

INÁCIO SANTIAGO DE OLIVEIRA QUEIROZ

**DESENVOLVIMENTO DE CONCRETOS DE
ULTRA-ALTA RESISTÊNCIA COM USO DE
MATERIAIS DISPONÍVEIS NA REGIÃO DO
NORTE DE MINAS GERAIS**

Dissertação de Mestrado

Departamento de Engenharia Civil

Belo Horizonte, julho de 2018

INÁCIO SANTIAGO DE OLIVEIRA QUEIROZ

**DESENVOLVIMENTO DE CONCRETOS DE ULTRA-ALTA RESISTÊNCIA COM
USO DE MATERIAIS DISPONÍVEIS NA REGIÃO DO NORTE DE MINAS GERAIS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Péter Ludvig

BELO HORIZONTE

2018

Q3d Queiroz, Inácio Santiago de Oliveira
Desenvolvimento de concretos de ultra-alta resistência com uso
de materiais disponíveis na região do Norte de Minas Gerais. / Inácio
Santiago de Oliveira Queiroz. – – Belo Horizonte, 2018.
70 f. : il.

Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação
Tecnológica de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil. 2018.

Orientador: Prof. Dr. Péter Ludvig

Bibliografia

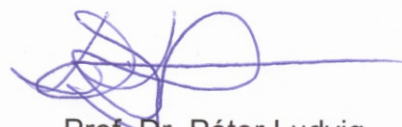
1. Concreto de Alta Resistência. 2. Cimento. 3. Materiais
Compósitos. I. Ludvig, Péter. II. Centro Federal de Educação
Tecnológica de Minas Gerais. III. Título

CDD 691.3

INÁCIO SANTIAGO DE OLIVEIRA QUEIROZ

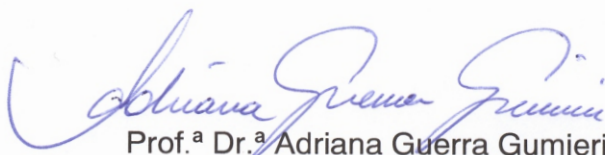
**DESENVOLVIMENTO DE CONCRETOS DE ULTRA-ALTA
RESISTÊNCIA COM USO DE MATERIAIS DISPONÍVEIS NA
REGIÃO DO NORTE DE MINAS GERAIS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.



Prof. Dr. Péter Ludvig
Orientador

Departamento de Engenharia Civil, CEFET-MG



Prof.ª Dr.ª Adriana Guerra Gumieri
Examinadora Externa

Departamento de Engenharia de Materiais e Construção, UFMG



Prof. Dr. Conrado de Souza Rodrigues
Examinador
Departamento de Engenharia Civil, CEFET-MG

Belo Horizonte, 09 de julho de 2018

À Deus, à minha família e aos meus verdadeiros amigos, que
sempre apoiaram meus esforços e me deram forças.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus pela força, saúde e energia, pois foram cruciais nesta caminhada. Agradeço aos meus familiares que me incentivaram. Digo muito obrigado à Larissa e sua família, pelo apoio. Aos amigos, principalmente Ricardo, que sempre esteve disponível a auxiliar. Aos meus alunos, Maria Joaquina, Samara e Thyago, que estiveram sempre presentes, aprendendo e auxiliando. Aos colegas de trabalho, principalmente à professora Rose pela revisão e aos colegas de Escritório Modelo que estiveram dispostos para me substituir. Ao coordenador do curso de Engenharia Civil da FAVAG, Joaquim, que me apoiou durante o período de estudos e viagens. A FAVAG por apoiar e permitir a utilização das instalações dos laboratórios.

Aos professores e funcionários do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do CEFET-MG, principalmente meu orientador Prof. Péter, deixo meu agradecimento sincero, pela parceria, que incentivou e auxiliou durante este trabalho, compreendendo a distância do local onde trabalho e incentivando nas proposições de soluções para a pesquisa. Estendo também à professora Joana D'arc, da PUC Minas, que apoiou e incentivou continuar os estudos.

Aos técnicos e estagiários dos laboratórios do CEFET-MG, principalmente o Ivan, deixo meu obrigado pelo auxílio e acompanhamento nos ensaios com a prensa mecânica. Agradeço, em geral, ao CEFET-MG, pela infraestrutura disponibilizada. Ao Beto da FIP-MOC, pelo auxílio nos procedimentos preliminares. Aos técnicos da FAVAG que auxiliaram nas moldagens e preparação dos materiais. À Erica Gravina do SENAI-FIEMG no auxílio na determinação dos óxidos da sílica ativa.

Aos meus colegas de mestrado, principalmente Camila e Scarlet, deixo meu obrigado sincero, pela troca de experiência, informações e distrações, pois, sem essa cumplicidade, seria mais difícil. Estendo também aos alunos de graduação e iniciação científica, que se mostraram dispostos em auxiliar durante os ensaios.

Estendo este agradecimento aos “caroneiros” que me possibilitaram e contribuíram no deslocamento para Belo Horizonte - MG, com mais de 120 mil quilômetros percorridos, ou seja, mais de 3 voltas ao planeta Terra, nessas idas e vindas de Janaúba à BH.

Aos fornecedores Rima (Olhos D'água e Capitão Enéas) pelos materiais e informações cedidos, principal motivo do desenvolvimento deste trabalho, aos Cimentos Nacional e Lafarge/Holcim, por fornecer o cimento e as informações, à Erca e Gracie pelos aditivos químicos, meu obrigado.

RESUMO

O Concreto Ultra-Alta Resistência (CUAR) é classificado entre as tecnologias mais avançadas de concreto. O CUAR permite obras ousadas, com grande potencial e valor arquitetônico, proporcionando valor estético ao edifício ou obras de arte. As tecnologias de CUAR despertam o interesse da indústria de concreto pré-fabricado, como material base de métodos modernos de construção. Os custos envolvidos na fabricação deste material, em consonância com o alto consumo de cimento por m³, limitam a expansão da produção em escala. A utilização dos materiais locais, sílica ativa e pó de quartzo, subprodutos da produção de silício metálico, promove a destinação adequada dos subprodutos e reduz o custo na produção desse concreto. A performance do CUAR é influenciada fortemente pela otimização do empacotamento de partículas, ou seja, quanto melhor for este empacotamento, maior será o grau de compactação e o desempenho do concreto. Foi utilizado o método Andreassen Modificado para o empacotamento de partículas. O objetivo deste trabalho é comparar as propriedades mecânicas do CUAR, no estado fresco e endurecido, produzidos com três diferentes tipos de cimento Portland (CP II E 40, CP V e CP V RS), utilizando sílica ativa, pó de quartzo e areia natural originários da região do Norte de Minas Gerais, com diferentes tipos de cura (úmida e térmica). Foi possível alcançar resistências à compressão axial acima de 200 MPa com a cura térmica e acima de 170 MPa com a cura úmida, aos 28 dias.

Palavras-Chave: CUAR; sílica ativa, pó de quartzo; cura térmica; cura úmida.

ABSTRACT

Ultra-High Strength Concrete (UHSC) is ranked among the most advanced concrete technologies. The UHSC allows challenging works, with great potential and architectural value, providing an esthetic value to the buildings or special structures. UHSC technologies raise the interest of the prefabricated concrete industry as a basis material for modern construction methods. The costs involved in manufacturing this material, in line with the high consumption of cement per m³, limit the expansion of production at scale. The use of local materials, silica fume and quartz powder, by-products of the production of silicon metal, promotes the proper destination of by-products and reduces the cost of the production of such concretes. The performance of the UHSC is strongly influenced by the optimization of the packing of particles, that is, the better this packaging, the greater the degree of compactness and the effective performance of the concrete. The Modified Andreassen method was used for the packing of particles. The objective of this work is to compare the mechanical properties of the UHSC, in the fresh and hardened state, produced with three different types of Portland cement (CP II E 40, CP V e CP V RS), using active silica, quartz powder and natural sand from the northern region of Minas Gerais, with different types of cure (wet and thermal). It was possible to achieve compressive strength above 200 MPa with thermal cure and above 170 MPa with wet curing at 28 days.

