



UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS
CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**ESTUDO EXPLORATÓRIO DA PRODUÇÃO
DE CONCRETO CELULAR AUTOCLAVADO
COM O EMPREGO DE FINOS ORIUNDOS DA
RECICLAGEM DE CONCRETO COMO AGREGADOS**

ÂNGELO CEZAR FUMAGALLI ROSTIROLA

São Leopoldo, Setembro de 2013.

R839e Rostirola, Ângelo Cezar Fumagalli
Estudos exploratórios da produção de concreto celular autoclavado com o emprego de finos oriundos da reciclagem de concreto como agregados / por Ângelo Cezar Fumagalli Rostirola - 2013.
97 f. : il, 30 cm.

Dissertação (mestrado) — Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2013.

Orientação: Prof^a Dr^a Marlova Piva Kulakowski.
Bibliografia: f. 95-97.

1. Concreto celular. 2. Agregados (materiais de construção) – Reaproveitamento. 3. Construção Civil. I. Kulakowski, Marlova Piva. II. Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

CDD 620.136
CDU 620.139

ÂNGELO CEZAR FUMAGALLI ROSTIROLA

**ESTUDO EXPLORATÓRIO DA PRODUÇÃO DE CONCRETO
CELULAR AUTOCLAVADO COM O EMPREGO DE FINOS
ORIUNDOS DA RECICLAGEM DE CONCRETO COMO
AGREGADOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientadora: Profa. Dra. Marlova Piva Kulakowski
Co-Orientadora: Profa. Dra. Luciana Paulo Gomes

Banca examinadora: Profa. Dra. Ana Paula Kirchheim
Prof. Dr. Maurício Mancio

São Leopoldo, Setembro de 2013.

ÂNGELO CEZAR FUMAGALLI ROSTIROLA

**ESTUDO EXPLORATÓRIO DA PRODUÇÃO DE CONCRETO
CELULAR AUTOCLAVADO COM O EMPREGO DE FINOS
ORIUNDOS DA RECICLAGEM DE CONCRETO COMO
AGREGADOS**

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração: Gerenciamento de Resíduos, da Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS.

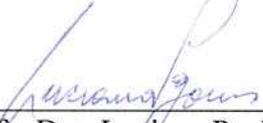
Aprovada em 24 de outubro de 2013



Prof. Dra. Marlova Piva Kulakowski
Orientadora – UNISINOS



Prof. Dr. Claudio de Souza Kazmierczak
Coordenador do PPGEC/UNISINOS

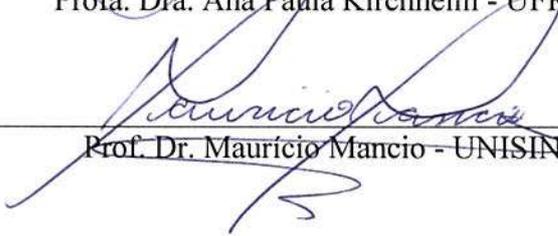


Prof. Dra. Luciana Paulo Gomes
Coorientadora - UNISINOS

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dra. Ana Paula Kirchheim - UFRGS



Prof. Dr. Mauricio Mancio - UNISINOS

Dedico aos meus familiares e amigos.

AGRADECIMENTOS

À minha família por todo o apoio e compreensão em todas as ocasiões.

Aos professores do mestrado pelo ensinamento passado nesses dois anos, principalmente à minha orientadora, Marlova, que me apadrinhou e sempre direcionou a pesquisa mesmo nos momentos difíceis.

Aos meus colegas que apoiaram nos trabalhos extraclasse e também durante a pesquisa, assim como aos bolsistas conduzidos pela Jéssica. A todos os funcionários do Laboratório de Materiais da Construção (Rodrigo, Felipe e Ingrid), mas, em especial, ao Maurício, que sempre se dispôs a ajudar, inclusive acreditando na viabilidade da pesquisa.

A Alini, do Laboratório de Caracterização e Valorização de Materiais, assim como a Michele, do ITT Fóssil, ambas sempre dispostas e compreensivas aos percalços ocorridos durante a pesquisa, durante a caracterização dos materiais e espécimes.

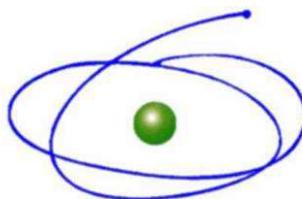
Aos demais profissionais envolvidos, fora da Unisinos, pelo apoio, pela compreensão, pela disposição e pelos ensinamentos, como: Mallmann, Claudomiro e Lizete (Cientec), e o professor Piazza (Universidade de Caxias do Sul).

Aos órgãos de fomento à pesquisa: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pela concessão da bolsa de estudos, e Sindicato das Indústrias da Construção Civil Novo Hamburgo, pelo financiamento da pesquisa.

FONTES DE FINANCIAMENTO DA PESQUISA

Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior.

Sindicato das Indústrias da Construção Civil Novo Hamburgo



C A P E S

Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior



SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	JUSTIFICATIVA	22
1.2	OBJETIVOS	23
1.2.1	Objetivo geral	23
1.2.2	Objetivos específicos	24
1.3	DELIMITAÇÕES DA PESQUISA	24
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	27
2.1	CONCRETO CELULAR	27
2.1.1	Histórico	27
2.1.2	Tipos	28
2.1.3	Materiais constituintes	31
2.1.4	Traços e métodos de produção do CCA	33
2.1.5	Propriedades e características CCA	35
2.2	EMPREGO DE RESÍDUOS NO CCA	41
2.3	AGREGADO RECICLADO DE CONCRETO	43
3	ESTUDO-PILOTO	45
3.1	ESTUDO 1	45
3.2	ESTUDO 2	51
3.3	ESTUDO 3	53
4	MATERIAIS E MÉTODOS	59
4.1	PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTO	59
4.1.1	Fatores e níveis de controle	59
4.1.2	Fatores fixos	59
4.1.3	Fatores não controláveis	59
4.1.4	Variáveis de resposta	60
4.2	MATERIAIS	60
4.2.1	Cimento	60
4.2.2	Cal calcítica hidratada	63
4.2.3	Agregado natural	64
4.2.4	Agregado reciclado	66
4.2.5	Agente expansor	68
4.2.6	Água	68
4.3	PRODUÇÃO DAS AMOSTRAS	69
4.3.1	Produção do concreto celular	69
4.3.2	Moldagem	70
4.3.3	Cura	71
4.3.4	Preparação e identificação das amostras	71
4.4	ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	72
4.5	ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE	73
4.6	ABSORÇÃO TOTAL	74
4.7	DENSIDADE DE MASSA APARENTE SECA	74
4.8	CARACTERIZAÇÃO DA MICROESTRUTURA	74
5	APRESENTAÇÃO E ANÁLISES DOS RESULTADOS	77
5.1	DENSIDADE DE MASSA APARENTE SECA	77
5.2	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	79
5.3	ABSORÇÃO CAPILAR DE ÁGUA	83
5.4	ABSORÇÃO TOTAL	85
5.5	CARACTERIZAÇÃO DA MICROESTRUTURA	85
5.5.1	Espécimes retirados do topo das amostras	86
5.5.2	Espécimes retirados do meio das amostras	88
5.5.3	Espécimes retirados do fundo das amostras	90

6	CONCLUSÃO	93
6.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	94
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	95

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Caracterização dos cimentos empregados nas pesquisas analisadas.	31
Tabela 2 – Caracterização das cales empregadas nas pesquisas analisadas.	32
Tabela 3 – Traços realizados nas pesquisas estudadas.	33
Tabela 4 – Métodos de produção das pesquisas estudadas.	34
Tabela 5 – Classes, resistência à compressão e densidade de massa aparente seca.	36
Tabela 6 – Resistência à compressão em concretos celulares com cura úmida e em autoclave.	38
Tabela 7 – Traços realizados no Estudo-Piloto 1.	45
Tabela 8 – Resistência à compressão amostras de concreto celular.	51
Tabela 9 – Resistência à compressão das amostras de concreto celular autoclavado.	53
Tabela 10 – Traço definitivo.	53
Tabela 11 – Resultados de resistência à compressão das amostras autoclavadas em 2, 4 e 6 horas.	55
Tabela 12 – Fluorescência de raios X do cimento CP V ARI, análise qualitativa.	60
Tabela 13 – Caracterização química do cimento CP V ARI.	61
Tabela 14 - Fluorescência de raios X da cal calcítica hidratada, análise qualitativa.	63
Tabela 15 – Caracterização físico-química da cal calcítica hidratada.	63
Tabela 16 – Análise química básica cal calcítica hidratada.	63
Tabela 17 - Fluorescência de raios X da areia de rio, análise qualitativa.	65
Tabela 18 – Caracterização química da areia de rio.	65
Tabela 19 – Fluorescência de raios X do resíduo de concreto, análise qualitativa.	66
Tabela 20 - Fluorescência de raios X do pó de alumínio, análise qualitativa.	68
Tabela 21 – Identificação da água potável.	69
Tabela 22 – Traços estudados e consumo de material.	69
Tabela 23 – Densidade de massa aparente seca.	77
Tabela 24 – ANOVA da variável densidade de massa aparente seca.	77
Tabela 25 – Resultados de compressão axial conforme traço e idade.	79
Tabela 26 – ANOVA dos fatores independentes e das interações entre eles em relação à resistência à compressão.	79
Tabela 27 – Resultados da taxa de absorção capilar de água e da porosidade efetiva.	83
Tabela 28 – ANOVA da variável taxa de absorção capilar de água.	83
Tabela 29 – ANOVA da variável porosidade.	84

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - (a) Material silicoso fino, aglomerantes, água e aditivos são introduzidos em molde metálico, formando uma mistura; (b) expansão para atingir o volume final.....	29
Figura 2 – Estrutura dos produtos de CCA, tem aproximadamente (i) 50% poros de ar, (ii) 30% microporos e cerca de (iii) 20% de material sólido.....	30
Figura 3 – Diagrama do fluxo da produção CCA.....	35
Figura 4 – Mecanismo de absorção capilar.	37
Figura 5 – Microestrutura de concreto celular de mesma composição (cimento-areia); (a) cura úmida e (b) autoclavado. Fonte: Narayanan e Ramamurthy (1999).....	38
Figura 6 – Microestrutura CCA referência, conforme fabricante.	39
Figura 7 – Rede de poros CCA (a) poro artificial; (b) poros entre grupos; e (c) poros entre partículas. Fonte: Narayanan e Ramamurthy (2000).....	39
Figura 8 – MEV da seção transversal do poro com ampliação 450x; e plaquetas de tobermorita com ampliação 4.000x. Fonte: Kus e Carlsson (2003).	40
Figura 9 – (a) Microporos entre as plaquetas de tobermorita, detalhe, e fissura nos mesoporos. (b) Macroporos - vista com menor ampliação dos poros de ar aprisionados. Fonte: Ioannou, Hamilton e Hall (2008).	40
Figura 10 – Concreto de pós-reativos autoclavado (a) poro esférico com tobermorita no perímetro, (b) ampliação no mesmo poro. Fonte: Yazici et al. (2010).....	41
Figura 11 – Materiais separados e pesados conforme traço.	46
Figura 12 – Mistura manual dos materiais.	46
Figura 13 – (a) Preenchimento do molde respeitando medidas determinadas e (b) identificação.....	47
Figura 14 – Acompanhamento da expansão do Traço 1.	47
Figura 15 – Moldagem do Traço 2.	48
Figura 16 – Amostras do terceiro traço com cura ao ar.....	49
Figura 17 – Amostras do terceiro traço com cura em estufa a 40°C, durante uma hora.	49
Figura 18 – Amostras (a) Traço 1 e (b) Traço 2. Sequência de preenchimento (2,5; 7 e 10 cm).	50
Figura 19 – Amostras Traço 3 (a) curadas ao ar e (b) curadas em estufa, durante uma hora. Sequência de preenchimento dos moldes (2,5; 7 e 10 cm).....	50
Figura 20 – Amostras Traço 4 (a) curadas ao ar e (b) curadas em estufa, durante uma hora. Sequência de preenchimento (2,5; 7 e 10 cm).....	50
Figura 21 – Amostras Traço 5 (a) curadas ao ar e (b) curadas em estufa, durante uma hora. Sequência de preenchimento (2,5; 7 e 10 cm).....	51
Figura 22 – Cura inicial após preenchimento dos moldes.....	51
Figura 23 – Amostras na autoclave, antes do processo de cura.	52
Figura 24 – Amostras do Traço 4 (a) antes e (b) depois da autoclavagem.....	52
Figura 25 – Amostras do Traço 5 (a) antes e (b) depois da autoclavagem.....	52
Figura 26 – (a) Vaso de pressão, tipo autoclave, fabricante Weco S/A; (b) parte interna com capacidade máxima de 0,2 metros cúbicos.....	54
Figura 27 – Caixa plástica para armazenamento das amostras.	54
Figura 28 – Logística e cronograma da produção das amostras de CCA.....	54
Figura 29 – Moldes prismáticos metálicos com compartimentações.....	55
Figura 30 – Amostras antes do processo de cura em autoclave.	55
Figura 31 – Influência tempo de cura em autoclave.....	56
Figura 32 – Micrografias das amostras conforme tempo de cura em autoclave: (a) 2 horas; (b) 4 horas; (c) 6 horas; e (d) 8 horas. Aumento de 5000x em todas as imagens.	57

Figura 33 – Difratoograma de raios X do Cimento CP V ARI.....	61
Figura 34 – Distribuição granulométrica do cimento CP V ARI, Cal calcítica, ARC e AN. ..	62
Figura 35 – Micrografia do cimento CP V ARI (aumento 500x).....	62
Figura 36 – Difratoograma de raios X da cal calcítica hidratada.....	64
Figura 37 – Micrografia da cal calcítica hidratada (aumento 500x).....	64
Figura 38 – Difratoograma de raios X da areia de rio.	65
Figura 39 – Micrografia da areia de rio (aumento 500x).....	66
Figura 40 – Difratoograma de raios X do resíduo de concreto.	67
Figura 41 – Micrografia do resíduo de concreto (aumento 500x).	67
Figura 42 – Difratoograma de raios X do pó de alumínio.	68
Figura 43 – (a) Argamassadeira do tipo planetária; (b) durante a mistura.	70
Figura 44 – (a) Processo de expansão; (b) após 60 minutos.....	70
Figura 45 – Retificação da parte superior das amostras.....	71
Figura 46 – Amostras do T1 na autoclave, antes do processo de cura.	71
Figura 47 – Identificação das amostras, conforme ensaio. (a) T1 idade 1 e (b) T1 idade 2. ...	72
Figura 48 – Ensaio de resistência à compressão, (a) antes e (b) depois da aplicação da carga.	72
Figura 49 – Esquema experimental utilizado por RILEM (1999).	73
Figura 50 – Pesagem da amostra, durante o ensaio.	74
Figura 51 – Amostras antes da extração dos pedaços menores.	75
Figura 52 – Amostra (10 x 10 x 10 mm) de CCA metalizado com ouro paladium.....	75
Figura 53 – Efeito isolado da variável “ARC” na densidade de massa aparente seca.....	78
Figura 54 – A mostras após 60 minutos da mistura (a) T1; (b) T2; e (c) T3.....	78
Figura 55 – Efeito isolado da variável “IDD” no desempenho de resistência à compressão. .	80
Figura 56 – Efeito isolado da variável “ARC” no desempenho de resistência à compressão. .	81
Figura 57 – Interação entre as variáveis ‘idade’ e ‘teor de ARC’ no desempenho de resistência à compressão.	82
Figura 58 – Gráfico da relação da resistência à compressão e a densidade de massa aparente seca.....	82
Figura 59 – Efeito isolado da variável “ARC” no ensaio de absorção por capilaridade.	84
Figura 60 – Efeito isolado da variável “ARC” na porosidade dos concretos.	85
Figura 61 – Absorção total.....	85
Figura 62 – Micrografia dos espécimes retirados do topo, (a) e (b) T1; (c) e (d) T2; e (e) e (f) T3. Aumento 500 e 3000x, respectivamente.....	86
Figura 63 – Micrografia dos espécimes retirados do topo, (a) e (b) T1; (c) e (d) T2; e (e) e (f) T3. Aumento 1500 e 5000x, respectivamente.....	88
Figura 64 – Micrografia dos espécimes retirados do meio, (a) e (b) T1; (c) e (d) T2; e (e) e (f) T3. Aumento 500-3000x, respectivamente.	89
Figura 65 – Micrografia dos espécimes retirados do meio, (a) e (b) T1; (c) e (d) T2; e (e) e (f) T3. Aumento 1500-5000x, respectivamente.	90
Figura 66 – Micrografia dos espécimes retirados do fundo, (a) e (b) T1; (c) e (d) T2; e (e) e (f) T3. Aumento 500 e 3000x, respectivamente.....	91
Figura 67 – Micrografia dos espécimes retirados do fundo, (a) e (b) T1; (c) e (d) T2; e (e) e (f) T3. Aumento 1500 e 5000x, respectivamente.....	92

LISTA DE ABREVIATURAS

a/c – Relação água/cimento

Al – Alumínio

AN – Agregado natural

ARC – Agregado reciclado de concreto

CCA – Concreto celular autoclavado

Cientec – Fundação de Ciência e Tecnologia

DRX – Difração de raios-X

FRX – Fluorescência de raios-X

LMC – Laboratório de Materiais de Construção Civil

MEV – Microscopia eletrônica de varredura

MET – Microscopia eletrônica de transmissão

RCD – Resíduo de construção e demolição

RESUMO

ROSTIROLA, Â.C.F. **Estudo exploratório da produção de concreto celular autoclavado com o emprego de finos oriundos da reciclagem de concreto como agregados.** São Leopoldo, 2013. 99f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Unisinos, São Leopoldo. 2013.

A construção civil atualmente é a indústria com maior crescimento no Brasil, fomentada por financiamentos e programas do governo federal. É também uma das indústrias que mais consome recursos naturais e energia, além de ser a principal geradora de resíduos sólidos urbanos. Grande parcela destes recursos naturais consumidos pela construção é formada pelos agregados. Uma alternativa econômica e ambientalmente correta, para diminuir a extração deste material, é a sua substituição por algum outro material, se possível por um resíduo, como apontam várias pesquisas. A busca por materiais e produtos ecologicamente corretos está em uma crescente, assim como os estudos para a reciclagem de diversos resíduos. A união entre produtos que consomem um volume menor de matéria-prima com o emprego de resíduos na sua produção parece uma saída viável para um desenvolvimento mais sustentável. Artefatos para a construção civil produzidos com concreto celular autoclavado (CCA) utilizam até quatro vezes menos materiais quando comparados a produtos com características semelhantes, produzidos com concreto convencional, cerâmico, entre outros. Além do menor consumo dos materiais constituintes, o concreto celular possui outras propriedades interessantes, como: suficiente resistência à compressão; isolamento térmico e acústico; baixa densidade; resistência ao fogo. Esta pesquisa teve como objetivo principal avaliar a influência da substituição parcial do agregado natural por agregado reciclado de concreto (ARC) na produção de concreto celular autoclavado. Após realização de estudos-piloto, optou-se pelo emprego da proporção de Cimento e Agregado Natural (AN) de 67% e 33% e sobre estes 0,45% de Cal e 0,3% de Alumínio com relação água/sólidos igual a 0,32. Foram empregados Cimento Portland CP-V ARI, Cal calcítica, areia natural e agregado fino reciclado de concreto, em teores de 0%, 25% e 50%. A dimensão máxima do agregado empregado na produção de CCA é de 150 μm . A cura foi realizada em autoclave após um tempo de espera de 24 horas a partir do início da mistura, por um período de 6 horas. Foram avaliadas a resistência à compressão, a absorção de água capilar, a massa específica e a porosidade. Os ensaios de resistência à compressão foram realizados em 48 e 72 horas, e a absorção de água, em corpos de prova preparados e acompanhados pelo período de 96 horas. A microestrutura dos CCA produzidos foi caracterizada por microscopia eletrônica de varredura (MEV). Verificou-se que existem expressivas alterações nas propriedades do CCA produzidos com ARC em substituição do AN, com a tendência de aumentar a densidade de massa aparente, bem com a resistência à compressão, a medida que aumenta-se o teor de ARC. Na análise dos resultados, percebeu-se que o uso de ARC alterou as propriedades dos concretos produzidos neste estudo exploratório, sem, entretanto, inviabilizar o seu emprego. Com um ajuste da dosagem, pode ser obtido um CCA produzido com ARC, cujo comportamento seja compatível com o comportamento de CCA produzido somente com o AN.

Palavras-chave: concreto celular autoclavado; agregado reciclado de concreto; resíduo.

ABSTRACT

ROSTIROLA, Â.C.F. **Exploratory study of the production of autoclaved aerated concrete with fines grains from recycled concrete aggregate.** São Leopoldo, 2013. 99p. Dissertation (Master Degree in Civil Engineering) – Postgraduate Civil Engineering Program, Unisinos, São Leopoldo.

In the last years, the Brazilian construction industry is among those of national production sectors that have been having a great growing, mostly due to the incentive from the government and due to financed resources by private and public agents. This industry is also one of the major consumers of natural resources and energy, besides being the main generator of solid waste. One of these natural resources used in the constructions is sand. An environmentally friendly and economical alternative to reduce the extraction of natural resources is the use of recycled waste. The associated use of low volume of raw materials with alternative materials, like waste, is one of the ways to get more sustainability in the construction sector. Construction and building components made with autoclaved cellular concrete (ACC) employ four times less material than others with the same function. Other advantage of ACC is the performance of its properties like compressive strength, thermal and acoustic behavior, lower density, fire resistance. The aim of this research was to investigate the use of fine grains from recycled concrete aggregate (ARC) as partial sand replacement in the production of autoclaved aerated concrete. With the goal to find the mix proportion some pilot studies were made. After this, it was chosen a relation of 67% of cement and 33% of natural fine aggregate (sand). The lime was used in the amount of 0.45% of total cement and sand, and 0.3% of aluminium. The water to total solids ratio was 0.32. It was employed Portland cement type V according to Brazilian standards, calcitic lime, natural sand and ARC passing in sieve with 150 micron opening. The replacement rate of sand by ARC was 0%, 25% and 50%. From 24 hours after the mixing of materials, the samples were submitted to steam curing in an autoclave chamber for 6 hours. It was evaluated the compressive strength, the density, the capillary water absorption and porosity. The compression strength tests were performed at 48 and 72 hours. Water absorption tests were conducted for 96 hours after samples preparing. The capillary porosity was calculated with the capillary water absorption data. ACC's microstructure analysis was done by scanning electron microscopy (SEM). The results showed in general that the behavior of ACC produced with ARC differs significantly from the ACC produced with natural aggregate. When the ARC rate increases the apparent specific gravity also increases as well as the compressive strength. The observed increase in the apparent specific gravity is not desired. However this behavior of ACC done with RCA does not prevent the use of this recycled aggregate. An optimized study of pre-wetting of RCA could improve its performance as aggregate for use in ACC, once its grain size showed to be appropriated for this kind of use.

Key-words: autoclaved aerated concrete; recycled concrete aggregate; concrete waste, recycling.

1 INTRODUÇÃO

Com o grande crescimento da indústria da construção civil, os materiais estão mais escassos e caros, tornando o emprego de produtos que consomem menos matéria-prima natural e/ou que utilizem resíduos na produção uma alternativa ambientalmente correta e econômica. Nota-se um crescimento no número de estudos que viabilizam o emprego de resíduos em produtos voltados a essa área.

Desenvolvimento sustentável, consciência ambiental e preservação dos recursos naturais são critérios cada vez mais exigidos em qualquer indústria, inclusive na construção civil. O crescimento urbano consome cerca de 50% das matérias-primas extraídas da natureza, 40% de toda a energia gerada e origina 50% do total de resíduos sólidos (OIKONOMOU, 2005). Portanto faz-se necessário um consumo racional dos materiais e um controle sobre os resíduos gerados e até mesmo sua utilização.

No Brasil, segundo Pinto (1999), são gerados 150 quilos de resíduos de construção e demolição (RCD) à cada metro quadrado construído. As características desses são distintas, sendo o resíduo oriundo de concreto o mais simples para segregar e o que apresenta maior homogeneidade.

Dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UNISINOS, já foram e estão sendo realizadas várias pesquisas com o emprego de resíduos, principalmente oriundos de construção e demolição. Essas pesquisas (WERLE, 2010; TROIAN, 2010; e HEINECK, 2012), na sua maioria, propõem o emprego dos resíduos na produção de materiais ou produtos voltados para a construção civil e estão inseridas no Grupo de Pesquisa em Materiais de Construção e Reciclagem – GMAT.

Um dos resíduos mais estudados nessas pesquisas é o resíduo de concreto, utilizado tanto como agregado graúdo quanto como miúdo na produção de argamassa ou concreto. Originário de demolições, de centrais dosadoras, da fabricação de pré-moldados, é um material com características conhecidas e com um menor grau de contaminação, se comparado aos demais RCD. Entre os principais problemas para o emprego de finos oriundos do agregado reciclado de concreto (ARC) está a maior porosidade e, por consequência, a menor massa específica desse material quando comparado aos agregados convencionais.

Os finos gerados são um dos problemas na reciclagem de concreto como ARC, caracterizados como sendo o material passante na peneira de malha de abertura 0,15 mm. No

estudo de Angulo et al. (2013), analisando processos de beneficiamento de resíduo de concreto para a obtenção de areia, o teor de finos gerados foi na ordem de 15 a 20%.

Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR 13438:1995, concreto celular autoclavado (CCA) é definido como um concreto leve, obtido por um processo industrial com materiais calcários ricos em sílica, granulados finamente, expandidos através de produtos formadores de gás. Por apresentar uma massa específica bastante baixa, característica intrínseca desse material, o seu emprego em vedações e divisórias, ou mesmo em enchimento de lajes, contribui para reduzir o carregamento da estrutura e, conseqüentemente, as dimensões de elementos estruturais e fundações. Essa diminuição pode levar ao emprego de um menor volume de concreto e, automaticamente, de recursos naturais não renováveis.

Os produtos de concreto celular autoclavado (CCA) consomem um menor volume de materiais quando comparados a produtos com características semelhantes - por exemplo, cerca de $\frac{1}{4}$, quando comparado ao concreto convencional, devido à expansão (FERREIRA, 1987). Corroborando com essa afirmação, outros autores apontam ser possível produzir 4 m³ de material de construção a partir de 1 m³ de matéria-prima (RILEM, 1993).

O uso de agregado reciclado associado, em função de suas características físicas e químicas, pode ser viável para emprego na produção de CCA e, associado ao menor consumo, parece ser uma alternativa viável e relevante no mercado da construção.

1.1 JUSTIFICATIVA

Fomentada por recursos públicos para o acesso da população à moradia própria e por investimentos em infraestrutura urbana, no Brasil, a indústria que mais cresce é a da construção civil, edificando residências, prédios, pontes e estradas. Novos métodos e conceitos de construção mais sustentável e ecoeficiente ainda não foram, porém, colocados em prática na grande maioria dos empreendimentos, o que ocasiona o excessivo consumo de matéria-prima e a excessiva geração de resíduos.

A definição de ecoeficiência, feita pelo CIS (1996), é “a competitividade na produção e na colocação no mercado de bens ou serviços que satisfazem as necessidades humanas, trazendo qualidade de vida, minimizando os impactos ambientais e o uso de recursos naturais, considerando o ciclo inteiro de vida da produção e reconhecendo a ecocapacidade planetária”. Vários são os parâmetros sugeridos para a condução de projetos de produtos ecoeficientes, entre eles o emprego de matérias-primas alternativas.

Além de colocar em prática os novos conceitos referentes a projetos racionais, com novos materiais e técnicas construtivas e com aperfeiçoamento da mão de obra, é preciso reavaliar o uso dos resíduos gerados e a destinação dada a eles. Atualmente os resíduos de construção e demolição (RCD) ainda são depositados em aterros inertes, ocupando uma parcela significativa do solo, determinando custos cada vez mais elevados para transporte e descarte, uma vez que faltam espaços licenciados para isso.

