



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

WESLEY FÊU DOS SANTOS

**INFLUÊNCIA DA CURA TÉRMICA NAS
PROPRIEDADES MECÂNICAS E NA
MICROESTRUTURA DO CONCRETO
AUTOADENSÁVEL CONTENDO ADIÇÕES DE
METACAULIM E FÍLER CALCÁRIO**

NATAL/RN

2016

WESLEY FÊU DOS SANTOS

**INFLUÊNCIA DA CURA TÉRMICA NAS
PROPRIEDADES MECÂNICAS E NA
MICROESTRUTURA DO CONCRETO
AUTOADENSÁVEL CONTENDO ADIÇÕES DE
METACAUULIM E FÍLER CALCÁRIO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação, em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof^o. Dra. Maria das Vitórias
Vieira Almeida de Sá

Co-orientador: Prof. Dr. Marcos Alyssandro
Soares dos Anjos

NATAL/RN

2016

**INFLUÊNCIA DA CURA TÉRMICA NAS
PROPRIEDADES MECÂNICAS E NA
MICROESTRUTURA DO CONCRETO
AUTOADENSÁVEL CONTENDO ADIÇÕES DE
METACAULIM E FÍLER CALCÁRIO**

Wesley Fêu dos Santos

Orientadora: Prof^o. Dra. Maria das Vitórias
Vieira Almeida de Sá

Co-orientador: Prof. Dr. Marcos Alyssandro
Soares dos Anjos

NATAL/RN

2016

WESLEY FÊU DOS SANTOS

**INFLUÊNCIA DA CURA TÉRMICA NAS
PROPRIEDADES MECÂNICAS E NA
MICROESTRUTURA DO CONCRETO
AUTOADENSÁVEL CONTENDO ADIÇÕES DE
METACAULIM E FÍLER CALCÁRIO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação, em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dra. Maria das Vitórias Vieira Almeida de Sá - Orientador

Prof. Dr. Marcos Alyssandro Soares dos Anjos – Co-orientador

Prof. Dra. Andreza Kelly Costa Nobrega – Examinador Interno

Prof. Dr. Givanildo Alves Azeredo – Examinador Externo

Catálogo da Publicação na Fonte
Universidade Federal do Rio Grande do Norte - Sistema de Bibliotecas Biblioteca
Central Zila Mamede / Setor de Informação e Referência

Santos, Wesley Fêu dos.

Influência da cura térmica nas propriedades mecânicas e na microestrutura do concreto autoadensável contendo adições de metacaulim e fíler calcário / Wesley Fêu dos Santos. - 2016.

100 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Natal, RN, 2017.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Maria das Vitórias Vieira Almeida de Sá.

1. Concreto autoadensável - Dissertação. 2. Adições minerais - Dissertação. 3. Tratamento térmico - Dissertação. I. Almeida, Maria das Vitórias Vieira. II. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 691.327.3

Resumo

A fabricação do Cimento Portland é uma atividade que causa grande impacto ambiental devido à sua elevada taxa de emissão de CO₂ na atmosfera. Visando reduzir esse impacto, a viabilidade técnica de materiais alternativos em substituição ao Cimento Portland tem sido cada vez mais analisada. Já são conhecidos os benefícios que as adições minerais infere ao concreto convencional (CV), no entanto, existe a necessidade de compreender melhor seus benefícios quando utilizadas em CAA e verificar o comportamento deste quando curado termicamente. Assim, este trabalho avalia os efeitos da incorporação de fíler calcário (Fc) e metacaulim (Mk) na hidratação do concreto autoadensável, quando submetido à cura térmica. Para tanto, foram produzidos seis composições de CAA, sendo uma de referência, sem adição mineral, quatro misturas binárias com substituição do cimento por 10% de Mk, 10% Fc, 20% de Mk e 20% Fc e uma terciária com substituição do cimento por 10% de Mk e 10% de Fc. Os concretos foram dosados e realizados os ensaios realizados para os concretos dosados foram: slump flow, T500, L-box, V-test e J-ring para caracterização do CAA no estado fresco. Após iniciada a pega (aproximadamente 3 horas), intervalo chamado de pré-cura, os corpos de prova moldados foram curados através de imersão total em banho aquecido. A taxa de aquecimento utilizada foi de 20 °C/h, chegando às temperaturas máximas de 50, 60 e 70 °C, com posterior resfriamento de 10 °C/h. O tempo total do ciclo (pré-cura, aquecimento, patamar isotérmico e resfriamento), foi de 18 a 20 horas. Também foram confeccionados corpos de prova de CAA que foram curados por imersão em água a temperatura ambiente. As propriedades analisadas no estado endurecido de todas as composições foram: resistência à compressão nas idades de 1, 3, 7 e 28 dias, com módulo de elasticidade dinâmico, absorção de água por capilaridade, massa específica e absorção total aos 28 dias de idade. A análise da microestrutura dos diferentes concretos se deu por microscopia eletrônica de varredura e difração de raios X aos 3 e 28 dias de idade. As adições de metacaulim e fíler calcário podem substituir o cimento Portland, nos percentuais de 10% e 20%, de maneira satisfatória em misturas binárias e terciárias. Aos 28 dias de idade, os CAA curados termicamente em geral não apresentaram resistências à compressão inferiores aos curados a 28

°C. A cura térmica úmida por imersão propicia um aumento na resistência à compressão nas primeiras idades, exceto para os concretos contendo 20% de fíler calcário em substituição ao cimento Portland. Para cada traço estudado, houve um temperatura que se mostrou mais eficaz, ou seja, uma temperatura patamar mais adequada. Na análise da microestrutura dos CAA pode se observar que a elevada resistência obtida a 1 dia de idade, deve-se a rápida formação de CSH para os CAA tratados termicamente.

Palavras-chave: tratamento térmico, adições minerais, concreto autoadensável.

Abstract

The manufacture of Portland cement is an activity that causes great environmental impact due to its high CO₂ emission rate in the atmosphere. In order to reduce this impact, technical feasibility of alternative materials to replace Portland cement has been increasingly analyzed. It is already known the benefits that mineral additions infers to conventional concrete (CV), however, little is known of their use in self-compacting concrete (SCC) subjected to heat treatment. This work evaluates the effects of the incorporation of limestone fillers (LP) and metakaolin (MK) in the hydration of self-compacting concrete, when subjected to thermal curing. For this purpose six SCC compositions were produced, as a reference without mineral addition, four binary mixtures with replacement of cement with 10% MK, 10% LP, 20% MK and 20% LP and a tertiary with substitution of cement by 10% MK and 10% LP. The concrete were measured and made the tests slump flow, T500, L-box, V-test and J-ring to characterize the SCC fresh. After started the crystallization reactions (about 3 hours), range called pre-curing, the molded specimens were cured through total immersion in a warm bath. The heating rate used was 20 °C/hr, reaching the maximum temperatures 50, 60 and 70 °C, with subsequent cooling 10 °C/hr. The total cycle time (pre-curing, heating, cooling and isothermal level) was 18 to 20 hours. Also, specimens were prepared which were cured by immersion in water at room temperature. The analyzed properties in the hardened state of all compositions were compressive strength at ages of 1, 3, 7 and 28 days at modulus, water absorption by capillarity, density, and total absorption to 28 days of age. The analysis of the microstructure of different concrete was given by scanning electron microscopy and X-ray diffraction at 1 and 28 days of age. The CAA thermally cured obtained a high increase in compressive strength at 1 day old, when compared to CAA cured at room temperature. For each dosage analyzed, there is a maximum temperature within the thermal cycle, which provides better mechanical performance to the CAA. The thermal curing causes changes in the microstructure, including, promote the rapid formation of calcium silicate hydrate (CSH). The additions of metakaolin and lime filer can replace Portland cement in percentages of 10% and 20%, satisfactorily in binary and tertiary mixtures. After 28 days the CAA cured thermally groups showed no

resistance to compression to lower cured at 28 ° C. The wet thermal curing dip provides an increase in compressive strength at early ages, except for the concrete containing 20% filler limestone to replace Portland cement. For each studied trait, there was a temperature that was more effective, i.e., a temperature most suitable level. The analysis of the microstructure of the CAA can be seen that the high strength obtained at 1 day old, due to rapid formation of the CSH to the heat-treated CAA.

Keywords: mineral additions, self-compacting concrete and thermal curing.

AGRADECIMENTOS

A Deus pela sua misericórdia e graça. A Ele toda honra, glória e louvor. A minha mãe, Lindóia dos Santos Fêu e ao meu pai, Evaldo Antônio dos Santos que sempre se esforçaram em conceder educação aos seus filhos, em prover recursos e constantemente estarem em oração pela minha vida.

Aos meus amigos e colegas de pós-graduação em especial Fernanda Karolline e Cleber Medeiros e aos estagiários do IFRN: Raphaela Paiva, Ryguell Silva e Mateus Dumont, que estiveram todo tempo acompanhando e auxiliando no desenvolvimento dessa pesquisa.

A professora Dra. Maria das Vitórias pela orientação e paciência durante todo o desenvolvimento desse trabalho. Sua simplicidade, caráter e personalidade levo comigo como um exemplo a ser seguido.

Ao professor Dr. Marcos Alyssandro pela sua co-orientação no desenvolvimento dessa pesquisa. Agradeço grandemente todo seu companheirismo e amizade. Todo o tempo e conhecimento dedicado, suas ideias e ensinamentos foram essenciais nesse trabalho.

Ao Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, Campus Central, por ter cedido seus laboratórios para o a realização dos ensaios necessários a esta pesquisa.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 2.1 - Curvas de fluxo do CCV e CAA (ALENCAR, 2008)
- Figura 2.2 - Ciclo proposto por Cassagnabère et al (2010), adaptado.
- Figura 3.1 - Fluxograma do procedimento experimental, Fonte: Autor (2015)
- Figura 3.2 - Baia de armazenagem do agregado miúdo, Fonte: Autor (2015)
- Figura 3.3 - Baia de Armazenagem do agregado graúdo, Fonte: Autor (2015)
- Figura 3.4 - Gráfico de caracterização do agregado miúdo, Fonte: Autor (2015)
- Figura 3.5 - Gráfico de caracterização do agregado graúdo, Fonte: Autor (2015)
- Figura 3.6 - Moldes cúbicos 100x100x100 mm, Fonte: Autor (2015)
- Figura 3.7 - Ciclo térmico utilizado, Fonte: Autor (2015)
- Figura 3.8 – “Banho maria”
- Figura 3.9 – “Banho maria” c/ formas cúbicas
- Figura 4.1 - Evolução da resistência à compressão do CAA de referência com diferentes temperaturas de cura
- Figura 4.2 - Evolução da resistência à compressão do CAA 10% MK com diferentes temperaturas de cura
- Figura 4.3 - Evolução da resistência à compressão do CAA 20% MK com diferentes temperaturas de cura
- Figura 4.4 - Evolução da resistência à compressão do CAA 10% FC com diferentes temperaturas de cura
- Figura 4.5 - Evolução da resistência à compressão do CAA 20% FC com diferentes temperaturas de cura
- Figura 4.6 - Evolução da resistência à compressão do CAA 10%MK10%FC com diferentes temperaturas de cura
- Figura 4.7 - Resistências de 1 dia de cura a 28°C
- Figura 4.8 - Resistências de 28 dias de cura a 28°C
- Figura 4.9 - Resistências de 1 dia de cura a 50°C
- Figura 4.10 - Resistências de 28 dias de cura a 50°C

Figura 4.11 - Resistências de 1 dia de cura a 60°C

Figura 4.12 - Resistências de 28 dias de cura a 60°C

Figura 4.13 - Resistências de 1 dia de cura a 70°C

Figura 4.14 - Resistências de 28 dias de cura a 70°C

Figura 4.15 - Módulo de elasticidade dinâmico dos CAA sob cura ambiente a 28°C

Figura 4.16 - Módulo de elasticidade dinâmico dos CAA de cura a 50°C

Figura 4.17 - Módulo de elasticidade dinâmico dos CAA de cura a 60°C

Figura 4.18 - Módulo de elasticidade dinâmico dos CAA de cura a 70°C

Figura 4.19 - Absorção total sob cura ambiente a 28°C

Figura 4.20 – Índice de vazios sob cura ambiente a 28°C

Figura 4.21 – Massa específica sob cura ambiente a 28°C

Figura 4.22 - Absorção total sob cura ambiente a 50°C

Figura 4.23 – Índice de vazios sob cura ambiente a 50°C

Figura 4.24 – Massa específica sob cura ambiente a 50°C

Figura 4.25 - Absorção total sob cura ambiente a 60°C

Figura 4.26 – Índice de vazios sob cura ambiente a 60°C

Figura 4.27 – Massa específica sob cura ambiente a 60°C

Figura 4.28 - Absorção total sob cura ambiente a 70°C

Figura 4.29 – Índice de vazios sob cura ambiente a 70°C

Figura 4.30 – Massa específica sob cura ambiente a 70°C

Figura 4.31 - Absorção por capilaridade dos CAA sob cura ambiente a 28°C

Figura 4.32 - Absorção por capilaridade dos CAA de cura a 50°C

Figura 4.33 - Absorção por capilaridade dos CAA de cura a 60°C

Figura 4.34 - Absorção por capilaridade dos CAA de cura a 70°C

Figura 4.35 – MEV do CAA de referência a 1 dia de idade. A – temperatura 28°C, B – temperatura de 70°C

Figura 4.36 – DRX do CAA de referência a 1 dia de idade

Figura 4.37 – DRX do CAA de referência a 28 dias de idade

Figura 4.38 – MEV do CAA com 20% de metacaulim a 1 dia de idade. A – temperatura 28°C, B – temperatura de 70°C

Figura 4.39 – DRX do CAA com 20% de metacaulim a 1 dia de idade

Figura 4.40 – DRX do CAA com 20% de metacaulim a 28 dias de idade

Figura 4.41 – MEV do CAA com 20% de filer calcário a 1 dia de idade. A – temperatura 28°C, B – temperatura de 70°C

Figura 4.42 – DRX do CAA com 20% de filer calcário a 1 dia de idade

Figura 4.43 – DRX do CAA com 20% de filer calcário a 28 dias de idade

Figura 4.44 – MEV do CAA com 10% de metacaulim e 10% de filer calcário a 1 dia de idade. A – temperatura 28°C, B – temperatura de 70°C

Figura 4.45 – DRX do CAA com 10% de metacaulim e 10% de filer calcário a 1 dia de idade

Figura 4.46 – DRX do CAA com 10% de metacaulim e 10% de filer calcário a 28 dias de idade

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Valores típicos dos materiais nas misturas de CAA, Fonte: EFNARC (2005)

Tabela 2.2 - Parâmetros de dosagem típicos das misturas de CAA, Fonte: Sebaibi et al (2013)

Tabela 2.3 - Efeito de diferentes intervalos de pré-cura, adaptado de Santos (2010)

Tabela 3.1 - Diâmetro máximo, módulo de finura, massa unitária, massa específica e teor de material pulverulento dos agregados caracterizados, Fonte: Autor (2015)

Tabela 3.2 - Caracterização química CP V ARI RS, Fonte: Mizu (2015)

Tabela 3.3 - Caracterização física CP V ARI RS, Fonte: Mizu (2015)

Tabela 3.4 - Caracterização mecânica CP V ARI RS, Fonte: Mizu (2015)

Tabela 3.5 – FRX do cimento CP V ARI RS, Fonte: Autor (2015)

Tabela 3.6 - Caracterização química Metacaulim HP, Fonte: Metacaulim do Brasil (2015)

Tabela 3.7 - Caracterização física Metacaulim HP, Fonte: Metacaulim do Brasil (2015)

Tabela 3.8 – FRX do Metacaulim, Fonte: Autor (2015)

Tabela 3.9 – FRX do Fíler Calcário, Fonte: Autor (2015)

Tabela 3.10 - Traço unitário em peso e consumo para 1m³ do CAA desenvolvido na pesquisa, Fonte: Autor (2015)

Tabela 3.11 - Traços analisados para 1 m³ de concreto, Fonte: Autor (2015)

Tabela 4.1 - Traços analisados para 1 m³ de concreto, Fonte: Autor (2015)

LISTA DE QUADROS

Quadro 3.1 – Classe de espalhamento ABNT NBR 15823-1:2010

Quadro 3.2 – Classe de viscosidade, fluxo livre ABNT NBR 15823-1:2010

Quadro 3.3 – Classe de viscosidade, fluxo confinado ABNT NBR 15823-1:2010

Quadro 3.4 – Classe de habilidade passante, fluxo livre ABNT NBR 15823-1:2010

Quadro 3.5 – Classe de habilidade passante, fluxo confinado ABNT NBR 15823-1:2010

Quadro 3.6 - Normas de referência dos ensaios de índices físicos

Quadro 4.1 – Classificação dos CAA segundo a ABNT NBR 15823-1:2010

Quadro 4.2 – Siglas utilizadas nas análises de DRX

SUMÁRIO

1	Introdução	1
1.1	Objetivos	2
1.1.1.	Objetivo geral.....	2
1.1.2.	Objetivo específico.....	2
1.1.3.	Justificativa	2
2	Revisão de literatura	4
2.1	Concreto autoadensável.....	4
2.1.1	Concreto autoadensável com adições minerais	6
2.2	Dosagem e tratamento térmico do CAA	12
2.2.1	Dosagem do CAA	12
2.2.2	Tratamento térmico.....	13
2.2.3	Ciclo de cura térmica	16
3	Materiais e métodos.....	22
3.1	Planejamento dos trabalhos	22
3.2	Etapa 01 – Caracterização dos materiais.....	25
3.2.1	Agregados	25
3.2.2	Cimento	28
3.2.3	Adições minerais	30
3.3	Etapa 02 – Detalhamento do método de dosagem do CAA.....	33
3.3.1	Dosagem do CAA	33
3.3.2	Cálculo dos quantitativos de materiais.....	34
3.3.3	Produção do CAA	35
3.3.4	Caracterização do CAA no estado fresco	36
3.4	Etapa 03 – Tratamento térmico	40
3.5	Etapa 04 – Caracterização do CAA no estado endurecido	42
3.5.1	Propriedades mecânicas	42
3.5.2	Índices físicos	43
3.5.3	Análise microestrutural	44
4	Análise dos resultados e discussões.....	45
4.1	Propriedades no estado fresco.....	45

4.2	Propriedades no estado endurecido.....	47
4.2.1	Resistência à compressão.....	47
4.2.2	Módulo de elasticidade dinâmico.....	63
4.2.3	Absorção total, índice de vazios e massa específica.....	66
4.2.4	Absorção por capilaridade.....	72
4.3	Análise da microestrutura.....	76
4.3.1	CAA de referência.....	77
4.3.2	CAA 20 MK.....	80
4.3.3	CAA 20 FC.....	82
4.3.4	CAA 10MK10FC.....	85
5	Conclusões.....	88
6	Sugestões para os estudos futuros.....	89
	Referências.....	90

1 Introdução

O clínquer, principal matéria prima do cimento Portland, após a mistura em proporções adequadas dos seus componentes (material calcário, alumina e sílica) sofre queima em fornos rotativos a uma temperatura aproximada de 1450 °C (NEVILLE, 1997). Esse processo causa grande impacto ambiental devido ao grande consumo de energia necessária e inerente emissão gasosa de CO₂.

Como alternativa ao uso do cimento Portland e conseqüente redução no consumo de clínquer, tem se buscado cada vez mais materiais alternativos, que diminuam a demanda energética e emissões de poluentes ao meio ambiente. Uma dessas alternativas tem sido o uso de adições minerais.

A maioria das adições minerais são subprodutos e necessitam de descarte apropriado. Quando adequadamente utilizadas em concreto autoadensável pode promover desempenho igual ou superior ao cimento Portland, além de trazerem consigo uma diminuição dos impactos gerados em sua produção.

O concreto autoadensável quando utilizado em fábricas de estruturas pré-moldadas, ou em outras aplicações, deve apresentar adequadas propriedades reológicas e elevado desempenho em suas propriedades mecânicas e durabilidade.

Com objetivo de se obter adequadas características reológicas, em geral, pode se utilizar uma adição sem atividade química (exemplo: fíler calcário). Já se tem conhecimento que as adições inertes, apesar de não possuírem atividade química, podem proporcionar elevação de resistência ao concreto, através de um maior empacotamento do esqueleto granular (CASTRO AD & PANDOLFELLI V). Para se obter atividade pozolânica e conseqüente redução do consumo de cimento, metacaulim é uma das alternativas (PERLOT *et al*, 2013).

Para dar celeridade ao processo fabril, é corrente na indústria de pré-moldados de concreto a adoção de tratamento térmico, que apesar de favorecer a resistência inicial, tende a reduzir a resistência para idades avançadas, isso quando comparado com um concreto submetido a cura úmida a temperatura ambiente (VERBECK & HELMUTH, 1968).

Assim, analisar as propriedades de misturas de CAA contendo adições minerais (inertes ou pozolânicas) quando submetidas a tratamento térmico, se mostra um cenário real ao que se pratica em fábricas de estruturas pré-moldados, aproximando o tema pesquisado com sua aplicação.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo geral

O objetivo geral dessa pesquisa é avaliar o efeito que diferentes patamares de cura térmica, que teriam possibilidade de uso em fábricas de estruturas pré-moldadas, proporcionam à hidratação e microestrutura do concreto autoadensável contendo adições de metacaulim e fíler calcário.

1.1.2. Objetivo específico

- Analisar a utilização de adições minerais como alternativa à substituição do cimento Portland;
- Avaliar o comportamento no estado fresco do CAA em misturas binárias e terciárias com diferentes teores de substituição de metacaulim e fíler calcário ao cimento Portland;
- Avaliar a influência de cura térmica com patamar de 50, 60 e 70 °C nas propriedades mecânicas, físicas e microestrutural dos CAA;
- Avaliar a influência das adições minerais no comportamento mecânico e microestrutural do CAA.

1.1.3. Justificativa

Por questões técnicas, logísticas e econômicas, um grande número de fábricas de pré-moldados de concreto buscam aumentar a resistência inicial através do tratamento térmico. O que torna válido avaliar como os materiais regionais se comportam quando utilizados em concretos autoadensáveis submetidos a tratamento térmico em diferentes temperaturas.

A utilização das adições de metacaulim e fíler calcário objetivam atender as características reológicas e propriedades necessárias ao estado endurecido. Sendo uma alternativa para a obtenção de CAA com menores consumos de cimento e que apresente desempenho satisfatório quanto a fluidez.

O ciclo térmico proposto terá como análise três temperaturas máximas distintas (50, 60 e 70°), pois, segundo a bibliografia, 60° C apresenta os melhores resultados para as propriedades no estado endurecido, sendo as temperaturas de 50° e 70° C adotadas como limites inferior e superior, respectivamente. A duração total do ciclo entre 18 e 20 horas.

A análise microestural se faz necessária pois o CAA contendo adições minerais em substituição ao cimento Portland e sob efeito de cura térmica, sofre alterações em sua microestrutura, que o diferenciam do concreto autoadensável sem a utilização de adições e curado por via úmida a temperatura ambiente. Tais alterações irão se refletir nas propriedades do concreto em seu estado endurecido e na formação dos compostos hidratados.

2 Revisão de literatura

2.1 Concreto autoadensável

No final da década de 70 e início dos anos 80, pesquisas em países como Itália, Alemanha e Japão levaram ao desenvolvimento de misturas de concreto de alta trabalhabilidade que são comercialmente conhecidos por vários nomes, como concreto autoadensável, concreto autocompactável, concreto autonivelante e concreto reoplástico. O concreto autoadensável pode ser definido como um concreto fluido que pode ser moldado in loco sem o uso de vibradores para formar um produto livre de vazios e falhas (MEHTA & MONTEIRO, 2014).

A principal diferença entre o concreto convencional (CV) e o concreto autoadensável (CAA) consiste na sua reologia. Para os concretos no estado fresco, dois conceitos fundamentais da reologia atuam simultaneamente: tensão de escoamento e viscosidade. A tensão de escoamento está relacionada com o a deformação (espalhamento), sendo a fluidez menor quanto maior a tensão de escoamento, assim, concretos com menor fluidez necessitam de uma maior tensão, “esforço”, para se deslocarem, significando uma maior tensão de escoamento. A viscosidade, entretanto, possui relação direta com a trabalhabilidade ou coesão, uma alta viscosidade torna o CAA difícil de ser bombeável, aumentando a probabilidade de vazios ou nichos de concretagem (LARRARD & SEDA, 2002).

Para o CAA entende-se que a tensão de escoamento deve ser baixa, o que propiciará a alta fluidez, no entanto, a viscosidade deve ser moderada com o objetivo de propiciar a estabilidade e resistência à segregação necessária. Nos CV, esses valores são opostos, pois exigem tensões de escoamento mais altas e viscosidades baixas (GOMES & BARROS, 2002).

Sobre as tensões de escoamento e viscosidade plástica, Fava & Fornasier (2004) apud Alencar (2008), destacam algumas características que o CAA deverá apresentar:

- um valor muito pequeno ou nulo de tensão de escoamento (cisalhamento (σ)) fornece ao concreto um comportamento muito próximo a um fluido Newtoniano. Isso implicará em uma elevada fluidez.

- um valor moderado de viscosidade (η), de forma a fornecer uma adequada resistência a segregação. Um elevada viscosidade favorece os efeitos de bloqueio enquanto uma viscosidade muito baixa favorece a segregação.

Na Figura 2.1, estão representadas as várias curvas de fluxo para CV e CAA, com indicação das zonas de risco à segregação e bloqueio.

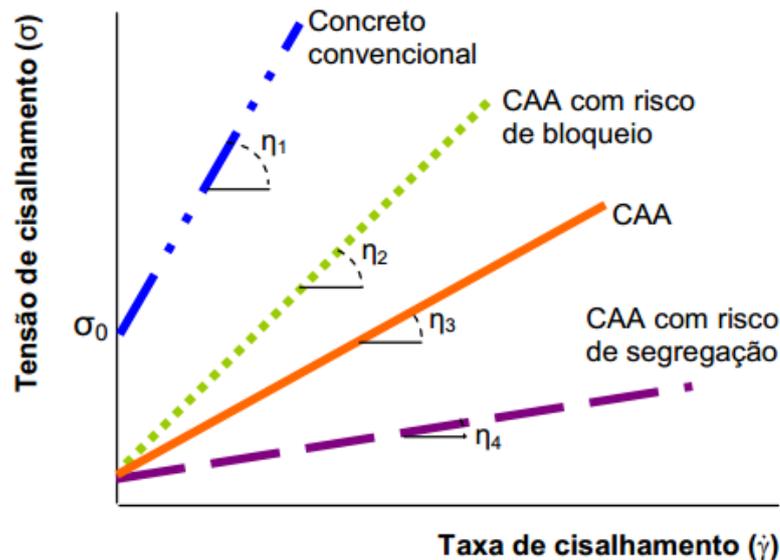


Figura 2.1 - Curvas de fluxo do CCV e CAA (ALENCAR, 2008)

Um baixo valor de tensão de escoamento é fornecido pelo aditivo promovedor de fluidez (superplastificante) e água, sendo a viscosidade função da ação dos materiais finos (cimento e adições minerais) ou aditivos modificadores de viscosidade (BILLBERG, 1999).

A água aumenta a fluidez, entretanto, diminui sua viscosidade, o que não acontece com a utilização do aditivo superplastificante, que tem por princípio aumentar a fluidez sem contribuir de maneira acentuada na redução da viscosidade (OKAMURA, 1997).

De maneira geral, o comportamento da pasta é regido pelas partículas finas contidas na mistura, que irão atuar fisicamente e quimicamente, sendo a reologia do CAA controlada pela fricção entre essas partículas. A tensão de escoamento tem mais relação com a distância entre as partículas da pasta, já a viscosidade representa a frequência de contato entre elas (SUGAMATA *et al*, 2003).

Em algumas situações a tensão de escoamento e a viscosidade podem atuar juntas na resistência à segregação: quando houver valores muito baixo de viscosidade plásticas a tensão de escoamento deve ser alta e quando a viscosidade plástica for alta a tensão de escoamento deverá ser baixa (NIELSSON & WALLEVIK, 2003). Um concreto com baixa viscosidade e baixa tensão de escoamento, por exemplo, tem menor capacidade em se manter homogêneo no lançamento, o que poderá favorecer o enfraquecimento da aderência entre a pasta e as partículas de agregado e armadura em algumas regiões (KHAYAT *et al*, 1999).

Já um CAA típico, é um concreto fluido com baixa tensão de escoamento, com um valor de abatimento acima de 200 mm e um valor de espalhamento acima de 600 mm, de elevada coesão, alta viscosidade, e pode ser lançado e adensado sem a ajuda de vibradores. Essas propriedades são comumente alcançadas com a maior proporção de pasta e cimento em relação a quantidade de agregado, do que a normalmente utilizada em concretos comuns (MEHTA & MONTEIRO, 2014).

2.1.1 Concreto autoadensável com adições minerais

O grande consumo de energia e grande quantidade de emissões de CO₂ provenientes da fabricação do clínquer tem causado relevante impacto ambiental. Uma tonelada da clínquer requer cerca de 3,68-6,87 GJ e libera cerca de uma tonelada de CO₂ para a atmosfera (GARTNER, 2004). Em função disso, a utilização unicamente de cimento Portland em concretos convencionais ou CAA, tem sido substituída por misturas contendo cimento e adições minerais.

Um exemplo de adição mineral que pode ser utilizada em substituição ao cimento é o metacaulim. O metacaulim é uma adição mineral pozolânica que é obtido pela ativação por meio da temperatura do silicato de alumínio, produzido principalmente pela calcinação do caulim a temperatura entre 700 a 850 °C (SABIR *et al*, 1996).

A utilização de metacaulim em substituição ao clínquer contido no cimento tras consigo ganhos ambientais. A decomposição do metacaulim libera menor quantidade de CO₂, a argila caulinita é queimada a baixa temperatura e o material bruto é o silicato de alumínio, que não sofre descarbonatação durante o processo de queima. Além

disso a quantidade de CO₂ liberado na produção de metacaulim é reduzido, aproximadamente 96 Kg eq. CO₂/tonelada, que pode chegar a valores próximos a zero se calcinado em fornos com biogás (PERLOT ET AL, 2013).

As adições minerais podem ser utilizadas em misturas binárias, terciárias ou quaternárias no concreto. Entende-se por composição primária no concreto com a utilização de apenas cimento Portland como aglomerante, assim, a junção de cimento com uma, duas ou três adições minerais, como misturas (ou adições) binárias, terciárias e quaternárias respectivamente. O principal benefício dessa combinação é contribuir na destinação de materiais que possam atuar como adições minerais ao concreto, reduzindo o uso de cimento Portland, e através disso, reduzir os custos envolvidos na produção de concreto (DERABLA & BENMALEK, 2014).