Key-Words: UHSC, silica fume, quartz powder; thermal curing; wet curing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Obras de arte produzidas com CUAR, ponte da República, Montpellier, sul da França (a) e fachada do Banco Attijariwafa, Rabat, Marrocos (b).	13
Figura 2 – Ferramentas para reduzir a emissão de carbono na indústria cimentícia	15
Figura 3 - Micrografia eletrônica de varredura de sílica ativa (x30k)	15
Figura 4 – Distribuição geográfica das indústrias de Si Met e FeSi no Brasil (a) e em Minas Gerais (b).....	16
Figura 5 - Efeito filler da Sílica Ativa	24
Figura 6 – Microestrutura do Concreto.....	25
Figura 7 - Difrátograma de raios X da sílica ativa (a) na forma como produzida (amorfa) e (b) depois de aquecida 1100° C (cristalina).....	25
Figura 8 – Comparativo de diâmetro de partículas.....	26
Figura 9 - Micrografia em mesma escala de grãos de Cimento Portland (a) e sílica ativa (b)	26
Figura 10 - Comparação de texturas entre Concreto Convencional (CC) (a) e CUAR (b). ...	29
Figura 11 – Distribuição das partículas, Método Andreassen (a) e Andreassen Modificado (b)	31
Figura 12 - Otimização do empacotamento de partículas (a) partículas pequenas cabem no vazio deixado pelas partículas maiores. (b) as partículas maiores são empurradas por partículas menores	32
Figura 13 – Distribuição de partículas da receita Andreassen Modificado $q=0,32$ e CUAR I CP II E 40 (a), e CUAR II CP V ARI (b) e CUAR III CP V ARI RS (c).....	40
Figura 14 – Distribuição granulométrica por difração a laser em amostra	43
Figura 15 – Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) dos cimentos Portland, aumentada 270x, escala 50 μm : CP II E 40 (a), CP V ARI (b) e CP V ARI RS (c).....	44
Figura 16 - Difrátograma de raios X em amostra e parâmetros de análise.....	45
Figura 17 – Distribuição granulométrica por difração a laser em amostra	46
Figura 18 – Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), 3500x, escala 5 μm , da sílica ativa.	46
Figura 19 – Curva Granulométrica do Pó de Quartzo (< 300 μm)	48
Figura 20 – Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), 200x, escala 50 μm , do Pó de Quartzo.....	48
Figura 21 – Índice de consistência do CUAR III CP V ARI RS, sem alteração da relação a/c.	50
Figura 22 – Resistência à Compressão Axial (MPa), CUAR I CP II E 40, cura úmida e térmica.	51

Figura 23 – Resistência à Compressão Axial (MPa), CUAR II CP V ARI, cura úmida e térmica.	51
Figura 24 – Resistência à Compressão Axial (MPa), CUAR III CP V ARI RS, cura úmida e térmica.	52
Figura 25 – Resistência à Compressão Axial (MPa), cura úmida.	53
Figura 26 – Resistência à Compressão Axial (MPa), cura térmica.	53
Figura 27 – Comparação entre Resistência Média à Compressão Axial (MPa) da pasta de cimento e CUAR, em cura úmida, CUAR I CP II E 40 (a), CUAR II CP V ARI (b) e CUAR III CP V ARI RS (c)	54
Figura 28 – Comparação entre Resistência Média à Compressão Axial (MPa) da pasta de cimento e CUAR, em cura úmida (a) e térmica (b), CUAR I CP II E 40, CUAR II CP V ARI e CUAR III CP V ARI RS.	56
Figura 29 – Módulo de Elasticidade Estático (GPa), cura úmida, aos 28 dias.	59
Figura 30 – Módulo de Elasticidade Estático (GPa), cura térmica, aos 28 dias.	59
Figura 31 – Tração por Compressão Diametral (MPa), cura úmida, aos 28 dias	60
Figura 32 – Tração por Compressão Diametral (MPa), cura térmica, aos 28 dias	61
Figura 33 – Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), 270x, escala 50 μm , dos CUAR: I CP II E 40 (a), II CP V ARI (b) e III CP V ARI RS (c), cura úmida (I) e térmica (II),	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Quantidade de sílica ativa obtida por tonelada de liga metálica produzida.....	16
Tabela 2 - Produção anual de cimento Portland, segundo os tipos (em mil toneladas).....	21
Tabela 3 - Produção anual de cimento Portland (em toneladas).....	22
Tabela 4 - Classificação dos aditivos químicos segundo a NBR 11786:2011	22
Tabela 5 - Composição dos tipos de cimentos utilizados neste trabalho.....	34
Tabela 6 – Ensaios Físicos e Mecânicos dos cimentos Portland	34
Tabela 7 – Ensaios Químicos dos cimentos Portland	35
Tabela 8 – Superplastificantes utilizados na pesquisa.	35
Tabela 9 – Características Químicas e Físicas da Sílica Ativa	36
Tabela 10 – Características Químicas da Areia Quartzosa Artificial e Pó de Quartzo	36
Tabela 11 – Dosagem e traço em massa dos CUAR utilizados neste trabalho	41
Tabela 12 – Granulometria resumida, superfície específica e massa específica dos cimentos Portland.	44
Tabela 13 - Análise química da sílica ativa.	45
Tabela 14 – Comparação entre os resultados desta pesquisa e de Hoppe Filho <i>et al.</i> , 2017	45
Tabela 15 – Composição Granulométrica do Pó de Quartzo.	47
Tabela 16 – Análise química do Pó de Quartzo.	49
Tabela 17 –Superfície específica (B.E.T) e massa específica das areias finas naturais.	49
Tabela 18 – Análise química da areia fina natural.....	49
Tabela 19 – Índice de consistência das misturas	49
Tabela 20 – Resistência média à Compressão Axial e Desvio Padrão (D.P.), cura úmida e térmica.....	50
Tabela 21 – Correlação de incremento entre as resistências à compressão axial (MPa) de acordo a idade anterior.	57
Tabela 22 – Correlação de incremento entre as resistências à compressão axial (MPa) de acordo o tipo de cura nas mesmas idades.	58