Encontrar um uso para esses resíduos é um caminho ambiental e economicamente viável. Combinado com a redução do custo de um produto que consome menos matéria-prima e possui uma série de propriedades positivas, isso parece ser uma alternativa com grande potencial.

Em 1995, foram produzidos no mundo, em aproximadamente 50 fábricas, mais de 31 milhões de metros cúbicos de concreto celular (TECHNOLOGIES, [S.d.]). O concreto celular autoclavado, apesar de ter sido patenteado ainda na segunda década do século passado (FERREIRA, 1987) e de trazer benefícios para o desempenho global da edificação, ainda é um material, no Brasil, pouco difundido, com escassos fabricantes. Os artigos sobre o tema são pouco detalhados ou incompletos, no que diz respeito a materiais constituintes, suas características e seu proporcionamento. Desenvolver pesquisas que possam trazer alguns esclarecimentos acerca desse material parece ser uma proposta de interesse para o desenvolvimento do conhecimento técnico e científico sobre o assunto na área da engenharia civil e de materiais.

Associado a esse aspecto, propor o emprego de agregado miúdo reciclado de concreto na produção de CCA é uma questão inovadora no que se refere às pesquisas na área. O foco é o concreto celular curado em autoclave, por ser o método empregado na indústria nacional na fabricação de blocos.

1.2 OBJETIVOS

Os objetivos desta pesquisa foram definidos em geral e específicos.

1.2.1 Objetivo geral

Este trabalho propõe-se avaliar a viabilidade técnica da utilização de finos oriundos da reciclagem de concreto como agregados (ARC) na produção de concreto celular autoclavado (CCA), perante suas principais características mecânicas.

1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos da proposta são:

- Explorar o proporcionamento dos materiais constituintes para a elaboração do CCA;
- Verificar a influência dos agregados reciclados na reação de expansão do CCA;
- Analisar a influência dos teores de substituição do agregado natural por agregado reciclado de concreto (ARC) na resistência à compressão, na absorção de água, na massa específica no estado endurecido e na porosidade do CCA;
- Investigar a microestrutura dos CCA produzidos.

1.3 DELIMITAÇÕES DA PESQUISA

Diversos fatores influenciam as propriedades do CCA, como tipos de aglomerantes (cimento e cal), relação água/sólidos, agregado, pó de alumínio, características dos equipamentos de produção (misturador) e de cura (autoclave), condições e métodos dos ensaios. Assim, é necessário delimitar a abrangência deste trabalho, principalmente no que tange ao programa experimental a ser desenvolvido.

Quanto aos **aglomerantes**, no que se refere ao **cimento**, o tipo existente no Brasil que mais se assemelha aos utilizados nos experimentos apresentados na revisão bibliográfica é o Cimento Portland CP V ARI, por conter uma quantidade reduzida de adições. Já a **cal** deve ser a mais pura possível e rica em CaO, para obter-se a melhor relação química com o pó de alumínio, por isso será empregada a cal calcítica. Como esta é a primeira experiência com CCA realizada na região, apesar de, no Rio Grande do Sul, ser produzida a cal dolomítica e seu emprego ser aconselhável por tratar-se de um material local, decidiu-se isolar este fator empregando-se cal calcítica.

Os **agregados** naturais empregados nas pesquisas apresentam dimensão máxima de 100 μ m. Nesta pesquisa, por questões de viabilidade de aquisição e preparação dos materiais, foram empregados agregados com dimensão máxima de 150 μ m, provenientes de rio, e reciclados de resíduos de concreto. Eles foram peneirados e segregados conforme a dimensão máxima, em laboratório.

Em relação às **condições de execução e aos métodos** do programa experimental, as misturas foram elaboradas no Laboratório de Materiais e Construção da Universidade do Vale do Rio dos Sinos (Unisinos), São Leopoldo-RS, e a cura em autoclave foi efetuada no Laboratório de Meio Ambiente da Fundação de Ciência e Tecnologia (Cientec), Porto Alegre, RS. Já os ensaios e a análise dos materiais foram realizados nos laboratórios da Unisinos, respeitando sempre as mesmas condições.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, serão apresentados os conteúdos relativos às pesquisas e aos estudos realizados com concreto celular. Por se tratar de um produto com uso recente no Brasil, não existem muitas pesquisas nacionais, e, quando existem, elas estão em processo de patente ou não têm todos os dados divulgados por motivos de confidencialidade com a empresa parceira na pesquisa.

2.1 CONCRETO CELULAR

O concreto celular é basicamente uma argamassa com agregado miúdo com diâmetro reduzido, geralmente máximo de 100 μ m (WONGKEO e CHAIPANICH, 2010), expandida por algum agente aerador, formador de bolhas estáveis. O que diferencia e classifica o concreto celular são as diferentes formas de geração das bolhas de ar, o tipo de cura e o traço empregado.

Scheffler e Colombo (2005) definem o material como uma espuma cerâmica com uma rede de poros fechados, produzida através de um processo de aeração de uma mistura cimentícia. Os autores ainda apontam que o concreto celular pode conter ou não agregados, e, quando contém, estes são da classificação fina. Nos materiais componentes, não existem agregados graúdos, leves ou pesados, justificando a denominação “argamassa leve” (FERREIRA, 1987).

2.1.1 Histórico

Os primeiros estudos para desenvolvimento de concretos aerados começaram em 1889, na cidade de Praga, quando se buscavam novos materiais com massa específica menor do que os tradicionalmente empregados, utilizando ácido clorídrico e bicarbonato de sódio para a produção de bolhas de ar na mistura. Em 1919, em Berlim, surge a primeira patente aplicada industrialmente, para a produção de vigas armadas. Mas, apenas a partir de 1923, quando a primeira patente sueca foi homologada, o concreto celular teve maior desenvolvimento. Depois, em vários países, o número de patentes não parou de crescer, sendo diferenciadas pelo processo da liberação do gás expensor ou pelos melhoramentos dos registros anteriores (FERREIRA, 1987).

Na Suécia, em 1923, na cidade de Estocolmo, segundo Ferreira (1987), Eriksson depositou a patente, sendo considerado o “pai” dos concretos celulares, pois, após essa data, iniciou-se um maior desenvolvimento do material, aumentando o número de patentes; em

1987 já existiam centenas, com inúmeros métodos de produção e materiais. Em 1925, surge a primeira patente de concreto celular espumoso empregando substâncias orgânicas como agentes espumantes, porém este processo tinha um grande problema: o controle da expansão. Na década de 70, surgiram produtos químicos orgânicos capazes de tornar controladas a expansão e a estabilidade da massa (FERREIRA, 1987).

No Brasil, nesse mesmo período, começou o emprego do concreto celular espumoso, produzido com produtos químicos orgânicos ou ação física (FERREIRA, 1987). Sua função era preenchimento de lajes, proteção mecânica de sacadas/terraços.

Atualmente, além do concreto celular espumoso produzido no país, há fábricas de blocos e artefatos de concreto celular autoclavado. Todo processo produtivo é patenteado e tratado como segredo industrial, por isso a dificuldade de realização de pesquisas na área.

2.1.2 Tipos

Grutzeck (2005) não classifica o concreto celular como um tipo de concreto, explicando que se trata de uma mistura formada por cimento e água, aerada antes do processo de cura. O autor ainda assinala que essa nomenclatura foi empregada para propiciar uma melhor aceitação no mercado, já que os profissionais da área teriam desconfiança em empregar blocos de mistura de cimento.

Outros autores, como Narayanan e Ramamurthy (1999), defendem que o ar aprisionado na matriz cimentícia pode ser considerado um agregado leve. De fato, o que pode ser interpretado, a partir da colocação dos autores, é que o CCA é constituído por duas fases de densidades bem distintas, a matriz (mistura e agregado) e o poro. Assim, os autores, através de análises da microestrutura do concreto celular, identificaram uma zona de transição na interface dos poros com a matriz, e o motivo que os leva a fazer esta afirmação é o fato de que os cristais se desenvolvem de forma diferente na borda do poro quando comparado ao cristal que cresce confinado na matriz. E, em analogia à zona de transição mistura-agregado convencional e mistura-agregado leve de concretos, esta interface com o poro parece ser mais compacta e com maior intertravamento entre os cristais.

Existem diversas classificações que variam de país para país e de autor para autor, devido à imensa dificuldade na definição e na caracterização desse material. Conforme o item anterior há dois tipos, o concreto celular (ou aerado) e o concreto celular espumoso, diferenciados pelo processo de obtenção da rede de poros (bolhas) interna: física e química ou orgânica, e o tipo de cura: ao ar, autoclave e estufa ou forno de mufla.

Na revisão realizada por Narayanan e Ramamurthy (2000), para a incorporação química de ar, é utilizado um agente junto à mistura de cimento e/ou cal, ainda na fase plástica antes do seu endurecimento, resultando em uma mistura com aumento de volume e estrutura porosa devido ao gás liberado na reação química.

Ramachandran (1996) listou diversos materiais empregados como agentes químicos – magnésio, zinco e pó de alumínio, que liberam o gás hidrogênio; compostos de nitrogênio e amônia, que liberam nitrogênio; e a reação entre peróxido de hidrogênio com hipoclorito de sódio, que libera oxigênio.

O processo mais comum é a incorporação de pó de alumínio na mistura de material aglomerante, gerando uma reação química com o hidróxido de cálcio. A partir dessa reação, é liberado o gás hidrogênio que permanece retido na parte interna da mistura devido à viscosidade da mistura, ocasionando a expansão (NARAYANAN e RAMAMURTHY, 2000). Para que a reação ocorra, o pH da mistura deve ser de 12,5 aproximadamente (Equação 1), segundo Goual et al. (2006).



Se fossem comparados blocos de concreto com mesmas dimensões e volume aparente, os produtos de concreto celular autoclavado (CCA) consomem menos materiais, aproximadamente apenas 1/4 do volume de matéria-prima, quando comparado ao concreto convencional, devido à expansão, conforme mostra a Figura 1. O uso de agregado reciclado, associado ao menor consumo, parece ser uma alternativa viável e importante no mercado da construção.

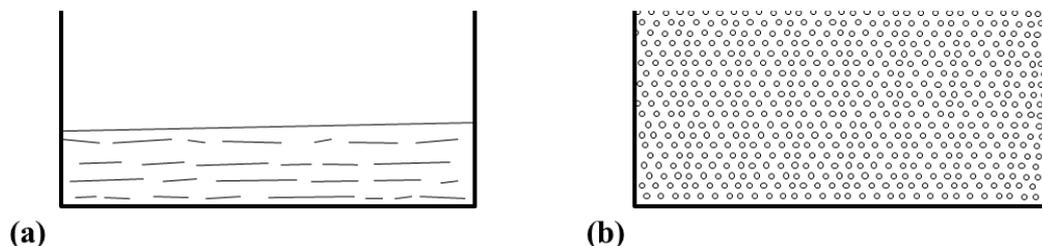


Figura 1 - (a) Material silicoso fino, aglomerantes, água e aditivos são introduzidos em molde metálico, formando uma mistura; (b) expansão para atingir o volume final.

Fonte: RILEM (1993).

Com o crescimento das pesquisas referentes ao concreto celular, surgiram classificações e termos deste material. Existem várias formas de se fabricar o concreto celular, com diferenças na composição, nos métodos de cura e na geração do gás que dá origem às

bolhas de ar dentro da massa de concreto (SCHEFFLER e COLOMBO, 2005). Quando as bolhas são geradas pelo método físico, o concreto celular é denominado espumoso, já o gerado a partir de reação orgânica ou química é conhecido como celular ou aerado (FERREIRA, 1987).

Além da produção de blocos ou painéis de vedação pré-fabricados, o concreto celular é empregado como preenchimento geotécnico e de minas - nestes casos, com a cura no local da aplicação (TIKALSKY, POSPISIL e MACDONALD, 2004). Ainda segundo os autores, além da capacidade de absorver ondas de energia, o concreto celular apresenta outras vantagens, como a resistência ao fogo e a absorção de água (LAVALLE, 1999).

Os produtos de concreto celular têm sua estrutura formada por aproximadamente 50% de poros devido às bolhas de ar, 30% de microporos e 20% de material sólido (RILEM, 1993), conforme Figura 2. Isso os caracteriza como produtos verdes, ecológicos.

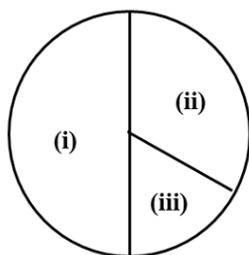


Figura 2 – Estrutura dos produtos de CCA, tem aproximadamente (i) 50% poros de ar, (ii) 30% microporos e cerca de (iii) 20% de material sólido.

Fonte: RILEM (1993).

A porosidade, representada na Figura 2, é responsável pelas propriedades finais do concreto celular e está ligada diretamente ao agente gerador de bolhas ou ao teor deste na mistura (SCHEFFLER e COLOMBO, 2005). Quanto maior o volume de poros, menor será a resistência mecânica do produto, portanto o ideal é associar bons resultados para resistência mecânica e isolamento térmico e acústico.

Algumas propriedades finais do concreto celular são oriundas da temperatura de cura, considerando tratar-se da reação de cura de um material cerâmico a base de cimento. Os três tipos de cura mais empregados são: em temperatura ambiente, em estufa (ou forno de mufla) e em autoclave.

Narayanan e Ramamurthy (2000) apontam que a cura em autoclave aumenta a resistência à compressão, em comparação aos concretos celulares curados à temperatura ambiente. Ferreira (1987) destaca que a diferença pode chegar ao dobro de resistência à

compressão e à metade da retração, a favor dos curados em autoclave, devido a diferença da reação dos compostos durante a hidratação.

2.1.3 Materiais constituintes

A mistura é geralmente composta por um ou mais aglomerantes, agregados geralmente ricos em sílica e classificados na categoria de finos, água e o agente expander. Podem ser incorporados aditivos, se necessário.

A proporção da mistura utilizada na indústria de CCA é basicamente: areia (65), cal (25), cimento (10) e pó de alumínio (0,05%) com uma relação de água/sólido de 0,7 (MOSTAFA, 2005), traduzindo este proporcionamento para a notação comum aos concretos, o traço unitário de materiais secos cimento:cal:areia ficaria 1:2,5:6,5 com 0,05% de Al e 0,7 de água em relação à massa total de material seco. A relação varia de acordo com o tipo de produto, com as características pretendidas e também com a disponibilidade das matérias-primas na região da produção.

Em geral, utilizam-se dois aglomerantes, o cimento e a cal. O cimento Portland comum, que atualmente não é mais produzido, pode ser utilizado, porém os cimentos com alta resistência inicial geram vantagens neste tipo de concreto (FERREIRA, 1987). A cal precisa ser a mais pura possível e rica em CaO para se obter uma melhor reação química. Os trabalhos estudados apresentam a caracterização química fornecida pelo fabricante dos aglomerantes, apresentados na Tabela 1 e na Tabela 2.

Tabela 1 – Caracterização dos cimentos empregados nas pesquisas analisadas.

Referências	1	2	3	4	5	6
SiO ₂	20,90	20,96	21,81	20,85	20,96	20,76
CaO	63,10	63,97	62,66	64,32	63,97	63,50
Al ₂ O ₃	6,90	5,58	4,76	4,98	5,58	6,12
Fe ₂ O ₃	2,10	3,69	4,86	3,52	3,69	3,37
MgO	1,80	1,69	2,47	1,53	1,69	-
MnO	2,30	NI	NI	-	NI	NI
Na ₂ O	0,10	-	NI	0,21	NI	0,30
K ₂ O	0,20	-	NI	0,59	-	1,00
SO ₃	1,90	2,84	1,70	2,60	2,84	0,80

Fonte: (1) Mostafa (2005); (2) Karakurt et al (2010); (3) Laukaitis, A. e Fiks (2006); (4) Wongkeo e Chaipanich (2010); (5) Kurama et al (2009); (6) Laukaitis et al. (2012). (NI – não informado)

Tabela 2 – Caracterização das cales empregadas nas pesquisas analisadas.

Referências	1	2	3
SiO ₂	1,62	3,13	2,05
Al ₂ O ₃	0,61	0,99	1,66
Fe ₂ O ₃	0,23	0,16	0,88
CaO	96,08	81,83	89,24
MgO	1,02	1,40	2,38
R ₂ O	<i>NI</i>	0,59	0,37
SO ₃	0,015	1,03	0,06

Fonte: (1) Karakurt et al (2010); (2) Laukaitis, A. e Fiks (2006); (3) Laukaitis et al. (2012).
(*NI* – não informado)

Nos trabalhos e livros estudados, não foi mostrada a curva de composição granulométrica do agregado natural ou resíduo. A única informação fornecida é a dimensão máxima.

Os agregados usualmente empregados são semelhantes aos da origem das argamassas, com dimensão máxima de 100 µm (WONGKEO e CHAIPANICH, 2010). Também podem ser utilizadas escória e cinza volante para diminuir o consumo de agregados naturais (RILEM, 1993).

Nas bibliografias consultadas percebe-se que não existe um mesmo método de caracterização de agregados e resíduos para produção de CCA. Estas caracterizações variam de trabalho para trabalho conforme o objetivo de cada um. Por exemplo:

- Mostafa (2005) utilizou areia do deserto (Egito) e a caracterizou por difração de raios X. Já para a escória, que ele sugeriu como substituição do AN, realizou difração de raios X (DRX) e microscopia eletrônica de varredura (MEV);
- Narayanan e Ramamurthy (2000) citaram, na sua revisão sobre CCA, que, além da microscopia eletrônica, pode ser realizada análise de imagem automática, porosimetria por intrusão de mercúrio e análise por permeabilidade a gás, para avaliar a estrutura e a porosidade do agregado;
- Fluorescência de raios X (FRX) é outra análise química empregada na caracterização de agregados (KURAMA, H., TOPÇU, I. B. e KARAKURT, C., 2009).

Este levantamento e as comparações entre os trabalhos foram necessários para estabelecer as técnicas de análise que foram empregadas na presente pesquisa.

O pó de alumínio deve ser puro, acima de 90% (WONGKEO e CHAIPANICH, 2010). Outros autores citam um nível mais alto de pureza, como 99,7% (KURAMA, H.,

TOPÇU, I. B. e KARAKURT, C., 2009), apresentando sempre a caracterização do fabricante. Quanto menor a granulometria, ou seja, mais fino o pó, mais rápida se dará a reação e a formação das bolhas (HOLT e RAIVIO, 2005).

A água da mistura deve ser potável, limpa e fresca, para não causar nenhum tipo de interferência na reação química.

2.1.4 Traços e métodos de produção do CCA

Conforme já mencionado, o traço aplicado na produção do CCA interfere nas propriedades e nas características finais do produto. São apresentados, na Tabela 3, alguns traços encontrados na literatura e, na Tabela 4, os métodos de mistura e produção.

Tabela 3 – Traços realizados nas pesquisas estudadas.

Referências	1	2	3	4	5	6
Cimento (%)	10	15	50	55	29	12,5
Cal (%)	25	4,5	3 (dos sólidos)	5	7,2	20,56
AN (areia) (%)	65	80,5	50	40	63,8	66,94
Alumínio (Al) (%)	0,05	<i>NI</i>	0,1 – 0,25	0,2	0,5	0,18 (mistura)
w/s*	<i>NI</i>	21 (0,21)	0,5 – 0,7	29 (0,29)	60 (0,6)	0,54
Agregado – superfície específica	350m ² /kg	-	300- 400m ² /kg	-	-	276m ² /kg
Ø agregados	-	0-4mm 0,5-1mm.	-	100µm	100 µm	-

Fonte: Adaptado de (1) Mostafa (2005); (2) Karakurt et al (2010); (3) Laukaitis, A. e Fiks (2006); (4) Wongkeo e Chaipanich (2010); (5) Kurama et al (2009); (6) Laukaitis et al. (2012). (*NI – não informado*)

*o percentual de água é apresentado em relação ao total de material sólido (w/s).

Cabe ressaltar que alguns dados não são informados pelos autores.

Tabela 4 – Métodos de produção das pesquisas estudadas.

Referências	1	2	3	4	5	6
Mistura	<i>NI</i>	- materiais sólidos (misturar durante 1 min); - acrescentar 50% água (misturar durante 2 min); - acrescentar Al e 50% água.	<i>NI</i>	- cimento, cal e Al (misturar durante 1 min); - acrescentar água (misturar durante 30 seg); - agregado (misturar durante 30 seg); - tempo total da mistura 4 min e 30 seg	- cimento, cal e agregado (misturar durante 1 min); - acrescentar a água (misturar durante 2 min); - acrescentar Al.	- agregado e água (misturar durante 1 min); - acrescentar cimento (misturar durante 1 min); - acrescentar cal (misturar durante 1 min); - acrescentar mistura de Al (misturar durante 1 min).
Produção	- 2 tipos de cal e emprego de escória resfriada ao ar (indústria metalúrgica).	- moldes metálicos pré-aquecidos (40°C); - molde com mistura repouso de 2 horas em estufa a 40°C, para assentamento e volume; - autoclave.	- mistura a 40°C.	- moldes metálicos preenchidos em duas camadas, com intervalo de 10 seg entre elas, em mesa vibratória; - 24 horas em temperatura ambiente; - autoclave.	- moldes metálicos pré-aquecidos; - molde com mistura repouso de 3 horas em estufa a 40°C, para estabilizar o volume; - autoclave.	- 3 horas de repouso temperatura ambiente; - corte; - autoclave.
AUTOCLAVE						
Pressão (atm)	10	12	8	1,36	12	8
Temperatura (°C)	183	180 – 200	<i>NI</i>	126	180 – 200	173
Tempo (horas)	2-4-12-24	8 – 18	11	6	8 – 18	20
Corpos de prova (mm)	40x40x40	40x40x160 20x50x100 100x100x100	340x340x340	50x50x50	70x70x70 40x40x160	70x70x70 40x40x160

Fonte: Adaptado de (1) Mostafa (2005); (2) Karakurt et al (2010); (3) Laukaitis, A. e Fiks (2006); (4) Wongkeo e Chaipanich (2010); (5) Kurama el al (2009); (6) Laukaitis et al. (2012). (NI – não informado)

O fluxo de produção de concreto celular autoclavado está apresentado no diagrama da Figura 3.

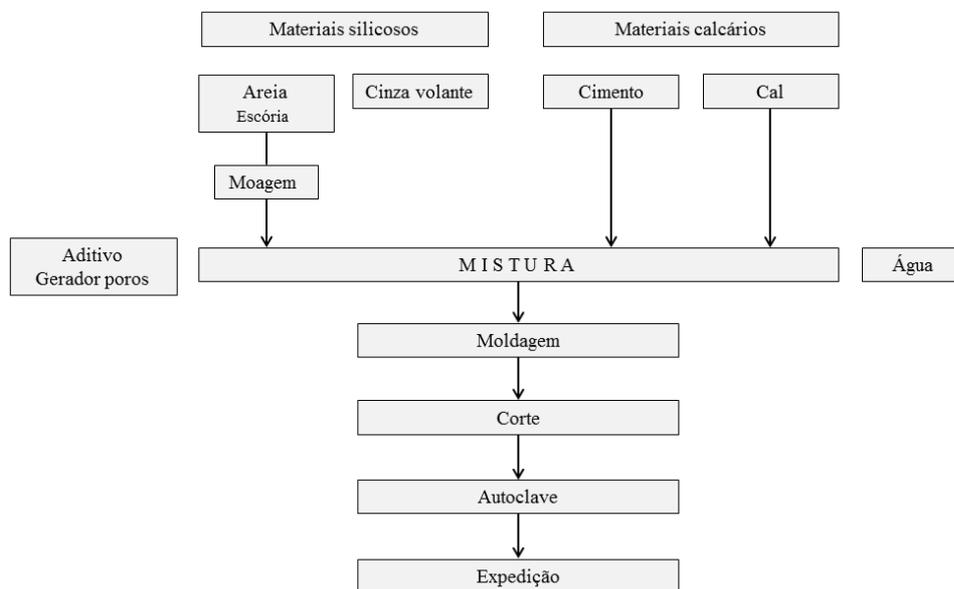


Figura 3 – Diagrama do fluxo da produção CCA.

Fonte: Adaptado RILEM (1993).

2.1.5 Propriedades e características CCA

A partir do CCA, podem ser produzidos componentes de edificações, maciços, com função estrutural ou não (ABNT NBR 13439:1995), geralmente utilizados para a construção de paredes internas e externas, assim como tabelas para lajes pré-fabricadas.

As propriedades e as características positivas dos produtos de CCA são várias. Segundo Mostafa (2005), pode ser citado: baixo consumo de matéria-prima, baixo consumo de energia na produção, baixa densidade, produtos finais leves, menor retração, maior facilidade no uso (mão de obra), alta eficiência energética e maior resistência ao fogo. Quando comparado a outros materiais normalmente empregados na construção civil, essas propriedades fazem do CCA um material mais ambientalmente correto.

Por apresentar uma alta porosidade, cerca de 80% em volume, o concreto celular é um material muito leve com densidade variando entre 300 e 1800 kg/m³, enquanto o concreto convencional apresenta uma massa específica em torno de 2300 kg/m³ (GOUAL et al., 2006). Tikalsky, Pospisil e MacDonald (2004) apontam a resistência a fogo como uma grande vantagem do concreto celular, conferida pela estrutura inorgânica. Outra vantagem proveniente da estrutura interna de poros é o excelente grau de isolamento acústico e térmico, além da boa resistência à absorção de água (NARAYANAN e RAMAMURTHY, 2000).

Assim como as propriedades mencionadas anteriormente, a resistência mecânica do produto está diretamente ligada à rede de poros interna (SCHEFFLER e COLOMBO, 2005). Por isso, a aplicação final do produto determinará o volume de poros necessário para atingir os quesitos densidade, isolamento termo acústico e resistência mecânica (NARAYANAN e RAMAMURTHY, 2000).

Essas características interferem no dimensionamento estrutural das edificações, pois, quando utilizados blocos de CCA, ocorre uma diminuição do carregamento de vigas, pilares e fundações (NARAYANAN e RAMAMURTHY, 2000). Segundo os autores o fato de o tamanho e a distribuição dos poros diminuir o peso próprio do bloco é a causa do menor carregamento devido ao emprego desse material em alvenarias.

Ainda conforme Narayanan e Ramamurthy (2000), alguns ensaios que podem ser realizados para avaliar as propriedades do material, como: análise de densidade através da relação compactidade e porosidade; caracterização química com DRX, MEV, microscopia eletrônica de transmissão (MET); resistência à compressão, módulo de elasticidade, resistência à tração na flexão e retração por secagem a fim de analisar as propriedades mecânicas; e as características funcionais, como absorção de água por capilaridade, durabilidade, condutividade térmica.

a) Resistência à compressão e densidade aparente

Atualmente, no Brasil, existem três normas que tratam da classificação e da avaliação somente de blocos de CCA, são: ABNT NBR 13438:95 Blocos de concreto celular autoclavado (Tabela 5), ABNT NBR 13439:95 Blocos de concreto celular autoclavado – Verificação da resistência à compressão; e ABNT NBR 13440:95 Blocos de concreto celular autoclavado – Verificação da densidade de massa aparente seca, todas estão em projeto de revisão até o final de 2013.

Tabela 5 – Classes, resistência à compressão e densidade de massa aparente seca.

Classe	Resistência à compressão (seca)		Densidade aparente seca
	Valor médio mínimo (MPa)	Menor valor isolado (MPa)	Média (kg/m ³)
C 12	1,2	1,0	≤ 450
C 15	1,5	1,2	≤ 500
C 25	2,5	2,0	≤ 550
C 45	4,5	3,6	≤ 650

Fonte: ABNT NBR 13438:95

b) Absorção

Após análise de estudo sobre a absorção por capilaridade em CCA financiado pela Comissão Europeia, Ioannou, Hamilton e Hall (2008) realizaram experimento para justificar os diferentes resultados encontrados. Segundo os autores, há dois meios de absorção total no CCA: pela matriz cimentícia porosa e pela contribuição da absorção no interior dos poros de ar (Figura 4).

