ou NBR 15577-6 (ABNT, 2008).

4.4. Análise da viabilidade econômica

Para avaliar a viabilidade econômica do uso dos resíduos de britagem, utilizou-se uma adaptação à metodologia proposta por Cincotto (1988), definindo-se alguns critérios:

- 1º critério: verificar se a quantidade disponível do resíduo de britagem é suficiente para justificar o seu manuseio, processamento e transporte, quando houver substituição da areia natural por resíduos em concretos;

Considerando que a produção de brita em 2004 foi estimada por Valverde (2005) em 128,7 milhões de toneladas e Prudêncio, Coelho e Guststein (1998) estimaram que 20% das matérias-primas utilizadas na britagem de rochas se tornam resíduos, ocorre a geração de aproximadamente 26 milhões de toneladas de resíduos de britagem no Brasil por ano.

Na Bahia, por não existirem dados confiáveis, é possível estimar a quantidade gerada de resíduos de britagem empregando a metodologia utilizada por John (2000), e o consumo de cimento em 2005, que foi de 1,67 milhões de toneladas (SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO, 2005).

A metodologia utilizada consiste em considerar que o cimento é misturado com a areia e brita em uma proporção média de 1:2:4 para a produção de concretos e argamassas. Então, a quantidade estimada de brita consumida na Bahia foi de 6,68 milhões de toneladas, o que acarreta em uma geração de aproximadamente

areia natural como inócua e o resíduo de britagem como potencialmente reativo aos álcalis do concreto.

Para a utilização dos resíduos de britagem em concretos visando a produção de elementos pré-fabricados que serão utilizados em estruturas especiais, classificação da ação preventiva como mínima, considerou-se necessário que o concreto possua valores de Na₂O equivalente menor que 2,4 kg/m³.

O Quadro 28 apresenta quais os concretos propostos, com substituição da areia natural por resíduos de britagem ou não, podem ser utilizados para a produção de estruturas pré-fabricadas especiais (ABNT, NBR15577-1, 2008).

Para o cálculo dos valores de Na₂O equivalente nos concretos, considerando-se o aporte de álcalis trazido pelo cimento ao concreto de acordo com a NBR 15577-1 (ABNT, 2008). Para isto utilizou-se a Equação 8.

$$T = t \times C \quad (8)$$

Sendo,

T = Total de Na₂O equivalente (kg/m³);

t = Teor de Na₂O equivalente no cimento (%);

C = Consumo de cimento (kg/m³).

Quadro 28. – Viabilidade de utilização do resíduo de britagem em relação à RAA em concretos para estruturas pré-fabricadas especiais.

Traço	Consumo de cimento (kg/m ³)	Teor de Na ₂ O equivalente no cimento* (%)	Total de Na ₂ O equivalente (kg/m ³)	Viabilidade de utilização do resíduo de britagem
300	300	0,77	2,31	Sim
300-P1-25	300	0,77	2,31	Sim
300-P2-25	300	0,77	2,31	Sim
365	365	0,77	2,81	Não
365-P1-25	365	0,77	2,81	Não
365-P2-38	365	0,77	2,81	Não

* Valores fornecidos pelo fabricante.

Quando os resíduos de britagem forem utilizados em concretos para a fabricação de elementos pré-fabricados que possuírem contato com umidade, classificação da

Os resultados dos ensaios de massa específica mostram que não há variação considerável no valor das massas específicas secas e saturadas, quando houve a substituição de areia natural por resíduos de britagem.

A massa específica permeável que leva em consideração os poros permeáveis do concreto tem o seu valor diminuído com a substituição de areia natural por resíduo de britagem, confirmando a diminuição dos poros permeáveis no concreto.

Análise de risco da ocorrência da RAA nos concretos propostos

Normalmente as estruturas pré-fabricadas de concreto não são compostas por elementos maciços, pois isto dificultaria o transporte e montagem das mesmas. Sendo assim, quando as peças pré-fabricadas forem utilizadas em obras correntes e não possuem contato com a umidade, não é necessária a adoção de medidas de mitigação de acordo com a NBR15577-1 (ABNT, 2008).

Quando as peças pré-fabricadas forem utilizadas em obras de estruturas especiais ou estiverem em contato com umidade é necessária a adoção de medidas de mitigação.

A intensidade das medidas de mitigação adotada deve estar de acordo com o grau de risco a qual a estrutura ou elemento de concreto está submetido, segundo a NBR15577-1 (ABNT, 2008).

A norma Brasileira NBR15577-1 (ABNT, 2008) não faz distinção quantitativa da potencialidade reativa para a classificação dos agregados quanto à possibilidade da ocorrência da RAA, mas com base nos resultados da reatividade da areia natural e do resíduo de britagem, e das análises petrográficas, considerou-se que para a utilização dos resíduos de britagem nos concretos é necessária a adoção de ações preventivas mais intensas do que aquelas necessárias para a utilização da areia natural.

A expansão das barras de argamassa que utilizou resíduo de britagem foi 52% maior que das barras que utilizaram areia natural. Já a análise petrográfica considerou a

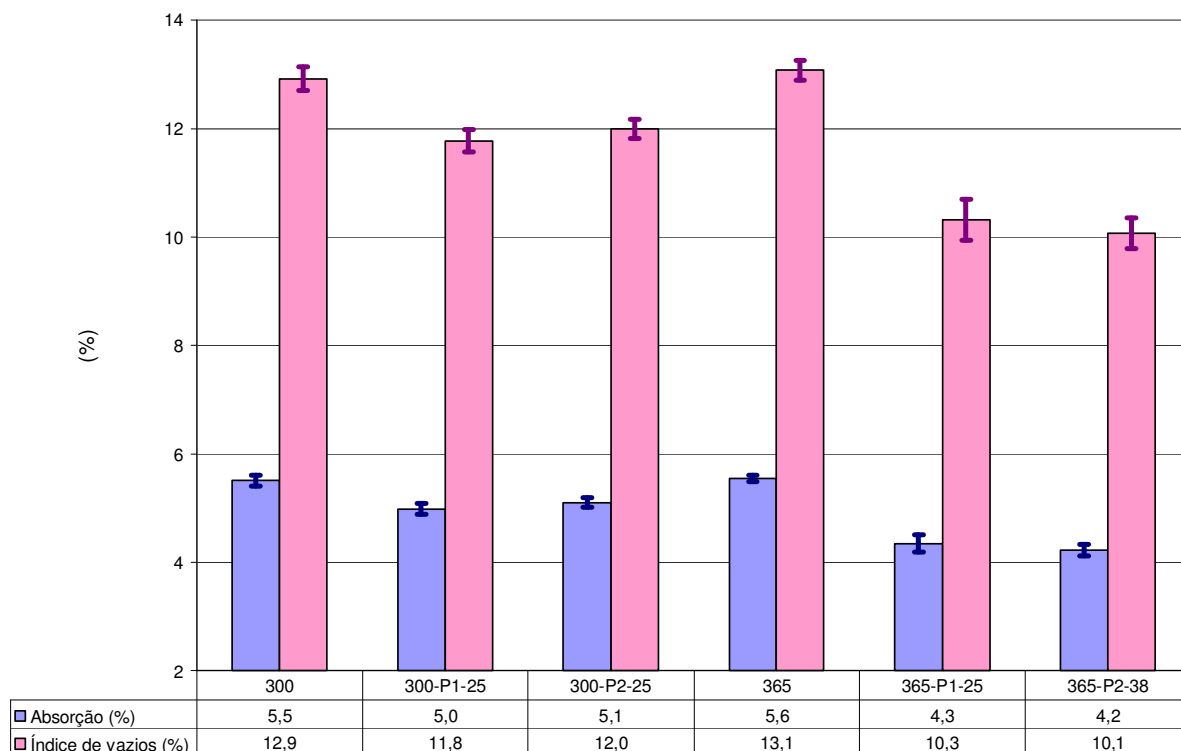


Figura 44. Resultados dos ensaios de absorção de água e índice de vazios no concreto (3ª fase).

A figura 45 apresenta os resultados obtidos de massa específica seca, massa específica saturada e massa específica permeável nos concretos propostos.

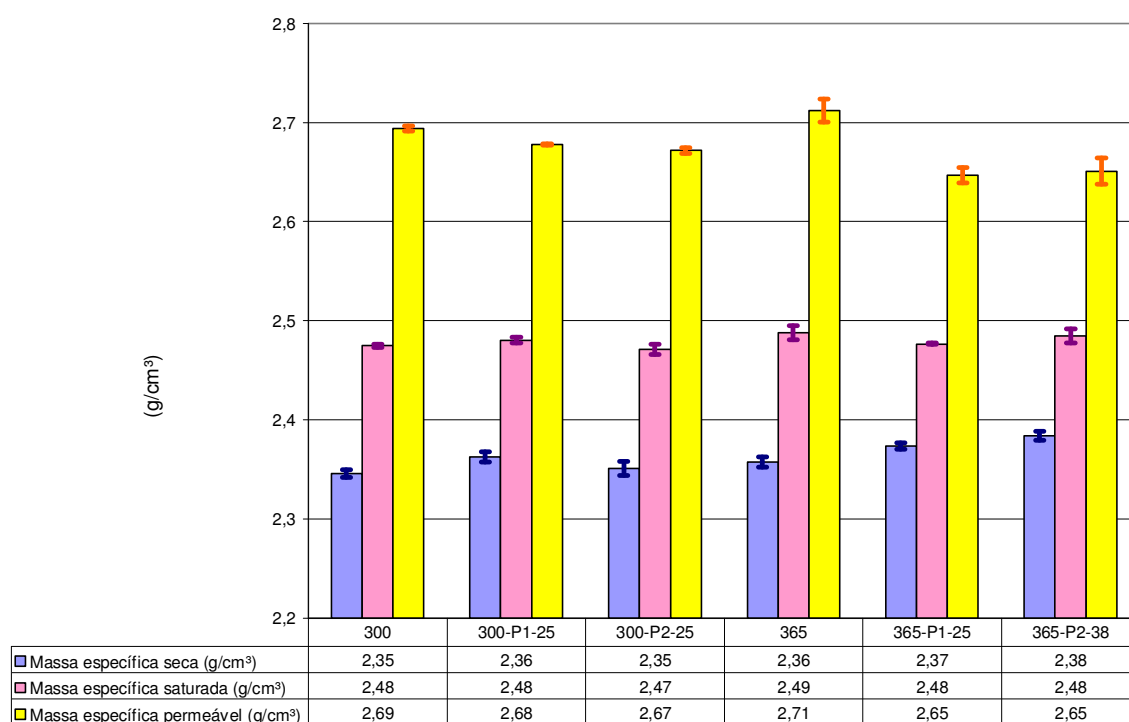


Figura 45. Resultados dos ensaios de massa específica do concreto (3ª fase).

Tabela 13. Resultados de absorção de água, índice de vazios e massa específica no concreto (3ª fase).

Traço		300	300-P1-25	300-P2-25	365	365-P1-25	365-P2-38
Abatimento (mm)		80	60	80	100	100	100
Relação a/c		0,45	0,45	0,45	0,40	0,40	0,40
Teor de resíduos (%)		0	25	25	0	25	38
M _s (g)	1	3.788,0	3.561,0	3.580,0	3.770,0	3.718,0	3.788,0
	2	3.728,0	3.720,0	3.661,5	3.688,0	3.687,0	3.883,0
M _{sat} (g)	1	3.994,0	3.736,0	3.765,0	3.981,0	3.884,0	3.951,0
	2	3.936,0	3.908,0	3.846,0	3.891,0	3.843,0	4.044,0
M _i (g)	1	2.381,0	2.231,0	2.239,0	2.384,0	2.316,0	2.364,0
	2	2.345,0	2.331,0	2.292,0	2.324,0	2.291,0	2.413,0
Absorção (%)	1	5,4	4,9	5,2	5,6	4,5	4,3
	2	5,6	5,1	5,0	5,5	4,2	4,1
	média	5,5	5,0	5,1	5,6	4,3	4,2
Índice de vazios (%)	1	12,8	11,6	12,1	13,2	10,6	10,3
	2	13,1	11,9	11,9	13,0	10,1	9,9
	média	12,9	11,8	12,0	13,1	10,3	10,1
Massa específica seca (g/cm ³)	1	2,35	2,37	2,35	2,36	2,37	2,39
	2	2,34	2,36	2,36	2,35	2,38	2,38
	média	2,35	2,36	2,35	2,36	2,37	2,38
Massa específica saturada (g/cm ³)	1	2,48	2,48	2,47	2,49	2,48	2,49
	2	2,47	2,48	2,47	2,48	2,48	2,48
	média	2,48	2,48	2,47	2,49	2,48	2,48
Massa específica permeável (g/cm ³)	1	2,69	2,68	2,67	2,72	2,65	2,66
	2	2,70	2,68	2,67	2,70	2,64	2,64
	média	2,69	2,68	2,67	2,71	2,65	2,65

M_s = massa da amostra seca em estufa;

M_{sat} = massa da amostra saturada em água;

M_i massa da amostra saturada imersa em água.

Os resultados obtidos são compatíveis com os obtidos por Çelik e Marar (1996), que concluíram que a permeabilidade do concreto diminui com o incremento da quantidade de resíduos de britagem de rocha, que contenham partículas de material fino. Sendo que isto ocorre devido ao bloqueio das passagens e dos canais de água do concreto pelo material fino.

A Figura 44 apresenta os resultados de absorção de água e índice de vazios obtidos nos concretos propostos.

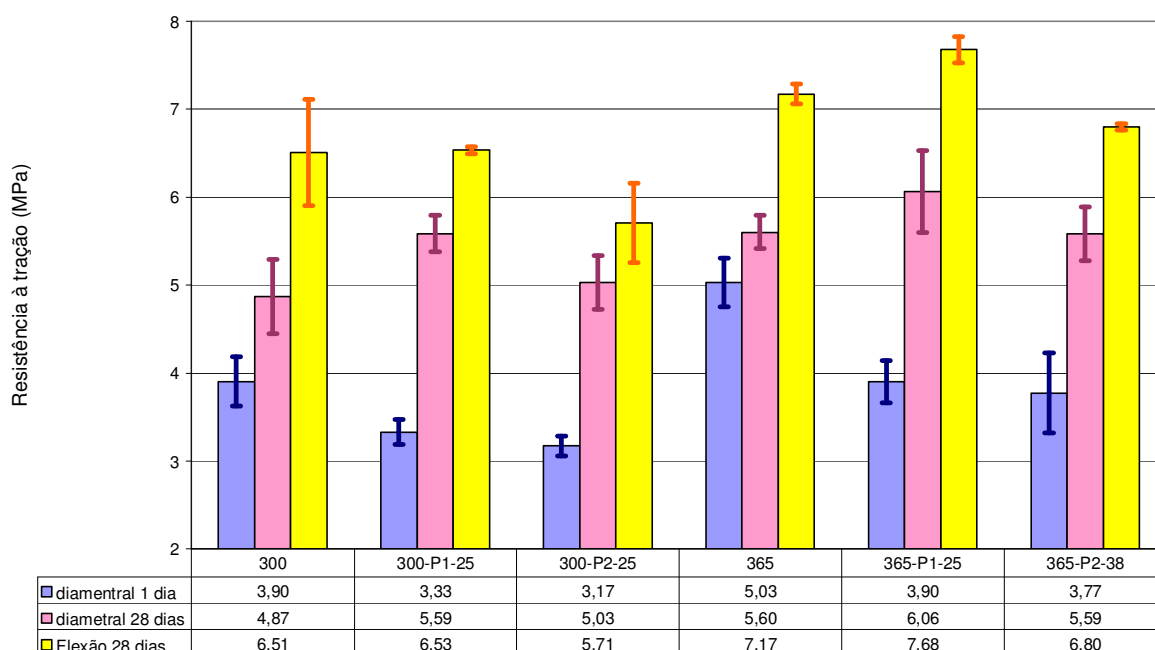


Figura 43. Resultado de resistência à tração na 3ª fase.

Os resultados dos ensaios demonstram que a substituição de areia natural por resíduos de britagem faz com que a resistência à tração diminua nas primeiras idades, enquanto que na idade de 28 dias a resistência à tração aumente.

A melhoria da resistência à tração com 28 dias pode ser explicada pela textura dos grãos dos resíduos de britagem, que por possuírem uma maior área específica superficial aumentam a aderência da pasta ao agregado.

Os resultados dos ensaios de absorção, índice de vazios e massa específica dos concretos da 3ª fase estão mostrados na Tabela 13.

Os resultados obtidos nos ensaios de absorção e índice de vazios mostram que a substituição de areia natural por resíduos de britagem é benéfica em relação à permeabilidade do concreto, pois a diminuição dos valores de absorção de água e índice de vazios indica que o concreto possui uma quantidade menor de poros permeáveis susceptíveis à percolação de líquidos.

A permeabilidade do concreto é diretamente proporcional a sua durabilidade, pois a maioria dos processos de degradação do concreto ocorre por meio do transporte de substâncias deletérias ao interior da massa de concreto através da sua superfície.

Como o objetivo deste trabalho é a incorporação de resíduos nos concretos sem que haja perda de desempenho, os teores de substituição utilizados se mostraram adequados, quando analisados em relação a resistência à compressão.

Os resultados da resistência à tração dos concretos na 3ª fase estão relacionados nas Tabelas 10 a 12 e na Figura 43.

Tabela 10. Resultados de resistência à tração por compressão diametral com 1 dia (3ª fase).

Traço	Teor de substituição (%)	Relação a/c	Resistência à tração por compressão diametral - 1 dia (MPa)						
			1	2	3	4	Média	Desvio-padrão	Coefficiente de variação (%)
1 300	0	0,45	4,20	4,07	3,69	3,63	3,90	0,3	7,2
2 300-P1-25	25	0,45	3,44	3,37	3,12	3,37	3,33	0,1	4,2
3 300-P2-25	25	0,45	3,18	3,06	3,12	3,31	3,17	0,1	3,4
4 365	0	0,40	5,41	4,90	5,03	4,77	5,03	0,3	5,5
5 365-P1-25	25	0,40	3,82	4,20	3,95	3,63	3,90	0,2	6,2
6 365-P2-38	38	0,40	4,46	3,50	3,50	3,63	3,77	0,5	12,2

Tabela 11. Resultados de resistência à tração por compressão diametral com 28 dias (3ª fase).

Traço	Teor de substituição (%)	Relação a/c	Resistência à tração por compressão diametral - 28 dias (MPa)						
			1	2	3	4	Média	Desvio-padrão	Coefficiente de variação (%)
1 300	0	0,45	4,27	5,16	4,90	5,16	4,87	0,4	8,6
2 300-P1-25	25	0,45	5,28	5,73	5,60	5,73	5,59	0,2	3,8
3 300-P2-25	25	0,45	5,28	5,16	5,09	4,58	5,03	0,3	6,1
4 365	0	0,40	5,41	5,86	5,54	5,60	5,60	0,2	3,3
5 365-P1-25	25	0,40	6,37	5,41	6,43	6,05	6,06	0,5	7,7
6 365-P2-38	38	0,40	5,16	5,86	5,73	5,60	5,59	0,3	5,5

Tabela 12. Resultado de resistência à tração na flexão com 28 dias (3ª fase).

Traço	Teor de substituição (%)	Relação a/c	Resistência à tração na flexão - 28 dias				
			1	2	Média	Desvio-padrão	Coefficiente de variação (%)
1 300	0	0,45	6,08	6,93	6,51	0,6	9,3
2 300-P1-25	25	0,45	6,56	6,51	6,53	0,0	0,6
3 300-P2-25	25	0,45	5,39	6,03	5,71	0,5	7,9
4 365	0	0,40	7,09	7,25	7,17	0,1	1,6
5 365-P1-25	25	0,40	7,57	7,79	7,68	0,2	2,0
6 365-P2-38	38	0,40	6,83	6,77	6,80	0,0	0,6

Tabela 09. Resultados de resistência à compressão com 28 dias (3ª fase).

Traço	Teor de substituição (%)	Relação a/c	Resistência à compressão - 28 dias (MPa)							Coeficiente de variação (%)
			1	2	3	4	Média	Desvio-padrão		
1 300	0	0,45	39,24	40,00	38,47	38,98	39,17	0,6	1,6	
2 300-P1-25	25	0,45	46,62	47,13	45,86	45,35	46,24	0,8	1,7	
3 300-P2-25	25	0,45	44,59	41,02	42,04	44,33	42,99	1,7	4,1	
4 365	0	0,40	48,41	53,50	50,96	50,96	50,96	2,1	4,1	
5 365-P1-25	25	0,40	57,07	56,05	52,99	52,48	54,65	2,3	4,1	
6 365-P2-38	38	0,40	44,59	45,86	47,13	48,15	46,43	1,5	3,3	

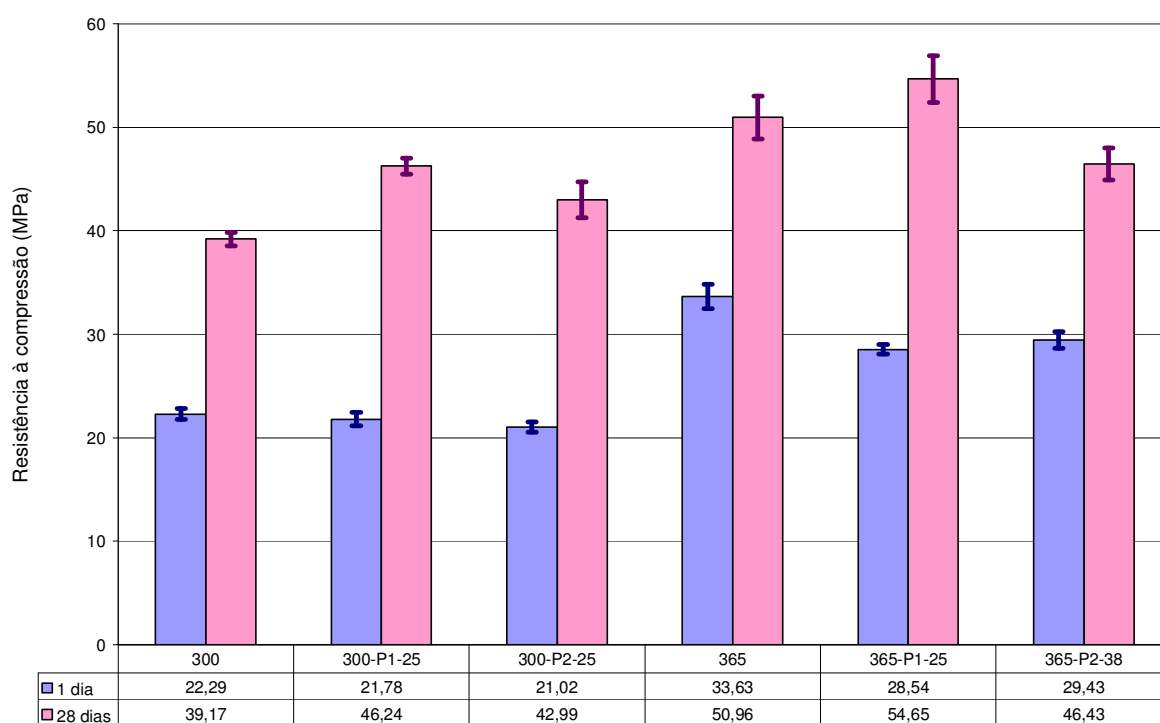


Figura 42. Resultado dos ensaios de resistência à compressão na 3ª fase.

Os resultados dos ensaios mostram que a substituição de areia natural por resíduos de britagem fez com que a resistência à compressão com 1 dia diminuísse, mas não chegando a ultrapassar o limite mínimo de 15 MPa para os concretos utilizados em peças pré-fabricadas usuais, com consumo de 300 kg/m³ e de 25 MPa para os concretos utilizados em peças pré-fabricadas pretendidas, com consumo de 365 kg/m³, valores estes pré-definidos no programa experimental.

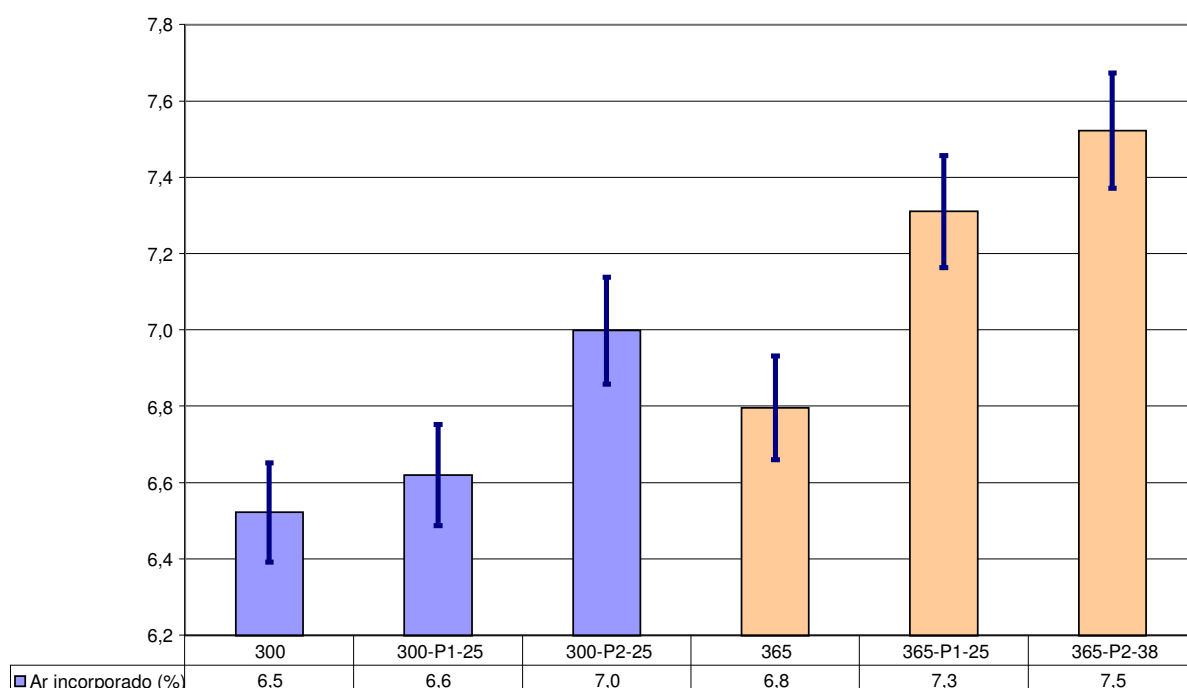


Figura 41. Resultados dos ensaios de teor de ar incorporado na 3ª fase.

Os resultados dos ensaios indicam que a substituição de areia natural por resíduos de britagem faz com que o teor de ar incorporado aumente nos concretos.

O pequeno aumento do teor de ar incorporado nos concretos é benéfico, pois o ar incorporado funciona como um agregado de formato regular que não possui atrito, melhorando a consistência do concreto. Assim, o menor incremento da quantidade de ar incorporado no traço 300-P1-25 pode explicar a perda de consistência ocorrida no mesmo.

Os resultados da resistência à compressão dos concretos na 3ª fase estão mostrados nas Tabelas 08 e 09 e na Figura 42.

Tabela 08. Resultados de resistência à compressão com 1 dia (3ª fase).

Traço	Teor de substituição (%)	Relação a/c	Resistência à compressão - 1 dia (MPa)							Desvio-padrão	Coeficiente de variação (%)
			1	2	3	4	Média				
1 300	0	0,45	22,42	21,66	22,93	22,17	22,29	0,5	2,4		
2 300-P1-25	25	0,45	22,42	20,89	22,17	21,66	21,78	0,7	3,1		
3 300-P2-25	25	0,45	20,38	20,89	21,15	21,66	21,02	0,5	2,5		
4 365	0	0,40	34,90	33,89	33,63	32,10	33,63	1,2	3,4		
5 365-P1-25	25	0,40	28,79	28,28	29,04	28,03	28,54	0,5	1,6		
6 365-P2-38	38	0,40	29,55	30,06	29,81	28,28	29,43	0,8	2,7		

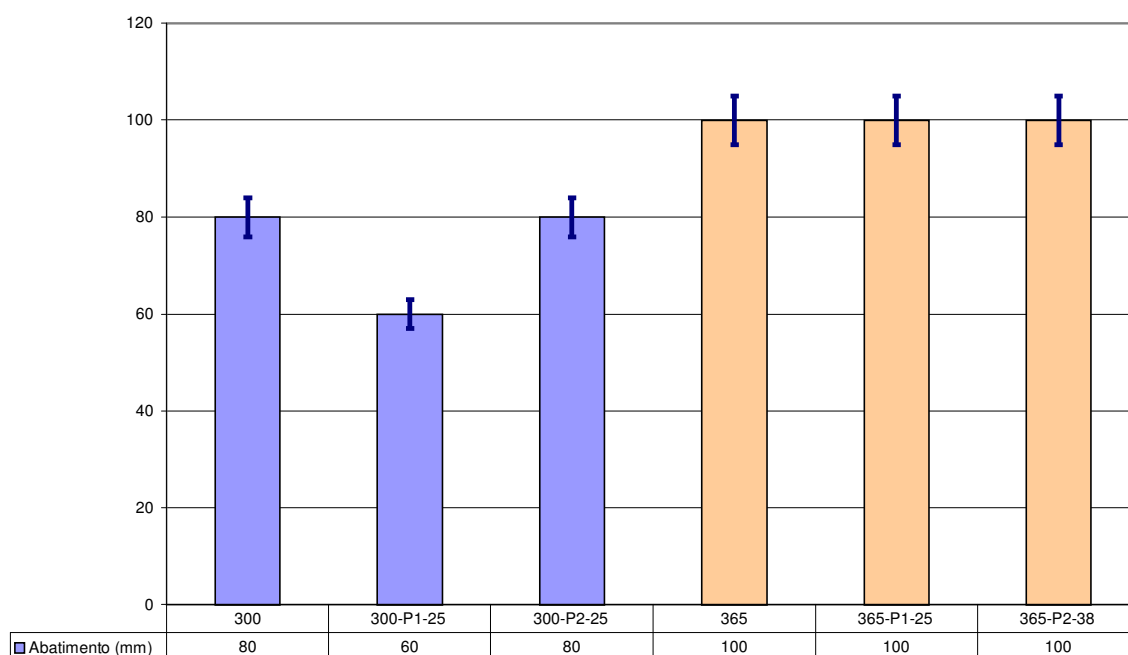


Figura 40. Resultado do ensaio de abatimento do concreto na 3ª fase.

A redução no abatimento do concreto 300-P1-25 se deve ao maior teor de material pulverulento inserido na mistura. Os materiais pulverulentos possuem elevada área específica e necessitam de uma grande quantidade de água para que a consistência do concreto não seja afetada.

Nos concretos de consumo de 365 kg/m³ a introdução do material pulverulento não afetou a consistência devido à maior quantidade de aditivo superplastificante utilizado e ao incremento na quantidade de ar incorporado introduzido na mistura. Isto pode ser constatado através dos resultados da Figura 41.

Estes resultados estão de acordo com Çelik e Marar (1996) que concluíram que o incremento de material fino proveniente da britagem de rocha diminui o valor do abatimento dos concretos.

Os resultados médios e os desvios-padrão dos ensaios que avaliaram o teor incorporado de ar nos concretos da 3ª fase estão relacionados na Figura 41.

- traço com consumo de cimento de 300 Kg/m³ e teor de resíduos de britagem lavado de 25%;
- traço com consumo de cimento de 365 Kg/m³ e teor de resíduos de britagem seco de 25%;
- traço com consumo de cimento de 365 Kg/m³ e teor de resíduos de britagem lavado de 38%.

4.3.3. Resultados da fase de avaliação do concreto proposto.

Os traços de concreto desta fase utilizam as mesmas matérias-primas dos concretos da 2ª fase, só alterando as quantidades colocadas na central de concreto. Nesta fase passou-se a utilizar 2 sacos de cimento por mistura, o que equivale a aproximadamente 550 kg de concreto.

Para a avaliação do concreto nesta fase, não se adotou o parâmetro de controle da consistência. Foram mantidas constantes as relações a/c de 0,40 para concretos com consumo de cimento de 365 kg/m³ e de 0,45 para concretos com consumo de 300 kg/m³.

Os resultados dos ensaios de abatimento médios e desvios-padrão usados para avaliar a consistência nos concretos da 3ª fase estão relacionados na Figura 40.

O concreto 300-P1-25, que utiliza o resíduo de britagem seco, apresentou um abatimento menor que os outros de mesmo consumo, enquanto que os concretos com consumo de 365 kg/m³ tiveram o mesmo abatimento.

Quadro 27. Resultados de resistência à compressão em relação ao teor de substituição de areia natural por resíduos de britagem (2ª fase).

Idade (dias)	Traço	Resistência referência (MPa)	Teor substituição de máxima resistência (%)	Máxima resistência à compressão (MPa)	Variação relativa ao valor de referência (%)
1 dia	300 P1	17,58	0,39	17,77	1,05%
	300 P2	17,58	-28,86	18,32	4,20%
	365 P1	24,65	4,39	25,13	1,95%
	365 P2	24,65	13,65	25,49	3,41%
7 dias	300 P1	37,64	1,92	38,13	1,31%
	300 P2	37,64	17,03	39,69	5,44%
	365 P1	49,11	5,21	49,34	0,47%
	365 P2	49,11	19,21	50,48	2,78%
28 dias	300 P1	43,25	23,03	44,50	2,90%
	300 P2	43,25	30,00	47,65	10,18%
	365 P1	55,92	16,95	58,04	3,78%
	365 P2	55,92	20,81	58,85	5,24%

Quando se compara os resultados obtidos dos ensaios de resistência à compressão na fase exploratória e na fase de avaliação da substituição, verifica-se que o aumento relativo da resistência mecânica, com a substituição dos traços de concreto da fase de avaliação, foi menor.

Este fato pode ser explicado devido à troca no cimento utilizado, passou-se de um CP II 32 F para um CP V ARI RS, entre as duas fases. O cimento utilizado na fase exploratória possuía uma área específica de 3.839 cm²/g, enquanto que o cimento utilizado na fase de avaliação da substituição tinha uma área específica de 4.430 cm²/g, o que ocasionou um menor ganho na compactidade da mistura da fase de avaliação da substituição da areia por resíduos.

Como a finalidade deste estudo é a obtenção de concretos de menor impacto ambiental através da redução da demanda de recursos minerais, optou-se por teores de substituição maiores do que aqueles onde se obtiveram as máximas resistências à compressão, mas que não ocasionassem perda de desempenho aos concretos.

Os teores de substituição escolhidos para a realização da fase de avaliação do concreto proposto no programa experimental de desempenho foram:

- traço com consumo de cimento de 300 Kg/m³ e teor de resíduos de britagem seco de 25%;

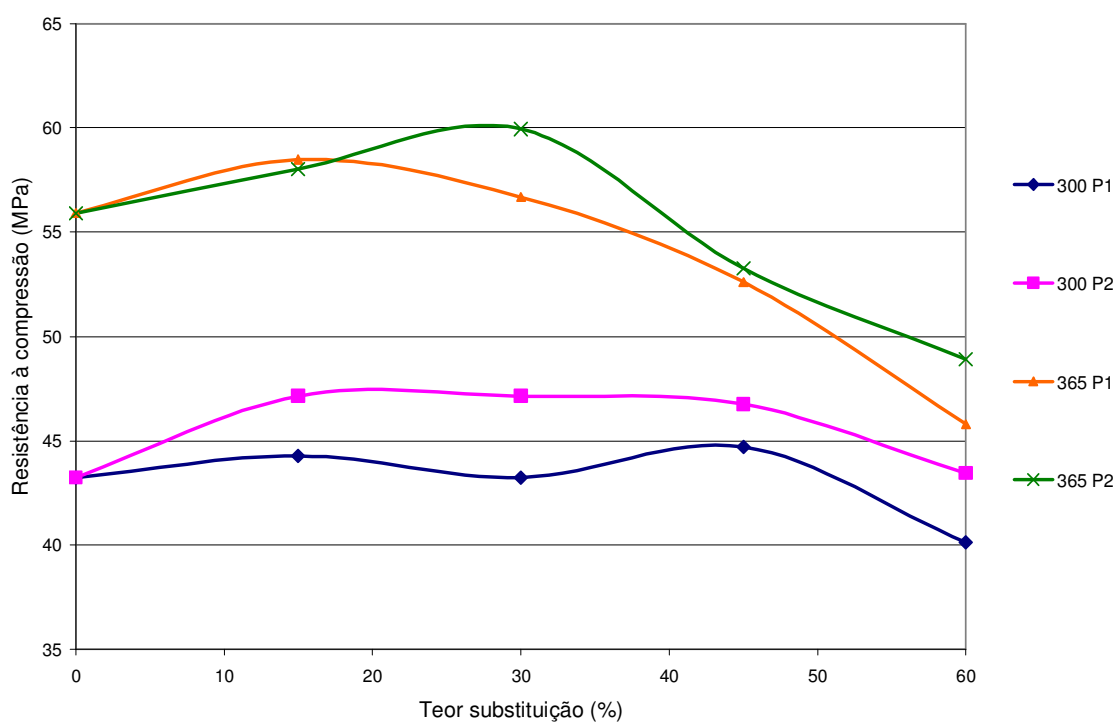


Figura 39. Curva da resistência à compressão no 28º dia em função do teor de substituição de areia natural por resíduos de britagem (2ª fase).