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a/c - água/cimento

a/ag – água/aglomerante

B.E.T. – Brunauer, Emmett, Teller - Teoria de adsorção multimolecular

CAR – Concreto de Alta Resistência

CBC – Cinza de Bagaço de Cana-de-açúcar

CC – Concreto Convencional

CCA – Cinza de Casca de Arroz

CIA – Cálculo de Impacto Ambiental

CP II – Cimentos Portland Composto

CP V ARI – Cimento Portland de Alta Resistência Inicial

CP V ARI RS – Cimento Portland de Alta Resistência Inicial Resistente a Sulfatos

CPR – Concretos de Pós Reativos

CPs – Corpos de Prova

C-S-H – Silicato de Cálcio Hidratado

CUAD – Concreto de Ultra-Alto Desempenho

CUAR – Concreto de Ultra-Alta Resistência

C₃A – Aluminato Tricálcio

C₃S – Silicato Tricálcio

D.P. – Desvio Padrão

DRX – Difração de Raios X

EMMA – *Elkem Material Mix Analyzer* (Analisador de Mistura de Material Elkem)

f_{ck} – Resistência Característica do Concreto

FRX – Fluorescência de Raios X

f_{t,D} – Resistência à Tração por Compressão Diametral

GJ – Giga Joule

KWh – Quilo watt hora

M – Mol

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura

MS – Materiais Suplementares

NO_x – Partículas de azoto

PM₁₀ – Partículas inaláveis < 10 µm

q – coeficiente de distribuição

SNIC – Sindicato Nacional das Indústrias de Cimento

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1. Pergunta de pesquisa e objetivos	17
1.1.1. <i>Pergunta da Pesquisa</i>	<i>17</i>
1.1.2. <i>Objetivo Geral</i>	<i>17</i>
1.1.3. <i>Objetivos Específicos</i>	<i>18</i>
1.2. Justificativa e Relevância.....	18
1.3. Restrições e Limitações da Pesquisa	19
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	19
2.1. Conceitos do CUAR.....	19
2.2 Materiais constituintes do CUAR.....	21
2.2.1 <i>Cimento Portland.....</i>	<i>21</i>
2.2.2 <i>Aditivos Químicos.....</i>	<i>22</i>
2.2.2.1 <u>Aditivos Superplastificantes</u>	22
2.2.3 <i>Adições Minerais</i>	<i>23</i>
2.2.3.1 <u>Sílica Ativa</u>	23
2.2.4 <i>Agregados Miúdos</i>	<i>26</i>
2.2.4.1 <u>Pó de Quartzo</u>.....	26
2.2.4.2 <u>Areia Fina</u>.....	27
2.3 Atividade Pozolânica	28
2.4 Empacotamento das Partículas	28
2.5 Processo de Cura	32
3. METODOLOGIA.....	33
3.1. Enquadramento Metodológico.....	33
3.2. Materiais	33
3.2.1 <i>Cimento Portland.....</i>	<i>33</i>
3.2.2 <i>Aditivo Químico Superplastificante</i>	<i>35</i>
3.2.3 <i>Sílica Ativa</i>	<i>35</i>
3.2.4 <i>Pó de Quartzo</i>	<i>36</i>
3.2.5 <i>Areia Fina.....</i>	<i>37</i>
3.2.6 <i>Água.....</i>	<i>37</i>
3.3. Métodos.....	37
3.3.1. <i>Caracterização dos constituintes da mistura.....</i>	<i>37</i>
3.3.2 <i>Atividade Pozolânica</i>	<i>38</i>
3.3.3 <i>Método de Empacotamento de Partículas e produção do CUAR.....</i>	<i>39</i>
3.3.4. <i>Análise do CUAR no estado fresco</i>	<i>42</i>

3.3.5. <i>Análise do CUAR no estado endurecido</i>	42
3.3.5.1. <u>Resistência à compressão axial e módulo de elasticidade</u>	42
3.3.5.2. <u>Tração por Compressão Diametral</u>	43
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	43
4.1 Caracterização dos materiais constituintes	43
4.1.1 <i>Cimento Portland</i>	43
4.1.2 <i>Superplastificante</i>	44
4.1.3 <i>Sílica ativa</i>	44
4.1.4 <i>Pó de Quartzo</i>	47
4.1.5 <i>Areia Fina</i>	49
4.2 Resultados dos ensaios no CUAR	49
4.2.1 <i>Índice de Consistência</i>	49
4.2.2 <i>Resistência à Compressão Axial</i>	50
4.2.3 <i>Módulo de Elasticidade Estático</i>	58
4.2.4 <i>Tração por Compressão Diametral</i>	60
4.2.5 <i>Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) do CUAR</i>	61
5. CONCLUSÕES	62
5.1 Considerações Finais	62
5.2 Sugestões para trabalhos futuros	64
6. REFERÊNCIAS	65

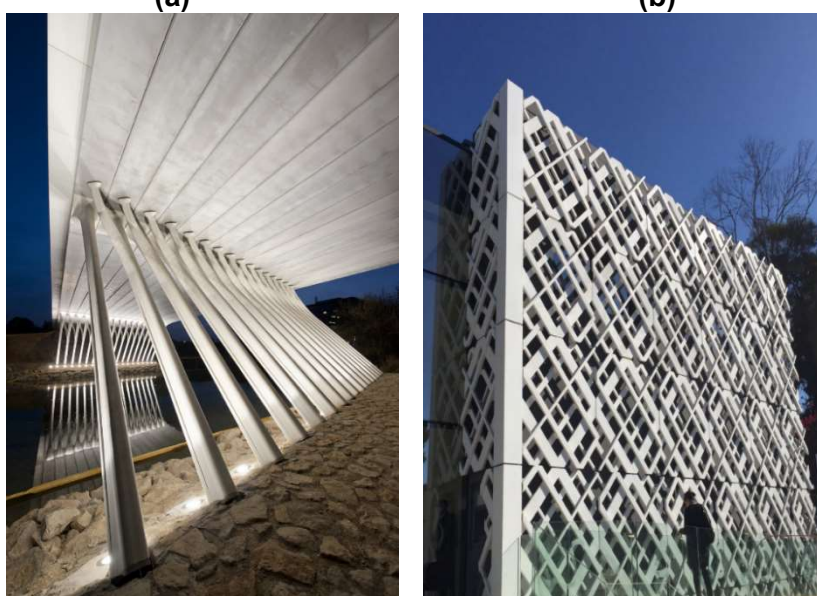
1. INTRODUÇÃO

O avanço das pesquisas com Concreto de Alta Resistência (CAR) por Pierre Richards, ex-diretor científico da empresa francesa Bouygues, desde 1982, promoveram um concreto com propriedades mais interessantes, o Concreto de Ultra-Alta Resistência (CUAR), sendo assim, considerado o desenvolvedor desse tipo de concreto. A inserção de fibras e aditivos especiais no CUAR se iniciou em 1990 por Richards (TUTIKIAN *et al.*, 2011). O Concreto de Ultra-Alto Desempenho (CUAD) ou Concreto de Ultra-Alta Resistência (CUAR), também denominado Concreto de Pós-Reativos (CPR), atraiu o interesse dos pesquisadores, por sua potencialidade em várias aplicações, por exemplo, estruturas resistentes a impactos e explosões (WILLE *et al.*, 2011).

Quando se trata de concreto, o CUAR pode ser entendido como uma das tecnologias mais avançadas. A variedade de aplicação de tais tecnologias na construção civil está relacionado com a eficiência que pode ser obtida com uso deste material (RANADE *et al.*, 2013). Obras mais ousadas, com potencial estrutural e valor arquitetônico, proporcionando valor estético ao edifício ou obras de arte é possível com uso do CUAR.

As indústrias de concreto pré-fabricado são as mais interessadas no CUAR como matéria prima para os processos constitutivos, ilustrado na figura 1. Novos arranjos para produtos pré-fabricados são possíveis, algo que o concreto comum não permitia (DUCTAL, 2018). Elementos com seção mais esbelta, mais leves, são possíveis com a utilização do CUAR. As características técnicas do concreto oriundos de CAR e CUAR são significativamente melhores do que as características do concreto comum (ŠPAK *et al.*, 2016).

Figura 1 – Obras de arte produzidas com CUAR, ponte da República, Montpellier, sul da França (a) e fachada do Banco Attijariwafa, Rabat, Marrocos (b).