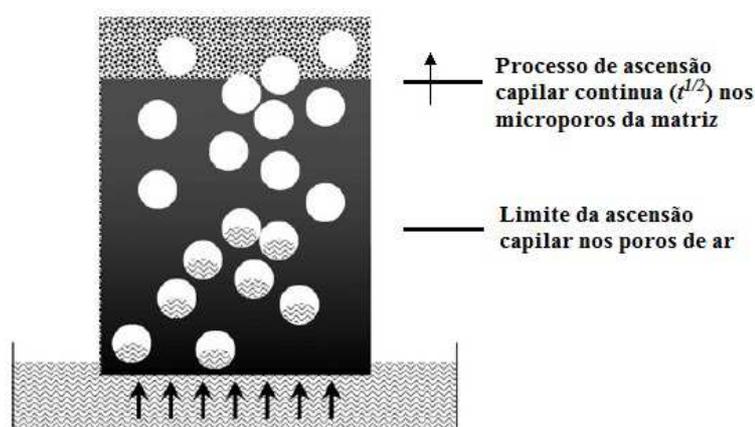


Figura 4 – Mecanismo de absorção capilar.

Fonte: Adaptado de Ioannou, Hamilton e Hall (2008).

c) Microestrutura

De acordo com Kihara (1991), durante a cura hidrotérmica (autoclave), o principal produto oriundo da hidratação acelerada do cimento Portland é o silicato de cálcio hidratado, que possui estrutura similar ao mineral tobermorita. O autor salienta que a formação desse produto advém da reação entre cálcio e sílica, provenientes da hidratação dos silicatos cálcicos do cimento e da adição de cal e material silicoso amorfo à mistura.

Conforme Grutzeck (2005), o concreto celular é um material composto por duas fases distintas, uma gasosa e a outra sólida. Uma é responsável pelas propriedades mecânicas e pelo desempenho, já a outra dita a densidade e a facilidade de manuseio do produto, respectivamente. Mesmo afetando algumas propriedades, a fase gasosa é classificada pelo autor como um enchimento inerte.

Em relação ao volume total do CCA, a fase gasosa é constituída por aproximadamente 50% de poros de ar, formados pela reação química e aprisionados na matriz cimentícia, e por 30% de microporos resultantes da evaporação de água durante o processo de cura. O percentual de poros pode variar de acordo com a quantidade de agente expansor

utilizado na fabricação. O restante do material, cerca de 20% em volume, é composto pela fase sólida (Figura 2).

A fase sólida é constituída pela matriz cimentícia, formada pelos compostos óxidos de cálcio (CaO) e de silício (SiO₂) e água (H₂O) durante o processo de hidratação, comumente denominado como gel C-S-H na área da Engenharia Civil. Segundo Narayanan e Ramamurthy (2000), a sequência da reação é: C-S-H → C-S-H → 11.3 Å tobermorita. Desta reação, surge uma mistura de tobermorita cristalina, semicristalina e amorfa.

No trabalho de investigação da microestrutura do concreto celular, Narayanan e Ramamurthy (1999) utilizaram a Difração de raios X (DRX) e o Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) para avaliar amostras produzidas com areia e cinza volante, com cura úmida e em autoclave. Os resultados de resistência à compressão (Tabela 6) são superiores nos concretos autoclavados, justificados pela melhor cristalinidade dos produtos gerados no processo de hidratação do material (Figura 5).

Tabela 6 – Resistência à compressão em concretos celulares com cura úmida e em autoclave.

Mistura	Cura úmida (MPa)			Autoclavadas (MPa)	
	28 dias	90 dias	150 dias	8 horas	12 horas
Cimento - areia	7,4	7,8	7,9	12,1	14,5
Cimento - cinza volante	5,5	7,5	7,5	7,9	9,3

Fonte: Narayanan e Ramamurthy (1999).

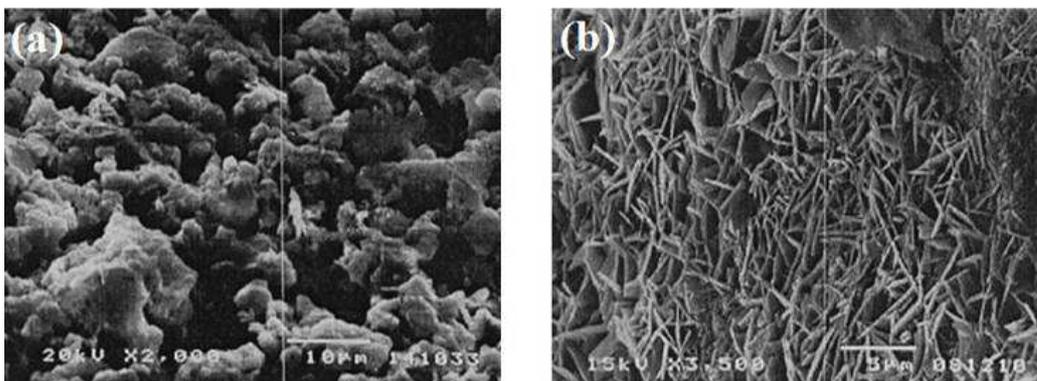


Figura 5 – Microestrutura de concreto celular de mesma composição (cimento-areia); (a) cura úmida e (b) autoclavado.

Fonte: Narayanan e Ramamurthy (1999).

Em um estudo realizado no Japão, Matsushite, Aono e Shibata (1999), utilizando amostras de CCA convencional, caracterizaram a microestrutura e indicaram a existência de uma rede de cristais rígidos, formada por partículas de tobermorita com forma de “cunhas” (Figura 6).

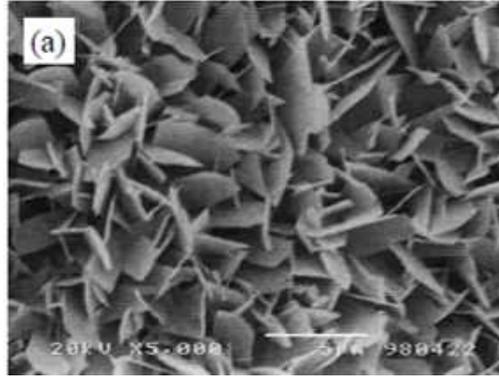


Figura 6 – Microestrutura CCA referência, conforme fabricante.

Fonte: Matsushite, Aono e Shibata (1999).

No processo de cura em temperatura ambiente, com baixa temperatura (menor que 100°C), a estrutura do C-S-H é amorfa. Já com cura em autoclave, essa estrutura tende a se cristalizar, formando a tobermorita, que imprime maior resistência mecânica ao CCA (NARAYANAN e RAMAMURTHY, 2000). Os autores classificam os poros, em função do tamanho e distribuição, como poro artificial, poro entre grupo e poro entre partícula, conforme Figura 7. Pode-se interpretar esta classificação dos poros feita pelos autores da seguinte forma: o poro artificial seria o formado por ar aprisionado ou pela conexão de várias bolhas de hidrogênio, geralmente é o de maior tamanho, conforme Figura 7 (a); os poros entre grupos são aqueles formados a partir do gás hidrogênio liberado na reação do alumínio com a cal e são apresentados na Figura 7 (b); e os poros entre partícula são os vazios entre os cristais de C-S-H (torbemorita), conforme Figura 7 (c).

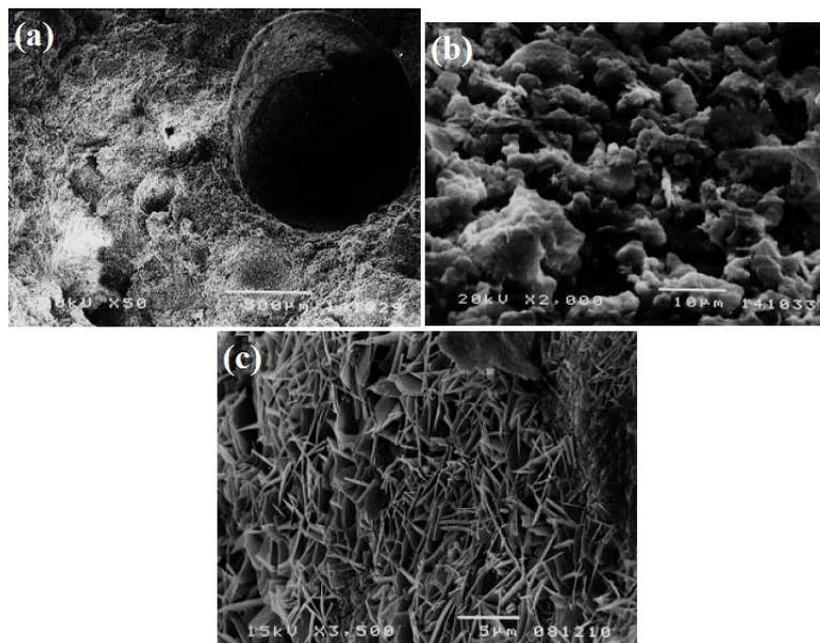


Figura 7 – Rede de poros CCA (a) poro artificial; (b) poros entre grupos; e (c) poros entre partículas.

Fonte: Narayanan e Ramamurthy (2000).

Durante a análise do efeito de carbonatação no CCA, KUS e CARLSSON (2003) realizaram a caracterização da microestrutura e confirmaram a formação de plaquetas de tobermorita (Figura 8), corroborando com os apontamentos em RILEM (1993) e Ioannou, Hamilton e Hall (2008), Figura 9. Os autores atestam que a formação da tobermorita é a principal fase mineral.

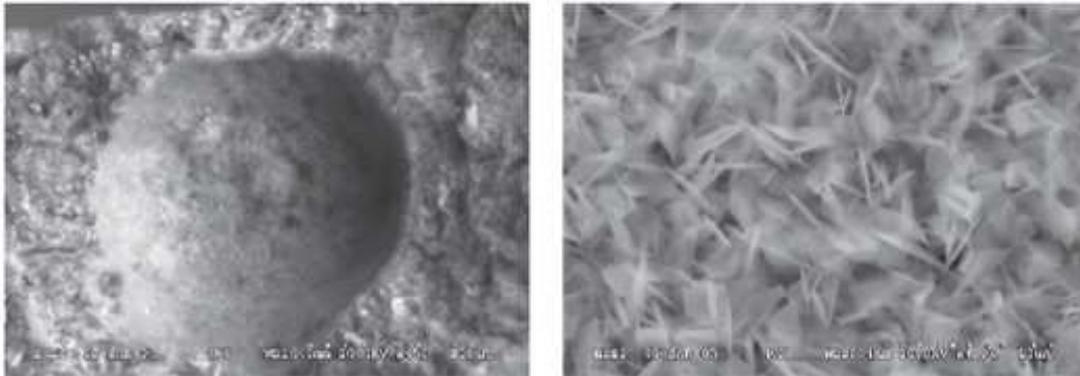


Figura 8 – MEV da seção transversal do poro com ampliação 450x; e plaquetas de tobermorita com ampliação 4.000x.

Fonte: Kus e Carlsson (2003).

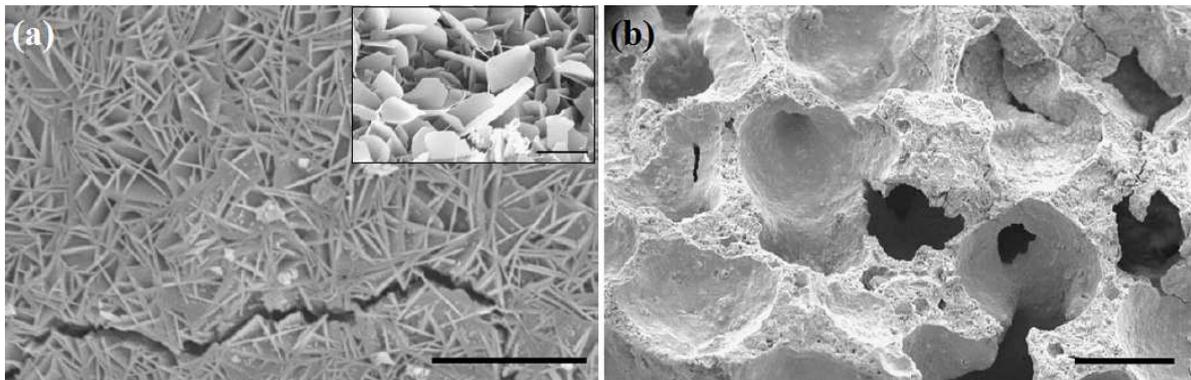


Figura 9 – (a) Microporos entre as plaquetas de tobermorita, detalhe, e fissura nos mesoporos. (b) Macroporos - vista com menor ampliação dos poros de ar aprisionados.

Fonte: Ioannou, Hamilton e Hall (2008).

Em estudo com concreto de pós-reativos, Yazici et al. (2010) analisaram a microestrutura das amostras com o emprego do MEV, conforme Figura 10. No trabalho, os autores comparam a formação cristalina, existente nos poros, com a microestrutura do CCA.

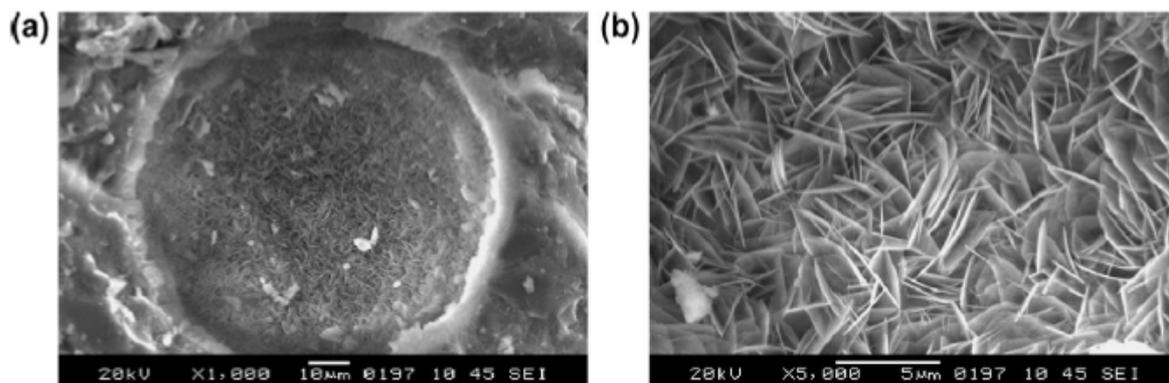


Figura 10 – Concreto de pós-reativos autoclavado
(a) poro esférico com tobermorita no perímetro, (b) ampliação no mesmo poro.
 Fonte: Yazici et al. (2010).

2.2 EMPREGO DE RESÍDUOS NO CCA

No Brasil e no mundo, alguns pesquisadores estão estudando o emprego de diversos resíduos na produção do CCA, desde a substituição parcial até a total do agregado. A substituição do agregado natural por escória resfriada ao ar teve um resultado positivo, pois o seu emprego leva a uma redução da temperatura e do tempo na autoclave e, desta forma, leva a uma otimização da produção (MOSTAFA, 2005). Infelizmente, como em outras citações, o autor, em seu trabalho, não apresenta os valores obtidos de resistência à compressão.

Outros estudos internacionais sugerem diversas substituições, incorporações e misturas. Hauser, Eggenberger e Mumenthaler (1999) avaliaram a substituição do aglomerante cal por cinza volante, oriunda da indústria de celulose. Os resultados apontaram que o uso desse resíduo reduz a resistência do produto, justificada pela não cristalização total do C-S-H, não formando a tobermorita.

Já Narayanan e Ramamurthy (1999) propuseram dois tipos de cura e a substituição do agregado natural por cinza volante; as amostras com o emprego de cinza têm sua resistência mecânica significativamente reduzida devido à formação de produtos menos cristalinos, porém as cinzas ajudam no refinamento da formação dos poros. Em outro estudo em que os autores fazem uma revisão sobre o assunto, indicam que a substituição parcial dos aglomerantes ou agregados por cinza de carvão e resíduo de ardósia (NARAYANAN e RAMAMURTHY, 2000) representa uma queda na resistência mecânica, mas que a destinação final do material é importante para se avaliar a viabilidade do emprego desses resíduos no concreto celular.

A escória resfriada a ar, oriunda da indústria metalúrgica, é outro resíduo testado como substituto parcial do agregado natural (MOSTAFA, 2005). Nessa pesquisa, também

foram examinados dois tipos de cal com diferença nos teores de CaO. Os resultados demonstraram a viabilidade da substituição, uma vez que o emprego da escória refrigerada a ar acelera a formação da tobermorita, responsável pela resistência mecânica do CCA, o que implica um menor tempo de autoclavagem, diminuindo o custo de produção. Como possível ponto negativo, o autor lembra a coloração escura dos produtos com emprego da escória.

Testes com resíduos oriundos da queima de detritos urbanos, por serem ricos em alumínio, foram avaliados como substitutos do agente aerador e agregado por Holt e Raivio (2005). Os autores concluíram que é viável a substituição de 10% do agregado natural pelo resíduo; para percentuais maiores, deverão ser realizados outros ajustes na composição da mistura. Bons resultados obtidos em amostras sem a adição do pó de alumínio viabilizam a fabricação sem este componente, porém a proposta requer mais estudo.

Outro resíduo que pode ser empregado na fabricação de CCA é a cinza de carvão (KURAMA, H., TOPÇU, I. B. e KARAKURT, C., 2009). Os autores ressaltam que, além do aumento na resistência mecânica, devido à atividade pozolânica, a cinza reduz o peso final do produto. Os melhores resultados foram conseguidos com a substituição de 50% do agregado natural pela cinza.

A substituição do agregado natural em 50% de zeólito natural, partículas maiores, forma estruturas C-S-H mais densas, acarretando uma resistência superior ao referência (100% AN) (KARAKURT, CENK, KURAMA, HALDUN e TOPÇU, I. B., 2010). Os autores também assinalam que percentuais maiores também podem ser empregados dependendo das propriedades finais requeridas pelo uso do CCA. Os resultados ainda demonstram que a produção sem o pó de alumínio também pode ser viável, demandando um aprofundamento maior na pesquisa.

Wongkeo e Chaipanich (2010) apresentaram resultados positivos, semelhantes ao referência, em sua pesquisa para um percentual de até 20% de substituição no consumo de cimento por cinza residual de carvão, empregando ainda 5% de sílica ativa para efeito pozolânico.

A incorporação de fibra de carbono melhora a resistência mecânica do CCA (LAUKAITIS, ANTANAS et al., 2012). Foi considerado pelos autores um tratamento mecânico, ajudando na fase da cristalização da tobermorita.

O emprego de escória de alto forno e rejeito de cobre em substituição à cal foi avaliado por Huang et al. (2012). Esses resíduos foram testados por possuírem elevado teor de

CaO e MgO. Algumas amostras com determinado teor de incorporação apresentaram resistência igual ou superior ao exigido na norma nacional chinesa.

Também existe, no Brasil, estudo para a substituição do agente expensor – produto mais valorizado da mistura – por resíduos da indústria metalúrgica. Isso, porém, está em processo de patente, e nada foi publicado até o momento.

2.3 AGREGADO RECICLADO DE CONCRETO

O resíduo de concreto tem diversas fontes de geração, sendo provenientes de construções e demolições, concreteiras ou fábricas de pré-moldado e pré-fabricado. Os resíduos oriundos de concreteiras ou fábricas têm um controle superior quando comparado aos de construções e ainda mais de demolições. Esses resíduos apontam alto potencial para reciclagem, devido a homogeneidade e ausência de contaminantes (BUTTLER e CORRÊA, 2006).

Conforme os autores, Buttler e Corrêa (2006), os agregados reciclados derivados de concreto e na fração graúda, possuem massa específica inferior aos naturais da mesma fração. Este fator influencia na massa específica do novo concreto, que por sua vez acarreta diminui a resistência à compressão.

Existem diversas formas de cominuição desse tipo de resíduo, geralmente são empregados britadores de mandíbula, de impacto, giratório e de cone, britador de rolo e moinho de martelo (HEINECK, 2012), originando fragmentos com granulometria e forma diferente de acordo com o equipamento utilizado.

Segundo Mallmann (1996), a forma e a dimensão do grão, assim como a distribuição granulométrica dos agregados, não exercem grande significância nos resultados de resistência mecânica, em produtos curados em autoclave. Em sua pesquisa, o autor testou diferentes materiais e resíduos com forma e dimensão diferentes e concluiu que não há significância em relação à resistência do produto final.

Em alguns estudos produzindo novos concretos, como Werle (2010) e Troian (2010) apontam para a possibilidade de substituição do agregado natural por reciclado de concretos, na ordem de até 50%. A caracterização realizada nos três tipos de ARC (WERLE, 2010), com resistências diferentes, identificou a presença de argamassa aderida aos grãos da fração graúda. Justificando em relação à absorção de água, que quanto maior o teor de ARC maior será a absorção, a diferença encontrada chegou 36% com relação ao concreto referência.

A relação entre a resistência mecânica do concreto original com o teor de fino ($<150\ \mu\text{m}$) e a porosidade deste agregado reciclado é relatada por Angulo et al. (2013). Ainda é referido pelos autores que, quanto menor a resistência do concreto, mais porosa será a mistura de cimento (agregado miúdo), enquanto o teor de mistura de cimento é superior nos finos gerados a partir de concretos com resistências mecânicas maiores.

Algumas metodologias para o melhor beneficiamento do ARC, fração finos, são propostas e apresentadas por Angulo (2013), como: remoção da argamassa, arredondamento de partícula e redução da porosidade utilizando o tratamento térmico.

3 ESTUDO-PILOTO

Seguindo os traços apresentados na revisão de literatura compilados na Tabela 3, fizeram-se, inicialmente dois estudos-piloto com materiais existentes no LMC da Unisinos. Para isso, foram selecionados moldes cilíndricos metálicos, com diâmetro de 5 cm e altura de 10 cm, pela facilidade no controle da expansão e na desmoldagem sem danificar as amostras. Com as amostras obtidas e as dificuldades encontradas nos primeiros testes, foram realizados outros traços com base nos levantamentos feitos na revisão bibliográfica.

O primeiro estudo foi realizado com materiais e nas condições disponíveis no LMC – Unisinos, em São Leopoldo, com cura à temperaturas de 21 e 40°C. O segundo foi desenvolvido nas dependências do Laboratório de Meio Ambiente da Cientec, em Porto Alegre, com cura em autoclave. Já o terceiro estudo avaliou, principalmente, o tempo de cura e também outros parâmetros, como traço, materiais, moldes, moldagem e desmoldagem, embalagem e transporte.

3.1 ESTUDO 1

Os materiais empregados na primeira etapa foram cimento CP II-Z, cal CH I (dolomítica), agregado natural (AN) com dimensão máxima 150µm, alumínio em pó com pureza de 97% e água potável. A escolha dos materiais se deu pela disponibilidade no laboratório. Todas as misturas foram realizadas dentro de uma sala climatizada com controle de temperatura e umidade.

Estudou-se neste primeiro estudo, cinco traços, conforme proporcionamento apresentado na Tabela 7. Para executar a mistura do Traço 1 (T1), empregou-se uma quantidade de materiais secos (cimento, cal e AN) de 500 g.

Tabela 7 – Traços realizados no Estudo-Piloto 1.

Traço	Fonte	Cimento (%)	Cal (%)	AN (areia) (%)	Al (%)	Relação água/sólidos
T1	Wongkeo e Chaipanich (2010)	55	5	40	0,2	0,29
T2	Kurama et al (2009)	30	7	63	0,5	0,60
T3	-----	40	7	53	0,3	0,324
T4	-----	40	10	50	0,3	0,32
T5	-----	40	5	55	0,3	0,32

Conforme a Figura 11, os materiais foram separados e pesados em recipientes distintos. O processo de mistura foi realizado manualmente (Figura 12). A sequência de mistura foi:

- - Homogeneização da mistura seca de cimento, alumínio e cal durante um minuto;
- - Acréscimo de água com a mistura inicial em movimento em 30 segundos e realização de mistura por mais 30 segundos;
- Ainda misturando, acréscimo de areia durante 30 segundos.

A mistura se dá no tempo total de quatro minutos e 30 segundos, e os moldes são preenchidos imediatamente após esse período.



Figura 11 – Materiais separados e pesados conforme traço.



Figura 12 – Mistura manual dos materiais.

Não sendo conhecida a capacidade de expansão da mistura com os materiais empregados, determinaram-se três medidas para preenchimento dos moldes, sendo elas: 2,5; 7 e 10 cm. O controle foi realizado com o auxílio de um delimitador da altura de preenchimento, posicionando a parte inferior de uma régua metálica no alinhamento da altura a ser preenchida. Logo em seguida, os moldes foram identificados (Figura 13 a e b). Com um cronômetro, acompanhou-se o processo de expansão (Figura 14). Algumas adaptações foram realizadas com relação ao preenchimento e à dimensão do molde, com relação ao método da referência bibliográfica do Traço 1 (WONGKEO E CHAIPANICH, 2010). A cura das

amostras foi realizada em sala climatizada, com temperatura de $21\pm 2^{\circ}\text{C}$ e umidade relativa de $60\pm 5\%$.



Figura 13 – (a) Preenchimento do molde respeitando medidas determinadas e (b) identificação.



Figura 14 – Acompanhamento da expansão do Traço 1.

Da mesma forma que no Traço 1, para execução do Traço 2 (T2), foram necessárias algumas adaptações em relação à referência bibliográfica no que diz respeito à forma do molde, ao tempo total de mistura e ao tipo de cura, como já apresentado na Tabela 3. A mistura do Traço 2 também foi realizada com 500 g de material seco e com procedimento de mistura conforme segue:

- Mistura de cimento, cal e areia durante um minuto;
- Acréscimo de água e mistura por dois minutos;
- Adição de pó de alumínio.

O tempo total de mistura também foi de quatro minutos e 30 segundos. Esse tempo total não é detalhado no trabalho utilizado como referência, por isso foi estipulado o tempo do traço anterior.

O preenchimento dos moldes seguiu o Traço 1. As diferenças entre o proporcionamento dos dois primeiros traços é significativa, na ordem de duas vezes, principalmente entre as relações água/sólidos e entre os teores de pó de alumínio. Além dessas duas grandes diferenças, outra que pode ser apontada é a sequência de mistura dos materiais.

Aparentemente o Al, no Traço 2, não ficou distribuído de forma homogênea como no Traço 1. No preenchimento das amostras do Traço 2, a mistura apresentou excesso de água, e a expansão ocorreu sem controle, com volume aparente de bolhas superior ao primeiro traço, conforme Figura 15. O procedimento de cura adotado nos Traços 1 e 2 foi o mesmo.



Figura 15 – Moldagem do Traço 2.

Após os dois primeiros traços realizados, foi proposto um terceiro, sempre com base nas referências bibliográficas, compiladas na Tabela 3. O Traço 3 (T3) do primeiro estudo-piloto seguiu a ordem e o tempo de mistura do Traço 1, diferenciando-se pelo proporcionamento dos materiais e pela exposição das amostras a um ambiente de cura com temperatura mais elevada, conforme apresentado em determinados trabalhos.

Na bibliografia consultada, para a cura inicial, antes da desmoldagem, foram testadas duas formas de cura. Na maioria dos trabalhos, entre eles o de (WONGKEO e CHAIPANICH, 2010), as misturas permaneciam, após a moldagem, em temperatura ambiente por 24 horas. Em outros dois estudos (Kurama, Topçu, e Karakurt, 2009; e Karakurt et al, 2010), a fim de controlar e estabilizar a expansão, as misturas foram depositadas em formas pré-aquecidas a 40°C, mantendo-se por três horas em estufa também a 40°C.

A quantidade de material seco para executar o Traço 3 foi de 1000 g, pois foram testados os dois tipos de cura inicial apresentados anteriormente. Três amostras curaram ao ar (Figura 16), e outras três foram moldadas em moldes pré-aquecidos a 40°C e deixadas na estufa na mesma temperatura por uma hora (Figura 17). A diminuição do tempo, uma hora em vez de três, conforme bibliografia, é justificada pelo fato de ser observado que, após os primeiros 30 minutos em estufa, já ocorria a estabilização da expansão das amostras.



Figura 16 – Amostras do terceiro traço com cura ao ar.



Figura 17 – Amostras do terceiro traço com cura em estufa a 40°C, durante uma hora.