Além dos benefícios mencionados, as adições secundárias, terciárias e quaternárias podem melhorar o desempenho dos concretos em suas características reológicas e mecânicas. Cossagnabere *et al* (2009) verificaram que a substituição de 25% do cimento por metacaulim, pode propiciar um acréscimo de até 40% da resistência à compressão para 1 dia de idade.

A utilização de adições minerais no concreto autoadensável (CAA) além de contribuir para a sustentabilidade, melhora o desempenho de suas propriedades no estado fresco e endurecido (GESOGLU *et al*, 2009). Siddique (2011) comenta que a utilização de cinza volante em teores de 15% a 35% em substituição ao cimento aumentam a fluidez do concreto conduzindo a maiores valores de slump flow, sem aumentar os custos e reduzindo a dosagem de aditivo promovedor de fluidez.

Nos concretos com reduzidas relações água/pó e alta substituição de adição mineral, as mudanças na resistência à compressão são mais complexas, devido a combinação dos efeitos físicos e químicos das pozoladas no concreto. O físico influencia o refinamento dos poros, já o efeito químico tem relação com a reação das pozolanas e processo de hidratação (HALIT, 2007).

A elevada finura das adições minerais contribui de forma positiva no arranjo e granulometria das partículas, garantindo melhorias na coesão do concreto em seu estado fresco e conseqüentemente na durabilidade. No estado endurecido as adições

atuam promovendo melhorias significativas na microestrutura do concreto, reduzindo a interconexão entre seus poros capilares (DERABLA & BENMALEK, 2014).

2.1.1.1 CAA com adição de metacaulim

Analisando a sustentabilidade no uso do metacaulim, a baixa ou inexistente emissão de CO₂ e o baixo consumo de energia em sua fabricação, tornam sua utilização em substituição ao cimento Portland, para uso em concretos, uma alternativa viável. Seguindo de seus efeitos positivos nas propriedades reológicas, resistência e durabilidade (SABIR et al, 1996).

Efeitos do metacaulim na reologia do CAA:

Segundo Sfikas *et al* (2014), a trabalhabilidade do CAA é afetada por um alto consumo de metacaulim, o que demanda um aumento da quantidade de aditivo promovedor de fluidez, para garantir o mesmo comportamento para taxas menos elevadas. Esse efeito é atribuído a elevada superfície específica do metacaulim quando comparado com o cimento ou fíler calcário.

Sfika *et al* (2014) também afirmam que a viscosidade mensurada pelo V-funil aumenta, com o incremento de metacaulim à mistura, independente do componente substituído. Esse efeito é mais evidente na substituição do cimento. Na mesma condição, o concreto flui mais rapidamente na análise do espalhamento através do slump-flow, embora apresente um menor diâmetro.

Efeitos do metacaulim nas propriedades do CAA no estado endurecido:

Sobre a contribuição do metacaulim na resistência à compressão Poon *et al* (2001) verificaram que o uso de 10% de metacaulim em substituição ao cimento apresentam melhores resistências à compressão em todas as idades analisadas, em comparação a matriz sem adição e com adição de sílica ativa e cinza volante. Para 5% e 10% de substituição, nas idades analisadas (3, 7, 28 e 90 dias), as misturas contendo metacaulim apresentaram a menor porosidade e diâmetro de poros médios menores que as misturas sem adição e as que utilizavam sílica.

Kim *et al.* (2007) avaliaram a resistência à compressão do concreto de alta resistência com substituição de cimento Portland por adições de metacaulim e sílica ativa (SA) nos teores 5, 10, 15 e 20%. Na substituição contendo 10% de MK observou-se melhorias significativas nas idades de 1 e 3 dias (idades iniciais), fundamentais no controle de içamento, desforma e protensões na industriais de pré-moldados. Apesar da resistência à compressão com o teor de 5% de MK a 1 dia de idade se aproximar do teor de 10%, uma maior utilização de adição promove ganhos ambientais. Houve redução na resistência à compressão nas idades de 1, 3, 28, 56 e 91 dias de idade para o CAA contendo 20% de substituição de metacaulim, quando comparado as misturas sem metacaulim e com substituição no teores de 5, 10 e 15%.

Para Sfikas *et al* (2014), entretando, a resistência à compressão do CAA aos 28 e 360 dias de idade tende a aumentar de maneira proporcional ao aumento da quantidade de metacaulim em substituição ao cimento. Sendo crescente para os teores de 5, 10, 15 e 20%. Segundo os mesmos autores a resistência à compressão obtida aos 28 dias de idade é muito similar à obtida aos 360 dias de idade, evidenciando a reação pozolânica praticamente completa aos 28 dias.

Com relação a análise dos parâmetros de durabilidade do CAA Shekarchi *et al* (2010) analisaram efeitos da utilização de 15% de metacaulim em substituição ao cimento. Quando comparado ao concreto contendo apenas cimento Portland, observaram que é possível se obter uma redução de: 50% na penetração de água, 37% na permeabilidade a gás, 27% na absorção de água, e 47% na penetração de íons cloreto, além de promover um acréscimo de 20% na resistência à compressão e 450% em sua resistividade elétrica.

Segundo Madandoust *et al.* (2012) a utilização de MK a 10% aumenta a resistência à compressão do CAA, nas idades iniciais e demais idades, sendo mais evidente aos 14 dias, com aumento de aproximadamente 27%. Contribui também na diminuição da absorção (<3%), sendo essa redução mais acentuada para baixas relações água/pó.

No estudo desenvolvido por Poon *et al.* (2006) foi avaliada a influência na penetração de íons cloreto para os concretos com adição de metacaulim (teores de 5, 10 e 20%) e sílica ativa (teores de 5 e 10%) em substituição ao cimento Portland. A análise foi feita com base nos procedimentos normativos prescritos na ASTM C1202-

94, que mensura a resistência à penetração de íons cloreto expressa como uma indicação elétrica: a carga total passante em coulombs durante 6 horas de ensaio. Os concretos contendo MK e SA obtiveram melhores resultados de resistência à penetração de íons cloreto e resistência à compressão, que os concretos contendo apenas cimento Portland.

Segundo Poon *et al* (2006), tais melhorias nas propriedades mecânicas e durabilidade do concreto que contém adições de metacaulim, podem ser atribuídas ao efeito fíler, que provoca empacotamento, refinamento dos poros e por conseguinte acelera as reações de hidratação. Outra contribuição se deve a sua atividade pozolânica com o hidróxido de cálcio, formando compostos resistentes (C-S-H) e aumentando a resistência da matriz cimentícia. Os autores puderam observar também, que um concreto que utilize 10% de MK obtém benefícios em suas propriedades mecânicas, durabilidade e microestrutura, quando comparados aos concretos contendo apenas cimento Portland.

Efeitos do metacaulim na microestrutura do CAA:

Segundo Ramezaniapour *et al.* (2014), o uso de metacaulim provoca melhorias significativas na durabilidade dos concretos sob regime de cura térmica. Esses benefícios podem estar relacionados pela rápida formação de C-S-H gel e cristais de CH, provocando um refinamento dos poros internos. A resistividade superficial aumenta, devido ao consumo de C_3A .

2.1.1.2CAA com adição de fíler calcário

A utilização de fíler calcário (Fc) como adição mineral em concretos pode ser uma alternativa ao descarte de subprodutos da britagem da rocha calcária em pedreiras comerciais. Segundo Felekoglu (2007), que buscou analisar a incorporação de altos teores de pó de calcário em concreto autoadesável, destaca que o pó proveniente da britagem pode causar problemas ambientais e causar riscos a saúde da população.

Efeitos do fíler calcário na reologia do CAA:

Segundo Mohammed *et al* (2013), os grãos de fíler calcário possuem uma forma angulosa com formação de arestas. Essa geometria das partículas explica a maior quantidade de aditivo promovedor de fluidez que um CAA contendo fíler calcário irá requerer, quando comparado aos mesmo concreto com adições de cinza volante, por exemplo. A forma angulosa das partículas de fíler calcário também indica elevada área superficial para grãos de mesma dimensão e em função disso, demanda uma maior quantidade de água em sua superfície.

Efeitos do fíler calcário nas propriedades do CAA no estado endurecido:

Segundo Felekoglu (2007), a utilização de 10% de fíler calcário em substituição ao cimento promove um aumento na resistência à compressão das pastas de cimento, o que pode ser um efeito positivo na promoção de melhorias na pasta de CAA. Para a utilização do fíler no concreto autoadensável, os parâmetros de mistura, dosagem e fases da produção, devem ser adequadamente ajustados, em particular a dosagem de aditivo promovedor de fluidez.

Segundo Derabla & Benmalek (2014), a resistência à compressão nas idades iniciais do CAA contendo 20% de fíler calcário submetido a tratamento térmico é elevada, entretando, à longo prazo (180 dias), apresenta uma resistência inferior a escória granulada e cristalizada para o mesmo teor de substituição. Uma substituição de 40% e fíler calcário favorece a resistência inicial, mas prejudica a resistência aos 180 dias de idade, tanto para cura térmica a vapor como para cura úmida a temperatura ambiente.

A utilização de fíler calcário no CAA, mantendo-se constante a quantidade de cimento, geralmente reduz a quantidade de aditivo fluidificante necessária e aumenta a resistência à compressão aos 28 dias (FELEKOGLU, 2007). Para Derabla & Benmalek (2014) que pesquisou o fíler em substituição ao cimento, entretanto, o uso de fíler aumenta a fluidez do CAA, mas afeta negativamente a estabilidade, reduzindo a viscosidade da mistura para teores crescentes de substituição.

Efeitos do fíler calcário na microestrutura do CAA:

Segundo Mohammed *et al* (2013), com relação a resistência à compressão teores de até 33% de fíler calcário (FC) mostram-se adequados a utilização no CAA

para concretos com resistência entre 50-60 MPa. Entretanto, na análise da microestrutura do CAA em que foi adicionado cinza volante junto com o fíler calcário, foi observado uma matriz mais densa e melhor zona de transição quando comparado ao CAA contendo apenas fíler. Assim, do ponto de vista físico, uma aglomeração de partículas de FC, de grandes dimensões, com geometria angular, aumenta a água aprisionada entre as partículas, levando a um aumento na espessura da zona de transição.

2.2 Dosagem e tratamento térmico do CAA

2.2.1 Dosagem do CAA

O constituintes presentes no CAA diferem do concreto convencional principalmente no volume de pasta presentes na mistura. Na publicação *The European Guidelines for Self-Compacting Concrete*, realizada pela EFNARC (2005), são apresentas algumas indicações sobre a quantidade normalmente encontrada para os constituintes do concreto autoadensável, como pode ser visto na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Valores típicos dos materiais nas misturas de CAA, Fonte: EFNARC (2005)

Material	Faixa típica em massa (Kg/m ³)	Faixa típica em volume (L/m ³)
Cimento + Adições (Pó)	380 – 600	-
Pasta	-	300 – 380
Água	150 – 210	150 – 210
Agregado graúdo	750 – 1000	270 – 360
Agregado miúdo	Contém uma relação com o volume dos outros constituintes, normalmente 48 – 55% da massa total dos agregados em peso	
Água / Pó ⁽¹⁾	-	0,85 – 1,10

(1) Relação obtida com relação ao volume

O trabalho desenvolvido por Sebaibi *et al* (2013) apresenta de maneira resumida a pesquisa realizada por Domone, P. L. (2006). Domone, P. L. (2006) apud Sebaibi *et al* (2013) catalogaram os parâmetros de dosagem encontrados para 11 anos de aplicação do concreto autoadensável, 1993 a 2003, em 51 utilizações em diferentes países, conforme apresentado na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Parâmetros de dosagem típicos das misturas de CAA, Fonte: *Sebaibi et al* (2013)

Material	Faixa típica em massa	Faixa típica em volume
Pó (Kg/m ³)	385 – 635	-
Pasta (%) ⁽¹⁾	-	30 – 42
Agregado graúdo (%) ⁽²⁾	-	28 – 38
Água / Pó ⁽³⁾	< 0,48	
Aditivo superplastificante	Considerar o teor próximo ao ponto de saturação	

(1) e (2) - Em relação ao volume total de CAA

(3) - Valor adimensional que leva em conta a massa de água dividido pela massa de pó

2.2.2 Tratamento térmico

A elevação da temperatura pode ser resultado do calor de hidratação, aumento da temperatura ambiente, aquecimento da água de cura ou a combinação de diversos fatores (GALLUCI *et al*, 2013).

Submeter o concreto a uma cura com temperatura elevada é um método utilizado a vários anos na fabricação do concreto, sendo seu objetivo principal o ganho de resistência inicial. O que pode ser justificado pela taxa de hidratação variar com o aumento da temperatura (TURKEL & ALABAS, 2005).

Efeitos da cura térmica nas propriedades do CAA no estado endurecido:

Para Asaga *et al* (1992), o primeiro benefício da cura térmica no concreto é acelerar a resistência inicial. Na pesquisa desenvolvida por Hwang, *et al* (2012), por exemplo, foram avaliados os efeitos que a cura térmica a vapor causa no concreto

autoadensável de alta resistência, foi observado que a cura térmica a vapor pode elevar em até 6 vezes a resistência inicial, quando comparado com o mesmo concreto submetido a cura convencional.

Não se deve imaginar que elevar a resistência inicial é resultado unicamente da utilização de um tratamento térmico. O resultado da resistência à compressão nas idades iniciais do concreto submetido à cura térmica, conforme Hwang *et al* (2012), é atribuído a um conjunto de fatores, como materiais constituintes, composição das misturas e parâmetros de cura.

Um dos efeitos prejudiciais, ou não benéficos da cura térmica, seria a redução da resistência final em idades elevadas, como aos 28 e 90 dias. Essa redução pode ser atribuída à diminuição na taxa de hidratação da pasta ao longo do tempo. O mesmo conceito é apresentado por Bingöl, *et al.* (2013), que obteve a maior resistência aos 28 dias de idade para os corpos de prova curados em meio úmido à temperatura ambiente, quando comparado aos corpos de prova submetidos à cura a vapor.

O tratamento térmico apesar de acelerar as reações de hidratação pode levar a alterações na distribuição das dimensões dos poros do concreto autoadensável, sem, no entanto, aumentar o volume total de poros do concreto (REINHARDT & STEGMAIER, 2006).

A estrutura de poros da pasta de cimento do CAA é, então, afetada pelo tratamento térmico, aumentando a quantidade de poros de maior diâmetro e não na porosidade total. Como resultado, a resistência do concreto em idades elevadas pode ser inferior ao concreto submetido à cura úmida à temperatura ambiente (PCA, 2006).

Para Verbeck & Helmuth (1968), no entanto, a cura com elevada temperatura atua na formação de poros com elevado diâmetro e também provoca aumento na porosidade total, principalmente na zona de transição, diminuindo a aderência entre a pasta e os agregados

Através da análise dos resultados de microscopia eletrônica de varredura (MEV), acompanhada de termogravimetria (TG) e fluorescência de raios X (FRX), Gallucci *et al* (2013), puderam identificar que a porosidade observada nas pasta de

cimento sob elevada temperatura corre principalmente devido a alterações na densidade aparente de C-S-H.

Segundo Gallucci *et al* (2013) a maior porosidade observada em pastas de cimento sob tratamento térmico, decorre principalmente de mudanças na densidade aparente de silicato de cálcio hidratado (C-S-H). Ele é altamente sensível à temperatura e sua densidade aparente aumenta continuamente na faixa de temperatura de 5 a 60 °C. Este aumento significa que menos espaço é preenchido pelo C-S-H, resultando em uma alta porosidade capilar e que tem impacto prejudicial sobre as propriedades mecânicas e durabilidade.

Para Ramezani pour *et al* (2013), a absorção capilar tende a diminuir com o aumento da temperatura do ciclo de cura, o mesmo não ocorre quando se aumenta o tempo, onde ciclos mais longos propiciam uma maior absorção. A utilização de um ciclo com temperatura máxima de 70 °C pode implicar efeitos negativos na durabilidade do CAA. Isso pode ser explicado pela rápida formação de C-S-H e CH cristalino, que resulta em uma estrutura de poros heterogênea e de grandes dimensões.

Efeitos da cura térmica na microestrutura do CAA:

O aumento da resistência à compressão inicial devido à elevação da temperatura pode ser explicado pelo incremento na velocidade de hidratação, devido a rápida formação de silicato de cálcio hidratado (C-S-H). Assim, a alta temperatura promove a hidratação do C-S-H e formação de cristais de C-H (Ramezani pour *et al*, 2013).

A rápida formação dos compostos hidratados (C-S-H, CH), devido à elevação da temperatura de cura, causará uma distribuição heterogênea desses compostos que irão se depositar ao redor do clínquer anidro, prejudicando a posterior hidratação e causando a diminuição da resistência a idades elevadas ((Verbeck & Helmuth (1968); Asaga *et al* (1992)).

Para Gallucci *et al* (2013), entretanto, a hidratação final não é alterada com a temperatura. A composição de C-S-H muda levemente com um pequeno incremento na absorção de sulfato e incorporação de alumínio. Com o aumento da temperatura ocorre uma diminuição da quantidade de água estrutural. Essa diminuição é maior que

a que ocorre com a polimerização das cadeias de silicato e surge um mecanismo diferente de associação das unidade de C-S-H.

Com a elevação da temperatura de cura, ocorre também a deterioração da etringita. Mehta & Monteiro (2014) esclarecem que a etringita não é uma fase estável acima de 65°C, e decompõe-se, formando o monossulfato hidratado se as temperaturas da cura térmica no processo de fabricação forem superiores a 65°C.

A etringita depois de decomposta é adsorvida pelo silicato de cálcio hidratado que, posteriormente, formarão uma nova etringita, causando expansão e fissuração na estrutura. A expansão na pasta causada pela formação de etringita tardia causa fissuras na pasta e na interface pasta-agregado (MEHTA & MONTEIRO, 2014). Segundo Siedel *et al*, (1993) a temperatura de cura além de influenciar na decomposição da etringita também influencia na morfologia e comprimento de seus cristais.

Com objetivo de minimizar a redução na resistência e a probabilidade de formação de etringita tardia, a temperatura do concreto poderia ser limitada a 70 °C (PCA, 2006). Já as normas Canadenses e Alemãs limitam a temperatura máxima de cura em 60 °C para o concretos submetidos a condições de umidade (CSA, 2005).

2.2.3 Ciclo de cura térmica

O tempo total em que uma estrutura estará submetida a cura térmica é conhecido como ciclo. Um típico ciclo de cura térmica é formado por um período chamado de pré-cura ou cura inicial, um período em que a superfície pós acabada (concretada) sofre um aquecimento e permanece na temperatura máxima para um posterior resfriamento a taxas de 11-44 °C/h. Soma-se um intervalo geralmente compreendido entre 6-18 h em que a estrutura ficará sujeita à temperatura máxima. A temperatura máxima utilizada em tratamento térmico é normalmente limitada ao intervalo de 60-90 °C (Hwang *et al*, 2012).

Dentre os parâmetros de análise típicos de um ciclo de cura térmica estão: tempo de cura inicial (pré-cura), temperatura máxima e duração da cura na temperatura máxima (HO *et al*, 2003). Para Camarini (1995) os ciclos de cura térmica são adotados conforme a resistência inicial que se deseje adquirir, geralmente

definidas em projeto e respeitando o tempo disponível para sua realização. O ciclo envolve uma etapa de cura inicial, também chamada de pré-cura, seguido de um aquecimento até atingir a temperatura máxima, com posterior resfriamento do material. Assim, Camarini (1995) sugere a divisão de um ciclo térmico em quatro etapas:

- a) Pré-cura: período de tempo decorrido entre a mistura do aglomerante com a água e o início do aquecimento. Deve ser igual ao tempo de pega do cimento.
- b) Elevação da temperatura: deve ser controlada até atingir o valor desejado. A taxa recomendada é de 20°C/h.
- c) Regime isotérmico (patamar): período em que a temperatura desejada deve ser mantida por algumas horas.
- d) Esfriamento: é a redução da temperatura até que se atinja a temperatura ambiente. A taxa recomendada é de 20°C/h.

El Debs (2000) sugeriu um ciclo muito parecido com o proposto por Camarini (1995), diferindo apenas com relação ao gradiente de esfriamento, que seria na ordem de 10°C/h.

Cassagnabère *et al* (2010) em estudos envolvendo CAA, com adições de filer calcário e silício, sílica ativa e metacaulim, com análise da resistência à compressão a 1 e 28 dias de idade, seguiram o regime térmico proposta na Figura 2.2.

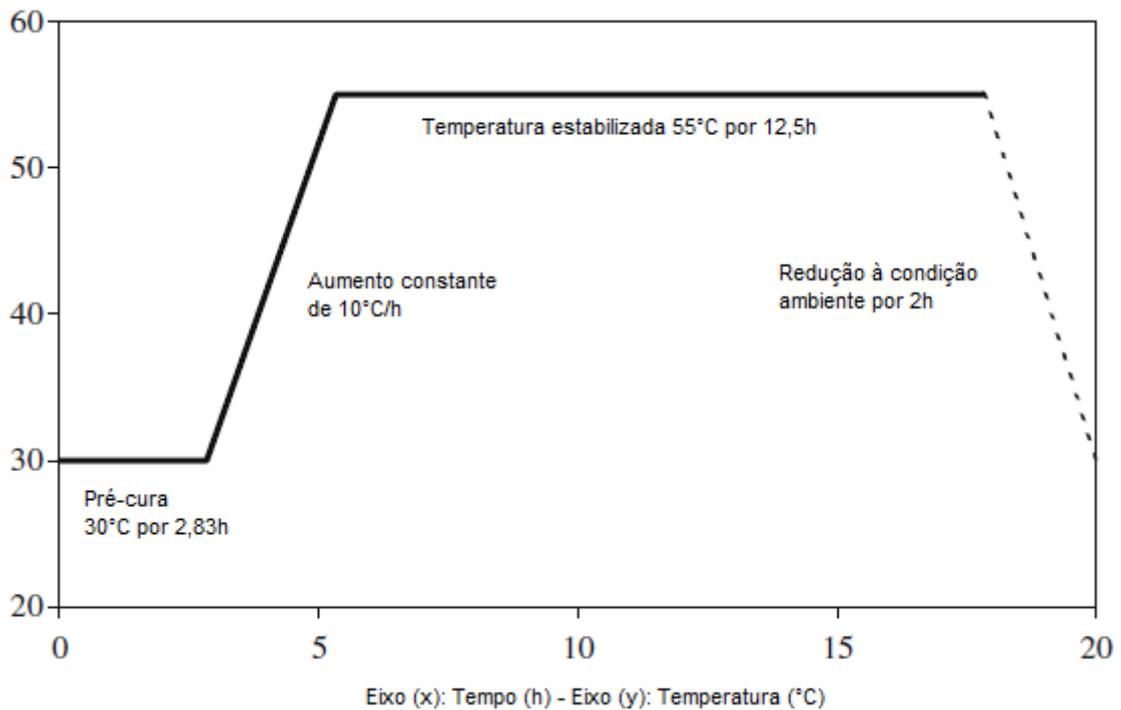


Figura 2.2 - Ciclo proposto por Cassagnabère *et al* (2010), adaptado.

Pré-cura:

A determinação do adequado tempo de espera, tempo que antecede o início da cura térmica, é de fundamental relevância no comportamento que o concreto apresentará quando endurecido.

As aplicações de cura térmica que se iniciam antes do tempo de início de pega, as porções externas, ou faces, do concreto endurecerão rapidamente enquanto o interior permanecerá no estado plástico. O aumento da temperatura fará o concreto ainda fresco se expandir, exercendo pressões sobre as faces já endurecidas do material, causando micro-fissuras e aumentando a porosidade (PERES, 2006).

Esse conceito é corroborado por Erdem *et al* (2003), que diz que o ciclo térmico deve ser empregado após o início de pega, para que o mesmo já possua resistência suficiente e evite expansões e aparecimento de micro-fissuras. Para Ba *et al* (2011), o aumento no tempo da pré-cura promove alterações na porosidade e distribuição dos poros.

Caramini (1995) sugeriu uma pré-cura igual ao início de pega do cimento, El Debs (2000) recomenda aproximadamente 2 h, para Hwang *et al*, (2012) a recomendação mais utilizada é aplicar o tratamento térmico após 3 horas da aplicação do concreto. Assim, segue na Tabela 2.3, a recomendação de outros autores e comportamento no concreto em função dos diferentes intervalos.

Tabela 2.3 - Efeito de diferentes intervalos de pré-cura, adaptado de Santos (2010)

Autor	Ano	Pré-cura	Comportamento ante a pré-cura
Shideler e Chamberlin	1949	2 h a 6 h	Aumento de resistência da ordem de 15% a 40%
Hanson	1963	1 h a 5 h	Aumento da resistência e ocorrência de fissuras horizontais para período de espera de 1 h
Mironov	1964	Relacionado à resistência	Quando o concreto atingisse 0,7 MPa à 0,8 MPa
Alexanderson	1972	4 h a 7 h	Nenhuma perda de resistência foi observada
Erdem, Turanli e Erdogan	2003	Tempo de espera igual ao tempo de início de pega	Nenhuma perda de resistência foi observada

Taxa de aquecimento:

Na análise da adequada taxa de aquecimento, algumas referências recomendam taxas que variam de 11 a 44 °C/h. A maioria dos padrões, no entanto, adotam taxas que variam de 20 a 22 °C. Essa medida busca evitar as fissuras devido um amplo gradiente de aquecimento (Hwang *et al*, 2012). Foi constatado também por Hwang *et al* (2012), que para um CAA com resistência característica de 80 MPa, a maior resistência inicial é obtida para uma temperatura máxima de 60 °C, a uma taxa de aquecimento de 22 °C/h e uma pré-cura de 5 horas. A taxa de aquecimento e pré-cura deve ser relacionada com base na temperatura máxima a ser imposta, para garantir a resistência à compressão e módulo de elasticidade desejado (Hwang *et al*, 2012).

Temperatura máxima – Patamar térmico:

A temperatura do patamar de cura pode variar entre 40 e 85 °C a depender do ciclo utilizado. No entanto, a temperatura máxima deve ser limitada por efeitos prejudiciais no desenvolvimento da resistência ao longo do tempo e durabilidade (Hwang *et al*, 2012).

Patamar térmico pode ser definido como a temperatura final após o aquecimento onde as amostras ficam em regime isotérmico até o posterior resfriamento. Também está relacionado à duração da cura na temperatura máxima. Segundo Derabla e Benmalek (2014) o tratamento térmico a uma temperatura de 60°C durante 24 h é muito eficaz, especialmente para as idades iniciais. Em sua pesquisa, todos os CAA's tratados termicamente foram capazes de conseguir uma resistência superior aos que não tiveram tratamento térmico.

O mesmo conceito foi apresentado por Yang *et al* (2003). Para o autor a temperatura máxima de cura que apresenta melhor desempenho considerando a resistência é próxima a 60°C. Outro conceito a ser analisado é duração da cura a vaporna temperatura máxima, ela tem relação com as propriedades do concreto no estado endurecido, o aumento do tempo de cura na temperatura máxima aumenta a resistência.

Segundo Bingöl *et al* (2013), para os concretos submetidos a tratamento térmico, a temperatura de 70 °C num ciclo total de 16 horas apresenta melhor resposta mecânica. Para essa temperatura a resistência aos 28 dias é 95% da obtida com a cura convencional. Os CAA submetidos à cura ao ar foram os que apresentaram os menores valores de resistência à compressão quando comparados aos demais de tipos de cura (Bingöl *et al*. 2013).

Tempo total:

O parâmetros de temperatura máxima, tempo de aquecimento, taxa de aquecimento e resfriamento devem ser ajustados para o melhor desempenho do ciclo.

Segundo Hwang *et al* (2012), um tempo total de 18 horas de cura térmica mostra bons resultados, da mesma forma que aumentar a taxa de aquecimento evidencia uma elevação na resistência inicial.

Para Soraka *et al* (1978), um problema seria aplicação de um período de cura térmica muito curto, em torno de 30 min a 60 min, o que causaria um dano a capacidade de resistência à compressão do concreto ensaiado. E utilizar um ciclo térmico longo demais (acima de 24h) após a moldagem das peças concretadas poderia prejudicar algumas propriedades do concreto endurecido, tais como resistência e durabilidade (SORAKA *et al*, 1978).

Ramezaniapour *et al* (2014) constataram que o aumento do tempo total de cura também tende a aumentar os valores de resistência à compressão. Entretanto para Vodák (2004), o prolongado aquecimento dos componentes básicos do concreto (silicato de cálcio hidratado – CSH, géis de aluminato de cálcio – $\text{Ca}(\text{AlOS}_2)_2$ e hidróxido de cálcio – $\text{Ca}(\text{OH})_2$) podem ser decompostos, acarretando a deterioração das propriedades físico-químicas do concreto.

3 Materiais e métodos

3.1 Planejamento dos trabalhos

O planejamento e desenvolvimento da pesquisa teve como objetivo possibilitar analisar a influência que a adição de metacaulim (Mk) e fíler calcário (Fc) promovem no concreto autoadensável submetido à cura térmica. Para essa análise foram elaboradas seis composições de CAA, sendo uma de referência (sem adição mineral), quatro misturas binárias com substituição do cimento por 10% de Mk, 10% Fc, 20% de Mk e 20% Fc e uma terciária com substituição do cimento por 10% de Mk e 10% de Fc. Todas as misturas foram preparadas para se obter um CAA com fluidez de classe SF2 (660-750 cm de espalhamento), conforme a ABNT NBR 15823-1:2010 e resistência à compressão aos 28 dias superior a 40,0 MPa.

A primeira etapa do trabalho se deu pela caracterização dos agregados, cimento e adições. Os agregados graúdos e miúdos foram caracterizados no Laboratório de Materiais de Construção do IFRN – Campus Central. A caracterização do cimento e metacaulim foram fornecidas por seus respectivos fabricantes. A caracterização do fíler calcário foi realizada nos Laboratórios de Engenharia dos Materiais e Física da UFRN.

Na segunda etapa é descrito o método de dosagem, misturas dos componentes, volume produzido por betonada, referência dos equipamentos utilizados e demais informações referentes à produção dos concretos. A verificação da uniformidade e classificação do CAA no estado fresco foi feita através dos seguintes ensaios: Slump flow, T500, L-box, V-test e J-ring.

Na terceira etapa as amostras de concreto autoadensável foram curadas em banho térmico nas temperaturas de 50°C, 60°C e 70°C em um ciclo total de 18 horas. Segue nesse subitem o detalhamento completo do ciclo térmico.

A quarta e última etapa da pesquisa foi analisar a influência da incorporação de adições minerais e cura térmica nas características do CAA no estado endurecido. Essa etapa pode ser subdividida em três análises principais: índices físicos, propriedades mecânicas e análise microestrutural.

A Figura 3.1 ilustra o fluxograma com as atividades experimentais desenvolvidas na pesquisa, suas diferentes etapas e principais ensaios apresentados de maneira sistêmica e processual.