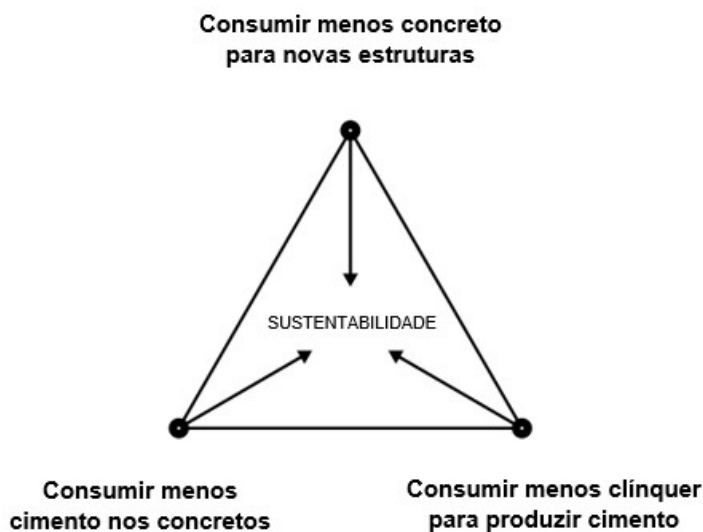
Fonte: (DUCTAL, 2018)

O CUAR é produzido com materiais de até 2 mm de diâmetro, então, o agregado graúdo está ausente da mistura. Em questão granulométrica, trata-se de uma argamassa e não de um concreto, ao qual fibras podem ser adicionadas. As propriedades avaliadas são as mesmas do concreto, mas em grau mais intenso, assim o termo concreto se manteve, em função do desempenho melhorado deste material (VANDERLEI, 2004). A ausência do agregado graúdo resulta na inibição da zona de transição e do crescimento da superfície do esqueleto granular, como possíveis oclusões ou vazios internos, sendo a ideia inicial desse tipo de concreto. Com a distribuição mais uniforme das cargas, diminuindo a concentração de tensões, a resistência última é elevada, devido a maior superfície específica existente (TUTIKIAN *et al.*, 2011).

As características e vantagens do CUAR são evidentes, apesar do alto consumo cimentício e sua pegada de carbono desfavorável, assim como certas particularidades relacionadas às suas formulações e sua produção tornando seus custos constestáveis, o que dificulta seu crescimento. Suas aplicações, muitas vezes, se relacionam em alguns casos quando suas qualidades os tornam indispensáveis (AMANJEAN, 2015).

Os mais variados motivos podem ser descritos para justificar que a indústria do concreto não é sustentável. O consumo de quantidades elevadas de materiais virgens pode ser listado em primeiro lugar. Em segundo lugar, o cimento Portland utilizado na produção do concreto é um dos principais contribuintes para as emissões de carbono (CO_2) na atmosfera. Em terceiro lugar, a indústria de concreto permite desenvolvimento de estruturas mais duráveis, mas, mesmo assim, a aplicação está restrita, sem evolução prática (MEHTA, 2009). A figura 2 representa três ferramentas que a indústria do concreto pode utilizar para alcançar sustentabilidade. O centro do triângulo, que representa a sustentabilidade, é o objetivo, sendo necessário passar por cada um dos três cantos do triângulo. O uso conjunto dessas três ferramentas pode produzir grandes reduções no consumo de cimento Portland e emissões de carbono (MEHTA, 2009).

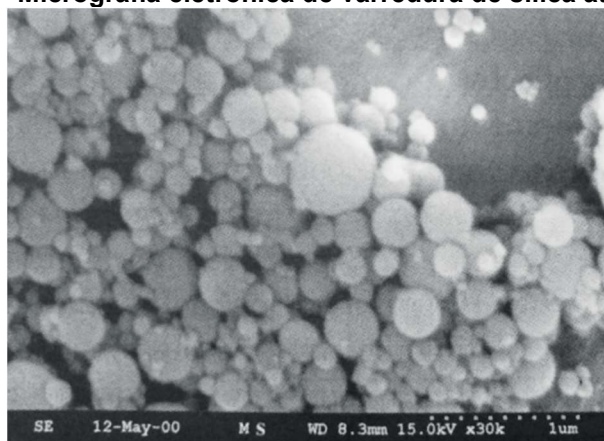
Figura 2 – Ferramentas para reduzir a emissão de carbono na indústria cimentícia



Fonte: (MEHTA, 2009)

As indústrias de silício metálico, no processo de extração de quartzo, para produção de ligas de silício, geram um subproduto, o pó de quartzo (MORI *et al.*, 2007), que ao passar por um controle tecnológico, integra os componentes do CUAR. No processo de produção de ligas de silício, que ocorre em fornos elétricos de arcos submersos (temperaturas superiores a 2.000°C), emitem um subproduto volátil, que quando resfriada, se torna a sílica ativa, conhecida também como microssílica ou fumo de sílica (MEHTA; MONTEIRO, 2008). A sílica ativa é praticamente isenta de carbono e tem a cor clara quando o forno tem um sistema de recuperação de calor eficiente (NEVILLE, 2015). Os gases de monóxido de silício (SiO), emitidos pela redução do quartzo silício, se oxidam na interação com o ar e condensam a temperaturas baixas na parte superior do forno, formando as partículas esféricas minúsculas (figura 3), compostas por dióxido de silício (SiO₂), retidas por meio de filtros manga (DAL MOLIN, 2005).

Figura 3 - Micrografia eletrônica de varredura de sílica ativa (x30k)



Fonte: (MEHTA; MONTEIRO, 2008)

A cada tonelada de liga metálica produzida são extraídas quantidades diversas de sílica ativa, conforme tabela 1, levando em consideração os procedimentos operacionais

empregados, o tipo de liga produzido, as matérias primas utilizadas, o tipo do forno, dentre outros. (DASTOL¹, 1984 *apud* DAL MOLIN, 2005).

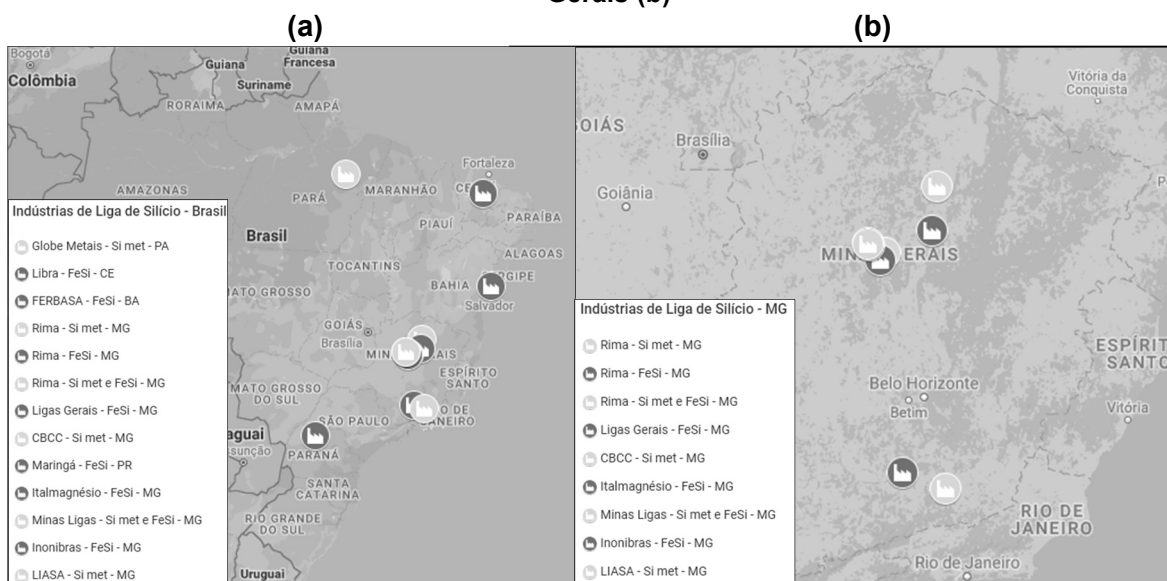
Tabela 1- Quantidade de sílica ativa obtida por tonelada de liga metálica produzida