A amostra do Traço 3, curada em estufa, com menor altura de preenchimento (2,5 cm), apresentou uma grande diferença de expansão em relação às amostras preenchidas até outras alturas (5 e 7 cm). Isso pode ser decorrência de que esta amostra, de seis moldadas com a mistura do Traço 3, foi a última a ser preenchida, sendo o maior intervalo de tempo decorrido desde o final da mistura. No momento da sua moldagem, a mistura já estava começando a expandir.

Ainda para comparação dos tipos de cura inicial (ao ar e em estufa), foi elaborado o Traço 4 (T4), empregando-se 500 g de material seco, alterando-se o consumo de pó de alumínio e cal, bem como o tempo total de mistura, reduzindo-o em um minuto. A redução do tempo foi adotada para evitar que os moldes fossem preenchidos com a mistura já em expansão.

As amostras do Traço 4 apresentaram, após uma análise qualitativa, expansão e aspecto dos poros semelhantes às do Traço 3. Dessa forma, decidiu-se testar um último traço neste primeiro estudo. O Traço 5 (T5) seguiu todos os procedimentos adotados no anterior, modificando-se apenas a proporção da cal.

Aparentemente este foi o traço em que a relação cal/pó de alumínio proporcionou uma aparência macroscópica à amostra endurecida semelhante à aparência dos blocos de CCA comerciais, disponíveis no Laboratório.

Fica evidente que a expansão das amostras do Traço 2 foi superior, conforme apresentado na Figura 18, em comparação com as amostras do Traço 1, porém o segundo ficou mais frágil do que o primeiro, pois se desagregava facilmente. É possível que a fragilidade tenha sido ocasionada pelo maior volume de água e de alumínio.

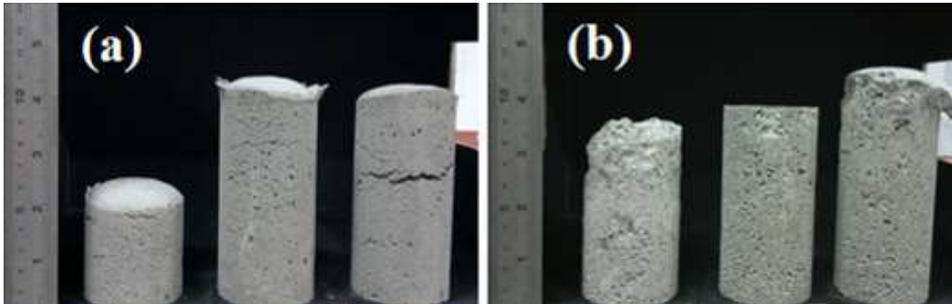


Figura 18 – Amostras (a) Traço 1 e (b) Traço 2. Sequência de preenchimento (2,5; 7 e 10 cm).

A Figura 19 exibe as amostras do Traço 3. Pode-se observar, em b, que a amostra preenchida apenas com 2,5 cm de mistura atingiu uma altura maior, pelo fato da pré-expansão no momento de moldagem.

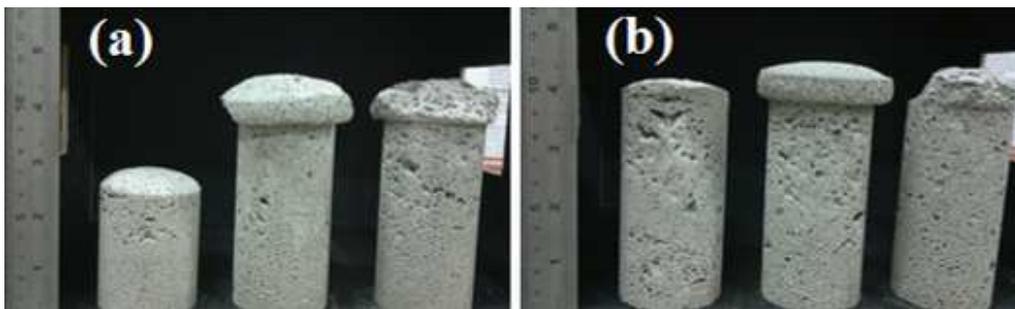


Figura 19 – Amostras Traço 3 (a) curadas ao ar e (b) curadas em estufa, durante uma hora. Sequência de preenchimento dos moldes (2,5; 7 e 10 cm).

As Figura 20 e Figura 21 apresentam as amostras do Traço 4 e do Traço 5 respectivamente. Não se observam diferenças visíveis entre as amostras com cura ao ar e cura em estufa. A expansão e o controle do volume são semelhantes, havendo pequenas distinções não significativas.

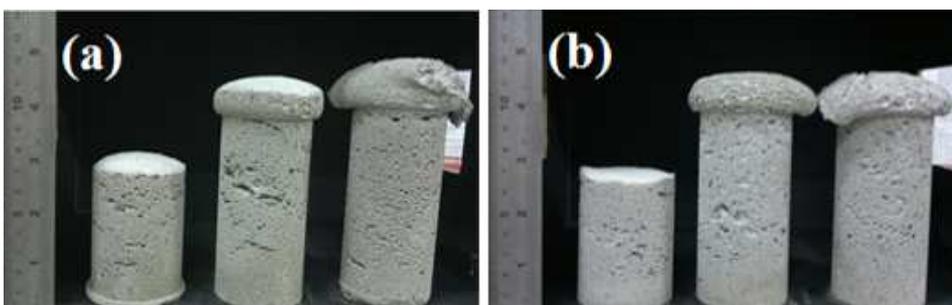


Figura 20 – Amostras Traço 4 (a) curadas ao ar e (b) curadas em estufa, durante uma hora. Sequência de preenchimento (2,5; 7 e 10 cm).

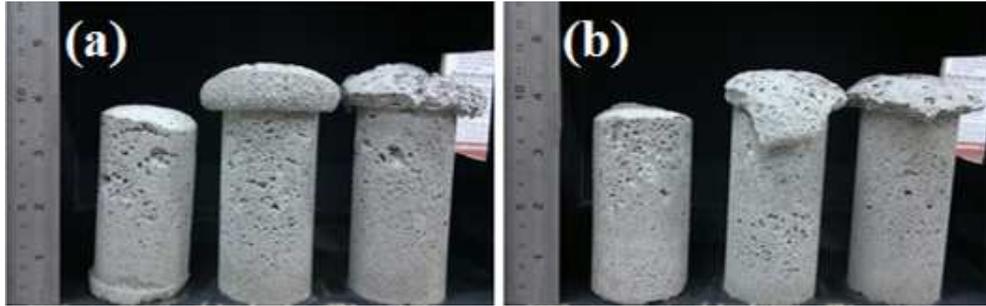


Figura 21 – Amostras Traço 5 (a) curadas ao ar e (b) curadas em estufa, durante uma hora. Sequência de preenchimento (2,5; 7 e 10 cm).

Após a análise qualitativa das amostras, chegou-se à conclusão de que o Traço 5 apresenta visualmente a melhor aparência, a melhor estabilidade da expansão e o menor consumo de cimento em ambos os tipos de cura. Na Tabela 8, expõem-se as resistências das amostras com cura ao ar ou em estufa, produzidas no Estudo 1.

Tabela 8 – Resistência à compressão amostras de concreto celular.

Traço	Altura de enchimento (cm)	Tipo de cura	Peso (g)	Altura (mm)	Área (mm ²)	Volume (mm ³)	Resistência à compressão (MPa)
T4	7	Ar	123,43	98,03	1963,50	192481,45	0,6
T4	7	Estufa	108,23	96,93	1963,50	190321,61	0,5
T5	7	Ar	114,46	97,04	1963,50	190537,59	0,5
T5	7	Estufa	94,53	87,16	1963,50	171138,26	0,5
T4	10	Ar	114,50	95,70	1963,50	187906,51	0,5
T4	10	Estufa	119,48	98,48	1963,50	193365,03	-
T5	10	Ar	113,63	92,32	1963,50	181269,90	0,4
T5	10	Estufa	108,44	98,65	1963,50	193698,82	0,4

3.2 ESTUDO 2

O segundo estudo-piloto teve como objetivo avaliar os Traços 4 e 5 (Tabela 7), com cura em autoclave. O cimento utilizado foi o CP V ARI, conforme referências. As misturas foram realizadas com o mesmo procedimento dos Traços 4 e 5. O preenchimento dos moldes foi realizado com o mesmo volume em todos os moldes, uma vez que a expansão já foi avaliada. A mistura, a cura inicial e a autoclavagem foram realizadas no Laboratório do Meio Ambiente, da Cientec, conforme Figura 22 e Figura 23.



Figura 22 – Cura inicial após preenchimento dos moldes.

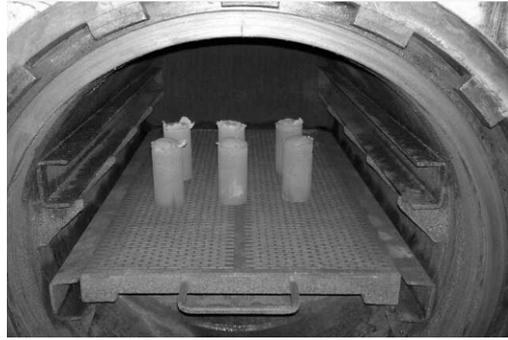


Figura 23 – Amostras na autoclave, antes do processo de cura.

Durante o processo de mistura deste segundo estudo, observou-se que o pó de alumínio, acondicionado em um pacote plástico, não se desprende por completo da embalagem, o que resultou em uma menor expansão da mistura.

As amostras ficaram na autoclave sob pressão de 8,5 atm, a uma temperatura de 170 °C durante duas horas. O processo total, incluindo a pressurização e despressurização, levou cerca de cinco horas. O equipamento levou aproximadamente uma hora para atingir a pressão de 8,5 atm e cerca de duas horas para voltar à pressão ambiente e possibilitar a abertura do equipamento.

As Figura 24 e a Figura 25 apresentam as amostras antes e depois do processo de cura em autoclave; as resistências das amostras de CCA são expostas na Tabela 9.

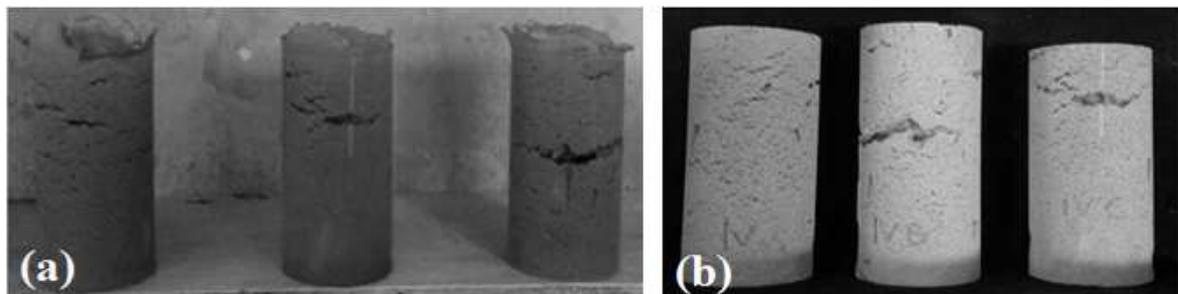


Figura 24 – Amostras do Traço 4 (a) antes e (b) depois da autoclavagem.

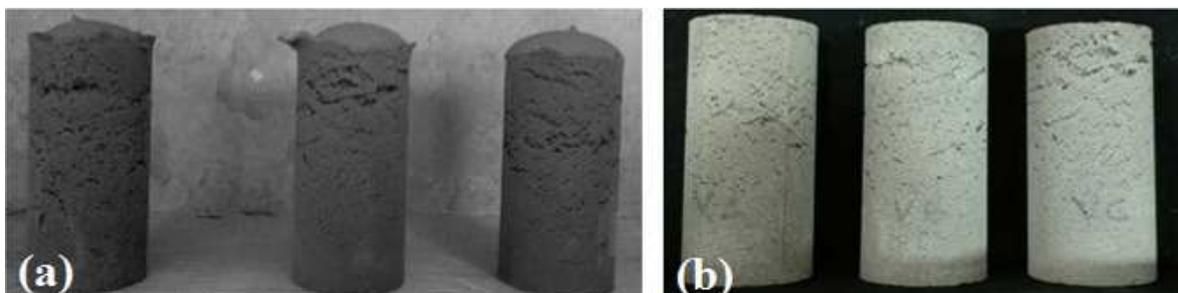


Figura 25 – Amostras do Traço 5 (a) antes e (b) depois da autoclavagem.

Tabela 9 – Resistência à compressão das amostras de concreto celular autoclavado.

Traço	Peso (g)	Altura (mm)	Área (mm²)	Volume (mm³)	Resistência à compressão (MPa)
T4 A	141,095	95,86	1963,50	188220,67	0,82
T4 B	141,990	99,73	1963,50	195819,40	0,49
T4 C	135,403	93,03	1963,50	182663,98	0,99
T5 A	141,777	99,50	1963,50	195367,79	1,34
T5 B	140,534	98,08	1963,50	192579,63	0,95
T5 C	141,059	98,33	1963,50	193070,50	1,05

3.3 ESTUDO 3

No terceiro estudo, foram testados: traço referência, logística e cronograma da produção das amostras, tempo de cura, formas metálicas e realização do ensaio de resistência à compressão.

Após análise química quantitativa dos materiais constituintes, realizou-se o balanço de massas destes, a fim de ajustar o Traço 5 (T5) quimicamente para a melhor proporção de cada material. Assim, foi estabelecido o traço de referência, atingindo a resistência mínima estabelecida para CCA pela ABNT NBR 13438:95.

Com a orientação da doutora em engenharia e engenheira química Lizete Senandes Ferret, coordenadora do Laboratório de Termoanálise da Cientec, montou-se a estequiometria de cal e alumínio para obter-se a proporção necessária de cal (livre CaO) para melhor rendimento da reação com o pó de alumínio. Segundo o balanço de massas a cada 54g de pó de alumínio são necessários 74 g de CaO livre na mistura, conforme Equação 1.

Com base nas caracterizações apresentadas, o cimento existente no mercado brasileiro que mais se assemelha aos empregados nos trabalhos é o CP V ARI. A cal disponível no mercado com composição química semelhante é a cal calcítica hidratada, rica em CaO e com baixo teor de MgO.

O traço definitivo é apresentado na Tabela 10, em que agregado e cimento compõem 100%; já a cal, alumínio em pó e a água são proporcionais sobre os 100% composto por agregado e cimento.

Tabela 10 – Traço definitivo.

Agregado	Cimento	Cal	Alumínio	Água
67%	33%	0,45%	0,3%	32%
335 g	165 g	2,25 g	1,5 g	160 g

O processo de produção da mistura e o preenchimento dos moldes foram realizados no LMC (Unisinos) onde permaneceram em cura inicial por aproximadamente 20 horas. As amostras foram desmoldadas, identificadas, embaladas em plástico-bolha e

armazenadas em caixa plástica para transporte até a Cientec, onde foi realizado teste de tempo de cura em autoclave (Figura 26). Os tempos testados foram 2h, 4h, 6h e 8h sob pressão de 8,5 atm. Ao término do processo de cura, as amostras foram coletadas, embaladas e armazenadas em caixas plásticas (Figura 27) para o transporte até o LMC (UNISINOS). Neste local, foram preparadas para o ensaio de resistência à compressão, conforme especificações (Figura 28).

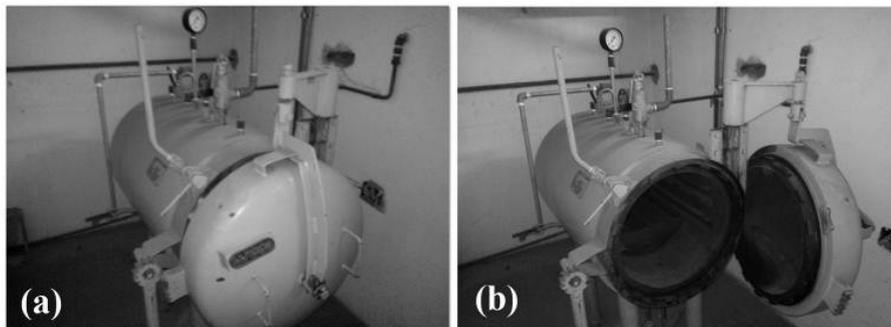


Figura 26 – (a) Vaso de pressão, tipo autoclave, fabricante Weco S/A; (b) parte interna com capacidade máxima de 0,2 metros cúbicos.



Figura 27 – Caixa plástica para armazenamento das amostras.

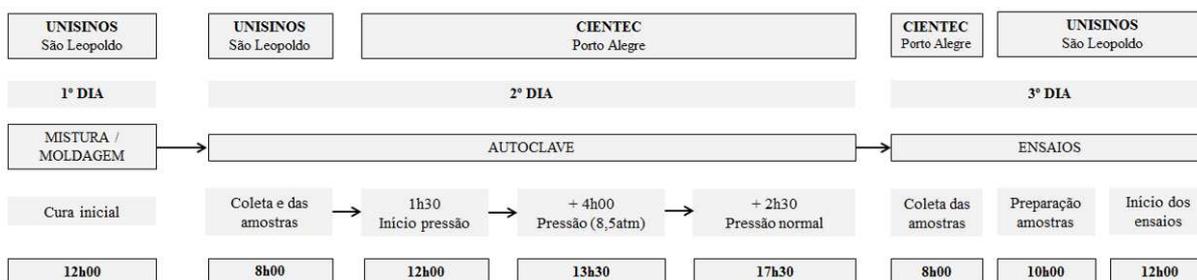


Figura 28 – Logística e cronograma da produção das amostras de CCA.

Os moldes metálicos, com forma prismática de 40 x 40 x 160 mm, foram compartimentados em quatro partes, conforme Figura 29. As amostras cúbicas (1 a 6) foram utilizadas para os testes de resistência à compressão e, com isso, avaliar a influência do tempo de cura em autoclave.

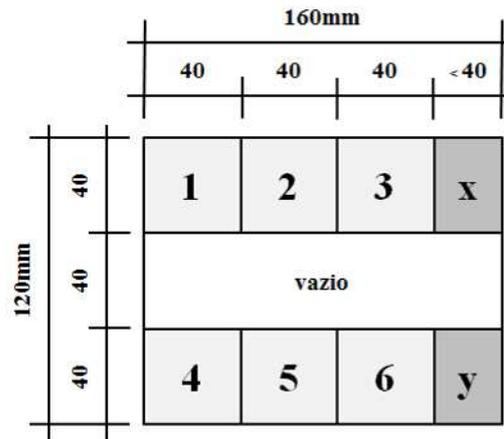


Figura 29 – Moldes prismáticos metálicos com compartimentações.

Para cada teste de tempo foram moldados seis corpos de prova de 40 x 40 x 40 mm e dois com menores dimensões (Figura 30). As amostras foram ensaiadas com a idade de 48 horas após moldagem, variando o tempo de autoclavagem. Os resultados estão expressos na Tabela 11.



Figura 30 – Amostras antes do processo de cura em autoclave.

Tabela 11 – Resultados de resistência à compressão das amostras autoclavadas em 2, 4 e 6 horas.

Amostra	Tempo autoclavagem (horas)	Resistência (MPa)	Média (MPa)
A2	2	0,73	0,79
B2	2	1,0	
C2	2	0,64	
D2	2	0,78	
E2	2	0,79	
F2	2	0,78	
A4	4	0,87	1,13
B4	4	0,97	
C4	4	1,29	
D4	4	0,92	
E4	4	1,59	
A6	6	0,94	1,52
B6	6	1,89	
C6	6	1,30	
D6	6	1,48	
E6	6	1,98	

Os resultados do ensaio com autoclavagem por oito horas foram descartados, pois durante o ensaio a borracha de vedação da autoclave rompeu, ocasionando um vazamento de pressão e água. Ao término dos ensaios de resistência à compressão, as amostras apresentaram resistências abaixo do esperado, foi então realizada uma inspeção no equipamento de cura, que constatou a queima de uma das três resistências.

Com os dados do ensaio de resistência, pode-se apontar o crescimento da resistência conforme o maior período de autoclavagem, conforme Figura 31.

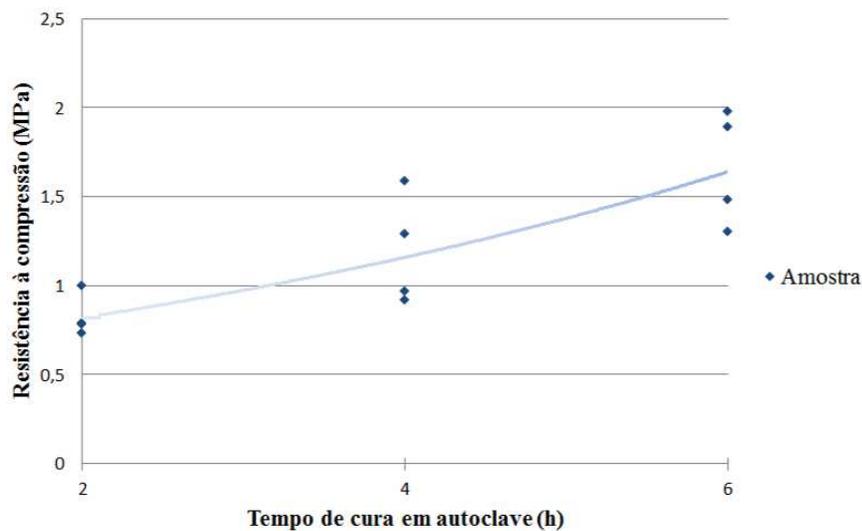


Figura 31 – Influência tempo de cura em autoclave.

Neste terceiro estudo, notou-se a necessidade de uma melhor vedação das extremidades da forma metálica e também do corte do topo da amostra durante o período de cura inicial, a fim de evitar a quebra desta durante a desmoldagem.

Foi analisada a microestrutura das amostras, para avaliar a influência do tempo de cura em autoclave. A Figura 32 apresenta as micrografias realizadas nas amostras curadas em tempos diferentes. Na Figura 32(a), com duas horas de cura, percebe-se que a microestrutura ainda não apresenta uma morfologia bem definida dos cristais, possivelmente pelo pouco tempo de cura; já, na Figura 32(b), conforme tratado nas referências, a formação é semicristalina, com alguns cristais desenvolvidos entre a mistura pouco cristalina, nesta magnificação.

Já a amostra curada durante seis horas, Figura 32(c), apresentou a cristalização de quase toda a superfície analisada, com estruturas mais desenvolvidas em tamanho e forma, mesmo assim existem alguns pontos onde os cristais ainda se desenvolvendo. Como já mencionado, o vazamento ocorrido prejudicou o desenvolvimento das amostras curadas

durante oito horas, e, ao analisar a microestrutura da Figura 32(d), nota-se a presença de cristais em formação incrustados na mistura parcialmente anidra.

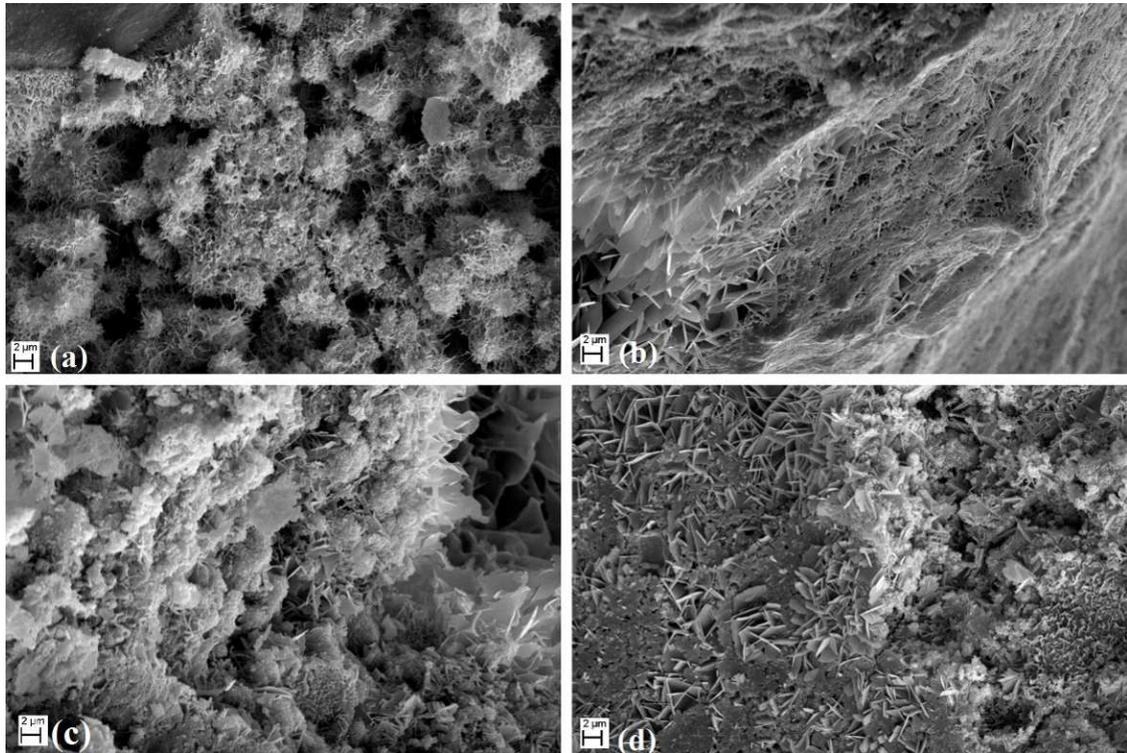


Figura 32 – Micrografias das amostras conforme tempo de cura em autoclave: (a) 2 horas; (b) 4 horas; (c) 6 horas; e (d) 8 horas. Aumento de 5000x em todas as imagens.

Os estudos serviram para ajustes do processo de produção, seleção dos equipamentos e otimização da logística, sendo estes os pontos-chave para a definição da metodologia que foi empregada na produção e cura das amostras de CCA do programa experimental desta pesquisa.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

O programa experimental foi desenvolvido visando alcançar os objetivos propostos. Para tanto, foram definidos fatores de controle, variáveis de resposta, materiais, métodos, quantidades e cronograma. As misturas, as moldagens, os ensaios e as análises foram realizados nos Laboratórios da Unisinos, e o processo de cura (autoclave), no Laboratório de Meio Ambiente da Cientec.

4.1 PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTO

4.1.1 Fatores e níveis de controle

O fator de controle de substituição de agregado natural (AN) por agregado reciclado de concreto (ARC) foi nos teores 0%, 25% e 50%.

A idade de ensaio de resistência à compressão foi realizada em dois níveis de estudo, sendo eles 48 e 72 horas após a moldagem.

Para o ensaio de absorção, as amostras ficaram em estufa a 60°C, até a constância de massa.

4.1.2 Fatores fixos

Os fatores fixos referem-se aos materiais empregados na pesquisa, tais como:

- **Aglomerantes** – cimento e cal, ambos provenientes de um mesmo fabricante e lote;
- **Traço** – único, definido pela estequiometria da cal e do alumínio;
- **Tempo e pressão de autoclave** – apenas o tempo de seis horas à pressão de 10 atm de exposição à autoclave;
- **Temperatura e umidade na mistura** – a mistura do CCA em sala com temperatura regulada para $21 \pm 2^\circ\text{C}$ e umidade de $60 \pm 5\%$.

4.1.3 Fatores não controláveis

Alguns fatores não podem ter sido controlados, como as condições ambientais para transporte e execução dos ensaios de resistência à compressão. Para contornar a questão de condição de transporte, os corpos de prova foram acondicionados em caixas plásticas com tampa, procurando proporcionar uma boa vedação.

4.1.4 Variáveis de resposta

As variáveis de resposta investigadas são:

- Densidade de massa aparente seca;
- Resistência à compressão;
- Absorção de água capilar;
- Porosidade efetiva.

4.2 MATERIAIS

Os materiais selecionados para a pesquisa têm características semelhantes aos dos trabalhos apresentados na revisão bibliográfica. A caracterização contemplou a distribuição granulométrica por granulometria laser; a análise química: qualitativa e quantitativa por fluorescência de raios X; a análise mineralógica por difração de raios X. Foi realizada apreciação da microestrutura por análise de imagens através de microscopia eletrônica de varredura.