Os resultados de resistência à compressão demonstraram que a substituição de areia natural por resíduos de britagem melhora a resistência à compressão em todas as idades ensaiadas quando se usa teores de aproximadamente 15% de substituição.

No quadro 27 abaixo estão relacionados os teores de substituição e valores máximos de resistências encontrados quando se ajusta as curvas para polinômios de 2º através do método dos mínimos quadrados.

Tabela 07. Resultados de resistência à compressão com 28 dias (2ª fase).

Traço	Teor de substituição (%)	Relação a/c	Resistência à compressão - 28 dias (MPa)				Média	Desvio-padrão	Coeficiente de variação (%)	
			1	2	3	4				
1	300	0	0,45	43,31	43,31	42,04	44,33	43,25	0,9	2,2
2	300-P1-15	15	0,43	44,59	45,61	43,57	43,31	44,27	1,0	2,4
3	300-P1-30	30	0,44	44,59	43,06	43,82	41,53	43,25	1,3	3,0
4	300-P1-45	45	0,45	44,59	44,33	45,10	44,84	44,71	0,3	0,7
5	300-P1-60	60	0,49	41,78	40,51	38,22	40,00	40,13	1,5	3,7
7	300-P2-15	15	0,45	47,13	44,59	50,70	46,11	47,13	2,6	5,5
8	300-P2-30	30	0,45	47,13	45,86	48,41	45,61	46,75	1,3	2,8
9	300-P2-45	45	0,46	43,57	44,33	44,08	41,78	43,44	1,1	2,6
10	300-P2-60	60	0,50	55,03	56,05	56,56	56,05	55,92	0,6	1,1
11	365	0	0,36	55,03	59,87	58,85	60,13	58,47	2,4	4,0
12	365-P1-15	15	0,35	57,32	55,29	55,54	58,60	56,69	1,6	2,8
13	365-P1-30	30	0,35	55,80	50,96	53,50	50,19	52,61	2,6	4,9
14	365-P1-45	45	0,38	42,55	49,68	43,31	47,64	45,80	3,4	7,5
10	365-P1-60	60	0,40	55,03	56,05	56,56	56,05	55,92	0,6	1,1
15	365-P2-15	15	0,37	60,13	59,87	56,05	56,05	58,03	2,3	3,9
16	365-P2-30	30	0,36	58,60	61,15	61,15	58,85	59,94	1,4	2,3
17	365-P2-45	45	0,39	53,50	51,21	56,05	52,23	53,25	2,1	3,9
18	365-P2-60	60	0,40	50,96	50,96	44,59	49,17	48,92	3,0	6,1

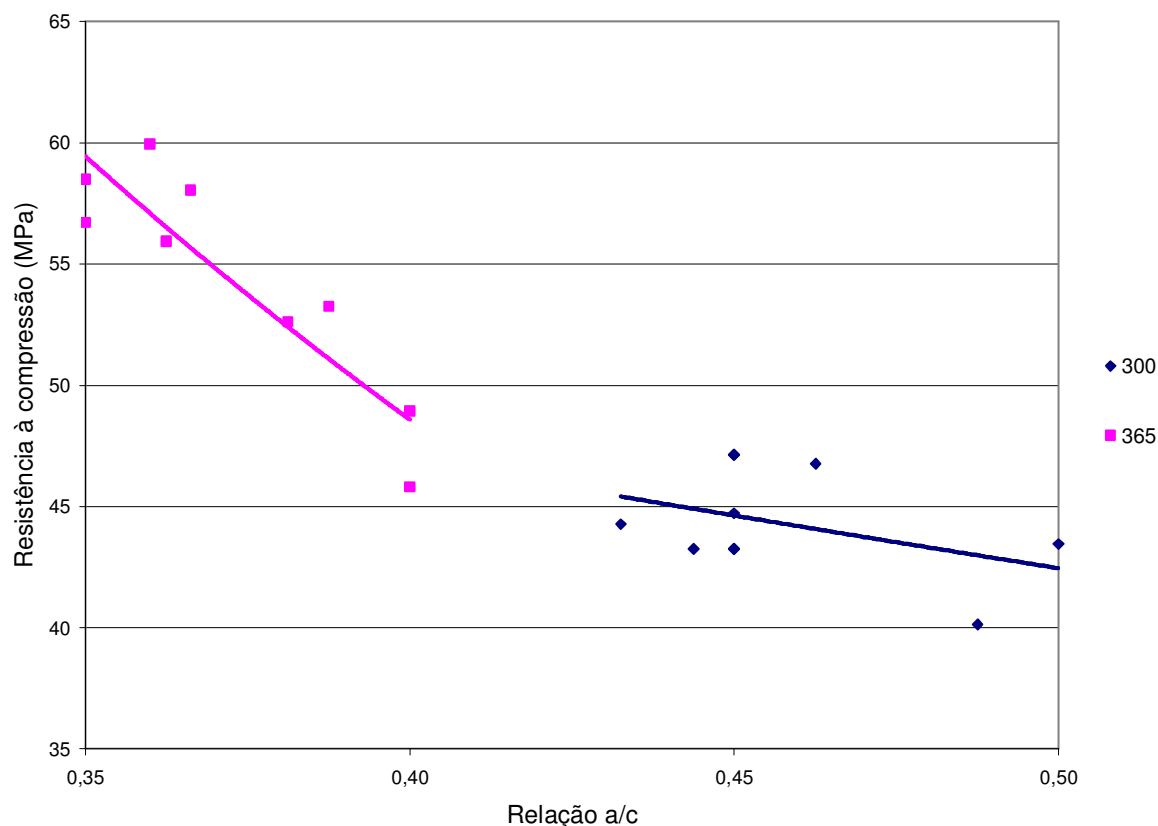


Figura 38. Curva de Abrams para 28 dias (2ª fase).

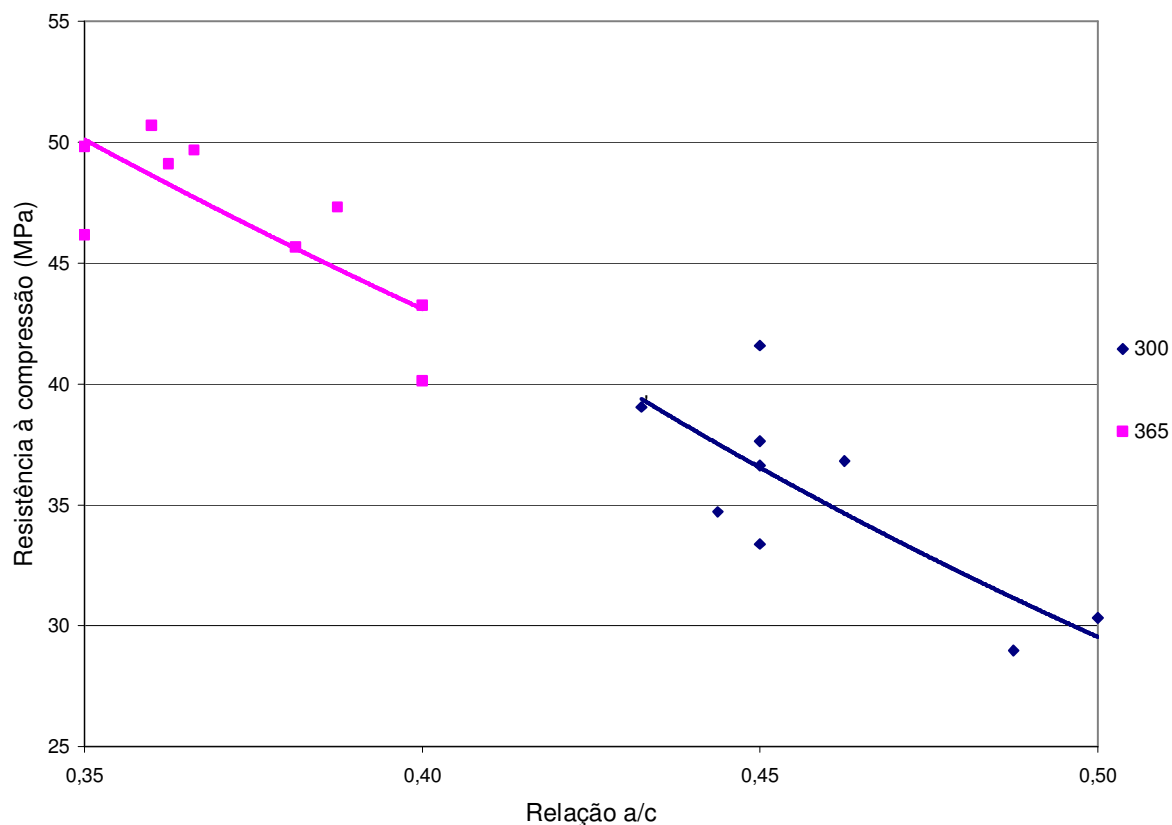


Figura 36. Curva de Abrams para 7 dias (2ª fase).

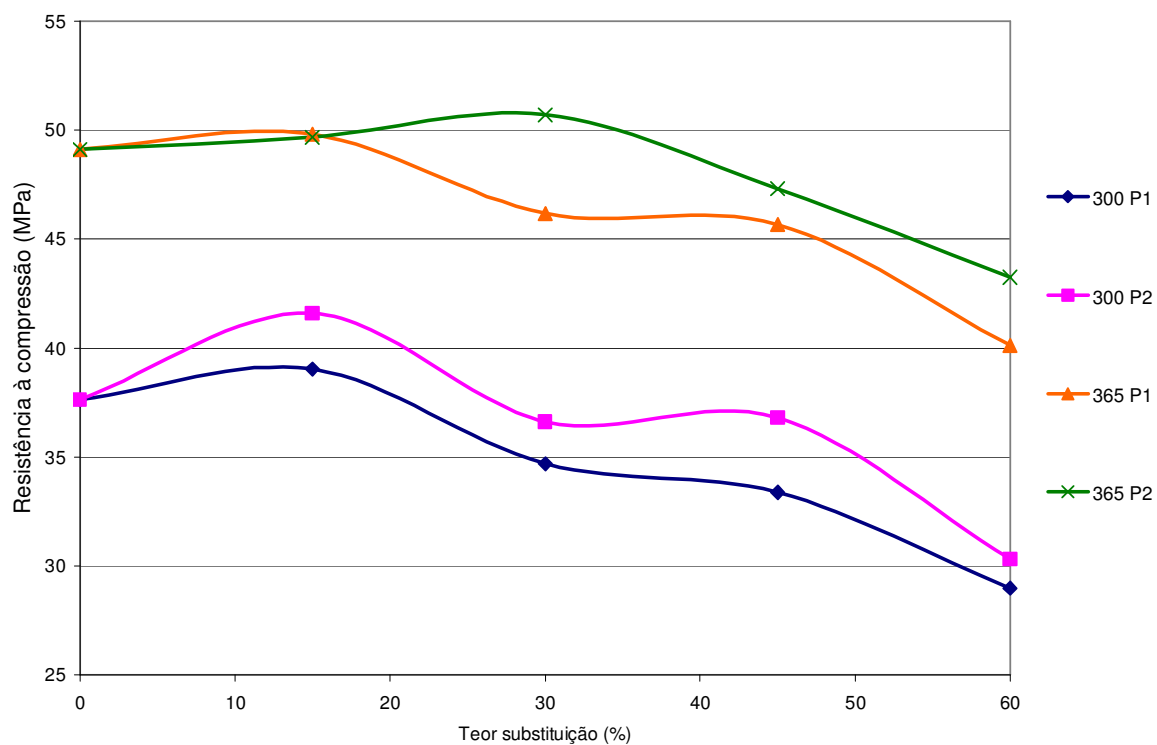


Figura 37. Curva da resistência à compressão no 7º dia em função do teor de substituição de areia natural por resíduos de britagem (2ª fase).

Concretos utilizados em estruturas convencionais com teores de substituição da areia natural por resíduos de britagem, de até 35%, obtiveram valores de resistência a compressão superiores ao limite mínimo de 15 MPa.

Já para os concretos utilizados em peças protendidas, o teor de substituição da areia natural por resíduos de britagem lavado, de até 38%, e de 25% para o resíduo seco, obtiveram valores de resistência a compressão superiores ao limite mínimo de 21 MPa.

Tabela 06. Resultados de resistência à compressão com 7 dias (2ª fase).

Traço	Teor de substituição (%)	Relação a/c	Resistência à compressão - 7 dias (MPa)							
			1	2	3	4	Média	Desvio-padrão	Coefficiente de variação (%)	
1	300	0	0,45	40,76	35,67	36,94	37,20	37,64	2,2	5,8
2	300-P1-15	15	0,43	41,27	39,75	36,18	38,98	39,04	2,1	5,5
3	300-P1-30	30	0,44	33,12	35,67	36,69	33,38	34,71	1,7	5,0
4	300-P1-45	45	0,45	33,12	35,16	34,65	30,57	33,38	2,1	6,2
5	300-P1-60	60	0,49	28,03	27,52	29,81	30,57	28,98	1,4	5,0
6	300-P2-15	15	0,45	42,04	42,55	42,04	39,75	41,59	1,3	3,0
7	300-P2-30	30	0,45	35,67	38,98	35,92	35,92	36,62	1,6	4,3
8	300-P2-45	45	0,46	34,39	38,22	36,18	38,47	36,82	1,9	5,2
9	300-P2-60	60	0,50	29,04	31,08	29,81	31,34	30,32	1,1	3,6
10	365	0	0,36	46,11	49,68	49,68	50,96	49,11	2,1	4,2
11	365-P1-15	15	0,35	49,68	50,70	47,90	50,96	49,81	1,4	2,8
12	365-P1-30	30	0,35	45,86	47,13	46,37	45,35	46,18	0,8	1,6
13	365-P1-45	45	0,38	45,86	48,66	44,84	43,31	45,67	2,3	4,9
14	365-P1-60	60	0,40	38,47	41,27	40,00	40,76	40,13	1,2	3,0
15	365-P2-15	15	0,37	48,66	50,96	49,43	49,68	49,68	1,0	1,9
16	365-P2-30	30	0,36	53,50	48,41	52,23	48,66	50,70	2,6	5,0
17	365-P2-45	45	0,39	48,41	45,86	47,90	47,13	47,32	1,1	2,3
18	365-P2-60	60	0,40	43,82	43,31	42,55	43,31	43,25	0,5	1,2

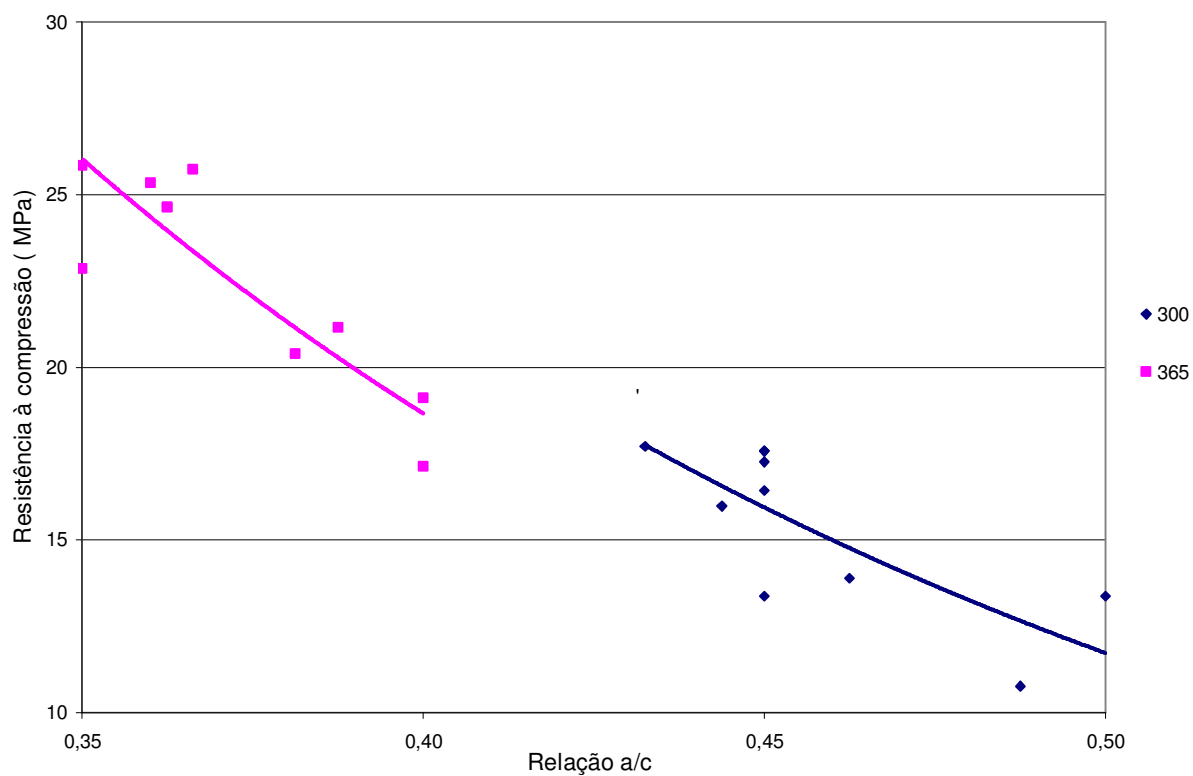


Figura 34. Curva de Abrams para 1 dia (2ª fase).

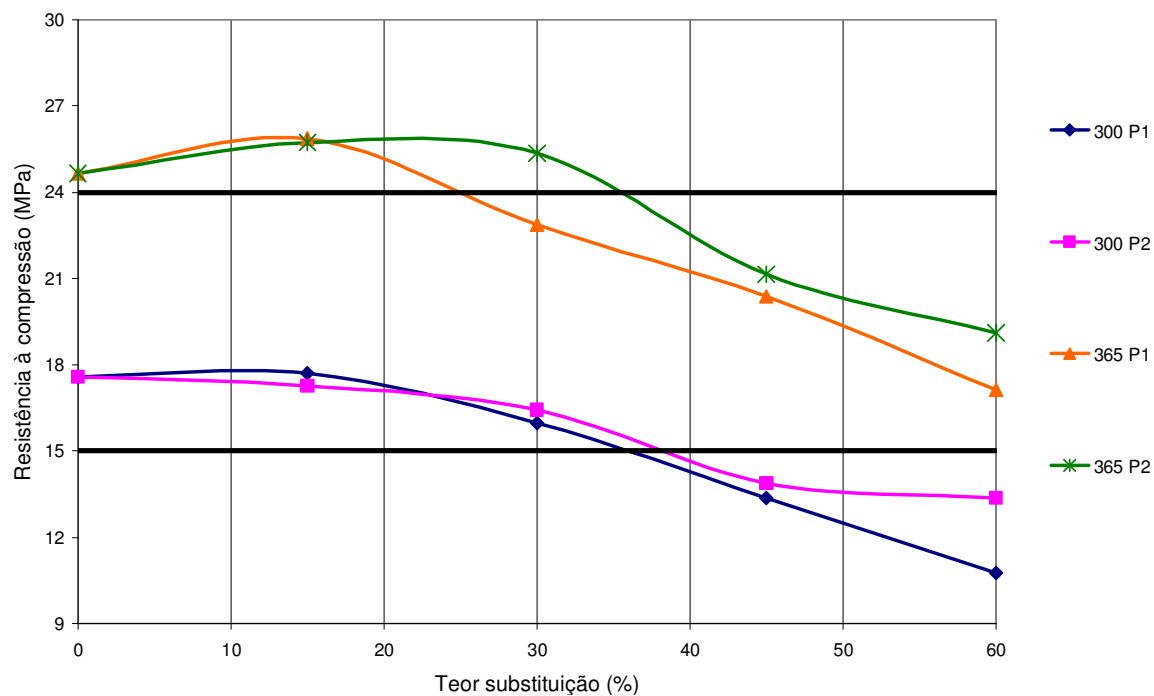


Figura 35. Curva da resistência à compressão no 1º dia em função do teor de substituição de areia natural por resíduos de britagem (2ª fase).

As curvas demonstram que a demanda de água diminui ou se mantém inalterada para teores de substituição de até 30%, fazendo, teoricamente, com que estes concretos atinjam resistências maiores. Esta diminuição da água necessária pode gerar uma economia no custo do concreto, desde que se façam os ajustes necessários nos traços.

A redução inicial na demanda de água pode ser explicada pelo aumento da compacidade da mistura granulométrica. A partir de certo teor de substituição da areia natural, a forma e textura dos grãos dos resíduos de britagem aumentam a necessidade de água, cancelando o benefício do aumento de compacidade.

Os resultados obtidos de resistência à compressão estão mostrados nas Tabelas 05 a 07 e nas Figuras 34 a 39, onde se pode observar a tendência da diminuição da resistência com aumento da relação água/cimento, confirmando assim os princípios apregoados por Duff Abrams.

Tabela 05. Resultados de resistência à compressão com 1 dia (2ª fase).

Traço	Teor de substituição (%)	Relação a/c	Resistência à compressão – 1 dia (MPa)							Desvio-padrão	Coeficiente de variação (%)
			1	2	3	4	Média				
1	300	0	0,45	16,56	17,07	18,60	18,09	17,58	0,9	5,3	
2	300-P1-15	15	0,43	17,32	17,83	17,83	17,83	17,71	0,3	1,4	
3	300-P1-30	30	0,44	15,80	16,05	16,56	15,54	15,99	0,4	2,7	
4	300-P1-45	45	0,45	13,25	13,25	12,99	14,01	13,38	0,4	3,3	
5	300-P1-60	60	0,49	10,70	10,45	10,96	10,96	10,76	0,2	2,3	
6	300-P2-15	15	0,45	16,56	16,31	16,82	19,36	17,26	1,4	8,2	
7	300-P2-30	30	0,45	16,56	15,03	19,11	15,03	16,43	1,9	11,7	
8	300-P2-45	45	0,45	14,01	14,27	14,01	13,25	13,89	0,4	3,2	
9	300-P2-60	60	0,46	13,76	12,99	13,25	13,50	13,38	0,3	2,5	
10	365	0	0,50	24,71	22,93	24,20	26,75	24,65	1,6	6,4	
11	365-P1-15	15	0,36	25,22	25,48	26,24	26,50	25,86	0,6	2,3	
12	365-P1-30	30	0,35	22,93	22,42	23,44	22,68	22,87	0,4	1,9	
13	365-P1-45	45	0,35	20,13	20,13	20,38	20,89	20,38	0,4	1,8	
14	365-P1-60	60	0,38	17,32	17,32	17,32	16,56	17,13	0,4	2,2	
15	365-P2-15	15	0,40	27,52	25,48	24,46	25,48	25,73	1,3	5,0	
16	365-P2-30	30	0,36	25,48	24,46	25,48	25,99	25,35	0,6	2,5	
17	365-P2-45	45	0,37	21,40	20,38	20,64	22,17	21,15	0,8	3,8	
18	365-P2-60	60	0,36	18,85	19,62	18,34	19,62	19,11	0,6	3,3	

Quadro 26. Características dos concretos executados na fase de avaliação da substituição.

	Traço	Abatimento (mm)	Consumo de cimento (kg/m ³)	Teor de substituição (%)	Relação a/c	M	A%	K (%)
1	300	70	300	0	0,45	6,95	5,66	45,80
2	300-P1-15	75	301	15	0,43	6,97	5,43	45,78
3	300-P1-30	80	301	30	0,44	6,97	5,57	45,78
4	300-P1-45	65	300	45	0,45	6,99	5,64	45,77
5	300-P1-60	60	296	60	0,49	7,01	6,24	45,74
6	300-P2-15	80	300	15	0,45	6,97	5,65	45,78
7	300-P2-30	75	300	30	0,45	6,97	5,64	45,78
8	300-P2-45	60	299	45	0,45	6,99	5,79	45,77
9	300-P2-60	70	297	60	0,46	7,01	6,09	45,74
10	365	80	371	0	0,50	5,46	5,61	47,60
11	365-P1-15	100	372	15	0,36	5,48	5,40	49,98
12	365-P1-30	90	371	30	0,35	5,49	5,55	52,62
13	365-P1-45	80	367	45	0,35	5,52	5,85	55,54
14	365-P1-60	80	365	60	0,38	5,53	6,13	58,85
15	365-P2-15	80	370	15	0,40	5,48	5,65	47,57
16	365-P2-30	80	372	30	0,36	5,49	5,39	47,55
17	365-P2-45	80	366	45	0,37	5,52	5,95	47,51
18	365-P2-60	90	365	60	0,36	5,53	6,13	47,49

M = teor de agregados secos, A% = relação água/materiais secos, K = teor de argamassa.

A Figura 33 a seguir, apresenta a relação entre os teores de substituição de areia natural por resíduos de britagem com a relação a/c utilizada.

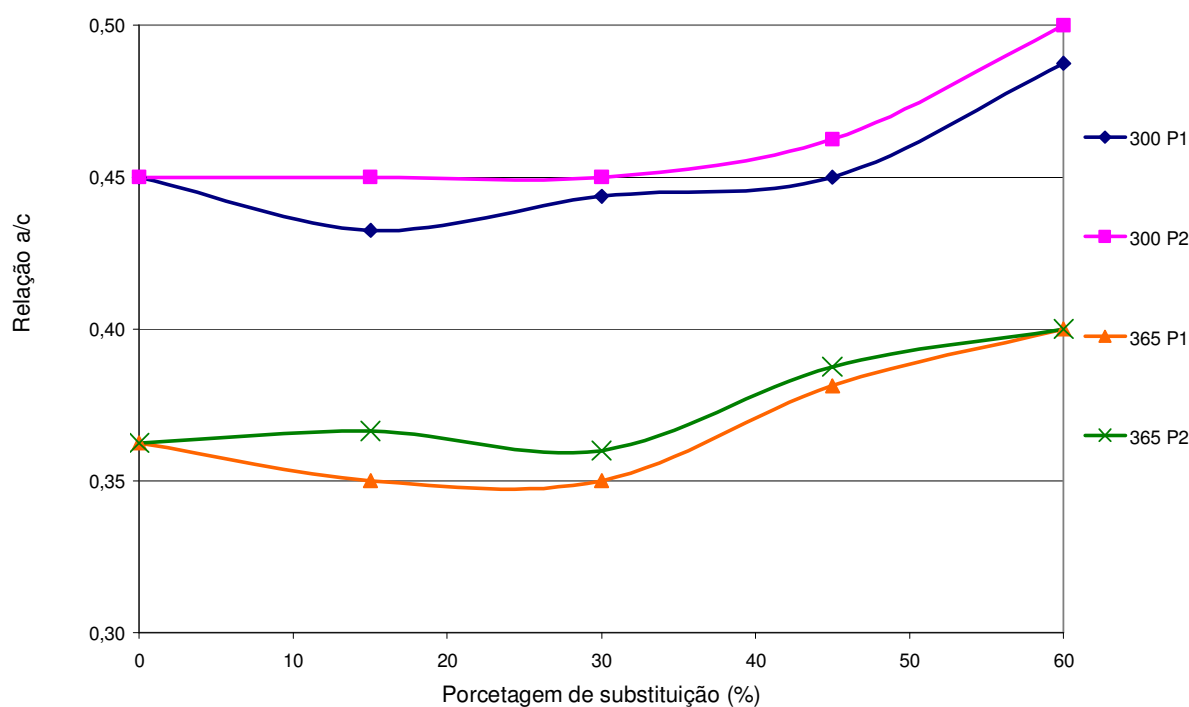


Figura 33. Curva Teor de substituição versus Relação a/c (2ª fase)

Pode-se observar no Quadro 25 que para a idade de 1 dia, os traços de concreto com consumo de cimento de aproximadamente 400 kg/m³ não são afetados de forma significativa em relação à resistência à compressão quando ocorre a substituição de areia por resíduos de britagem, enquanto que nos traços com consumo 320 kg/m³ de cimento houve aumento na resistência. Com 7 e 28 dias a substituição sempre melhorou as resistências à compressão dos concretos.

Os concretos com maior consumo de cimento tiveram um ganho menor no aumento da resistência, com a substituição da areia natural por resíduos de britagem. Isto sugere que estes concretos, por terem a sua mistura total (cimento, agregados e água) com maior grau de compactação, não fossem favorecidos de maneira significativa pela melhoria da compactação da mistura granulométrica do agregado miúdo.

Em relação a resistência a compressão, o teor de substituição da areia natural por resíduos de britagem mostrou-se adequado em torno de 40% para os concretos usados em peças pré-fabricadas normais e de 20% para os concretos empregados em peças protendidas.

Os resíduos de britagem lavado tiveram um desempenho melhor em todos os traços e em todas as idades, sendo isto ocasionado pelo menor teor de material pulverulento existente.

4.3.2. Resultados da fase de avaliação da substituição

Os traços de concreto ensaiados nesta fase têm suas características apresentadas no Quadro 26.

A relação a/c utilizada nos traços de concreto foi ajustada para que o abatimento fosse de 80 ± 20 mm. Este ajuste alterou algumas características dos traços.

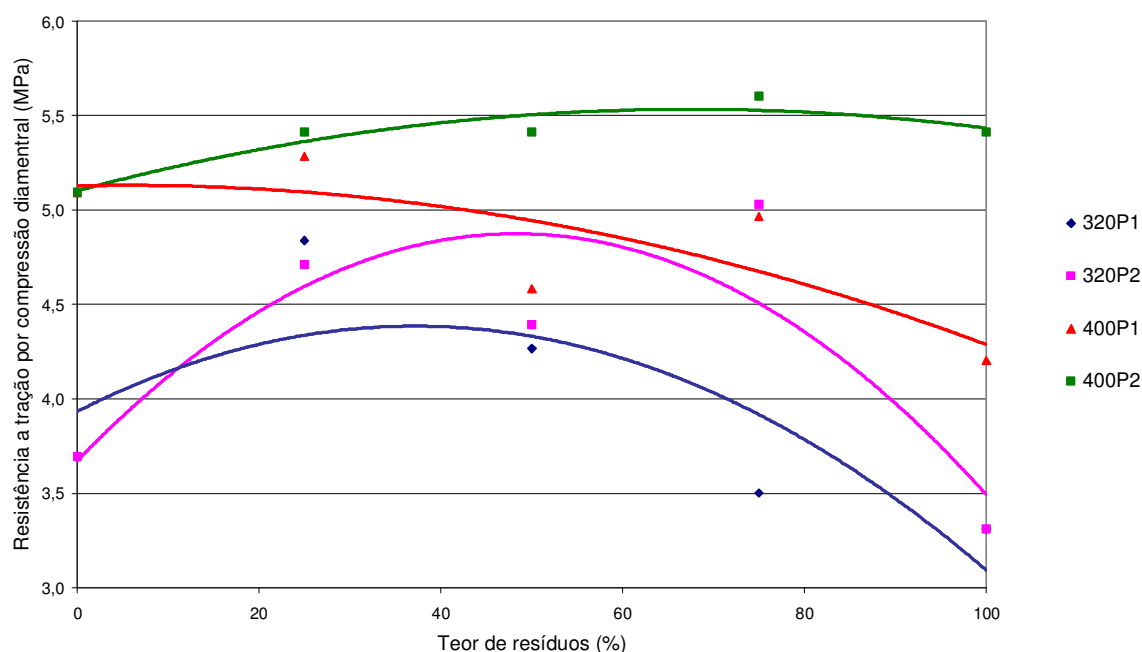


Figura 32. Gráfico da resistência à tração por compressão diametral com 28 dias *versus* teor de resíduos de britagem.

No Quadro 25 têm-se os valores máximos atingidos pelos concretos com o respectivo teor de substituição. Os valores foram estimados através dos máximos das curvas ajustadas pelo método dos mínimos quadrados.

Quadro 25. Resultados de resistência à compressão em relação ao teor de substituição de areia natural por resíduos de britagem (fase exploratória).

Idade (dias)	Traço	Teor substituição de máxima resistência (%)	Máxima resistência à compressão (MPa)	Variação relativa ao valor de referência (%)
1 dia	320 P1	31,6	11,8	22,1
	320 P2	42,6	14,5	49,7
	400 P1	5,5	22,3	-0,5
	400 P2	2,8	22,6	1,1
7 dias	320 P1	40,4	36,2	27,8
	320 P2	43,5	38,1	34,8
	400 P1	23,0	47,5	2,5
	400 P2	44,7	48,2	4,1
28 dias	320 P1	40,5	43,7	27,1
	320 P2	40,0	43,9	27,6
	400 P1	26,1	53,4	2,3
	400 P2	36,4	55,1	5,6

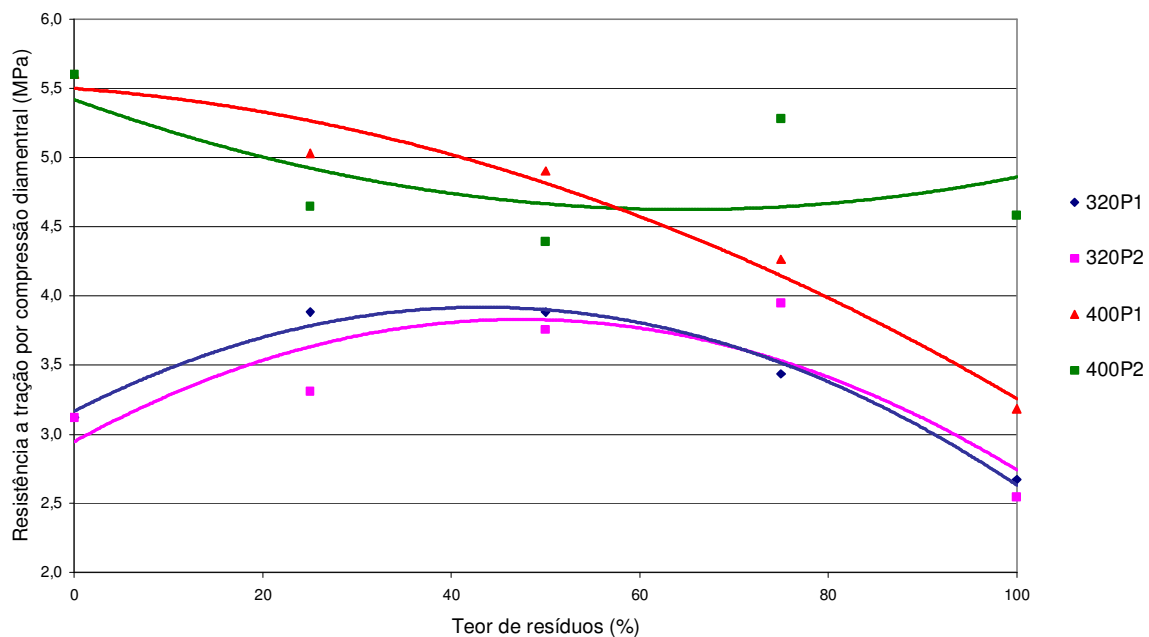


Figura 30. Gráfico da resistência à tração por compressão diametral com 7 dias *versus* teor de resíduos de britagem.