Liga Metálica	Sílica Ativa
1.000 kg de silício metálico	550 kg
1.000 kg de ferro-silício 75%	350 kg
1.000 kg de ferro-silício 50%	90 kg

Fonte: (DASTOL¹, 1984 *apud* DAL MOLIN, 2005)

Na produção de ligas de silício, são gerados ao menos dois subprodutos utilizáveis na composição de CUAR, a sílica e o pó de quarto. Na figura 4 está apresentada a distribuição das indústrias de liga de silício no Brasil, especialmente em Minas Gerais. É possível verificar que cinco, das seis indústrias nacionais de silício metálico (sílica ativa com teores de $\text{SiO}_2 > 90\%$ (VIEIRA *et al.*, 1997)) estão em Minas Gerais, e que, quatro delas, estão no Norte de Minas. A utilização de materiais disponíveis localmente é um passo fundamental para reduzir os custos do CUAR, uma vez que o transporte de materiais aumenta o custo de produção (ABBAS *et al.*, 2016; ALSALMAN *et al.*, 2017a).

Figura 4 – Distribuição geográfica das indústrias de Si Met e FeSi no Brasil (a) e em Minas Gerais (b)



Fonte: (KRUGER, 2009; FEAM, 2010) (adaptado)

Resistência à compressão variando entre 100 e 200 MPa são uma realidade com os avanços da indústria química e a aplicação de aditivos avançados na produção de CUAR (MIR *et al.*, 2016). Materiais aglomerantes e pós muito finos, como cimento, sílica ativa, quartzo

¹ DASTOL, M. **Produção e propriedades da microsílica da Elkem**. Seminário Tecnológico da Elkem Microsílica, v. 1, p. 1-19, 1984.

triturado e metacaulim são os componentes principais do CUAR, tornando a microestrutura densa e a porosidade muito baixa (BOROSNYOI, 2015).

Requisitos mínimos de qualidade devem ser atendidas pelas estruturas de concreto, os quais são: capacidade resistente (segurança à ruptura), desempenho em serviço (capacidade da estrutura manter-se em condições plenas de utilização durante sua vida útil) e durabilidade (resistir às influências ambientais previstas), durante sua construção e serviço, e aos requisitos adicionais definidas em projeto (ABNT 6118, 2014). O concreto, composto principalmente de cimento Portland, atualmente é o material mais utilizado no mundo (TUTIKIAN *et al.*, 2011). A utilização do concreto no mundo é mais do que duas vezes a soma de todos os materiais utilizados na construção, incluindo madeira, aço, plástico e alumínio (CONCRETE, 2017).

Dessa forma, com este trabalho, busca-se comparar as propriedades mecânicas do CUAR, no estado fresco e endurecido, produzidos com três diferentes tipos de cimento Portland (CP II E 40, CP V ARI, CP V ARI RS), utilizando sílica ativa, pó de quartzo e areia natural, originários da região do Norte de Minas Gerais, com diferentes tipos de cura (úmida e térmica).

1.1. Pergunta de pesquisa e objetivos

1.1.1. Pergunta da Pesquisa

Para a produção de concretos estruturais de alta resistência, são necessários diversos cuidados em relação à dosagem, preparação e produção, lançamento e cura, além do controle tecnológico rigoroso durante esses processos. Por meio da identificação dos materiais disponíveis na região, é possível evitar equívocos nessa fase de escolha dos materiais constituintes, enfatizando o alcance dos resultados esperados. Com uso dos subprodutos, a sílica ativa e o pó de quartzo, proporciona-se, de maneira sustentável, melhoria da resistência do concreto estrutural. Com isso, surge a seguinte questão de pesquisa:

- Qual é a influência do tipo de cimento Portland e da cura no desempenho mecânico do CUAR, utilizando sílica ativa e pó de quartzo disponíveis na região do Norte de Minas em sua composição?

1.1.2. Objetivo Geral

O objetivo principal deste trabalho é estudar a influência de três tipos diferentes de cimento Portland e dois processos de cura na produção de CUAR que utiliza sílica ativa e pó de quartzo disponíveis na região do Norte de Minas Gerais.

1.1.3. *Objetivos Específicos*

Com o intuito de alcançar o objetivo geral, os objetivos específicos deste trabalho são:

- analisar as características físico-químicas da sílica ativa por meio de ensaios que investiguem sua composição mineralógica e química, análise granulométrica, a reatividade pozolânica, densidade, superfície específica e morfologia;
- analisar as características físico-químicas do pó de quartzo e do cimento por meio de ensaios que investiguem sua granulometria, densidade, superfície específica e morfologia;
- avaliar propriedades do CUAR, no estado fresco e endurecido, com variação de três tipos de cimento Portland, curados termicamente ou por imersão;
- obter uma correlação entre tipo de cimento Portland, tipo de cura e as resistências à compressão axial.

1.2. **Justificativa e Relevância**

O fato mais relevante para a escolha deste tema é o uso de materiais locais para produção do CUAR, pois os custos envolvidos na fabricação deste material, em consonância com o alto consumo de cimento Portland por m³, limitam a expansão da produção em escala (ALSALMAN *et al.*, 2017b). A utilização dos materiais locais, subprodutos da produção de silício metálico, promove a destinação adequada dos subprodutos (ABBAS *et al.*, 2016). A sílica ativa e pó de quartzo utilizados nesta pesquisa têm elevada disponibilidade no Norte de Minas, justificando a utilização desses materiais no presente trabalho.

Das diversas vertentes em pesquisa sobre CUAR, este trabalho se concentrou no estudo das propriedades mecânicas aprimoradas de tal concreto, incluindo propriedades relacionadas à resistência à compressão, resistência à tração e índice de consistência. A relevância deste trabalho, portanto, encontra-se na produção de CUAR com materiais disponíveis localmente e propriedades resistentes superiores aos concretos convencionais.

Ganhos diretos como redução do volume de concreto e consumo de aço e aumento na velocidade de execução, necessitando menos homens/hora e, ganhos indiretos como diminuição de impactos ambientais, flexibilidade de projeto e redução da seção das peças podem ser objetivados com utilização de novas tecnologias na execução das estruturas de concreto (SILVA, 2010).

1.3. Restrições e Limitações da Pesquisa

A investigação foi realizada em CUAR, ficando excluídas as análises em concretos convencionais, de alto desempenho, armagassas e pastas cimentícias. Não foram avaliadas propriedades do concreto em idades superiores aos 28 dias.

A sílica ativa e o pó de quartzo, utilizados na pesquisa, não tiveram seus processos de produção ou tratamento estudados. Foi utilizada sílica ativa não densificada, diretamente extraída dos filtros de manga de indústria de silício metálico e pó de quartzo proveniente da mineração extrativista do quartzo base para produção do silício metálico.