4.2.1 Cimento

O cimento utilizado na pesquisa foi o CP V ARI, de alta resistência inicial, de um único lote. Adotou-se esse tipo de cimento por conter uma pequena fração de adição mineral não ativa. Além disso, usualmente é o tipo aplicado na pré-fabricação em concreto e na produção de blocos, pois permite a desmoldagem em baixas idades.

A caracterização química qualitativa e quantitativa do cimento foi realizada no Laboratório de Caracterização e Valorização de Materiais (LCVM) da Unisinos, utilizando a técnica de fluorescência de raios X por dispersão de energia (ED-XRF) no equipamento EDX-720 SHIMADZU. O ensaio de perda ao fogo foi realizado no LMC – Unisinos, conforme a ABNT NBR NM 18:2004. Os resultados são apresentados na Tabela 12 e na Tabela 13.

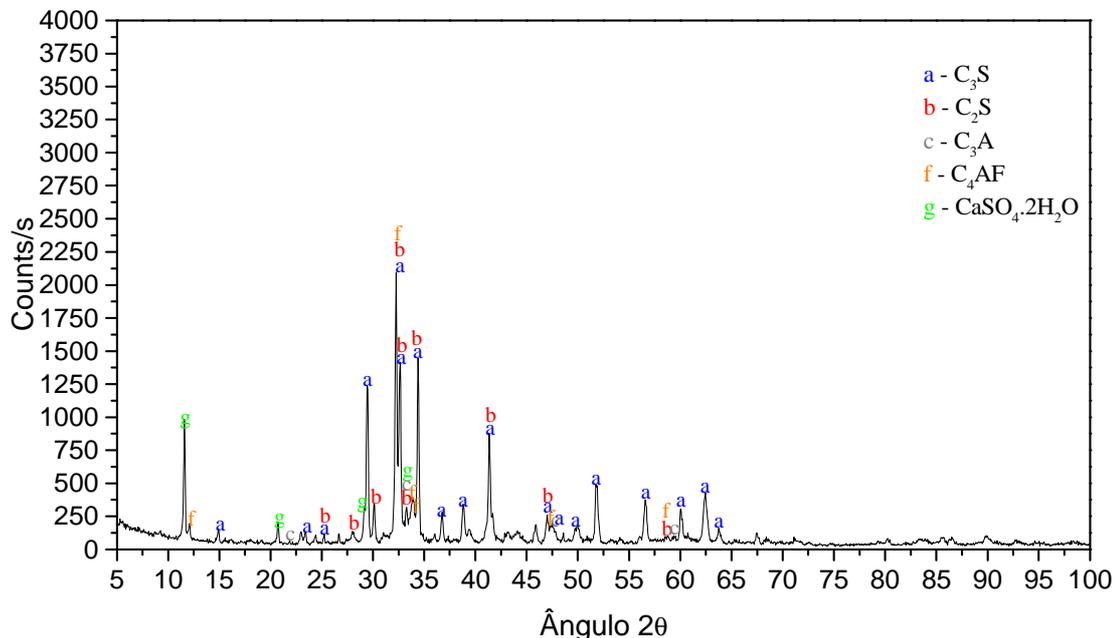
Tabela 12 – Fluorescência de raios X do cimento CP V ARI, análise qualitativa.

Elemento majoritário	Menor quantidade	Elementos traços
Ca	Si, Fe, S e K	Sr, Al e Mn

Tabela 13 – Caracterização química do cimento CP V ARI.

Parâmetro	Teor (%)
CaO	67,04
SiO ₂	17,27
Al ₂ O ₃	3,87
Fe ₂ O ₃	3,01
MnO	0,06
SO ₃	ND
NA ₂ O	ND
K ₂ O	1,47
TiO ₂	0,27
SrO	0,33
P ₂ O ₅	0,16
Cr ₂ O ₃	0,01
MgO	3,10
ZnO	0,004
Perda ao fogo (1000°C)	3,54

A caracterização mineralógica foi realizada no difratômetro Siemens D5000 do Laboratório de Difração de raios X do Instituto de Física da UFRGS, apresentada na Figura 33. Foram identificados picos significativos de C₃S, C₂S e C₃A.

**Figura 33 – Difratograma de raios X do Cimento CP V ARI.**

A distribuição granulométrica, expressa na Figura 34, foi obtida pelo método de difração de raios laser, realizada no LCVM da Unisinos, com o equipamento Microtac S3500. Conforme a caracterização, 95% das partículas apresentam tamanho inferior a 40,26 µm (D95), diâmetro médio de 13,90 µm (D50) e o D10 de 6,09 µm.

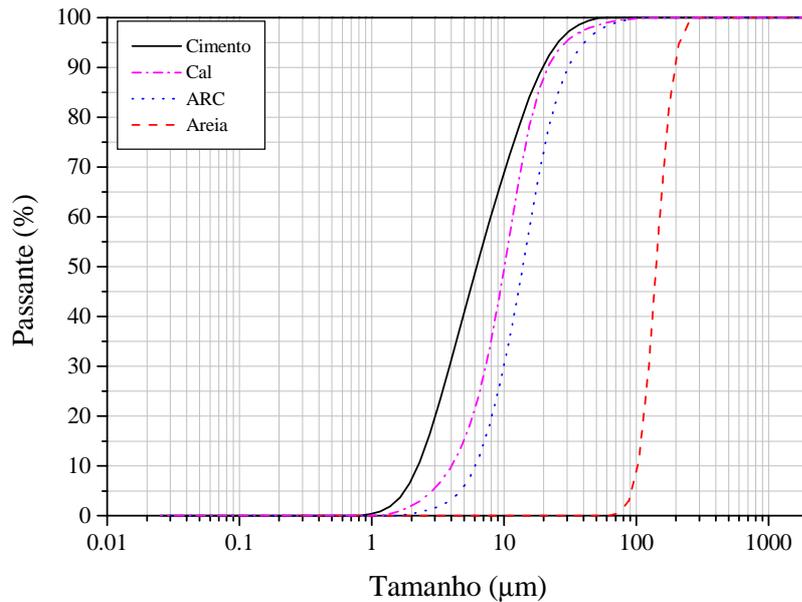


Figura 34 – Distribuição granulométrica do cimento CP V ARI, Cal calcítica, ARC e AN.

Já a Figura 35 apresenta a micrografia do cimento CP V ARI obtida em microscópio eletrônico de varredura, realizada no ITT FOSSIL – Instituto Tecnológico de Micropaleontologia da Unisinos. O equipamento empregado é modelo EVO | MAIS da marca Zeiss. A amostra foi metalizada com ouro paládium e visualizada em alto vácuo com detector de elétrons secundários.

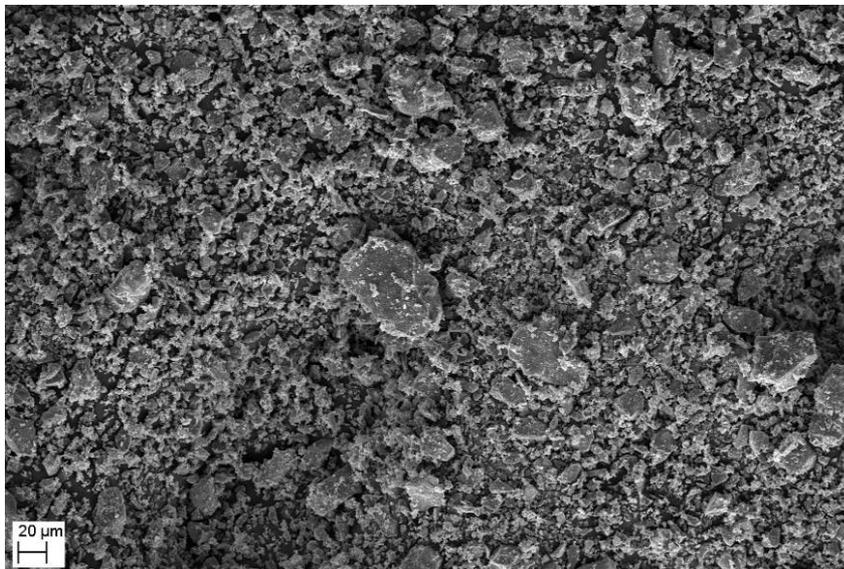


Figura 35 – Micrografia do cimento CP V ARI (aumento 500x).

A análise de imagem da micrografia do cimento indica a existência de partículas com formas irregulares e com dimensões compatíveis com aquelas caracterizadas por granulometria à laser. A caracterização se assemelha aos empregados nas pesquisas estudadas e citadas na revisão bibliográfica.

4.2.2 Cal calcítica hidratada

Optou-se pelo uso da cal calcítica hidratada por ser mais pura e conter alto teor de CaO, componente importante para a reação química com o alumínio em pó, resultando na liberação de hidrogênio. A análise química qualitativa, obtida através de fluorescência de raios X, realizada no LCVM, pode ser observada na Tabela 14.

Tabela 14 - Fluorescência de raios X da cal calcítica hidratada, análise qualitativa.

Elemento majoritário	Menor quantidade	Elementos traços
Ca	-	Sr, S e Fe

Na Tabela 15, é apresentada a caracterização físico-química conforme fabricante. Também foi realizada a análise química básica no Laboratório de Análises Inorgânicas do Departamento de Química (Dequim) da Fundação de Ciência e Tecnologia – CIENTEC, onde foi constatada a presença de 68,12% de óxido de cálcio livre (Tabela 16).

Tabela 15 – Caracterização físico-química da cal calcítica hidratada.

Composição Físico-Química	Especificação	Resultado
Concentração	Min. 90%	91,96%
Óxido de cálcio (CaO total)	Min. 72%	72,16%
Carbonato de cálcio (CaCO ₃)	Máx. 5,5%	4,38%
Hidróxido de magnésio (Mg(OH) ₂)	Máx. 2,2%	0,62%
Umidade	Máx. 1,0%	0,73%
Sílica (SiO ₂ + RI)	Máx. 1,5%	1,06%
Retenção #100	Máx. 2,2%	1,56%

Fonte: Fabricante.

Tabela 16 – Análise química básica cal calcítica hidratada.

Ensaio	Método	Resultado
Óxido de cálcio livre em cimento	ABNT NBR NM 13:12	68,12%
Resíduo insolúvel e sílica em calcário	ASTM - C 25:98	0,6%
R ₂ O ₃ (Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃) em cal virgem	ABNT NBR 6473	0,6%
Óxido de cálcio (CaO)	ABNT NBR 5743:89	72,5%
Óxido de magnésio (MgO)	ABNT NBR 5743:89	0,6%
Perda por calcinação em calcário (1000°C)	ABNT NBR 5743:89	24,9%

Fonte: Dequim – CIENTEC.

A caracterização mineralógica, também realizada na UFRGS, é apresentada no difratograma de raios X da Figura 36. Observa-se a presença de picos significativos de hidróxido de cálcio (P), corroborando com o resultado da fluorescência de raios X, em que se obteve o Ca como elemento majoritário.

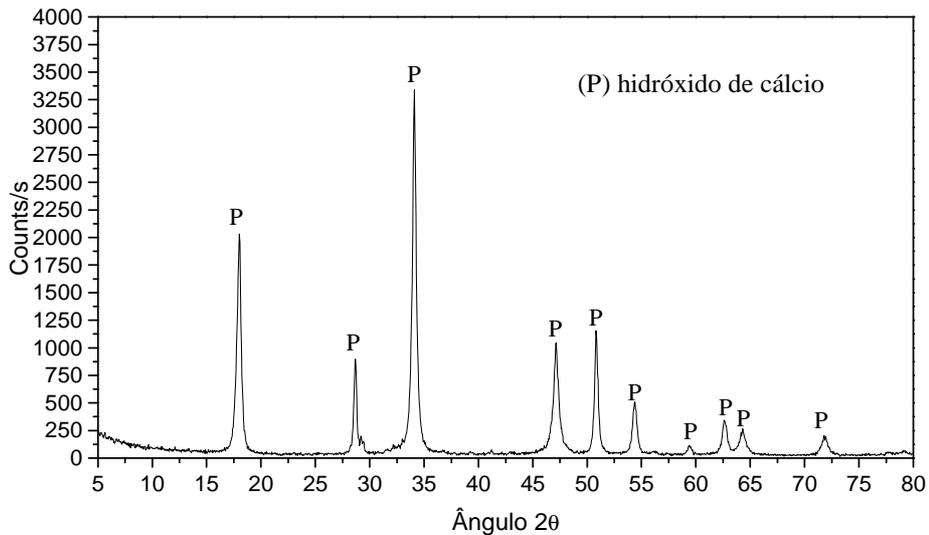


Figura 36 – Difratoograma de raios X da cal calcítica hidratada.

A distribuição granulométrica e a micrografia são apresentadas na Figura 34 e na Figura 37, respectivamente. As partículas possuem tamanhos variando de 40,26 μm (D95) e 4,02 μm (D10) com diâmetro médio de 10,130 μm (D50).

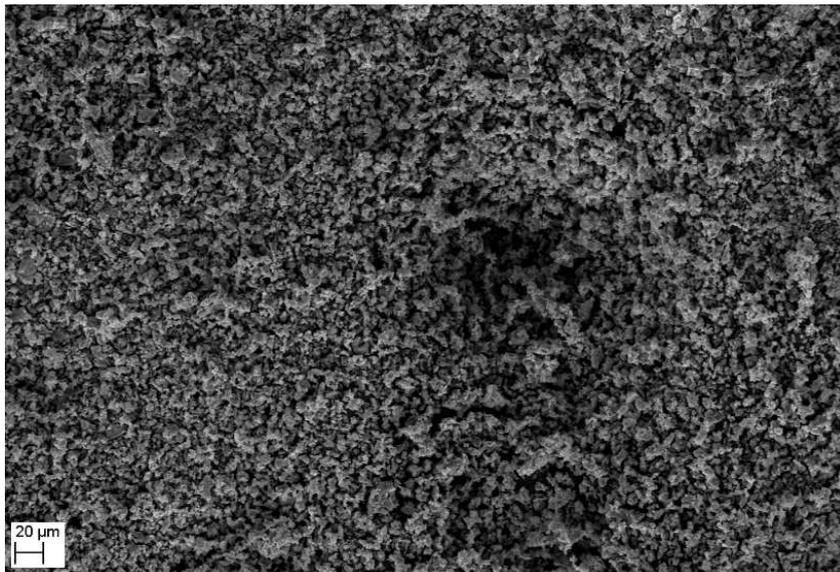


Figura 37 – Micrografia da cal calcítica hidratada (aumento 500x).

Conforme literatura estudada, as cales geralmente empregadas nos concretos celulares têm composição química semelhante à selecionada para esta pesquisa.

4.2.3 Agregado natural

Foram empregados agregados provenientes do Rio Jacuí, de origem quartzosa, lavados, secos e peneirados segregando somente o passante na malha de 150 μm . A fração foi escolhida com base nas referências e com objetivo de viabilizar a preparação com melhor aproveitamento do material e tempo.

Na Tabela 17 e na Tabela 18, é apresentada a caracterização química qualitativa e quantitativa, respectivamente. Confirmando como elemento majoritário o silício, o difratograma (Figura 38) apresenta, nos picos significativos, o quartzo.

Tabela 17 - Fluorescência de raios X da areia de rio, análise qualitativa.

Elemento majoritário	Menor quantidade	Elementos traços
Si	K, Al, Fe e Ti	V e Sr

Tabela 18 – Caracterização química da areia de rio.

Parâmetro	Teor (%)
SiO ₂	71,908
K ₂ O	0,953
Al ₂ O ₃	6,512
CaO	0,264
MnO	0,089
P ₂ O ₅	0,025
Fe ₂ O ₃	0,65
MgO	0,076

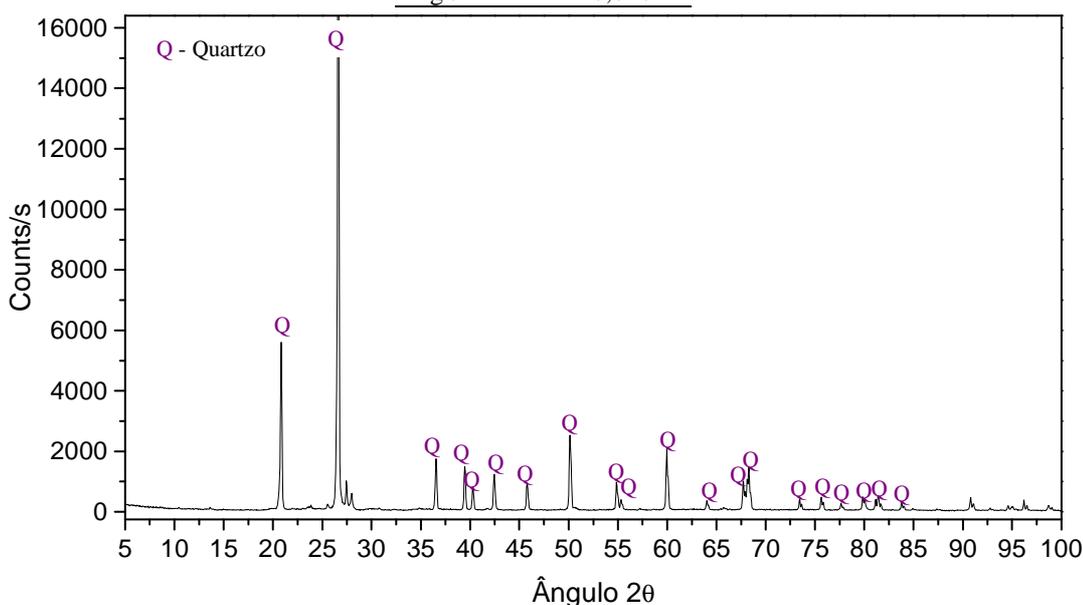


Figura 38 – Difratograma de raios X da areia de rio.

Através da análise granulométrica a laser (Figura 34), foi possível perceber que, mesmo empregando somente a fração passante na malha com abertura máxima de 150 µm, existem grãos com dimensões superiores. O agregado natural tem partículas com tamanho variando entre D10 com 103,0 µm, médio de 141,5 µm (D50) e máximo de 211,9 µm (D95), o que pode ser explicado, segundo Arnold (2011), pelo formato mais alongado (lamelar) de alguns grãos.

A micrografia eletrônica de varredura (Figura 39) corrobora o que foi analisado quanto à forma das partículas da areia, que, apesar do formato arredondado, alguns grãos apresentam uma forma mais alongada.

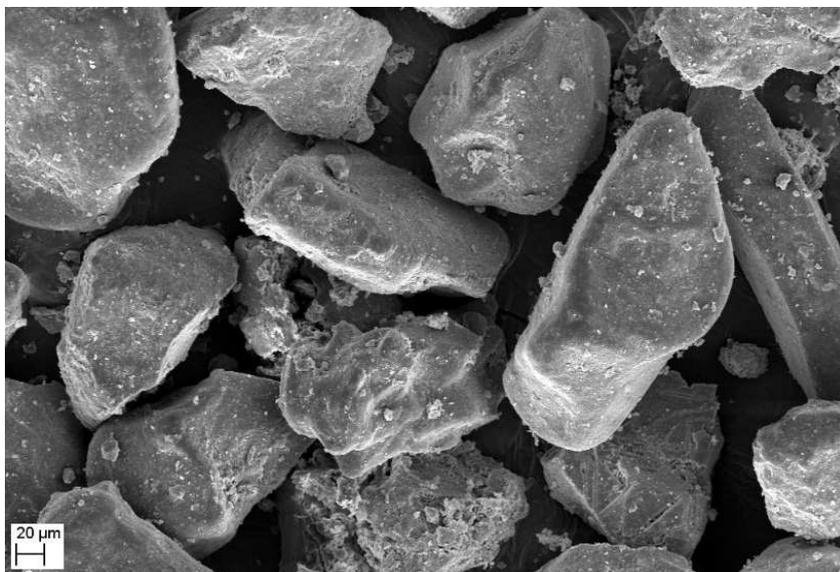


Figura 39 – Micrografia da areia de rio (aumento 500x).

4.2.4 Agregado reciclado

Os agregados reciclados de concreto, oriundos da fabricação de lajes alveolares e fornecidos por uma empresa de pré-fabricados, da cidade de Porto Alegre/RS, foram cominuídos. O ARC foi segregado com peneira de malha de abertura 150 µm, utilizando-se a fração passante, mesma fração do agregado natural. A caracterização química qualitativa foi realizada por fluorescência de raios X (Tabela 19), já a quantitativa não pôde ser realizada pela falta de padrão de referência. A Figura 40 apresenta o difratograma de raios X do ARC.

Tabela 19 – Fluorescência de raios X do resíduo de concreto, análise qualitativa.

Elemento majoritário	Menor quantidade	Elementos traços
Ca	Si, Fe, K e Al	S, Ti, Sr e Mn

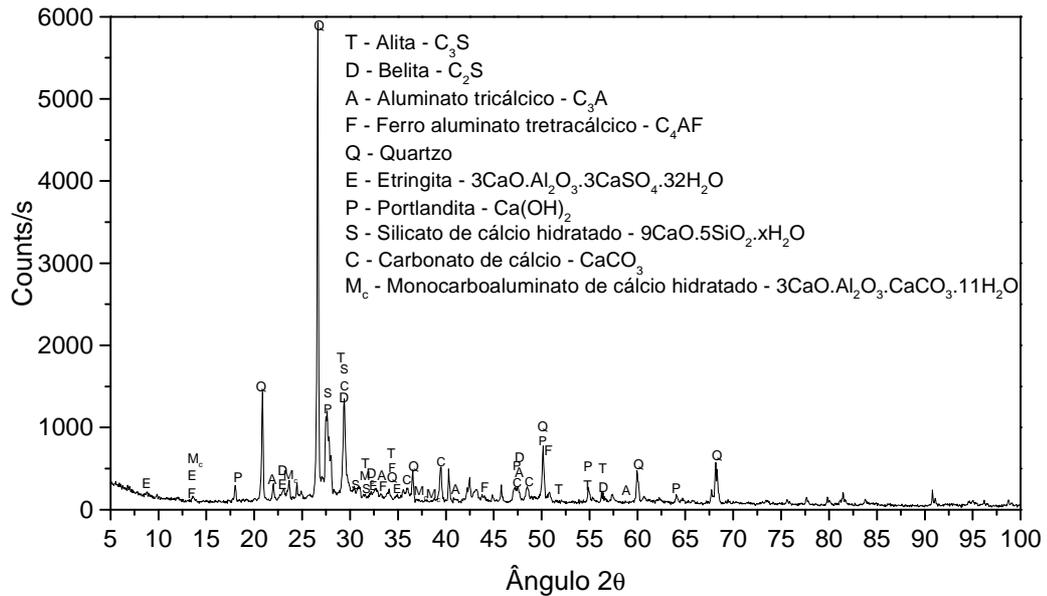


Figura 40 – Difratoograma de raios X do resíduo de concreto.

Pela análise do difratograma da Figura 40, percebe-se a existência de minerais relativos aos produtos de hidratação do cimento e de cimento anidro, assim como a presença de quartzo que pode ser devido aos agregados do resíduo de concreto.

Conforme a granulometria a laser (Figura 34), as partículas apresentam tamanhos compreendidos entre 12,45 μm (D10) e 191,60 μm (D95), com tamanho médio de 68,66 μm (D50). Assim como no agregado natural, apesar da utilização do peneiramento para segregar partículas com dimensão máxima de 150 μm , algumas delas, com forma lamelar, podem passar pela malha na menor dimensão. Conforme a Figura 41, o ARC se distingue morfológicamente pela forma mais angulosa quando comparado ao AN.

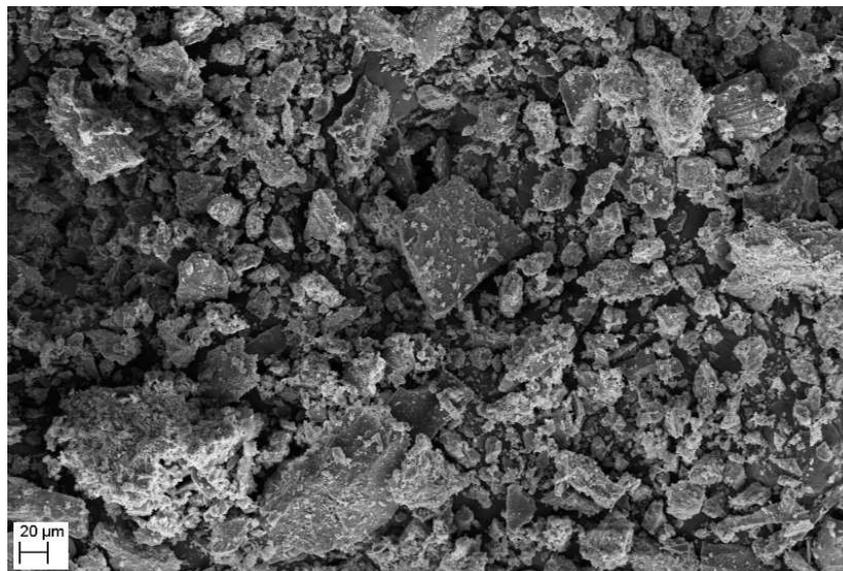


Figura 41 – Micrografia do resíduo de concreto (aumento 500x).

A maior presença de partículas com menor dimensão, fração de finos, no ARC, é outra diferença morfológica entre os dois tipos de agregados.

4.2.5 Agente expensor

O pó de alumínio foi empregado por ser o agente expensor mais habitualmente utilizado na produção de CCA, inclusive pelos fabricantes nacionais de artefatos de CCA. Segundo o produtor do pó de alumínio, este possui 95% de pureza.

A análise química qualitativa foi realizada através de fluorescência de raios X (Tabela 20), no laboratório da Unisinos. No difratograma de raios X, Figura 42, não foram identificados picos característicos nos ângulos de difração da alumina (óxido de alumínio), confirmando a qualidade do Al e comprovando que está em condições de uso para a reação de expansão.

Tabela 20 - Fluorescência de raios X do pó de alumínio, análise qualitativa.

Elemento majoritário	Menor quantidade	Elementos traços
Al	Fe e Si	S, K, Cr e Zn

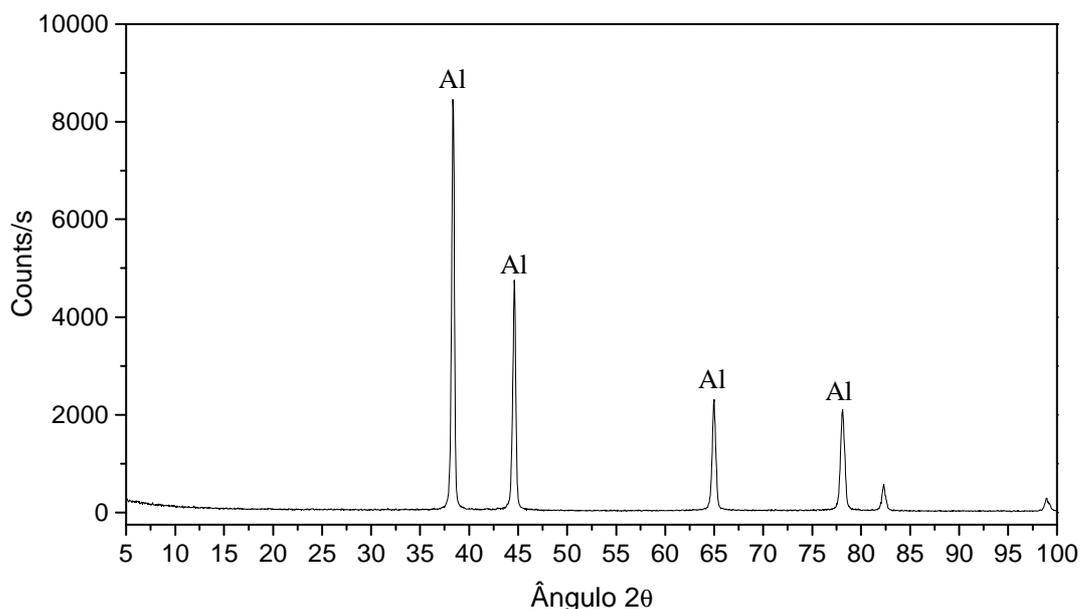


Figura 42 – Difratograma de raios X do pó de alumínio.