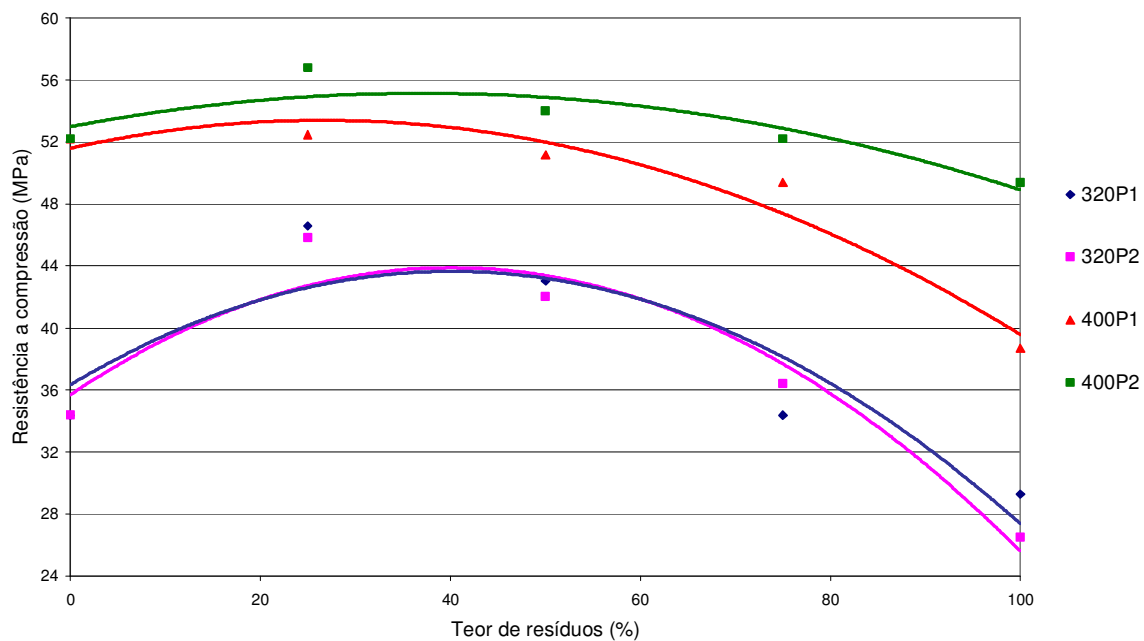


Figura 31. Gráfico da resistência à compressão com 28 dias *versus* teor de resíduos de britagem.

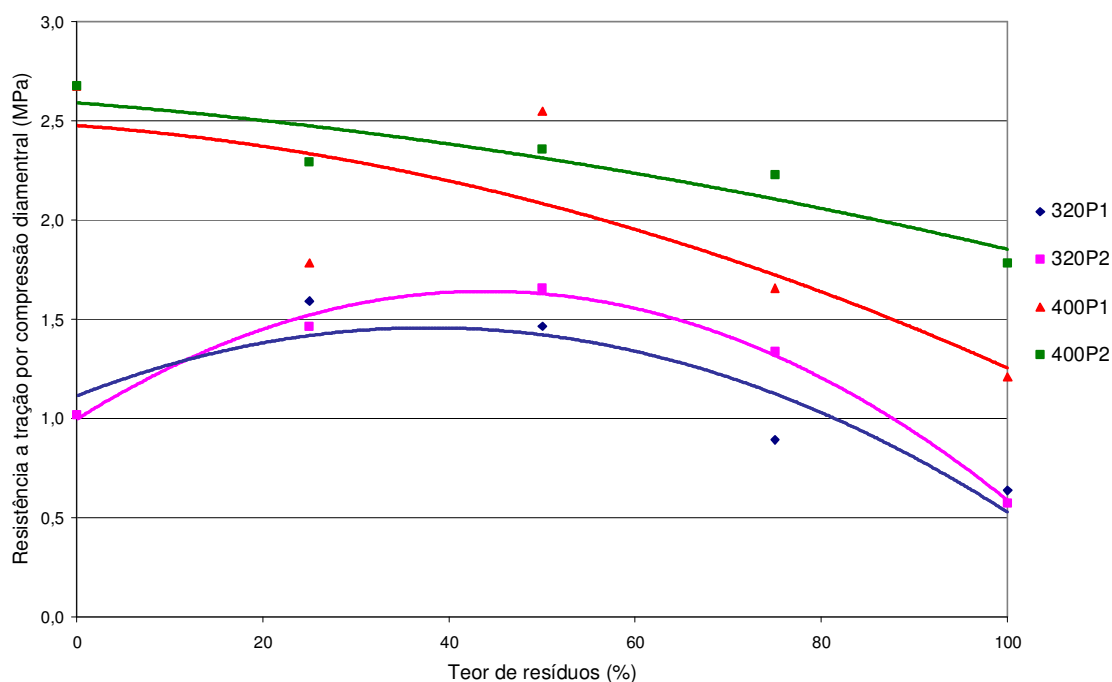


Figura 28. Gráfico da resistência à tração por compressão diametral com 1 dia *versus* teor de resíduos de britagem.

Nos traços com consumo de 400 kg/m³ o limite mínimo de resistência (21 MPa) só é atingido quando o valor de substituição chega a 35,8% para os resíduos de britagem secos e 76,7% para os resíduos de britagem lavados, quando são considerados os resultados ajustados por uma curva polinomial de 2ª ordem pelo método dos mínimos quadrados.

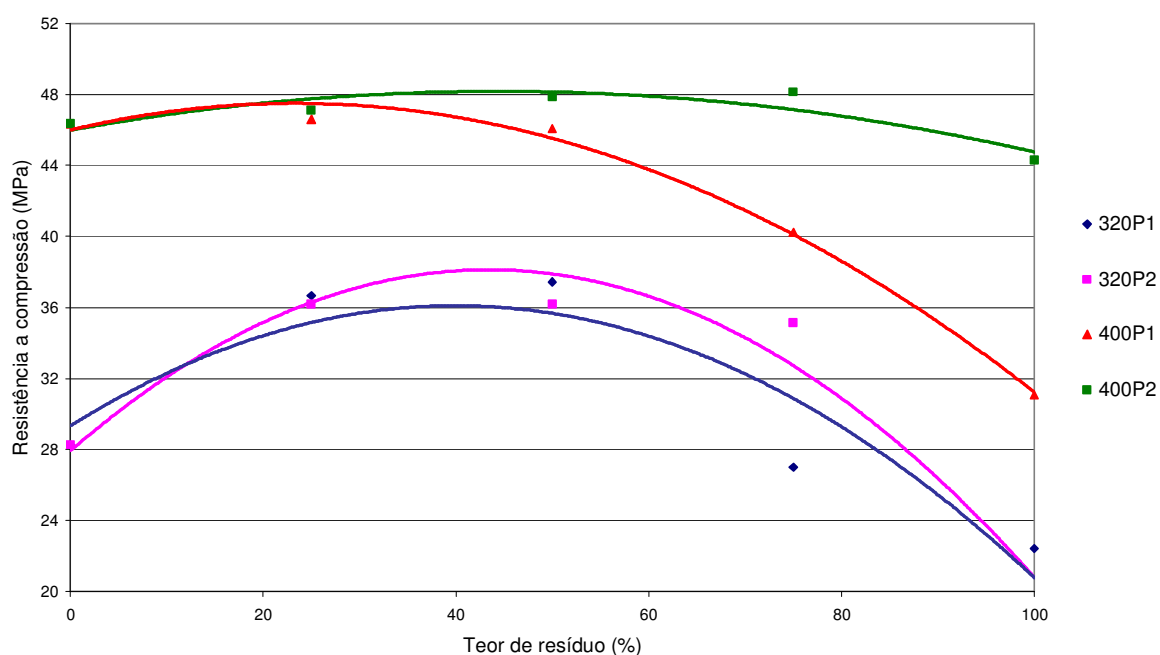


Figura 29. Gráfico da resistência à compressão com 7 dias *versus* teor de resíduos de britagem.

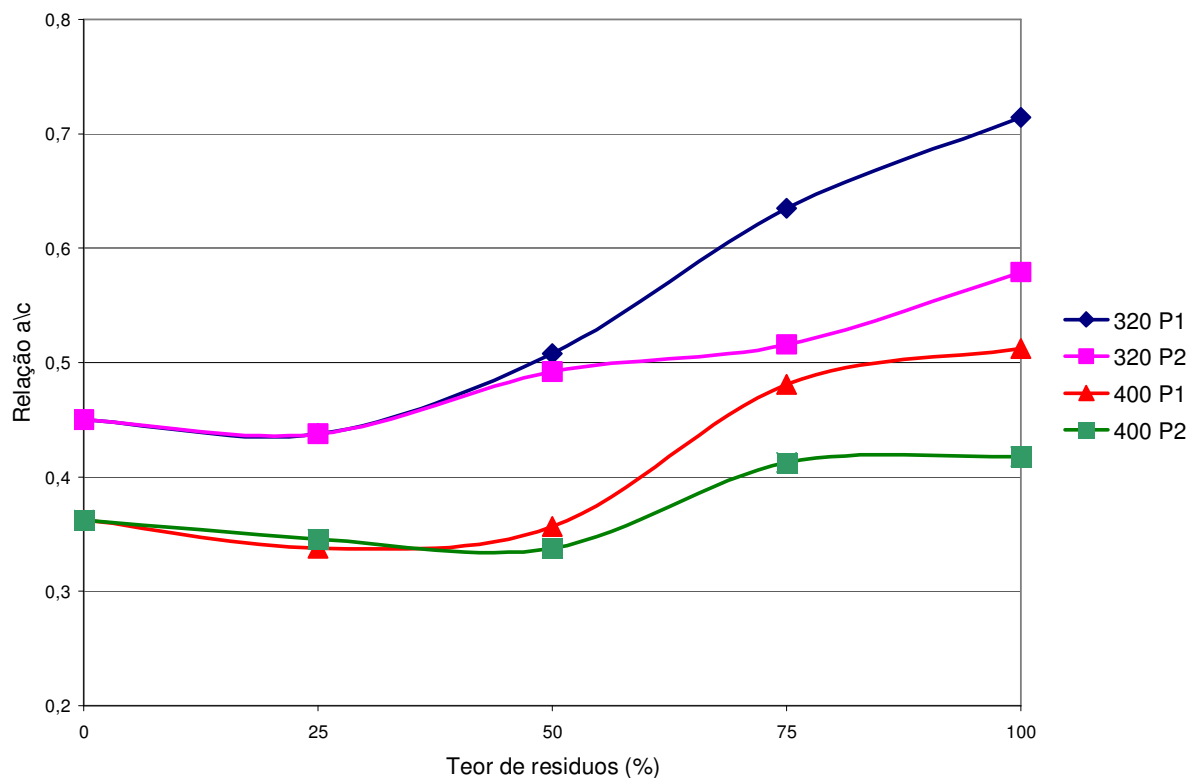


Figura 26. Relação a/c versus teor de resíduos de britagem.

As Figuras 27 a 32 mostram como a resistência à compressão e a tração por compressão diametral é afetada pela substituição da areia natural pelos resíduos de britagem.

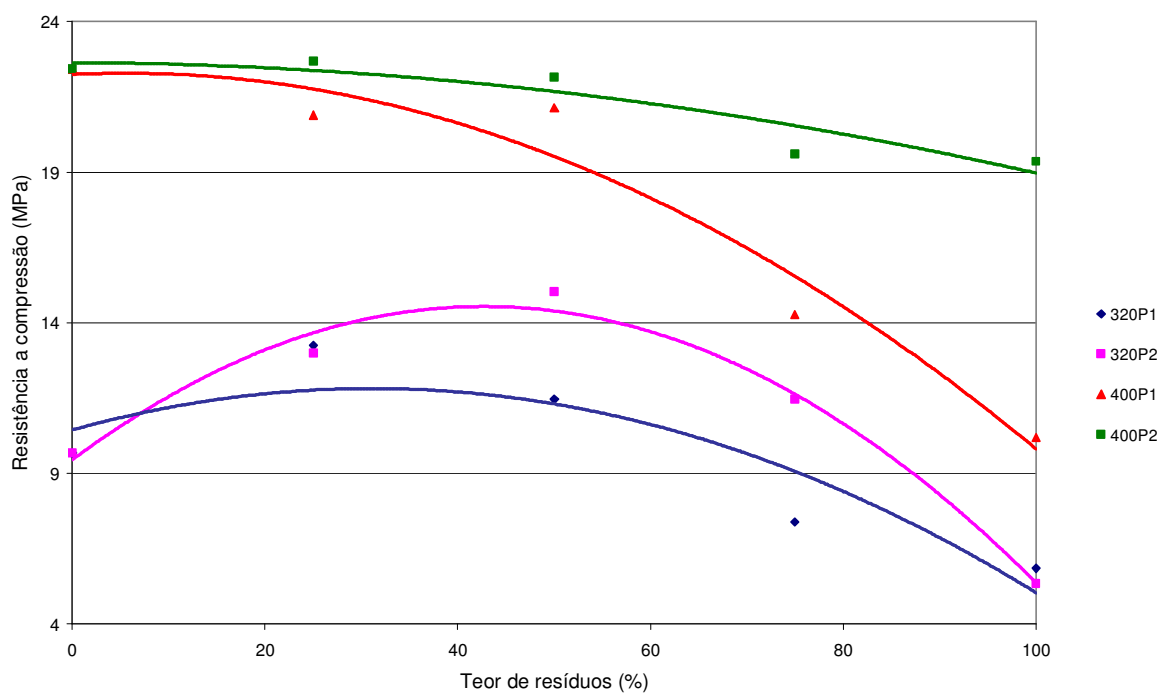


Figura 27. Gráfico da resistência à compressão com 1 dia versus teor de resíduos de britagem.

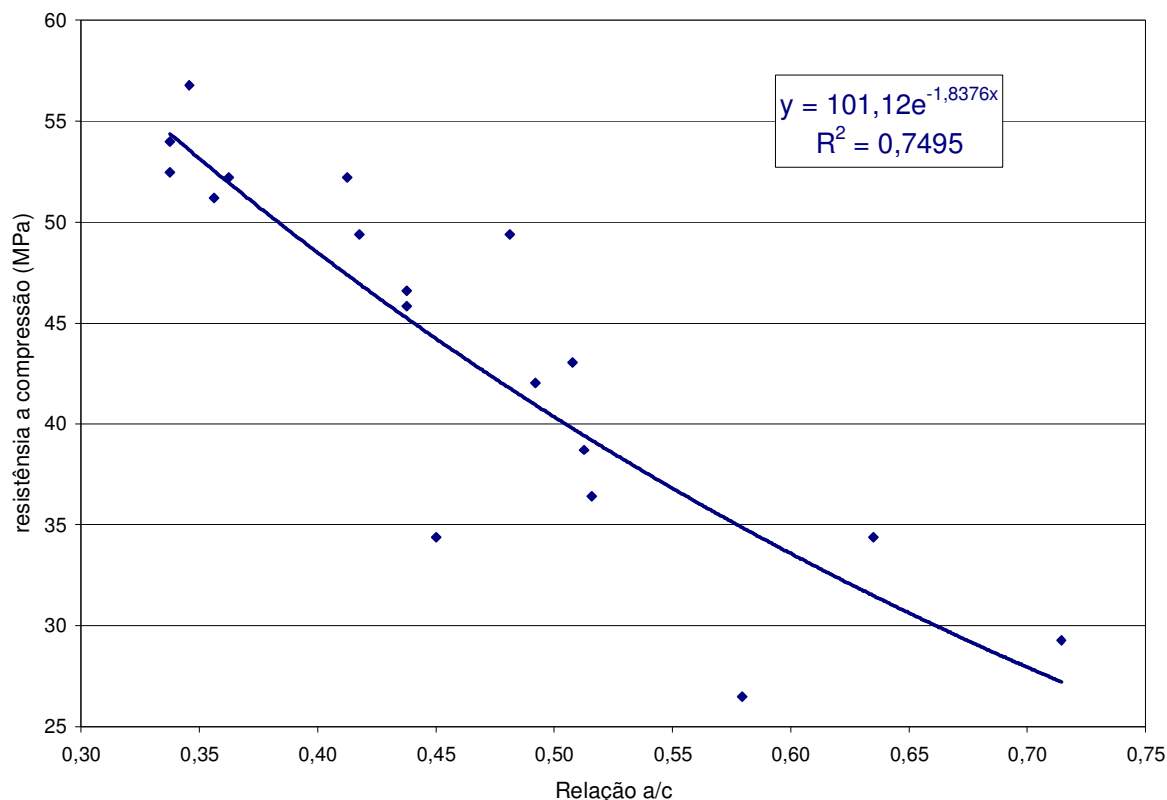


Figura 25. Curva de Abrams para 28 dias (resultados da 1ª fase).

A Figura 26 mostra a relação a/c em função dos diferentes teores de substituição da areia natural pelos resíduos de britagem, quando mantido o abatimento.

Observa-se na Figura 26 que até o valor de substituição de aproximadamente 30% o valor da relação a/c necessária, para se manter o abatimento de 80 ± 20 mm, é menor ou igual ao do traço de referência.

Esta diminuição da quantidade de água necessária é decorrente do aumento da compactação da mistura granular, onde os grãos dos resíduos e da areia natural se arrumam de tal forma, que a quantidade de vazios diminui, ocasionando uma menor demanda de água para preenchê-los.

Após teores de substituição superiores a 30% a quantidade de água necessária aumenta, principalmente nos traços que usam os resíduos de britagem seco, devido ao aumento da quantidade total do teor de material pulverulento e da predominância da forma lamelar e da textura dos grãos dos resíduos de britagem em relação às partículas da areia natural.

As Figuras 23, 24 e 25 mostram as curvas de Abrams para 1, 7 e 28 dias, dos concretos com e sem substituição da areia natural por resíduos de britagem.

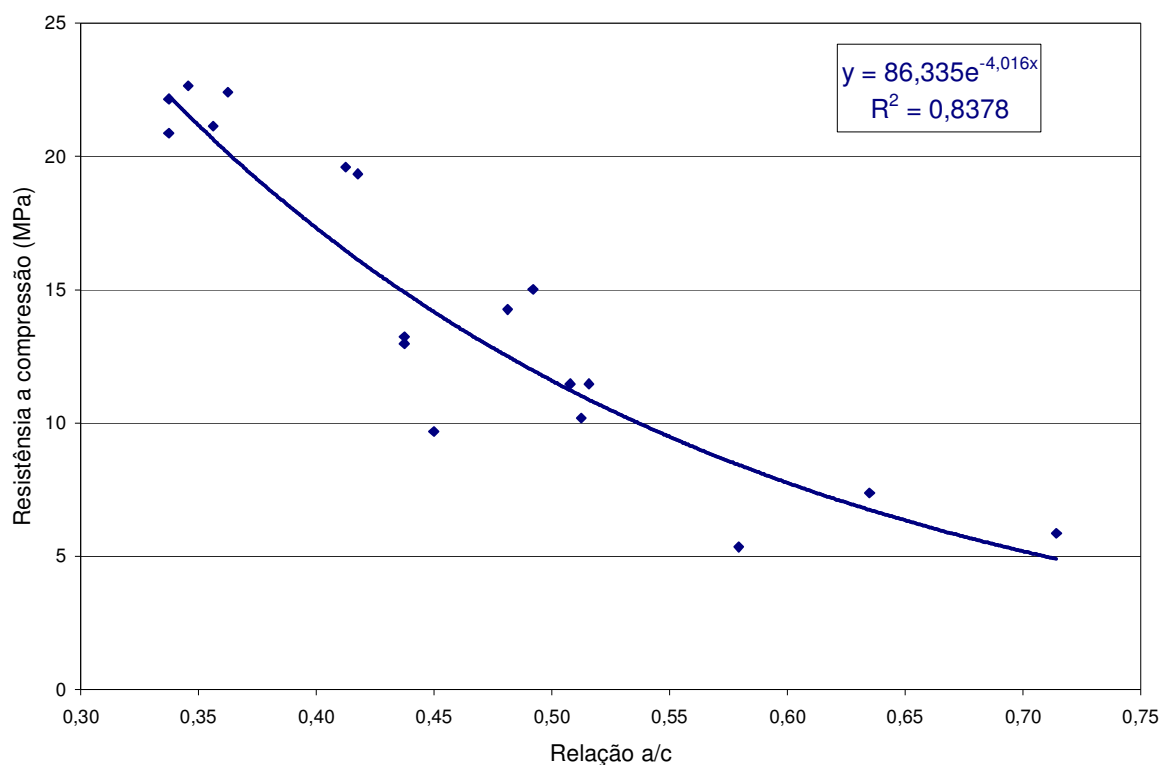


Figura 23. Curva de Abrams para 1 dia (resultados da 1ª fase).

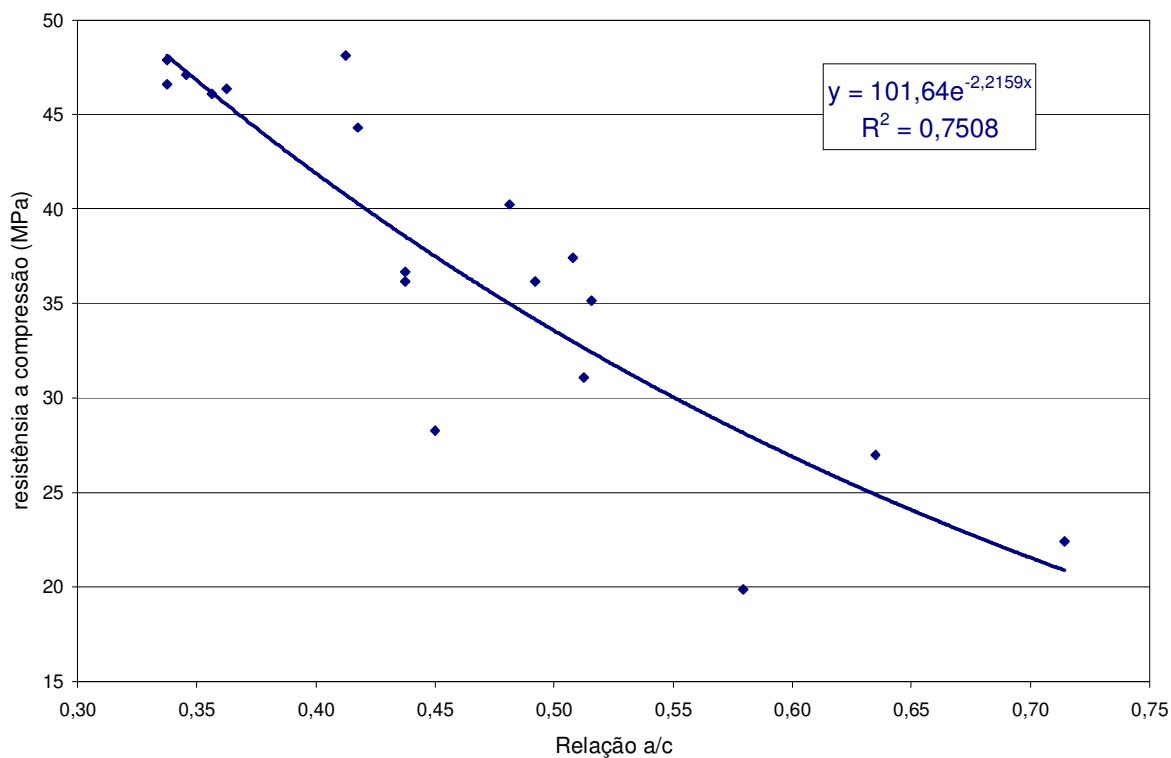


Figura 24. Curva de Abrams para 7 dias (resultados da 1ª fase).

Quadro 23. Características do agregado graúdo utilizado nas fases de avaliação.

Abertura peneira (mm)	% retida acumulada
25	-
19	-
12,5	62
9,5	77
6,3	97
4,75	100
< 4,75	100
Dimensão máxima (mm)	19
Módulo de finura	6,77
Massa específica (g/cm ³)	2,76
Teor pulverulento (%)	0,7
Impurezas orgânicas	-
Classificação da amostra	Zona 9,5 / 25,0

4.3. Desempenho do Concreto

4.3.1. Resultados da fase exploratória

Devido à utilização do parâmetro de controle, abatimento de 80 ± 20 mm, foram necessários ajustes na relação a/c, o que alterou as características dos traços propostos para esta fase de avaliação do desempenho do concreto. No Quadro 24 estão apresentadas às novas características do concreto executado nesta fase.

Quadro 24. Características dos concretos executados na fase exploratória.

Traço		Abatimento (mm)	Teor de pó (%)	Relação a/c	Consumo de cimento (kg/m ³)	M	A%	K (%)
1	320	100	0	0,45	320	6,37	6,11	46,4
2	400	85	0	0,36	403	4,87	6,18	48,6
3	320/25P1	70	25	0,44	322	6,38	5,93	46,3
4	320/25P2	70	25	0,44	322	6,38	5,93	46,3
5	320/50P1	70	50	0,51	315	6,42	6,85	46,4
6	320/50P2	60	50	0,49	316	6,42	6,63	46,4
7	320/75P1	60	75	0,63	303	6,42	8,56	46,4
8	320/75P2	75	75	0,52	315	6,42	6,95	46,4
9	320/100P1	60	100	0,71	295	6,49	9,54	46,3
10	320/100P2	60	100	0,58	307	6,49	7,74	46,3
11	400/25P1	90	25	0,34	410	4,84	5,78	48,6
12	400/25P2	70	25	0,35	409	4,84	5,92	48,6
13	400/50P1	70	50	0,36	409	4,84	6,10	48,6
14	400/50P2	60	50	0,34	412	4,84	5,78	48,6
15	400/75P1	70	75	0,48	390	4,84	8,24	48,6
16	400/75P2	80	75	0,41	400	4,84	7,06	48,6
17	400/100P1	70	100	0,51	384	4,89	8,70	48,6
18	400/100P2	30	100	0,42	398	4,89	7,09	48,6

M = teor de agregados secos, A% = relação água/materiais secos, K = teor de argamassa.

O aditivo utilizado foi um superplastificante que tem como base polímeros de naftaleno sulfonado sendo classificado como SP, de acordo com a norma NBR 11768 (ABNT, 1992) e cujas características são:

- massa específica = 1,25 g/cm³ a 25°C;
- teor de álcalis = <72,0 g de equivalente Na₂O por litro;
- pH: 7,5 a 9,5;
- teor de sólidos: 42,0 a 44,0%;
- nome comercial = SP450;
- Fabricante = Anhortec.

Os agregados miúdos utilizados foram: areia fina natural, proveniente de Beribeira em Camaçari – BA, resíduo de britagem seco e resíduo de britagem lavado, provenientes do estoque da Pedreiras Valéria, e cujas características são apresentadas no Quadro 22 abaixo.

Quadro 22. Características dos agregados miúdos utilizados nas fases de avaliação.

Abertura Peneira (mm)	Porcentagem retida acumulada		
	Areia natural	Resíduos de britagem seco	Resíduos de britagem lavado
4,75	-	4	-
2,36	2	26	21
1,18	5	46	44
0,60	23	63	66
0,30	65	76	80
0,15	94	87	93
< 0,15	100	100	100
Dimensão máxima (mm)	1,2	4,8	4,8
Módulo de finura	1,89	3,02	3,04
Massa específica (g/cm ³)	2,67	2,71	2,73
Teor pulverulento (%)	0,5	10,8	3,3
Impurezas orgânicas	Inferior	-	-
Classificação da amostra	Zona utilizável inferior	Zona utilizável superior	Zona utilizável superior

O agregado graúdo utilizado nos testes foi fornecido pela mesma Pedreira que forneceu os resíduos de britagem e tem suas características apresentadas no quadro 23.

combinado com a areia natural e a brita, formam um agregado total que possui um teor de material pulverulento dentro do limite de 6,5% prescrito na norma.

4.2.2. Fase de avaliação da substituição e fase de avaliação do concreto proposto

Os materiais utilizados nestas fases do programa experimental foram separados e armazenados, e as suas características são apresentadas a seguir.

Entre os ensaios realizados na fase exploratória e os ensaios da fase de avaliação da substituição, houve troca no fornecedor de cimento para a usina de pré-fabricação, o que ocasionou a troca do tipo de cimento e ajustes nos traços de referência utilizados na pesquisa.

O aglomerante utilizado nas fases de avaliação foi um cimento CPV-ARI-RS, classificado de acordo com a NBR 5733 (ABNT, 1991) e a NBR 5737 (ABNT, 1992), fornecido em sacos de 40 kg pela Maré Cimentos (MIZÚ), cujas principais características são descritas no Quadro 21 (dados fornecidos pelo fabricante).

Quadro 21. Características do cimento utilizado nas fases de avaliação.

Ensaio químico e físico	Unidade	Resultado
Perda ao fogo	%	3,38
Anidrido sulfúrico – SO ₃	%	3,19
Resíduo insolúvel	%	0,83
Equivalente alcalino Na ₂ O	%	0,77
Óxido de cal livre – CaO	%	1,80
Área Específica – Blaine	cm ² /g	4.430
Massa específica	g/cm ³	3,12
Finura – resíduos na peneira de 0,075 mm	%	0,19
Finura – resíduos na peneira de 0,044 mm	%	1,37
Pasta de consistência normal	%	29,1
Início de pega	hora : min	02:50
Fim de Pega	hora : min	03:09
Expansibilidade de Le Chatelier	mm	0,89
Resistência à compressão 1 dia	MPa	20,07
Resistência à compressão 3 dias	MPa	30,48
Resistência à compressão 7 dias	MPa	36,50
Resistência à compressão 28 dias	MPa	45,00

Quadro 19. Características dos agregados miúdos utilizados na fase exploratória.

Abertura peneira (mm)	Porcentagem retida acumulada		
	Areia natural	Resíduo de britagem seco	Resíduo de britagem lavado
4,75	-	3	2
2,36	-	24	26
1,18	2	41	51
0,60	13	56	72
0,30	71	67	87
0,15	95	76	96
< 0,15	100	100	100
Dimensão máxima (mm)	1,2	4,8	4,8
Módulo de finura	1,81	2,67	3,34
Massa específica (g/cm ³)	2,62	2,70	2,72
Teor pulverulento (%)	0,8	15,4	2,0
Massa unitária (g/cm ³)	1,50	-	-
Impurezas orgânicas	Inferior	Inferior	Inferior
Classificação da amostra	Zona utilizável inferior	Zona utilizável superior	Zona utilizável superior

O agregado graúdo utilizado nos testes foi fornecido pela mesma Pedreira que forneceu os resíduos e tem as características descritas no Quadro 20.

Quadro 20. Características do agregado graúdo utilizado na fase exploratória.

Abertura peneira (mm)	Porcentagem retida acumulada
25	-
19	-
12,5	5
9,5	44
6,3	82
4,75	94
< 4,75	100
Dimensão máxima (mm)	12,5
Módulo de finura	6,37
Massa específica (g/cm ³)	2,76
Teor pulverulento (%)	0,4
Massa unitária (g/cm ³)	1,49
Impurezas orgânicas	Inferior
Classificação da amostra	Zona 4,75/12,5

O teor de materiais pulverulentos no resíduo de britagem seco está acima do permitido pela norma NBR 7211 (ABNT, 2005) para agregados miúdos, mas quando

CIMENTO SERGIPE S/A (Poty), cuja principais características estão descritas no Quadro 18 (dados fornecidos pelo fabricante):

Quadro 18. Características do cimento utilizado na fase exploratória.

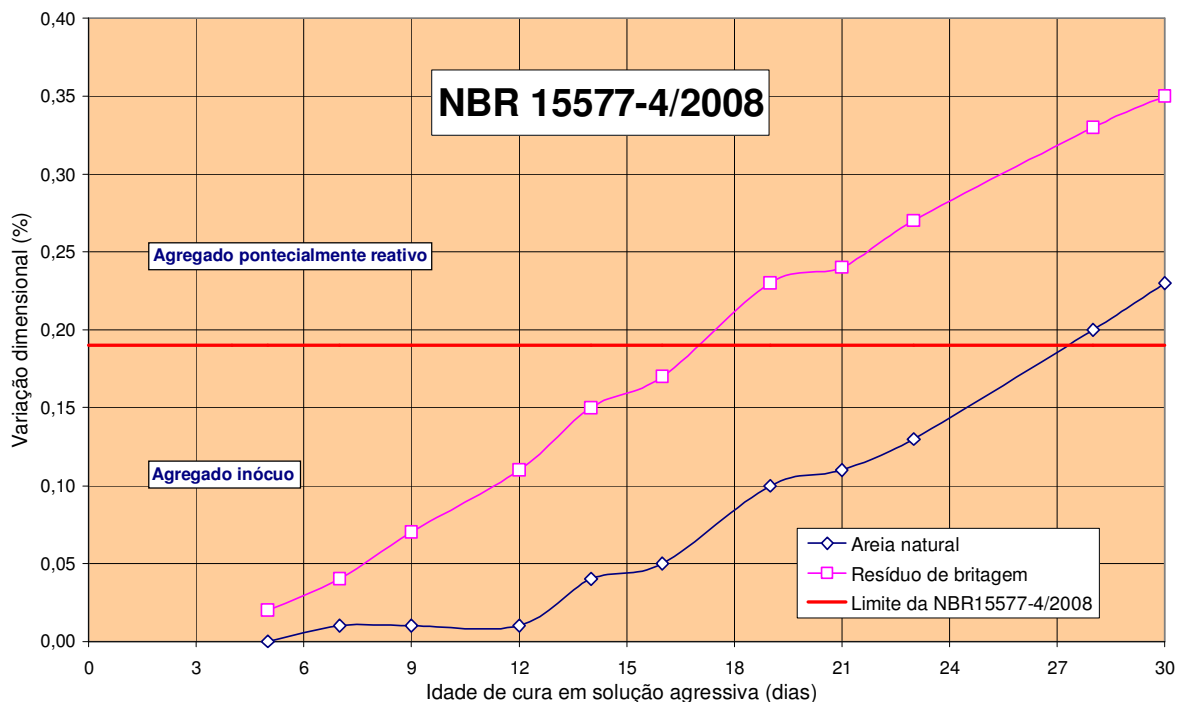
Ensaio químico e físico	Unidade	Resultados
Perda ao fogo	%	3,84
Óxido de Magnésio – MgO	%	2,98
Anidro sulfúrico – SO ₃	%	2,72
Resíduo insolúvel	%	1,49
Equivalente alcalino Na ₂ O	%	0,64
Óxido de cal livre – CaO	%	1,90
Área específica – Blaine	cm ² /g	3839
Massa específica	g/cm ³	3,11
Finura – resíduos na peneira de 0,075 mm	%	0,8
Finura – resíduos na peneira de 0,044 mm	%	7,6
Pasta de consistência normal	%	26,1
Início de pega	hora : min	02:24
Fim de Pega	hora : min	03:20
Expansibilidade de Le Chatelier	mm	0,5
Resistência à compressão 1 dia	MPa	16,6
Resistência à compressão 7 dias	MPa	32,0

O aditivo utilizado nesta fase foi um superplastificante que tem como base polímeros de naftaleno sulfonado, sendo classificado como SP, de acordo com a norma NBR 11768 (ABNT, 1992) e cujas principais características são:

- massa específica = 1,25 g/cm³ a 25°C;
- teor de álcalis ≤ 72,0 g de equivalente Na₂O por litro;
- nome comercial = SP450;
- fabricante = Fosroc-Reax (adquirida pela Anchortec).

Os agregados miúdos utilizados foram: areia fina natural proveniente de Camaçari, resíduo de britagem seco e resíduo de britagem lavado, coletados no estoque da Pedreiras Valéria. As características estão apresentadas no Quadro 19.

Figura 22 – Evolução das expansões com o tempo de cura em solução alcalina – considerando os limites da NBR 15577-4 (2008).



Segundo os critérios da NBR15577-1 (ABNT, 2008) para 30 dias de exposição à solução alcalina, tanto a areia natural, cuja barras de argamassa expandiram 0,23%, quanto os resíduos de britagem, cuja barras de argamassa tiveram expansão de 0,35%, são considerados como potencialmente reativos aos álcalis do concreto.

A NBR15577-1 (ABNT, 2008) especifica que para a utilização de agregados potencialmente reativos em concretos que forem utilizados em estruturas ou elementos de concreto que estiverem sujeitos a riscos de desenvolvimento da RAA, são necessárias adoções de medidas preventivas para a precaução e mitigação dos efeitos deletérios da RAA.