Outra limitação desta pesquisa é com relação aos outros materiais da mistura do CUAR, a areia fina, os cimentos e o superplastificante. Foi utilizada areia quartzosa de granulometria fina natural proveniente de rio, cimentos CP II E 40, CP V ARI e CP V ARI RS e superplastificante a base de policarboxilato. Materiais de outros tipos, composições, granulometrias ou origem mineralógica não foram estudados nem para efeito de comparação, uma vez que o foco da pesquisa é na utilização de materiais disponíveis na região variando o tipo de cimento Portland e cura.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Conceitos do CUAR

A durabilidade e características mecânicas do CUAR se devem à homogeneidade melhorada da mistura, obtida pela substituição dos agregados graúdos por areias muito finas e pó de quartzo (MA *et al.*, 2004). A composição também é caracterizada pelo uso de sílica ativa; grandes quantidades de cimento Portland; pequenas relações água-aglomerante (a/ag); e, conseqüentemente, o uso de aditivos redutores de água. A sílica ativa é utilizada para aumentar a produção de C-S-H e também como microfíler para os vazios no concreto, reduzindo a porosidade (GRAYBEAL; HARTMANN, 2003).

Para satisfazer ambas as expectativas, o teor de sílica ativa pode ser de 25 a 30% da massa de cimento. Em CUAR, a grande quantidade de aglomerante (cimento e sílica ativa) leva a um comportamento frágil e uma tendência a micro fissuramento devido à retração autógena (MA; SCHNEIDER, 2002).

A grande maioria dos cimentos vendidos fora da América do Norte é constituída por clínquer e cimentos compostos com Materiais Cimentícios Suplementares (MCS), ou simplesmente, adições minerais. No entanto, na idade precoce, a resistência ainda é principalmente devido à reação do clínquer. É importante compreender essa reação, que também pode ser modificada pela presença física dos MCS. Posteriormente, os próprios MCS reagem e contribuem para o processo de hidratação (SCRIVENER *et al.*, 2015).

O CUAR possui uma baixíssima relação a/c ($< 0,25$) e uma grande quantidade de finos, sendo menores que os grãos de cimento, o que torna a mistura densa e sem espaço intergranular, resultando em um acréscimo na resistência à compressão e diminuindo a capilaridade. Partículas ultrafinas de sílica (entre 10 e 100 nm) fazem parte da composição do CUAR (PLANK *et al.*, 2009).

O termo Concreto de Pós Reativos (CPR) foi criado para descrever uma estrutura reforçada com fibra, superplastificada, com adição de sílica ativa com baixa relação água-cimento (a/c) caracterizada pela presença de areia de quartzo muito fina (0,15-0,40 mm) ao invés do agregado comum. Richard e Cheyrezy (1995b) não consideram a mistura um concreto, devido à ausência do agregado graúdo, mas, essa inexistência é um aspecto chave para a microestrutura e o desempenho do CPR, proporcionando uma redução na heterogeneidade existente entre a matriz de cimento e o agregado.

Porém, devido à utilização de areia muito fina em vez de agregado comum, o consumo de cimento é alto, variando de 900 a 1000 kg/m³. Esse consumo de cimento incomum pode aumentar a retração por secagem e tensão do CUAR em relação ao concreto comum com consumo de cimento usual de 300 a 500 kg/m³ (RICHARD; CHEYREZY, M., 1995).

Os superplastificantes são essenciais para melhorar a reologia do CUAR. Normalmente, eles são baseados em policarboxilato e trabalham principalmente induzindo uma grande interação entre as partículas (SCHRÖFL *et al.*, 2012). Superplastificantes de alto desempenho, baseados em policarboxilato de éter (PCE) permitem uma dispersão efetiva de aglomerantes. Além disso, o processo de mistura afeta decisivamente o grau de dispersão e homogeneização dos componentes (MAZANEC *et al.*, 2010).

O baixo teor de água no CUAR promove a necessidade de investigações sobre o tempo de mistura. Durante a mistura, a lâmina de água ao redor das partículas é, em média, um pouco mais espessa e, portanto, o atrito entre elas é mais baixo, promovendo mais mobilidade e facilidade no contato das partículas. Isso significa que, mais tempo e energia, são necessários para misturar as partículas, que possuem tamanho e teor de água reduzido (MAZANEC *et al.*, 2010).

Análises das propriedades mecânicas envolvendo tipos variados de cura, diferentes granulometrias de sílica e tamanho de fibras de aço foram avaliadas por Arel (2016) e Wu *et al.* (2016). A aplicação de pressão, ainda em estado fresco, apresentou redução da porosidade total, removendo ar incorporado e propiciando melhoria das propriedades mecânicas em estudos de Abbas *et al.* (2016).

Voo e Foster (2010) descrevem o Cálculo do Impacto Ambiental (CIA) como uma medida de otimização dos materiais utilizados em relação à energia incorporada e emissão

de CO₂, em comparação com a prática existente. Sugere-se que análise de durabilidade seja feita em conjunto com a análise de impacto ambiental. A análise de durabilidade é importante para garantir que estrutura de concreto cumpra a vida de projeto requerida, com tão pouca manutenção quanto possível, reduzindo assim, o custo geral do ciclo de vida, o impacto social e o não planejamento do consumo de material adicional.

Finalmente, os estados limites devem ser avaliados para se verificar a necessidade de manutenção e requisitos de resistência da estrutura. Os critérios acima mencionados podem ser adotados em qualquer concreto estrutural, assim, o custo total e a funcionalidade da estrutura podem ser otimizados com o mínimo impacto ambiental (VOO; FOSTER, 2010).

2.2 Materiais constituintes do CUAR

O concreto é um material composto e suas características dependem diretamente da proporção, propriedades e interação de seus componentes (NEVILLE, 2015). Dessa maneira, a escolha adequada dos materiais constituintes é a primeira etapa na elaboração de um CUAR.

2.2.1 Cimento Portland

A composição do cimento Portland é proveniente da queima de uma mistura adequada de materiais contendo quatro óxidos principais - CaO, SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃, formando o clínquer, um dos dois ingredientes básicos necessários para fabricação desse material. O outro é o sulfato de cálcio na forma de gesso (CaSO₄.2H₂O) ou hemidrato (CaSO₄.½H₂O) ou anidrita ou sulfato de cálcio (CaSO₄), ou uma mistura de dois ou três deles (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

A tabela 2 apresenta a produção anual brasileira de cimento Portland de acordo com o tipo de cimento de 2008 a 2013. O crescimento na produção anual devido ao aquecimento da economia brasileira nesse período é perceptível, assim como o crescimento da produção de CP II e CP III, que utilizam escória de alto forno em sua formulação (ABNT 11578, 1991; ABNT 5735, 1991b) e também do CP V (ABNT 5733, 1991c). O acréscimo de produção de cimentos Portland que utilizam adições minerais estão alinhados com as metas de sustentabilidade propostas por Mehta (2009).

Tabela 2 - Produção anual de cimento Portland, segundo os tipos (em mil toneladas)

ANO	TIPOS DE CIMENTO						SUBTOTAL	AJUSTES*	TOTAL
	CP I	CP II	CP III	CP IV	CP V	Branco			
2008	346	33 080	8 879	5 714	3 577	86	51 682	288	51 970
2009	84	34 662	7 967	5 097	3 377	-	51 187	560	51 747
2010	88	38 474	8 345	6 686	4 211	-	57 804	1 313	59 117
2011	103	38 659	9 347	8 247	4 973	-	61 329	2 764	64 093
2012	98	39 743	10 000	9 612	5 580	-	65 033	3 776	68 809
2013	263	41 249	9 405	9 863	5 660	-	66 440	3 721	70 161

(*) Dados estimados

Fonte: (SNIC, 2015)

A tabela 3 apresenta a produção anual brasileira de cimento Portland de acordo com a região de 2014 a 2017. O decréscimo na produção anual devido ao desaquecimento da economia brasileira é perceptível, assim como a região sudeste ser responsável por quase 50% da produção nacional. Em 2017, Minas Gerais foi responsável pela produção de 8.741.176 toneladas (SNIC, 2018), ou seja, 45% da produção regional e 21% da produção nacional, confirmando a representatividade do estado na produção de cimento Portland.