4.2.6 Água

A água empregada na produção do CCA é potável, fornecida pelo sistema de abastecimento da Cidade de São Leopoldo, Serviço Municipal de Água e Esgotos – SEMAE. A Tabela 21 apresenta a caracterização da amostra, cedida pelo órgão responsável pelo abastecimento.

Tabela 21 – Identificação da água potável.

Parâmetro	Metodologia	VMP/Portaria 2914 do Ministério da Saúde	Resultados Água tratada
pH	Potenciometria	Entre 6,0 e 9,5	6,30
Dureza (mg/L CaCO ₃)	Complexometria	500 mg/L CaCO ₃	33,40
Sólidos Totais Dissolvidos (mg/L NaCl)	Potenciometria	1000 mg/L NaCl	118,46
Sulfatos (mg/L SO ₄)	Turbidimetria	250 mg/L SO ₄	30,70
Cloretos (mg/L Cl)	Titulometria	250 mg/L Cl	18,00
Matéria Orgânica (mg/L O ₂ Consumido)	Oxi - Redução	-	3,00

Fonte: Serviço Municipal de Água e Esgotos – SEMAE.

4.3 PRODUÇÃO DAS AMOSTRAS

4.3.1 Produção do concreto celular

Para a produção do concreto celular, foram adotados os dados dos estudos-piloto. Com esses dados, fixou-se a quantidade de cada material (Tabela 22) necessária para a moldagem de cada traço. As misturas foram realizadas em argamassadeira do tipo planetária (Figura 43), com capacidade total de três litros. Para cada mistura, foram utilizados aproximadamente dois quilogramas de material total, incluindo a água.

Tabela 22 – Traços estudados e consumo de material.

Traço	Substituição (%)	Cimento (g)	AN (g)	ARC (g)	Cal (g)	Al (g)	Água (g)
T1	0	495	1.005	-	6,75	4,5	480
T2	25	495	753,75	251,25	6,75	4,5	480
T3	50	495	502,5	502,5	6,75	4,5	480

Não houve compensação da água mesmo se sabendo que o ARC demanda mais que o AN, isto se deve ao estudo exploratório do material.

As misturas foram realizadas em sala com temperatura e umidade controladas, sendo 21±2°C e 60±10% respectivamente. Executou-se a sequência da mistura com base nos testes dos estudos-piloto, conforme segue:

- 1. Homogeneização do cimento, cal e pó de alumínio, durante 60 segundos em velocidade baixa;
- 2. Adição da água durante 30 segundos, ainda em velocidade baixa;
- 3. Mistura durante 30 segundos em velocidade baixa;
- 4. Colocação do agregado (natural e reciclado, quando o caso), durante 30 segundos, em velocidade rápida;

- 5. Mistura por 60 segundos em velocidade rápida.

Dessa forma, o tempo total de mistura foi de três minutos e 30 segundos.

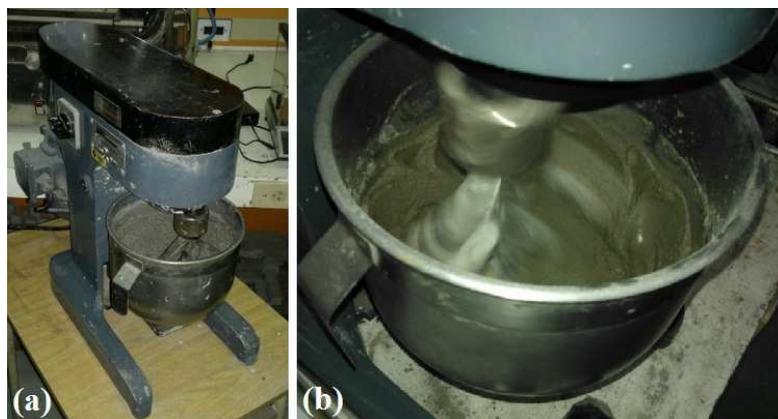


Figura 43 – (a) Argamassadeira do tipo planetária; (b) durante a mistura.

4.3.2 Moldagem

Para evitar os vazamentos ocorridos durante os estudos-piloto, as fôrmas metálicas foram seladas no perímetro com selante de poliuretano. Antes do início da mistura, receberam uma fina camada de óleo mineral para auxiliar na desmoldagem.

Logo após o término da mistura, as fôrmas foram preenchidas em uma única camada de aproximadamente 20 mm, recebendo 13 golpes, com bastão de vidro, em toda a superfície de cada segmento da fôrma, visando ao adensamento. Na sequência, as misturas permaneceram em cura inicial por aproximadamente 60 minutos, período durante o qual ocorreu o processo de expansão, conforme Figura 44.

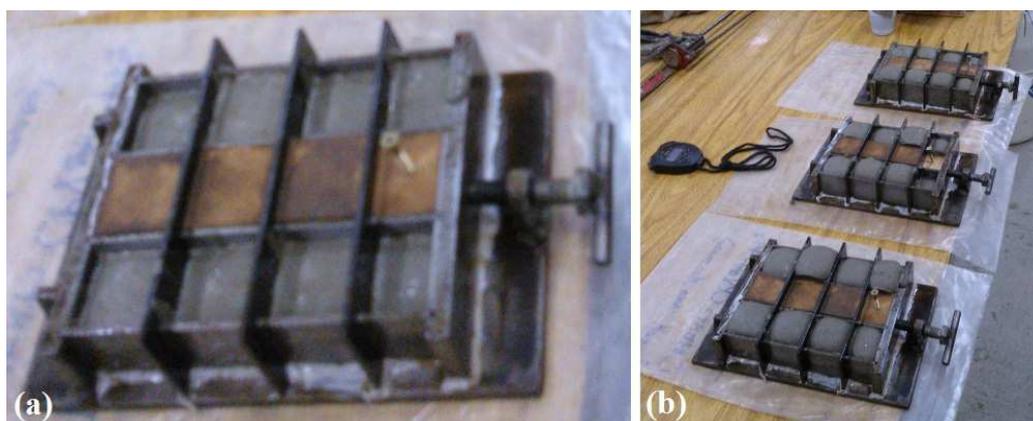


Figura 44 – (a) Processo de expansão; (b) após 60 minutos.

Com a mistura ainda fresca, as amostras foram retificadas utilizando um fio de *nylon* umedecido com óleo mineral. A porção de mistura que expandiu além dos limites das fôrmas foi retirada (Figura 45).



Figura 45 – Retificação da parte superior das amostras.

4.3.3 Cura

Depois de retificados, os corpos de prova permaneceram nas fôrmas e em cura ambiente por mais 23 horas, totalizando 24 horas de cura inicial. Esta ocorreu em sala com temperatura e umidade controladas, no LMC – Unisinos.

As fôrmas foram colocadas em caixas plásticas para o transporte até o Laboratório de Meio Ambiente – Cientec. Após a desmoldagem, as amostras foram postas na autoclave (Figura 46) e submetidas à pressão de 10 atm, conforme referências, no período de seis horas.

Após o processo de autoclavagem, as amostras foram embaladas em plástico bolha, colocadas em caixas plásticas e transportadas até o LMC – Unisinos.



Figura 46 – Amostras do T1 na autoclave, antes do processo de cura.

4.3.4 Preparação e identificação das amostras

Depois de desembaladas, as amostras foram separadas e identificadas (Figura 47) conforme o ensaio ao qual seriam submetidas. As amostras que foram submetidas a ensaios de resistência à compressão com a idade de 72 horas, absorção de água e investigação por imagem da microestrutura foram colocadas em estufa a 60°C.

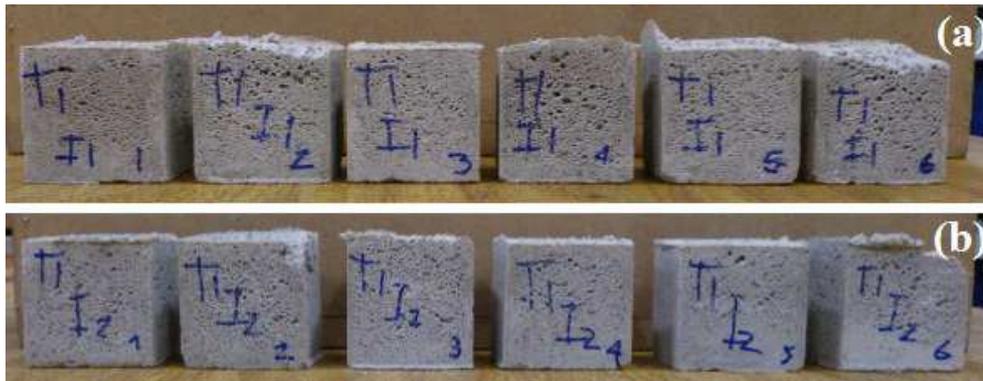


Figura 47 – Identificação das amostras, conforme ensaio. (a) T1 idade 1 e (b) T1 idade 2.

Já as amostras para a avaliação da resistência a compressão na idade de 48 horas foram identificadas e encaminhadas ao ensaio.

4.4 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

O ensaio que avaliou a resistência à compressão das amostras seguiu os procedimentos referentes à resistência à compressão axial (item 5.5.3) da norma brasileira de argamassa ABNT NBR 13279:2005. As adaptações foram em relação à idade de ruptura e ao tamanho do corpo de prova, seguindo todas as outras definições da referida norma.

Os corpos de prova foram posicionados sempre na mesma orientação, sendo a carga aplicada perpendicularmente ao sentido de moldagem (topo – base), conforme Figura 48.

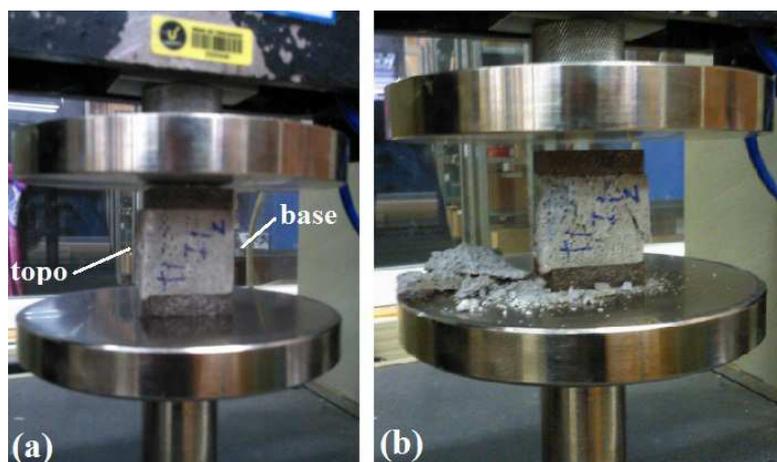


Figura 48 – Ensaio de resistência à compressão, (a) antes e (b) depois da aplicação da carga.

4.5 ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

O ensaio de absorção de água por capilaridade é uma adaptação do procedimento RILEM TC 116 PCD (1999), segundo modificação de Troian (2010) e Werle (2010), descrito a seguir:

- As amostras moldadas em formato de cubo de 40 x 40 x 40 mm foram mantidas em estufa a 60°C para estabilização da massa;
- Após esse período, foram colocadas no dessecador até atingirem a temperatura da sala climatizada (21±2°C) onde ocorreu o ensaio;
- Assim que retiradas do dessecador, tiveram suas quatro arestas laterais vedadas com fita adesiva impermeável tipo “*silver tape*”, impermeabilizando essas laterais;
- As superfícies, inferior e superior, permaneceram livres. Sobre a superior, foi colocado um balão, para que não houvesse interferência da umidade externa durante o ensaio. A maleabilidade do balão permitiu espaço suficiente para armazenar o ar expulso pela absorção de água pela superfície inferior, entre a amostra e o látex;
- A superfície inferior ficou em contato com a lâmina de água, com profundidade constante de três milímetros, mantida através de sistema de fluxo contínuo de alimentação de água e de um extravasor, conforme Figura 49.

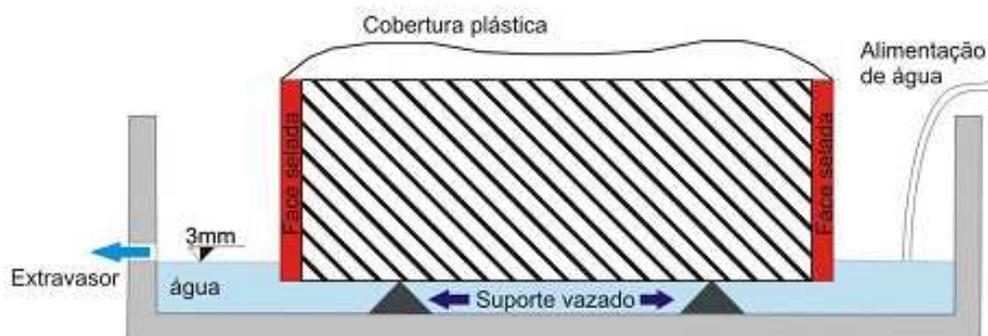


Figura 49 – Esquema experimental utilizado por RILEM (1999).

Fonte: Troian (2010).

- Além do sistema de abastecimento, foram necessários um recipiente com fundo plano e um estrado vazado que permitiu o contato da água com a superfície inferior da amostra.

A absorção foi acompanhada com pesagem das amostras (Figura 50) nos seguintes intervalos de tempo: 1; 2; 3; 4; 5; 10; 15; 30 e 60 minutos e 2; 3; 4; 5; 6; 24; 48; 72 e 96 horas. Antes de cada pesagem, a amostra foi seca, de modo superficial, com um pano úmido, mantendo sempre a face inferior umedecida.

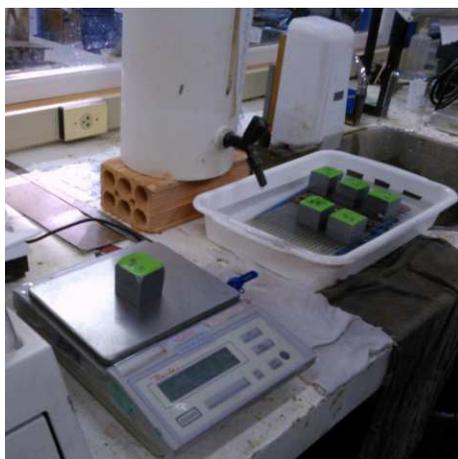


Figura 50 – Pesagem da amostra, durante o ensaio.

4.6 ABSORÇÃO TOTAL

O ensaio foi adaptado da ABNT NBR 15270-3:2005, utilizando as mesmas amostras do ensaio de absorção por capilaridade, após as 96 horas. Segundo a norma, as amostras devem ficar submersas em água e temperatura ambiente pelo período de 24 horas, porém, para este ensaio, elas ficaram submersas até a saturação total, sendo monitoradas de 24 em 24 horas.

4.7 DENSIDADE DE MASSA APARENTE SECA

Adaptando as dimensões dos corpos de prova, os procedimentos de mensuração e cálculo da densidade de massa aparente seca seguiram os estipulados na ABNT NBR 13440:1995.

A densidade das amostras foi medida nos corpos de prova destinados ao ensaio de absorção de água, imediatamente antes do início do processo.

4.8 CARACTERIZAÇÃO DA MICROESTRUTURA

As amostras 'X' e 'Y' (Figura 29), com menores dimensões, após autoclavadas permaneceram em estufa a 60°C, durante no mínimo sete dias, para secar por completo, externa e internamente. De cada amostra seca, foram extraídos pedaços menores de cerca de 10 x 10 x 10 mm, em três níveis: topo, meio e fundo (Figura 51).

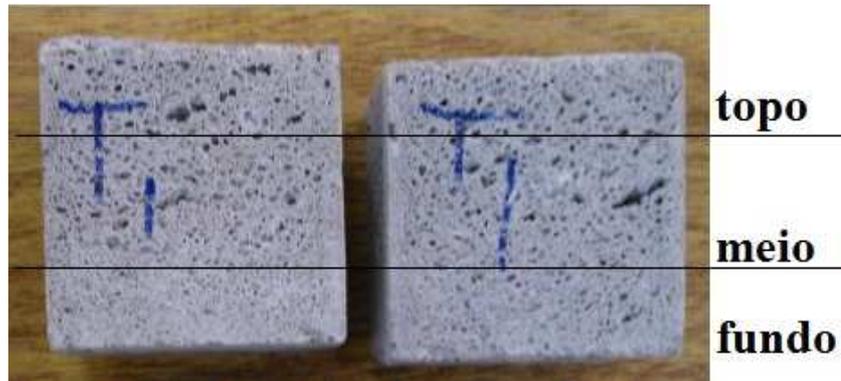


Figura 51 – Amostras antes da extração dos pedaços menores.

A hidratação desses pedaços foi interrompida com álcool isopropílico, logo após foram embalados, identificados quanto ao traço e à região de extração, colocados em um dessecador até a data prevista para a preparação das amostras. Os exemplares receberam metalização de ouro paladium (Figura 52) e foram analisados em microscópio eletrônico de varredura, modelo EVO | MAIS da marca Zeiss e visualizados em alto vácuo com detector de elétrons secundários – ITT FOSSIL – Unisinos.



Figura 52 – Amostra (10 x 10 x 10 mm) de CCA metalizado com ouro paladium.

5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISES DOS RESULTADOS

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos, assim como a caracterização por imagem da microestrutura do CCA. Como análise estatística, foi empregada à análise de variância (ANOVA) para tratamento dos dados, utilizando o *software Statistica 12*, em versão demonstrativa.

5.1 DENSIDADE DE MASSA APARENTE SECA

Os valores de densidade de massa aparente seca são expostos na Tabela 23.

Tabela 23 – Densidade de massa aparente seca.

Traço	Amostra	Densidade Aparente (kg/m ³)	Média DA (kg/m ³)
T1	1	585,63	639,14
T1	2	672,17	
T1	3	654,70	
T1	4	640,49	
T1	5	638,43	
T1	6	643,40	
T2	1	777,48	786,18
T2	2	766,52	
T2	3	764,05	
T2	4	792,51	
T2	5	805,69	
T2	6	810,84	
T3	1	928,09	902,61
T3	2	909,07	
T3	3	879,36	
T3	4	886,33	
T3	5	916,17	
T3	6	896,63	

A análise de variância ANOVA é apresentada na Tabela 24, indicando que o teor de ARC apresenta um efeito significativo sobre a densidade do CCA.

Tabela 24 – ANOVA da variável densidade de massa aparente seca.

Fonte	SQ	GDL	MQ	Teste F	Significância - p	Efeito significativo
ARC	209191	2	104596	198,23	0,00000	Sim
Erro	7915	15	528			

Onde: GDL = grau de liberdade; SQ = soma quadrada; MQ = média quadrada;

Um dos motivos para diferenças significativas pode ser a grande quantidade de finos existente e a forma mais irregular do agregado reciclado (HEINECK, 2012). Durante a mistura e a moldagem, foi percebido o aumento da viscosidade entre as misturas, crescendo de acordo com o aumento do teor de substituição de AN por ARC. Isso se deve ao maior consumo de água pelo agregado reciclado, o que influenciou na expansão da mistura. A Figura 53 mostra o gráfico com as médias de densidade.

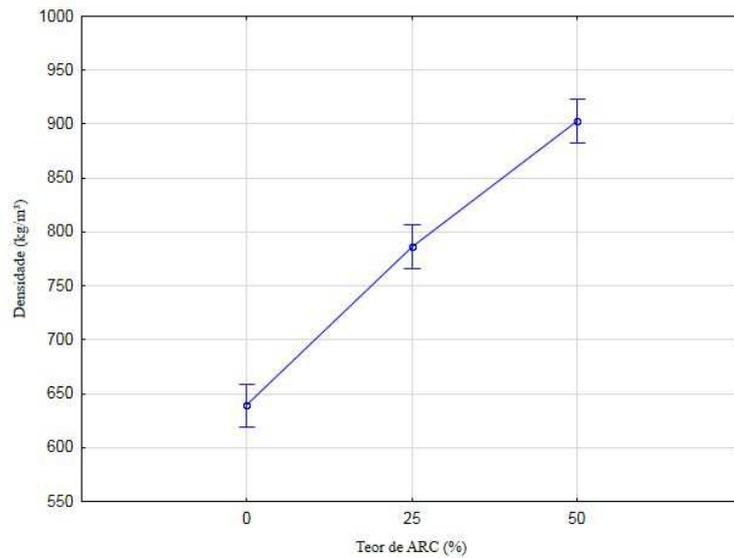


Figura 53 – Efeito isolado da variável “ARC” na densidade de massa aparente seca.

Os concretos com agregado reciclado exibiram uma densidade de massa aparente seca superior à do concreto de referência. Obteve-se um aumento de 23 e 41%, respectivamente, na comparação dos concretos com 25 e 50% de ARC com o produzido apenas com agregado natural.

Para avaliar o emprego do ARC na produção do CCA, a quantidade de água utilizada foi igual em todos os traços, mesmo se sabendo que o agregado reciclado é mais poroso e contém um teor de finos superior ao do agregado natural empregado. Como a água é o meio em que se dá a reação química da expansão entre o alumínio em pó e a cal, o fato de existir uma menor quantidade de água disponível para essa reação fez com que a expansão diminuísse conforme a quantidade de ARC aumentava (Figura 54).

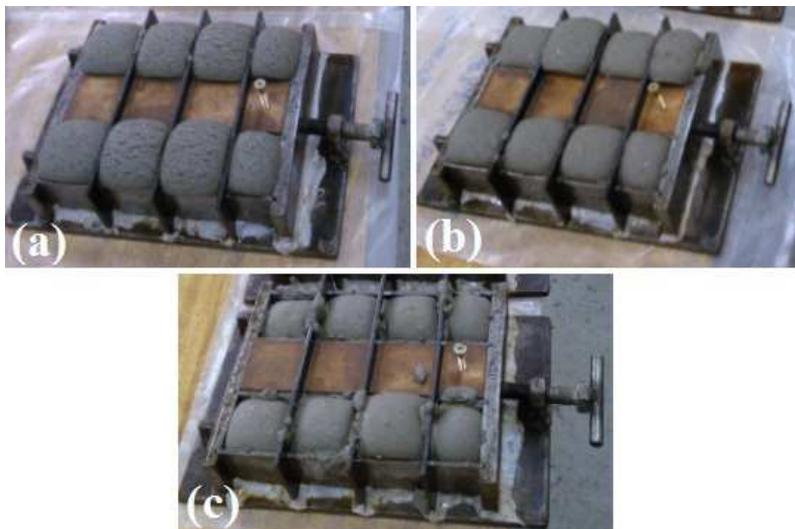


Figura 54 – A mostras após 60 minutos da mistura (a) T1; (b) T2; e (c) T3.

Esses aumentos também podem ser explicados pela diferença das dimensões das partículas de ambos os agregados. O AN apresenta partículas de 103,0 a 211,9 μm , enquanto o ARC apresenta partículas entre 12,45 a 191,6 μm , e a dimensão média do AN é 1,06 vezes maior que a do ARC. Logo essas diferenças levam a um empacotamento das partículas da mistura com ARC mais denso do que somente com AN.

5.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Na Tabela 25, são apresentados os resultados de resistência à compressão conforme os traços (T1, T2 e T3), as idades (48 e 72 horas) e as amostras (1 a 6).

Tabela 25 – Resultados de compressão axial conforme traço e idade.

Traço	Amostra	AN (%)	ARC (%)	Idade 1 (MPa)	Média I1 (MPa)	Idade 2 (MPa)	Média I2 (MPa)
T1	1	100	-	1,4		1,54	
T1	2	100	-	0,9		1,52	
T1	3	100	--	1,2	1,13	1,49	1,76
T1	4	100	-	1,1		1,92	
T1	5	100	-	1,2		2,17	
T1	6	100	-	1,0		1,91	
T2	1	75	25	2,2		4,33	
T2	2	75	25	2,7		3,83	
T2	3	75	25	2,8	2,52	3,58	4,04
T2	4	75	25	2,7		4,22	
T2	5	75	25	2,3		3,94	
T2	6	75	25	2,4		4,33	
T3	1	50	50	6,3		7,96	
T3	2	50	50	5,9		7,01	
T3	3	50	50	5,8	5,67	6,26	6,59
T3	4	50	50	5,7		6,67	
T3	5	50	50	5,3		5,05	
T3	6	50	50	5,0		6,61	

O efeito isolado de cada uma das variáveis estudadas e das interações entre elas está na Tabela 26. Com esses resultados, é possível considerar estatisticamente a significância do efeito dos fatores estudados sobre a variável resistência à compressão. Os fatores isolados apresentaram efeito significativo sobre esta variável, em um nível de confiança de 95%, pois apresentam valores de 'p' menores que 0,05.

Tabela 26 – ANOVA dos fatores independentes e das interações entre eles em relação à resistência à compressão.

Fonte	SQ	GDL	MQ	Teste F	Significância - p	Efeito significativo
ARC	133,7327	2	66,8664	290,013	0,00000	Sim
IDD	9,4454	1	9,4454	40,967	0,00000	Sim
ARC*IDD	1,2490	2	0,6245	2,709	0,082905	Não
Erro	6,9169	30	0,2306			

Onde: GDL = grau de liberdade; SQ = soma quadrada; MQ = média quadrada; ARC = agregado reciclado de concreto; IDD = idade.

A Figura 55 e a Figura 56 mostram, em forma de gráfico, as médias para os efeitos isolados das variáveis idade e teor de ARC, sobre a resistência à compressão, respectivamente.

Os valores médios do fator ‘idade’ demonstram um comportamento diferente do esperado, com uma melhora de, aproximadamente, 1 MPa para a maior idade (72 horas). Nos trabalhos estudados, ((KARAKURT, CENK, KURAMA, HALDUN e TOPÇU, Í. B., 2010), (NARAYANAN e RAMAMURTHY, 2000)) os autores afirmam que o CCA tem sua resistência máxima já ao sair da autoclave. Na análise dos resultados, entretanto, observa-se um aumento médio de resistência à compressão de 33% quando se comparam amostras de idade de 72 e de 48 horas. Deve-se ressaltar que as amostras com 48 horas de hidratação, assim que retiradas da autoclave, foram embaladas, transportadas, desembaladas e imediatamente ensaiadas. Nesse momento, foi observada uma água residual nas amostras, oriunda do vapor da autoclave. Já as amostras com 72 horas permaneceram em estufa a 60°C durante 24 horas. Isso faz as amostras das duas idades estarem em condição de umidade diferente no momento do ensaio. Sabe-se que, para concretos convencionais, o teor de umidade influencia diretamente a resistência à compressão, sendo a condição saturada superfície seca a mais desfavorável. Esta pode ser uma possível explicação para a diferença de resistência entre as idades de 48 e 72 horas.

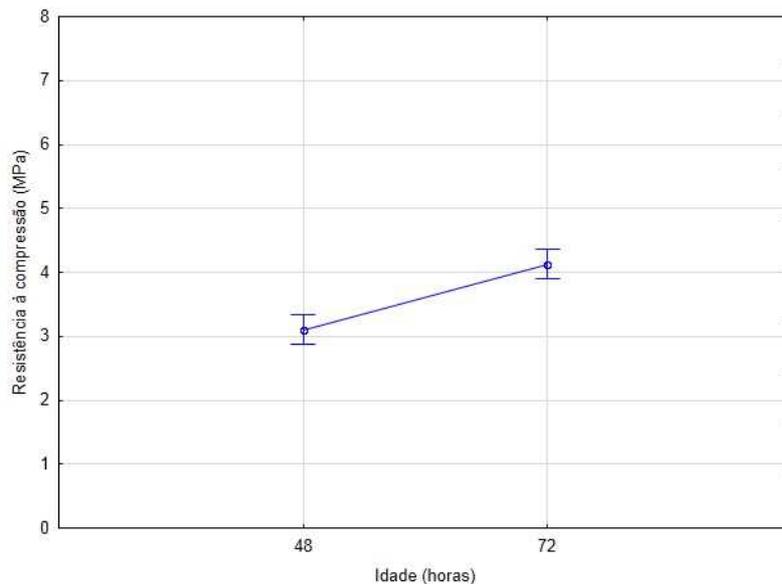


Figura 55 – Efeito isolado da variável “IDD” no desempenho de resistência à compressão.