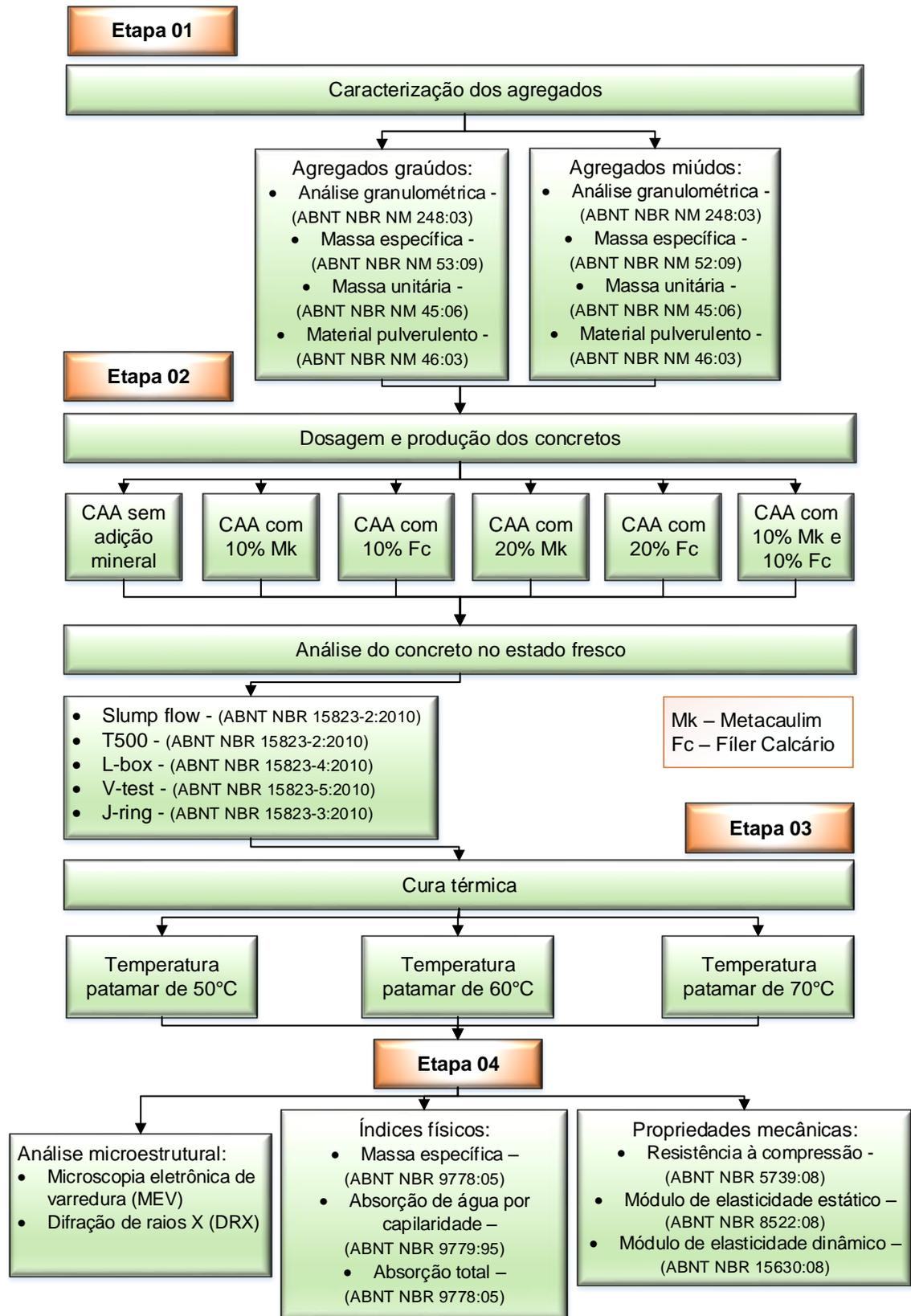


Figura 3.1 - Fluxograma do procedimento experimental, Fonte: Autor (2015)

3.2 Etapa 01 – Caracterização dos materiais

A Etapa 01 como descrito no item 3.1, refere-se à caracterização dos materiais utilizados na produção dos concretos, que compreende a caracterização dos agregados (miúdos e graúdo), do cimento e adições minerais (metacaulim e fíler calcário).

3.2.1 Agregados

Os agregados foram coletados no pátio de estocagem de uma concreteira da região localizada no município de São Gonçalo do Amarante/RN, as margens da BR 406. A jazida de origem do agregado graúdo é a Pedreira Serrinha, localizada no município de São Gonçalo do Amarante/RN, enquanto que o agregado miúdo é proveniente da jazida Aningas, situada no mesmo município.

Os agregados estavam dispostos em baias por graduação e sob um piso cimentado, conforme recomendação da ABNT NBR 12655:2015. Foram coletados conforme os parâmetros da ABNT NBR NM 26:2009 e reduzidos e remetidos aos ensaios em laboratório, conforme a ABNT NBR NM 27:2001. As Figura 3.2 e Figura 3.3 mostram o local da coleta e disposição dos agregados no pátio de estocagem.



Figura 3.2 - Baía de armazenagem do agregado miúdo, Fonte: Autor (2015)



Figura 3.3 - Baía de Armazenagem do agregado graúdo,
Fonte: Autor (2015)

Para a caracterização dos agregados foi utilizado o Laboratório de Materiais de Construção do Instituto Federal de Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte - Campus Central. Na caracterização das amostras foram realizados os seguintes ensaios: análise granulométrica, massa específica, massa unitária e teor de materiais pulverulentos.

Análise granulométrica:

Para a determinação da composição granulométrica dos agregados graúdos e miúdos foi utilizado como referência a norma técnica ABNT NBR NM 248:2003.

As Figura 3.4 e Figura 3.5 representam graficamente a relação entre o percentual acumulado e a abertura das peneiras dos agregados miúdos e graúdos, obtidos a partir da análise granulométrica. Através desse ensaio também é possível se obter o diâmetro máximo e módulo de finura de cada amostra ensaiada, como pode ser observado na Tabela 3.1.

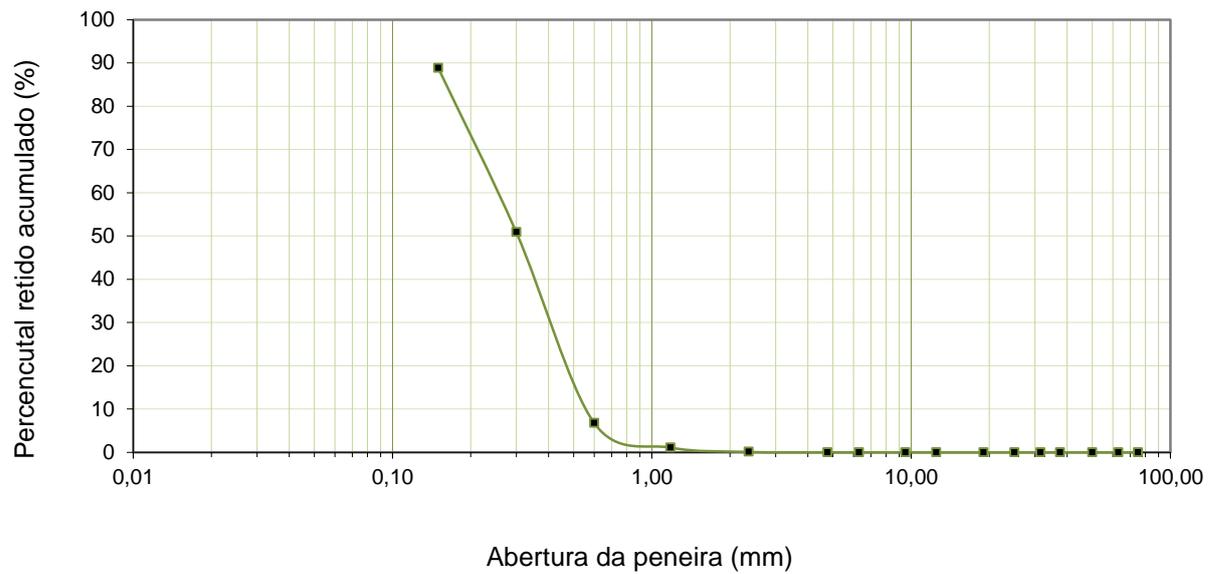


Figura 3.4 - Gráfico de caracterização do agregado miúdo, Fonte: Autor (2015)

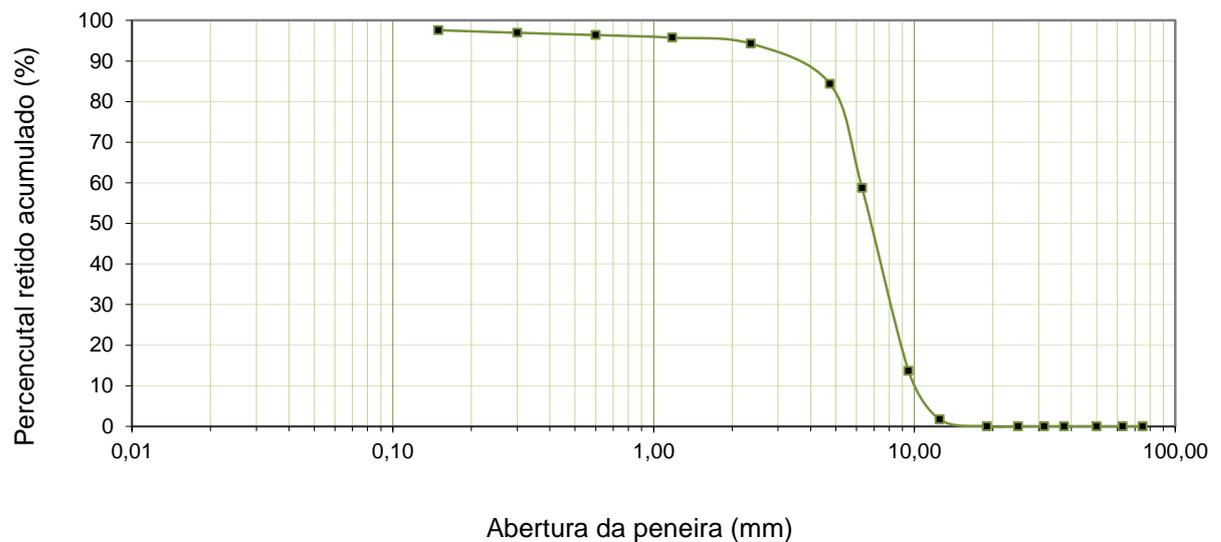


Figura 3.5 - Gráfico de caracterização do agregado graúdo, Fonte: Autor (2015)

Observa-se na Figura 3.4 que trata-se de uma areia mal graduada com maior parte de seus grãos distribuídos entre as aberturas 0,1 e 0,6 mm. A brita, como pode se observar na Figura 3.5, também é mal graduada e a maior parte dos seus grãos entre as aberturas 2 e 10 mm.

Massa unitária:

A realização do ensaio de massa unitária tem como referência a norma ABNT NBR NM 45:2006. Segue na Tabela 3.1 os resultados obtidos para o ensaio de massa unitária dos agregados utilizados.

Massa específica:

A realização do ensaio de massa específica seca do agregado miúdo foi realizado conforme a ABNT NBR NM 52:2009 e do agregado graúdo conforme ABNT NBR NM 53:2009. Segue na Tabela 3.1 os resultados obtidos para o ensaio de massa específica dos agregados utilizados.

Teor de material pulverulento:

O teor de material pulverulento foi obtido conforme recomendações da ABNT NBR NM 46:2003. Material pulverulento pode ser definido como o material mais fino que a abertura da peneira de malha 75 μm . Na Tabela 3.1 seguem os resultados obtidos como teor de material pulverulento dos agregados.

Tabela 3.1 - Diâmetro máximo, módulo de finura, massa unitária, massa específica e teor de material pulverulento dos agregados caracterizados, Fonte: Autor (2015)

Índices obtidos	Agregado miúdo	Agregado graúdo
Diâmetro máximo (mm)	1,18	12,5
Módulo de finura	1,48	5,79
Massa unitária (Kg/m^3)	1640	1490
Massa específica (g/cm^3)	2,62	2,65
Teor de material pulverulento (%)	1,48	1,40

3.2.2 Cimento

O cimento utilizado foi do tipo CP V ARI RS fabricado pela Mizu Cimentos Especiais. A escolha desse tipo de cimento se deve principalmente ao seu corrente uso pelas indústrias de estruturas pré-moldados de concreto. A alta resistência inicial desses cimentos contribui em suprir a celeridade exigida no processo industrial.

A aquisição do cimento se deu por doação da Mizu Cimentos Especiais, que forneceu o material em paletes, armazenados e ensacados em sacos de 40 Kg. A caracterização química, física e mecânica do lote em estudo foi fornecido pelo fabricante, conforme apresentado na Tabela 3.2, Tabela 3.3 e Tabela 3.4, respectivamente, realizados segundo especificações da ABNT NBR 5733:1991 e ABNT NBR 5737:1992.

Tabela 3.2 - Caracterização química CP V ARI RS, Fonte: Mizu (2015)

Análise química	Teor (%)	Limite Normativo (%)
Perda ao fogo	4,27	≤ 4,5
Resíduos insolúveis	0,74	≤ 1,0
SO ₃	3,16	≤ 3,5
CaO Livre	2,01	-

Tabela 3.3 - Caracterização física CP V ARI RS, Fonte: Mizu (2015)

Análise física		Teor	Limite Normativo
Massa específica (g/cm ³)		3,06	-
Finura	Blaine (cm ² /g)	4.350,96	≥ 3.000
	#325 (%)	3,42	-
	#200 (%)	0,61	≤ 6,0
Expansibilidade quente (mm)		1,92	≤ 5
Pega	Início (min)	103,96	1 h ≥
	Fim (min)	157,08	10 h ≤
Consistência normal (%)		28,11	-

Tabela 3.4 - Caracterização mecânica CP V ARI RS, Fonte: Mizu (2015)

Análise mecânica	Resistência à compressão (MPa)			
	01 Dias	03 Dias	07 Dias	28 Dias
Ensaio laboratoriais	19,26	29,69	37,95	46,38
Limite normativo	≥ 11,0	≥ 24,0	≥ 34,0	-

Como análise complementar foi realizada a caracterização por fluorescência de raios-X (FRX) no Laboratório de caracterização de minerais /materiais – LACAMM do Instituto Federal do Rio Grande do Norte - Campus Central, segue na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 – FRX do cimento CP V ARI RS, Fonte: Autor (2015)

Composto	Teor (%)
CaO	78,29
SiO ₂	9,49
Fe ₂ O ₃	6,02
Al ₂ O ₃	2,40
SO ₃	2,37
K ₂ O	0,69
TiO ₂	0,39
BaO	0,30
SrO	0,04
ZrO ₂	0,03

3.2.3 Adições minerais

Foram utilizadas na pesquisa duas adições minerais, quais sejam: metacaulim e filer calcário.

Metacaulim:

O metacaulim utilizado tem nome comercial: Metacaulim HP Ultra, fornecido pela Metacaulim do Brasil, conforme descrito pelo fabricante, trata-se de uma adição mineral pozolânica de alta reatividade. A caracterização química e física foi fornecida pela fabricante, conforme pode ser visto na Tabela 3.6 e Tabela 3.7 respectivamente, conforme recomendação normativa da ABNT NBR 15894:2010.

Tabela 3.6 - Caracterização química Metacaulim HP, Fonte: Metacaulim do Brasil (2015)

Análise química	Teor obtido (%)	Limite Normativo (%)
SiO ₂	58,0	44,0 – 65,0
Al ₂ O ₃	34,0	32,0 – 46,0
Fe ₂ O ₃	2,0	-
TiO ₂	1,0	-
CaO	0,1	CaO + MgO < 1,5
MgO	0,6	
K ₂ O	1,7	0,658 K ₂ O + Na ₂ O < 1,5
Na ₂ O	0,1	< 0,5
SO ₃	0,1	< 1,0
Perda ao fogo	2,5	< 4,0

Tabela 3.7 - Caracterização física Metacaulim HP, Fonte: Metacaulim do Brasil (2015)

Análise física	Teor obtido	Limite Normativo
Finura (#325) (%)	5,0	< 10,0
Área específica (cm ² /g)	230.000	> 150.000
Massa específica (g/cm ³)	2,58	-
Massa unitária (g/cm ³)	0,60	-

Como análise complementar foi realizada a caracterização por fluorescência de raios-X (FRX) no Laboratório de caracterização de minerais /materiais – LACAMM do Instituto Federal do Rio Grande do Norte - Campus Central, cujo o resultado segue na Tabela 3.8.

Tabela 3.8 – FRX do Metacaulim, Fonte: Autor (2015)

Composto	Teor (%)
SiO ₂	53,01
Al ₂ O ₃	28,1
Fe ₂ O ₃	7,1
K ₂ O	5,6
TiO ₂	3,4
CaO	1,4
BaO	0,8
SO ₃	0,21
ZrO ₂	0,16
Cr ₂ O ₃	0,062

Filer Calcário:

O filer calcário utilizado foi do fabricante Sibelco e foi caracterizado por fluorescência de raios-X (FRX) no Laboratório de caracterização de minerais/materiais – LACAMM do Instituto Federal do Rio Grande do Norte - Campus Central, cujo o resultado segue na Tabela 3.9.

Tabela 3.9 – FRX do Filer Calcário, Fonte: Autor (2015)

Composto	Teor (%)
CaO	86,3
SiO ₂	5,3
MgO	4,6
Fe ₂ O ₃	1,3
Sc ₂ O ₃	1,3
Al ₂ O ₃	0,7
K ₂ O	0,23
SrO	0,19
SO ₃	0,16
ZrO ₂	0,01

3.3 Etapa 02 – Detalhamento do método de dosagem do CAA

A Etapa 02 trata do detalhamento do método de dosagem utilizado na pesquisa, bem como, apresenta informações relativas à produção e à caracterização do concreto autoadensável no estado fresco. Assim, essa etapa pode ser dividida em partes distintas descritas no itens 3.3.1 a 3.3.4.

3.3.1 Dosagem do CAA

O concreto foi dosado pela adaptação das equações: relação água/materiais secos, teor de argamassa e consumo teórico de aglomerante, as necessidades do CAA. Para se obter os parâmetros iniciais que foram indexados as equações na obtenção do traço unitário em massa (T.U.M), se utilizou como referência a EFNARC (2005) e Sebaibi *et al* (2013).

Experimentalmente observou-se que a menor quantidade de pó que atenderia as condições de fluidez e viscosidade do CAA foi aproximadamente 450 Kg/m³ e que a relação água/pó adequada assumiria valores próximos a 0,44 de relação água/pó. Foi observado que para os materiais utilizados o teor de argamassa que fornece ao concreto melhor comportamento no estado fresco é aproximadamente 55%. A Tabela 3.10 apresenta o traço unitário em massa (T.U.M) e consumo para 1 m³ de CAA.

Tabela 3.10 - Traço unitário em massa e consumo para 1m³ do CAA de REF desenvolvido na pesquisa, Fonte: Autor (2015)

Material	Pó (cimento + adições)	Areia	Brita	Relação água/pó
T.U.P (Traço Unitário em Peso)	1,00	1,64	2,16	0,44
1 m ³	450	738	972	198

3.3.2 Cálculo dos quantitativos de materiais

Para o cálculo da quantidade de material utilizado nas misturas é necessário calcular o volume total de concreto a ser produzido. A quantidade de cada componente é obtida pela correlação entre o volume total a ser produzido e os materiais necessários a se produzir 1 m³ de concreto. A Tabela 3.8 ilustra os traços para 1 m³ de concreto sem considerar a massa específica dos materiais.

Tabela 3.11 - Traços analisados para 1 m³ de concreto, Fonte: Autor (2015)

Traço	Cimento (Kg)	MK (Kg)	FC (Kg)	Areia (Kg)	Brita (Kg)	Água (Kg)	Aditivo (%)
CAAR	450	-	-	738	972	198	0,43
CAA10MK	405	45	-	738	972	198	1,04
CAA10FC	405	-	45	738	972	198	0,37
CAA20MK	360	90	-	738	972	198	1,21
CAA20FC	360	-	90	738	972	198	0,34
CAA10MK10FC	360	45	45	738	972	198	0,65

O volume total de concreto a ser produzido foi mensurado em função do volume necessário para a realização dos ensaios no estado fresco, endurecido e análise microestrutural, com uma majoração de 30% em função de perdas. Os corpos de prova moldados para a análise dos índices físicos e propriedades mecânicas foram: cilíndricos com 100 mm de diâmetro e de geometria cúbica com 100 mm aresta lateral (Figura 3.6), conforme a ABNT NBR 5738:2015 e NP EN 12390-01, respectivamente. Foram utilizados CP's cúbicos, por não caber no equipamento utilizado na cura térmica, "banho maria", os corpos de prova cilíndricos ($\varnothing=100$ mm) padronizados no Brasil pela ABNT NBR 5739:2007.



Figura 3.6 - Moldes cúbicos 100x100x100 mm, Fonte: Autor (2015)

3.3.3 Produção do CAA

Os concretos autoadensáveis foram produzidos e caracterizados em seu estado fresco no Laboratório de Materias de Construção do Instituto Federal de Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte - Campus Central.

Aditivo superplastificante:

Devido a fluidez necessária ao concreto autoadensável foi utilizado o aditivo superplastificante Glenium 51 fabricado pela Basf *The Chemical Company*. Esse consiste em um aditivo líquido, livre de cloretos, de pega normal, com alta taxa de redução de água.

A dosagem do aditivo recomendada pelo fabricante encontra-se na faixa de 0,2 a 1,0% com relação massa de cimento mais adições. Neste trabalho a dosagem do aditivo foi definida em função da obtenção de uma classificação SF2, conforme a ABNT NBR 15823-1:2010.

Procedimentos de mistura dos materiais:

A mistura dos materiais foi feita em uma betoneira estacionária de eixo inclinado da marca CSM com capacidade de 150 L, e rotação do tambor de 34 rpm. Para melhor eficiência da mistura se utilizou cerca de 60% da capacidade nominal da betoneira, aproximadamente 90 L (0,090 m³). Como o volume de concreto necessário foi 72 L, uma única betonada foi suficiente para a mistura dos materiais por traço analisado.

Como procedimentos prévios a betoneira foi umidecida com água, com o objetivo de evitar a perda de água de amassamento por absorção. O mesmo foi feito com todos os equipamentos auxiliares, que também foram dispostos o mais próximo possível do local de mistura, evitando-se transtornos e atrasos.

Os procedimentos da produção dos concretos seguiram a seguinte sequência de execução:

- a) Com a betoneira ligada foi depositado todo agregado graúdo;
- b) Cerca de 80% da água de amassamento foi adicionada com objetivo de “lavar” o agregado graúdo e otimizar o contato dos materiais com a água;
- c) Todo cimento e adições incorporados a mistura;
- d) Cerca de 10% da água restante foi adicionado;
- e) Todo agregado miúdo foi então adicionado;
- f) Após se verificar o completo desprendimento dos materiais das paredes da betoneira, 10% de água restante entraram na composição;
- g) O aditivo superplastificante entra na mistura;
- h) A betoneira ficou em agitação constante por cerca de 5 minutos;
- i) Imediatamente posterior aos 5 minutos de mistura foram realizados os ensaios de caracterização do concreto no estado fresco.

3.3.4 Caracterização do CAA no estado fresco

Segundo Okamura & Ouchi (2003), os ensaios que caracterizam o concreto autoadensável no estado fresco, ou mensuram sua tendência ao autoadensamento têm três objetivos principais:

1. Verificar se o concreto é autoadensável o suficiente para ser aplicado;
2. Caracterizar os componentes;

3. Corrigir a dosagem dos materiais quando a autoadensabilidade não é suficiente.

Após a mistura dos materiais em betoneira e produzidos os concretos, a verificação da conformidade das amostras no estado fresco se deu através dos seguintes ensaios: Slump-flow, T500, V-test, J-ring e L-box.

A ABNT NBR 15823-1:2010 apresenta as várias classes dos ensaios que caracterizam o estado fresco do concreto autoadensável, conforme apresentado nos Quadros 3.1, 3.2, 3.3, 3.4 e 3.5.

Quadro 3.1 – Classe de espalhamento ABNT NBR 15823-1:2010

Classe de espalhamento	Espalhamento (mm)
SF1	550 a 650
SF2	660 a 750
SF3	760 a 850

Quadro 3.2 – Classe de viscosidade, fluxo livre ABNT NBR 15823-1:2010

Classe de viscosidade plástica aparente, livre	t_{500} (s)
VS1	≤ 2
VS2	> 2

Quadro 3.3 – Classe de viscosidade, fluxo confinado ABNT NBR 15823-1:2010

Classe de viscosidade plástica aparente, confinado	Funil V (s)
VF1	< 9
VF2	9 a 25

Quadro 3.4 – Classe de habilidade passante, fluxo livre ABNT NBR 15823-1:2010

Classe de habilidade passante sob fluxo livre	Anel J (mm)
PJ1	0 a 25
PJ2	25 a 50

Quadro 3.5 – Classe de habilidade passante, fluxo confinado ABNT NBR 15823-1:2010

Classe de habilidade passante sob fluxo confinado	Caixa L (H2/H1)
PL1	$\geq 0,80$ com 2 barras
PL2	$< 0,80$ com 3 barras

Slump-flow e T500:

Normalizado no Brasil pela ABNT NBR 15823:2010-2, trata-se de um ensaio simples, uma adaptação do ensaio de abatimento, em que o tronco-cônico de Abrams é apoiado em uma placa metálica quadrada ($L_{\min} \geq 900$ mm), com a uma marcação circular 500 mm de diâmetro ao centro.

No ensaio *Slump flow*, o tronco-cônico é preenchido com concreto e removido verticalmente para cima sem interrupção em tempo não superior a 5s, onde o concreto escorrerá pela placa até cessar seu movimento. Quando o tronco-cônico iniciar sem movimento ascendente deve-se acionar o cronômetro e parar quando a massa de concreto cobrir totalmente a marcação de 500 mm de diâmetro.

O resultado do *Slump flow* (SF) será a média aritmética de duas medidas perpendiculares do diâmetro em milímetros (mm). Segundo Okamura & Ouchi (2003), checa a deformabilidade do concreto fresco e sua habilidade de preenchimento em fluxo livre, sendo normalmente indicado para todas as aplicações (ABNT NBR 15823-1:2010).

O *Slump flow T500*, representa qualitativamente a viscosidade plástica do concreto sob fluxo livre (ABNT NBR 15823-1:2010). Seu resultado será determinado pelo intervalo de tempo em segundos que o concreto levará para sair da posição inercial, imediatamente anterior a ascensão do tronco-cônico, até a marcar de 500 mm de diâmetro ao centro da placa.

Funnel-tests:

A norma que regulamenta no Brasil esse ensaio é a ABNT NBR 15823:2010-5. O funil v é compreendido por uma caixa em forma de “V” de 60 cm de altura, a abertura superior com seção transversal de 7,5 x 51,5 cm e abertura inferior com seção transversal de 7,5 x 6,5 cm, tendo uma tampa metálica para contenção.

Na execução do ensaio deve-se ter o cuidado do funil V ser totalmente preenchido com CAA. Um recipiente metálico é depositado na extremidade inferior do funil para coleta da amostra. Aciona-se o cronômetro após a abertura da porta metálica inferior e registra-se o tempo necessário para que todo concreto escoe.

No *funnel tests 5min*, logo após a primeira leitura, a comporta deve ser fechada novamente e o CAA coletado pelo recipiente metálico utilizado para preencher mais uma vez todo o recipiente. Com 5 minutos após o preenchimento, a comporta será aberta e registra-se o tempo necessário para que todo volume de concreto escoe.

O ensaio *funnel tests* pode ser correlacionado com a viscosidade do concreto sob fluxo confinado. Já o *funnel tests 5min* pode estar relacionado com a tendência do concreto à segregação.

J-ring:

Caracteriza-se pelo acréscimo de um anel metálico ao ensaio de *Slump Flow*. Esse anel com 300 mm de diâmetro e 120 mm de altura é constituído verticalmente de barras de aço de 10 mm de diâmetro a cada aproximados 58 mm. Casos particulares podem exigir diâmetros e espaçamentos distintos, desde que o espaçamento seja maior que três vezes o diâmetro máximo do agregado graúdo (ABNT NBR 15823-3:2010).

O ensaio se assemelha ao *Slump Flow*, onde novamente tem-se o tronco-cônico ao centro da placa, sendo agora circundado pelo anel J. Após preenchido de CAA o tronco-cônico realizará um movimento ascendente em tempo não superior a 5s. Com a média aritmética de dois diâmetros perpendiculares após o escoamento se obtém o espalhamento com o anel J. O resultado do ensaio será a diferença entre espalhamento *Slump Flow* e *J-ring* (ABNT NBR 15823-3:2010). Esse ensaio possui correlação direta com a habilidade passante que o concreto apresenta sob fluxo livre.

L-box:

Conforme a ABNT NBR 15823-4:2010, trata-se de uma caixa em forma de L e com um compartimento vertical e horizontal, com uma portinhola móvel que faz separação entre o compartimento vertical e horizontal. Na saída do compartimento vertical são dispostas duas ou três barras de aço de 12,5 mm, espaçadas a 58 mm ou 40 mm respectivamente. A adoção da quantidade de barras visa obter uma correlação com a aplicação do concreto em condições reais.

O ensaio consiste em depositar a amostra na seção vertical em tempo não superior 2 minutos, após a sua coleta e após 30 a 60 segundos a porta deve ser aberta permitindo o escoamento do CAA para a seção horizontal.

O resultado do ensaio será a relação entre as alturas H2 e H1, o que representará a habilidade passante do concreto auto adensável em fluxo confinado.

3.4 Etapa 03 – Tratamento térmico

Essa etapa apresenta as características do tratamento térmico proposto. O tratamento térmico foi realizado via cura úmida com aquecimento, nas temperaturas máximas de 50°C, 60°C e 70°C, em ciclos de 18 a 20 horas, como segue ilustrado na Figura 3.7.