Tabela 3 - Produção anual de cimento Portland (em toneladas)

ANO	REGIÃO					BRASIL
	NORTE	NORDESTE	CENTRO-OESTE	SUDESTE	SUL	
2014	3 276 243	15 502 984	8 605 200	33 446 287	10 423 331	71 254 045
2015	3 222 710	14 733 620	7 639 386	29 937 085	9 750 169	65 282 970
2016	2 797 447	12 837 294	5 836 271	26 695 388	9 390 501	57 556 901
2017	2 038 334	8 617 621	4 308 237	19 270 962	6 647 628	40 882 782

Fonte: (Relatórios anuais SNIC, 2015 a 2018) (adaptado)

2.2.2 Aditivos Químicos

Aditivos químicos são produtos que, adicionados em pequena quantidade aos concretos de cimento Portland, modificam algumas de suas propriedades, no sentido de melhor adequá-las a determinadas condições (NBR 11768, 2011). Assim, o uso de aditivos químicos proporciona ao concreto consideráveis melhorias físicas e econômicas.

Os aditivos são classificados em virtude das alterações que causam nas propriedades do concreto fresco e/ou endurecido e é apresentada na tabela 4 a classificação de aditivos químicos empregada no Brasil, segundo a NBR 11768: 2011.

Tabela 4 - Classificação dos aditivos químicos segundo a NBR 11768:2011

Tipo	Classificação	Tipo	Classificação
P	Plastificante	A	Acelerador
R	Retardador	PA	Plastificante Acelerador
PR	Plastificante Retardador	IAR	Incorporador de Ar
SP	Superplastificante	SPA	Superplastificante Acelerador
SPR	Superplastificante Retardador		

Fonte: (ABNT 11768, 2011)

Os principais aditivos químicos utilizados na produção do CUAR são os superplastificantes, pois aumentam a fluidez do concreto a níveis muito elevados, sem alterar outras características, permitindo produzir, por meio da redução da relação água/aglomerante, concretos com alta resistência e maior durabilidade (AİTCIN, 2000).

2.2.2.1 Aditivos Superplastificantes

O principal objetivo do uso de aditivos superplastificantes é melhorar a consistência e as condições de trabalhabilidade do concreto sem que haja adição de água. Além disso, segundo (TUTIKIAN *et al.*, 2011), os superplastificantes aumentam as propriedades

mecânicas e a durabilidade da mistura, além de reduzir o consumo de cimento, mantendo sua consistência.

A compatibilidade entre a composição do cimento e o superplastificante adotado é um aspecto de extrema importância, visto que, para cada tipo de superplastificante existe um ponto de saturação para um dado cimento (TUTIKIAN *et al.*, 2011). Os problemas de compatibilidade, segundo Aïtcin (2000), quase sempre estão vinculados à formação da etringita e à reatividade inicial do C_3S . Ainda conforme Aïtcin (2000), nem todos os superplastificantes comercializados apresentam a mesma eficiência dentro da mistura e, dessa forma, sua escolha deve ser feita de maneira minuciosa.

Como uma simples avaliação visual das especificações dos superplastificantes não é suficiente para determinar seu comportamento reológico com o cimento, é necessário realizar experimentos para testar e observar as reações ocorridas (AÏTCIN, 2000). Ensaio de laboratório podem apontar a máxima quantidade de aditivo acima da qual não são observadas melhoras na fluidez da pasta de cimento, sendo este ponto conhecido como o de saturação (MARTINS *et al.*, 2009).

O estudo da compatibilidade deve ser feito avaliando individualmente as combinações de cada cimento e aditivo disponível para uso, visto que apresentam reações diferentes entre si. Sobretudo, o estudo deve ser direcionado aos aspectos desejados, definidos previamente, bem como consistência, fluidez, etc (MARTINS *et al.*, 2009). Martins *et al.* (2009) ressalta que a utilização de dosagens de superplastificantes maiores que a do ponto de saturação pode causar segregação da mistura, exsudação e retardo do tempo de pega.

2.2.3 Adições Minerais

Denomina-se adição mineral os materiais com atividade pozolânica que são inseridos na mistura, tais como: pozolanas naturais, cinzas volantes, escória básica granulada de alto-forno, cinza de casca de arroz, metacaulim, sílica ativa e outras (TUTIKIAN *et al.*, 2011). Dentre os benefícios de seu emprego no concreto incluem melhora da resistência à fissuração térmica devido ao calor de hidratação mais baixo, aumento das resistências e da impermeabilidade por refinamento dos poros, e uma durabilidade maior a ataques químicos (SILVA, 2010).

2.2.3.1 Sílica Ativa

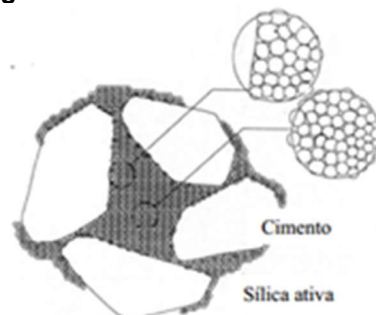
A produção mundial de silício metálico no ano de 2013 foi de 7.700.000 (sete milhões e setecentos mil) toneladas e a produção brasileira foi 230.000 (duzentos e trinta mil) toneladas, ou seja, quase 3%. A produção brasileira de ferro silício 75% foi de 158.000 (cento e cinquenta e oito mil) toneladas (BRASIL, 2015). A sílica ativa, derivada da produção do

silício metálico, produzida no Brasil em 2007, foi de 18 (dezoito) mil toneladas, em 2013, a previsão foi de 21 (vinte e uma) mil toneladas e a previsão para 2020 é de 26 (vinte e seis) mil toneladas (KRUGER, 2009).

As propriedades do concreto tanto no estado fresco (trabalhabilidade, coesão, estabilidade, segregação, exsudação, etc) quanto no estado endurecido (resistência mecânica e durabilidade) são modificados pela inserção da sílica ativa (VIEIRA *et al.*, 1997). Alterações na microestrutura e nas propriedades macroscópicas do concreto podem ser percebidas devido ao efeito físico e pozolânico da sílica ativa (NEVILLE, 2015).

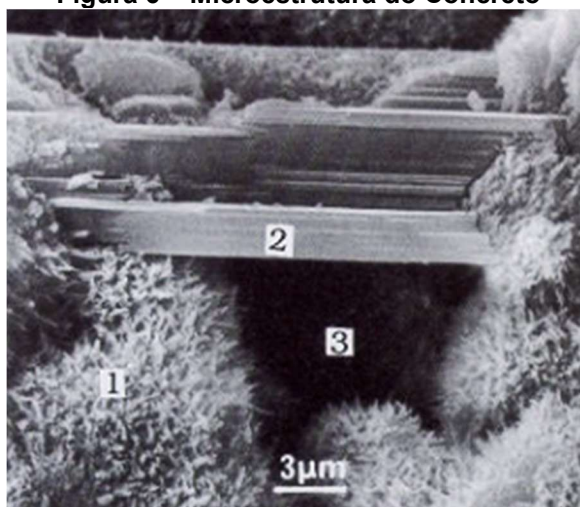
Segundo Aïtcin (2000), os efeitos benéficos da sílica ativa na microestrutura e nas propriedades mecânicas do concreto são devido às suas características peculiares que tornam a sílica um material pozolânico muito reativo, devido ao seu elevado teor de SiO_2 , seu estado amorfo e a sua extrema finura, com partículas que podem preencher os vazios entre as partículas maiores do cimento, quando estas estão desfloculadas na presença de uma dosagem adequada de superplastificantes (figura 5).