Em relação ao fator ‘agregado reciclado de concreto’ (Figura 56), o teor de substituição de 25% de AN por ARC leva a um aumento na resistência à compressão. Ao

compararem-se as amostras de 0% de ARC com as de 25% de ARC, obteve-se um aumento médio na ordem de 126%, e, com as de 50% de ARC, um aumento médio na ordem de 323%. Este aumento de resistência reflete, como foi visto (item 5.1), um comportamento oriundo da densidade do CCA: quanto mais compacto o material, maior pode ser sua resistência.

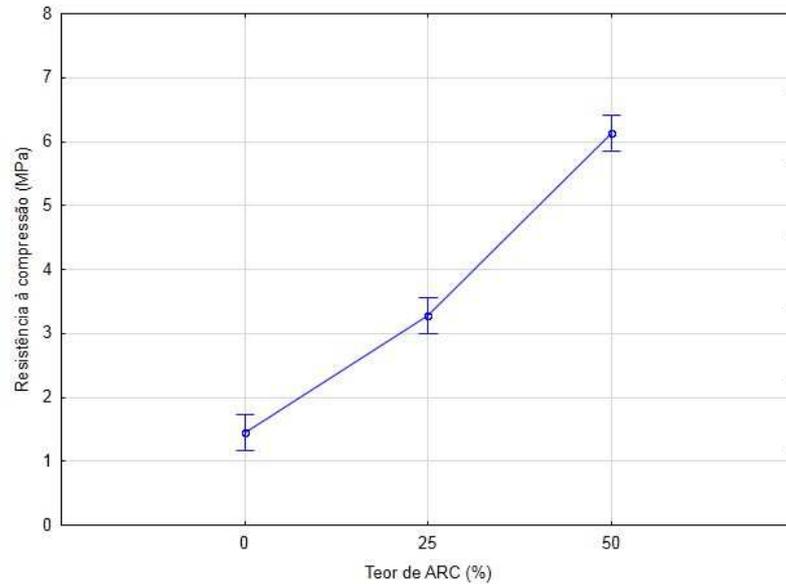


Figura 56 – Efeito isolado da variável “ARC” no desempenho de resistência à compressão.

O gráfico da Figura 57 mostra a interação entre os fatores ‘idade’ e ‘teor de ARC’ na resistência à compressão axial. A análise de variância ao retornar um ‘p’ de 0,08 para interação entre os dois fatores indica que esta não é significativa no comportamento de resistência à compressão dos CCA. Na comparação das duas idades de cura, observa-se, no entanto, um aumento de 56% para as misturas com NA, de 60% para as misturas com 25% de ARC e de apenas 16% para as misturas com 50% de ARC. O maior teor de ARC pode levar a diminuir a água disponível para a reação do cimento, talvez, dessa forma, explicando o menor aumento de resistência à compressão no concreto com 50% de ARC.

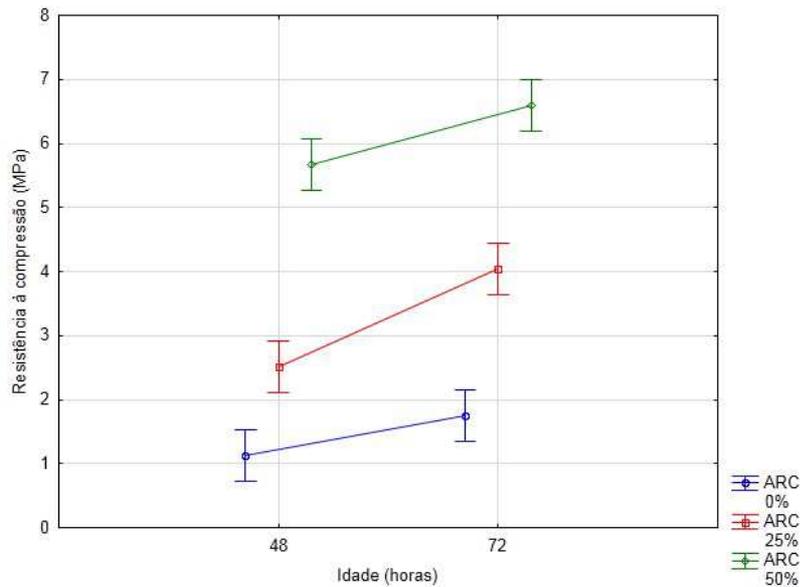


Figura 57 – Interação entre as variáveis ‘idade’ e ‘teor de ARC’ no desempenho de resistência à compressão.

Na Figura 58, o gráfico exibe a relação da densidade de massa aparente seca e a resistência à compressão de forma linear e com R^2 de 99%, para esta pesquisa, indicando o aumento da resistência conforme o aumento da densidade. Já ao se relacionarem dados de resistência à compressão com a densidade dos requisitos estabelecidos pela NBR 13438 (ABNT, 1995), verifica-se um R^2 de 97%. Comparando as duas retas obtidas, observa-se uma mesma tendência de comportamento, sendo que os dados desta pesquisa são em média 45% inferiores, ou seja, as resistências atingidas pela pesquisa são menores do que as previstas pela norma quando considerada a mesma densidade.

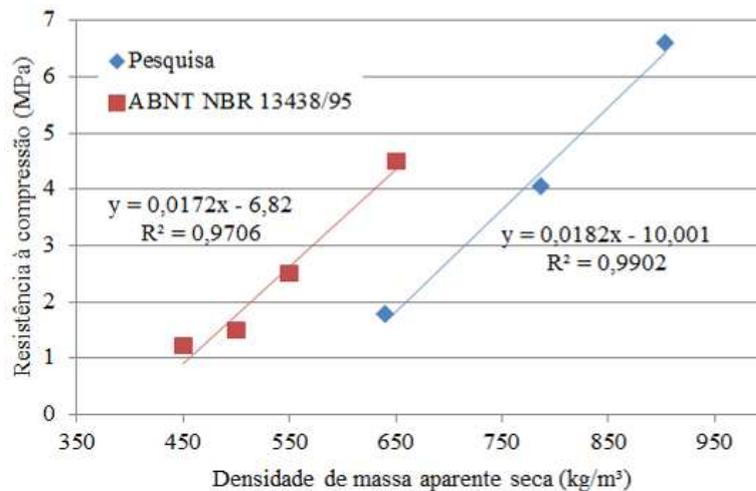


Figura 58 – Gráfico da relação da resistência à compressão e a densidade de massa aparente seca.

5.3 ABSORÇÃO CAPILAR DE ÁGUA

Os resultados da análise de absorção capilar de água e porosidade efetiva podem ser visualizados na Tabela 27.

Tabela 27 – Resultados da taxa de absorção capilar de água e da porosidade efetiva.

Traço	Amostra	AN (%)	ARC (%)	Taxa de Absorção (mm/h ^{1/2})	Média Taxa Absor. (mm/h ^{1/2})	Porosidade Efetiva (%)	Média Porosidade (%)
T1	1	100	-	1,02		14,52	
T1	2	100	-	1,69		25,00	
T1	3	100	--	1,27	1,42	18,19	19,81
T1	4	100	-	1,92		26,45	
T1	5	100	-	1,40		18,35	
T1	6	100	-	1,20		16,37	
T2	1	75	25	1,28		16,32	
T2	2	75	25	1,37		16,19	
T2	3	75	25	1,26	1,29	15,90	16,35
T2	4	75	25	1,26		15,54	
T2	5	75	25	1,24		17,35	
T2	6	75	25	1,34		16,80	
T3	1	50	50	1,23		15,54	
T3	2	50	50	1,20		15,80	
T3	3	50	50	1,32	1,29	13,24	15,79
T3	4	50	50	1,24		15,38	
T3	5	50	50	1,33		16,71	
T3	6	50	50	1,44		18,07	

Os dados de absorção de água por capilaridade foram analisados através da ANOVA, verificando o efeito do fator de substituição do AN pelo ARC na absorção de água por capilaridade (Tabela 28). A análise retornou um 'p' de 0,4896, maior que 0,05, indicando que o uso de ARC estatisticamente não apresenta efeito significativo sobre a absorção capilar de água. Em ambos os teores de substituição de AN por ARC, obteve-se uma diminuição da absorção capilar na ordem de 9%, provavelmente em função dos dois aspectos, já citados anteriormente, o tamanho dos grãos e a absorção de água do ARC, que leva a um refinamento da estrutura de poros, algumas vezes podendo interromper a comunicação entre os poros.

Tabela 28 – ANOVA da variável taxa de absorção capilar de água.

Fonte	SQ	GDL	MQ	Teste F	Significância - p	Efeito significativo
ARC	0,06127	2	0,03064	0,7494	0,48962	Não
Erro	0,61324	15	0,04088			

Onde: GDL = grau de liberdade; SQ = soma quadrada; MQ = média quadrada;

A Figura 59 apresenta o gráfico de médias da absorção de água em função do teor de ARC, onde pode ser visualizado o comportamento analisado.

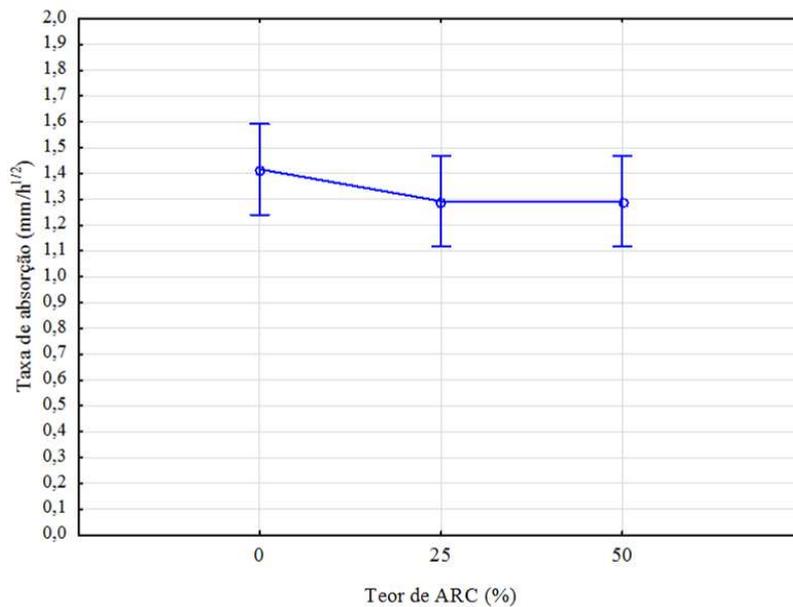


Figura 59 – Efeito isolado da variável “ARC” no ensaio de absorção por capilaridade.

A partir da leitura dos dados de absorção de água por capilaridade foi calculada a porosidade capilar efetiva dos concretos estudados, apresentados na Tabela 27. O resultado da análise de variância ANOVA está exposto na Tabela 29. Para um nível de significância α 0,05, o teor de ARC não apresenta efeito significativo sobre o comportamento da variável de resposta ‘porosidade efetiva’, pois retornou um valor ‘p’ de 0,06595. Contudo, na comparação da porosidade do concreto de referência com as dos concretos com 25 e 50% de ARC obteve-se, respectivamente, uma diminuição da porosidade de 18 e de 20%, o que, tecnicamente, não pode ser desconsiderado. Esta diferença de porosidade se reflete na densidade dos concretos e na resistência à compressão, conforme já foi visto.

Tabela 29 – ANOVA da variável porosidade.

Fonte	SQ	GDL	MQ	Teste F	Significância - p	Efeito significativo
ARC	56,980	2	28,490	3,2770	0,06595	Não
Erro	130,409	15	8,694			

Onde: GDL = grau de liberdade; SQ = soma quadrada; MQ = média quadrada;

O gráfico da Figura 60 mostra as médias das porosidades efetivas dos concretos estudados.

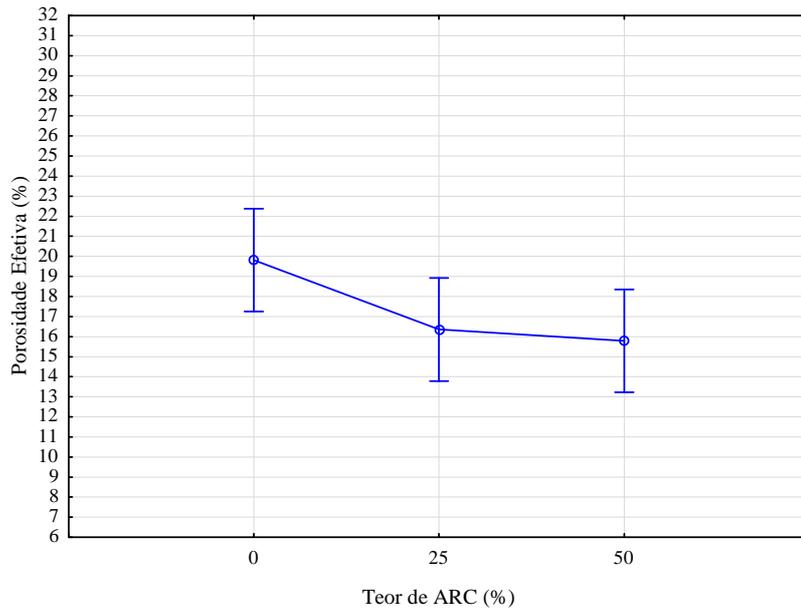


Figura 60 – Efeito isolado da variável “ARC” na porosidade dos concretos.

5.4 ABSORÇÃO TOTAL

O gráfico da Figura 61 apresenta a média dos resultados de absorção total das amostras de CCA.

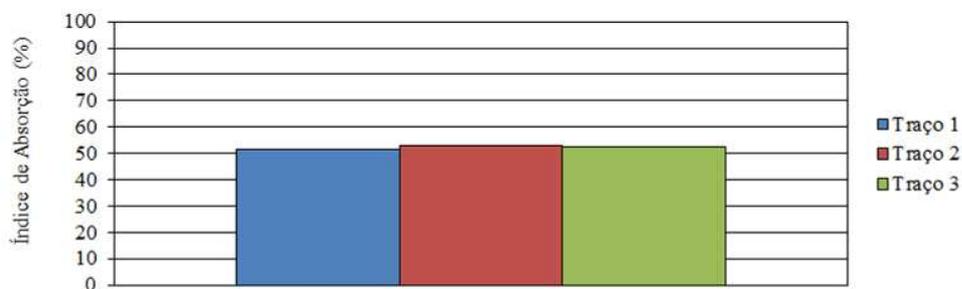


Figura 61 – Absorção total.

As médias de absorção total dos concretos estudados tecnicamente não apresentaram diferenças significativas entre si, retornando os valores de 51,3% (T1), 52,8% (T2) e 52,5% (T3). Isso se deve à saturação total das duas fases que compõem o CCA, conforme explicado pela Figura 4, preenchendo, além da fase sólida, todos os tipos de poros (macro/meso/micro).

5.5 CARACTERIZAÇÃO DA MICROESTRUTURA

O uso de microscopia eletrônica de varredura auxiliou no entendimento da formação das fases gasosa e sólida, e da interação entre os agregados, poros e matriz cimentícia. Conforme apresentado no item 4.8, os espécimes foram extraídos de três trechos

de cada corpo de prova: fundo, meio e topo. Com isso, foi possível analisar, de forma qualitativa, os poros (macro, meso e micro), a microestrutura e a superfície dos concretos produzidos na pesquisa.

5.5.1 Espécimes retirados do topo das amostras

A seguir, são apresentadas as microscopias dos espécimes retirados da parte superior dos corpos de prova, topo. Para auxiliar no entendimento da formação dos poros conforme traços, a Figura 62 mostra um comparativo dos três traços, com microscopias com aumentos de 500 e 3000x.

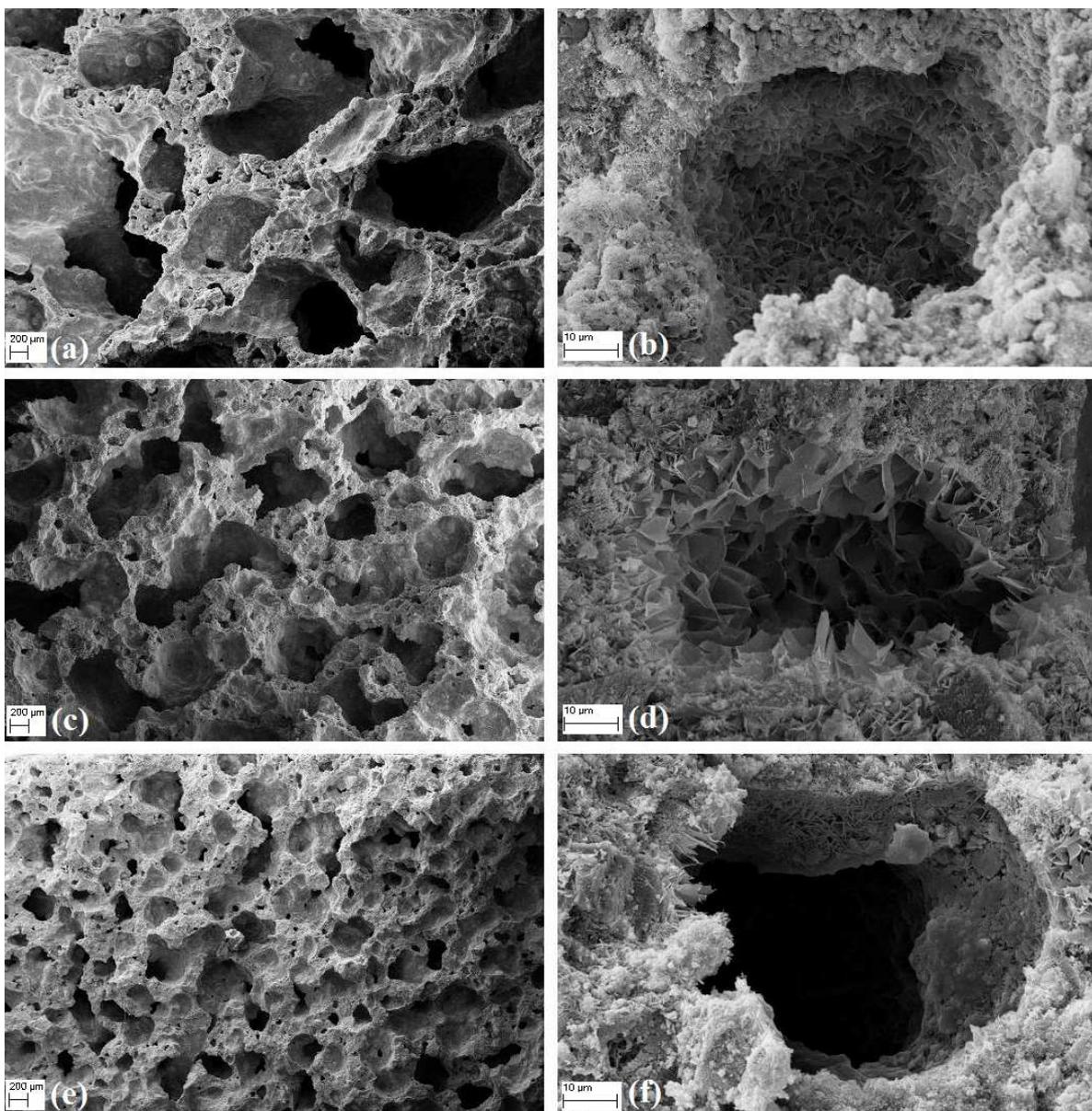


Figura 62 – Micrografia dos espécimes retirados do topo, (a) e (b) T1; (c) e (d) T2; e (e) e (f) T3. Aumento 500 e 3000x, respectivamente.

A Figura 62(a), (c) e (e) ilustra a diferença da formação dos poros oriundos da reação do alumínio e, algumas vezes, ar aprisionado (macro), respectivamente, para o traço T1, T2 e T3. Conforme o aumento do teor de ARC, nota-se uma alteração na estrutura dos poros relacionada ao tamanho e à distribuição. Também se pode inferir, pela forma irregular dos poros observados nos aumentos de 500x e pela comparação com a Figura 9 (b), que, neste segmento do corpo de prova, ocorreu um baixo índice de ar aprisionado, podendo-se atribuir grande parte da formação dos referidos poros à liberação de gases oriundos da reação do alumínio.

Já na Figura 62 (b), (d) e (f), que tem magnificação de 3000x, são visualizados os poros entre grupos e entre partículas, meso e microporos. O grande vazio da Figura 62 (b), por exemplo, pode ser classificado como poro entre grupo e os espaços entre as plaquetas são considerados poros entre partículas, segundo Narayanan e Ramamurthy (2000). Nessas figuras, é possível observar a formação mais irregular do poro entre grupo, assim como a diminuição dos espaços entre partículas conforme o aumento de ARC utilizado.

A Figura 63 é um comparativo da interação com grãos de maior dimensão, que podem ser agregado (AN e ARC), sendo necessária uma análise de EDS para confirmação da natureza das partículas. As magnificações empregadas foram de 1500 e 5000x e seguem a mesma ordem da anterior (T1, T2 e T3). É possível observar uma maior compactação e uma menor cristalização da fase sólida entre os traços.

A relação de partículas maiores com a fase sólida é diferente em todos os traços. No T1, as plaquetas aparentemente estão incrustadas em uma partícula, formando uma zona de transição semelhante às encontradas em concretos convencionais. No T2 e no T3, a zona de transição não é clara.

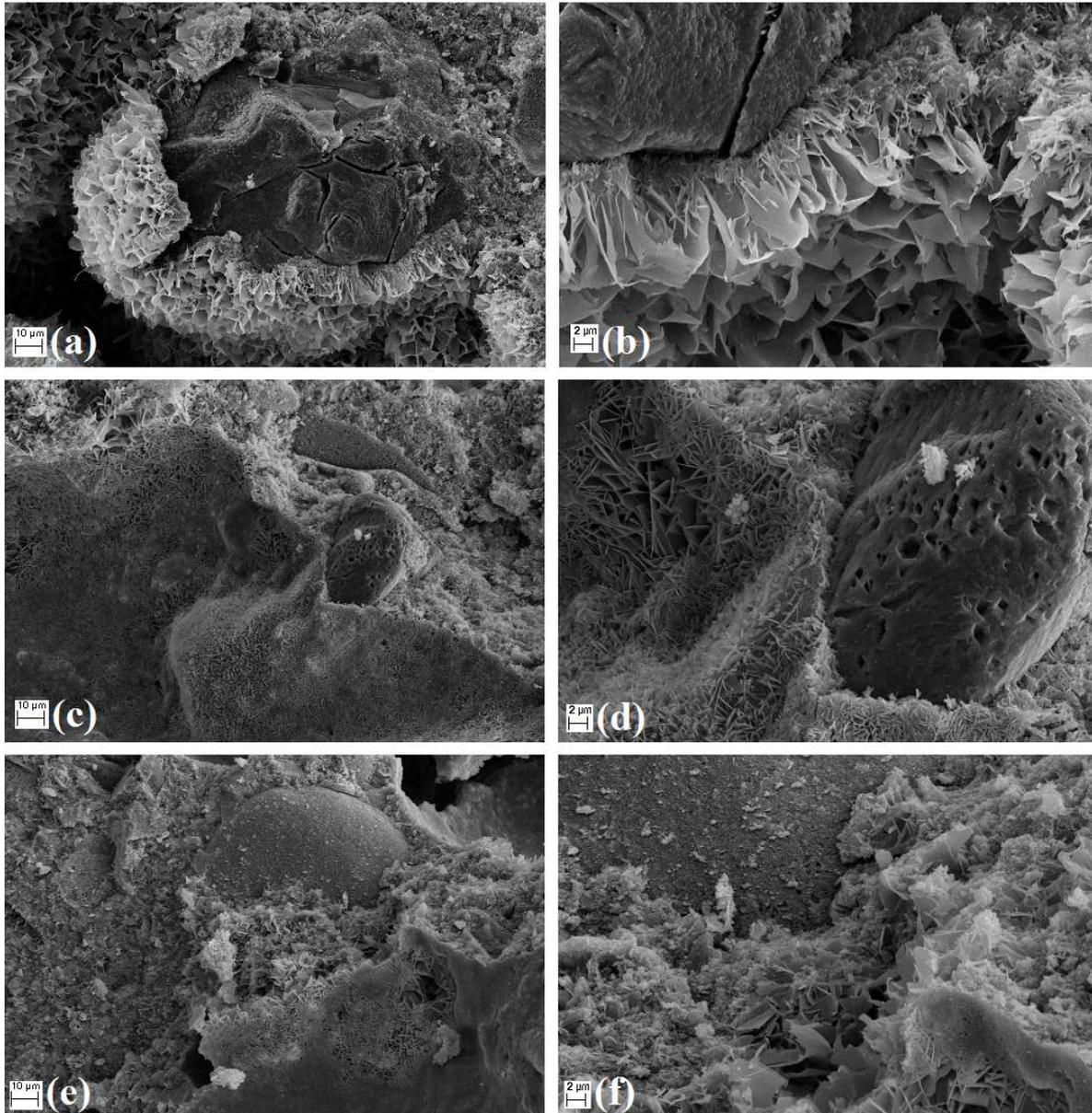


Figura 63 – Micrografia dos espécimes retirados do topo, (a) e (b) T1; (c) e (d) T2; e (e) e (f) T3. Aumento 1500 e 5000x, respectivamente.

5.5.2 Espécimes retirados do meio das amostras

Nas Figura 64 e Figura 65 são apresentadas as micrografias das amostras retiradas no meio do corpo de prova. A diferença em relação às imagens anteriores é quanto à quantidade e o formato dos poros. Neste trecho das amostras os poros artificiais e entre grupos tem um formato mais irregular em todos os traços.

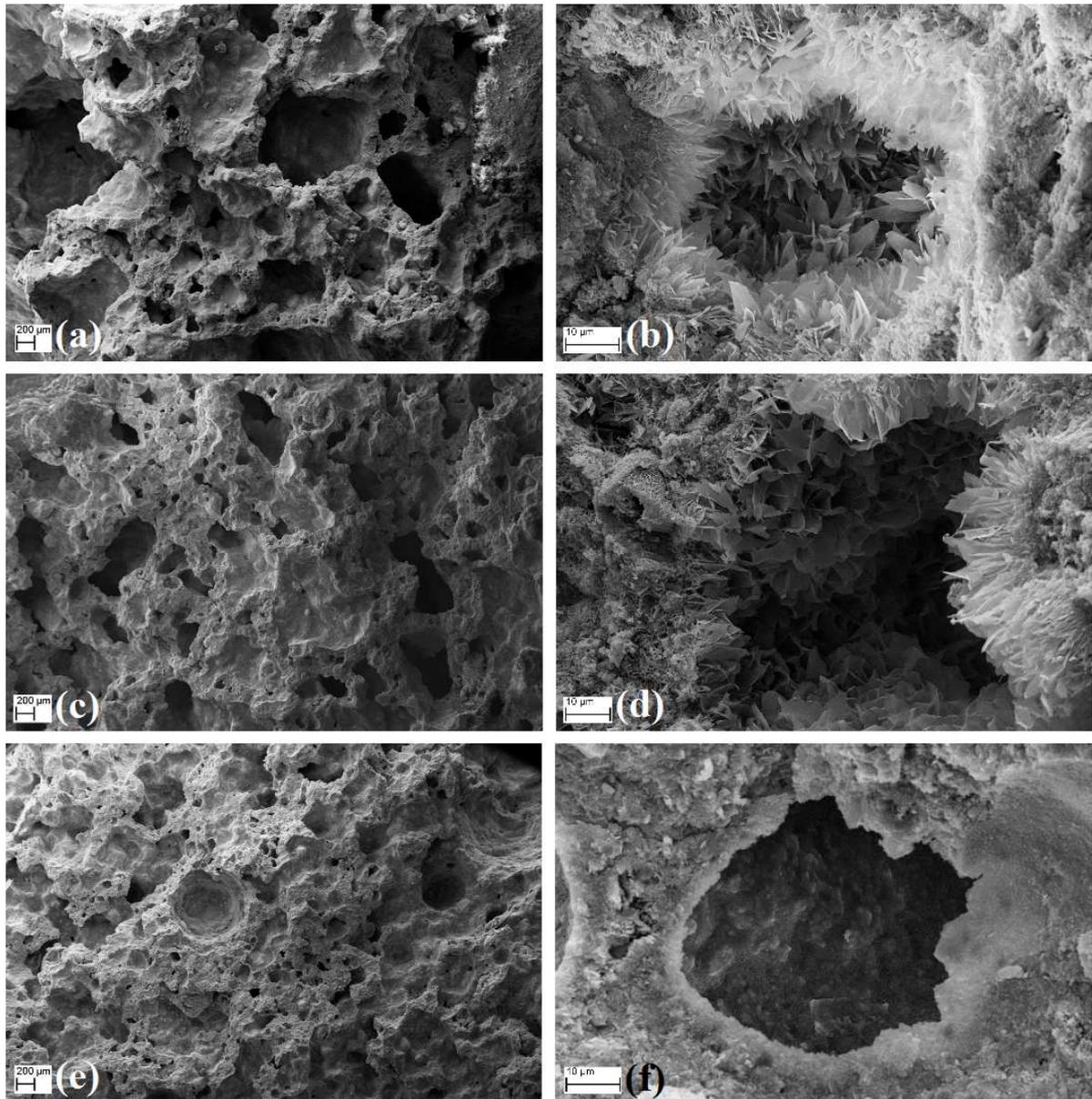


Figura 64 – Micrografia dos espécimes retirados do meio, (a) e (b) T1; (c) e (d) T2; e (e) e (f) T3. Aumento 500-3000x, respectivamente.