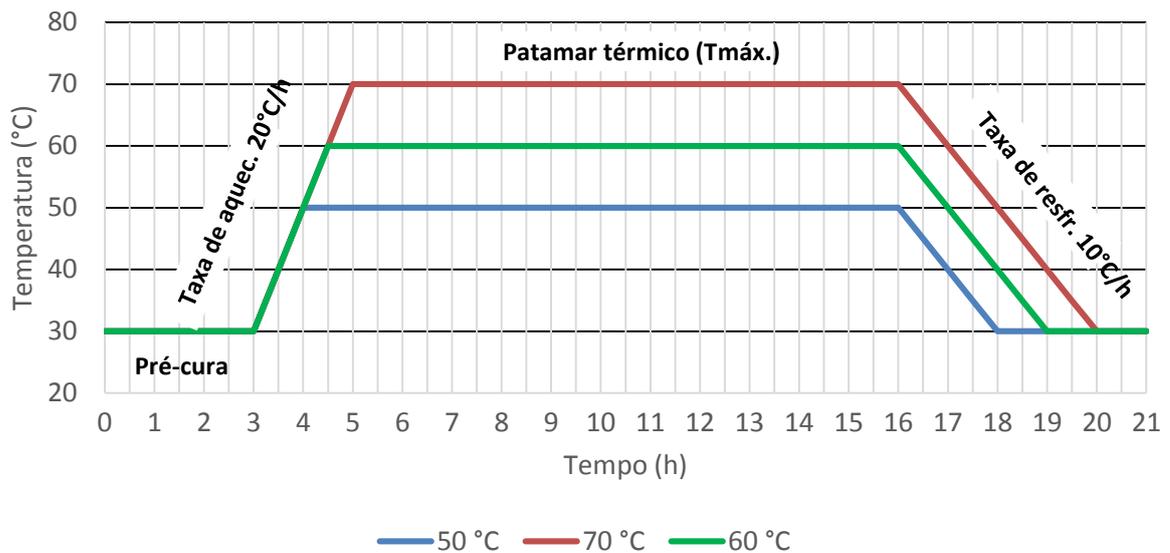


Figura 3.7 - Ciclo térmico utilizado, Fonte: Autor (2015)

Para o ciclo proposto foram adotados os seguintes parâmetros, conforme apresentado na figura Figura 3.7:

- Temperatura inicial: foi adotada a temperatura ambiente como a temperatura inicial, aproximadamente 28~30 °C
- Pré-cura: foi utilizado uma pré-cura com tempo não inferior à pega do cimento utilizado, ou seja, início do tratamento após 3 horas aproximadamente.
- Taxa de aquecimento: foi adotada a taxa de aquecimento de 20°C/h
- Temperatura patamar: foram analisadas as temperaturas patamares de 50, 60 e 70°C
- Taxa de resfriamento: foi utilizada a taxa de resfriamento de 10°C/h.
- Tempo total: em função do resfriamento dos corpos de prova, foram adotados tempos totais de 18, 19 e 20 horas, para as temperaturas de 50, 60 e 70 °C, respectivamente.

A cura térmica foi úmida por imersão em água aquecida no Laboratório de Materiais de Construção do IFRN – Campus Central. O equipamento utilizado foi do tipo “banho maria”, com capacidade de armazenar até 14 CP’s cúbicos (100x100x100 mm) por análise. As Figura 3.8 e Figura 3.9 mostram o “banho maria” e o “banho maria” com as fôrmas cúbicas, respectivamente.



Figura 3.8 – “Banho maria”



Figura 3.9 – “Banho maria” c/ formas cúbicas

3.5 Etapa 04 – Caracterização do CAA no estado endurecido

A quarta etapa foi dada pela análise das propriedades mecânicas, índices físicos e análise da microestrutura do CAA. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Materias de Construção do Instituto Federal de Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte - Campus Central.

3.5.1 Propriedades mecânicas

As propriedades mecânicas foram mensuradas através dos ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade estático e dinâmico.

Resistência à compressão axial:

A resistência à compressão axial das amostras submetidas ao tratamento térmico foi mensurada nas idades de 1, 3, 7, 14 e 28 dias de idade, pela ruptura de três corpos de prova cúbicos, conforme a NP EM 12930-3:2009. Aos 28 dias de idade foi obtida a resistência à compressão de um par de exemplares cúbicos sem tratamento térmico e de um par de corpos de prova cilíndricos também sem tratamento

térmico, conforme a ABNT NBR 5739:2007, com objetivo de verificar a influência da geometria dos CP's na resistência.

Os corpos de prova cúbicos com 100 mm de aresta lateral e cilíndricos com 100 mm de diâmetro, tiveram as dimensões verificadas com auxílio de um paquímetro e registradas para o cálculo da resistência. As amostras foram então rompidas em uma prensa hidráulica com capacidade para 100 toneladas fabricada pela Contenco e fornecida pela Pavitest. A velocidade de aplicação de carga foi mantida entre o intervalo de 0,3 – 6,0 MPa/s até a ruptura.

Módulo de elasticidade:

Para as amostras submetidas à cura térmica foi realizado o ensaio de módulo de elasticidade estático dinâmico também aos 28 dias de idade, conforme ABNT NBR 15630:2008. Apesar da norma brasileira desse ensaio ser específica para argamassas, os resultados apresentados dão indicativos da uniformidade e homogeneidade do concreto.

3.5.2 Índices físicos

Para a análise das propriedades físicas, nas amostras com e sem tratamento térmico, realizou-se aos 28 dias de idade, os seguintes ensaios: massa específica, índice de vazios, absorção por capilaridade e absorção total. Segue no Quadro 3.6 as respectivas normas de referência para cada ensaio.

Quadro 3.6 - Normas de referência dos ensaios de índices físicos

Ensaio	Norma de referência
Massa específica	ABNT NBR 9778:2005
Índice de vazios	ABNT NBR 9778:2005
Absorção por capilaridade	ABNT NBR 9779:1995
Absorção total	ABNT NBR 9778:2005

3.5.3 Análise microestrutural

Foi realizado a 1 e 28 dias de idade para os concretos com e sem tratamento térmico a análise da microestrutura, através dos ensaios de difração de raios X (DRX) e microscopia eletrônica de varredura (MEV).

Difração de raios X (DRX):

Ensaio realizado no Laboratório de Nanoestruturas Magnéticas e Semicondutoras do Universidade Federal do Rio Grande do Norte – LNMS. O sistema utilizado foi o MiniFlex II da Rigaku, que gera um feixe de raios-x com comprimento de onda $\lambda = 1,545 \text{ \AA}$. A coleta de dados se deu com um ângulo inicial de $2\theta 5,0^\circ$ a $70,0^\circ$ passo de $0,01^\circ$ e velocidade $15,0^\circ/\text{min}$. Para interpretação qualitativa do espectro foi utilizado como referência os padrões contidos no banco de dados JCPDS (ICDD-2002).

Microscopia eletrônica de varredura (MEV):

Foi utilizado o Laboratório de caracterização de minerais /materiais – LACAMM do Instituto Federal do Rio Grande do Norte - Campus Central. As imagens microscópicas foram obtidas por um microscópio eletrônico de varredura da marca Philips modelo XL30 ESEM. As amostras foram preparadas pela deposição de uma porção de material sólido sobre uma fita adesiva de carbono fixada no porta-amostra.

4 Análise dos resultados e discussões

4.1 Propriedades no estado fresco

A Tabela 4.1 apresenta os resultados obtidos no ensaios de verificação das propriedades dos CAA no estado fresco. Apresenta também a quantidade de aditivo promovedor de fluidez, do tipo superplastificante, necessária em cada mistura.

Tabela 4.1 – Propriedades do CAA no estado fresco, Fonte: Autor (2015)

Ensaio	Unidade	REF	10MK	10FC	20MK	20FC	10MK 10FC
Slump-flow	Mm	710	740	720	700	740	700
T-500	S	2,6	3,1	1,8	4,2	1,5	2,2
V-Funnel	S	7,28	9,5	6,5	11,2	6	9
J-ring	mm	30	33	27	37	24	28
L-box	-	0,75	0,73	0,76	0,70	0,77	0,75
Aditivo	%	0,43	1,04	0,37	1,21	0,34	0,65

Verifica-se que os CAA contendo adição de metacaulim demandam uma maior quantidade de aditivo quando comparado ao CAA referência. Resultado semelhante foi obtido por Sfika *et al* (2014) que justifica esse aumento na quantidade de aditivo à elevada superfície específica do metacaulim quando comparado com o cimento ou fíler calcário.

As misturas contendo apenas metacaulim como adição (10MK e 20MK) apresentaram-se mais “compactas” e coesas, indicando menor tendência à segregação. Essa característica influenciou em todos os ensaios, em especial os que mensuram a viscosidade (T-500 e V-Funnel), que apresentaram os maiores tempos

de escoamento, indicando uma maior viscosidade. No trabalho de Sfika *et al* (2014) o uso de metacaulim também provocou um aumento na viscosidade mensurada pelo V-funnel, ou seja, a viscosidade em espaço confinado.

Os CAA contendo fíler calcário, quando comparado ao CAA de referência, demandam uma menor quantidade de aditivo plastificante. Para Mohammed *et al* (2013) os grãos de fíler apresentam uma forma angulosa com formação de arestas, o que favorece um maior consumo de aditivo superplastificante quando comparado aos grãos, com mesmas dimensões, de cimento ou outras adições. No presente trabalho, entretanto, os traços contendo fíler demandaram uma menor quantidade de aditivo promovendo de fluidez o que pode caracterizar uma maior finura para o cimento e metacaulim.

Verificou-se que os concretos contendo fíler calcário apresentaram menor coesão. Essa característica foi observada em todos os ensaios, com ênfase especial aos que mensuram a viscosidade (T-500 e V-Funnel), onde esses concretos obtiveram os menores resultados. Resultados inferiores aos demais CAA também foi obtidos para o ensaio J-ring.

Para uma fluidez semelhante, o CAA contendo 10% de metacaulim e 10% de fíler calcário demandou uma elevação da quantidade de aditivo superplastificante quando comparado ao CAA de referência. Os resultados obtidos nesse concreto foram muito similares aos obtidos para o CAA de referência.

O Quadro 4.1 apresenta a classificação segundo a ABNT NBR 15823-1:2010. Como proposto, todos os CAA produzidos foram classificados como SF2 no ensaio de Slup-flow. Para o ensaio T-500, devido aos baixos valores obtidos para os CAA contendo fíler calcário, esses foram classificados como VS1. No ensaio V-funnel, os concretos contendo adição de metacaulim, foram classificados como VF2. Para o ensaio J-ring, o CAA 20FC foi classificado como PJ1 e para o ensaio L-box, todos os concretos foram classificados como PL2.

Quadro 4.1 – Classificação dos CAA segundo a ABNT NBR 15823-1:2010

Ensaio	REF	10MK	10FC	20MK	20FC	10MK 10FC
Slump-flow	SF2	SF2	SF2	SF2	SF2	SF2
T-500	VS2	VS2	VS1	VS2	VS1	VS2
V-Funnel	VF1	VF2	VF1	VF2	VF1	VF2
J-ring	PJ2	PJ2	PJ2	PJ2	PJ1	PJ2
L-box	PL2	PL2	PL2	PL2	PL2	PL2

4.2 Propriedades no estado endurecido

4.2.1 Resistência à compressão

A Figura 4.1 apresenta os resultados de resistência à compressão realizados nos CAA de referência após diferentes ciclos de cura térmica. Verifica-se um grande ganho de resistência a 1 dia de idade em todos CAA curados termicamente, quando comparados aos CAA curados a temperatura ambiente, notadamente com maior ganho de resistência com cura a 70°C.

A elevação da resistência a 1 dia de idade para os CAA sob cura térmica já era esperado. Segundo Hwang *et al* (2012) essa elevação de resistência pode ser de até 6 vezes para o mesmo concreto curado à temperatura ambiente.

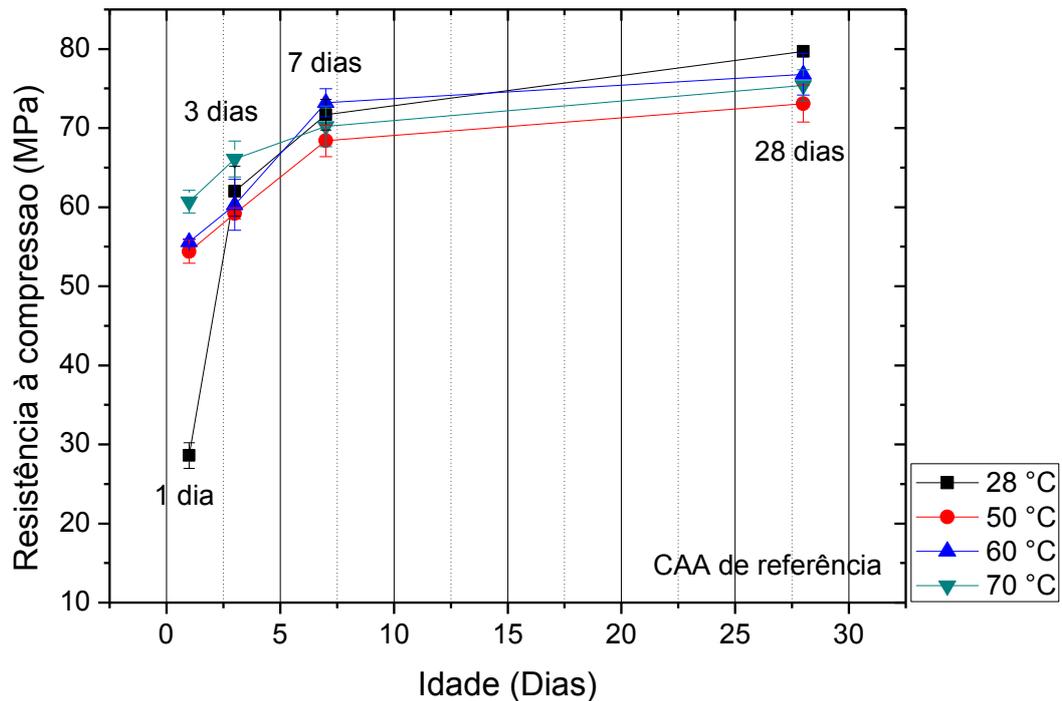


Figura 4.1 - Evolução da resistência à compressão do CAA de referência com diferentes temperaturas de cura

Os acréscimos de resistência a 1 dia de idade foram de 90%, 94% e 112% respectivamente para as curas de 50°C, 60°C e 70°C, quando comparado à cura ambiente a 28°C. O melhor desempenho da cura térmica a 70°C se manteve até os 3 dias. O CAA para essa temperatura de cura e idade mostrou maior resistência que os demais traços. Observa-se também nessa idade que o CAA com cura ambiente atingiu resistência similar as obtidas pelos CAA curados a 50°C e 60°C.

Verifica-se ainda que aos sete dias de cura o CAA submetido à cura a 60°C mostrou ligeiramente a melhor resistência, superando as demais curas térmicas, fato que perdura até os 28 dias, no entanto, sem representar ganho efetivo entre as curas realizadas. A cura a 60°C mostrou-se, portanto, a mais eficaz para o CAA de referência, uma vez que o CAA obteve excelente ganho de resistência a 1 dia, o que pode proporcionar retirada de fôrmas e colocação das peças em serviço já nessa idade, a depender do nível de resistência requerida.

Verifica-se ainda analisando a Figura 4.1 que praticamente não houve perda de resistência aos 28 dias para os CAA curados a 60°C, quando comparado a cura

aos 28 dias em temperatura ambiente. De acordo com Bingöl *et al.* (2013) e Hwang *et al.* (2012), há uma tendência de diminuição da resistência final aos 28 dias quando se compara concretos curados a temperatura ambiente e concretos com cura térmica. Essa redução pode ser atribuída à diminuição na taxa de hidratação da pasta ao longo do tempo. No entanto, este fato não foi verificado no CAA de referência quando curado a 60°C, uma vez que essa cura proporcionou o mesmo nível de resistência que o CAA com cura ambiente.

A Figura 4.2 apresenta os resultados de resistência à compressão realizados nos CAA com substituição de 10% da massa de cimento por metacaulim, após os diferentes ciclos de cura térmica. Verifica-se o mesmo comportamento quanto ao ganho de resistência a 1 dia em todas as temperaturas de cura analisadas, assim como comprovado no CAA de referência. No entanto, os maiores ganhos de resistência a 1 dia ocorreram para as curas a 50°C e 60°C. Resultado semelhante é apresentado por Derabla e Benmalek (2014), que considera o tratamento térmico a temperatura de 60°C durante 24 h muito eficaz nas idades iniciais. Yang *et al.* (2003) também considera que ciclos com temperatura máxima próxima a 60°C apresentam os melhores resultados de resistência à compressão.

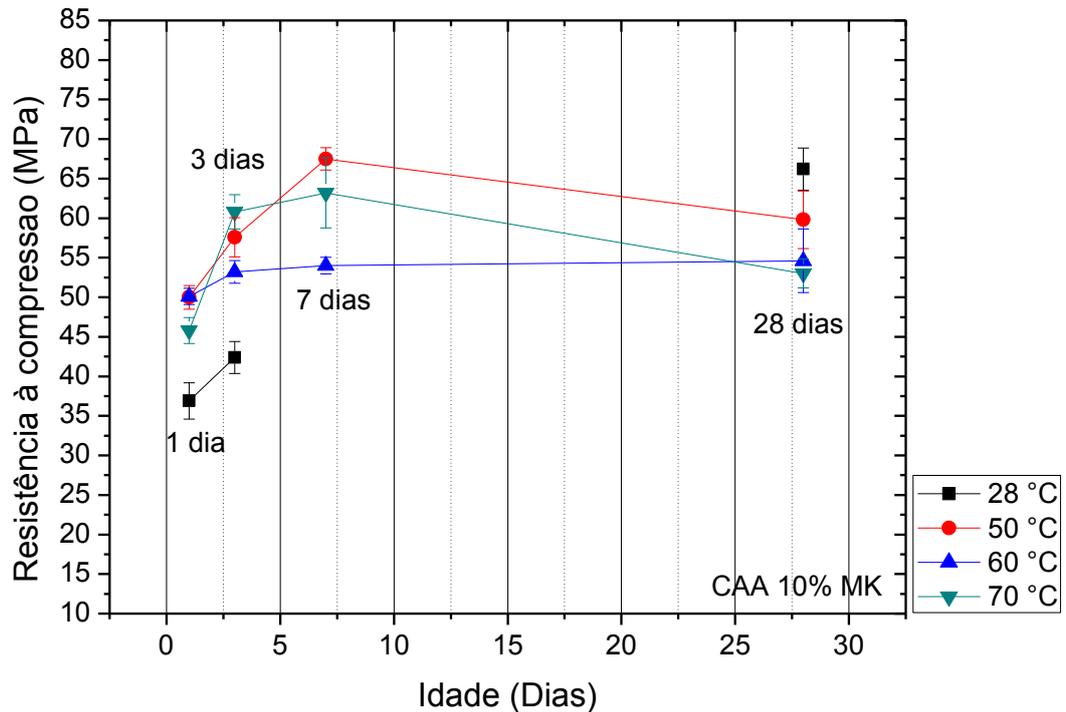


Figura 4.2 - Evolução da resistência à compressão do CAA 10% MK com diferentes temperaturas de cura

Os acréscimos de resistência a 1 dia de idade foram de 36%, 36% e 24% respectivamente para as curas de 50°C, 60°C e 70°C, quando comparado à cura ambiente a 28°C. Verifica-se que os ganhos de resistência a 1 dia de idade foram bem menores quando se utiliza CAA com 10% de metacaulim. Em comparação ao CAA de referência, o CAA contendo 10% de metacaulim apresenta resistência superior na idade de 1 dia sob a mesma condição de cura.

Nos CAA com 10% de MK e aos 3 dias de cura, o melhor desempenho foi verificado para a cura térmica a 70°C, apresentando maior ganho de resistência em relação às demais temperaturas de cura e também à cura a temperatura ambiente. Verifica-se que a temperatura ambiente o CAA com 10% MK apresenta resistência menor que para o CAA de referência para idade de 3 dias. Este fato está relacionado com o maior teor de cimento para o concreto de referência, 450 kg/m³, em relação ao CAA com 10% de metacaulim, 405 kg/m³.

Verifica-se ainda que aos sete dias de cura o CAA submetido à cura a 50°C mostrou melhor resistência superando as demais cura térmica, fato que perdura até os 28 dias. A cura a 50°C mostrou-se portanto a mais eficaz para o CAA com 10% de MK, uma vez que obteve excelente ganho de resistência a 1 dia e melhor resistência aos 28 dias em relação às demais curas térmicas.

Aos 28 dias de idade, a semelhança do CAA de referência sob cura ambiente a 28°C obteve a maior resistência. Destaca-se a queda na resistência à compressão nas idades de 7 para 28 dias, nas curas térmicas de 50°C e 70°C para os CAA com 10% de MK.

Na Figura 4.3 são apresentados os resultados de resistência à compressão realizados nos CAA com substituição de 20% da massa de cimento por metacaulim, após os diferentes ciclos de cura térmica. Observa-se novamente que as curas a 50°C, 60°C e 70°C obtiveram maior resistência a 1 dia de idade quando comparadas à cura ambiente a 28°C. À semelhança do CAA com 10% de mecaulim, os maiores ganhos de resistência a 1 dia ocorreram para as curas a 50°C e 60°C.

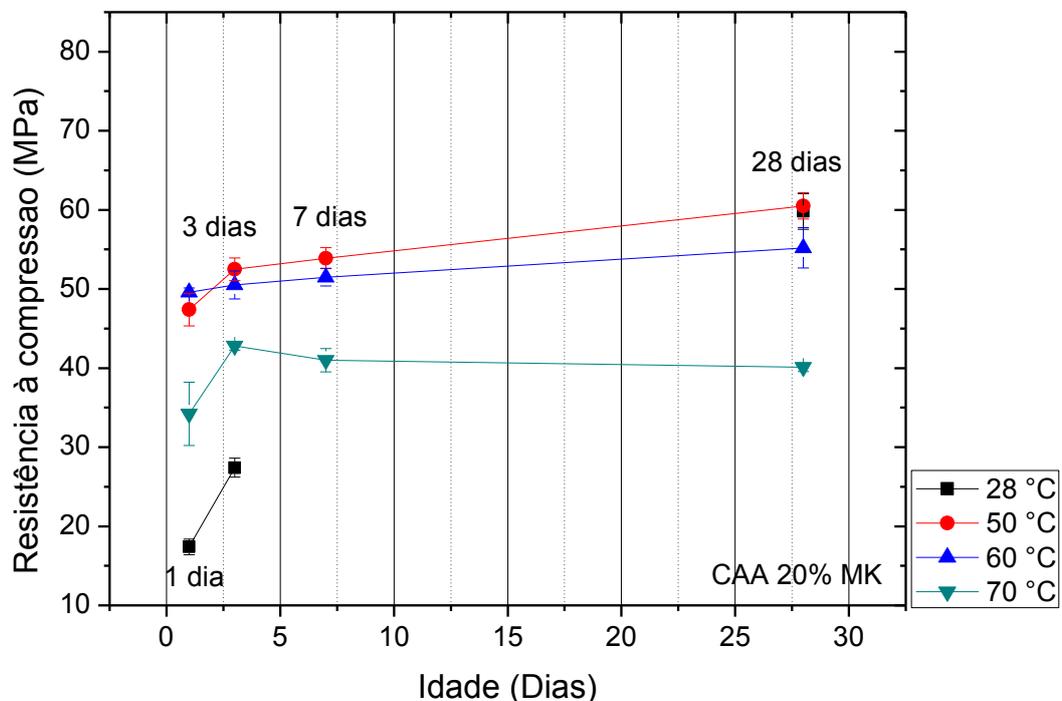


Figura 4.3 - Evolução da resistência à compressão do CAA 20% MK com diferentes temperaturas de cura

Os acréscimos de resistência a 1 dia de idade foram de 172%, 185% e 97% respectivamente para as curas de 50°C, 60°C e 70°C, quando comparado à cura ambiente a 28°C. Observa-se que o ganho de resistência a 1 dia de idade quando se utiliza 20% de metacaulim foi bem maior quando comparado ao CAA de referência (exceto para a cura a 70°C), pois ao contrário do que ocorreu com o CAA com 10% de metacaulim, houve uma redução acentuada na resistência do CAA contendo 20% de metacaulim submetido a cura ambiente a 28°C.

Verificam-se as menores resistências para o CAA contendo 20% de metacaulim nas idades de 1 e 3 dias de idade quando comparado ao CAA contendo 10% e CAA de referência. Isso se deve provavelmente a baixa atividade do metacaulim e menor quantidade de Cimento Portland, 360 Kg/m³, quando relacionada às outras duas misturas.

A maior resistência à compressão a 1 dia de idade foi obtida para a cura térmica a 60°C. Aos 3 dias de idade o CAA submetido à cura térmica a 50°C se mostrou mais eficiente, e manteve os melhores resultados aos 7 e também aos 28 dias de idade, com valores ligeiramente superiores ao CAA sob cura ambiente a 28°C. Portanto, a cura a 50°C também se mostrou a mais eficaz para o CAA com 20% de MK, uma vez que obteve excelente ganho de resistência a 1 dia e maior resistência para todas as idades e temperaturas de cura analisadas.

O CAA com 20% de metacaulim curado a 70°C obteve as menores resistências quando comparado ao CAA curado a temperatura de 50°C e 60° para todas as idades analisadas (1, 3, 7 e 28 dias). Verifica-se também uma redução sucessiva da resistência nas idades de 7 e 28 dias, quando comparada à resistência aos 3 dias de idade.

Na Figura 4.4 são apresentados os resultados de resistência à compressão realizados nos CAA com substituição de 10% da massa de cimento por filer calcário, após os diferentes ciclos de cura térmica. Verifica-se maior ganho de resistência a 1 dia de idade para as temperaturas de 50°C, 60°C e 70°C quando comparado às resistências obtidas na cura ambiente a 28°C, destacando-se 50°C e 60°C, à semelhança do CAA contendo 10% metacaulim.

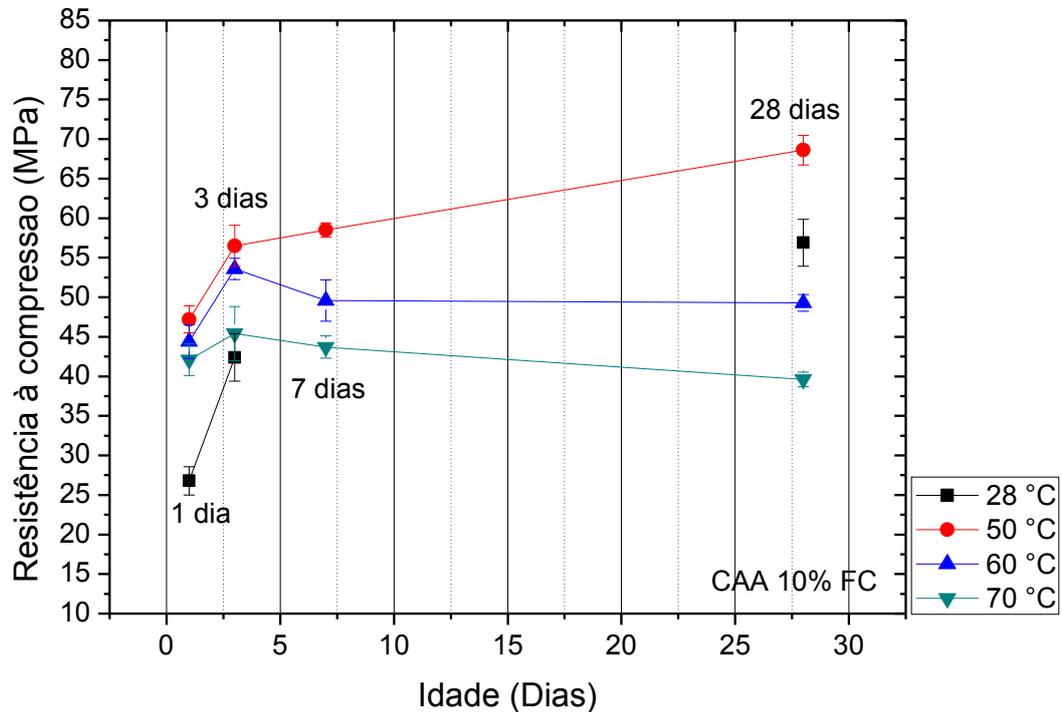


Figura 4.4 - Evolução da resistência à compressão do CAA 10% FC com diferentes temperaturas de cura

Os acréscimos de resistência a 1 dia de idade foram de 76%, 66% e 57% respectivamente para as curas de 50°C, 60°C e 70°C, quando comparado à cura ambiente a 28°C. Verifica-se que os ganhos de resistência a 1 dia de idade do CAA contendo 10% de fíler calcário é ligeiramente inferior ao CAA contendo 10% de metacaulim. Isso provavelmente deve-se à reação pozolânica do metacaulim favorecer uma maior formação de compostos resistentes ainda nas primeiras idades.

A 1 dia de idade, a maior resistência foi obtida no CAA curado a temperatura de 50°C, seguido do CAA curado 60°C. Aos 3 dias de idade as temperaturas de 50°C e 60°C apresentaram um crescimento praticamente equivalente, já 70°C apresentou um resultado ligeiramente superior a cura úmida a temperatura ambiente, entretando, o menor resultado para as três temperaturas de cura térmica analisadas.

Verificou-se uma redução na resistência do CAA curado a temperatura de 60°C e 70°C a partir de 7 dias de idade, tendência que se manteve até 28 dias de idade. O CAA submetido a cura ambiente a 28 °C obteve aos 28 dias de idade uma resistência superior a essas duas temperaturas.

O CAA submetido a cura térmica a 50°C obteve a maior resistência em todas as idades analisadas (1, 3, 7 e 28 dias), assim, a temperatura de 50°C se mostrou a mais eficaz para a cura térmica do CAA contendo 10% de fíler calcário.

Na Figura 4.5 são apresentados os de resistencia à compressão realizados nos CAA com substituição de 20% da massa de cimento por fíler calcário, após os diferentes ciclos de cura térmica. Observa-se que o CAA curado a 60°C obteve resistência a 1 dia de idade equivalente ao CAA sob cura ambiente a 28°C. O CAA curado a 70°C apresentou um pequeno crescimento, quando comprado a esse mesmo concreto. A temperatura de 50°C apresentou a maior resistência para essa idade.