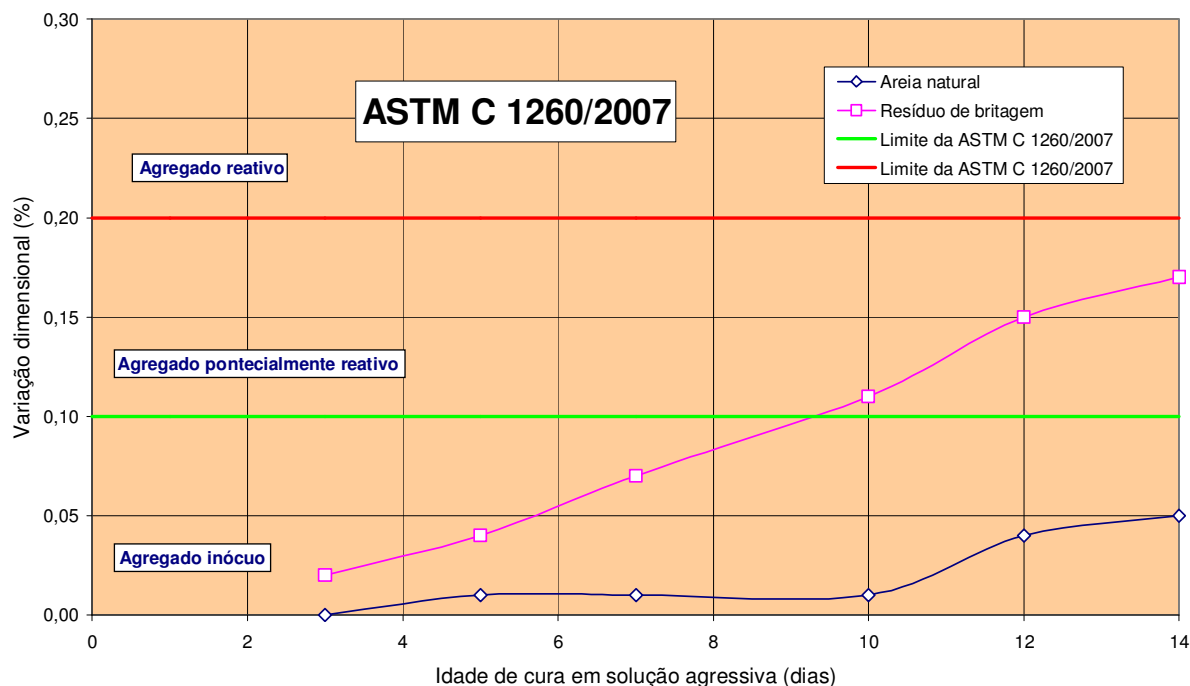
4.2. Caracterização dos Materiais Utilizados

4.2.1. Fase exploratória

O cimento utilizado nesta fase do programa experimental foi um CII-F-32, classificado de acordo com a NBR 11578 (ABNT, 1991), fornecido a granel pela

A Figura 21 ilustra a evolução das expansões médias das barras de argamassa em ambiente que potencializa as reações do álcali do concreto com os minerais reativos dos agregados, de acordo com a ASTM C 1260/2007.

Figura 21 – Evolução das expansões com o tempo de cura em solução alcalina – considerando os limites da ASTM C 1260/2007.



De acordo com os resultados obtidos, observa-se que as expansões médias das barras de argamassa aos 14 dias de cura em solução alcalina da amostra de areia natural foram de 0,05%, indicando que o agregado é inócuo à RAA, enquanto que a expansão das barras de argamassas da amostra de resíduo de britagem de rocha foi de 0,17%, indicando um agregado potencialmente reativo, segundo os critérios da ASTM C 1260 (2007).

Já que o método de ensaio da NBR 15577-4 (ABNT, 2008) é semelhante ao da ASTM C 1260 (2007), foram realizadas medições para 30 dias de exposição das barras de argamassa para o enquadramento dos agregados nos limites de classificação da norma Brasileira.

A Figura 22 ilustra como ocorreu a evolução das expansões das barras de argamassa imersas em solução alcalina que potencializa as reações entre os agregados e os álcalis do concreto, de acordo com NBR 15577-4/2008.

álcalis do concreto. Esta reatividade está relacionada à ocorrência de quartzo microcristalino, feldspato alterado, além do quartzo com extinção ondulante (deformado).

Todos esses minerais deletérios ocorrem de forma significativa. Os quartzos microcristalinos e deformados ocorrem em torno de 5 a 10% da amostra e os feldspatos alterados ocorrem em mais de 30%.

Ensaio da reatividade potencial dos agregados

O Quadro 17 apresenta os resultados obtidos no ensaio de determinação da potencialidade da reatividade álcali-agregado dos agregados miúdos, realizado de acordo com a norma ASTM C 1260 (2007).

Quadro 17. – Variação dimensional das barras de argamassa em solução alcalina.

Idade de cura agressiva (dias) *	Variações dimensionais (%)	
	Areia natural	Resíduo de britagem
1	-	-
2	-	-
3	0,00	0,02
4	-	-
5	0,01	0,04
6	-	-
7	0,01	0,07
8	-	-
9	-	-
10	0,01	0,11
11	-	-
12	0,04	0,15
13	-	-
14	0,05	0,17
15	-	-
16	-	-
17	0,10	0,23
18	-	-
19	0,11	0,24
20	-	-
21	0,13	0,27
22	-	-
23	-	-
24	-	-
25	-	-
26	0,20	0,33
27	-	-
28	0,23	0,35

* - Para a idade do ensaio, desde a moldagem, acrescente 2 dias.

De acordo com os resultados obtidos na análise petrográfica, a areia natural foi considerada inócua com relação à potencialidade reativa frente aos álcalis do concreto.

O Quadro 16 apresenta as principais características petrográficas do resíduo de britagem.

Quadro 16 - Características físicas e petrográficas do resíduo de britagem.

Mineralogia	Principal	Feldspatos (plagioclásio, microclínio) e quartzo.
	Subordinada	Piroxênio, biotita, sericita, titanita, apatita e opacos
	Deletéria	Feldspatos alterados > 30%, quartzo microcristalino - 1 a 5% e quartzo com extinção ondulante (maior que 35°) > 5%
Cor	Cinza esbranquiçado	
Estrutura	Maciça	
Textura	Granular	
Granulação	Média	
Feldspatos (mirmequitas e pertitas)	Presentes (1-5%)	
Estado de alteração	Medianamente alterada (feldspatos sericitizados, biotita cloritizada e piroxênios alterados)	
Deformação do agregado	Quartzo deformado (ângulo de extinção ondulante maior que 30°) e em alguns pontos minerais menores (triturados) bordejando os maiores, evidenciando deformação na rocha	
Propriedade físico-mecânica	Rocha muito coerente	
Forma dos fragmentos	Anédricos a hipidiomórficos	
Tipo de rocha	Ígnea	
Classificação petrográfica	Quartzo Monzonito	

Segundo Teixeira *et. al.* (2008), a classificação petrográfica das rochas ígneas é baseada na proporção dos minerais majoritários constituintes e em suas texturas. Os critérios de nomenclatura são padronizados internacionalmente pela IUGS (International Union of Geological Sciences). As rochas Quartzo-Monzoníticas têm textura faneríticas e possuem, em média, 66,8% de óxido de silício (SiO_2) e os feldspatos potássicos estão em equilíbrio, quantitativamente, com feldspatos plagioclásios cálcio-sódicos. O teor de quartzo existente nesta rocha é um pouco menor que o existente nos granitos.

De acordo com a NBR 15577-3 (ABNT, 2008), o resíduo de britagem de rocha foi considerado como potencialmente reativo, em relação à sua reatividade frente aos

Análise petrográfica dos agregados

Foi realizada 1 análise petrográfica para a areia natural e outra para o resíduo de britagem seco, que foram utilizados no programa experimental, pois é necessária a verificação de como a substituição dos agregados miúdos afetaria a possibilidade de ocorrência da reação álcali-agregado.

Só é necessária uma análise petrográfica nos resíduos de britagem, devido aos dois tipos de resíduos utilizados no programa experimental serem provenientes da mesma rocha.

A avaliação das características petrográficas da areia natural foi realizada através de microscópio estereoscópico (lupa) de luz refletida. A amostra foi lavada na malha de 0,15 mm para eliminação da porção argilosa. O Quadro 14 sintetiza os resultados obtidos.

Quadro 14. –Características físicas e petrográficas da areia natural.

Amostra		Areia fina natural
Cor (seca)		Branca
Mineralogia	Principal	Quartzo
	Subordinada	Raros fragmentos de turmalina e opacos
	Deletéria	-
Grau de arredondamento		Arredondada e subarredondada
Grau de esfericidade		Alta
Superfície dos grãos		Polidos
Alteração		-

Os resultados da composição mineralógica da areia natural são apresentados no Quadro 15.

Quadro 15. – Composição mineralógica da areia natural (% de números de grãos).

Fração (mm)	Minerais						
	Quartzo	Feldspatos	Fragmentos de rocha	Agregados limoníticos e Argilosos	Quartzo microcristalino e Sílex	Mica	Outros
2,36 - 1,18	100	-	-	-	-	-	traços
1,18 - 0,6	100	-	-	-	-	-	traços
0,6 - 0,3	100	-	-	-	-	-	traços
0,3 - 0,15	100	-	-	-	-	-	traços

Para cada tipo de agregado foram repetidos 4 ensaios, sendo que estão apresentados nas Figuras 19 e 20 os valores médios e os desvios-padrão dos resultados obtidos.

Os resultados dos ensaios mostraram que o valor das massas específicas dos resíduos de britagem são equivalentes, e maiores que o valor da massa específica da areia natural, isto ocorrendo, pois a massa específica depende dos os minerais que constituem o agregado.

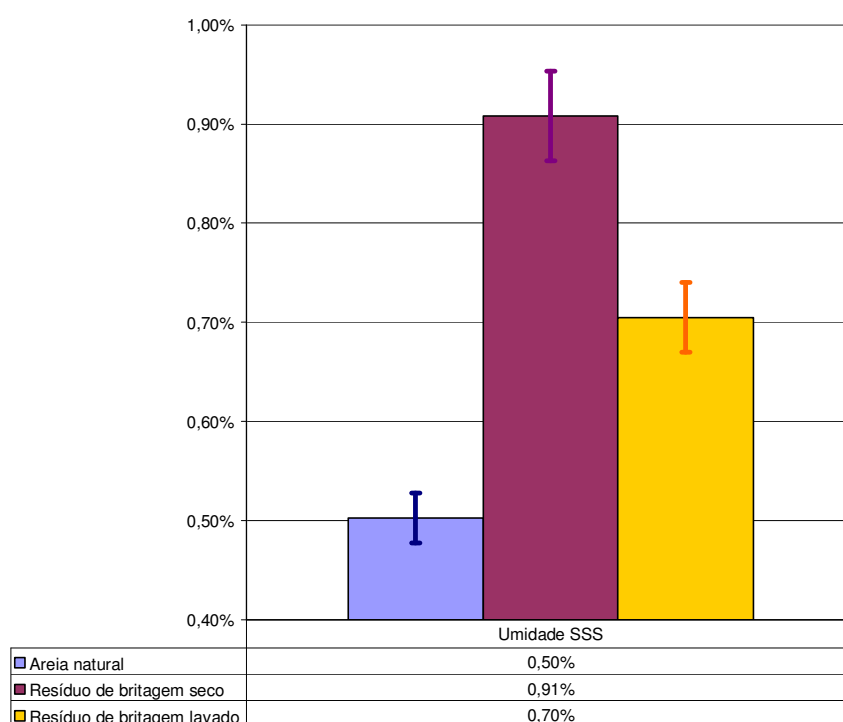


Figura 20. Resultados dos ensaios do teor de absorção de água nos agregados.

O teor de absorção dos resíduos de britagem são maiores que o da areia natural, indicando uma maior quantidade de poros permeáveis nos seus grãos.

Como os dois resíduos de britagem são provenientes da mesma rocha, a diferença do teor de absorção de água está na capacidade de absorção das partículas pulverulentas, ou seja, as partículas pulverulentas têm capacidade de absorção de água maior que as demais partículas dos resíduos de britagem devido ao efeito parede provocado pela tensão superficial entre a água e a superfície dos grãos.

valor obtido quando se utiliza somente areia natural, com um teor de substituição de 75%.

No ensaio de compactação úmida há uma aproximação (homogeneidade) das curvas dos resíduos de britagem seco e lavado, pois a água preenche os vazios entre os grãos da mistura granular, funcionando como uma agregado muito fino, compensando a diminuição do material pulverulento.

Uma análise dos resultados obtidos nos ensaios de compactação, mostram que os ensaios por via seca e úmida são equivalentes em termos de eficiência e precisão para a determinação da compactação de uma mistura granular de agregados miúdos.

Ensaio de massa específica e absorção de água

Os resultados dos ensaios de determinação de massa específica, massa específica aparente e teor de absorção de água são apresentados nas Figuras 19 e 20.

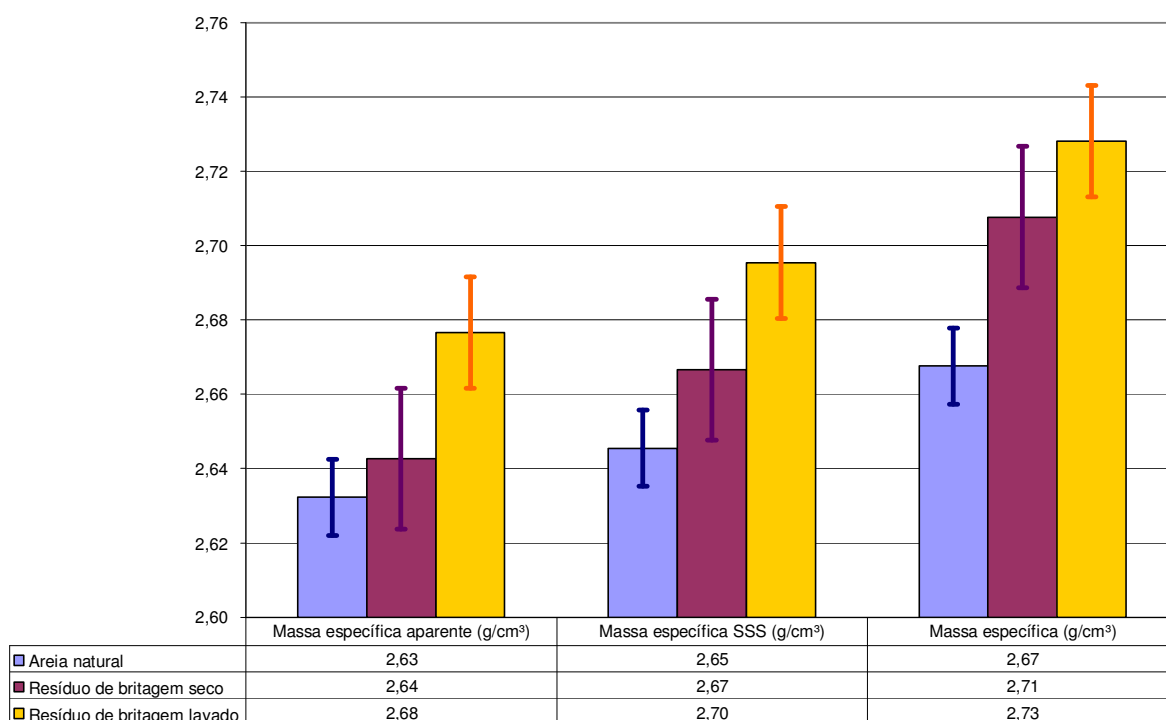


Figura 19. Resultados dos ensaios de massa específica.

Quadro 12. Ensaio de compactação úmida – areia natural + resíduo de britagem seco.

Quantidade (%)		Massa específica (g/cm ³)	Umidade (%)	Compacidade
Areia natural	Resíduos de britagem seco			
100,0	0,0	2,67	18,0	0,68
75,0	25,0	2,68	15,3	0,71
50,0	50,0	2,69	13,1	0,74
25,0	75,0	2,70	10,3	0,78
0,0	100,0	2,71	13,4	0,73

Quadro 13. Ensaio de compactação úmida – areia natural + resíduo de britagem lavado.

Quantidade (%)		Massa específica (g/cm ³)	Umidade (%)	Compacidade
Areia natural	Resíduos de britagem lavado			
100,0	0,0	2,67	18,0	0,68
75,0	25,0	2,68	16,2	0,70
50,0	50,0	2,70	13,1	0,74
25,0	75,0	2,71	10,4	0,78
0,0	100,0	2,73	14,0	0,72

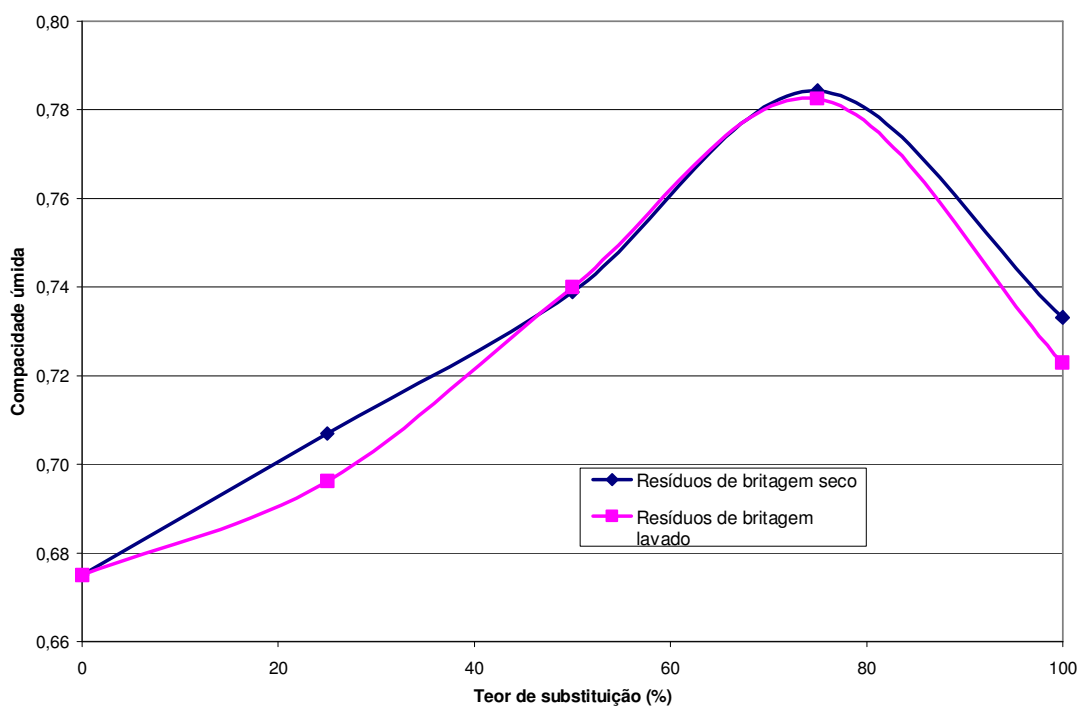


Figura 18. Curva de compactação úmida

O ensaio de compactação úmida confirmou a tendência apresentada na Figura 17 (compactação seca) do aumento da compactação com a substituição da areia natural por resíduos de britagem. A compactação máxima obtida foi 15% superior ao

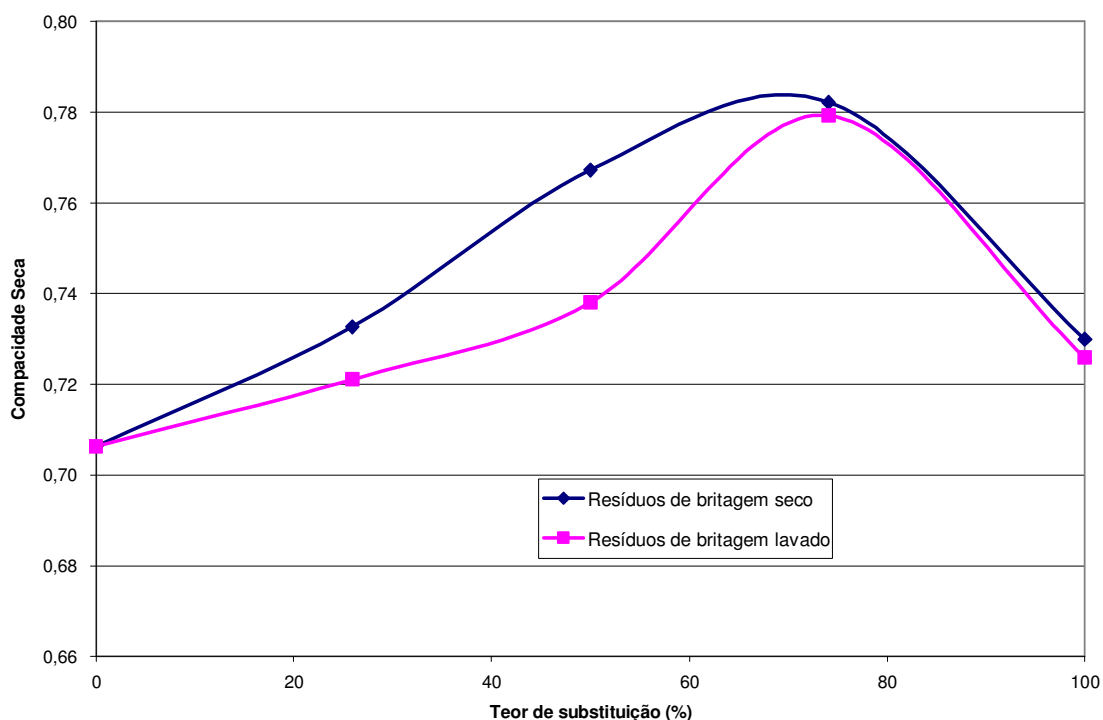


Figura 17. Curva de compacidade seca.

Também é possível verificar que nas misturas granulares com 25 e 50 % de areia natural e resíduo de britagem seco os valores obtidos de compacidade foram maiores que os valores obtidos nas misturas com mesma porcentagem de areia natural e resíduo de britagem lavado.

Ensaio de compacidade úmida

Os resultados do ensaio de compacidade úmida são apresentados nos Quadros 12 e 13. Foram realizadas misturas granulares variando de 0 a 100%, a cada 25%, de resíduos de britagem com o intuito de verificar o comportamento da compacidade das misturas saturadas de água, ou seja, quando teoricamente todos os vazios estão preenchidos por água.

Através dos resultados obtidos nos ensaios de compacidade úmida foi elaborada a Figura 18.

Ensaio de compactação-vibração

Os resultados do ensaio de compacidade seca, ou compactação-vibração, estão descritos nos Quadros 10 e 11. Foram realizadas misturas granulares a fim de verificar a compacidade com a substituição de areia natural por resíduos de britagem, com teores de substituição variando de 0 a 100%, a cada 25%.

Quadro 10. Ensaio de compacidade seca – areia natural + resíduo de britagem seco.

Quantidade (%)		Massa específica (g/cm ³)	Massa aparente seca (g/cm ³)	Compacidade
Areia natural	Resíduos de britagem seco			
100,0	0,0	2,67	1,89	0,71
74,1	25,9	2,68	1,96	0,73
50,0	50,0	2,69	2,06	0,77
25,9	74,1	2,70	2,11	0,78
0,0	100,0	2,71	1,98	0,73

Quadro 11. Ensaio de compacidade seca – Areia natural + Resíduo de britagem lavado.

Quantidade (%)		Massa específica (g/cm ³)	Massa aparente seca (g/cm ³)	Compacidade
Areia natural	Resíduos de britagem lavado			
100,0	0,0	2,67	1,89	0,71
74,1	25,9	2,69	1,93	0,72
50,0	50,0	2,70	1,99	0,74
25,9	74,1	2,71	2,10	0,78
0,0	100,0	2,73	1,98	0,73

Através dos resultados obtidos foi elaborada uma curva de compacidade seca, apresentada na Figura 17.

O ensaio de compacidade seca demonstrou que a substituição de areia natural por resíduos de britagem aumenta a compacidade da mistura até um teor de substituição de aproximadamente 70%, quando o aumento da compacidade é de cerca de 10%.

O aumento da compacidade na mistura granular, ocorre devido aos grãos dos resíduos de britagem e da areia se combinarem, de tal forma que os vazios entre os grãos de um material são preenchidos pelos grãos do outro material.



Figura 16. Material retido na peneira de abertura 2,36 mm – resíduo de britagem lavado.

De acordo com a classificação de SHEPARD e PAWERS (SILVA, 2004), os resíduos de britagens têm o formato anguloso, enquanto a areia natural possui formato arredondado.

Esta classificação está de acordo com Persson (1998), que afirma que a principal diferença entre os agregados naturais e britados ocorre em sua forma, sendo esta diferença acentuada nas partículas finas. Os agregados provenientes da britagem de rocha são mais alongados e possuem superfícies mais ásperas.

As formas angulosas dos grãos dos resíduos de britagem fazem com que os mesmos tenham maior área específica superficial e, portanto, necessitem de uma quantidade maior de água para molhá-las.

Quando se utiliza um agregado que necessita de uma maior demanda de água, o concreto tem sua consistência diminuída no estado fresco, quando se matem todas as demais propriedades de sua dosagem.



Figura 14. Material retido na peneira de abertura 2,36 mm – areia natural.



Figura 15. Material retido na peneira de abertura 2,36 mm – resíduo de britagem seco.

Os resultados dos ensaios de granulometria mostram que o teor de material pulverulento dos resíduos de britagem, quando se leva em consideração que este material é proveniente da britagem de rochas, está dentro dos percentuais permitidos pela NBR 7211 (ABNT, 2005) para concretos protegidos de desgaste superficial.

È necessária a verificação através da análise petrográfica da não existência de materiais inadequados que interfiram nas propriedades de durabilidade do concreto.

As formas das curvas granulométricas mostram que todos os agregados analisados possuem uma distribuição granulométrica contínua, sendo que os resíduos de britagem de rocha apresentam uma distribuição granulométrica bem graduada, enquanto a brita e a areia apresentam uma distribuição granulométrica mais uniforme.

Considerando que a NBR 7211 (ABNT, 2005) define as zonas de aplicabilidade dos agregados miúdos através do módulo de finura, foi considerado que esta característica qualifica, de modo simplificado, os agregados para o uso em concretos. Levando-se este fato em consideração, todos os agregados miúdos analisados estão aptos a serem utilizados em concretos.

Os resultados mostram que as variações nas características dos resíduos de britagem são compatíveis com as variações das características dos agregados tradicionalmente utilizados nos concretos, brita e areia natural, quando avaliadas através do valor do desvio-padrão e da variância do módulo de finura e do formato das curvas granulométricas exibidas nas Figuras 10 a 13.

Análise da forma

As Figuras 14 a 16 apresentam imagens de frações retidas na peneira de abertura 2,36 mm dos agregados miúdos para análise da forma e textura dos grãos.

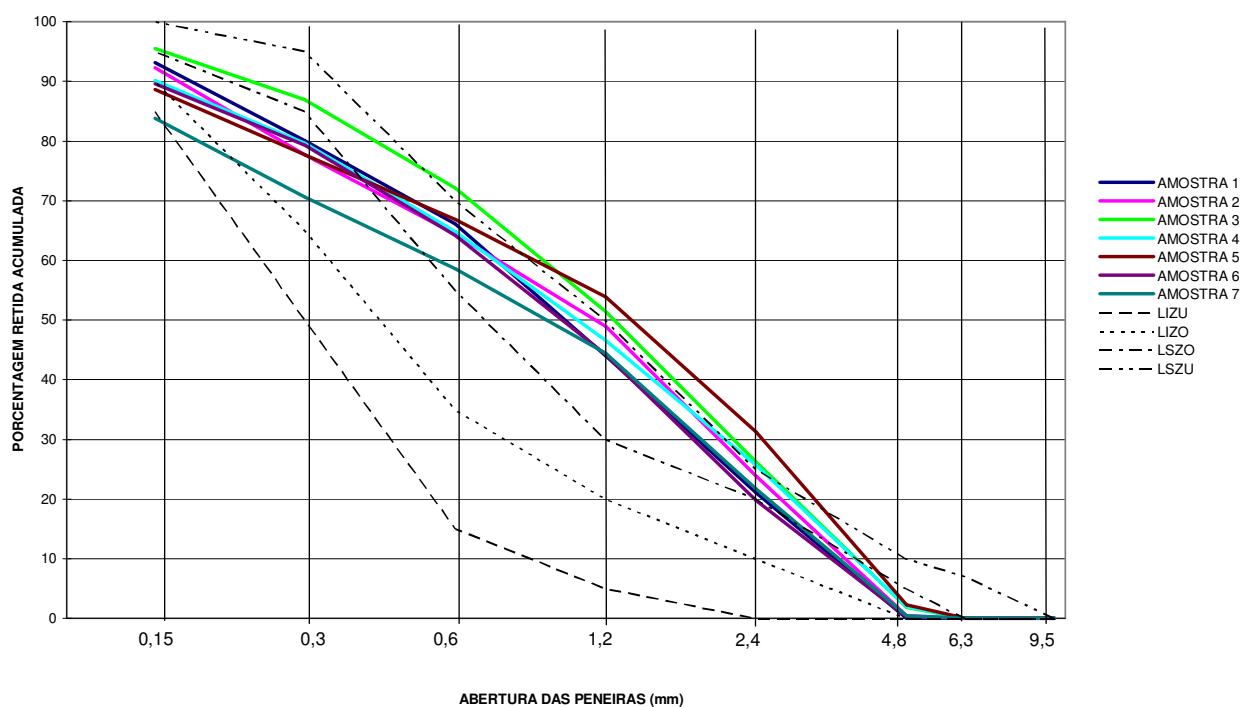


Figura 12. Distribuição granulométrica do resíduo de britagem lavado.

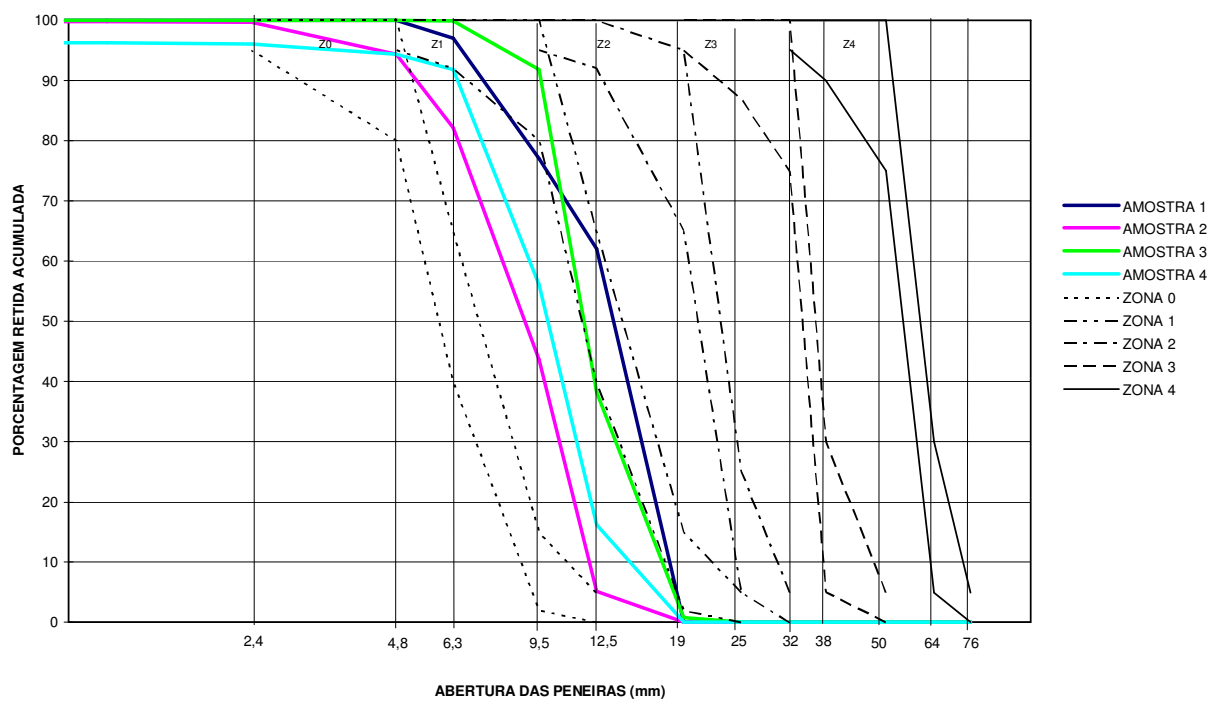


Figura 13. Distribuição granulométrica da brita 9,5 / 25,0.

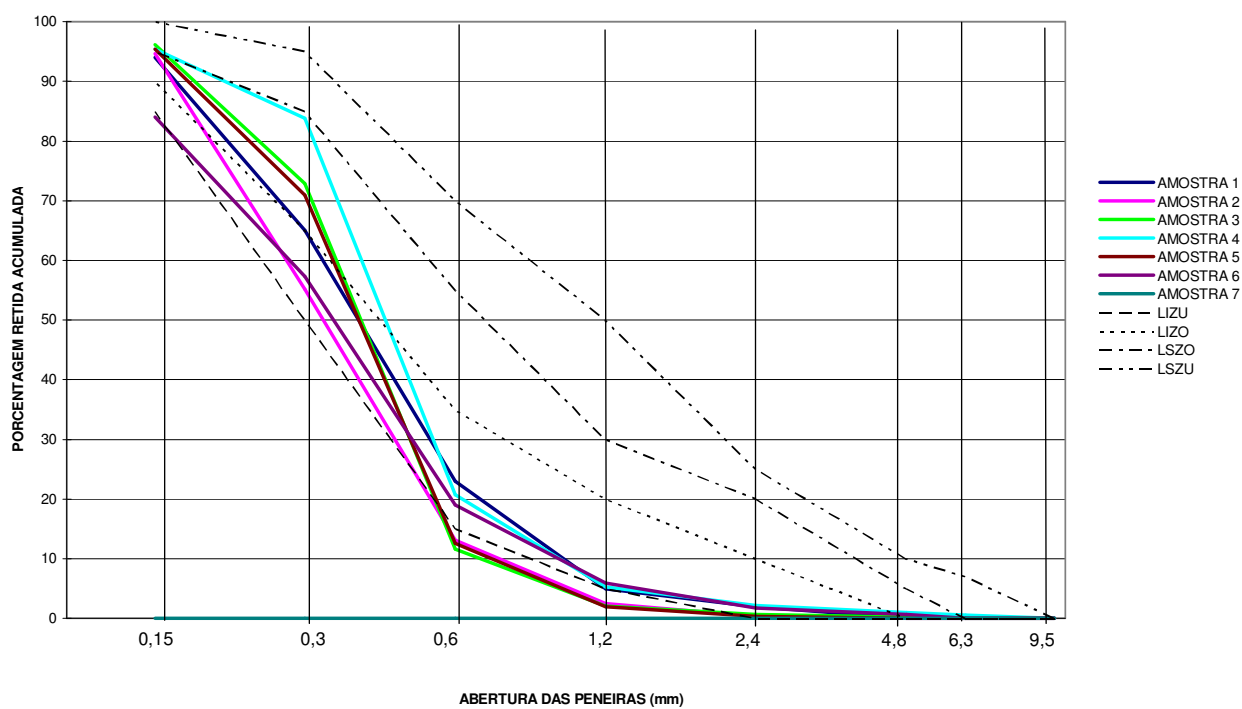


Figura 10. Distribuição granulométrica da areia natural.

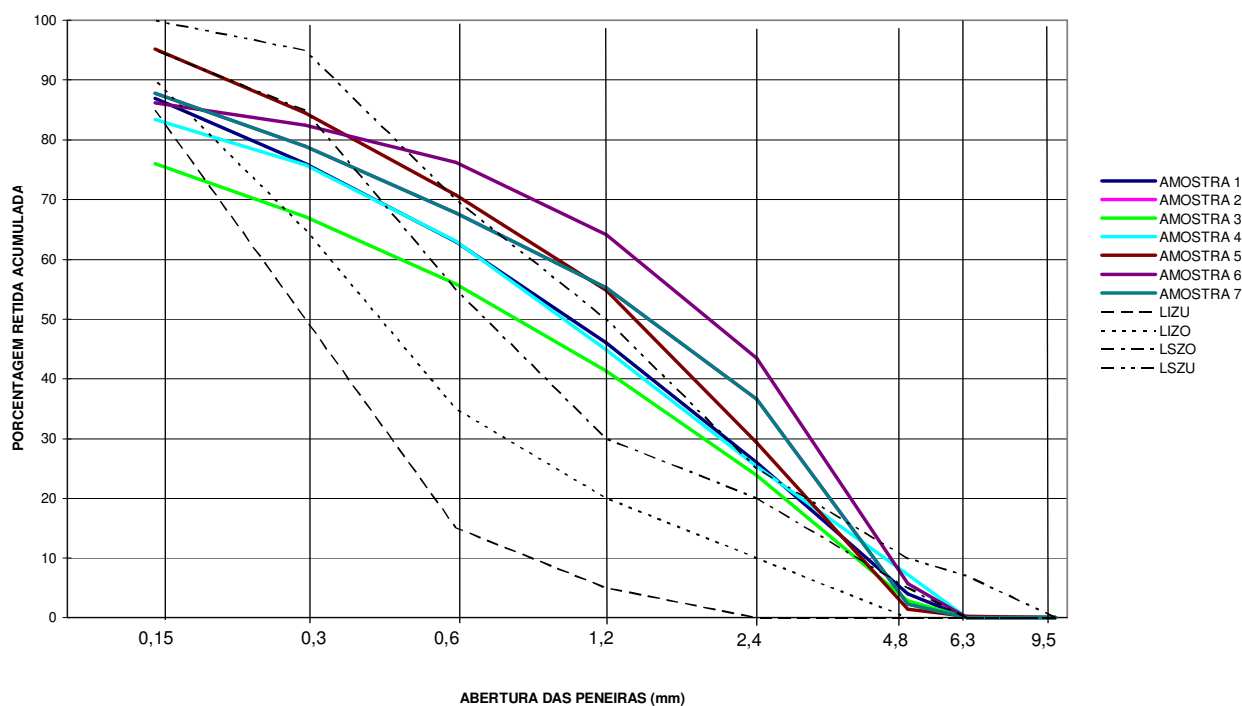


Figura 11. Distribuição granulométrica do resíduo de britagem seco.