Na Figura 64 (b) e (d), é possível verificar a formação de cristais desenvolvidos de forma diferente. Observam-se plaquetas de tobermorita formadas na borda do poro tipo ‘entre grupo’ onde, conforme os autores Narayanan e Ramamurthy (1999), ocorre um maior intertravamento entre as plaquetas de C-S-H. As diferenças entre os traços são as mesmas, porém na Figura 64 (f), nota-se que, nesta magnificação, não se consegue distinguir a forma dos cristais na fase sólida do concreto.

Na Figura 65, a interface, entre cristais e poros, aparece de forma mais nítida, assim como se pode notar a zona de transição entre uma partícula e a fase sólida do concreto. Nessas micrografias, os cristais estão bem formados nos três traços, diferentemente das

imagens anteriores, comprovando que não existe uma homogeneidade na microestrutura do T3 ao longo do mesmo trecho.

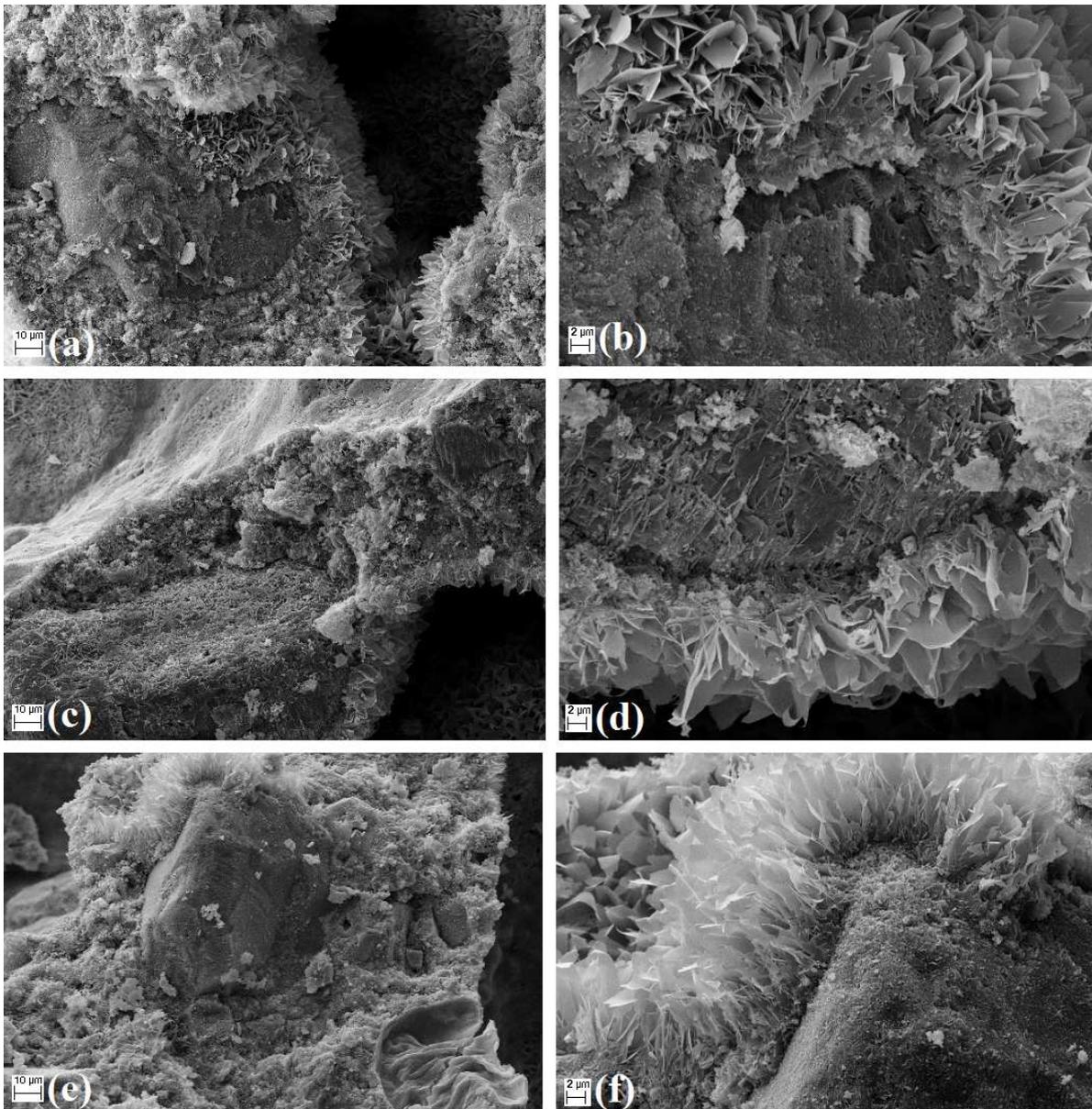


Figura 65 – Micrografia dos espécimes retirados do meio, (a) e (b) T1; (c) e (d) T2; e (e) e (f) T3. Aumento 1500-5000x, respectivamente.

5.5.3 Espécimes retirados do fundo das amostras

As micrografias do fundo são mostradas na Figura 66, onde se observa que esta é a região mais compacta dos corpos de prova (Figura 51), o que se comprova ao analisar-se a Figura 66 (b), onde se nota a conexão entre dois poros do tipo ‘entre grupos’. Isso pode ter ocorrido pelo fato de que, no fundo, a mistura no estado fresco sofre a ação da massa do restante da mistura, sofrendo um confinamento que dificulta a formação de vazios bem definidos pela expansão do hidrogênio.

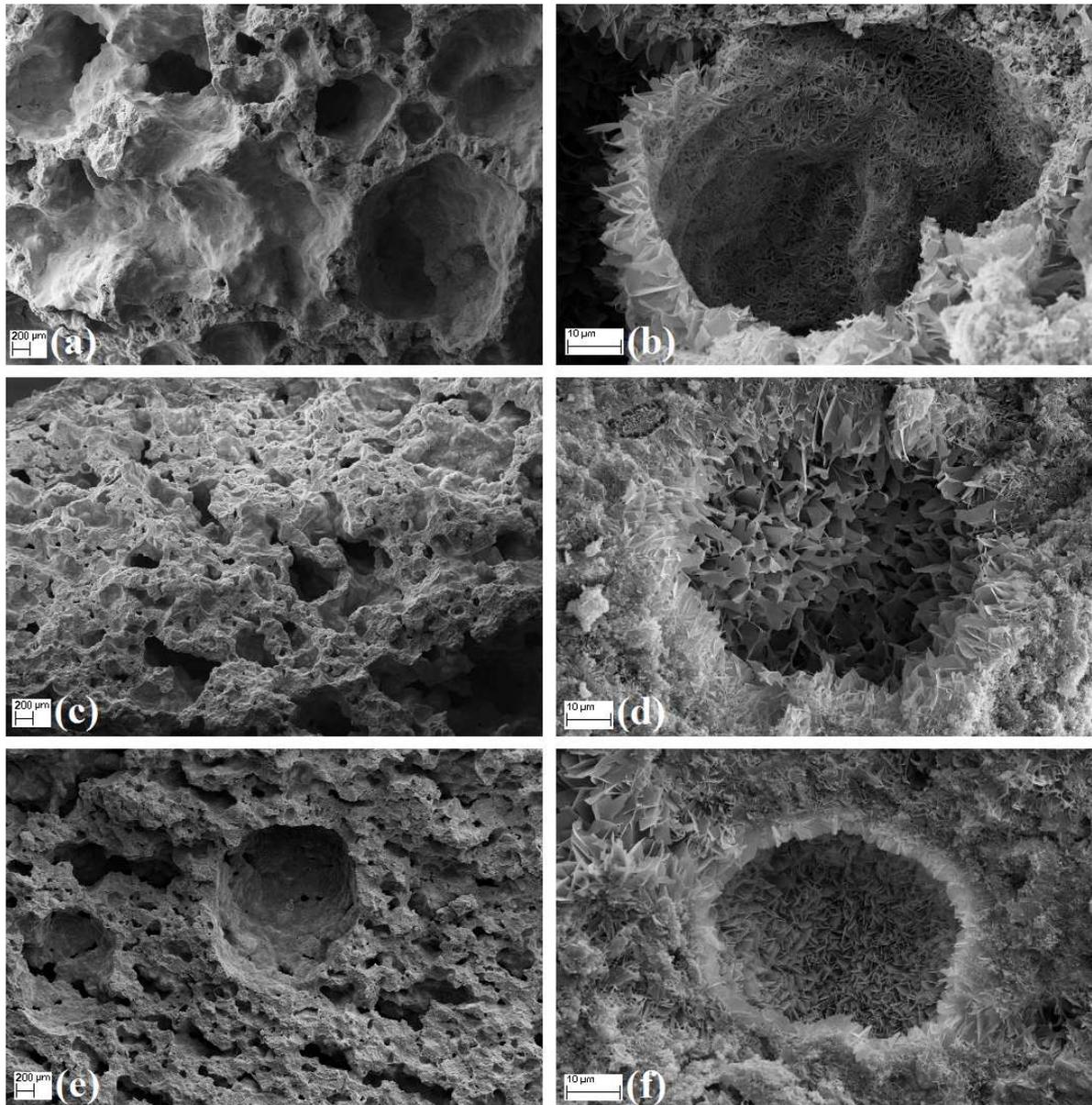


Figura 66 – Micrografia dos espécimes retirados do fundo, (a) e (b) T1; (c) e (d) T2; e (e) e (f) T3. Aumento 500 e 3000x, respectivamente.

Na Figura 66 (d) e (f), novamente aparecem a interface do poro ‘entre grupo’ e as plaquetas com maiores dimensões, porém, no T3, o restante da fase sólida, com essa ampliação, apresenta uma forma mais coesa e refinada.

A forma dos poros, Figura 67, é totalmente irregular no T1, nos demais traços, a compactação é mais evidente quando comparadas as amostras retiradas do topo e do meio dos corpos de prova. Mais uma vez o efeito do confinamento exercido pela mistura no estado fresco acima desta região pode dificultar a expansão da parte mais inferior do corpo de prova.

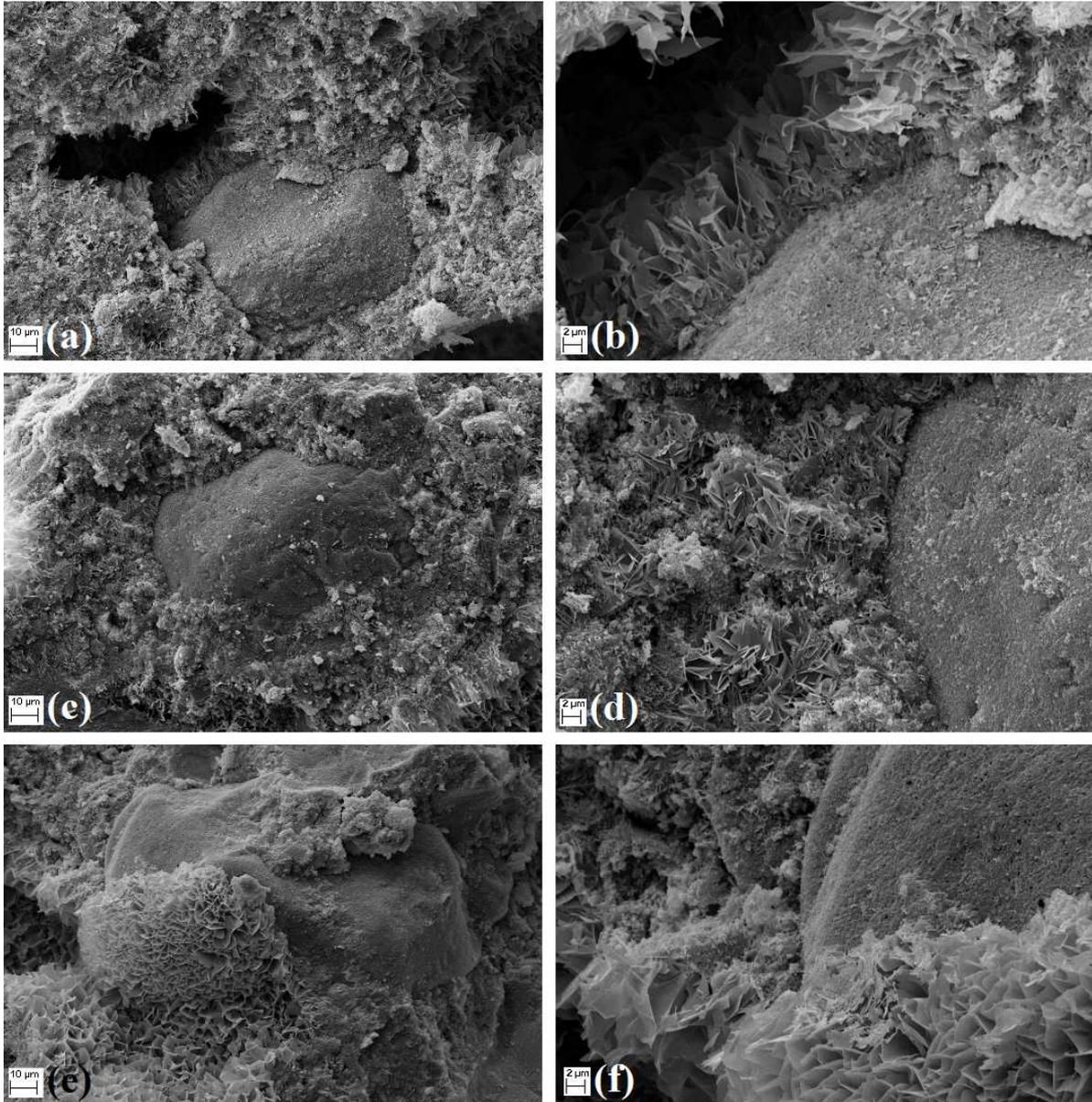


Figura 67 – Micrografia dos espécimes retirados do fundo, (a) e (b) T1; (c) e (d) T2; e (e) e (f) T3. Aumento 1500 e 5000x, respectivamente.

As figuras com maior ampliação do T2 e T3 não apresentam poros com menor dimensão (entre grupos e entre partículas). Isso se justifica pela menor expansão ocorrida nesses dois traços.

Para finalizar estas análises, é possível supor que a heterogeneidade da presença de vazios, devido à expansão do hidrogênio, ao longo da altura do corpo de prova, pode ter ocorrido devido a uma espécie de segregação dos componentes da mistura. Nos concretos convencionais, quando ocorre exsudação de água para o topo do corpo de prova, esta região terá uma porosidade maior do que o fundo do corpo de prova. Em analogia, uma possível exsudação de água e ou de gás pode fazer com que o topo do corpo de prova tenha mais vazios que o fundo.

6 CONCLUSÃO

Neste capítulo, são apresentadas as considerações finais sobre a pesquisa desenvolvida, bem como algumas sugestões para futuros trabalhos.

O proporcionamento empregado neste trabalho para a produção do CCA com agregado natural se mostrou satisfatório, atingindo os limites mínimos quanto à resistência à compressão, para a utilização como bloco de vedação, conforme normas vigentes. A relação entre densidade e resistência à compressão do concreto de referência, no entanto, ficaram abaixo dos limites de norma.

Em relação ao agente expensor, empregou-se o alumínio metálico em pó com proporcionamento realizado em função da estequiometria da reação com o óxido de cálcio livre na cal. A cal empregada neste estudo foi do tipo calcítica.

Houve influência direta do emprego de agregado reciclado sobre a expansão: esta diminuiu sensivelmente à medida que o teor de substituição de ARC foi aumentando. Isso pode ter ocorrido devido à maior porosidade do agregado reciclado e à maior finura do ARC, levando a uma maior demanda de água. No estudo, optou-se por manter a mesma quantidade de água do traço de referência, o que pode ter resultado em uma menor quantidade de água disponível, afetando diretamente a reação de expansão.

Os dois traços com teores de substituição distintos apresentaram algumas características semelhantes, como absorção de água por capilaridade e porosidade efetiva, não havendo diferença significativa no comportamento dessas variáveis quando comparados os teores de substituição de AN por ARC. Já em relação à resistência à compressão e à densidade de massa seca aparente, foi observado um aumento significativo no comportamento destas variáveis conforme o aumento da substituição de AN por ARC.

Foi percebida diferença significativa na microestrutura dos CCA estudados, e, de forma geral, ocorreu um refinamento dela à medida que se aumentou o teor de ARC. Também se verificou uma heterogeneidade na porosidade ao longo da altura dos corpos de prova, sendo o fundo mais compacto que o topo. Provavelmente esse comportamento ocorreu devido a uma possível segregação da mistura e à influência da densidade da mistura no estado fresco. Isso pode ter influído na expansão da mistura, dificultando a formação dos vazios necessários para a melhor formação das plaquetas de C-S-H (tobermorita).

Finalizando, a substituição do agregado natural pelo agregado reciclado de concreto, nas condições empregadas, alterou as propriedades do concreto celular autoclavado

produzido neste estudo exploratório, sem, contudo, inviabilizar o seu emprego. Na análise dos resultados, foi possível perceber que, com uma otimização da dosagem, pode ser obtido um CCA produzido com ARC cujo comportamento seja compatível com o comportamento de CCA produzido somente com o AN.

6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

No término deste estudo exploratório alguns quesitos precisam de um estudo mais aprofundado para confirmação ou não do que foi apontado. Como este foi o primeiro estudo realizado, na UNISINOS, com a produção do concreto celular autoclavado alguns direcionamentos foram executados visando o término da dissertação em tempo hábil.

Para a efetiva aplicação do ARC na produção do CCA se faz necessária apontar algumas sugestões para trabalhos futuros, são elas:

- Um estudo do empacotamento das partículas empregadas pode corrigir a deficiência encontrada na relação entre densidade e resistência à compressão.

- Faz-se necessário estudar a estequiometria da reação deste agente expensor, alumínio em pó, com outros tipos de cales e/ou aglomerantes. Também é possível estudar o emprego de outros agentes expansores de diferentes origens, incluindo resíduos.

- Um estudo direcionado pode definir o percentual de água a ser adicionado conforme o teor de substituição do ARC.

- Sugere-se que essa heterogeneidade da porosidade ao longo da altura do corpo de prova, possa ser mitigada com um estudo aprofundado da distribuição granulométrica do conjunto de materiais seco.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANGULO, S. C. et al. Tratamento térmico e moagem de resíduos de concreto com diferentes classes de resistência. (C. de S. Kazmierczak et al., Eds.) In: III ENCONTRO NACIONAL SOBRE APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL. **Anais...** São Leopoldo: [s.n.], 2013.
- ANGULO, S. C. Paradigmas ambientais para a gestão e reciclagem de resíduos de construção e demolição (RCD) no Brasil. (C. de S. Kazmierczak et al., Eds.) In: III ENCONTRO NACIONAL SOBRE APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL. **Anais...** São Leopoldo: [s.n.], 2013.
- ARNOLD, D. C. M. **Análise da influência da forma dos grãos nas propriedades das argamassas.** Universidade do Vale do Rio dos Sinos - [S.l.]. 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 13438 - Blocos de concreto celular autoclavado.** . Rio de Janeiro: [s.n.], 1995a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 13439 - Blocos de concreto celular autoclavado - Verificação da resistência à compressão.** . Rio de Janeiro: [s.n.], 1995b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 13440 - Blocos de concreto celular autoclavado - Verificação da densidade de massa aparente seca.** . Rio de Janeiro: [s.n.], 1995c.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 13279 - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão.** . Rio de Janeiro: [s.n.], 2005a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 15270-3: Componentes cerâmicos Parte 3: Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural e de vedação – Métodos de ensaio.** . Rio de Janeiro: [s.n.], 2005b.
- BUTTLER, A. M.; CORRÊA, M. R. S. **Desenvolvimento de unidades de alvenaria estrutural produzidas com agregados reciclados de concreto.** Cadernos de Engenharia de Estrutura, São Carlos, v.8, n.32, p. 9-12, 2006.
- FERREIRA, O. A. R. Concreto celulares espumosos. **Boletim Técnico do Departamento de Engenharia de Construção Civil da Escola Politécnica da Universidade São Paulo**, v. BT - PCC 1, p. 20, 1987.
- GOUAL, M. S. et al. Isothermal moisture properties of Clayey Cellular Concretes elaborated from clayey waste, cement and aluminium powder. **Cement and Concrete Research**, v. 36, n. 9, p. 1768-1776, doi:10.1016/j.cemconres.2005.12.017, 2006.
- HAUSER, A.; EGGENBERGER, U. e MUMENTHALER, T. Fly ash from cellulose industry as secondary raw material in autoclaved aerated concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 29, p. 297-302, 1999.

HEINECK, S. **Desempenho de argamassas de revestimentos com incorporação de agregados reciclados de concreto**. Universidade do Vale do Rio dos Sinos - [S.l.]. 2012.

HOLT, E. e RAIVIO, P. Use of gasification residues in aerated autoclaved concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 35, p. 796-802, doi:10.1016/j.cemconres.2004.05.005, 2005.

HUANG, X. et al. Preparation of autoclaved aerated concrete using copper tailings and blast furnace slag. **Construction and Building Materials**, v. 27, n. 1, p. 1-5, doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.08.034, 2012.

IOANNOU, I.; HAMILTON, A. e HALL, C. Capillary absorption of water and n-decane by autoclaved aerated concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 38, n. 6, p. 766-771, doi:10.1016/j.cemconres.2008.01.013, 2008.

KARAKURT, Cenk;; KURAMA, Haldun e TOPÇU, İ. B. Utilization of natural zeolite in aerated concrete production. **Cement and Concrete Composites**, v. 32, n. 1, p. 1-8, doi:10.1016/j.cemconcomp.2009.10.002, 2010.

KIHARA, Y. A Síntese da Tobermorita e sua Aplicação na Engenharia de Materiais. **Instituto de Geociência - USP**, v. 5, n. 1880, p. 1-4, 1991.

KURAMA, H.; TOPÇU, I. B. e KARAKURT, C. Properties of the autoclaved aerated concrete produced from coal bottom ash. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 9, n. 209, p. 767-773, doi:10.1016/j.jmatprotec.2008.02.044, 2009.

KUS, H. e CARLSSON, T. Microstructural investigations of naturally and artificially weathered autoclaved aerated concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 33, n. 9, p. 1423-1432, doi:10.1016/S0008-8846(03)00084-X, 2003.

LAUKAITIS, A. e FIKS, B. Acoustical properties of aerated autoclaved concrete. **Applied Acoustics**, v. 67, n. 3, p. 284-296, doi:10.1016/j.apacoust.2005.07.003, 2006.

LAUKAITIS, Antanas et al. Influence of mechanically treated carbon fibre additives on structure formation and properties of autoclaved aerated concrete. **Construction and Building Materials**, v. 26, n. 1, p. 362-371, doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.06.035, 2012.

LAVALLE, S. **Cellular concrete to the rescue**. Disponível em: <www.cellular-concrete.com>. Acesso em: 5 jan. 2013.

MALLMANN, J. E. C. **Estabilização pozolânica de cinzas volante e pesada com cal dolomítica hidratada e areia, curadas pelos processos de autoclavagem e câmara à temperatura constante**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul - [S.l.]. 1996.

MATSUSHITE, F.; AONO, Y. e SHIBATA, S. **Durability of Building Materials and Components 8**. 1. ed. Canada: NRC Research Press, 1999. p. 159-169

MOSTAFA, N. Y. Influence of air-cooled slag on physicochemical properties of autoclaved aerated concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 35, p. 1349-1357, doi:10.1016/j.cemconres.2004.10.011, 2005.

NARAYANAN, N. e RAMAMURTHY, K. Microstructural investigations on aerated concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 30, p. 457-464, 1999.

NARAYANAN, N. e RAMAMURTHY, K. Structure and properties of aerated concrete: a review. **Cement and Concrete Composites**, v. 22, n. 5, p. 321-329, doi:10.1016/S0958-9465(00)00016-0, 2000.

OIKONOMOU, N. D. Recycled concrete aggregates. **Cement and Concrete Composites**, v. 27, n. 2, p. 315-318, doi:10.1016/j.cemconcomp.2004.02.020, 2005.

PINTO, Tarcísio de Paula. **Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana**. 1999. 189p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Departamento de Engenharia da Construção Civil. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

RAMACHANDRAN, V. S. **Concrete Admixtures Handbook**. 1996.

RILEM SYSTEMS AND STRUCTURES - INTERNATIONAL UNION OF LABORATORIES AND EXPERTS IN CONSTRUCTION MATERIALS. **Autoclaved Aerated Concrete - Properties, Testing and Design: Rilem Recommended Practice**. First edit ed. London: E & FN Spon, 1993. p. 404

SCHEFFLER, M. e COLOMBO, P. **Cellular Ceramics: Structure, Manufacturing, Properties and Applications**. First edit ed. Weinheim: 2005 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2005. p. 527

TECHNOLOGIES, E. C. **Autoclaved Aerated Concrete**. Disponível em: <<http://rebar.ecn.purdue.edu/ect/links/technologies/civil/autoclaved.aspx>>. Acesso em: 9 jan. 2013.

TIKALSKY, P. J.;; POSPISIL, J. e MACDONALD, W. A method for assessment of the freeze-thaw resistance of preformed foam cellular concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 34, p. 889-893, doi:10.1016/j.cemconres.2003.11.005, 2004.

TROIAN, A. **Avaliação da durabilidade de concretos produzidos com agregado reciclado de concreto frente à penetração de íons de cloreto**. Universidade do Vale do Rio dos Sinos - [S.I.]. 2010.

WERLE, A. P. **Determinação de propriedades de concretos com agregados reciclados de concreto, com ênfase na carbonatação**. Universidade do Vale do Rio dos Sinos - [S.I.]. 2010.

WONGKEO, W. e CHAIPANICH, A. Compressive strength, microstructure and thermal analysis of autoclaved and air cured structural lightweight concrete made with coal bottom ash and silica fume. **Materials Science and Engineering A**, v. 527, n. 16-17, p. 3676-3684, doi:10.1016/j.msea.2010.01.089, 2010.

YAZICI, H. et al. Mechanical properties of reactive powder concrete containing high volumes of ground granulated blast furnace slag. **Cement and Concrete Composites**, v. 32, n. 8, p. 639-648, doi:10.1016/j.cemconcomp.2010.07.005, 2010.