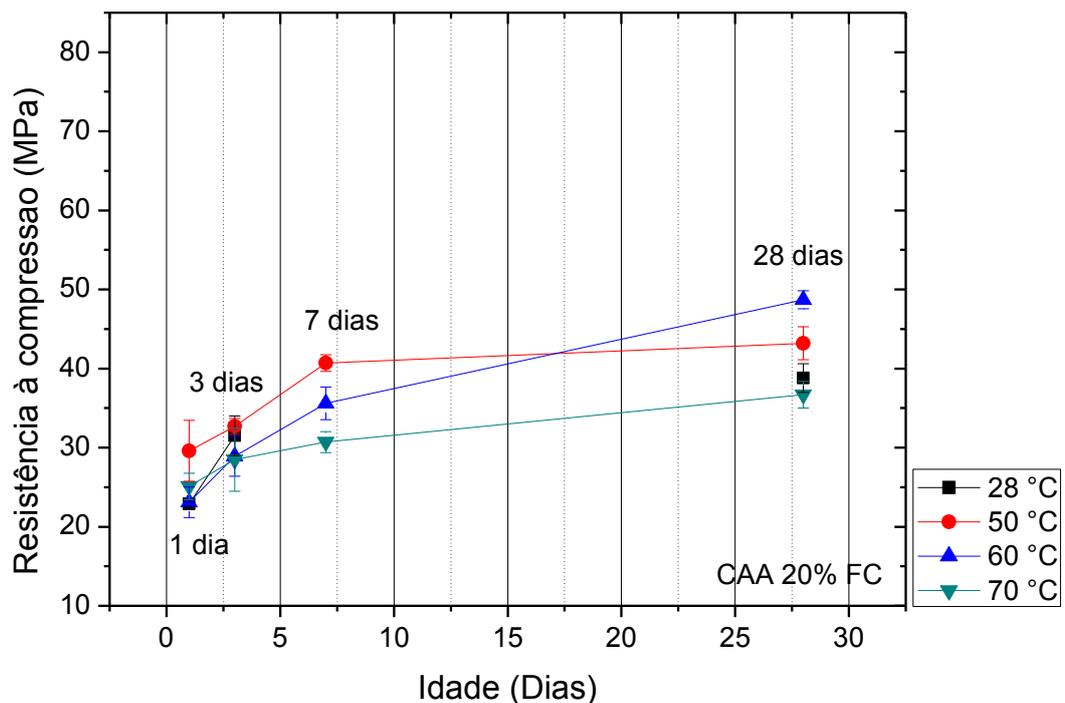


Figura 4.5 - Evolução da resistência à compressão do CAA 20% FC com diferentes temperaturas de cura

Os acréscimos de resistência a 1 dia de idade foram de 29%, 1% e 10% respectivamente para as curas de 50°C, 60°C e 70°C, quando comparado a cura ambiente a 28°C. Observa-se que o ganho de resistência a 1 dia de idade no CAA contendo 20% de fíler calcário é superior ao CAA contendo 20% de mecaulim quando submetido a cura ambiente a 28°C, entretanto, quando se utiliza tratamento térmico a

resistência reduz consideravelmente para todas as temperaturas analisadas (50°C, 60°C e 70°C).

A 1 dia de idade a maior resistência foi obtida no CAA curado a temperatura de 50°C, seguido do CAA curado a 70°C. Aos 3 dias de idade as temperaturas de 60°C e 70°C apresentam um resultado praticamente equivalente e inferior ao CAA curado a 50°C e a temperatura ambiente de 28°C. O CAA curado a 50°C mantém o maior resultado também aos 7 dias de idade, seguido de 60°C.

Aos 28 dias de idade o CAA curado a 70°C apresenta a menor resistência, seguindo do CAA sob cura ambiente a 28°C. O CAA curado a 50°C obtém a segunda maior resistência, sendo a mais elevada a obtida pelo CAA curado a 60°C.

Considerando todas as idades analisadas (1, 3, 7 e 28 dias) o CAA curado a 50°C mostrou ser o mais eficiente para o CAA contendo 20% de fíler calcário. Além de se obter a temperatura de 50°C a um menor consumo energético, a única idade em que esse concreto não apresentou a maior resistência foi aos 28 dias, em que foi inferior a 60°C, entretanto, apresentou crescimento com relação a 7 dias e resultado superior ao CAA sob cura ambiente a 28°C.

Na Figura 4.6 são apresentados os resultados de resistência à compressão realizados nos CAA com substituição de 10% da massa de cimento por metacaulim e 10% de substituição da massa de cimento por fíler calcário, após diferentes ciclos de cura térmica.

Verifica-se maior ganho de resistência a 1 dia de idade para o CAA submetido a tratamento térmico quando comparado ao CAA submetido à cura ambiente a 28°C. As maiores resistências para essa idade foram obtidas para o CAA curado a 50°C e 60°C.

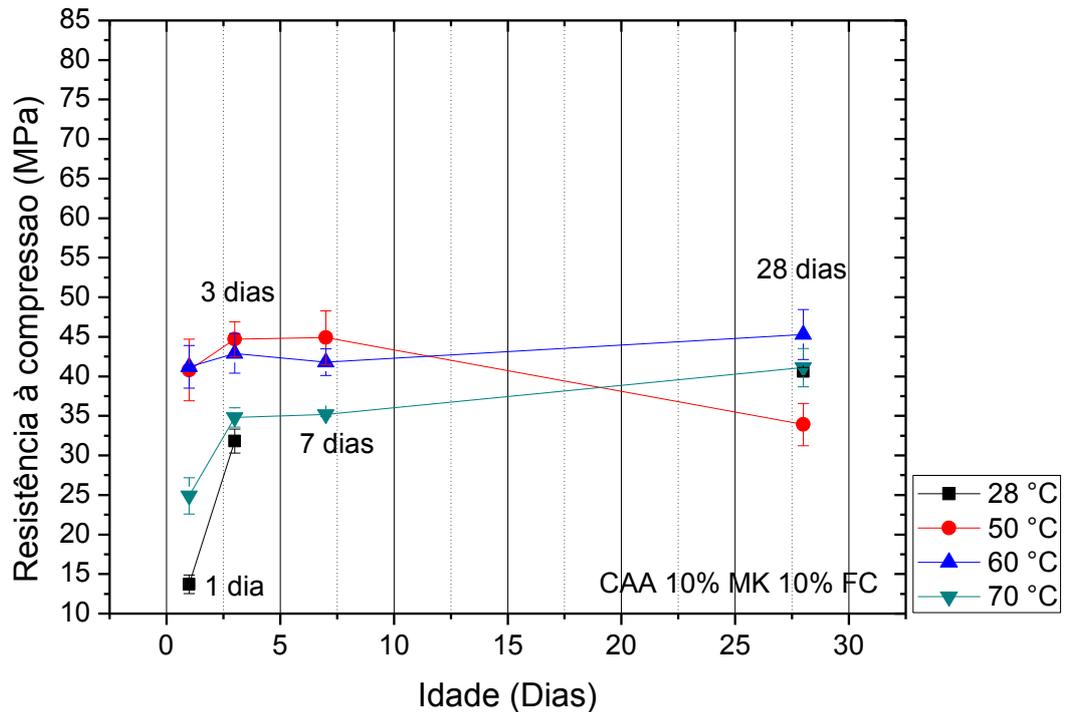


Figura 4.6 - Evolução da resistência à compressão do CAA 10%MK10%FC com diferentes temperaturas de cura

Os acréscimos de resistência a 1 dia de idade foram de 198%, 201% e 82% respectivamente para as curas de 50°C, 60°C e 70°C, quando comparado à cura ambiente a 28°C. Verifica-se que os ganhos de resistência a 1 dia de idade (temperaturas de 50°C e 60°C principalmente) foram bem maiores quando se utiliza CAA com 10% de metacaulim e 10% de fíler calcário quando comparado a outros CAA. Isso se deve ao CAA com 10% de metacaulim e 10% de fíler calcário com cura ambiente a 28°C apresentar a menor resistência a 1 dia de todos os traços analisados.

A baixa resistência do CAA com cura ambiente a 28°C a 1 dia de idade, deve-se inicialmente à redução da quantidade de cimento devido a uma substituição de 20% de sua massa. Seguindo do fato da temperatura de 28°C não acelerar as reações pozolânicas do metacaulim, como acontece com o tratamento térmico para as temperaturas analisadas. Soma-se ainda o fato do fíler apresentar uma tendência a baixas resistências a 1 dia de idade, conforme pode-se observar no CAA com substituição de 10% e 20% de fíler calcário.

Observa-se que a maior resistência é encontrada para 1 dia de idade para o CAA curado a 60°C. Tendência que não se mantém aos 3 dias, onde a temperatura 50°C resulta na maior resistência. Verifica-se também que aos 3 dias de idade, que a resistência do CAA sob cura ambiente a 28°C atingiu um valor próximo a resistência do CAA curado a 70°C.

Aos 7 dias de idade, observa-se uma redução na resistência do CAA curado a 60°C, quando comparado a idade de 3 dias. Verifica-se um pequeno crescimento para o CAA curado a 50°C, mantendo assim a maior resistência também para essa idade.

Verifica-se aos 28 dias de idade no CAA curado a 50°C uma brusca redução em sua resistência, quando comparado a 7 dias de idade, essa atingindo um valor de resistência inferior ao CAA sob cura ambiente a 28°C. O CAA curado a temperatura de 60°C apresenta crescimento de sua resistência, quando comparada a idade de 7 e 3 dias. Enquanto que na idade de 28 dias apresenta a maior resistência para todas as temperaturas analisadas.

O CAA curado a temperatura de 60°C se mostrou mais eficaz, devido a resistência que obteve a 1 dia de idade, e aos 28 dias apresentar a maior resistência, sendo essa mais elevada que o CAA curado a 70°C e o CAA curado a temperatura ambiente de 28°C.

Na Figura 4.7 e na Figura 4.8 está ilustrada a influência da substituição parcial do cimento nos diferentes CAA curados a 28°C por 1 e 28 dias, respectivamente, onde se verifica uma queda na resistência para essas idades quando comparadas ao CAA de referência, com exceção do traço com 10% de metacaulim a 1 dia. Kim *et al* (2007) obtiveram resultado semelhante e observaram que na substituição contendo 10% de MK observou-se melhorias significativas nas idades de 1 e 3 dias, quando comparado ao concreto sem adição, contendo apenas cimento. Poon *et al* (2006) atribui as melhorias às propriedades mecânicas e durabilidade do CAA contendo 10% de metacaulim ao efeito fíler dessa adição, que provoca empacotamento, refinamento dos poros e por conseguinte acelera as reações de hidratação. Outra contribuição se deve à sua atividade pozolânica com o hidróxido de cálcio, formando compostos resistentes e aumentando a resistência da matriz cimentícia.

Pode se observar na Figura 4.7 que 1 dia de idade o CAA contendo 10% de metacaulim tem resistência superior ao CAA de referência. O CAA contendo 10% de fíler calcário tem a resistência que mais se aproxima da referência e o CAA contendo 10% de metacaulim e 10% fíler apresenta o pior resultado pra essa idade e temperatura.

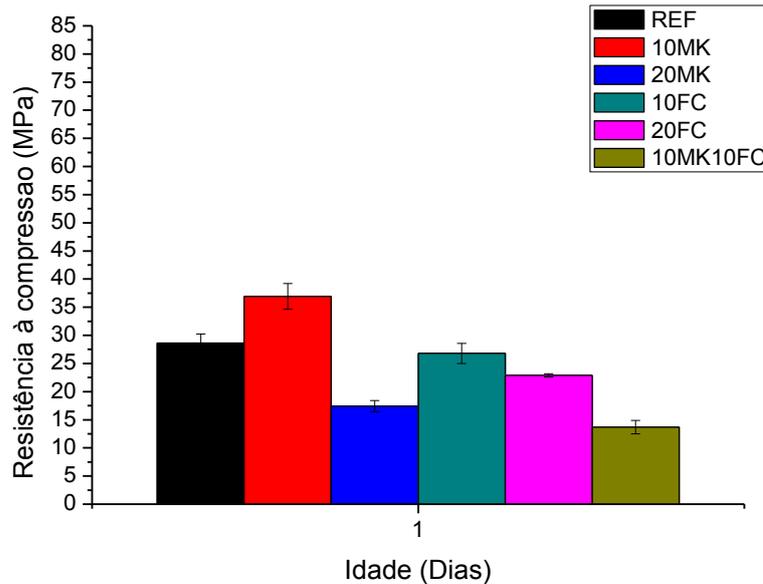


Figura 4.7 - Resistências de 1 dia de cura a 28°C

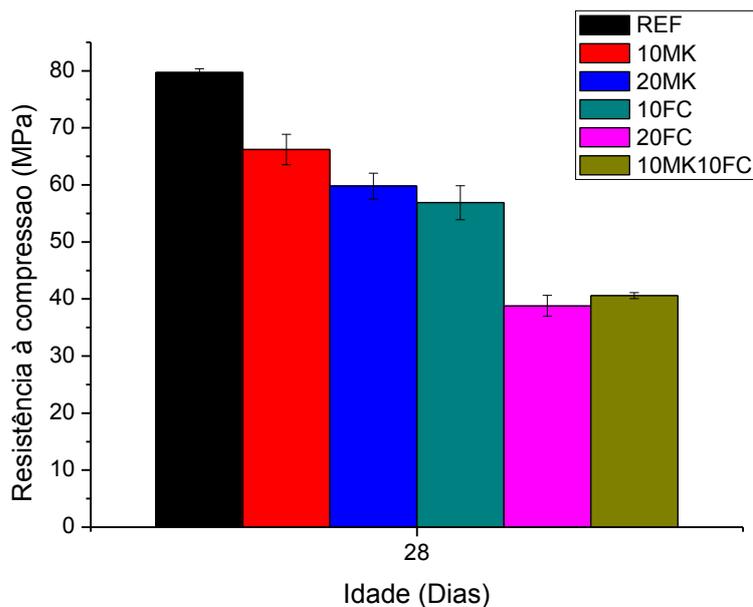


Figura 4.8 - Resistências de 28 dias de cura a 28°C

Na Figura 4.9 e Figura 4.10 é representada a influências da substituição parcial do cimento nos diferentes CAA curados a 50°C por 1 e 28 dias, onde se observa uma queda na resistência para essas idades quando comparadas ao CAA de referência.

Verifica-se a 1 dia de idade uma menor resistência para o CAA contendo 20% de fíler calcário e a 28 dias a maior resistência foi obtida para o CAA com 10% de fíler calcário.

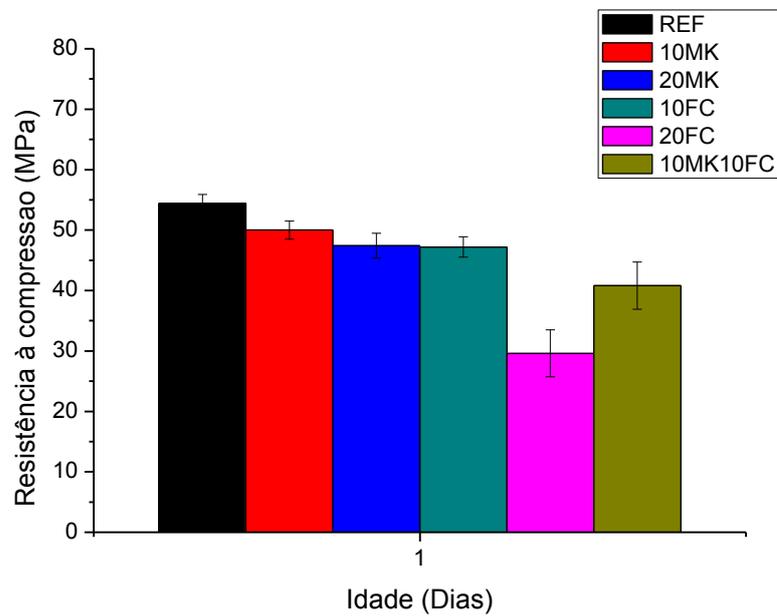


Figura 4.9 - Resistências de 1 dia de cura a 50°C

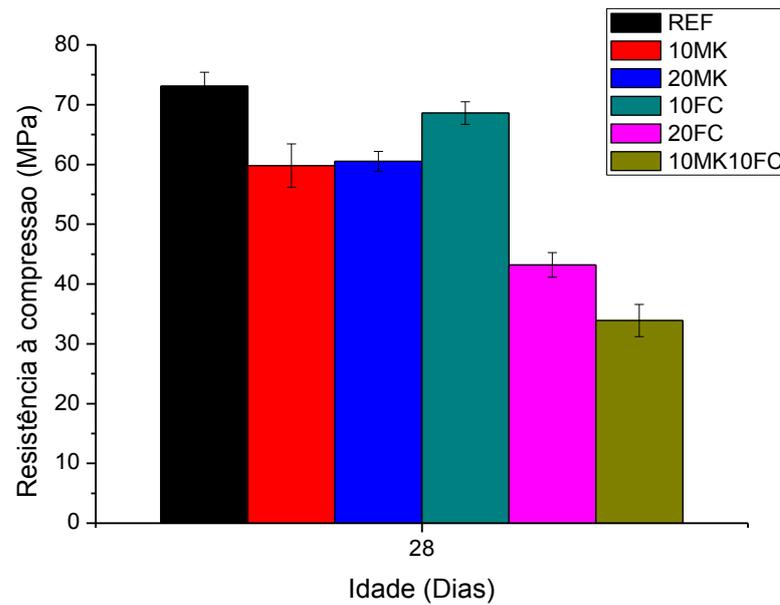


Figura 4.10 - Resistências de 28 dias de cura a 50°C

Na Figura 4.11 e Figura 4.12 é apresentada a influência da substituição parcial do cimento nos diferentes CAA curados a 60°C por 1 e 28 dias, onde se observa uma queda na resistência para essas idades quando comparadas ao CAA de referência.

Pode se verificar, à semelhança da cura a 50°C, que a menor resistência a 1 dia de idade pode ser atribuída ao CAA contendo 20% de fíler calcário. Os melhores resultados a 28 dias de idade relaciona-se aos CAA contendo metacaulim a 10% e 20% de substituição.

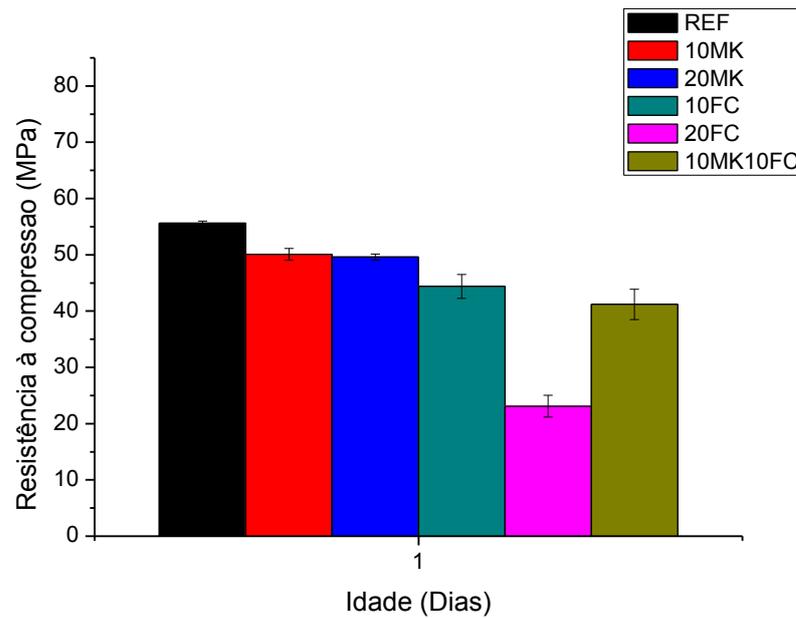


Figura 4.11 - Resistências de 1 dia de cura a 60°C

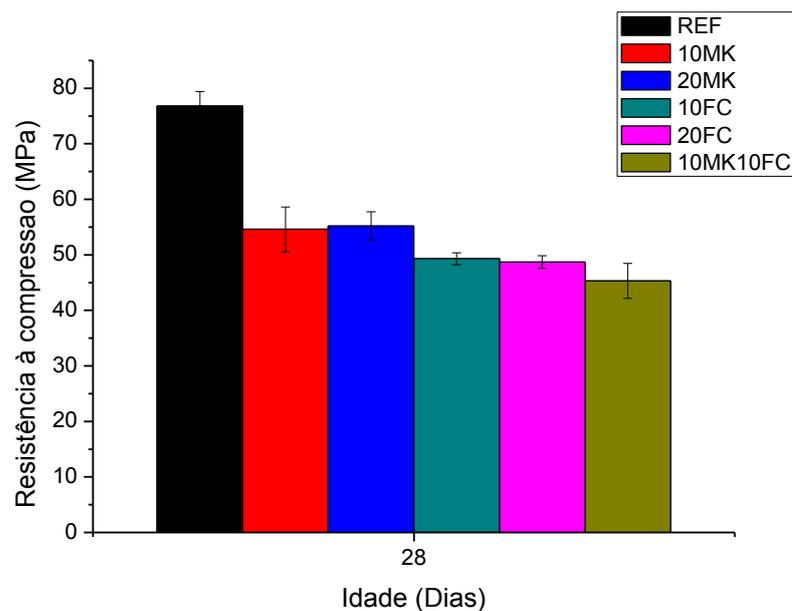


Figura 4.12 - Resistências de 28 dias de cura a 60°C

Na Figura 4.13 e Figura 4.14 é apresentada a influência da substituição parcial do cimento nos diferentes CAA curados a 70°C por 1 e 28 dias, onde se observa uma queda na resistência para essas idades quando comparadas ao CAA de referência.

Verifica-se que a 1 dia de idade o CAA que mais se aproxima da referência é o CAA contendo 10% de metacaulim e o CAA contendo 10% de fíler calcário. Aos 28

dias de idade o CAA que mais se aproxima do CAA de referência é o contendo 10% de metacaulim.

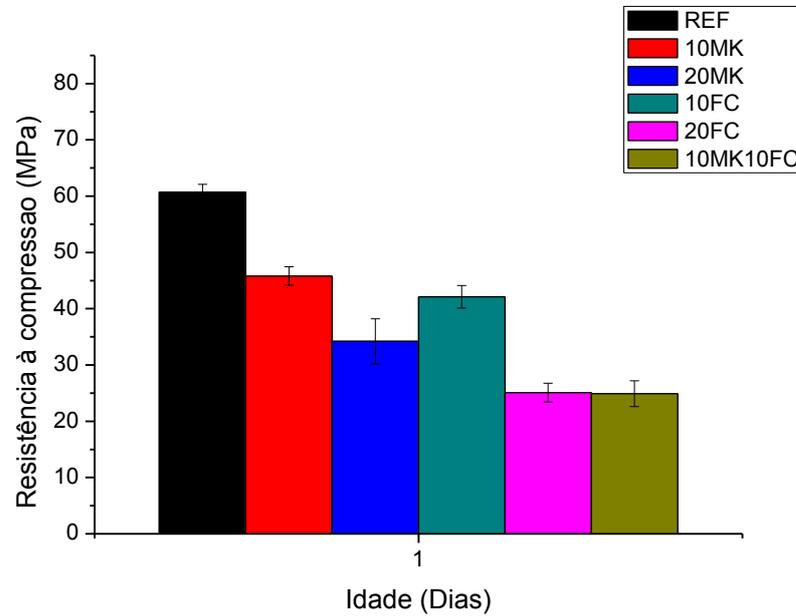


Figura 4.13 - Resistências de 1 dia de cura a 70°C

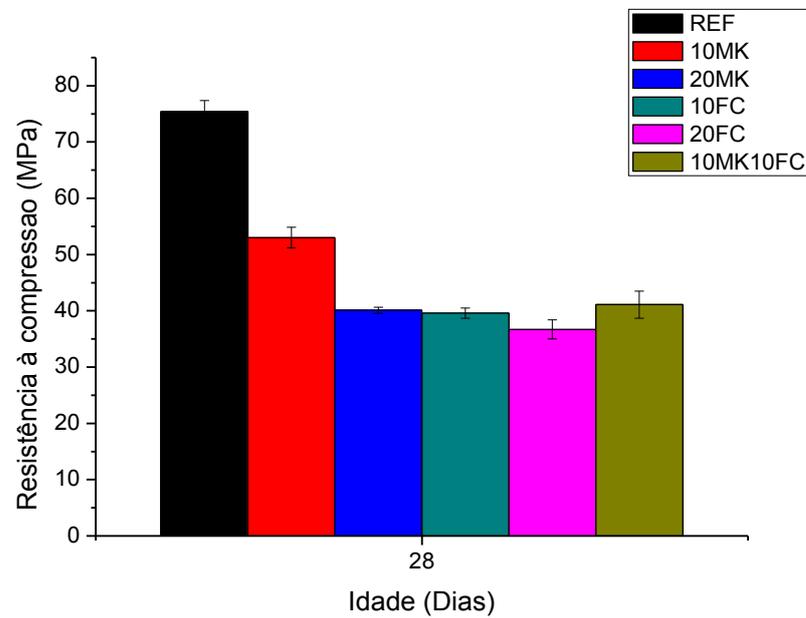


Figura 4.14 - Resistências de 28 dias de cura a 70°C

4.2.2 Módulo de elasticidade dinâmico

Na Figura 4.15 são apresentados os resultados de módulo de elasticidade dinâmico dos CAA quando sob cura ambiente a 28°C por 28 dias. Observa-se que o CAA de referência obteve o melhor resultado, acompanhado dos CAA contendo 10% de fíler calcário e CAA contendo 20% de fíler calcário.

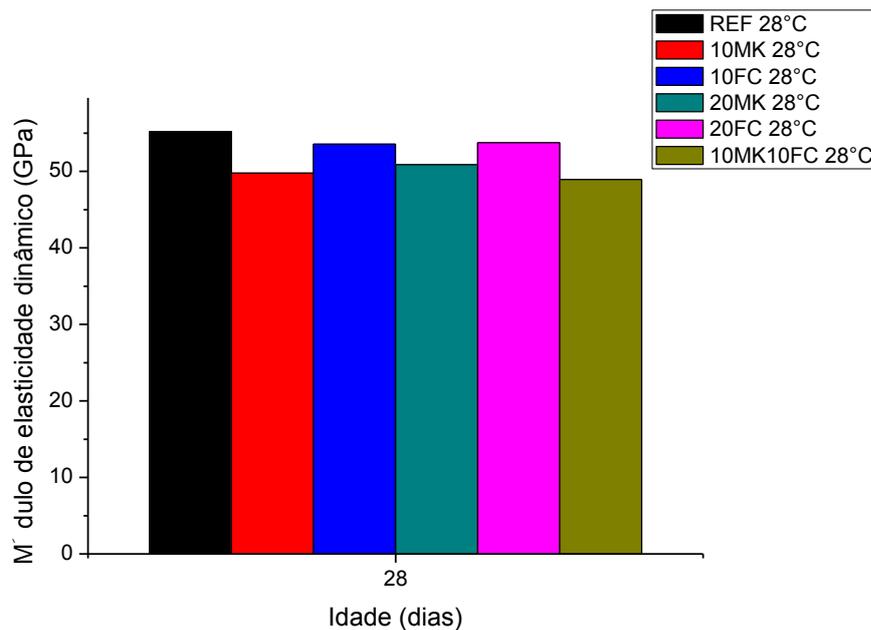


Figura 4.15 - Módulo de elasticidade dinâmico dos CAA sob cura ambiente a 28°C

Na Figura 4.16 são apresentados os resultados de módulo de elasticidade dinâmico dos CAA quando sob cura térmica a 50°C por 28 dias. Aos 50°C novamente os CAA contendo fíler calcário apresentaram valores mais elevados de módulo de elasticidade. Verifica-se o melhor resultado para o CAA contendo 10% de fíler calcário, seguido do CAA contendo 20% de fíler e CAA de referência.

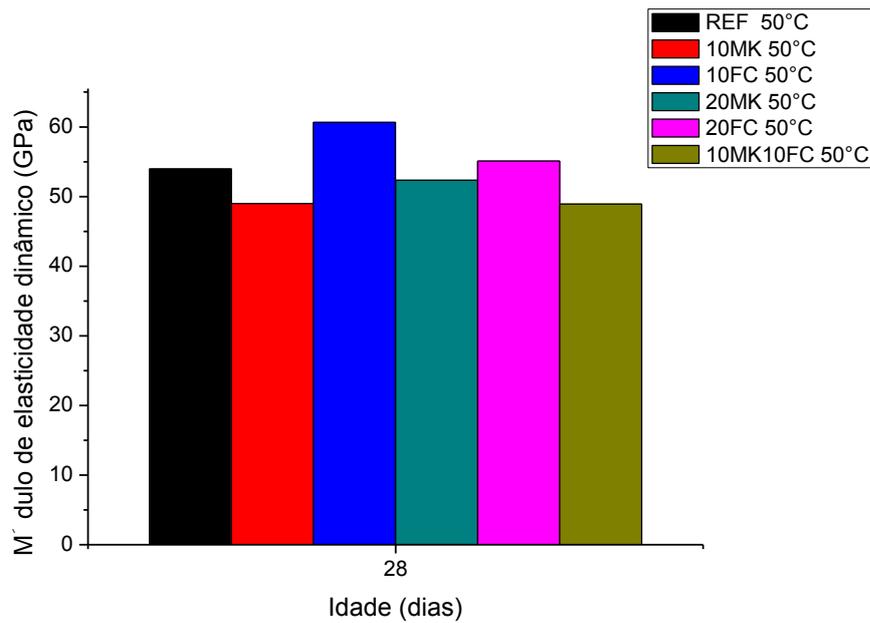


Figura 4.16 - Módulo de elasticidade dinâmico dos CAA de cura a 50°C

Na Figura 4.17 são apresentados os resultados de módulo de elasticidade dinâmico dos CAA quando sob cura térmica a 60°C por 28 dias. Aos 60°C os CAA contendo fíler calcário apresentaram novamente bons resultados, entretanto, observa-se acréscimo na resistência do CAA contendo 10% de metacaulim e 10% de fíler calcário.

Verifica-se o melhor resultado para o CAA contendo 10% de fíler calcário, seguindo com resultados praticamente similares do CAA de referência e o CAA contendo 10% de metacaulim e 10% de fíler calcário.

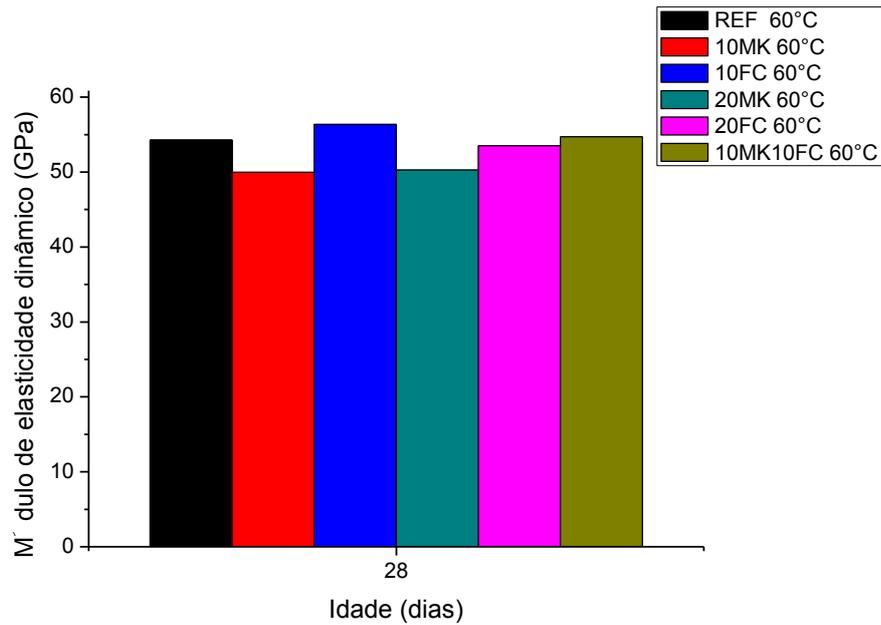


Figura 4.17 - Módulo de elasticidade dinâmico dos CAA de cura a 60°C

Na Figura 4.18 são apresentados os resultados de módulo de elasticidade dinâmico dos CAA quando sob cura térmica a 70°C por 28 dias. Verifica-se o melhor resultado para o CAA de referência, seguindo do CAA contendo 10% de metacaulim, o CAA contendo 10% de fíler calcário e o CAA contendo 10% de mecaulim e 10% de fíler seguem na sequencia com resultados praticamente iguais.