Tabela 03. Análise granulométrica – resíduos de britagem lavado.

Amostra	Características do resíduo de britagem lavado				
	Módulo de finura	Dimensão máxima (mm)	Teor de pulverulento (%)	Massa específica (g/cm ³)	Classificação*
A.M.1	3,05	4,75	3,30	2,73	ZUS
A.M.2	3,08	4,75	5,10	2,73	ZUS
A.M.3	3,34	4,75	2,00	-	ZUS
A.M.4	3,09	4,75	5,65	-	ZUS
A.M.5	3,21	4,75	4,80	2,72	ZUS
A.M.6	2,97	4,75	6,45	-	ZUS
A.M.7	2,80	4,75	5,10	2,72	ZO
Média	3,08	4,75	4,63	2,73	
Desvio-padrão	0,17	0,00	1,50	0,01	
Coefficiente de Variação (%)	5,6	0,0	32,4	0,2	

* Classificação de acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2005): ZUS – zona utilizável superior, ZO – zona ótima.

Tabela 04. Análise granulométrica – brita 9,5 / 25,0.

Amostra	Características da brita 9,5 / 25,0				
	Módulo de finura	Dimensão máxima (mm)	Teor de pulverulento (%)	Massa específica (g/cm ³)	Classificação*
A.M.1	6,77	19	0,70	-	9,5 / 25,0
A.M.2	6,37	12,5	0,40	2,76	4,75 / 12,5
A.M.3	6,92	19	0,30	2,76	9,5 / 25,0
A.M.4	6,35	19	0,50	2,78	9,5 / 25,0
Média	6,60	17,4	0,48	2,77	
Desvio-padrão	0,29	3,3	0,17	0,01	
Coefficiente de Variação (%)	4,3	18,7	36,0	0,4	

* Classificação de acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2005): O 9,5 e 4,75 correspondem a menor dimensão e o 12,5 e o 25,0 a maior dimensão do agregado.

O agregado miúdo que possuiu módulo de finura superior a 3,50 foi designado como superior a zona de utilização superior (SZUS), pois se encontra fora das zonas granulométricas definidas pela NBR 7211 (ABNT, 2005).

A partir dos ensaios foram elaboradas as curvas granulométricas, apresentadas nas Figuras 10 a 13, que mostram a variação da distribuição granulométrica dos agregados.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1. Caracterização dos agregados e dos resíduos de britagem

Análise granulométrica

Foram executados ensaios de análises granulométricas nos agregados, com objetivo de verificar a constância desta característica ao longo do tempo. Os resultados estão relacionados nas Tabelas 01 a 04 a seguir.

Tabela 01. Análise granulométrica – areia natural.

Amostra	Características da areia natural				Classificação*
	Módulo de finura	Dimensão máxima (mm)	Teor de pulverulento (%)	Massa específica (g/cm ³)	
A.M.1	1,89	1,18	0,50	2,67	ZUI
A.M.2	1,66	1,18	0,50	2,62	ZUI
A.M.3	1,84	1,18	0,30	-	ZUI
A.M.4	2,08	1,18	1,10	2,62	ZUI
A.M.5	1,81	1,18	0,80	2,62	ZUI
A.M.6	1,69	2,36	1,80	2,62	ZUI
A.M.7	1,66	1,18	0,50	2,62	ZUI
Média	1,80	1,37	0,79	2,63	
Desvio-padrão	0,15	0,45	0,52	0,02	
Coefficiente de variação (%)	8,6	33,1	65,9	0,8	

* Classificação de acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2005): ZUI – zona utilizável inferior.

Tabela 02. Análise granulométrica – resíduos de britagem seco.

Amostra	Características do resíduo de britagem seco				Classificação*
	Módulo de finura	Dimensão máxima (mm)	Teor de pulverulento (%)	Massa específica (g/cm ³)	
A.M.1	3,02	4,75	10,80	2,71	ZUS
A.M.2	3,29	4,75	11,40	2,74	ZUS
A.M.3	2,67	4,75	15,45	-	ZO
A.M.4	3,00	6,3	10,65	-	ZUS
A.M.5	3,36	4,75	10,80	2,70	ZUS
A.M.6	3,58	6,3	10,45	-	SZUS
A.M.7	3,29	4,75	11,40	2,74	ZUS
Média	3,17	5,19	11,56	2,72	
Desvio-padrão	0,30	0,76	1,75	0,02	
Coefficiente de Variação (%)	9,4	14,6	15,1	0,7	

* Classificação de acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2005): ZUS – zona utilizável superior, ZO – zona ótima, SZUS – superior a zona utilizável superior.

3.2. Análise da viabilidade econômica

Verificou-se a quantidade de resíduos de britagem gerados pelas pedreiras e quanto deste volume está disponível no mercado para utilização na fabricação de concreto.

Foram executados levantamentos dos custos dos resíduos de britagem para as empresas que poderão utilizá-los como agregado miúdo, levando-se em consideração as distâncias de transporte e os procedimentos de recebimento que serão necessários para sua utilização.

3.3. Avaliação dos impactos ambientais

Foram executadas visitas nas pedreiras e minerações de areia natural, visando avaliar os impactos ambientais gerados na extração de agregados para concreto. Estudou-se a legislação ambiental pertinente com o intuito de estimular a utilização de resíduos de britagem como agregado miúdo para concretos.

No concreto no estado fresco foram executados ensaios de abatimento do tronco cone, de acordo com a norma NBR NM 67 (ABNT, 1998). Este ensaio serve para avaliar a consistência no concreto fresco sob determinado processo de adensamento.

Ainda no concreto em estado fresco, foram realizados ensaios para quantificar o teor de ar incorporado, de acordo com a norma NBR 9833 (ABNT, 1987), pois a introdução de ar incorporado em pequenos teores no concreto reduz a necessidade de um agregado fino, já que este funciona como agregado miúdo de baixo atrito superficial e de elevada elasticidade (NEVILLE, 1982).

Foram executados ensaios de massa específica do concreto no estado fresco, de acordo com a norma NBR 9833 (ABNT, 1987), para verificar o comportamento desta característica com a substituição de areia natural por resíduos de britagem. A massa específica do concreto em seu estado fresco interfere no seu transporte e no seu lançamento, e no dimensionamento das fôrmas e escoramentos que serão utilizados.

Nesta etapa também foram realizados ensaios de resistência à compressão no concreto, nas idades de 1 e 28 dias, de acordo com as normas NBR 5739 (ABNT, 1994) e NBR 5738 (ABNT, 2002).

Os procedimentos dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral e tração na flexão foram realizados de acordo com as normas NBR 7222 (ABNT, 1994), NBR 12142 (ABNT, 1991) e NBR 5738 (ABNT, 2002). A resistência à tração é uma propriedade influenciada pela textura, forma e porosidade dos agregados e também é importante para o dimensionamento das estruturas de concreto.

Os ensaios de determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica foram executados através do procedimento da norma NBR 9778 (ABNT, 2005) e NBR 5738 (ABNT, 2002).

A durabilidade do concreto é influenciada pela facilidade de percolação de fluidos, que é proporcional a sua permeabilidade e pode ser avaliada através do valor da absorção de água.

apresenta a relação entre o tamanho da amostra e a precisão dos resultados para diferentes níveis de significância.

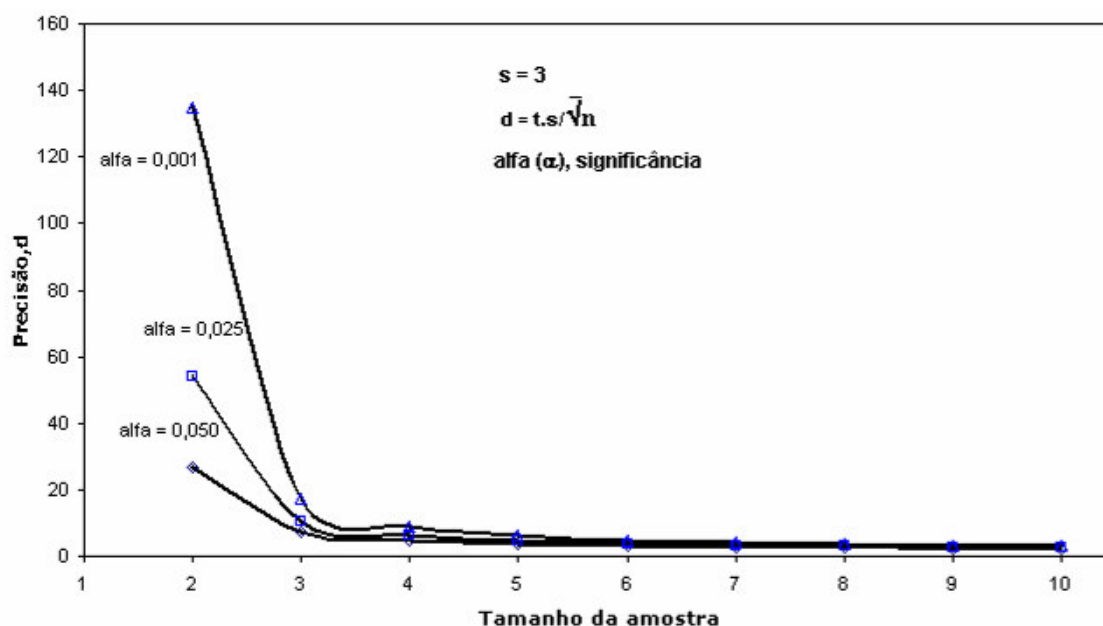


Figura 09. Curva da relação entre precisão e tamanho da amostra.

Com base na Figura 09, definiu-se o tamanho da amostra com 4 corpos-de-prova, pois a precisão dos resultados não melhora de maneira significativa com amostras de tamanho maiores.

Fase de avaliação do concreto proposto

Através dos resultados da fase anterior foram definidos os teores de substituição do agregado natural por resíduos de britagem, que foram utilizados nesta fase.

No quadro 09 estão apresentados os traços de concreto em massa, que foram utilizados nesta fase.

Quadro 09. Traços do concreto utilizados na fase de avaliação do concreto proposto.

Traço	Abatimento	Consumo cimento	Teor Pó (%)	Traço unitário						
				Cimento	Areia fina	P1	P2	Brita 9,5/25,0	Aditivo (%)	a/c
1 300 REF.	80	300	0	1	2,64			4,31	1,25%	0,45
2 300-P1-25	80	300	25	1	1,99	0,66		4,33	1,25%	0,45
3 300-P2-25	80	300	25	1	1,99		0,65	4,33	1,25%	0,45
4 365 REF.	80	365	0	1	2,08			3,39	1,71%	0,40
5 365-P1-25	80	365	25	1	1,57	0,52		3,40	1,71%	0,40
6 365-P2-38	80	365	38	1	1,30		0,80	3,42	1,71%	0,40

Para a escolha destes valores mínimos de resistência a compressão, foi considerada que a resistência à compressão com idade de 1 dia, necessárias, na indústria de pré-fabricados base, é de 12 MPa para peças em concreto armado e de 21 MPa em peças de concreto protendido.

Para que fosse levado em conta o desvio padrão da central de concreto e uma margem de segurança fosse estabelecida incrementou-se os valores mínimos de resistência em 3 MPa.

De acordo com Rodrigues e lemma (2005), o planejamento experimental pode ser determinado a partir das Equações (6) e (7), que correlacionam o tamanho da amostra com a precisão e níveis de significância desejados.

$$X = \bar{X} \pm d \quad (6)$$

$$d = \frac{t_{(n-1; \alpha/2)} \times s}{\sqrt{n}} \quad (7)$$

Sendo,

X = valor estimado por intervalo;

\bar{X} = valor médio;

d = precisão;

t = valor tabelado da distribuição ' t ' de Student;

s = desvio padrão;

n = tamanho da amostra;

α = significância.

O desvio-padrão de 3 MPa foi adotado devido a uma avaliação dos resultados correntes do controle de qualidade da central de concreto utilizada e também dos resultados verificados na fase exploratória do programa experimental. A Figura 9

pela NBR NM 67 (ABNT, 2002). Este ensaio serve para avaliar com que facilidade pode-se: homogeneizar, transportar, lançar, adensar e dar acabamento ao concreto fresco.

No Quadro 08 são apresentados os traços de concreto, em massa, que foram utilizados nesta fase.

Quadro 08. Traços iniciais de concreto da fase de avaliação da substituição.

Traço		Abatimento	Teor de Substituição (%)	Traço unitário						
				Cimento	Areia fina	P1*	P2*	Brita 9,5/25,0	Aditivo %	a/c**
1	Ref 300	80	0	1	2,64			4,31	1,25	0,45
2	Ref 365	80	0	1	2,08			3,39	1,71	0,40
3	300/15P1	80	15	1	2,25	0,40		4,32	1,25	0,45
4	300/15P2	80	15	1	2,25		0,40	4,32	1,25	0,45
5	300/30P1	80	30	1	1,86	0,80		4,32	1,25	0,45
6	300/30P2	80	30	1	1,86		0,80	4,32	1,25	0,45
7	300/45P1	80	45	1	1,46	1,20		4,32	1,25	0,45
8	300/45P2	80	45	1	1,46		1,20	4,32	1,25	0,45
9	300/60P1	80	60	1	1,07	1,60		4,32	1,25	0,45
10	300/60P2	80	60	1	1,07		1,60	4,32	1,25	0,45
11	365/15P1	80	15	1	1,77	0,31		3,40	1,71	0,40
12	365/15P2	80	15	1	1,77		0,31	3,40	1,71	0,40
13	365/30P1	80	30	1	1,46	0,63		3,40	1,71	0,40
14	365/30P2	80	30	1	1,46		0,63	3,40	1,71	0,40
15	365/45P1	80	45	1	1,15	0,94		3,42	1,71	0,40
16	365/45P2	80	45	1	1,15		0,94	3,42	1,71	0,40
17	365/60P1	80	60	1	0,84	1,26		3,43	1,71	0,40
18	365/60P2	80	60	1	0,84		1,26	3,43	1,71	0,40

P1* = resíduos de britagem seco

P2* = resíduo de britagem lavado

a/c** = relação água/cimento inicial

O valor da relação água/cimento foi alterado durante a mistura do concreto, em relação ao valor inicialmente proposto, devido à necessidade de se atingir o valor de consistência pré-determinado.

Para a escolha do teor de substituição de areia natural por resíduos de britagem, a ser proposto, foram realizados ensaios de resistência à compressão de acordo com as normas NBR 5739 (ABNT, 1994) e NBR 5738 (ABNT, 2002).

Os valores mínimos de resistência a compressão utilizados para escolha do teor de substituição, para a execução da fase de avaliação do concreto proposto, foi de 15 MPa para concretos utilizados em peças convencionais e de 24 MPa para concretos utilizados em peças protendidas.

Para cada traço foram moldados 12 corpos-de-prova, de dimensões 10 x 20 cm, de acordo com a NBR 5738. Após a moldagem, os corpos-de-prova permaneciam secando ao ar livre por aproximadamente 16 horas e, em seguida, os que não fossem rompidos, para idade de 1 dia, eram colocados em cura por imersão em água. Os corpos-de-prova eram tirados da cura por imersão 24 horas antes de serem rompidos.

Os 12 corpos-de-prova foram utilizados para a realização de ensaios de resistência a compressão e resistência à tração por compressão diametral, com idades de 01, 07 e 28 dias (02 corpos-de-prova para cada idade de ensaio). O valor considerado foi o da resistência potencial, ou seja, o resultado de maior valor encontrado entre os dois corpos-de-prova.

Fase de avaliação da substituição

Nesta fase houve uma alteração do tipo de cimento utilizado na indústria de pré-fabricados, para um CPV-ARI-RS, em decorrência de fatores econômicos e técnicos, e devido a isto foram desenvolvidos novos traços básicos de concreto com consumo de cimento de 300 e 365 kg/m³.

Através dos resultados obtidos na fase anterior foi definido que nesta fase os teores de substituição do agregado miúdo natural por resíduos de britagem de rocha variaria entre 15 a 60%, a cada 15%.

Esta fase serviu para a definição de qual teor de substituição da areia natural por resíduo de britagem será proposto para utilização nos dois traços de concreto utilizados na usina de pré-fabricação base.

As matérias-primas utilizadas nesta fase, exceto a brita 19 mm, foram separadas e armazenadas em um único dia. Os agregados miúdos foram armazenados em sacos plásticos, enquanto o cimento em saco foi armazenado sobre estrados de madeira em local arejado e coberto.

Como parâmetro de controle da mistura do concreto, foi utilizado o abatimento de 80 ± 20 mm, medida através do ensaio de abatimento do tronco cone, normalizado

A partir das matérias-primas e dos traços de concreto utilizados nesta indústria de pré-fabricados, chamados de traços de referência, desenvolveram-se traços com utilização de teores de substituição variando de 25 a 100%, a cada 25%, da areia natural por dois tipos de resíduos de britagem, o seco e o lavado.

No Quadro 07 são apresentados os traços de concreto produzidos em massa que foram utilizados nesta fase.

Quadro 07. Traços iniciais do concreto da fase exploratória.

Traço	Teor de Substituição (%)	Traço unitário							
		Cimento	Areia Fina	P1*	P2*	Brita 4,75/12,5	Aditivo %	a/c**	
1	Ref 320	0	1	2,42			3,95	1,17	0,45
2	Ref 400	0	1	1,85			3,02	1,25	0,40
3	320/25P1	25	1	1,82	0,61		3,96	1,17	0,45
4	320/25P2	25	1	1,82		0,61	3,96	1,17	0,45
5	320/50P1	50	1	1,22	1,22		3,98	1,17	0,45
6	320/50P2	50	1	1,22		1,22	3,98	1,17	0,45
7	320/75P1	75	1	0,61	1,83		3,98	1,17	0,45
8	320/75P2	75	1	0,61		1,83	3,98	1,17	0,45
9	320/100P1	100	1		2,47		4,02	1,17	0,45
10	320/100P2	100	1			2,47	4,02	1,17	0,45
11	400/25P1	25	1	1,38	0,46		3,00	1,25	0,40
12	400/25P2	25	1	1,38		0,46	3,00	1,25	0,40
13	400/50P1	50	1	0,92	0,92		3,00	1,25	0,40
14	400/50P2	50	1	0,92		0,92	3,00	1,25	0,40
15	400/75P1	75	1	0,46	1,38		3,00	1,25	0,40
16	400/75P2	75	1	0,46		1,38	3,00	1,25	0,40
17	400/100P1	100	1		1,86		3,03	1,25	0,40
18	400/100P2	100	1			1,86	3,03	1,25	0,40

P1* = resíduos de britagem seco

P2* = resíduo de britagem lavado

a/c** = Relação água/cimento inicial

Como parâmetro de controle da mistura do concreto foi utilizado a consistência de 80 ± 20 mm, medida através do ensaio de abatimento do tronco cone normalizado pela norma NBR NM 67 (ABNT, 2002). Por esta razão o valor da relação água/cimento foi corrigido durante a mistura do concreto, em relação a valor inicialmente proposto.

A correção da relação água/cimento foi executada durante a mistura do concreto, quando inicialmente não era colocada toda a água do traço e o restante da água somente era parcialmente colocada quando se executava o ensaio de abatimento do tronco cone e o valor do mesmo não atingia a consistência de 80 ± 20 mm.

3.1.2. Avaliação do desempenho do concreto

A verificação do desempenho dos concretos que utilizaram resíduos de britagem seco e lavado em substituição de parte do agregado miúdo foi feita em três fases.

A primeira fase, chamada de fase exploratória, consistiu na realização de ensaios preliminares de resistência à compressão e tração por compressão diametral em concretos com teores de substituição de areia natural por resíduos de britagem, variando de 0 a 100% a cada 25%.

A segunda fase, chamada de fase de avaliação da substituição, foi realizada com o intuito de estabelecer qual o teor de substituição de areia natural é mais vantajosa para os traços pesquisados em relação à trabalhabilidade e à resistência à compressão. O teor de substituição variou entre 0 a 60% a cada 15%.

Posteriormente, na terceira fase, definida como fase de avaliação do concreto proposto, foram realizados ensaios nos concretos com os teores de substituição escolhidos para se analisar propriedades como: teor de ar incorporado, resistência à tração por compressão diametral, resistência à tração na flexão, absorção de água e massa específica.

Todos os traços de concreto, que foram utilizados o programa experimental, foram nomeados em função do consumo de cimento por m^3 e pelo teor de substituição de areia natural por resíduos de britagem. O resíduo que não sofre lavagem durante a sua produção foi indicado como sendo P1 e o resíduo que sofreu lavagem foi indicado como P2.

Fase exploratória

Na indústria de pré-fabricação, que serviu de local para a realização do programa experimental, a resistência necessária para a desforma é de 12 MPa para as peças em concreto armado e de 21 MPa para as peças em concreto protendido. Os traços de concreto utilizados para cada tipo de peça possuem um consumo de cimento de $320 \text{ kg}/m^3$ e $400 \text{ kg}/m^3$, respectivamente e utilizam um cimento tipo CII-F-32.

classificação quanto à reatividade potencial do agregado com os álcalis. Expansões superiores a 0,20% aos 14 dias indicam que o agregado é reativo, enquanto que expansões entre 0,10% e 0,20% o agregado é classificado como potencialmente reativo, necessitando de ensaios complementares para decisão quanto ao seu uso. Expansões abaixo de 0,10% indicam que o agregado é inócuo.

O método consiste em preparar barras de argamassa utilizando-se um traço de 1:2,25 (cimento:agregado) com relação a/c fixa igual a 0,47. Após 24 horas, são desformadas e colocadas em um recipiente para cura em água, a qual é gradualmente aquecida desde a temperatura ambiente até atingir 80°C. As barras são conservadas nestas condições por 24 horas.

Após esse período de estabilização, as barras são removidas do recipiente de cura, e rapidamente medidas em seus comprimentos em sala climatizada ($23 \pm 2^\circ\text{C}$) para estabelecer a leitura inicial a 80°C. Cada medida, com precisão de 0,002 mm, deve ser feita em um período de 15 ± 5 segundos com o objetivo de não resfriar as barras de argamassa.

Após a leitura inicial, as barras são colocadas em cura em solução aquosa de NaOH $1 \pm 0,01$ N a $80^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$, sendo que são medidos seus comprimentos periodicamente por no mínimo 14 dias e calculadas suas expansões lineares. A metodologia estabelece que as expansões médias das barras de argamassa devem ser calculadas pelo menos por três idades intermediárias antes dos 14 dias de cura agressiva.

Segundo a ASTM C 1260 (2007), os resultados devem ser expressos pela média de leituras de 3 barras, sendo os valores individuais com aproximação de 0,001% e a média com aproximação de 0,01%.

Os cimentos empregados no programa experimental foram classificados segundo especificações normativas físicas e químicas das normas NBR 11578 (ABNT, 1991), NBR 5737 (ABNT, 1992) e NBR 5733 (ABNT, 1991).

O aditivo utilizado para as dosagens do concreto foi classificado de acordo com a norma NBR 11768 (ABNT, 1992).

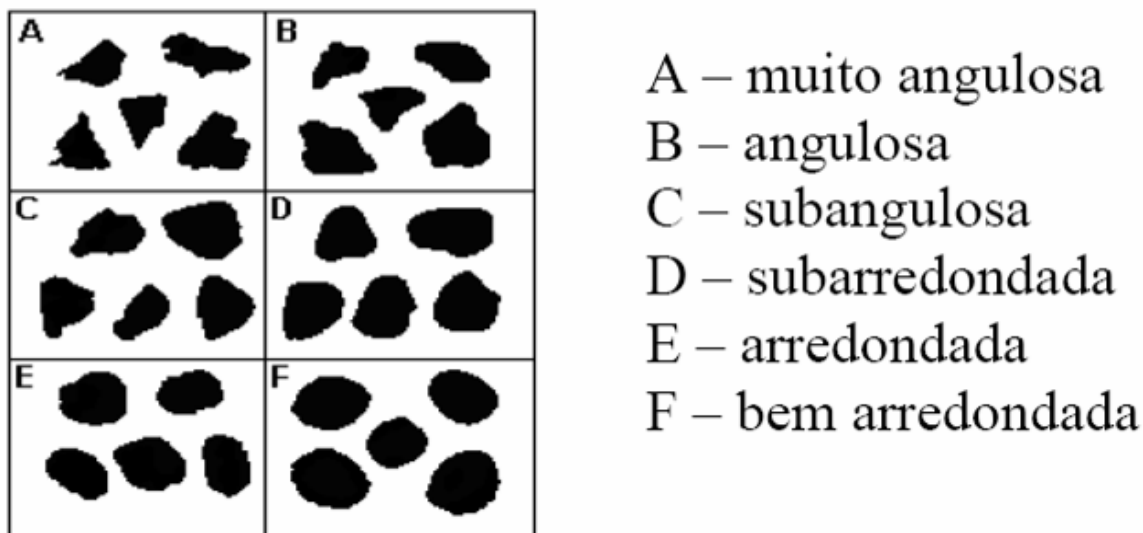


Figura 08. Classificação da forma dos grãos (Fonte: SILVA, BUEST e CAMPITELI, 2005).

Para verificar se alguma substância potencialmente reativa com os álcalis do cimento está presente nos agregados miúdos, foram realizadas análises petrográficas. Este procedimento de ensaio é normalizado pelas normas NBR 7389 (ABNT, 1992), NBR 15577-3 (ABNT, 2008) e ASTM C 295 (2003).

Para a avaliação da composição mineralógica da areia, primeiramente a amostra foi peneirada e separada em frações granulométricas. Observaram-se cada uma das frações em um microscópio estereoscópico para avaliação de sua mineralogia através da contagem simples de no mínimo 500 grãos, tendo sido a amostra previamente lavada para melhor observação microscópica.

A análise petrográfica do resíduo de britagem foi feita primeiramente ao microscópio estereoscópico, sendo complementada por observação de lâmina delgada ao microscópio óptico de luz transmitida.

Ainda para averiguação da possibilidade de reação entre os agregados miúdos e os álcalis do cimento, foram realizados ensaios de reatividade álcali-agregado em barras de argamassa, normalizado pela ASTM C 1260 (2007).

O método de ensaio ASTM C 1260 (2007) é utilizado para avaliar a potencialidade reativa de agregados frente a uma solução alcalina de hidróxido de sódio, através da medida das expansões dimensionais de barras de argamassa. A expansão média aos 14 dias de cura em solução alcalina é adotada como valor de referência para a

O ensaio de determinação da massa específica foi executado de acordo com a norma NBR 9778 (ABNT, 2005). Através dos resultados obtidos, foi possível calcular o valor da capacidade de absorção de água do agregado, ou seja, a quantidade de água que leva o agregado da condição de seco em estufa para a condição de saturado superfície seca (SSS).

Para o cálculo da massa específica aparente do agregado são considerados os poros permeáveis, enquanto que para a massa específica do agregado são excluídos os poros permeáveis.

Na condição SSS as partículas do agregado perdem a capacidade de absorção de água e de manter a superfície seca.

A massa específica do agregado saturado superfície seca (SSS) é a relação entre a massa das partículas e seu volume, quando as partículas do agregado culminam com a possibilidade de absorver água e preservar a sua superfície seca.

O valor da absorção de água nos agregados é necessário para a correção da quantidade de água nos traços de concreto. Neville (1992) afirma que a água presente nos poros permeáveis dos agregados não faz parte da água de amassamento da mistura.

Para a avaliação da forma e da textura superficial dos grãos foram executadas imagens digitais da fração retida na peneira nº 08 (2,36 mm) dos agregados miúdos. Para a definição do formato dos grãos usou-se a classificação proposta por SHEPARD e PAWERS *apud* Silva, Buest e Campiteli (2005), que estabelecem seis grupos de classificação da forma dos grãos, como mostra a Figura 08.

X_1 = proporção de material 1 na mistura granular;

X_2 = proporção de material 2 na mistura granular;

Os componentes utilizados no ensaio de compactação-vibração estão apresentados na Figura 06 e a configuração do ensaio está esquematizada na Figura 07.

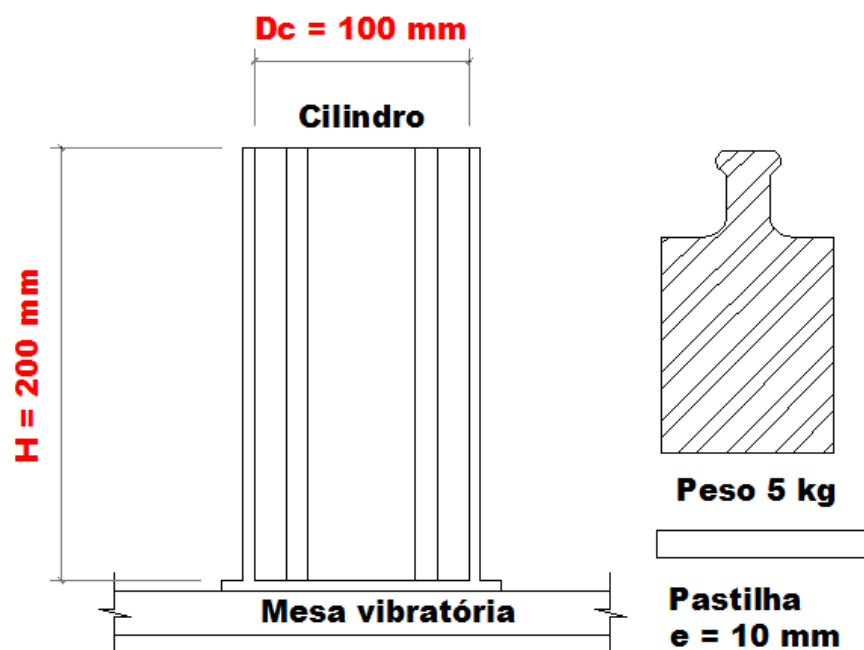


Figura 06. Componentes do ensaio de compactação-vibração.

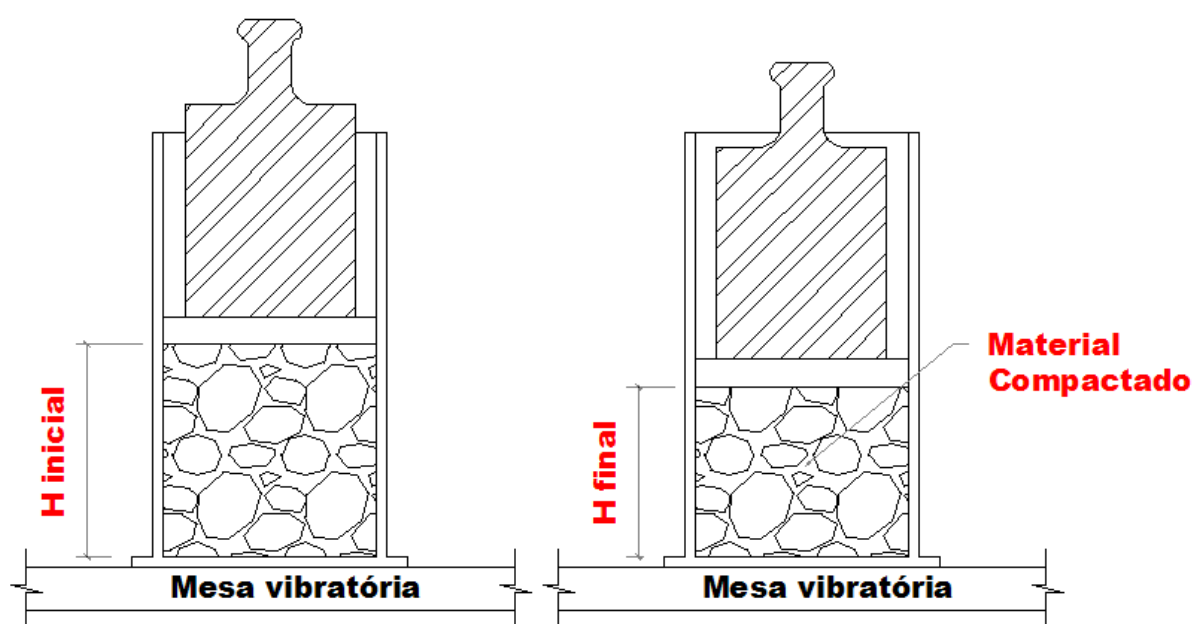


Figura 07. Configuração do ensaio de compactação-vibração.

- obter amostra de 3 kg do agregado por quartejamento;
- secar amostra em estufa;
- pesar 1 kg de material seco;
- colocar o material pesado em um cilindro de diâmetro de 100 ± 5 mm;
- colocar uma pastilha de 1 cm de espessura e um peso 5 kg sobre a amostra;
- aplicar uma vibração de 60 segundos, através de uma mesa vibratória com 1 motor de 1,5 CV e frequência de vibração de 70 ± 10 Hz;
- medir a altura final da amostra através de um paquímetro;
- calcular a compactidade do material através das equações (4) ou (5).

A Equação (4) fornece o valor da compactidade experimental da mistura para o protocolo de compactação descrito para o caso de um único material:

$$C = \frac{4M}{D_c^2 H m e_1 \pi} \quad (4)$$

No caso de uma mistura com dois materiais, utiliza-se a Equação (5):

$$C = \frac{4M}{D_c^2 H \pi \left[\frac{m e_1 \times m e_2}{m e_1 \times X_2 + m e_2 \times X_1} \right]} \quad (5)$$

Sendo,

M = massa do material seco (g);

$m e_1$ = massa específica do material 1 (g/cm³);

$m e_2$ = massa específica do material 2 (g/cm³);

D_c = diâmetro interno do cilindro (cm);

H = altura final da camada do material compactado (cm);

- pesar a amostra úmida;
- colocar a amostra em estufa até sua secagem;
- pesar a amostra seca;
- calcular a umidade da amostra ($h_{\%}$);
- calcular o valor da compacidade (C) através da Equação (2) ou (3).

No caso de um único material, utilizar à Equação (2):

$$C = \frac{1}{1 + me_1 \times h_{\%}} \quad (2)$$

No caso de uma mistura de dois materiais, utiliza-se a equação (3):

$$C = \frac{1}{1 + h_{\%} \left[\frac{me_1 \times me_2}{me_1 \times X_2 + me_2 \times X_1} \right]} \quad (3)$$

Sendo,

me_1 = massa específica do material 1 (g/cm^3);

me_2 = massa específica do material 2 (g/cm^3);

$h_{\%}$ = umidade da mistura granular (%);

X_1 = proporção de material 1 na mistura granular;

X_2 = proporção de material 2 na mistura granular.

O ensaio de compactação seca foi descrito por De Larrard e adaptado pelo laboratório de Estruturas da COPPE/UFRJ (Silva, 2004), no presente trabalho ajustou-se o método aos equipamentos e ferramentas existentes. A seguir é descrito o procedimento utilizado para a determinação da compacidade seca em materiais granulares.

O ensaio de compactação úmida foi proposto por Silva (2004) para uso em misturas granulares finas, com partículas menores que 100 μm . No presente trabalho ajustou-se o método para a utilização em agregados miúdos e para a utilização dos materiais disponíveis no laboratório utilizado.

A diferença entre o método proposto por Silva (2004) e o utilizado se constituiu em não se utilizar uma bateadeira industrial para homogeneização da mistura e a utilização de um protocolo de compactação para adensamento da mistura.