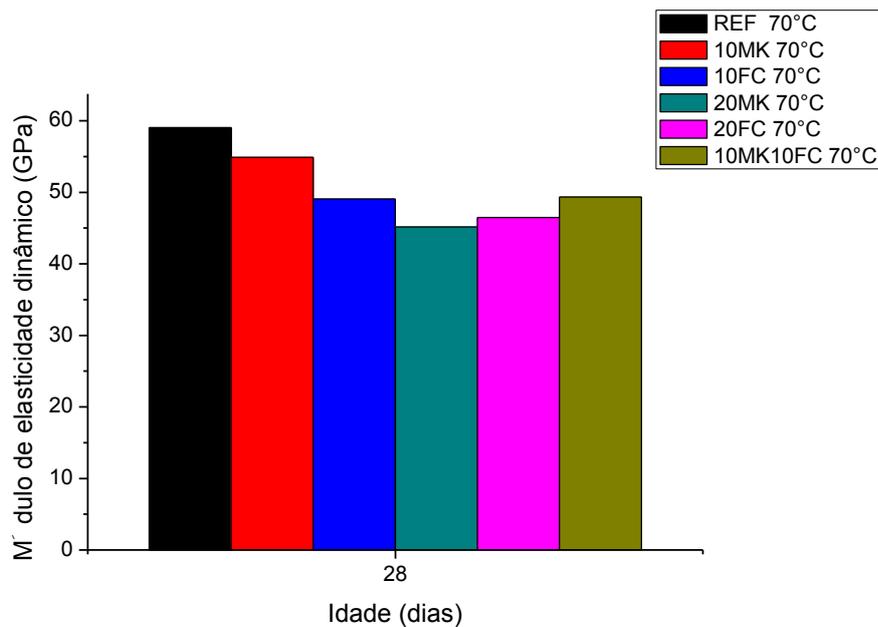


Figura 4.18 - Módulo de elasticidade dinâmico dos CAA de cura a 70°C

Com base nas Figuras 4.15, 4.16, 4.17 e 4.18, pode-se observar que o módulo de elasticidade dinâmico não teve relação direta com a resistência. Isso deve-se ao módulo de elasticidade dinâmico ser obtido pela coorelação com a velocidade do pulso ultra-sônico. Quanto mais rápido a onda sonora se propagar através do concreto, mais coeso e compacta será a amostra em análise. Assim, os maiores valores de módulo de elasticidade dinâmico, podem ter sido os obtidos para os concretos mais coesos e compactos e não necessariamente os que apresentam maior resistência à compressão.

4.2.3 Absorção total, índice de vazios e massa específica

Na Figura 4.19, 4.20 e 4.21 são apresentados os resultados de absorção total, índice de vazios e massa específica dos CAA quando sob cura ambiente a 28°C por 28 dias. Verifica-se no CAA contendo 20% de fíler calcário maior absorção total e índice de vazios, acompanhado do CAA contendo 10% de fíler, seguido do CAA de referência. O CAA contendo 10% de metacaulim e 10% de fíler obteve os melhores resultados. A massa específica não sofreu grandes variações para os CAA avaliados a essa temperatura idade.

O melhor desempenho dos CAA contendo metacaulim apresentado é atribuído a atividade pozolânica dessa adição. Essa pozolana atuará diminuindo o diâmetro dos poros e suas conexões. A maior abosorção total para os CAA contendo fíler calcário é função da maior quantidade de água/volume, expressa pela maior tendência a exsudação desses concretos.

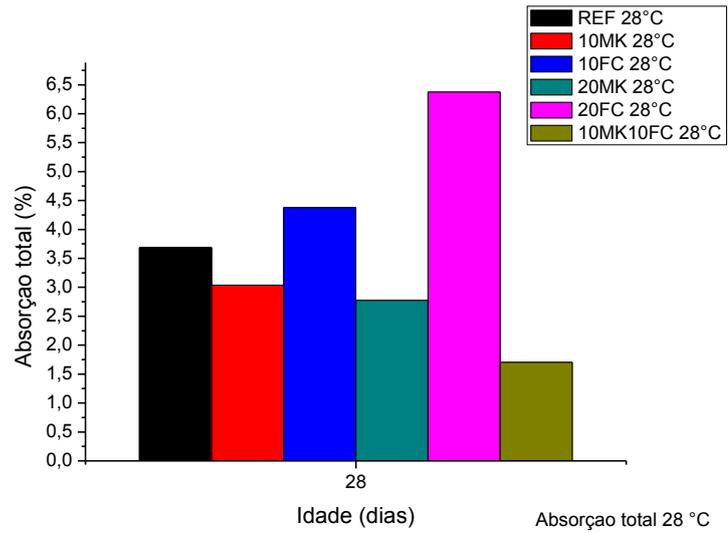


Figura 4.19 - Absorção total sob cura ambiente a 28°C

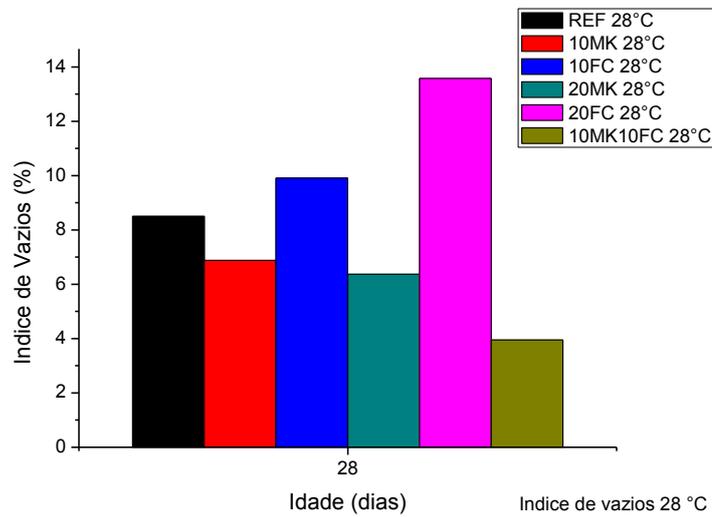


Figura 4.20 – Índice de vazios sob cura ambiente a 28°C

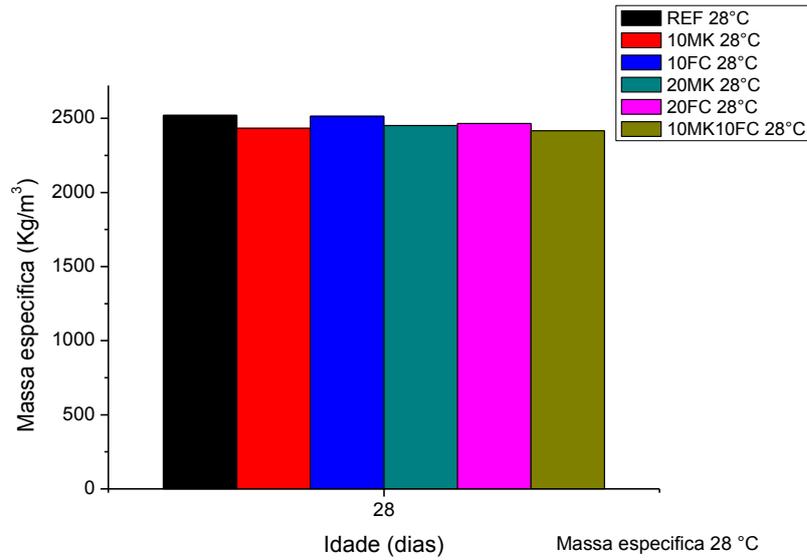


Figura 4.21 – Massa específica sob cura ambiente a 28°C

Na Figura 4.22, 4.23 e 4.24 são apresentados os resultados de absorção total, índice de vazios e massa específica dos CAA quando sob cura térmica a 50°C por 28 dias. Aos 50°C verifica-se uma maior absorção total e índice de vazios nos CAA de referência, seguindo novamente do CAA contendo 20% de fíler calcário. A massa específica não sofreu grandes variações para os CAA avaliados a essa temperatura e idade.

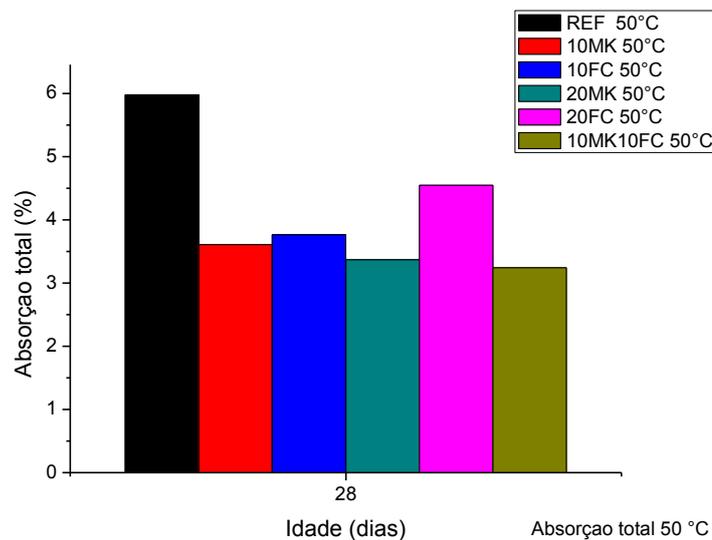


Figura 4.22 - Absorção total sob cura ambiente a 50°C

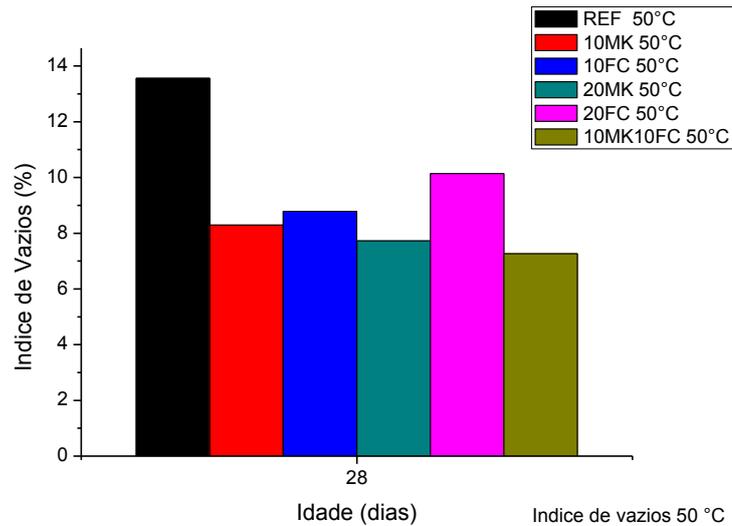


Figura 4.23 – Índice de vazios sob cura ambiente a 50°C

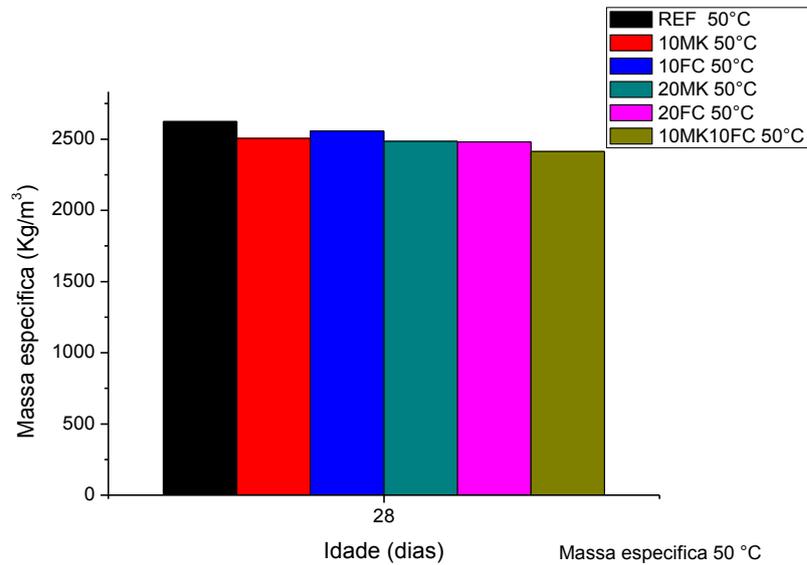


Figura 4.24 – Massa específica sob cura ambiente a 50°C

Na Figura 4.25, 4.26 e 4.27 são apresentados os resultados de absorção total, índice de vazios e massa específica dos CAA quando sob cura térmica a 60°C por 28 dias. Aos 60°C observa-se resultado semelhante ao obtido na cura ambiente a 28°C, exceto pela elevação da absorção total e índice de vazios do CAA de referência, que apresenta valores superiores ao CAA contendo 10% de fíler calcário. Também houve elevação dos resultados do CAA contendo 10% de metacaulim e 10% de fíler calcário. O CAA contendo 10% de metacaulim obteve os melhores resultados. A massa

específica não sofreu grandes variações para os CAA avaliados a essa temperatura e idade.

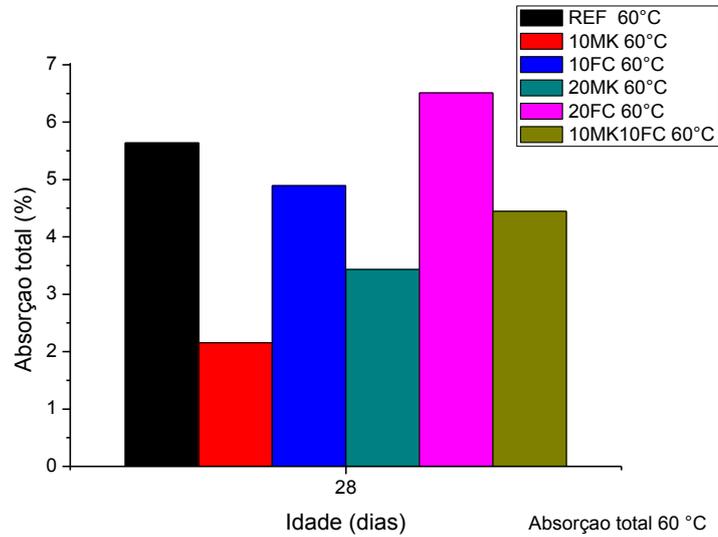


Figura 4.25 - Absorção total sob cura ambiente a 60°C

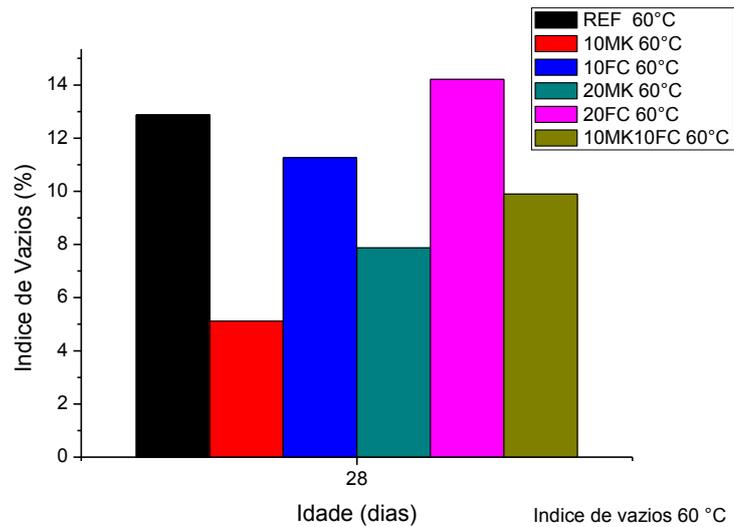


Figura 4.26 – Índice de vazios sob cura ambiente a 60°C

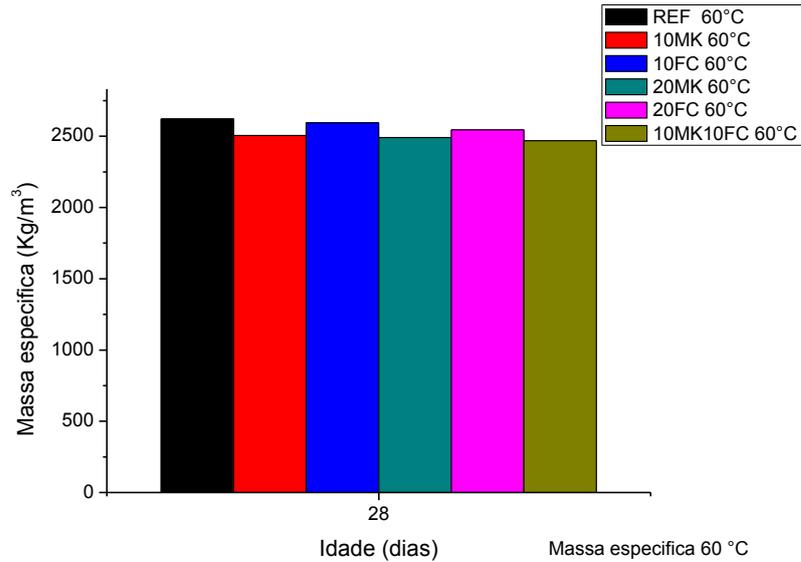


Figura 4.27 – Massa específica sob cura ambiente a 60°C

Na Figura 4.28, 4.29 e 4.30 são apresentados os resultados de absorção total, índice de vazios e massa específica dos CAA quando sob cura térmica a 70°C por 28 dias. Verifica-se que o CAA contendo 10% de fíler calcário apresenta os melhores valores de absorção total e índice de vazios, entretanto, o CAA contendo 20% de fíler apresenta os valores mais elevados. A massa específica não sofreu grandes variações para os CAA avaliados a essa temperatura e idade.

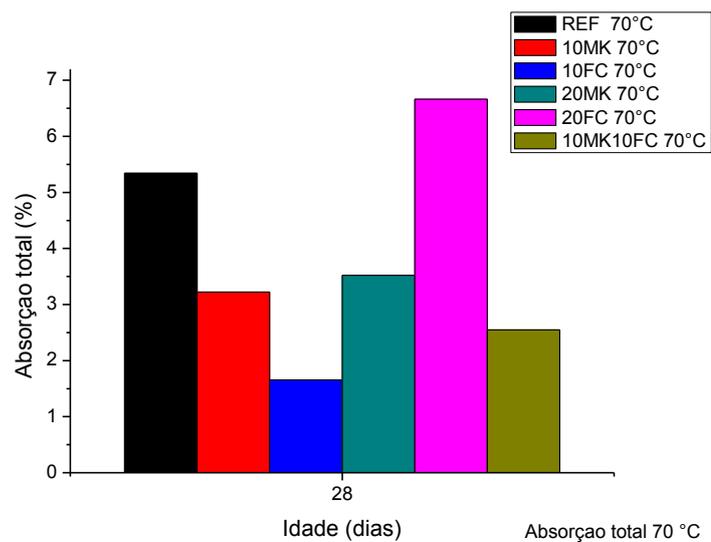


Figura 4.28 - Absorção total sob cura ambiente a 70°C

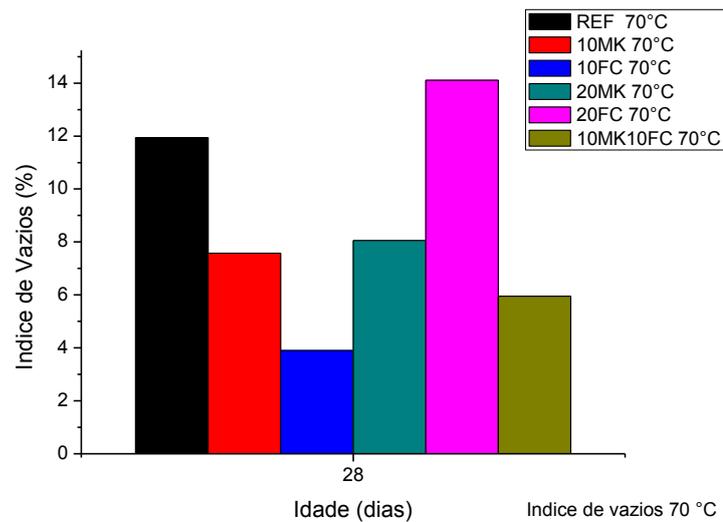


Figura 4.29 – Índice de vazios sob cura ambiente a 70°C

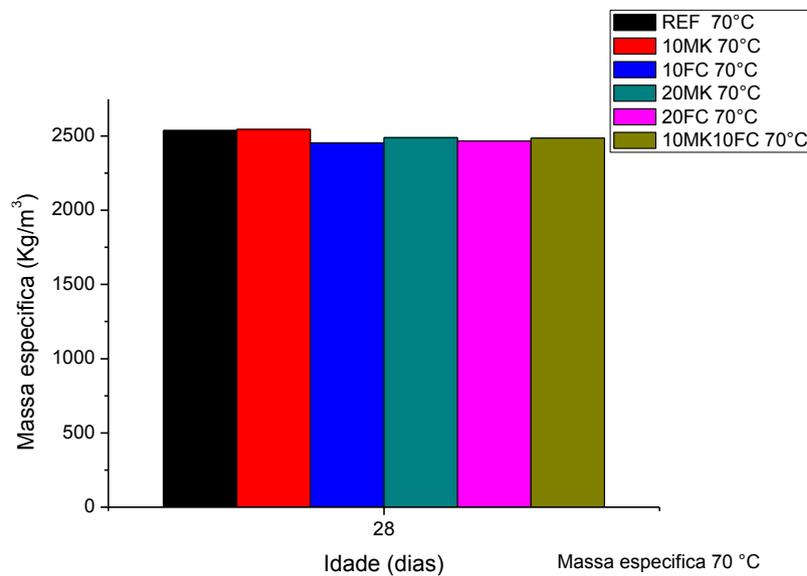


Figura 4.30 – Massa específica sob cura ambiente a 70°C

4.2.4 Absorção por capilaridade

Na Figura 4.31 são apresentados os resultados de absorção por capilaridade dos CAA quando sob cura ambiente a 28°C por 28 dias. Verifica-se que o CAA contendo 20% de metacaulim foi o que obteve menor absorção capilar. Mais uma vez esse resultado reflete o efeito pozolânico do metacaulim, favorecendo a formação de compostos resistentes, aumentando a compacidade da mistura, diminuindo assim os vazios permeáveis contidos na mistura.

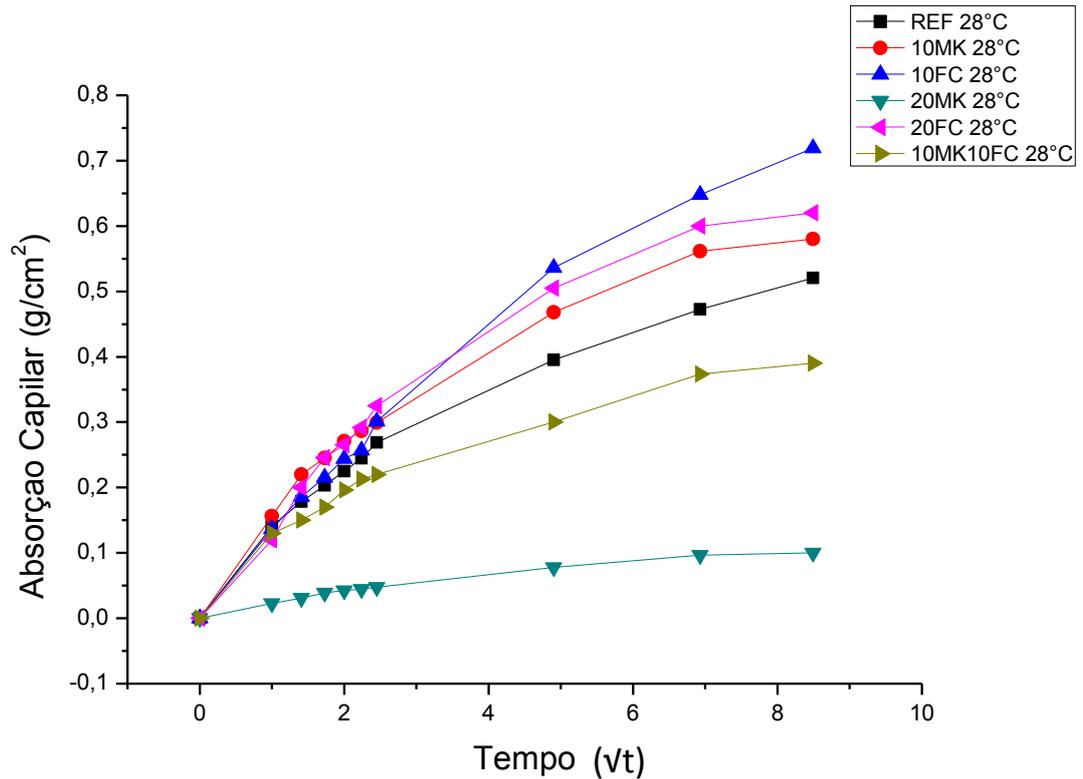


Figura 4.31 - Absorção por capilaridade dos CAA sob cura ambiente a 28°C

Na Figura 4.32 são apresentados os resultados de absorção capilar dos CAA quando sob cura térmica a 50°C por 28 dias. Aos 50°C verifica-se uma menor absorção capilar no CAA contendo 10% de metacaulim. Observa-se também um crescimento acentuado na absorção capilar do CAA de referência curado a 50°C, quando comparado com sua absorção sob cura ambiente a 28°C.

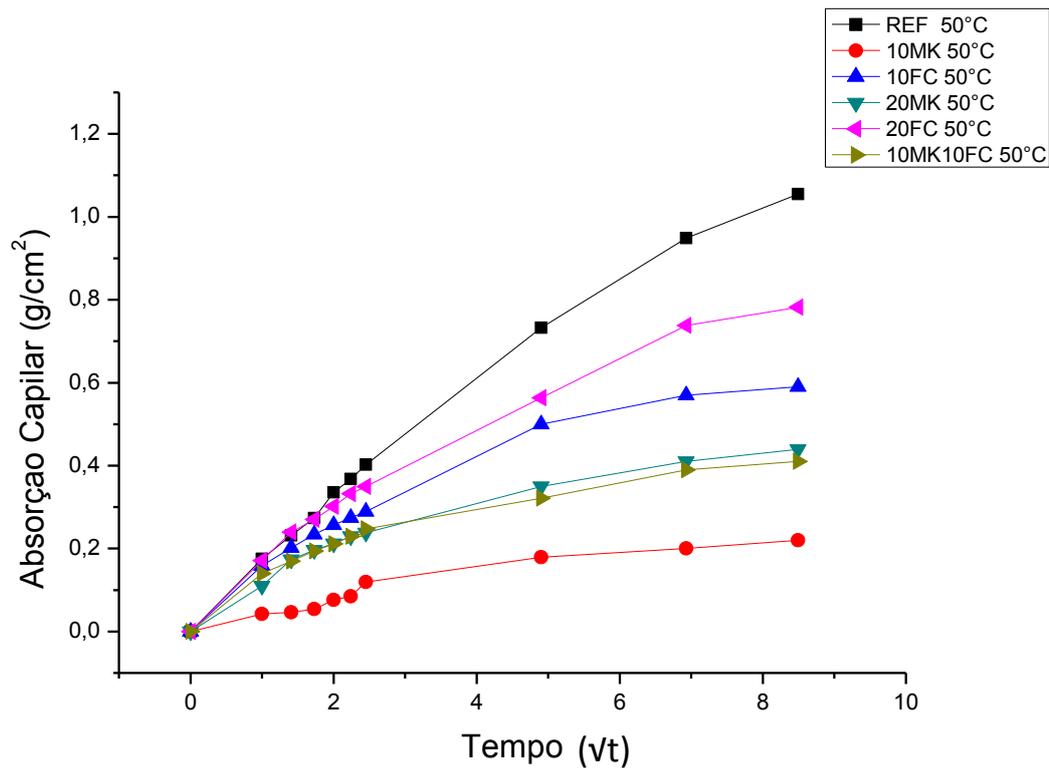


Figura 4.32 - Absorção por capilaridade dos CAA de cura a 50°C

Na Figura 4.33 são apresentados os resultados de absorção capilar dos CAA quando sob cura térmica a 60°C por 28 dias. Aos 60°C verifica-se novamente uma menor absorção capilar no CAA contendo 10% de metacaulim, com o CAA contendo 10% de metacaulim e 10% de fíler com valores equivalentes. Observa-se que a tendência de crescimento acentuado na absorção capilar do CAA de referência quando comparado com sua absorção sob cura ambiente a 28°C se manteve.

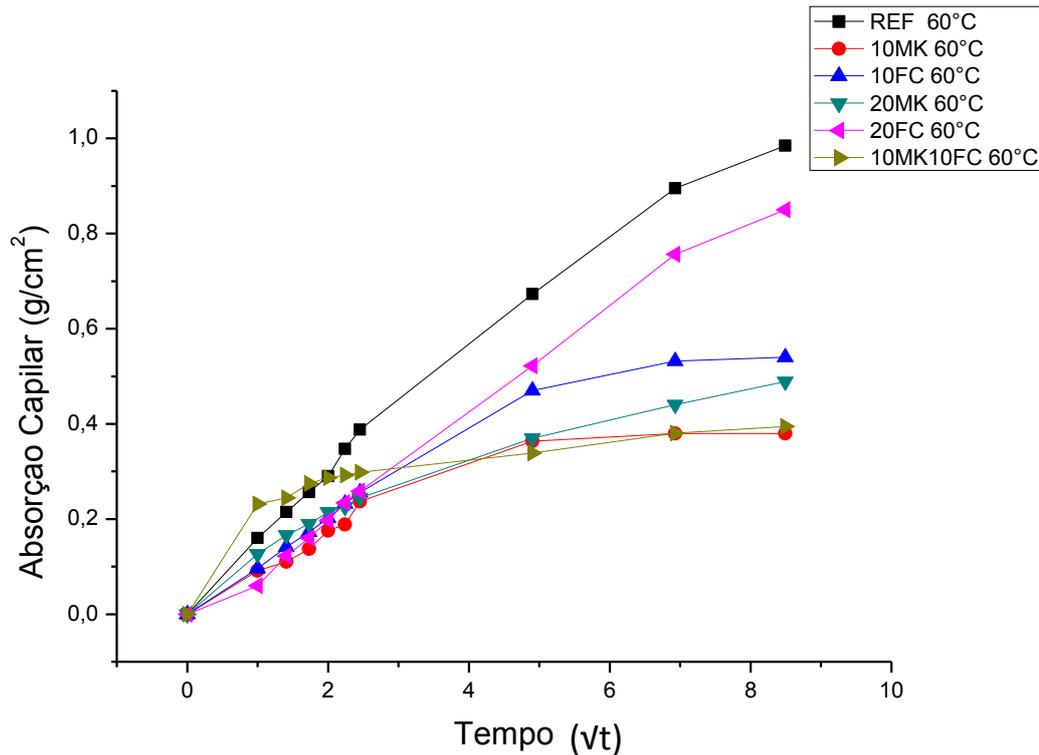


Figura 4.33 - Absorção por capilaridade dos CAA de cura a 60°C

Na Figura 4.34 são apresentados os resultados de absorção capilar dos CAA quando sob cura térmica a 70°C por 28 dias. Aos 70°C verifica-se uma menor absorção capilar para o CAA contendo 10% de filer calcário e a maior absorção para o CAA contendo 20% dessa mesma adição.

Para os CAA submetidos aos tratamento térmicos, os menores valores de absorção capilar foram obtidos para os curados à temperatura de 70°C. Esse resultado corrobora os obtidos por Ramezaniyanpour *et al* (2013). Para os autores, a absorção capilar tende a diminuir com o aumento da temperatura do ciclo de cura.

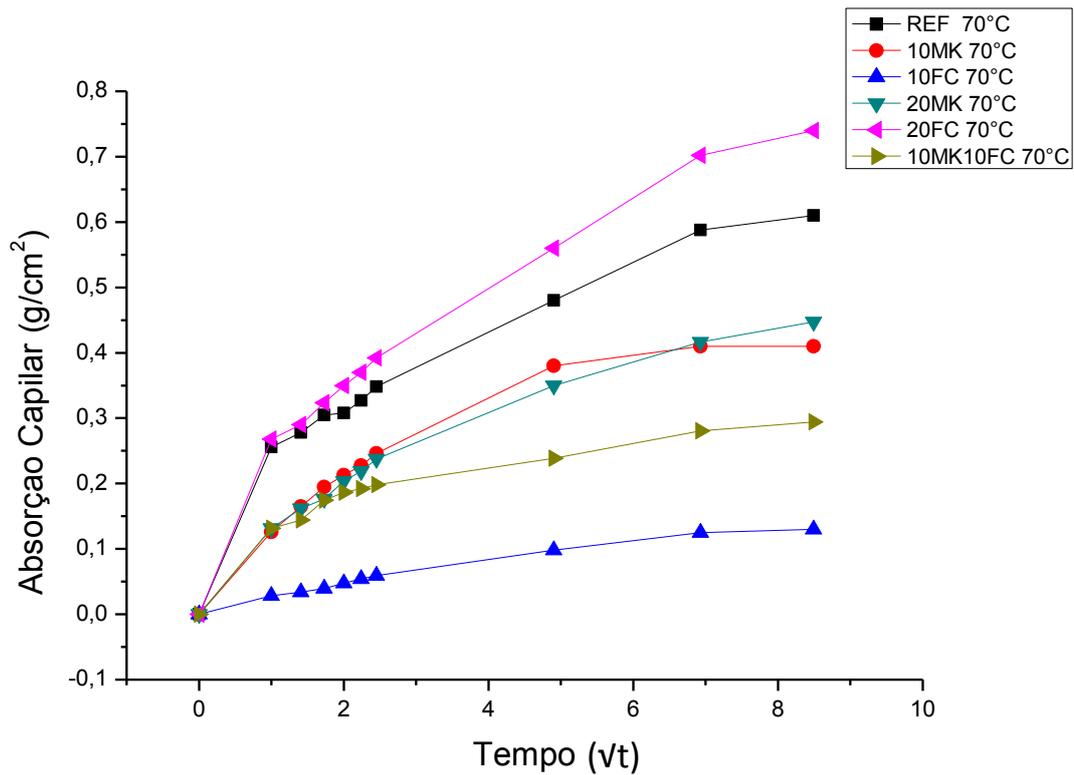


Figura 4.34 - Absorção por capilaridade dos CAA de cura a 70°C

4.3 Análise da microestrutura

Para a análise da microestrutura, as pastas (finos+água) foram moldadas e curadas nas mesmas condições dos CAA em estudo, foram realizados os ensaios de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e difração de raio X (DRX).

As imagens obtidas por MEV apresentadas tem ampliação de 3000x e são as obtidas a 1 dia de idade, nas temperaturas de 28 °C e 70° C. Utiliza-se 28 e 70 °C por serem as temperaturas limites utilizadas durante a cura. Os CAA com microestrutura analisada, tanto por MEV como por DRX, serão os traços de referência e os traços com maiores substituições: 20MK, 20FC e 10MK10FC. Os resultados das análises de DRX apresentadas foram os obtidos a 1 e 28 dias de idade.

Nas análises de DRX são utilizadas siglas para designar os diversos compostos existentes. No Quadro 4.2 são apresentados as siglas dos compostos com indicação de seus nomes e suas respectivas fórmulas químicas.

Quadro 4.2 – Siglas utilizadas nas análises de DRX

Sigla	Nome	Fórmula química
P	Portlandita	$\text{Ca}(\text{OH})_2$
L	Larnite	Ca_2SiO_4
E	Etringita	$\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$
CSH	Silicato de Cálcio Hidratado	$\text{Ca}_{1.5}\text{SiO}_{3.5} \cdot x\text{H}_2\text{O}$
CAOCH	Calcium Aluminum Oxide Carbonate Hydrate	$\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{CO}_9 \cdot 11\text{H}_2\text{O}$
CAOHH	Calcium Aluminum Oxide Carbonate Hydroxide Hydrate	$\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{O}_6(\text{CO}_3)_{0.5}(\text{OH}) \cdot 11.5\text{H}_2\text{O}$
GIP	Gipsita	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
AO	Aluminum Oxide	Al_2O_3
GIS	Gismondine	$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
CASH	Calcium Aluminum Silicate Hydrate	$\text{CaAl}_2\text{Si}_7\text{O}_{18} \cdot 1.7\text{H}_2\text{O}$
CMAOS	Calcium Magnesium Aluminum Oxide Silicate	$\text{Ca}_5\text{MgAl}_2\text{Si}_{16}\text{O}_{90}$
CASH	Calcium Aluminum Sulfate Hydrate	$\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{O}_6(\text{SO}_4) \cdot 14\text{H}_2\text{O}$
CAOH	Calcium Aluminum Oxide Hydrate	$\text{CaAl}_2\text{O}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$
CAOHH	Calcium Aluminum Oxide Hydroxide Hydrate	$\text{Ca}_2\text{Al}(\text{OH})_7 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$

4.3.1 CAA de referência

Na Figura 4.35 são apresentadas as imagens de ampliação dos CAA de referência a 1 dia de idade, curado à temperatura ambiente de 28 °C e térmica a 70 °C. Verifica-se que a morfologia do CAA curado a 28 °C, Figura 4.35 A, quando comparado ao CAA curado a 70 °C, Figura 4.35 B, apresenta-se mais porosa, com aparente menor formação de produtos hidratados e maior deposição de cristais de etringita. O CAA curado a 70 °C, entretanto, apresenta-se mais compacto e coeso, apresentando uma menor quantidade de etringita formada.

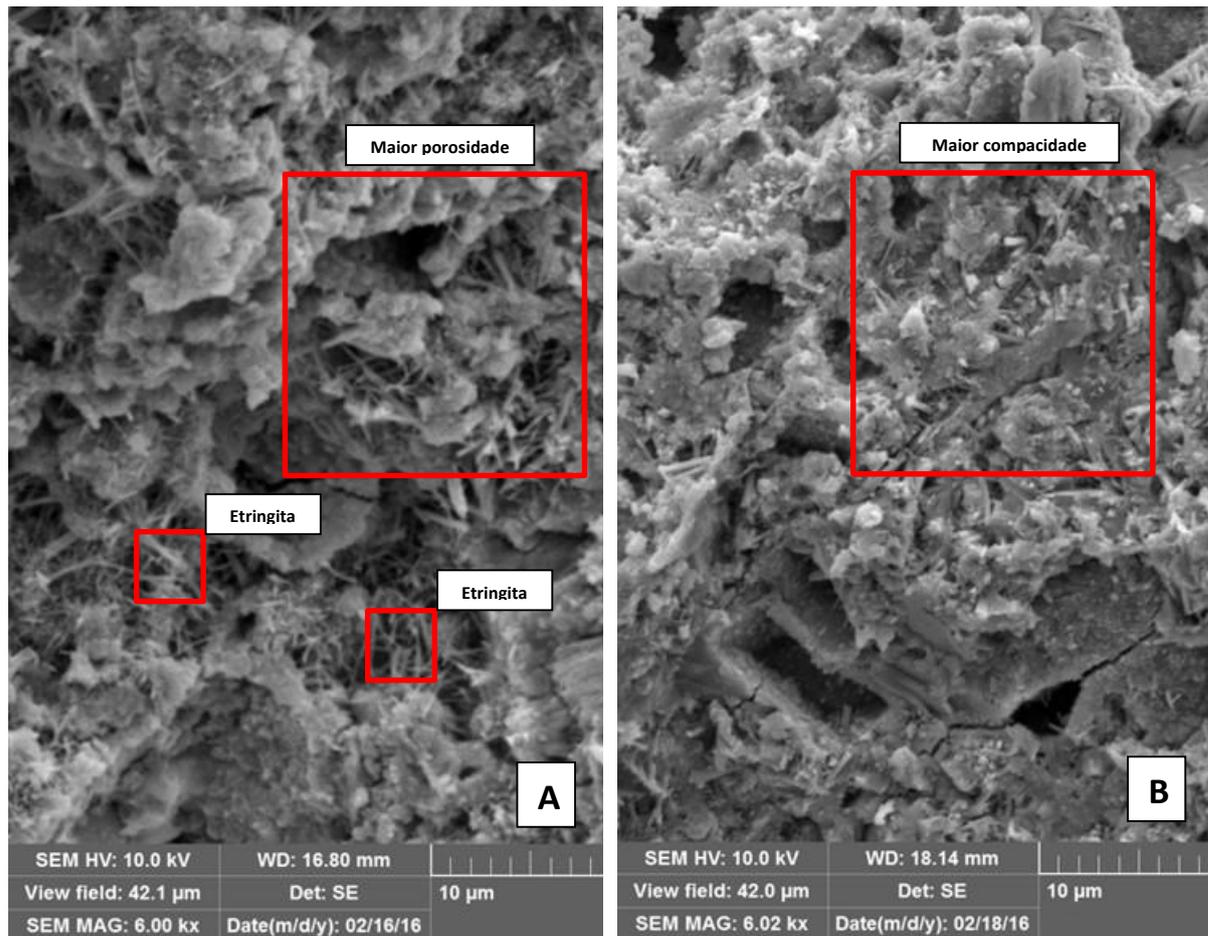


Figura 4.35 – MEV do CAA de referência a 1 dia de idade. A – temperatura 28°C, B – temperatura de 70°C

Na Figura 4.36 e 4.37 são apresenta as análises de DRX dos CAA de referência a 1 e 28 dias de idade. Verifica-se a 1 dia de idade, que para o CAA curado a temperatura de 28 °C não foi detectada a presença de silicato de cálcio hidratado (CSH), composto que foi detectado em todos os CAA curados termicamente. O CSH é um dos principais compostos responsáveis por elevar a resistência mecânica de concretos e argamassas. Isso explica a resistência à compressão a 1 dia de idade do CAA curado a 28°C ter sido inferior aos CAA curados termicamente.

Observa-se que aos 28 dias de idade não existe grandes variações entre o CAA curado à temperatura ambiente e os CAA curados termicamente. Não existe grandes distinções entre os compostos formados.

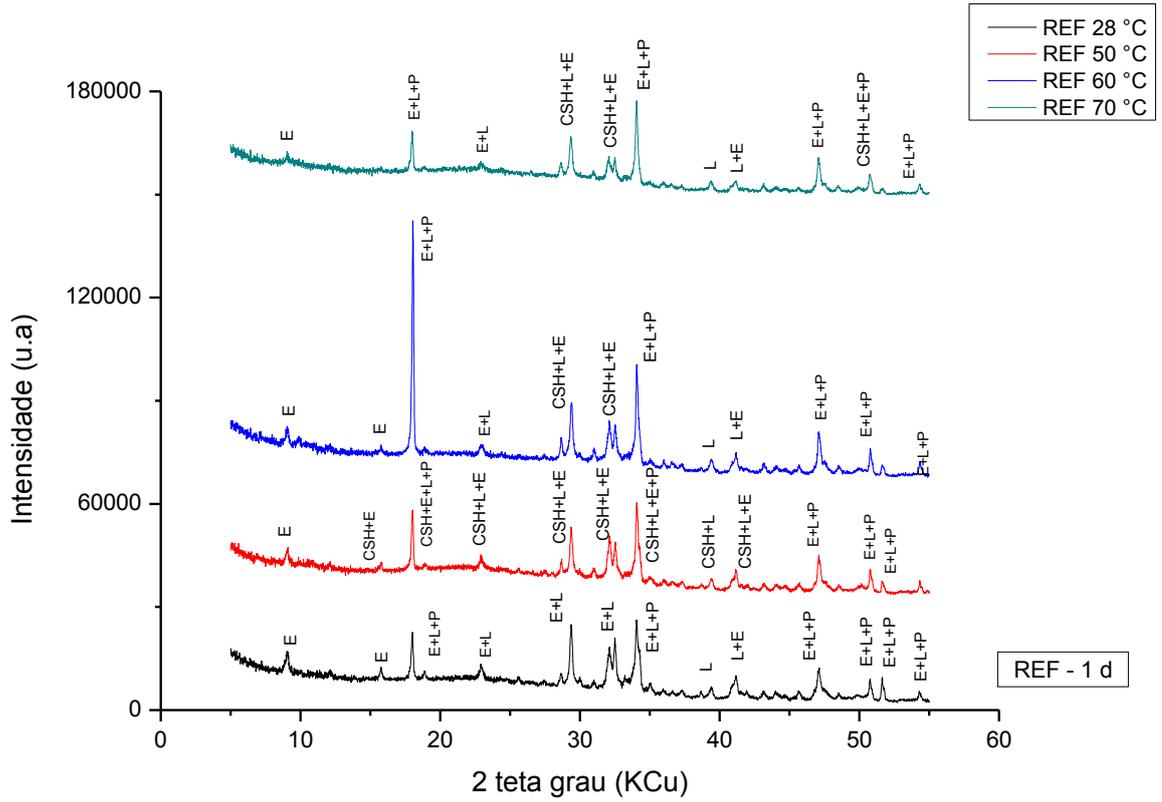


Figura 4.36 – DRX do CAA de referência a 1 dia de idade

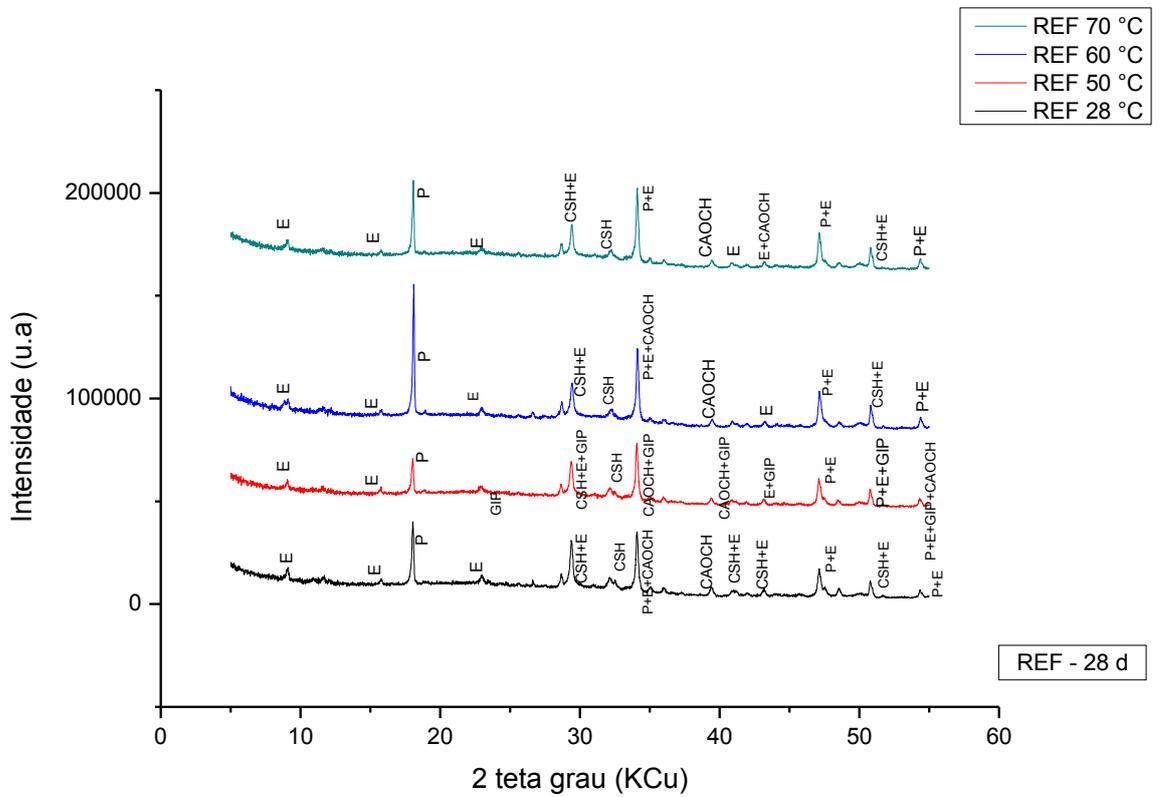


Figura 4.37 – DRX do CAA de referência a 28 dias de idade

4.3.2 CAA 20 MK

Na Figura 38 são apresentadas as imagens de ampliação dos CAA contendo 20% de metacaulim em substituição ao Cimento Portland a 1 dia de idade, curado à temperatura ambiente de 28 °C e termicamente a 70 °C. Verifica-se que o CAA curado a 28 °C, Figura 38 A, quando comparado ao CAA curado a 70 °C, Figura 38 B, apresenta maior deposição de etringita e maior porosidade. O CAA curado a 70°C, apresenta maior formação de CSH ainda nas primeiras horas (24 h), o que corrobora o citado por Ramezani pour *et al* (2014), a respeito da rápida formação de CSH nos CAA submetidos a cura térmica.

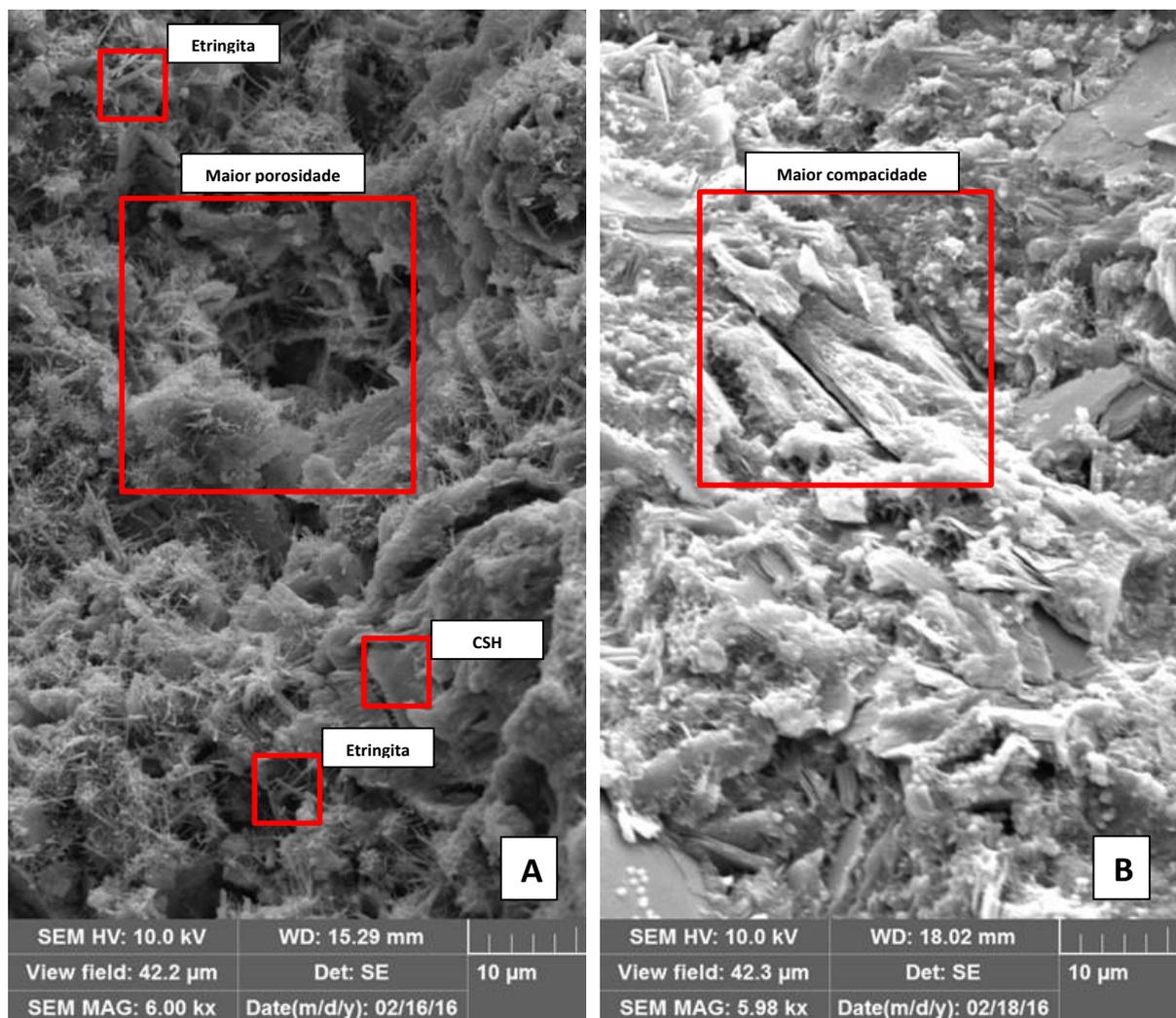


Figura 4.38 – MEV do CAA com 20% de metacaulim a 1 dia de idade. A – temperatura 28°C, B – temperatura de 70°C

Na Figura 4.39 e 4.40 são apresentadas as análises de DRX dos CAA de referência a 1 e 28 dias de idade. Verifica-se que a 1 dia de idade todos os concretos sob cura térmica apresentaram formação de CSH. Os concretos curados à temperatura ambiente não apresentaram.

Aos 28 dias de idade os compostos formados variaram para cada temperatura analisada.

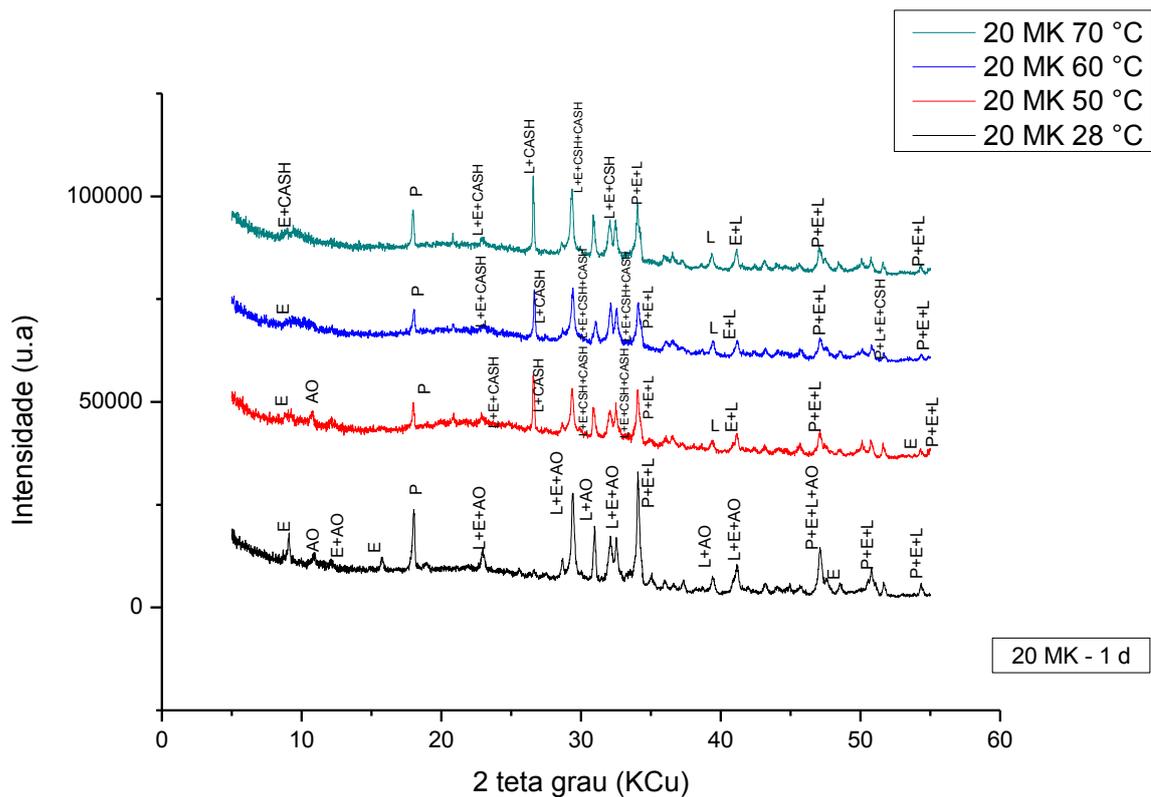


Figura 4.39 – DRX do CAA com 20% de metacaulim a 1 dia de idade

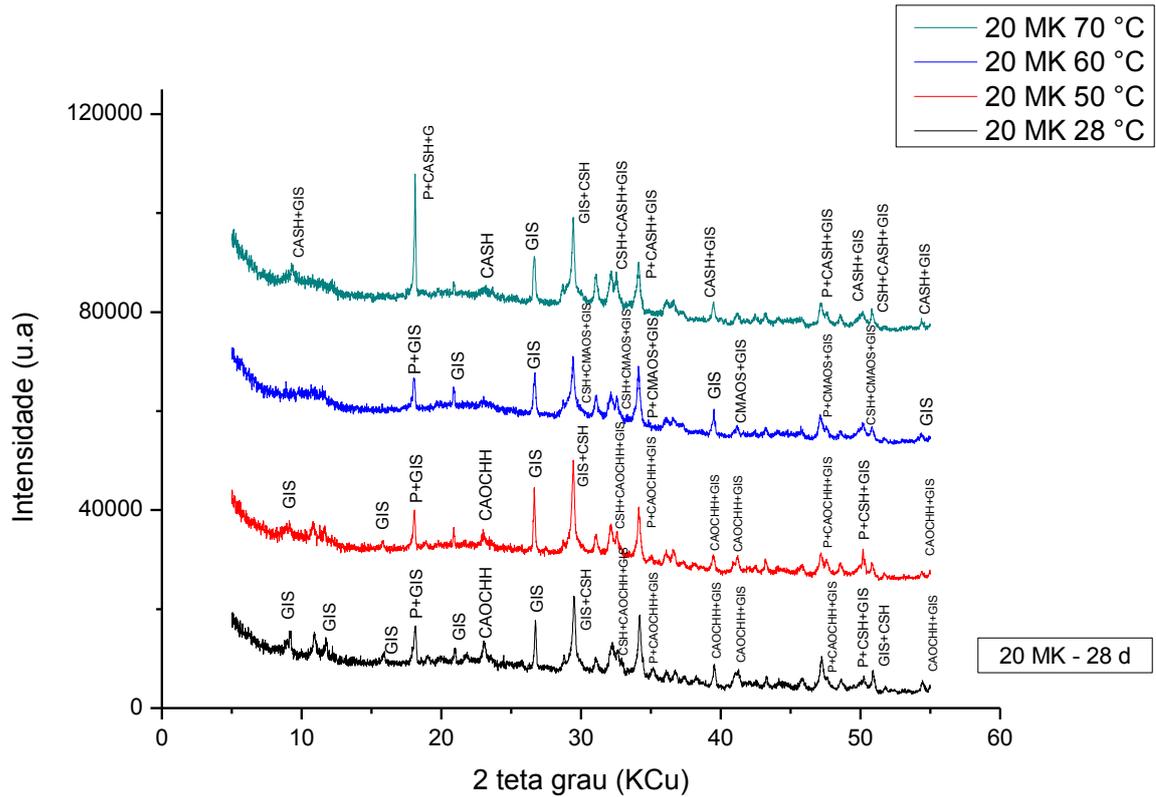


Figura 4.40 – DRX do CAA com 20% de metacaulim a 28 dias de idade

4.3.3 CAA 20 FC

A Figura 4.41 apresenta as imagens de ampliação dos CAA contendo 20% de fíler calcário em substituição ao Cimento Portland a 1 dia de idade, curado a temperatura ambiente de 28 °C e termicamente a 70 °C. Verifica-se que o CAA curado a 28 °C, Figura 4.41 A, quando comparado ao CAA curado a 70 °C, Figura 4.41 B, apresenta maior deposição de etringita e maior porosidade.