O procedimento utilizado para determinação da compactação úmida está descrito abaixo:

- obter amostra de 1 kg do agregado por quarteamento;
- colocar a amostra em uma bandeja e deixar secar naturalmente em condições ambiente;
- colocar aproximadamente 200 g do agregado em um recipiente de vidro, com diâmetro de 70 ± 5 mm e altura de 45 ± 5 mm;
- acrescentar uma pequena quantidade de água, homogeneizando manualmente a amostra;
- adensar a amostra através da compactação com 25 golpes de haste metálica de 340 ± 5 g de massa e superfície de compactação circular plana de 25 ± 5 mm de diâmetro;
- verificar a ocorrência de excesso de água através da visualização de água livre na superfície da amostra;
- no caso de não haver, continuar a colocação de pequenas quantidades de água com homogeneização na amostra e proceder novamente o seu adensamento;
- no caso de ocorrer um excesso de água livre na superfície da amostra, colocar material seco, homogeneizar e proceder novamente o adensamento da amostra;
- o final do ensaio é caracterizado quando, ao se acrescentar água, passar a existir uma tendência a apresentar uma pequena quantidade de água livre na superfície da amostra;

3. METODOLOGIA

A metodologia utilizada para o desenvolvimento da pesquisa consistiu em um programa experimental, que compreendeu a caracterização das matérias-primas utilizadas e a avaliação do desempenho de concretos que utilizam resíduos de britagem de rocha em substituição à areia natural, e na aplicação de um método qualitativo para analisar a viabilidade econômica e os impactos ambientais ocasionados pela substituição de agregados naturais por resíduos de britagem de rocha.

3.1. Programa Experimental

3.1.1. Caracterização dos materiais utilizados

As amostras dos agregados foram recolhidas de acordo com a NBR NM 26 (ABNT, 2001) ao longo de um período de 2 anos. O local da coleta dos resíduos de britagem foi o estoque da pedreira, tomando-se o cuidado para que sempre fossem coletados os resíduos que estavam sendo gerados naquele momento.

A areia natural e a brita foram coletadas no estoque da Baprel – Bahia Premoldados Estruturais Ltda, indústria que serviu de base para o programa experimental.

Realizaram-se ensaios de análise granulométrica, normalizados pelas normas NBR NM 248 (ABNT, 2003), NBR NM 46 (ABNT, 2003), NBR NM 52 (ABNT, 2003) e NBR NM 49 (ABNT, 2001), na areia natural, no resíduo de britagem seco, no resíduo de britagem lavado e na brita 19 mm.

Executaram-se os ensaios de granulometria dos agregados ao longo de um período de 2 anos, a fim de verificar a estabilidade das características dos agregados ao longo do tempo.

Foram executados ensaios de compacidade úmida (demanda de água) com o objetivo de determinar qual a quantidade (em massa) de água necessária para preencher todos os vazios em uma mistura granular.

vedação, de revestimento de paredes e tetos, e ainda para revestimento de pisos e contra-pisos.

Em Terra (2000), é descrito a evolução histórica da prática de utilização de materiais finos, oriundos de plantas de britagem como insumo alternativo à areia natural.

D'agostinho e Soares (2003), chegaram a conclusão que a areia resultante da britagem de rocha, os denominados finos de pedreira, é um material adequado para o preparo de argamassas e que sua utilização reduz parte dos problemas ambientais a partir do momento em que as pilhas estocadas destes resíduos se esgotem ou diminuam nas minerações produtoras de brita.

A utilização de resíduos de britagem em concreto também foi apresentada por Moura (2004), Bastos (2002), Neves (2001) e Almeida (2005), enquanto que Cunha (2005), Almeida e Silva (2005), Whitaker (2001) estudaram a utilização dos resíduos de britagem como matéria-prima para a produção de areias artificiais.

A caracterização dos resíduos de britagem de rocha em São Paulo foi estudado por Cuchierato (2000) e Lopes (2002).

Prudêncio; Coelho e Guststein (1998) sugeriram uma metodologia para a definição de uma composição granulométrica adequada para agregados miúdos artificiais, gerados a partir de resíduos de pó-de-pedra, para utilização em concretos estruturais e passível de utilização em escala industrial.

Utilização de resíduos industriais

A urbanização crescente, que tem causado a ocupação do entorno de pedreiras por habitações, e as restrições ambientais à utilização de várzeas e leitos de rios para extração de areia tem ocasionado uma escassez de agregados nos grandes centros urbanos. Uma alternativa para este problema é a utilização de resíduos industriais como agregados ou como matérias-primas para a produção de agregados.

Gonçalves (2000) estudou a utilização de resíduos do corte de granito como adição para concretos e concluiu que estes não apresentam riscos ambientais, que sua utilização como adição em concretos é tecnicamente viável tecnicamente, e que o teor de 10% de adição é que apresenta melhor desempenho.

A análise dos resultados obtidos por Moura (2000) permite concluir que a utilização de escória de cobre como adição no concreto proporciona melhora em seu desempenho. É possível concluir, ainda, que a utilização de escória de cobre como agregado miúdo, até 40% em volume, melhora o desempenho do concreto tanto no estado fresco como no estado endurecido.

Pinheiro (2003) concluiu que a utilização do resíduo do corte de pedra mineira como agregado no concreto e é tecnicamente viável, inclusive para estruturas e seu uso pode trazer para a comunidade local uma solução para um problema de impacto ambiental de potencial significativo.

Em pesquisa realizada por Afonso (2005) com resíduos de corte de rocha (RCR), os resultados mostraram que o RCR tem grande viabilidade quanto seu emprego em argamassas, pois além de ser uma solução ecologicamente correta, mostrou-se durável, com bom desempenho mecânico e ainda com menor custo de produção.

Silva (2006) avaliou o desempenho da escória de ferro cromo como agregado graúdo para concretos e chegou à conclusão que a utilização deste resíduo é viável e proporciona ganhos ambientais.

Os resultados obtidos por Viana (2007) em um programa experimental mostraram que três tipos de escória de fluxo de soldagem (EFS) podem substituir o agregado miúdo na produção de argamassas empregadas no assentamento de alvenaria de

Para a caracterização de um resíduo é preciso a identificação do processo produtivo ou atividade industrial da qual foi proveniente e de seus materiais constituintes. É feita também uma comparação destes constituintes com uma lista de resíduos e substâncias cujo impacto à saúde e ao meio ambiente é normalizada pela NBR 10004 (ABNT, 2004).

A classificação dos resíduos segundo a norma NBR 10004 (ABNT, 2004) é feita por meio dos resultados obtidos em ensaios de lixiviação e solubilização. A NBR 10005 (ABNT, 2004) normaliza o procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos, e a NBR 10006 (ABNT, 2004) o procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Já a NBR 10007 (ABNT, 2004) regula a amostragem de resíduos sólidos.

A classificação dos resíduos, de acordo com a NBR 10004 (ABNT, 2004), estabelece os seguintes tipos:

- **CLASSE I – PERIGOSOS:** são classificados como resíduos perigosos, aqueles que, em função de suas características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade, podem apresentar risco à saúde pública, provocando ou contribuindo para um aumento de mortalidade ou incidência de doenças e/ou apresentar efeitos adversos ao meio ambiente, quando manuseados ou dispostos de forma inadequada;
- **CLASSE II A - NÃO INERTES:** são classificados resíduos não inertes os resíduos sólidos ou mistura de resíduos sólidos que não se enquadram na Classe I – perigosos, ou na Classe II B - inertes. Estes resíduos podem ter propriedades tais como: combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade em água;
- **CLASSE II B - INERTES:** são classificados como resíduos inertes aqueles que, submetidos ao teste de solubilização, não tenham nenhum de seus constituintes solubilizados em concentrações superiores aos padrões definidos. Como exemplo destes materiais pode-se citar: rochas, tijolos, vidros e certos plásticos e borrachas que não são facilmente decompostos.

O carregamento das partículas sólidas para o leito dos rios ocasiona o assoreamento das calhas de escoamento, provocando enchentes, diminuição da navegabilidade, diminuição da luminosidade, causando prejuízos a biota aquática.

Na mineração os resíduos das operações de tratamento do minério são chamados de rejeitos, enquanto são denominados de estéreis todos os materiais extraídos sem valor econômico, a fim de permitir a lavra do bem mineral.

Um aspecto que permite avaliar os impactos gerados por uma mineração é o quociente entre a quantidade de estéril a ser removido e a quantidade de minério a ser extraído. Quando este valor é muito alto, como nas minerações de areia a seco, o problema de deposição dos rejeitos e dos estéreis são mais significativos.

Segundo D'Agostinho e Soares (2003), um dos maiores problemas das pedreiras é controlar a estabilização das pilhas de resíduos, pois quando sujeitas à ação dos ventos liberam material particulado, provocando poluição do ar que, em muitas vezes, se espalha por quilômetros de distância das pedreiras.

Estes impactos têm efeitos diretos na saúde humana e devem ser monitorados de forma sistemática, de modo que se estabeleça um controle sobre a qualidade do ar nas áreas habitadas afetadas.

As necessidades de supressão vegetal causam grandes impactos sobre a fauna e a flora pela alteração ou destruição do habitat natural.

Segundo Dias (2001), conseguir o aproveitamento integral da jazida, além de contribuir para a preservação do meio ambiente, é vantajoso do ponto de vista econômico.

Resíduos industriais

Resíduos industriais são todos os materiais resultantes de atividades industriais que não são considerados como produtos ou subprodutos, não gerando dividendos para a indústria. Todo resíduo, então, pode ser considerado como desperdício de matéria-prima e energia utilizada no processo produtivo.

desenvolvimento sustentável e a conservação do meio ambiente favorável para todas as formas de vida. A aprovação da regulamentação desta Lei Estadual se dá por meio do Decreto-Lei Nº 7.967 (BAHIA, 2001).

A preocupação com os resíduos da construção civil levou o Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) à criação da Resolução Nº 307 (BRASIL, 2002), que estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Essa resolução determina que o manuseio e destinação do resíduo seja responsabilidade dos geradores, os quais devem evitar sua geração, reutilizando e reciclando sempre que possível.

A Lei Federal Nº 9.605 de 12 de fevereiro de 1998, dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, estabelecendo as sanções criminais aplicáveis às atividades lesivas ao meio ambiente. Introduz também conceitos da responsabilidade criminal para condutas lesivas ao meio ambiente e da responsabilização criminal da pessoa jurídica. Esta lei prevê a desconsideração da pessoa jurídica para impedir, por exemplo, que quando a empresa decreta falência os danos ambientais não sejam ressarcidos.

Impactos ambientais na indústria da mineração de agregados

É de difícil aplicação a idéia de desenvolvimento sustentável na mineração, pois sendo os recursos minerais bens não-renováveis, as reservas são finitas e não podem ser utilizadas pelas gerações futuras.

No meio físico é onde ocorrem os maiores impactos do setor de extração mineral, podendo ser mencionados os impactos sobre as águas, que incluem aspectos sobre poluição das mesmas e da drenagem das minas, geração de rejeitos sólidos, impactos sobre a atmosfera e vibração do solo.

O principal problema sobre as águas devido à indústria da mineração é a presença de partículas sólidas. Estas partículas em suspensão são geradas pela ação das águas pluviais sobre superfícies desprotegidas das minas e sobre as pilhas de rejeitos ou de minerais armazenados sem as devidas precauções.

de governo para sua realização, dependendo das características e da abrangência espacial do empreendimento.

Ressalta-se que nesta Resolução o art. 2º, § 1º descreve que “Caberá ao órgão ambiental competente definir os critérios de exigibilidade, o detalhamento e as complementações, levando em consideração as especificidades, os riscos ambientais, o porte e outras características do empreendimento ou atividade”.

A mesma Resolução no art. 10, §1º define que o procedimento de licenciamento ambiental deverá constar da certidão da Prefeitura Municipal, declarando que o local e o tipo de atividade estão em conformidade com a legislação aplicável ao uso e ocupação do solo. E quando for o caso, é preciso constar também da autorização de supressão de vegetação e da outorga para o uso da água, emitidas pelos órgãos competentes.

Está incluída na competência de fiscalização do órgão ambiental a análise de projetos objetivando a preservação ou a recuperação de recursos ambientais afetados por processos de exploração predatórios ou poluidores.

Os critérios básicos, definições, responsabilidades e diretrizes gerais para o estabelecimento da avaliação dos impactos ambientais (AIA) são definidos na resolução do CONAMA Nº 001 (BRASIL, 1986).

Na Bahia o licenciamento ambiental está sob responsabilidade do Centro de Recursos Ambientais (CRA), autarquia criada no dia 31/03/83 pela lei delegada Nº 31(BAHIA, 1983), e do Conselho Estadual de Proteção Ambiental (CEPRAM), criado em 04/10/73 pela Lei Estadual Nº 3.163 (BAHIA, 1973), composto de representantes do Poder Público e da Sociedade Civil.

O objetivo principal da Resolução Nº 2.929 (BAHIA, 2002) do CEPRAM é constituir critérios e procedimentos para auxiliar no processo de Avaliação dos Impactos Ambientais para empreendimentos e atividades que causem ou possam causar expressiva deterioração do meio ambiente, como todas as outras atividades passíveis de estudos ambientais que venham se instalar no Estado da Bahia.

A instituição da Política Estadual de Administração dos Recursos Ambientais na Bahia é feita através da Lei Estadual Nº 7.799 (BAHIA, 2001) e visa garantir o

As alterações no meio ambiente provocadas pelos impactos ambientais podem ser em suas propriedades físicas, químicas ou biológicas. E afetam o bem estar da população residente no local, bem como sua saúde e segurança.

Como meio de diminuir os impactos ambientais negativos é necessário que todas as atividades humanas que potencialmente alteram o meio ambiente sejam disciplinadas por legislações. Antes do início destas atividades é preciso que seja feito o licenciamento ambiental.

O licenciamento ambiental é um processo administrativo em que o órgão ambiental estabelece regras, condições, restrições e medidas de controle ambiental a serem seguidas por uma empresa. Entre as principais características avaliadas no processo podemos ressaltar: o potencial de geração de líquidos poluentes (despejos e efluentes), resíduos sólidos, emissões atmosféricas, ruídos e o potencial de riscos de explosões e de incêndios.

O processo de licenciamento ambiental é constituído de três tipos de licenças. Cada uma é exigida em uma etapa do licenciamento, a saber:

- licença prévia (LP);
- licença de instalação (LI);
- licença de operação (LO).

A Lei Nº 7.804 (BRASIL, 1990) que alterou a Lei Nº 6.938 (BRASIL, 1981), estabeleceu que é de competência do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) o licenciamento de atividades e obras com significativo impacto ambiental, de âmbito nacional ou regional.

As licenças ambientais estão estabelecidas no Decreto Nº 99.274 (BRASIL, 1990), que regulamenta a Lei Nº 6.938 (BRASIL, 1981), e são detalhadas na Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) Nº 237 (BRASIL, 1997).

Esta resolução definiu como impacto ambiental regional todo e qualquer impacto ambiental que afete diretamente, no todo ou em parte, o território de dois ou mais Estados. Estabeleceu também os princípios para a descentralização do licenciamento ambiental e esclareceu as competências correspondentes aos níveis

De acordo com Moura (2004), é necessária a realização de estudos nos resíduos gerados na britagem de rochas para a produção de agregados graúdos quando estes forem utilizados em argamassas e concretos, analisando desde as propriedades físicas das partículas, até o seu efeito sobre as propriedades mecânicas e de durabilidade da argamassa e do concreto.

Cassa e Carneiro (1998) alertam que a elevação da resistência dos concretos obriga a uma seleção mais rigorosa dos agregados, independentemente de serem naturais ou resíduos industriais, pois estes agregados podem ser fatores limitantes.

Cuchierato, Sbrighi Neto e Quitete (2005) ressaltam que é de importância crucial o conhecimento da natureza petrográfica dos resíduos e de seu estado de alteração para que a avaliação técnica possa ser feita de forma completa.

Bastos (2002) conclui que o teor de material pulverulento existente nos resíduos de britagem tem de ser controlado, pois variações interferem na granulometria da dosagem, acarretando perda de abatimento e variação na relação água/cimento.

Pesquisas na Universidade do Texas (EUA) tem demonstrado que pode ser obtido concreto com ótima qualidade usando resíduos de britagem de rocha, mesmo quando existirem teores de material pulverulento acima dos limites considerados aceitáveis (ICAR, 2004).

Silva, Buest e Campiteli (2005) chegaram à conclusão de que em argamassas de revestimento a substituição de areia natural por areia britada é benéfica quando se leva em consideração as resistências à compressão e à tração na flexão, devido ao melhor grau de empacotamento da mistura.

2.7. Impactos ambientais

A NBR ISO 14001 (ABNT, 2004) define impacto ambiental como qualquer alteração do meio ambiente, benéfica ou adversa, que seja resultante, em parte ou no todo, de produtos ou serviços da atividade humana.

Em Salvador, até 2007, em geral, os agregados britados, de diâmetro máximo de 25, 19 e 9,5 mm, eram lavados para a diminuição da quantidade de material pulverulento. Após a britagem observam-se três tipos de resíduos: o resíduo de britagem seco, com teor de material pulverulento em torno de 12%, o resíduo de britagem lavado, que é chamado de areia de brita e possui um teor de material pulverulento variando de 2 a 5%, e o resíduo da lavagem que é chamado de fíler de brita e possui um teor de material pulverulento de até 35%.

Após 2007 foi proibida a lavagem dos agregados pelo órgão fiscalizador ambiental, Centro Recursos Ambientais da Bahia (CRA), sendo feito somente o peneiramento.

A Figura 05 apresenta um exemplo de fluxograma de produção de pedras britadas, obtido a partir do processo de britagem da Pedreiras Valéria (Salvador, Bahia).

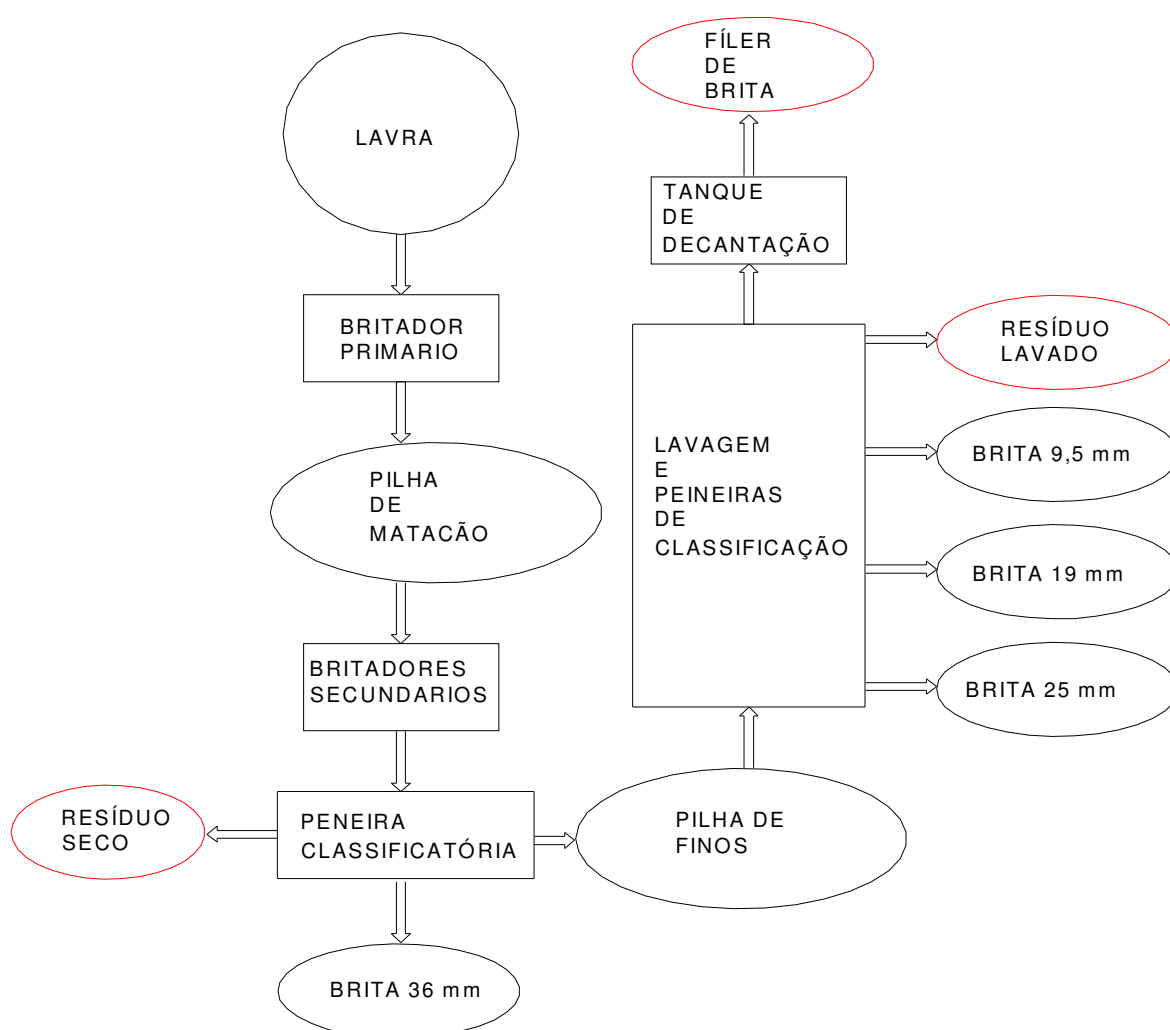


Figura 05. Fluxograma de produção de pedras britadas em Salvador em 2007.

Para os elementos protendidos por pré-tração, a NBR 9062 (ABNT, 2006) especifica uma resistência mínima de 21 MPa para a liberação dos mesmos. Já para o transporte e montagem de peças pré-fabricadas é aconselhável que o concreto tenha pelo menos 7 dias de idade.

A necessidade de uma resistência alta nas primeiras idades é a razão pela qual as indústrias de pré-fabricados utilizam cimento do tipo CPV ARI (alta resistência inicial) e baixas relações água/cimento. Estes parâmetros induzem a necessidade imprescindível de um processo de cura eficiente.

2.6. Indústria da mineração de agregados

A indústria da mineração de agregados para construção civil pode ser dividida em dois setores produtivos. O setor dos agregados miúdos ou as areias, que em 2005 produziu 187 milhões de toneladas e o setor dos agregados graúdos ou as britas, que produziu 128,7 milhões de toneladas em 2005 (VALVERDE, 2005).

De acordo com Valverde (2005), no Brasil, 70% das areias são extraídas de leito de rios e o restante nas várzeas, depósitos lacustres, mantos de decomposição de rochas, arenitos e pegmatitos decompostos.

Já as indústrias de mineração de rocha para produção de agregados graúdos, designadas como pedreiras, se utilizam de um processo de redução do tamanho da rocha chamado de britagem. De acordo com Buttler (2003) existem quatro maneiras básicas de britar uma rocha: através de impacto, atrito, clivagem (punção) ou compressão.

Durante o processo de britagem da rocha, para produção de agregado graúdo, é gerado um resíduo chamado de finos de britagem. Normalmente a quantidade gerada corresponde a aproximadamente 20% do volume do produto final (PRUDÊNCIO, 1998).

Os resíduos da britagem de rochas apresentam características próprias, a depender do tipo de processo de fragmentação, do tipo e estado da rocha, bem como dos parâmetros de operação dos equipamentos de britagem (TERRA, 2000).

retirada de atividades do canteiro, da redução de prazos e facilidade no atendimento de normas de segurança.

Peculiaridades do setor

Nas estruturas pré-fabricadas ocorre situações transitórias que são ocasionadas pela necessidade de desmoldagem, transporte, montagem e realização das ligações da estrutura antes da mesma entrar em sua configuração de serviço.

El Debs (2000) considera que é necessária a verificação, durante a fase de projeto das estruturas pré-fabricadas, das situações transitórias, pois a resistência mecânica do concreto ainda não atingiu o valor da resistência característica especificada no projeto e ocorrem esforços solicitantes diferentes daqueles presentes na configuração final de uso das estruturas.

Na fase de desmoldagem das peças, aparecem tensões mecânicas nas primeiras idades das peças pré-fabricadas. É necessário que a desmoldagem ocorra o mais rápido possível, para que o ciclo de produção tenha menos de 24 horas de duração, devido à necessidade da otimização da utilização das fôrmas, de modo que não seja necessária a execução de novas baterias de fôrmas, o que acarretariam em maiores custos.

Na fase de transporte das peças pré-fabricadas, das usinas até o local de implantação, ocorrem tensões mecânicas diferentes, oriundas de forças dinâmicas, em idades inferiores a da especificação para 28 dias.

Então, o desempenho das peças pré-fabricadas de concreto é definido em função das tensões que surgem nas fases transitórias de desmoldagem e transporte. Os concretos utilizados em usinas de pré-fabricados são dosados tendo como resistência mecânica característica não só o valor com 28 dias, mas também do valor da resistência mecânica nas primeiras idades.

De acordo com El Debs (2000) normalmente para a desmoldagem das peças de concreto armado é necessário que se atinja uma resistência à compressão referente à metade da resistência característica de projeto ou de no mínimo de 10 MPa.

este fim, que se enquadram e atendam a requisitos mínimos de qualidade e controle especificados na referida norma. Os requisitos mínimos especificados na norma são:

- uso de mão-de-obra treinada;
- qualificação prévia da matéria-prima e avaliação de desempenho através de inspeções e ensaios de recebimento;
- processos de controle de qualidade permanentes e documentados;
- estrutura permanente para execução de ensaios e inspeções (laboratório);
- processo de cura controlado;
- desvio padrão máximo de 3,5 MPa nos concretos;
- uso de ferramentas e equipamentos industriais;
- produtos em conformidade com normas e especificações.

De acordo com El Debs (2000), a tendência atual das unidades de pré-fabricação é de utilizar concretos com resistência à compressão entre 40 e 70 MPa. Esta tendência obriga a utilização de concretos com alto consumo de cimento e que necessitam de um rigoroso controle de qualidade.

Vantagens

Existem vantagens no uso de pré-fabricados na construção, como o aumento da produtividade, redução dos desperdícios e racionalização dos processos.

O aumento da produtividade ocorre devido ao uso de processos controlados, a não ocorrência de improvisações e a melhoria das condições de trabalho. Já a redução de desperdícios acontece pelo maior reaproveitamento dos materiais, redução do número de acidentes do trabalho, melhor aproveitamento das seções resistentes e eliminação de retrabalhos.

A racionalização dos processos é conseqüência da facilidade de controle de qualidade, da eliminação das interrupções na concretagem, da melhoria na qualidade do produto final, da redução da utilização de fôrmas e escoramentos, da

O Quadro 06 apresenta as ações de mitigação adequadas para o uso de agregados potencialmente reativos em concretos.

Quadro 06. Medidas de mitigação para precaução da RAA.

Intensidade da ação preventiva	Medidas de mitigação
Mínima	1) Limitar o teor de álcalis do concreto a valores menores que 3,0 kg/m ³ de Na ₂ O equivalente. 2) Utilizar cimentos CP II-E ou CP II-Z ou CP III ou CP IV. 3) Usar uma das medidas de mitigação previstas na ação preventiva de intensidade moderada.
Moderada	1) Limitar o teor de álcalis do concreto a valores menores que 2,4 kg/m ³ de Na ₂ O equivalente. 2) Utilizar cimento CP III, com no mínimo 60% de escória. 3) Utilizar cimento CP IV, com no mínimo 30% de pozolana. 4) Usar uma das medidas de mitigação previstas na ação preventiva de intensidade forte.
Forte	1) Utilizar materiais inibidores de RAA, comprovando a mitigação da reatividade através do ensaio de previsto em NBR 15577-5 (ABNT, 2008) ou do ensaio previsto na NBR 15577-6 (ABNT, 2008). 2) Substituir o agregado em estudo.
a) Aceita-se considerar o aporte de álcalis trazido ao concreto pelo cimento, na ausência de ensaios de todos os componentes do concreto. b) Na ₂ O equivalente = 0,658 K ₂ O + Na ₂ O	

Fonte: Adaptado da NBR 15577-1 (ABNT, 2008)

2.5. Estruturas pré-fabricadas de concreto

Segundo Sabbatini (1989), a industrialização do setor da construção civil é um processo evolutivo que, através da implantação de inovações tecnológicas, de métodos de trabalho e técnicas de planejamento e controle, tem como finalidade incrementar a produtividade e melhorar o desempenho da atividade construtiva.

A pré-fabricação de estruturas de concreto é um dos possíveis meios para incrementar os níveis de industrialização do setor da construção civil, pois a eficiência de seu processo de produção é função do cumprimento de tarefas adequadamente planejadas, com redução no consumo de materiais e mão-de-obra, aumento de produtividade e ganho de qualidade.

A NBR 9062 (ABNT, 2006) define elemento pré-fabricado de concreto como aquele executado industrialmente, em instalações permanentes de empresa destinada para

Quadro 05. Classificação da ação preventiva em função do tipo de estrutura ou elemento de concreto e das condições de exposição.

Classificação da ação preventiva			
Dimensões e condições de exposição dos elementos estruturais de concreto	Estruturas provisórias ^{a)}	Estruturas ou elementos estruturais correntes ^{b)}	Estruturas especiais ^{c)}
Não maciço e seco ^{d) e)}	Desnecessária	Desnecessária	Mínima
Maciço e seco ^{d) e) f)}	Desnecessária	Moderada	Forte
Não maciço e exposto à umidade ou em contato com água ^{d) e)}	Desnecessária	Forte	Forte
Maciço e em contato com água ^{d) g)}	Mínima	Forte	Forte

a) Estruturas provisórias são aquelas com curto período de vida útil de projeto.
b) Estruturas correntes são consideradas as construções prediais, residenciais, industriais em geral.
c) Estruturas especiais são as que possuem vida útil de projeto elevada, com grande responsabilidade estrutural, cuja ruína pode acarretar danos expressivos, grande número de perdas de vida ou dificultar o socorro a vítimas.
d) Elemento maciço é aquele cuja menor dimensão da seção transversal é maior ou igual a 1 m.
e) Considera-se que o ambiente seco corresponde à ausência permanente de umidade em contato com o concreto da estrutura. Os elementos estruturais enterrados são considerados úmidos. Elementos estruturais revestidos não enterrados são considerados protegidos da umidade.
f) A RAA pode ocorrer em elementos maciços em ambientes secos, uma vez que pode existir umidade relativa interna suficiente para o desenvolvimento da reação.
g) Elemento maciço em contato com água diretamente ou umidade proveniente do solo ou de rochas.

Fonte: adaptado da NBR 15577-1 (ABNT, 2008).

O emprego de inibidores de RAA, adições minerais como a sílica ativa e o metacaulim têm a finalidade de diminuir a permeabilidade do concreto e de fixar o hidróxido de cálcio resultante das reações de hidratação do concreto.

Algumas outras recomendações podem ser adotadas para se aumentar a durabilidade dos concretos frente à RAA, tais como: a utilização de processos de cura mais eficientes, o uso de baixas relações água/cimento, a fim de diminuir a porosidade da pasta, e o tratamento superficial em concretos expostos a ambientes agressivos.

A RAA é causadora de degradação em estruturas localizadas em ambientes cuja umidade é intensa, tais como barragens, fundações e pilares de pontes e estruturas marinhas. De acordo com Pinheiro (2003), a intensidade do processo da reação e a magnitude das deformações estão sujeitos a fatores variados, sendo os mais importantes: a quantidade e características físicas e mineralógicas dos agregados, os níveis de álcalis disponíveis no concreto provenientes ou não do cimento, a temperatura ambiente, a disponibilidade de umidade, a permeabilidade da pasta de cimento hidratada, pois ela controla os mecanismo de transporte da água e dos íons envolvidos na reação e também o deslocamento do gel de sílica, e a presença de adições minerais.

Segundo a NBR 15577-1 (ABNT, 2008), a determinação do nível de precaução e a adoção de medidas para mitigação da RAA dependem da realização de uma análise de risco do comprometimento da vida útil do elemento de concreto.

Os fatores que devem ser considerados para estabelecer o grau de risco do comprometimento do desempenho dos elementos, além da composição química do concreto, são:

- as condições de exposição da estrutura ou elemento de concreto;
- as dimensões da estrutura ou elemento de concreto;
- a responsabilidade estrutural.

Caso a avaliação do agregado indique potencialidade reativa e a estrutura ou elemento de concreto tenha possibilidade da manifestação patológica da RAA, o agregado pode ser utilizado desde que sejam tomadas ações preventivas de mitigação da RAA. O Quadro 05 apresenta a classificação das ações preventivas necessárias para a mitigação da RAA em função das condições de exposição e do tipo de estrutura ou elemento de concreto.

A ação preventiva desnecessária (Quadro 05) significa que a utilização do agregado pode ser feita sem a avaliação de sua potencialidade reativa. Os demais níveis de ação preventiva indicam a necessidade da avaliação da potencialidade reativa do agregado.

Reação Álcali-agregado

A reação álcali-agregado (RAA) é uma reação química envolvendo hidróxidos alcalinos derivados geralmente dos álcalis de sódio e potássio do cimento Portland e de certos elementos mineralógicos que podem estar presentes nos agregados. Os principais sintomas decorrentes da RAA são: fissuras nas proximidades da superfície dos agregados graúdos, presença de fase C-S-H exsudado ou preenchendo vazios do concreto, fissuração com característica poligonal na superfície da estrutura (PINHEIRO, 2003).

Quando os agregados reativos são à base de sílica a RAA é chamada de reação álcali-sílica (RAS) e quando os mesmos são de base de carbonatos a RAA é chamada de reação álcali-carbonato (RAC).

De acordo com Figueirôa e Andrade (2007) existem dois tipos de RAS:

- a reação álcali-sílica que se processa com uma velocidade maior e ocorre quando as fases reativas do agregado são: sílica amorfa, vidros vulcânicos ou artificiais;
- a reação álcali-silicatos que ocorre mais lentamente e cujas fases reativas dos agregados são: silicatos existentes nos feldspatos, folhelhos, argilas grauvacas, quartzitos, granitos e, principalmente, nos quartzos tensionados.

Um dos produtos formados na RAS é um gel higroscópico expansivo, cuja composição química inclui sílica, álcalis e ocasionalmente uma pequena quantidade de cálcio. O gel absorve água e tem como consequência a tendência ao aumento de volume. Como o gel é confinado pela pasta de cimento hidratada, a resultante é uma pressão interna que ocasiona expansão, fissuração e desagregação da pasta de cimento.

Para que aconteça o desencadeamento nocivo da RAA é necessária a ocorrência de três componentes básicos nas estruturas ou elementos de concreto: a presença do mineral reativo nos agregados, a existência álcalis livres no concreto provenientes ou não do cimento e umidade em quantidade suficiente.

Durabilidade do concreto

O concreto é definido como durável quando seu desempenho, para o qual foi especificado, se mantém adequado quando exposto ao intemperismo, desgaste e a qualquer outro processo de deterioração no meio ambiente de trabalho.

A deterioração do concreto é consequência de fatores químicos, físicos, ações mecânicas, biológicas ou de combinação destes fatores atuando simultaneamente, sendo que a velocidade com que alguns destes fatores deterioram o concreto é diretamente ligada aos mecanismos de transporte de fluidos para o interior da massa através da rede de poros da microestrutura do concreto.

O processo de deterioração do concreto também é função do meio ambiente em que a estrutura está inserida, da qualidade e do proporcionamento das matérias-primas utilizadas.

É possível melhorar a durabilidade do concreto através de algumas medidas preventivas que alterem suas características, tais como diminuição da permeabilidade superficial, diminuição dos álcalis disponíveis, aumento do recobrimento das armaduras no concreto armado, entre outras.

Entre os produtos resultantes da hidratação do cimento, o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) é o mais solúvel em água e, portanto, mais susceptível à dissolução. Quando se inicia o processo de hidrólise do hidróxido de cálcio pela água, a mesma continua até que a maior parte deste tenha sido lixiviado.

A dissolução do hidróxido de cálcio também pode ocorrer pela reação com sais ou ácidos provenientes do meio ambiente. Normalmente os compostos originados são ainda mais solúveis a água e, portanto, mais susceptíveis à lixiviação.

A lixiviação do hidróxido de cálcio aumenta a porosidade da pasta de cimento, tornado o concreto mais propenso à penetração de substâncias deletérias, expondo outros compostos cimentícios à decomposição química. (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Sendo a porosidade do concreto causada pelo excesso de água na pasta de cimento, é de se concluir que quanto maior a quantidade de argamassa no concreto, maior a porosidade do mesmo e menor a sua durabilidade.

Após o endurecimento do concreto existe água retida no interior da pasta de cimento em quatro estados:

- água quimicamente combinada ao cimento, que é parte integrante dos compostos hidratados, e não pode ser perdida por evaporação; corresponde aproximadamente de 22 a 32% da massa do cimento (HELENE, 1979);
- água adsorvida que está localizada na superfície das partículas do fase C-S-H de cimento sob a ação de forças de atração exercidas pela superfície sólida, corresponde de 15 a 25% da massa do cimento (HELENE, 1979), sendo a principal responsável pela retração da pasta de cimento (MEHTA; MONTEIRO, 2008);
- água capilar que se localiza nos vazios do concreto, evaporável a temperatura ambiente. Pode ser dividida em duas categorias: a que está nos vazios de diâmetro maior que 50 nm (0,05 μm) e não causa nenhuma variação de volume com a sua remoção, a qual pode ser considerada água livre e a água que está retida em vazios capilares pequenos, diâmetro entre 5 e 50 nm, cuja remoção pode provocar retração na pasta de cimento (MEHTA; MONTEIRO, 2008);
- água interlamelar, localizada entre camadas de partículas do fase C-S-H de cimento hidratado; está fortemente ligada ao composto por pontes de hidrogênio. Somente pode ser perdida por uma secagem intensa, o que ocasiona uma retração considerável no composto hidratado.

A compacidade de um concreto indica o grau de adensamento de sua massa e é inversamente proporcional a sua quantidade de vazios, ou seja, ao número de poros existentes superficialmente e internamente na massa do concreto.

A resistência mecânica do concreto é diretamente proporcional a sua compacidade. Enquanto que a permeabilidade superficial do concreto é proporcional a quantidade de poros superficiais e a rede de poros intercomunicáveis da massa do concreto endurecido.

A Equação (1) proposta por Duff Abrams em 1919 (NEVILLE, 1982) estima à resistência mecânica a partir da relação entre a quantidade de água e a quantidade de cimento, em massa.

$$f_c = \frac{K_1}{K_2^{a/c}} \quad (1)$$

Sendo:

f_c = resistência à compressão do concreto (MPa);

a/c = relação água/cimento da mistura, em massa;

K_1 e K_2 = constantes empíricas, que dependem da idade e dos materiais utilizados no concreto.

A curva entre a relação a/c e a resistência do concreto passou a ser denominada de curva de Abrams e a Equação (1) denominada de “Lei de Abrams”.

Além da relação água/cimento, outros fatores relativos aos agregados são relacionados por Mehta e Monteiro (2008) como modificadores das resistências mecânicas dos concretos, entre os quais, as dimensões, a forma, a textura superficial e a proporção volumétrica em relação ao consumo de cimento.

A mineralogia dos grãos dos agregados influencia as características da zona de transição entre a pasta de cimento e os mesmos e, portanto, também interferem na resistência mecânica do concreto.

Permeabilidade, porosidade e compactidade

O concreto é um material poroso que possui uma rede de vasos capilares que proporcionam a passagem de água sob pressão através da massa do concreto. Esta propriedade é denominada de permeabilidade, sendo de difícil quantificação, pois varia com o tempo, o tipo de água, a idade do concreto, dentre outras condições.

Considerando o concreto plenamente adensado, a sua permeabilidade depende da porosidade capilar, principalmente na pasta de cimento e na zona de transição.

A desvantagem do ar incorporado é que, se com o aumento do seu teor não houver uma redução do consumo de água no concreto, a resistência mecânica do mesmo diminui proporcionalmente.

Segundo Martin (2005), a quantidade de ar incorporado nos concretos aumenta quando se incrementa a quantidade de agregados miúdos, principalmente aqueles que possuem grãos de dimensão compreendidos entre 0,2 e 0,8 mm.

Existem dois métodos normalizados de se quantificar o teor de ar incorporado no concreto, sendo um gravimétrico, especificado pela NBR 9833 (ABNT, 1987), e outro pressométrico, normalizado pela NBR NM 47 (ABNT, 2002).

A desvantagem da utilização do método pressométrico é a necessidade do aparelho medidor de ar incorporado, enquanto que no método gravimétrico a desvantagem está em ter de se usar o valor da massa específica teórica, totalmente compactada, como parâmetro para o cálculo do teor de ar incorporado.

Resistência mecânica

A aplicação do concreto como material de constituição em elementos estruturais se dá principalmente pela sua capacidade, após o endurecimento, de resistir às tensões mecânicas provenientes de esforços externos.

A resistência à compressão é a propriedade do concreto usada para qualificá-lo, pois é sensível a qualquer variação de uniformidade, natureza e proporcionamento dos materiais constituintes (HELENE; TERZIAN, 1993).

Um dos principais fatores que influenciam a resistência mecânica do concreto é a relação entre a quantidade de água e de cimento colocada na mistura. Toda a água colocada no concreto, que não reage quimicamente com o cimento, pode se transformar em vazios após o endurecimento. Estes espaços tornam o concreto mais poroso, diminuindo a resistência e a durabilidade. Logo, a relação entre a quantidade de água e de cimento nos concretos é inversamente proporcional a sua resistência mecânica.

A trabalhabilidade, portanto, é o resultado da compatibilização de propriedades intrínsecas, como a consistência, a mobilidade e a coesão, fatores externos e condições de mistura, transporte, lançamento e adensamento do concreto.

Para que o concreto tenha qualidade satisfatória, é necessário que a sua massa permaneça homogênea durante o processo de adensamento e endurecimento. Sendo que esta homogeneidade é conseguida através de uma dosagem adequada dos materiais constituintes do concreto, com equilíbrio entre teor de água e os demais materiais secos.

O fenômeno de perda de homogeneidade do concreto é conhecido como segregação, e equivale à separação dos seus constituintes antes do endurecimento, em decorrência de uma deficiência na argamassa, que não fornece coesão à massa de concreto, ou devido a um procedimento executivo ineficiente de transporte, lançamento ou adensamento do concreto.

Pode-se definir exsudação como a segregação da água na massa de concreto, em que parte da água da mistura tende a subir para superfície do concreto devido à incapacidade dos materiais sólidos constituintes em fixar toda a água no interior da mistura. Este fato é decorrente principalmente do excesso de água, do reduzido teor de materiais finos na mistura ou do excesso de vibração.

Deve-se evitar a exsudação no concreto porque a concentração da água na sua superfície torna o mesmo poroso e frágil, além de prejudicar a aderência da pasta aos grãos dos agregados e aumentar a permeabilidade do concreto.

Ar incorporado

O ar incorporado substitui parte do agregado miúdo com as seguintes vantagens: possui melhor coeficiente de forma, é elástico e movimenta-se sem atrito, diminuem a porcentagem de vazios acidentais e irregulares, aumenta a coesão, diminui a exsudação, impede a sedimentação e obtura a passagem de água, diminuindo os vazios capilares.

As adições minerais mais utilizadas no concreto podem ser classificadas como:

- classe F: aquelas que possuem atividade pozolânica (sílica ativa, cinza de casca de arroz, cinza volante);
- classe C: as que possuem atividade cimentante (escória de alto-forno, cinza volante);
- inertes: as que não possuem atividade química, que são os fíleres, e produzem efeitos físicos dentro do concreto (material carbonático, pó de quartzo, pó de pedra, entre outros).

Trabalhabilidade

A trabalhabilidade é um conceito subjetivo, variando significativamente de uma aplicação para outra, e pode ser definida como a facilidade de transportar, lançar e adensar o concreto fresco sem que o mesmo perca a homogeneidade e deixe espaços vazios nas fôrmas.

Fatores externos à massa de concreto, como densidade de armadura e as dimensões das peças, são fundamentais para a definição se um concreto é trabalhável, podendo definir que um mesmo concreto é adequado para uma situação e totalmente inadequado para outra.

Uma das propriedades que interfere na trabalhabilidade do concreto é sua consistência que, por sua vez, é resultante da ação de forças internas como coesão e ângulo de atrito que dificultam a mudança da forma da massa do concreto sob ação de forças externas.

Fatores que interferem na consistência do concreto são: a dimensão máxima característica, a forma e a textura do agregado graúdo, a granulometria dos agregados, a relação água/mistura seca, *etc.*

O método mais utilizado para avaliar a consistência do concreto fresco é o ensaio de abatimento do tronco cone, que é especificado pela NBR NM 67 (ABNT, 1998).

geradas nesta fase resultarão em prejuízos para a vida útil da peça fabricada, comprometendo a sua durabilidade.

No estado endurecido as propriedades essenciais do concreto são: as resistências mecânicas, a porosidade e a durabilidade. Estas propriedades estão diretamente ligadas à microestrutura do concreto e a conexão entre a fase constituída pela pasta de cimento e a fase constituída pelos agregados, chamada de zona de transição.

A zona de transição possui características próprias que influenciam, e até mesmo limitam, as propriedades do concreto. Segundo Silva (2000), os principais tipos de ligação entre a pasta de cimento e o agregado são:

- ligação mecânica por rugosidade superficial do agregado, em que os cristais dos componentes hidratados do cimento envolvem as protuberâncias e as asperezas da superfície dos agregados;
- aderência devido à absorção da água contendo parte do aglomerante dissolvido pelo agregado; o qual, após penetrar na superfície do grão, cristaliza-se ao mesmo tempo em que a pasta, ligando-se a ela;
- atração entre a pasta de cimento e a superfície do agregado, por forças de Van der Waals – ligação física;
- continuidade da estrutura cristalina do agregado nos produtos da hidratação do cimento. Os cristais dos componentes do cimento hidratado prolongam os cristais do agregado, tendo em comum entre si as suas redes cristalinas;
- aderência química entre os produtos da reação da hidratação do cimento e as superfícies do agregado.

Pode-se melhorar o desempenho dos concretos através do uso de adições minerais, tanto em seu estado fresco como no endurecido.

As propriedades do concreto no estado fresco em que as adições interferem são a consistência e a exsudação. Já nos concretos no estado endurecido as adições influem principalmente na resistência mecânica, permeabilidade, porosidade, resistência a íons agressivos, reação álcali-agregado, entre outras (Gonçalves, 2000).

2.4. Concreto

O concreto pode ser definido como um material compósito formado por uma matriz quimicamente ativa, constituída pela pasta de cimento Portland, e uma carga composta por materiais inativos, chamados de agregado.

A função da pasta, mistura de cimento, água e eventualmente um aditivo, no concreto fresco é envolver os agregados, preenchendo os vazios entre os agregados e conferindo mobilidade e fluidez à mistura.

Chama-se de argamassa, a mistura entre a pasta e o agregado miúdo, que proporcionam ao concreto no estado plástico a coesão necessária para o transporte, lançamento e adensamento sem a ocorrência de segregação dos materiais constituintes.

A dosagem do concreto é o processo de proporcionamento dos materiais constituintes: cimento, brita, areia, água, aditivos, adições minerais, pigmentos, *etc.* Este processo apresenta como resultado uma proporção expressa em massa, chamada de traço, e tem como finalidade a obtenção de uma mistura com a melhor relação entre os fatores econômicos e técnicos.

Os principais fatores técnicos que devem ser levados em conta quando se está desenvolvendo um traço de concreto são:

- trabalhabilidade;
- resistência mecânica;
- durabilidade.

Quando da mistura dos materiais, para a dosagem do concreto, deve-se levar em conta o teor de umidade dos agregados miúdos para que a quantidade de água colocada na mistura seja corrigida, levando-se em consideração a umidade livre, ou seja, aquela além da capacidade de absorção dos agregados.

Conhecer o comportamento do concreto em seu estado plástico é muito importante, pois para que se obtenham concretos endurecidos de boa qualidade, é necessário que ele seja tratado cuidadosamente na fase plástica, uma vez que as deficiências

As principais funções dos aditivos no concreto são de incorporadores de ar, retardadores de pega, aceleradores de pega e os plastificantes.

Os aceleradores de pega são utilizados quando se necessita de resistências mecânicas elevadas pouco tempo após a concretagem. Já os retardadores de pega são usados para evitar junta fria de concretagem, alcançar resistências mecânicas homogêneas em grandes volumes, permitir concretagem em dias de elevada temperatura, pois diminuem o calor de hidratação e a variação volumétrica.

Os incorporadores de ar introduzem bolhas de ar no concreto que substituem parte do agregado miúdo. Estas bolhas têm em geral diâmetro inferior a 75 µm. Já os plastificantes (redutores de água) reduzem o consumo de água necessária em um concreto para que o mesmo atinja uma determinada plasticidade, diminuem a segregação e melhoram as condições para vibração e bombeamento do concreto.

O uso de aditivos plastificantes melhora a trabalhabilidade do concreto, aumentando sua fluidez através do processo de diminuição da tensão superficial da água, tornando as partículas de cimento temporariamente hidrofílicas. As moléculas de água circulam as partículas hidrofílicas do cimento e, como consequência, evitam a sua floculação, obtendo um sistema com boa dispersão (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Os aditivos redutores de água de alta eficiência, conhecidos como superplastificantes, são capazes de aumentar a redução no consumo necessário de água em três a quatro vezes, em um dado traço de concreto, quando comparado aos aditivos plastificantes. Quando são adsorvidos pelas partículas de cimento, conferem a este uma forte carga negativa que auxilia a reduzir de forma considerável a tensão superficial da água circundante, conferindo ao sistema elevada fluidez (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

As principais matérias-primas utilizadas na elaboração dos superplastificantes são: os lignosulfonatos, os condensados de naftaleno sulfonado, os condensados de sais de melanina, os poliacrilatos e os éteres policarboxílicos (MARTIN, 2005).

A norma NBR 11768 (ABNT, 1992) fixa as condições exigíveis para que os aditivos sejam classificados como: plastificante (P), superplastificante (SP), retardador (R), acelerador (A), plastificante retardador (PR) e plastificante acelerador (PA).

- cimentos que tiverem antecedentes de resultados de ensaios de longa duração ou de obras que comprovem resistência aos sulfatos.

Quadro 04. Tipos básicos de cimento Portland produzidos no Brasil.

Nome técnico	Sigla	Classes	Componentes (%)			
			Clínquer + gesso	Escória	Pozolana	Fíler calcário
Comum	CP I	25, 32, 40	100	0	0	0
Comum com Adição	CP I-S	25, 32, 40	95-99	1-5	1-5	1-5
Composto com Escória	CP II-E	25, 32, 40	56-94	6-34	0	0-10
Composto com Pozolana	CP II-Z	25, 32, 40	76-94	0	6-14	0-10
Composto com Fíler	CP II-F	25, 32, 40	90-94	0	0	6-10
Alto forno	CP III	25, 32, 40	25-65	35-70	0	0-5
Pozolânico	CP IV	25, 32, 40	5-45	0	15-50	0-5
Alta resistência Inicial	CP V ARI	-	95-100	0	0	0-5

Fonte: adaptado de ABCP, 2002.

A quantidade de álcalis (Na_2O e/ou de K_2O) no cimento é decorrência do tipo e quantidade de matérias-primas utilizadas em sua fabricação. Mehta e Monteiro (2008) consideram que na prática, cimentos que possuem um teor de álcalis menor que 0,6% de Na_2O equivalente (equivalente alcalino) são incapazes de causar danos devidos à RAA, independente da potencialidade reativa do agregado em concretos normais.

2.3. Aditivos para concreto

Os aditivos são substâncias químicas utilizadas para melhorar ou conferir certas propriedades ao concreto. Através da sua utilização consegue-se dosar concretos de alto desempenho, tanto em relação à sua resistência mecânica, quanto em relação à sua durabilidade.

A classificação dos aditivos quanto a sua funcionalidade é difícil, visto que os mesmos podem desempenhar mais de uma função no concreto, ou até mesmo desempenhar funções diferentes a depender da dosagem utilizada.

fora, expandindo a fase C-S-H. A porosidade da fase C-S-H na pasta é de aproximadamente 28% (NEVILLE, 1982), ou seja, 72% da fase C-S-H é sólidos provenientes da hidratação do cimento e o restante é preenchido por água.

Devido à necessidade de aplicações do cimento em finalidade diversas, foram desenvolvidos cimentos com adições de varias naturezas com o intuito de melhorar o seu desempenho. Estas adições, além de melhorar a qualidade dos cimentos, também proporcionam redução de custos, devido ao baixo valor agregado destes materiais, e diminuem o consumo de energia necessária para sua produção. Na produção destas adições é consumida uma menor quantidade de energia que na produção do clínquer (NEVILLE, 1982).

As adições são misturadas ao clínquer na fase de moagem e permitem a fabricação dos diversos tipos de cimento Portland hoje disponíveis no mercado. Essas adições podem ser: o gesso, as escórias de alto-forno, os materiais pozolânicos e os materiais carbonáticos (ABCP, 2002).

As adições agem no cimento Portland modificando algumas das propriedades do concreto, tais como, a resistência mecânica, o calor gerado durante a reação de hidratação, a resistência a agentes agressivos (água do mar, esgoto, etc.), a permeabilidade, entre outras.

No Brasil existem 8 tipos básicos de cimento. O Quadro 04 apresenta um resumo da nomenclatura e os seus respectivos materiais constituintes.

De acordo com NBR 5737 (ABNT, 1992), qualquer um dos tipos básicos de cimento Portland pode receber a designação de resistente a sulfatos (RS) desde que satisfaça a pelo menos uma das seguintes condições:

- teor de aluminato tricálcico (C_3A) do clínquer e teor de adições carbonáticas de, no máximo, 8% e 5% em massa, respectivamente;
- cimentos do tipo alto-forno que contiverem entre 60% e 70% de escória granulada de alto-forno, em massa;
- cimentos do tipo pozolânico que contiverem entre 25% e 40% de material pozolânico, em massa;

pôde ser considerada como inócua aos álcalis. Isto significa que a maioria dos agregados utilizados para confecção de concreto na região sul do Brasil pode desencadear a RAA.

2.2. Cimento Portland

O cimento Portland é um aglomerante hidráulico produzido pela moagem do clínquer; material resultante da calcinação de uma mistura de calcário e argila, sendo constituído essencialmente por silicatos de cálcio hidráulicos, com adição de uma ou mais formas de sulfato de cálcio.

Os principais constituintes do cimento Portland são:

- silicato tricálcico ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 = \text{C}_3\text{S}$): maior responsável pela resistência mecânica entre 10 horas e 28 dias e o segundo em importância para liberação do calor de hidratação;
- silicato bicálcico ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 = \text{C}_2\text{S}$): contribui para a resistência mecânica em idades avançadas, a partir de 45 dias;
- aluminato tricálcico ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 = \text{C}_3\text{A}$): contribui para a resistência mecânica no primeiro dia; é o composto que produz a maior liberação de calor de hidratação;
- ferro aluminato tetracálcico ($4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 = \text{C}_4\text{AF}$): não contribui para resistência mecânica, mas tem boa resistência a sulfatos.

O endurecimento do cimento se dá através da reação de hidratação dos compostos anidros, que pode ser descrita como o processo de estabilização e transformação destes compostos mais solúveis em compostos hidratados menos solúveis na forma de um silicato de cálcio hidratado (C-S-H). A formação desta fase C-S-H acontece no contorno dos grãos anidros, tanto na parte interna quanto na externa. Como decorrência disto, até que se complete a hidratação, existem compostos anidros dentro da fase C-S-H.

Portanto, para que a hidratação do cimento se complete é necessária a translação de água para dentro da fase C-S-H e que os produtos hidratados transladem para

De acordo com Grattan-Bellew (1997), certo número de agregados avaliados pelos ensaios acelerados em barras de argamassa tem obtidos resultados discordantes com o desempenho dos mesmos em situações reais de utilização. Por esta razão deve sempre ser realizada uma análise petrográfica para a definição da potencialidade reativa do agregado.

A Figura 04 apresenta a micrografia de um agregado de quartzo onde a RAA se desenvolveu.

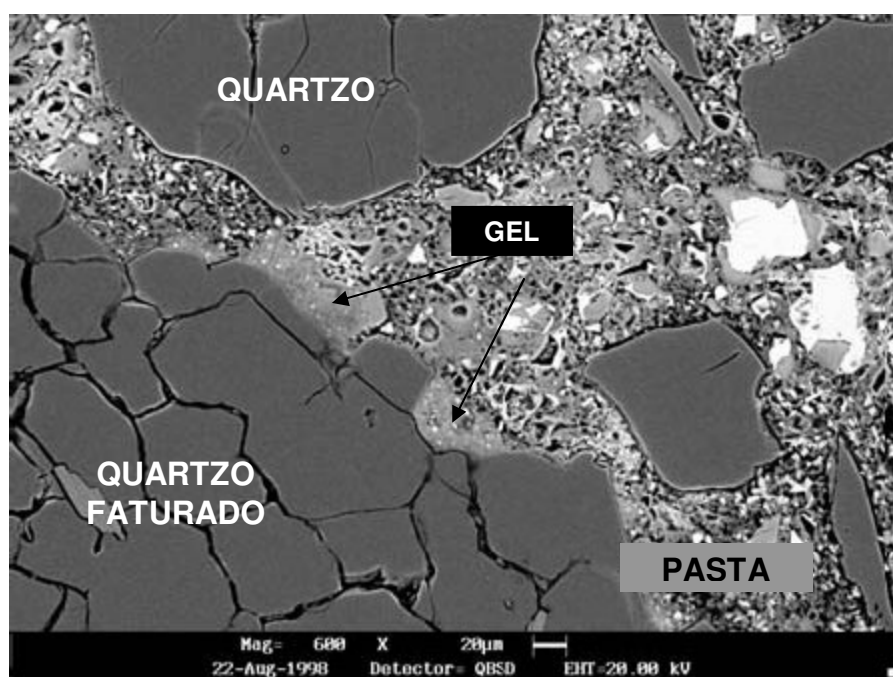


Figura 04. Micrografia com o gel da RAA ao redor do agregado de quartzo (Fonte: Hasparyk, Carasek e Monteiro; 2001).

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) é uma técnica importante que auxilia na investigação da RAA, pois através das micrografias pode-se verificar quais os constituintes reativos envolvidos e o local onde ocorrem as reações.

Hasparyk, Carasek e Monteiro (2001), em um estudo comparativo de diversos métodos de avaliação do potencial reativo dos agregados em relação à RAA, concluíram que a combinação da análise petrográfica, ensaio de reatividade em barras de argamassa e a microscopia eletrônica de varredura é o procedimento que atualmente melhor permite indicar um resultado conclusivo quanto à instalação da RAA.

Tiecher *et al.* (2007), em estudo realizado com 39 tipos de agregados mais utilizados na região sul do Brasil, verificou que nenhuma das amostras coletadas para análise

O Quadro 03 apresenta uma relação de rochas e minerais susceptíveis ao desenvolvimento da reação álcali-agregado.

Os limites máximos dos minerais reativos utilizados para classificar um agregado como potencialmente inócuo, definidos pela NBR 15577-3 (ABNT, 2008), são: 5% de quartzo deformado, 3% de calcedônia ou vidro vulcânico, 1% de tridimita ou cristobalita e 0,5% de opala.

A determinação da potencialidade reativa dos agregados em relação a RAA pode ser determinada através de ensaios em barras de argamassa executados de acordo com a norma ASTM C 1260 (2007). Este ensaio apresenta resultados com 14 dias de exposição das barras a ambiente que potencializa a ocorrência da RAA.

A expansão medida nas barras aos 14 dias de cura em solução alcalina é tomada como valor de referência para a reatividade potencial do agregado com os álcalis do concreto. Expansões maiores que 0,20% indicam que o agregado é reativo; se o valor for entre 0,10% e 0,20% o agregado é potencialmente reativo. Expansões abaixo de 0,10% indicam a estabilidade do agregado.

Caso as leituras de expansão continuem crescentes após os 14 dias é recomendado, para uma maior segurança, que se prolonguem as medidas de expansão até os 28 dias.

A norma NBR 15577-4 (ABNT, 2008) também estabelece um método de ensaio acelerado em barras de argamassa para determinar a susceptibilidade de um agregado em participar da RAA. Quando o resultado obtido neste ensaio indicar expansão menor que 0,19% aos 30 dias de exposição, o agregado pode ser considerado inócuo para a utilização em concretos. Caso a expansão obtida seja maior ou igual a 0,19% aos 30 dias, o agregado é considerado potencialmente reativo.

Outra diferença entre os métodos de ensaio determinados pelas normas ASTM C 1260 (2007) e da NBR 15577-4 (ABNT, 2008) é que, na seleção e especificação do cimento padrão a ser utilizado, a NBR 15577-4 (ABNT, 2008) determina que o mesmo possua uma finura de $4.900 \pm 200 \text{ cm}^2/\text{g}$, enquanto a ASTM C 1260 (2007) não estabelece nenhuma limitação.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas editou um conjunto de normas, da NBR 15577-1 até a NBR 15577-6 (seis partes), em 14 de abril de 2008 para ser utilizada como um guia para a avaliação da reatividade potencial e indicar medidas preventivas na utilização de agregados em concreto.

Segundo Prizskulnik (2005), a primeira etapa da verificação do potencial álcali-reativo de um agregado deve ser a análise petrográfica. Nesta apreciação são reconhecidas as fases minerais potencialmente reativas das rochas.

As principais fases minerais reativas dos agregados são: os dolomitos (os calcários dolomíticos) encontrados nas rochas carbonáticas e as formas reativas dos minerais de sílica, que podem estar em diversos graus de cristalinidade, variando desde a forma cristalina (quartzo) até a forma amorfa (opala) (SBRIGHI NETO, 2005).

A análise petrográfica deve ser executada de acordo com as normas ASTM C 295 (ASTM, 2003), NBR 7389 (ABNT, 1992) e a NBR 15577-3 (ABNT, 2008), sendo que esta última classifica os agregados quanto à RAA em potencialmente inócuo ou potencialmente reativo.

Quadro 03. Minerais e rochas suscetíveis à reação álcali-agregado.

Minerais reativos, com cristalinidade baixa ou sílica meta-estável e vidros vulcânicos		
Material reativo	Rocha de ocorrência	
	Rochas sedimentares	Rochas vulcânicas
Opala, tridimita ou cristobalita, vidro vulcânico ácido, intermediário ou básico	Rochas sedimentares contendo opala, como folhelho, arenito, rochas silicificadas, alguns cherts e flints e diatomito	Rochas vulcânicas com vidro ou vitrofíricas: rochas ácidas, intermediárias ou básicas como riolito, dacito, latito, andesito, tufo, perlita, obsidiana e todas as variedades contendo uma matriz vítrea, alguns basaltos
Rochas reativas contendo quartzo		
Material reativo	Tipos de rocha	
Calcedônia, quartzo micro e criptocristalino. Quartzo macrogranular, com o retículo cristalino deformado, rico em inclusões, intensamente fraturado, com quartzo microcristalino no contato do grão	Chert, flint, veio de quartzo, quartzito, quartzo arenito, arenito quartzoso, calcário silicoso Rochas vulcânicas com vidro devitrificado micro ou criptocristalino Rochas micro ou macrogranulares que contenham quartzo micro ou criptocristalino ou quantidade significativa de quartzo moderadamente ou intensamente tensionado: <ul style="list-style-type: none"> – rochas ígneas: granito, granodiorito e charnockito – rochas sedimentares: arenito, grauvaca, siltito, argilito, folhelho, calcário silicoso, arenito e arcóseo – rochas metamórficas: gnaiss, quartzo-mica-xisto, quartzito, filito, ardósia 	

Fonte: NBR 15577-3 (ABNT, 2008).

- torrões de argila e materiais friáveis: introduzem frações de partículas de baixa resistência mecânica;
- impurezas salinas: podem ocasionar alterações na reação de hidratação do cimento, surgimento de eflorescências, expansões, além de atacar as armaduras no caso de concreto armado;
- material pulverulento: constituído por partículas com dimensão inferior a 75 μm , incluindo materiais solúveis em água, aumentam a necessidade de consumo de água para uma determinada consistência e provocam fissuração no concreto.

A quantidade excessiva de material pulverulento nos agregados pode ser prejudicial, pois, como se trata de um material muito fino, possui superfície específica muito elevada, o que acarreta a necessidade de uma maior demanda de água para se manter a trabalhabilidade do concreto. O aumento da quantidade de água leva ao aumento da quantidade de cimento para que a relação água/cimento se conserve no valor pré-estabelecido.

De acordo com a norma NBR 7211 (ABNT, 2005), quando os materiais pulverulentos forem exclusivamente provenientes da britagem de rocha, e seus grãos não interferirem nas propriedades do concreto, os limites percentuais máximos aceitáveis em relação à massa do agregado miúdo são de 10% para concretos submetidos a desgaste superficial e 12% para concretos comuns. Quando for considerada a definição de agregado total, o limite deste material fino pode ser composto de até 6,5%.

No agregado graúdo este limite é de 2%, quando os mesmos forem produzidos a partir de rochas com absorção inferior a 1%. (ABNT NBR 7211, 2005).

Minerais álcali-reativos

Os minerais álcali-reativos dos agregados podem reagir com os álcalis presentes no concreto, ocasionando tensões de expansão que, em casos extremos, podem levar ao colapso do concreto. Esta reação é chamada de reação álcali-agregado ou RAA.

compactação-vibração, ou compactação seca, onde se verifica a compactação através de um protocolo de empacotamento que utiliza a vibração associada à compressão.

O ensaio de compactação úmida usualmente é usado para se verificar a densidade de empacotamento em partículas finas, enquanto que para partículas maiores que 100 μm , normalmente se usa o ensaio de compactação-vibração.

No ensaio de compactação úmida, a água tem por um lado a função de lubrificante e por outro a função de unir as partículas através do efeito da tensão superficial em pontes líquidas (Silva, 2004).

Ao aumentar a quantidade de água na massa granular a ser ensaiada, a mistura de grãos passa por diversas fases, como mostra a Figura 3.

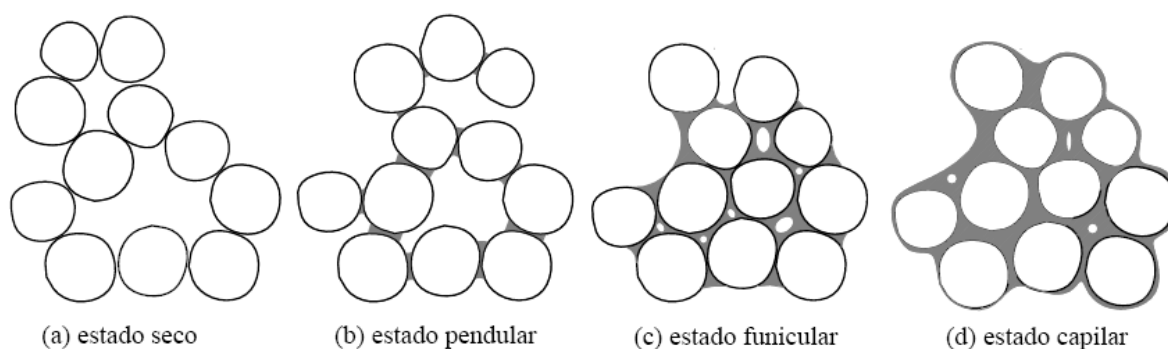


Figura 03. Fases do empacotamento durante o ensaio de compactação úmida (Fonte: Silva, 2004).

Após o estado capilar, ao se acrescentar água, ocorre um leve afastamento entre os grãos, diminuindo a compactação e tornando a mistura fluida.

Substâncias nocivas

Para serem usados na produção de concreto, os agregados devem ser isentos de substâncias nocivas ou estas estarem dentro de limites máximos especificados em normas, tais como:

- impurezas orgânicas: podem interferir na reação de hidratação do cimento, provocando machas e formando regiões de baixa resistência mecânica no concreto;

- seco em estufa, quando toda água evaporável for removida por aquecimento em estufa.
- seco ao ar, quanto estiver em equilíbrio com a umidade do meio ambiente.
- saturado com superfície seca (SSS), quando todos os poros permeáveis estão preenchidos e não há formação de uma película de água em sua superfície.
- úmido, quando há formação de uma película de água em sua superfície.

De acordo com Sbrighi Neto (2005), a capacidade de absorção de um agregado é definida como a quantidade de água necessária para levá-lo do estado seco em estufa para a condição SSS. Já a absorção efetiva é definida como a quantidade de água requerida para fazer com que o agregado passe da condição de seco ao ar para a condição de SSS.

O teor de absorção de água de um agregado pode ser usado como uma medida indireta da sua porosidade e resistência mecânica (MEHTA; MONTEIRO, 2008), pois as rochas mais densas, que normalmente originam agregados mais resistentes, possuem menor porosidade dos grãos e, portanto, menor capacidade de absorção de água.

Compacidade

A compacidade, ou densidade de empacotamento de um agregado, pode ser definida como sendo a razão entre o volume sólido e o volume aparente total.

Silva (2004) define compacidade virtual como sendo aquela obtida quando se arrumam os grãos um a um, de maneira que corresponda a um arranjo geométrico onde haja o menor espaço possível de vazio entre as partículas. Na realidade os grãos não se posicionam com esta ordem, deste modo a compacidade experimental (real) é inferior à compacidade virtual.

A compacidade de uma mistura granular pode ser avaliada através de dois ensaios desenvolvidos por De Larrard (SILVA, 2004). O primeiro é o ensaio de compacidade úmida, ou de demanda de água, onde todos os vazios de uma mistura são preenchidos com água, saturação de 100%; e o segundo ensaio, denominado de

A área específica de um agregado é inversamente proporcional ao tamanho dos seus grãos e é normalmente expressa em unidade de m^2/kg .

Quanto maior a área específica do agregado, maior é o consumo de água no concreto para obtenção de uma mesma consistência. Por outro lado, quanto maior a área específica, maior é a capacidade do agregado em reter água, diminuindo a exsudação no concreto.

Segundo Basílio (1980), a área específica de um agregado tem influência em quase todas as propriedades do concreto, sendo que pequenas alterações granulométricas no agregado miúdo provocam maiores alterações no desempenho de uma mistura do que uma grande variação na granulometria do agregado graúdo. Portanto a utilização do conceito de área específica só se faz necessário quando do uso de agregados miúdos que possuam elevada finura.

Porosidade

Nos agregados existem vazios internos que podem ser permeáveis ou impermeáveis. As características destes poros têm influência sobre diversas propriedades do concreto, como: massa específica, absorção de água, resistência mecânica, dureza, módulo de elasticidade, entre outros. (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Os poros dos agregados podem variar muito de tamanho, sendo que os maiores podem ser vistos com microscópio ou a olho nu, enquanto que os menores são maiores que os poros do fase C-S-H da pasta de cimento (NEVILLE, 1982).

A porosidade dos agregados afeta a resistência do concreto, principalmente interferindo na aderência entre a pasta de cimento e o agregado, na chamada zona de transição.

Absorção e umidade superficial

O agregado pode ser encontrado em diversas condições de umidade, a saber:

No agregado graúdo é possível avaliar a sua forma através da medição da maior e menor dimensão do grão. O índice calculado pela relação entre estas dimensões é chamado de Índice de Forma.

Gouveia e Fernandes Jr (2001), em estudos feitos para avaliar a angularidade e a textura dos agregados miúdos, usados para a produção de concreto asfáltico, definiu que o ensaio de angularidade, que é conhecido como FAA “fine aggregate angularity” é o que melhor se adéqua. Este ensaio avalia a angularidade e textura por meio da porosidade obtida em uma amostra de agregados secos colocada em um recipiente com uma determinada energia de compactação.

De acordo com Sbrighi Neto (2005), agregados miúdos muito grossos produzem concretos ásperos e não trabalháveis, enquanto que agregados miúdos muito finos aumentam o consumo de água e são anti-econômicos. Assim sendo uma distribuição granulométrica equilibrada produz misturas para concreto mais trabalháveis e econômicas.

Área específica

A definição de área específica de um material em pó é a medida da superfície total das suas partículas. O cálculo das superfícies em sólidos regulares é viável, mas ao transpor para agregados, o cálculo complica-se, devido à diversidade de tamanhos e aos seus formatos irregulares (ARAÚJO; BICALHO; TRISTÃO, 2003).

A área superficial de uma partícula pode atingir o triplo ou o quádruplo da área de uma esfera de volume correspondente, sendo que esta variação é atribuída à rugosidade da superfície do grão (COUTINHO, 1997). Por isso, calcular a área superficial considerando que o grão é esférico não permite uma boa aproximação. A vantagem desse método limita-se à simplificação do cálculo.

Pode-se avaliar a área específica dos agregados através da teoria dos fractais, ensaio de permeabilidade (Blaine), ensaio de absorção de N_2 (BET) ou da análise de imagens, mas os parâmetros encontrados são estimados, não correspondendo ao valor real.