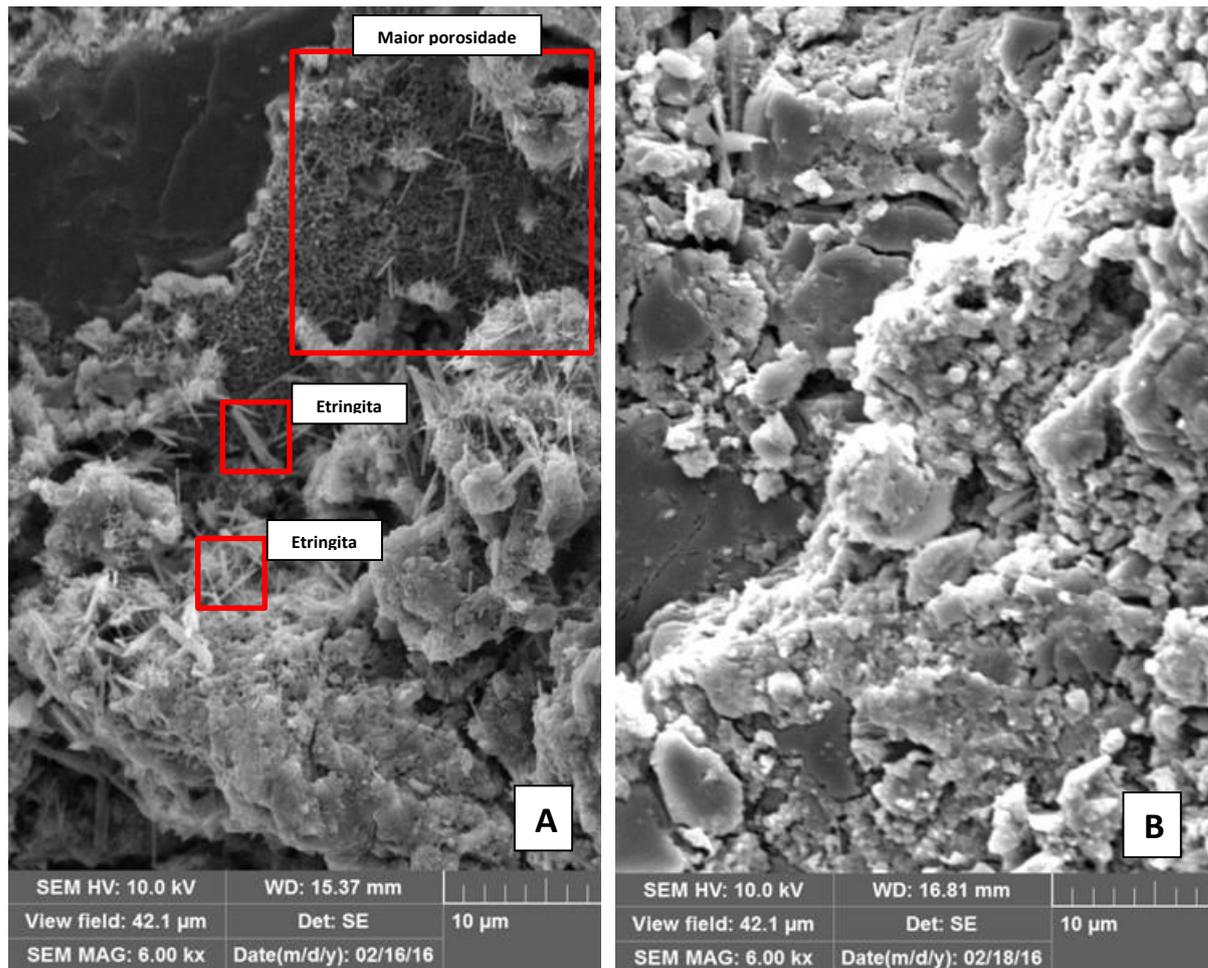


Figura 4.41 – MEV do CAA com 20% de filler calcário a 1 dia de idade. A – temperatura 28°C, B – temperatura de 70°C

A Figura 4.42 e 4.43 apresenta as análises de DRX dos CAA de referência a 1 e 28 dias de idade. Verifica-se que a 1 dia de idade, todos os CAA (com cura térmica ou ambiente) tiveram a formação de CSH ainda nas primeiras idades. Esse resultado justifica a resistência à compressão a 1 dia de idade, praticamente equivalente entre os CAA curados à temperatura ambiente e os tratados termicamente.

Aos 28 dias de idade não ocorreram grandes alterações entre os compostos formados para cada temperatura analisada.

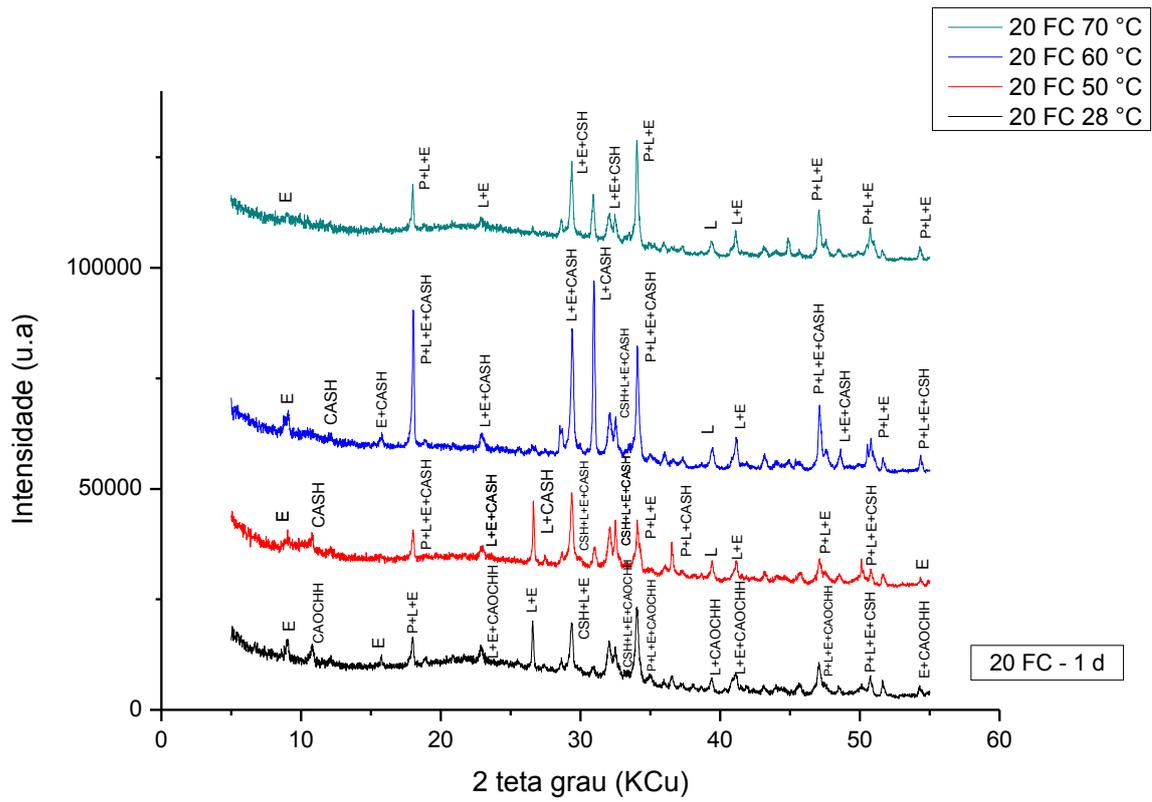


Figura 4.42 – DRX do CAA com 20% de filer calcário a 1 dia de idade

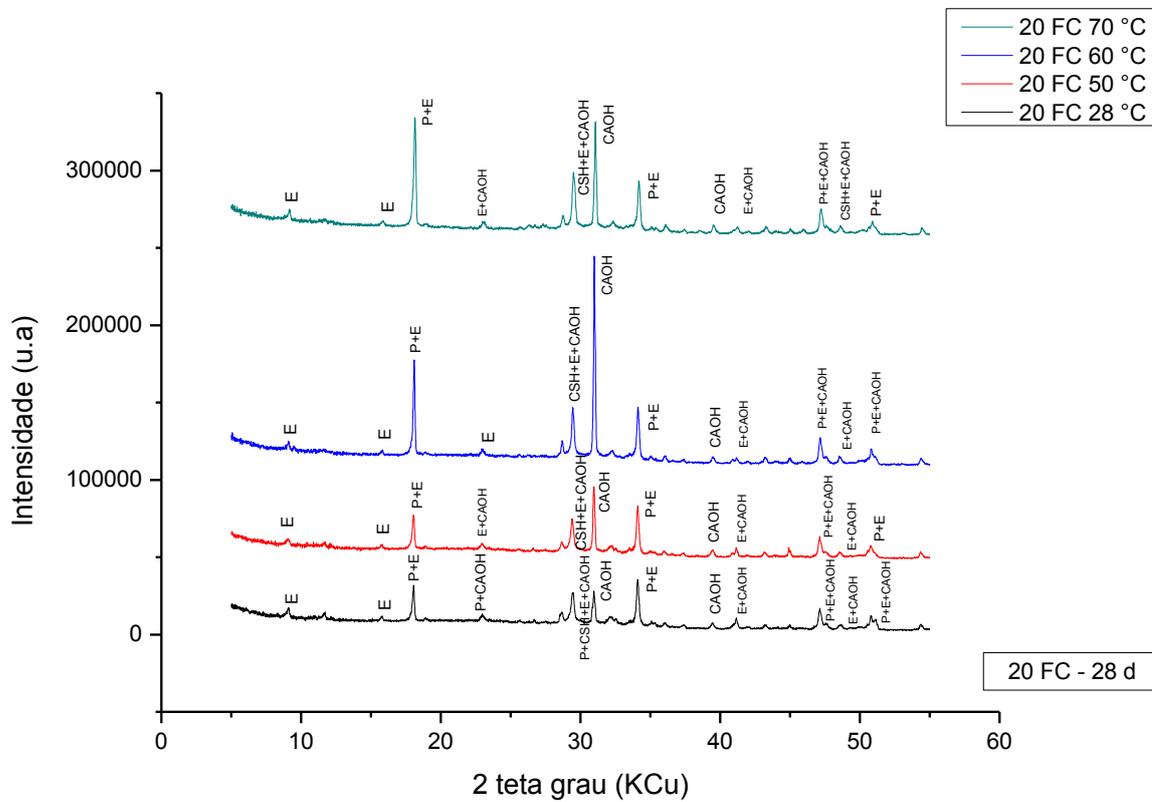


Figura 4.43 – DRX do CAA com 20% de filer calcário a 28 dias de idade

4.3.4 CAA 10MK10FC

Na Figura 4.44 são apresentadas as imagens de ampliação dos CAA contendo 10% de metacaulim e 10% de filer calcário em substituição ao Cimento Portland a 1 dia de idade, curado a temperatura ambiente de 28 °C e termicamente a 70 °C. Verifica-se que o CAA curado a 28 °C, Figura 4.44 A, quando comparado ao CAA curado a 70 °C, Figura 4.44 B, mais uma vez apresenta uma maior formação de etringita.

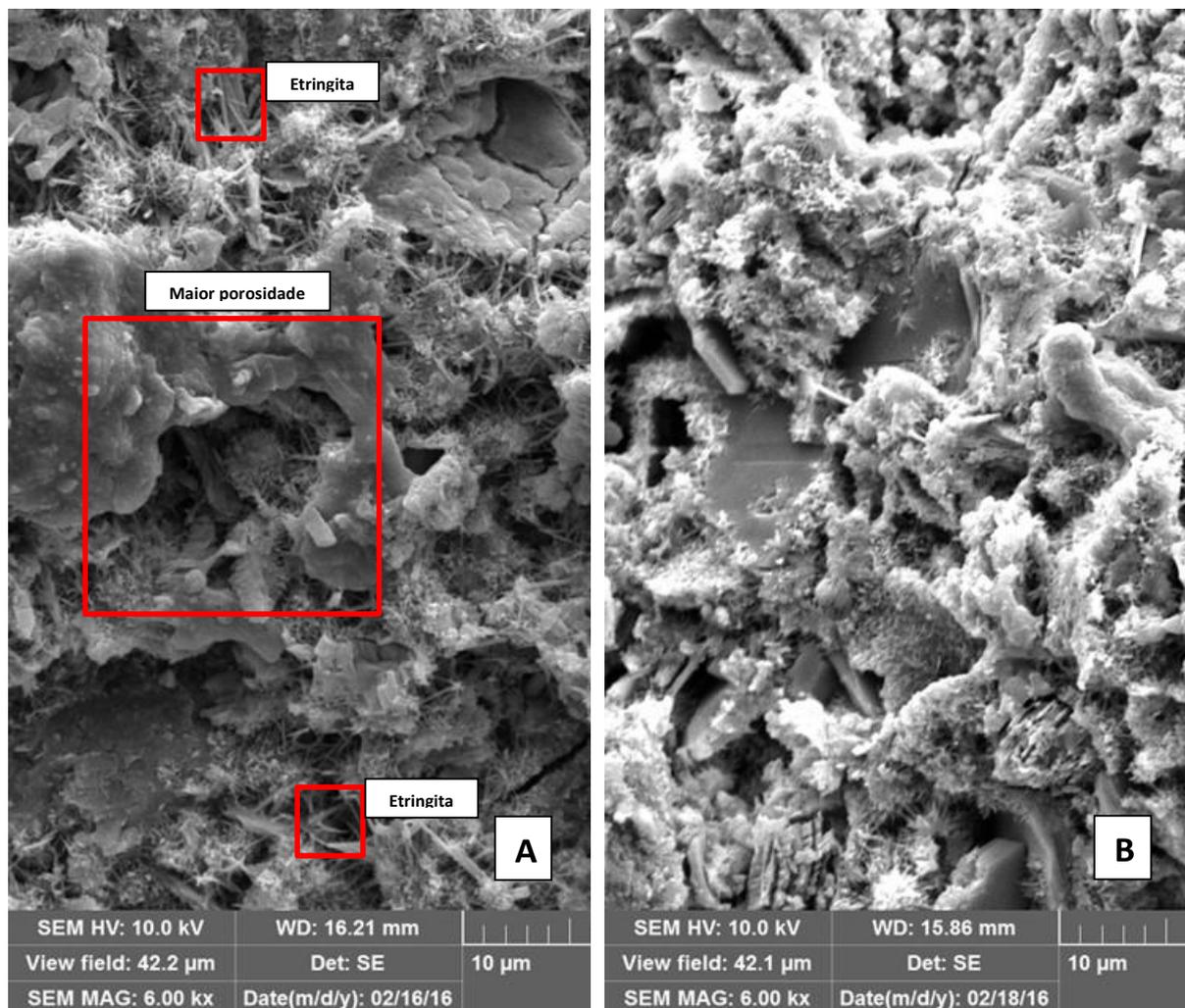


Figura 4.44 – MEV do CAA com 10% de metacaulim e 10% de filer calcário a 1 dia de idade. A – temperatura 28°C, B – temperatura de 70°C

Na Figura 4.45 e 4.46 são apresentadas as análises de DRX dos CAA de referência a 1 e 28 dias de idade. Verifica-se que a 1 dia de idade, todos os CAA (com

cura térmica ou ambiente) tiverem a formação de CSH ainda nas primeiras idades, entretanto esse resultado não foi acompanhado por uma equivalência na resistência à compressão dos CAA sob cura ambiente, quando comparado aos CAA curados termicamente.

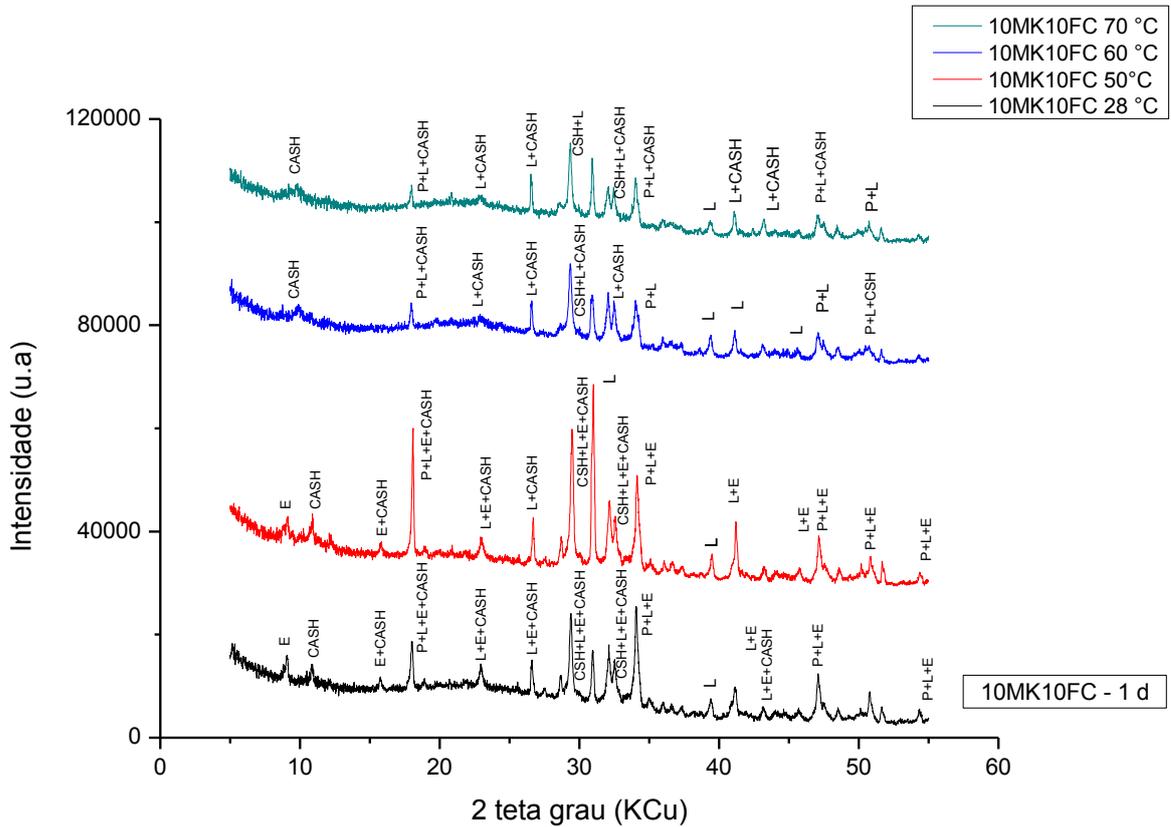


Figura 4.45 – DRX do CAA com 10% de metacaulim e 10% de filer calcário a 1 dia de idade

5 Conclusões

Este trabalho confirmou a necessidade de se estudar de maneira mais profunda e detalhada o comportamento do CAA quando submetido a tratamento térmico. As características apresentadas por esses concretos são resultado de um conjunto de variáveis: materiais, dosagem, condições de preparo etc, além das características do ciclo térmico utilizado.

A partir dos resultados obtidos nesta pesquisa pode-se concluir que:

- As adições de metacaulim e filer calcário podem substituir o cimento Portland, nos percentuais de 10% e 20%, de maneira satisfatória em misturas binárias e terciárias, atendendo aos requisitos necessários à obtenção de concreto autoadensável com f_{ck} superior a 40,0 MPa;
- A cura térmica úmida por imersão propicia um aumento na resistência à compressão nas primeiras idades, exceto para os concretos contendo 20% de filer calcário em substituição ao cimento Portland;
- Aos 28 dias de idade, os CAA curados termicamente em geral não apresentaram resistências à compressão inferiores aos curados a 28 °C. Isso se deve ao tratamento térmico ter sido realizado em via úmida por imersão, tendo esse se mostrado bastante eficaz;
- Para cada traço estudado, houve um temperatura que se mostrou mais eficaz, ou seja, uma temperatura patamar mais adequada. Assim, pode-se concluir que para cada traço ou aplicação deve-se estudar o ciclo térmico mais adequado;
- Os CAA de referência e contendo 20% de filer calcário em substituição ao cimento Portland apresentaram em geral os maiores valores de absorção total, índice de vazios e absorção por capilaridade;
- Na análise da microestrutura dos CAA pode se observar que a elevada resistência obtida a 1 dia de idade, deve-se a rápida formação de CSH para os CAA tratados termicamente.

6 Sugestões para os estudos futuros

É essencial que haja continuidade desta pesquisa para se obter um maior aprofundamento do tema, buscando entender melhor o comportamento do CAA contendo adições, quando submetido a tratamento térmico. A seguir uma breve recomendação para trabalhos futuros:

- Verificar o comportamento do CAA contendo outras adições regionais como: metacaulim vermelho, cinzada casca do arroz e cinza do bagaço de cana;
- Utilizar outros métodos de cura térmica: cura térmica a vapor e cura térmica via seca;
- Utilizar diferentes ciclos de tratamento térmico com diferentes taxas de aquecimento, tempo total, pré-cura etc;
- Utilizar outros métodos de análise da microestrutura como EDS no MEV e método rietveld no DRX;
- Realização de análise por termogravimetria;
- Estudo da hidratação do CAA e microestrutura quando submetido a cura térmica;
- Influência da cura térmica na hidratação do CAA.

Referências

ALENCAR, R. S. A. Dosagem do concreto autoadensável: produção de pré-fabricados/ R.S.A. de Alencar. – São Paulo, 2008. 179p.

ASAGA, K.; ISHIZAKI, M.; TAKAHAGH, S.; KONISHI, K.; TSURUMI, T.; DAIMON, M. Effect of Curing temperature on the hydration of portland cement compounds. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER COMMUNICATION, 9, 1992. Deli. Conference... Deli: ICC, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). Agregados - Determinação da composição granulométrica. NBR NM 248:2003. Rio de Janeiro, 2015

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento. NBR 12655:2015. Rio de Janeiro, 2015

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). Agregados - Amostragem. NBR NM 26:2009. Rio de Janeiro, 2009

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

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 um, por lavagem. NBR NM 46:2003. Rio de Janeiro, 2003.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). Cimento Portland de alta resistência inicial. NBR 5733:1991. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). Cimentos Portland resistentes a sulfatos. NBR 5737:1992. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). Metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta . NBR 15894:2010. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. NBR 5739:2007. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultra-sônica. NBR 15630:2008. Rio de Janeiro, 2008.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). Argamassa e concreto endurecidos — Determinação da absorção de água por capilaridade. NBR 9779:1995. Rio de Janeiro, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. NBR 5738. Rio de Janeiro, 2015

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). Concreto Autoadensável – Parte 1: classificação, controle e aceitação no estado fresco. NBR 15823-1. Rio de Janeiro, 2010.

BA M., QIAN C, GUO X, HAN X. Effects of steam curing on strength and porous structure of concrete with low water/binder ratio. Const Build Mater 2011:25 123-28

BINGÖL A., TOHUMCU I. Effects of different curing regimes on the compressive strength properties of self-compacting concrete incorporating fly ash and silica fume. *Materials & Design* 2013:51 12-18

CAMARINI, G. Desempenho de misturas de cimento Portland comum e escória de alto forno submetidas à cura térmica. Tese de Doutorado – Escola Politécnica USP – Departamento de Construção Civil, 252p. São Paulo, 1995.

CSA (Canadian Standards Association). 2005. *Precast Concrete – Materials and Construction*. CSA A23.4. Rexburg, ON, Canada: CSA.

CASSAGNABÈRE F, MOURET M, ESCADEILLAS G. Early hydration of clinker-slag-metakaolin combination in steam curing conditions, relation with mechanical properties. *Cem Concr Res* 2009:39 1164-73.

CASSAGNABÈRE F, MOURET M, ESCADEILLAS G, BROILLIARD P. Metakaolin, a solution for the precast industry to limit the clinker content in concrete: Mechanical aspects. *Constr Build Mater* 2010:2014 1109-18.

DE LARRARD, F; SEDA, T. Mixtue-proportioning of high-performance concrete. In: *Cement and Concrete Research*, V.32, n.11, Nov. 2002.

Derabla R, Benmalek M L. Characterization of heat-treated self-compacting concrete containing mineral admixture at early age and in the long term. *Const Build Mater* 2014:66 787-794.

EFNARC. *The European Guidelines for Self-Compacting Concrete* (2005).

EL DEBS, M. K. Concreto pré-moldado: fundamentos e aplicações. São Carlos: EESC- USP, 2000. 456 p.

ERDEM, T. K. Effect of delay period and maximum temperature period on compressive strength of steam cured concrete. MS thesis, METU Department of Civil Engineering Ankara, 2000.

ERDEM, T. K; TURANLI, L; ERDOGAN, T. Y. Setting time: an important criterion to determine the length of the delay period before steam curing of concrete. Cement and Concrete Research, Elmsford, v.33, p. 741-745, 2003.

FELEKOGLU B. Utilisation of high volumes of limestone quarry wastes in concrete industry (self-compacting concrete case). Resources conservation & Recycling 2007:51 770-91.

GALLUCI E, ZHANG X, SRIVENER K L. Effect of temperature on the microstructure of calcium silicate hydrate (C-S-H). Cement and Concrete Research 2013:53 185-195.

GESOGOLU M, GÜNEYISI E, ÖZBAY E. Properties of self-compacting concretes made with binary, ternary, and quaternary cementitious blends of fly ash, blast furnace slag, and silica fume. Constr Build Mater 2009; 23:1847-54

GARTNER E. Industrially interesting approaches to low CO₂ cement. Cem Concr Res 2004; 34:1489-98.

GOMES, P. C. C. Optimization and characterization of high-strength self-compacting concrete. 2002. 139 p. Tese – Escola Tècnica Superior D'Enginyers de Camins, Universitat Politècnica de Catalunya, Catalunya, 2002.

HALIT YAZICI. The effects of curing conditions on compressive strength of ultra high strength concrete with high volume mineral admixtures. *Build Environ* 2007; 42(5):2083-9.

HO D W S, CHUA CW, TAM CT. Steam-cured concrete incorporating mineral admixtures. *Cem Concr Res* 2003;33(4):595-601.

HWANG S D, KHATIB R, LEE H K, KHAYAT K. Optimization of steam-curing regime for high strength, self-consolidation concrete for precast, prestressed concrete applications. *PCI J* 2012;57:48-61.

HWANG S D, KHATIB R, LEE H K, LEE S H, KHAYAT K H. Optimization of steam-curing regime for high-strength, self-compacting concrete for precast, prestressed concrete applications. *Precast Concrete Institute (PCI) Journal*, summer 2012.

KHAYAT, K. H.; HU, C.; MONTY, H. Stability of self-compacting concrete, advantages, and potential applications. Edição: A. Skarendahl; O. Petersson. In: *International Rilem Symposium on self-compacting*, 2009.

KIM H S, LEE S H, MOON H Y. Strength properties and durability aspects of high strength concrete using Korean metakaolin. *Constr Build Mater* 2007;21:1229-37.

MADANDOUST R, MOUSAVI S Y. Fresh and Hardened properties of self-compacting concrete containing metakaolin. *Const Build Mater* 2012: 35 752:760

MALTAIS Y, MARCHAND J. Influence of curing temperature on cement hydration and mechanical strength development of fly ash mortars. *Cem Concr Res* 1997;27(7):1009-20.

MEHTA P K, MONTEIRO P J M. *Concreto – Micro estrutura, propriedades e materiais*, 2º ed IBRACON, São Paulo 2014, p. 520-524.

MELO, A. B. Influência da cura térmica (vapor) sob pressão atmosférica no desenvolvimento da microestrutura dos concretos de cimento Portland. 2000. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

NEVIILE, A. M. *Propriedades do concreto*. São Paulo, PINI, 23p., 1997.

NÍELSSON, I.; WALLEVIK, O. H. Rheologica evaluation of some empirical test methods – Preliminary results. Edição: O. Wallevik; I. Nielsson. In: INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON SELF-COMPACTING CONCRETE, 3^{rd.}, 2003, Reykjavik. Proceedings... France: RILEM Publications, 2003. P. 59-68

OKAMURA, H. Self-compacting Hig-perfomance concrete. In: *Concrete International*, v.19, n.7, p. 50-54, Julho 1997.

PCA (Portland Cement Association). 2006. *Design and Control of Concrete Mixtures*. Skokie, IL: PCA;

PERES, L. D. P. Avaliação de propriedades mecânicas de peças pré-moldadas submetidas à cura térmica pelo método da maturidade: Estudo de caso . 2006. 165 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2006.

PERLOT C, ROUGEAU P, DEHAUDT S. Slurry of metakaolin combined with limestone addition of self-compacted concrete. Application for precast industry. Cement & Concret composites 2013;44 50-57

POON C. S, KOU S. C, LAM L. Compressive strength, chloride diffusivity and poro structure of high performance metakaolin and silica fume concrete. Constr Build Mater 2006;20:858-65

POON C. S, LAM L, KOU S. C, WONG Y. L, WONG R. Rate of pozzolanic reaction of metakaolin in high-performance cement pastes. Cem Concr Res 2001;31:1301-6.

RAMEZANIANPOUR A A, KHAZALI M. H, VOSOUGHI P. Effect of steam curing cycles on strength and durability of SCC: A case study in precast concrete. Const Build Mater 2013;49 807-13.

RAMEZANIANPOUR A. M, ESMAEILI K, GHAHARI S. A. Influence of initial steam curing and different types of mineral additives on mechanical and durability properties of self-compacting concrete. Const Build Mater 2014;73 187-194.

REINHARDT H. W., STEGMAIER M. Influence of Heat Curing on the pore structure and compressive strength of self-compacting concrete (SCC). *Cement Concr Res* 2006;36:879-85.

SABIR BB, WILD S, KHATIB J. M. On the workability and strength development of metakaolin concrete. In: Dhir R. K, Dyer T. D, editors. *Concrete for environmental enhancement and protection*. London (UK): E&FN Spon; 1996. p. 651-6.

SANTOS, L. F. dos. A influência do patamar de cura térmica sobre a resistência dos concretos auto-adensáveis elaborados com diferentes tipos de cimento: avaliação pelo método da maturidade – Ilha Solteira: [s.n], 2010, 280p: il.

SFIKAS I. P, BADOGIANNIS E. G, TREZOS K. G. Rheology and mechanical characteristics of self-compacting concrete mixtures containing metakaolin. *Const Build Mater* 2014;64 121-129.

SHEINN, D.; H. O, D. W. S.; TAM, C. T. Effect of particle shape on paste rheology of SCC. Edição: O. Wallevik; I. Nielsson. In: *INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON SELF COMPACTING CONCRETE*, 3 rd., 2003, Reykjavik. *Proceedings...* France: RILEM Publications, 2003. P. 232-239.

SHEKARCHI M, BONAKDAR A, BAKHSHI M, MIRDAMADI A, MOBASHER B. Transport properties in metakaolin blended concrete. *Constr Build Mater* 2010;24:2217-23.

SIEDEL, H., S. HEMPEL, AND R. HEMPEL. 1993. Secondary Ettringite Formation in Heat Treated Portland Cement, Tokyo, 1968, pp. 1-32.

SIDDIQUE R. Properties of self-compacting concrete containing class F fly ash. *Mater Des* 2011;32:1501-7.

SOROKA, I.; JAEGERMANN, C.H.; BENTUR, A. Short-term steam curing and concrete later-age strength. *Materials Construction*, Springer Netherlands, V. 11, p. 93-96, 1978.

SUGAMATA, T.; EDAMATSU, Y.; OUCHI, M. A study of particle dispersing retention effect of polycarboxylate-based superplasticizers. Edição O. Wallevik; I. Nielsson. In: *INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON SELF-COMPACTING CONCRETE*, 3rd., 2003, Reykjavik. *Proceedings...*France: RILEM Publications, 2003. p. 420-431.

TUTIKIAN B. F, MOLIN D. C. D. *Concreto auto-densável*. São Paulo: Pini, 2008, 28-33p.

TÜRKEK S, ALABAS V. The effect of excessive steam curing on Portland Composite cement concrete. *Cem Concr Res* 2005;35:405-11.

VERBECK G. J, HELMUTH R. H. Structures and physical properties of cement pastes. In: *Proceedings of the 5th international symposium on the chemistry of cement*, Tokyo, Japan; 1968, p. 1-32.

VODÄK, F., TRTIK, K.; KAPICHOVA, O.; HOSHOVA, S.; DEMO, P. The effect of temperature on strength – porosity relationship for concrete. *Construction and Building Materials*, Guildford, v. 18, p.529-534, 2004.

YANG QB, YANG QR, ZHU PR. Scaling and corrosion resistance of steam-cured concrete. *Cem Concr Res* 2003;33(7):1057-61.

ZHANG MH, MALHOTRA VM. Characteristics of a thermally activated aluminosilicate pozzolanic material and its use in concrete. *Cem Concr Res* 1995;25:1713-25.