A NBR 7211 (ABNT, 2005) define agregado total como sendo a resultante da britagem de rochas cujo beneficiamento resulta numa distribuição granulométrica constituída por agregados graúdos e miúdos ou por uma mistura intencional de agregados britados e areia natural ou britada, que possibilita o ajuste da curva granulométrica em função das características do agregado e do concreto a ser preparado com esse material. Os limites desta norma referentes ao agregado total devem atender a critérios de ponderabilidade em massa entre os agregados graúdos e miúdos que o compõem.

Forma e textura

A forma e a textura dos grãos do agregado influenciam a trabalhabilidade no concreto fresco. Misturas com agregados que possuem grãos arredondados e lisos necessitam de uma quantidade menor de cimento e água para atingirem uma determinada consistência.

Os grãos dos agregados podem ser classificados, segundo a sua forma, em cubóides, alongados e lamelares. São considerados grãos cubóides os que apresentam dimensões nas três direções ortogonais aproximadamente na mesma ordem de grandeza; os grãos alongados apresentam uma dimensão muito maior que as outras duas; enquanto o grão lamelar apresenta uma dimensão menor que as outras.

A textura dos grãos de agregado normalmente se dá em função da forma como é obtido e da dureza, granulação e porosidade da rocha matriz. Os agregados britados têm superfície rugosa, enquanto os agregados naturais têm superfície lisa devido ao desgaste sofrido na natureza. Quanto maior a rugosidade do agregado, maior será a necessidade de demanda de água para obtenção da mesma trabalhabilidade no concreto.

Uma textura mais áspera no agregado favorece a formação de uma forte ligação física entre a pasta de cimento e a superfície do agregado, colaborando com a resistência do concreto, principalmente nas primeiras idades, enquanto ainda não há o desenvolvimento de uma forte aderência química. (MEHTA; MONTEIRO, 2008)

A classificação dos agregados miúdos ocorre em 3 zonas granulométricas chamadas de zona utilizável inferior (ZUI), quando o módulo de finura varia de 1,55 a 2,20, zona ótima (ZO), quando o módulo de finura varia de 2,20 a 2,90, e zona utilizável superior (ZUS) quando o módulo de finura varia de 2,90 a 3,50, conforme o Quadro 02.

Quadro 01. Limites da distribuição granulométrica do agregado graúdo.

Peneira com abertura de malha (mm)	Porcentagem em massa, retida acumulada.				
	Zona granulométrica d/D ¹				
	4,75/12,5	9,5/25	19/31,5	25/50	37,5/75
75	-	-	-	-	0-5
63*	-	-	-	-	5-30
50*	-	-	-	0-5	75-100
37,5	-	-	-	5-30	90-100
31,5*	-	-	0-5	75-100	95-100
25*	-	0-5	5-25 ²	87-100	-
19	-	2-15 ²	65 ² -95	95-100	-
12,5*	0-5	40 ² -65 ²	92-100	-	-
9,5	2-15 ²	80 ² -100	95-100	-	-
6,3*	40 ² -65 ²	92-100	-	-	-
4,75	80 ² -100	95-100	-	-	-
2,36	95-100	-	-	-	-

Fonte: NBR 7211 (ABNT, 2005).

¹ - d corresponde a menor e D a maior dimensão do agregado.

² - em cada zona granulométrica deve ser aceita a variação de no máximo cinco unidades percentuais em apenas um dos limites marcados. Essa variação pode ser distribuída em vários destes limites.

* peneira da série intermediária

Quadro 02. Limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo.

Peneira com abertura de malha (mm)	Porcentagem, em massa, retida acumulada.			
	Limite inferior da zona		Limite superior da zona	
	Utilizável	Ótima	Ótima	Utilizável
9,5	0	0	0	0
6,3*	0	0	0	7
4,75	0	0	5	10
2,36	0	10	20	25
1,18	5	20	30	50
0,60	15	35	55	70
0,30	50	65	85	95
0,15	85	90	95	100

Fonte: adaptado NBR 7211 (ABNT, 2005).

* peneira da série intermediária

Classificação

Os agregados são usualmente classificados quanto a sua origem como naturais, quando encontrados na natureza prontos para o uso sem a necessidade de beneficiamento; como britados, se provenientes de processos de britagem de rochas; como artificiais, quando oriundos de processos industriais; e como reciclados, quando são provenientes do beneficiamento de resíduos industriais ou de resíduos da construção civil.

Quanto ao tamanho dos grãos os agregados podem ser classificados como: agregados miúdos, aqueles que possuem grãos que passam pela peneira com abertura de malha de 4,75 mm e ficam retidos na peneira de abertura de malha de 150 μ m; e agregados graúdos, cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 75 mm e ficam retidos na peneira de abertura de malha de 4,75 mm, em ensaios realizados de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003).

Distribuição granulométrica

A avaliação da composição granulométrica, executada através da norma NBR NM 248 (2003), mostra como ocorre a distribuição da dimensão dos grãos que constitui os agregados, usualmente expressa através de porcentagem acumulada retida em massa, nas peneiras da série normal ou intermediária, que são definidas na norma NBR NM ISO 3310-1 (ABNT, 1997).

A dimensão máxima característica do agregado, corresponde à abertura de malha nominal, em milímetros, da peneira de série normal ou intermediária na qual o agregado apresenta uma porcentagem retida acumulada igual ou imediatamente inferior a 5% em massa.

O módulo de finura de um agregado é definido como a soma das porcentagens retidas acumuladas em massa de um agregado, nas peneiras da série normal dividida por 100.

A NBR 7211 (ABNT, 2005), classifica os agregados graúdos de acordo com a distribuição granulométrica em 5 zonas granulométricas. Como apresentado no Quadro 01.

- a quantidade de substâncias deletérias no agregado não deve ser excessiva, e deve estar dentro de limites estabelecidos por norma. Pois em excesso estas substâncias são capazes de prejudicar a trabalhabilidade, pega, endurecimento e as características de durabilidade dos concretos.
- os agregados não devem reagir com o cimento e devem permanecer estáveis na presença dos agentes que entrem em contato com o concreto.

A mistura de agregados durante a dosagem do concreto, chamado de mescla granulométrica, é feita para aumentar a compacidade, ou densidade de empacotamento, e com isto se obter concretos que necessitem de menores quantidades de pasta de cimento necessária para o total envolvimento dos agregados.

A compacidade máxima de uma mistura de agregados é definida como a compacidade obtida através de um arranjo geométrico das partículas de modo que haja a menor quantidade possível de vazios entre os grãos constituídos.

A melhor proporção entre dois agregados para obtenção da máxima compacidade pode ser obtida através de uma curva geométrica onde se relaciona a compacidade com a proporção de cada um dos agregados.

Segundo Coutinho (1997), as misturas granulométricas devem também ocasionar concretos trabaláveis, que se amoldam bem às fôrmas e não perdem esta qualidade ao serem transportados; portanto, as mesclas granulométricas têm de ocasionar máxima compacidade compatível com a trabalhabilidade requerida.

Lima e Helene (2001) concluíram que quanto maior o volume de pasta de cimento no concreto, maior será a sua porosidade resultante, tornando os concretos mais suscetíveis a agentes deletérios.

Do ponto de vista econômico é mais vantajoso o concreto que utiliza mescla granulométrica com uma máxima compacidade (densidade de empacotamento), pois demanda uma quantidade mínima de pasta de cimento, que é o constituinte de maior custo no concreto.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Agregados

Agregado é um material granular, não coesivo, de atividade química praticamente nula, que se constitui de partículas com vários tamanhos, usado na mistura do concreto como inerte.

Embora os agregados ocupem cerca de 75% do volume do concreto são frequentemente considerados como material de enchimento, sem influência nas propriedades do concreto. Mas de acordo com Buttler (2003), o agregado é o principal fator na definição da massa unitária, módulo de elasticidade e estabilidade dimensional do concreto.

Mehta e Monteiro (2008) afirmam que algumas características dos agregados têm grande influência nas propriedades do concreto, tais como: massa específica; composição granulométrica; teor de umidade e capacidade de absorção de água que são utilizadas na dosagem dos concretos. A porosidade, a composição granulométrica, a forma e textura superficial dos grãos influenciam na trabalhabilidade do concreto no estado fresco. No estado endurecido o concreto é influenciado pela: resistência mecânica, módulo de deformação e presença de substâncias nocivas.

De acordo com Prudêncio, Coelho e Guststein (1998), ao considerar a escolha de um material para utilização como agregado em concretos é necessário que o mesmo tenha algumas propriedades:

- o volume de vazios gerado quando o agregado é compactado deve ser baixo. Concretos com agregados de baixa compactidade exigem um grande volume de pasta para proporcionar a trabalhabilidade necessária;
- a superfície específica do agregado não deve ser muito alta. Agregados com granulometria muito fina exigem alta demanda de água, o que ocasiona concretos com misturas mais ricas em cimento;

- produção de concretos com menor impacto ambiental sem que haja aumento de custo ou perda de qualidade.
- conscientização do setor da pré-fabricação e da mineração para construção civil da importância da prevenção da poluição e do aproveitamento de seus resíduos.

1.5. Estruturação da dissertação

O resultado deste trabalho é apresentado em 05 capítulos e está organizado da seguinte forma:

No Capítulo 1 é feita uma apresentação geral sobre o tema, justificando a relevância de seu estudo. Também é apresentado o objetivo geral e os específicos, os métodos utilizados no trabalho, as justificativas e a estrutura da dissertação.

No Capítulo 2 são discutidas questões relativas às propriedades dos agregados (naturais e dos resíduos de britagem), do cimento e do concreto (nos estados fresco e endurecido). São também abordados os setores industriais de pré-fabricação de estruturas de concreto e mineração de agregados para construção civil e os aspectos relativos aos impactos ambientais ocasionados pela extração de bens minerais da natureza.

No Capítulo 3 é descrita a metodologia utilizada na parte experimental, detalhando o programa experimental, materiais e ensaios utilizados.

No Capítulo 4 apresentam-se os resultados obtidos, bem como as análises e discussões dos mesmos.

No Capítulo 5 são destacadas as conclusões sobre a utilização dos resíduos de britagem como substituição de parte do agregado miúdo utilizado em concretos empregados em estruturas pré-fabricadas.

- redução do uso de areia natural com aumento da vida útil das jazidas, mostrada na Figura 02;



Figura 01. Pilha de resíduos de britagem disposta sem proteção no meio ambiente.



Figura 02. Extração de areia natural.

substituição de parte do agregado miúdo, areias naturais, por resíduos de britagem de rocha em concretos utilizados na a produção de estruturas pré-fabricadas na região metropolitana da cidade de Salvador.

A caracterização dos resíduos de britagem é necessária, pois para se definir que um bem mineral pode ser utilizado como agregado para concreto é indispensável que o mesmo atenda a algumas características básicas de forma, textura, granulometria e reatividade álcali-agregado. Estas características influenciam diretamente na trabalhabilidade do concreto fresco e indiretamente nas propriedades do concreto endurecido.

A utilização do concreto como material de construção se dá por suas propriedades mecânicas e de durabilidade. Então, estudos de como a substituição das areias naturais por resíduos de britagem alteram estas propriedades são necessários, para que se possa demonstrar a viabilidade técnica desta substituição.

Ao se propor uma substituição de matéria-prima natural por um resíduo industrial, deve-se avaliar os impactos ambientais gerados. O resultado desta avaliação pode determinar o sucesso ou não desta alternativa de reutilização de resíduos industriais.

Normalmente, para a utilização de resíduos industriais são necessárias adaptações nos controles do processo de produção. No caso da substituição de parte da areia natural por resíduos de britagem em concretos, deve-se verificar se existem ganhos financeiros que compensem tal substituição e incentivem a utilização destes resíduos.

1.4. Contribuições esperadas

Como resultado deste trabalho espera-se que unidades de pré-fabricação de estruturas de concreto passem a utilizar os resíduos de britagem em seus processos produtivos, ocasionando:

- redução do impacto ambiental através da destinação do uso dos resíduos de britagem de rocha, que é gerado em grande quantidade e para o qual não existe alternativa para sua disposição, exemplificada pela Figura 01;

Específicos

- caracterizar as propriedades físicas e mineralógicas dos resíduos de britagem gerados na região metropolitana de Salvador.
- avaliar a consistência e o desempenho mecânico do concreto que utiliza resíduos de britagem em substituição parcial ou total ao agregado miúdo natural, em relação a concretos utilizados em uma indústria de estruturas pré-fabricadas de Salvador.
- verificar a viabilidade ambiental da substituição das areias naturais por resíduos de britagem em concretos.
- analisar a viabilidade econômica do uso do concreto com resíduos de britagem na execução de estruturas pré-fabricadas de concreto.

1.2. Metodologia

Primeiramente foi executado um levantamento do referencial teórico com vistas a se fazer uma análise crítica sobre o assunto e a obtenção de conhecimento para a elaboração do planejamento para a pesquisa.

A metodologia de pesquisa utilizada neste trabalho consistiu em: uma análise quantitativa, em que se executou um programa experimental para caracterização física dos agregados e avaliação técnica dos concretos com substituição parcial ou total do agregado miúdo natural por resíduos de britagem; e em uma análise qualitativa, em que se avaliou a viabilidade econômica e os impactos ambientais da indústria de mineração na produção de agregados.

1.3. Justificativa

O uso de resíduos industriais em lugar de recursos naturais tem-se mostrado de grande utilidade quando se pretende conseguir construções sustentáveis. Mas nem sempre o conhecimento necessário para que isto aconteça está disponível. Portanto, este trabalho pretende avaliar a viabilidade técnica, econômica e ambiental da

Um aspecto importante para o uso dos resíduos da britagem é a necessidade do controle no recebimento, pois a indústria de mineração de agregados para construção civil não tem controle sobre as propriedades destes resíduos.

Já a tecnologia de produção do concreto avança para a necessidade de controle de qualidade cada vez maior dos materiais constituintes, de forma a trabalhar com menores variações de características possíveis, contribuindo para a diminuição dos custos e aumento da confiabilidade dos concretos produzidos (TERRA, 2000).

Este contexto indica que a utilização dos resíduos de britagem em concretos empregados em estruturas pré-fabricadas é exeqüível, pois no processo de execução destas estruturas já são usados controles de qualidade, tanto no recebimento das matérias primas quanto na produção do concreto, que tornam possível a incorporação de resíduos industriais nas matérias-prima utilizadas.

Desta forma, o presente projeto visa estudar o uso dos resíduos de britagem, como parte do agregado miúdo, nos concretos utilizados em indústrias de estruturas pré-fabricadas na tentativa de encontrar uma solução para minimizar a extração de recursos naturais, e dos impactos ambientais provenientes da disposição inadequada destes resíduos.

1.1. Objetivo

Geral

Estudar a viabilidade técnica, econômica e ambiental do uso de resíduos da indústria de mineração de agregados para construção civil, no concreto usado na produção de peças pré-fabricadas para estruturas de concreto em Salvador.

amadurece e as populações aumentam, os bens minerais disponíveis se tornam escassos.

No Brasil, a reciclagem de resíduos industriais, como materiais de construção, ocorre de forma tímida se comparado a países do primeiro mundo, com exceção da indústria de aço e do cimento (ÂNGULO; ZORDAN; JOHN, 2001).

A indústria da construção civil tem características tais que a torna uma grande consumidora em potencial de resíduos industriais, pois está presente em todas as regiões do país, é uma grande geradora de resíduos sólidos e se utiliza de uma ampla variedade de matérias-primas.

A areia natural, por ser o material mais empregado na engenharia como agregado miúdo para concreto e argamassas, tem sofrido um esgotamento progressivo de suas jazidas, tornando-as cada vez mais longe do local de uso. A consequência disto é o aumento de seu custo, uma vez que, de acordo com Valverde (2005), 2/3 do custo da areia é decorrência da distância de transporte.

Ainda segundo Valverde (2005), a produção estimada de agregados para construção civil em 2004 foi de 187,0 milhões de toneladas de areia e 128,7 toneladas de pedra britada. Sendo que, do total das britas, 70% foi consumida na mistura com cimento Portland e o restante utilizada em asfaltos betuminosos, enquanto que 50% da areia foi destinada para a utilização em concretos e pré-fabricados e o restante para argamassas em geral.

Uma alternativa para minimizar a extração de areia natural, que provoca grandes deteriorações ambientais e problemas ecológicos, é a utilização dos resíduos da indústria de mineração de agregados, que são conhecidos por resíduos de britagem ou pó-de-pedra, como agregado miúdo em argamassas e concretos.

A substituição já demonstrou ser vantajosa em alguns lugares, pois de acordo com estudos realizados por Moura (2004) em Feira de Santana, com materiais daquela região, os resíduos de britagem mostraram maior resistência mecânica e menor grau de impurezas, além de apresentar uma distribuição granulométrica distinta da distribuição das areias naturais normalmente encontradas.

1. INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil forma uma cadeia produtiva que responde por cerca de 18% do Produto Interno Bruto (PIB) Brasileiro (CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO, 2007) e, ao mesmo tempo, é responsável pela geração de 40% a 70% de todos os resíduos sólidos urbanos (PINTO, 1999). Pode-se dizer então que este é o setor que mais contribui com ações que alteram o meio ambiente, com impactos visuais, sonoros e geração de resíduos.

Estas alterações ocorrem em todo o período da construção, desde as fases iniciais, que compreendem o planejamento e projeto, passando pelas fases de execução e utilização, indo até o fim da vida útil, quando se dá a demolição da construção.

Desta forma, é necessário que se pense em construções sustentáveis, que levem em conta não só os aspectos financeiros, mas também considere questões ambientais como: o uso de materiais reciclados, a geração de resíduos (durante a execução e a utilização da construção), a eficiência energética, a saúde do usuário, a gestão da água, a possibilidade de reciclagem de seus materiais constituintes após o fim de sua vida útil, entre outros.

De acordo com John (2000), o desenvolvimento sustentável da sociedade requer a desvinculação entre a geração de riquezas e o consumo de recursos naturais, ou seja, é necessário o aumento da eficiência na produção dos bens com redução no consumo das matérias-primas naturais.

Um sistema de gestão ambiental nas indústrias é fundamental para o gerenciamento dos resíduos, uma vez que a disposição destes em locais inadequados contribui para a degradação ambiental. Além disso, a geração de resíduos acarreta perda de recursos para o causador e provoca enormes gastos ao setor público, que arca com os custos da disposição final e em alguns casos do transporte destes resíduos.

O setor da construção civil consome elevada quantidade de recursos naturais (MATTOS; WAGNER, 1999), levando à uma necessidade de extração de recursos em grande volume na natureza. Segundo Callister JR (2001), o planeta Terra é um sistema fechado em relação aos materiais constituintes e à medida que a sociedade

4.3.	Desempenho do Concreto	103
4.3.1.	Resultados da fase Exploratória	103
4.3.2.	Resultados da fase de avaliação da substituição	110
4.3.3.	Resultados da fase de avaliação do concreto proposto	119
4.4.	Análise da Viabilidade Econômica	129
4.5.	Avaliação dos Impactos Ambientais	133
4.5.1.	Impactos na indústria de britagem de rocha	134
4.5.2.	Impactos na indústria de extração de areia natural	136
5.	CONCLUSÕES	140
5.1.	Sugestões para incentivar o uso de resíduos de britagem	141
5.2.	Contribuições da pesquisa	142
5.3.	Sugestões para trabalhos futuros	143
	REFERÊNCIAS	144

SUMÁRIO

	Página
1. INTRODUÇÃO	18
1.1. Objetivos	20
1.2. Metodologia	21
1.3. Justificativa	21
1.4. Contribuições esperadas	22
1.5. Estrutura da Dissertação	24
2. REFERENCIAL TEÓRICO	25
2.1. Agregados	25
2.2. Cimento Portland	38
2.3. Aditivos para concreto	40
2.4. Concreto	42
2.5. Estruturas Pré-fabricadas de concreto	53
2.6. Indústria da Mineração de Agregados	58
2.7. Impactos Ambientais	60
3. METODOLOGIA	66
3.1. Programa Experimental	66
3.1.1. Caracterização dos materiais utilizados	66
3.1.2. Avaliação do desempenho do concreto	74
3.2. Análise da Viabilidade Econômica	81
3.3. Avaliação dos Impactos Ambientais	81
4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	82
4.1. Caracterização dos Agregados e dos Resíduos de Britagem	82
4.2. Caracterização dos Materiais Utilizados	98
4.2.1. Fase exploratória	98
4.2.2. Fase de avaliação da substituição e fase de avaliação do concreto proposto	101

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a/c	=	Relação Água/cimento em massa
ABCP	=	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	=	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AIA	=	Avaliação dos Impactos Ambientais
ASTM	=	American Standards for Test and Material
CBIC	=	Câmara Brasileira da Indústria da Construção
CEPRAM	=	Conselho Estadual de Proteção Ambiental
CONAMA	=	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CRA	=	Centro dos Recursos Ambientais
fc	=	Resistência do concreto
IBAMA	=	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IUGS	=	International Union of Geological Sciences
LI	=	Licença de Instalação
LO	=	Licença de Operação
LP	=	Licença Previa
MEV	=	Microscopia Eletrônica de Varredura
PIB	=	Produto Interno Bruto
RAA	=	Reação Álcali – Agregados
SSS	=	Saturado Superfície Seca

LISTA DE TABELAS

	Página
Tabela 01. Análise granulométrica – Areia Natural.	82
Tabela 02. Análise granulométrica – Resíduos de britagem seco.	82
Tabela 03. Análise granulométrica – Resíduos de britagem lavado.	83
Tabela 04. Análise granulométrica – Brita 9,5 / 25,0.	83
Tabela 05. Resultados de resistência à compressão com 1 dia (2ª fase).	112
Tabela 06. Resultados de resistência à compressão com 7 dias (2ª fase).	114
Tabela 07. Resultados de resistência à compressão com 28 dias (2ª fase).	116
Tabela 08. Resultados de resistência à compressão com 1 dia (3ª fase).	121
Tabela 09. Resultados de resistência à compressão com 28 dias (3ª fase).	122
Tabela 10. Resultado de resistência à tração por compressão diametral com 1 dia (3ª fase).	123
Tabela 11. Resultado de resistência à tração por compressão diametral com 28 dias (3ª fase).	123
Tabela 12. Resultado de resistência à tração por flexão com 28 dias (3ª fase).	123
Tabela 13. Resultados de absorção de água, índice de vazios e massa específica no concreto (3ª fase).	125

Quadro 33.	Custo do concreto de referência 2.	132
Quadro 34.	Custo do concreto com uso de resíduo de britagem seco 2.	132
Quadro 35.	Custo do concreto com uso de resíduo de britagem lavado 3.	132

Quadro 17.	Variação dimensional das barras de argamassa em solução alcalina.	96
9Quadro 18.	Características do cimento utilizado na fase exploratória.	99
Quadro 19.	Características dos agregados miúdos utilizados na fase exploratória.	100
Quadro 20.	Características do agregado graúdo utilizado na fase exploratória.	100
Quadro 21.	Características do cimento utilizado nas fases de avaliação.	101
Quadro 22.	Características dos agregados miúdos utilizados nas fases de avaliação.	102
Quadro 23.	Características do agregado graúdo utilizado nas fases de avaliação.	103
Quadro 24.	Resumo das características dos concretos executados na fase exploratória.	103
Quadro 25.	Resumo dos resultados de resistência à compressão em relação ao teor de substituição de areia natural por resíduos de britagem (fase exploratória).	109
Quadro 26.	Resumo das características dos concretos executados na fase de avaliação da substituição.	111
Quadro 27.	Resumo dos resultados de resistência à compressão em relação ao teor de substituição de areia natural por resíduos de britagem (2ª etapa).	118
Quadro 28.	Viabilidade de utilização do resíduo de britagem em relação à RAA em concretos para estruturas pré-fabricadas especiais.	128
Quadro 29.	Custo dos agregados utilizados.	130
Quadro 30.	Custo do concreto de referência 1.	131
Quadro 31.	Custo do concreto com uso de resíduo de britagem seco 1.	131
Quadro 32.	Custo do concreto com uso de resíduo de britagem lavado 1.	131

LISTA DE QUADROS

		Página
Quadro 01.	Limites da distribuição granulométrica do agregado graúdo.	28
Quadro 02.	Limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo.	28
Quadro 03.	Minerais e rochas suscetíveis à reação álcali-agregado.	35
Quadro 04.	Tipos básicos de cimento Portland produzidos no Brasil.	40
Quadro 05.	Classificação da ação preventiva em função do tipo de estrutura ou elemento de concreto e das condições de exposição.	52
Quadro 06.	Medidas de mitigação para precaução da RAA.	53
Quadro 07.	Traços iniciais do concreto da fase exploratória.	75
Quadro 08.	Traços iniciais do concreto da fase de avaliação da substituição	77
Quadro 09.	Traços do concreto utilizados na fase de avaliação do concreto proposto.	79
Quadro 10.	Ensaio de compacidade seca – areia natural + resíduo de britagem seco.	89
Quadro 11.	Ensaio de compacidade seca – areia natural + resíduo de britagem lavado.	89
Quadro 12.	Ensaio de compacidade úmida – areia natural + resíduo de britagem seco.	91
Quadro 13.	Ensaio de compacidade úmida – Areia natural + Resíduo de britagem lavado.	91
Quadro 14.	Características físicas e petrográficas da areia natural.	94
Quadro 15.	Composição mineralógica da areia natural (% de números de grãos).	94
Quadro 16.	Síntese das características petrográficas do resíduo de britagem.	95

Figura 37.	Curva da resistência à compressão no 7º dia em função do teor de substituição de areia natural por resíduos de britagem (2ª fase).	115
Figura 38.	Curva de Abrams para 28 dias (2ª fase).	116
Figura 39.	Curva da resistência à compressão no 28º dia em função do teor de substituição de areia natural por resíduos de britagem (2ª fase).	116
Figura 40.	Resultados da consistência do concreto na 3ª fase.	120
Figura 41.	Resultados dos ensaios de teor de ar incorporado na 3ª fase.	121
Figura 42.	Resultado dos ensaios de resistência à compressão na 3ª fase.	122
Figura 43.	Resultado de resistência à tração na 3ª fase.	124
Figura 44.	Resultados dos ensaios de absorção de água e índice de vazios no concreto (3ª fase).	126
Figura 45.	Resultado dos ensaios de massa específica no concreto (3ª fase).	126
Figura 46.	Impacto ambiental – carreamento de partículas sólidas na pedreira.	134
Figura 47.	Impacto ambiental – poluição dos recursos hídricos nas pedreiras.	135
Figura 48.	Impacto ambiental – poluição do ar nas pedreiras 1.	135
Figura 49.	Impacto ambiental – poluição do ar nas pedreiras 2.	136
Figura 50.	Impacto ambiental – desmatamento em areal.	136
Figura 51.	Impacto ambiental – poluição dos mananciais de água superficiais em areal.	137
Figura 52.	Impacto ambiental – áreas degradadas em areal.	137
Figura 53.	Impacto ambiental – degradação de vias rodoviárias devido ao transporte de areias.	138
Figura 54.	Impacto ambiental – extração ilegal de areia.	139

Figura 20.	Resultados dos ensaios do teor de absorção de água nos agregados.	93
Figura 21.	Gráfico da evolução das expansões com o tempo de cura em solução alcalina – considerando os limites da ASTM C 1260 (2007).	97
Figura 22.	Gráfico da evolução das expansões com o tempo de cura em solução alcalina – considerando os limites da NBR 15577-4 (2008).	98
Figura 23.	Curva de Abrams para 1 dia (resultados da 1ª fase)	104
Figura 24.	Curva de Abrams para 7 dias (resultados da 1ª fase)	104
Figura 25.	Curva de Abrams para 28 dias (resultados da 1ª fase)	105
Figura 26.	Curva da relação <i>a/c</i> <i>versus</i> Teor de resíduos de britagem.	106
Figura 27.	Gráfico da resistência à compressão com 1 dia <i>versus</i> teor de resíduos de britagem.	106
Figura 28.	Gráfico da resistência à tração por compressão diametral com 1 dia <i>versus</i> teor de resíduos de britagem.	107
Figura 29.	Gráfico da resistência à compressão com 7 dias <i>versus</i> teor de resíduos de britagem.	107
Figura 30.	Gráfico da resistência à tração por compressão diametral com 7 dias <i>versus</i> teor de resíduos de britagem.	108
Figura 31.	Gráfico da resistência à compressão com 28 dias <i>versus</i> teor de resíduos de britagem	108
Figura 32.	Gráfico da resistência à tração por compressão diametral com 28 dias <i>versus</i> teor de resíduos de britagem.	109
Figura 33.	Curva teor de substituição <i>versus</i> relação <i>a/c</i> (2ª fase).	111
Figura 34.	Curva de Abrams para 1 dia (2ª fase).	113
Figura 35.	Curva da resistência à compressão no 1º dia em função do teor de substituição de areia natural por resíduos de britagem (2ª fase).	113
Figura 36.	Curva de Abrams para 7 dias (2ª fase).	115

LISTA DE FIGURAS

		Página
Figura 01.	Pilha de resíduos de britagem disposta sem proteção no meio ambiente	23
Figura 02.	Extração de areia natural.	23
Figura 03.	Fases do empacotamento durante o ensaio de compactidade úmida.	33
Figura 04.	Micrografia com o gel da RAA ao redor do agregado de quartzo.	37
Figura 05.	Fluxograma de produção de pedras britadas em Salvador em 2007.	57
Figura 06.	Componentes do ensaio de compactação-vibração.	70
Figura 07.	Configuração do ensaio de compactação-vibração.	70
Figura 08.	Classificação da forma dos grãos.	72
Figura 09.	Curva da relação entre precisão e tamanho da amostra.	79
Figura 10.	Curva resumo da análise granulométrica na areia natural.	84
Figura 11.	Curva resumo da análise granulométrica no resíduo de britagem seco.	84
Figura 12.	Curva resumo da análise granulométrica no resíduo de britagem lavado.	85
Figura 13.	Curva resumo da análise granulométrica das britas 9,5 / 25,0.	85
Figura 14.	Material retido na peneira de abertura 2,36 mm – resíduo de britagem seco.	87
Figura 15.	Material retido na peneira de abertura 2,36 mm – resíduo de britagem lavado.	87
Figura 16.	Material retido na peneira de abertura 2,36 mm – areia natural.	88
Figura 17.	Curva de compactidade seca.	88
Figura 18.	Curva de compactidade úmida.	91
Figura 19.	Resultados dos ensaios de massa específica.	92

ABSTRACT

The use of industrial waste instead of natural resources has proved a very useful when you want to achieve more sustainable buildings, but not always the knowledge to make this possible is available. Therefore, this work aims to demonstrate the feasibility of using waste from crushing stone, from industry mining coarse aggregate for the construction, replacing the natural sand used for the concrete production in the precast structures units in Salvador. The methodology used in this study, to assess the feasibility of replacing, consisted of: quantitative analysis in which he executed an experimental program for the physical and petrography characterization, and the potential reactive waste, evaluate the performance of concrete in relation to the consistency and quantity of the air incorporated in the fresh concrete; determination of strength to compression, tensile and absorption of water in the hardened concrete. For the verification of economic viability and environmental impacts of the mining industry to aggregates of rock were used qualitative methods. According to the results concluded that the replacement is technically and economically feasible. The replacement is also beneficial to the environment because it reduces the negative environmental impacts of the mining household, since it reduces the amount of waste from mining to be prepared in the environment while decreasing the amount of extraction of a non-renewable mineral and of nature.

KEYWORDS: fine aggregate, pre-manufacturing, sustainability of buildings, waste of crushing.

RESUMO

O uso de resíduos industriais em lugar de recursos naturais tem-se mostrado de grande utilidade quando se pretende conseguir construções mais sustentáveis, mas nem sempre o conhecimento para que isto seja possível está disponível. Portanto, este trabalho visa demonstrar a viabilidade do uso de resíduos de britagem de rocha, provenientes da indústria de mineração de agregado graúdo para a construção civil, em substituição às areias naturais utilizadas para a produção de concretos em unidades de pré-fabricação de estruturas em Salvador. A metodologia utilizada neste trabalho, para a avaliação da viabilidade da substituição, consistiu em: análise quantitativa em que se executou um programa experimental para a caracterização física, petrográfica e da potencialidade reativa dos resíduos; avaliação do desempenho dos concretos em relação à consistência e quantidade de ar incorporado do concreto no estado fresco; determinação das resistências à compressão, tração e absorção de água no estado endurecido. Para a verificação da viabilidade econômica e dos impactos ambientais da indústria de mineração de rocha para agregados utilizaram-se métodos qualitativos. De acordo com os resultados obtidos concluiu-se que a substituição é técnica e economicamente viável. A substituição também é benéfica ao meio ambiente, pois diminui os impactos ambientais negativos das minerações de agregado, já que reduz a quantidade de resíduos das minerações a serem dispostos no meio ambiente e ao mesmo tempo diminui a quantidade de extração de um bem mineral não renovável da natureza.

PALAVRAS-CHAVE: agregado miúdo, pré-fabricação, resíduos de britagem, sustentabilidade das construções.

AGRADECIMENTOS

Ao senhor Deus, por ter me dado força e sabedoria para transpor as dificuldades encontradas durante esta caminhada.

À minha esposa Andrea, às minhas filhas Sara e Rana, a meu sogro e minha sogra, Benjamim e Graça, à minha cunhada Vanessa, pelo incentivo e apoio incondicional, sem o qual esse trabalho não teria chegado ao final.

À Baprel, pela liberação de pessoal e viabilidade para execução dos ensaios em suas dependências internas, principalmente ao Sr. Otoniel pelo apoio e incentivo.

Ao Professor Emerson de Andrade Marques Ferreira, pela orientação.

Ao Professor Ricardo Fernandes Carvalho, pelas essenciais contribuições e orientações, sem as quais essa pesquisa seria mais limitada e menos relevante.

Aos Professores Adailton Oliveira Gomes e Sandro Lemos Machado pelo apoio e incentivo dados.

Ao Professor Washington Moura pelas idéias iniciais para o desenvolvimento da pesquisa.

Aos funcionários do MEAU, principalmente Alice pela ajuda prestada.

Às empresas, Cimento Mizú e Pedreiras Valeria, pela doação de materiais para estudo.

Ao colega Eng. Antonio Sergio pelo incentivo e realização de ensaios na Concreta.

À empresa LCL pela realização de ensaios.

Aos funcionários da Baprel, pela compreensão e ajuda para realização dos ensaios, principalmente a Antonio, Vanessa e Valdeci.

À minha família pelas orações e “torcida”.

Agradeço a todos que direta ou indiretamente contribuíram para o sucesso deste trabalho.

Muito Obrigado!

Dedicatória
À minha família.

Jarilson de Andrade Santana

**VIABILIDADE DO USO DE RESÍDUOS DE BRITAGEM EM
CONCRETOS DE ESTRUTURAS PRÉ-FABRICADAS EM
SALVADOR**

Dissertação apresentada ao Curso de
Mestrado em Engenharia Ambiental
Urbana – MEAU – da UFBA em
cumprimento às exigências para
obtenção do Grau de Mestre.

Salvador, 04 de julho de 2008

Banca Examinadora:

Emerson de Andrade Marques Ferreira _____
Doutor em Engenharia, UFBA.

Ricardo Fernandes Carvalho _____
Doutor em Engenharia e Ciências dos materiais, UFBA.

Vanessa Silveira Silva _____
Doutora em Engenharia e Ciências dos materiais, UFBA.

Dylmar Penteado Dias _____
Doutor em Ciências dos materiais, UENF.

FICHA CATALOGRAFICA



Universidade Federal da Bahia
Escola Politécnica
Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana

Jarilson de Andrade Santana

**VIABILIDADE DO USO DE RESÍDUOS DE BRITAGEM EM
CONCRETOS DE ESTRUTURAS PRÉ-FABRICADAS EM
SALVADOR**

Dissertação apresentada ao Curso de
Mestrado em Engenharia Ambiental
Urbana – MEAU – da UFBA em
cumprimento às exigências para
obtenção do Grau de Mestre.

ORIENTADOR: Dr. Emerson de Andrade Marques Ferreira
CO-ORIENTADOR: Dr. Ricardo Fernandes Carvalho

SALVADOR
2008



Universidade Federal da Bahia
Escola Politécnica
Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana

Dissertação de Mestrado

**VIABILIDADE DO USO DE RESÍDUOS DE BRITAGEM EM
CONCRETOS DE ESTRUTURAS PRÉ-FABRICADAS EM
SALVADOR**

JARILSON DE ANDRADE SANTANA

SALVADOR
2008