Figura 5 - Efeito fíler da Sílica Ativa



Fonte: (AÏCTIN, 2000)

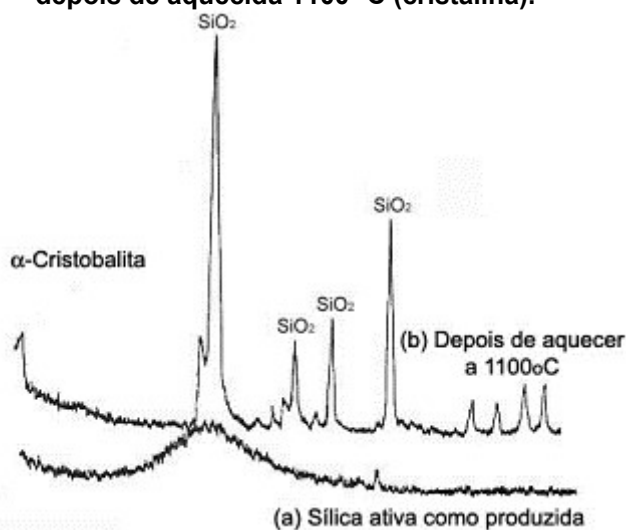
As partículas de sílica ativa são esféricas, proporcionando um efeito de redução de atrito (NEVILLE, 2015), o que, em teores mais baixos (1 a 2%), promove uma melhora da trabalhabilidade dos concretos. A trabalhabilidade do concreto é melhorada devido a água presente entre as partículas de sílica e de cimento, formando um efeito lubrificante (LACERDA; HELENE, 2005). O tamanho reduzido das partículas de sílica ativa leva a uma considerável diminuição tanto da exsudação interna como superficial da mistura, devido ao tamanho pequeno de suas partículas (Figura 6).

Figura 6 – Microestrutura do Concreto

- 1: C-S-H
- 2: Ca(OH)_2 ou (C-H)
- 3: Vazio Capilar

Fonte: (MORANVILLE-REGOURD, 1992)

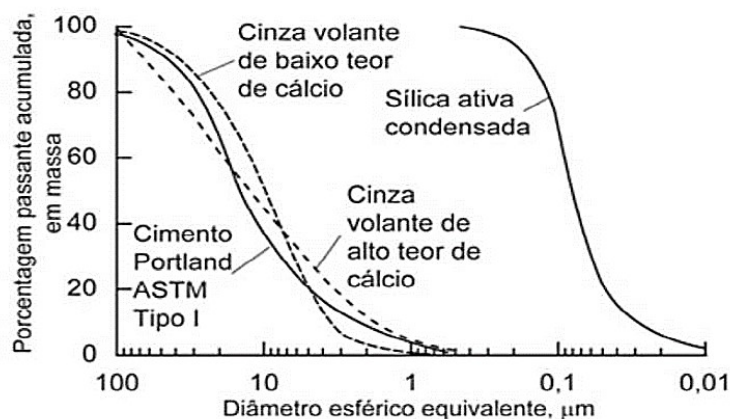
Do ponto de vista estrutural, é composta principalmente de sílica vítrea, como mostrado na figura 7, representado pelo difratograma de raios X, e quanto mais achatada for a crista observada, mais amorfa será a sílica ativa (AITCIN, 2000).

Figura 7 - Difratograma de raios X da sílica ativa (a) na forma como produzida (amorfa) e (b) depois de aquecida 1100° C (cristalina).

Fonte: (AITCIN, 2000)

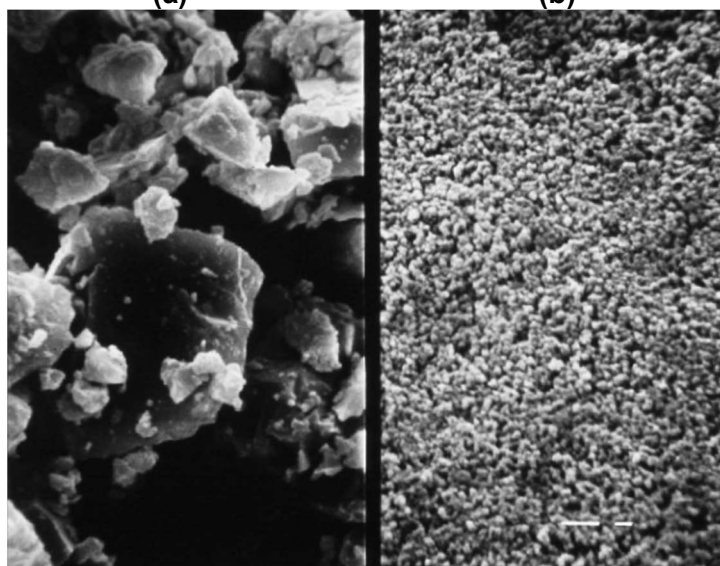
As partículas sílica ativa são muito pequenas, com um diâmetro médio de 0,01 μm , apresentam massa específica próxima 2,20 g/cm^3 , ocorrendo um aumento para materiais com menores teores de sílica (NEVILLE, 2015). O diâmetro da sílica ativa é bem inferior perante o diâmetro do cimento Portland e a cinza volante. Pelo método de Blaine, a superfície específica da sílica ativa não é determinada adequadamente. Com a técnica de adsorção de nitrogênio (B.E.T.), índices entre 20 e 25 m^2/g são obtidos, ou seja, entre 13 e 20 vezes maior que a superfície específica de outras pozolanas (MEHTA; MONTEIRO, 2008), conforme apresentado nas figuras 8 e 9.

Figura 8 – Comparativo de diâmetro de partículas.



Fonte: (MEHTA; MONTEIRO, 2008)

Figura 9 - Micrografia em mesma escala de grãos de Cimento Portland (a) e sílica ativa (b)



Fonte: (HOLLAND, 2005)

2.2.4 Agregados Miúdos

2.2.4.1 Pó de Quartzo

A estabilização da resistência do CUAR pode ser realizada pela adição de pó de quartzo como um dos principais constituintes. O CUAR com proporção de 30% de pó de quartzo em relação ao peso de cimento e cura a vapor em uma temperatura de autoclave de 250°C pode adquirir uma alta resistência à compressão de 180 MPa e apresentar uma alta resistência à tração (KUSHARTOMO *et al.*, 2015).

O pó de quartzo cristalino triturado na faixa de tamanho dos grãos de 10-15 μm é utilizado como microfíler em CUAR. Por se tratar de um material reativo, ele atua como um excelente material de preenchimento da interface pasta-agregado. Nas situações em que é empregada a cura térmica, o pó de quartzo demonstra uma maior reatividade. A máxima

reatividade durante a cura térmica é alcançada para um tamanho médio de partículas entre 5 e 25 μm (RICHARD; CHEYREZY, M. H., 1994).

2.2.4.2 Areia Fina

De acordo com Vanderlei, (2004) os critérios que norteiam sobre a seleção da areia são: diâmetro médio das partículas, composição mineral, composição granulométrica, dosagem da mistura em massa e forma das partículas. A areia quartzosa oferece as seguintes vantagens perante as areias artificiais derivadas de rochas calcáreas e de gnaise: material muito rígido; excelente interface pasta/agregado; boa disponibilidade na região do Norte de Minas Gerais e baixo custo.

Nas misturas convencionais de concreto, as partículas de agregado graúdo, mais fracas do que a argamassa circundante, são esmagadas antes da fase de argamassa, além da presença de zona de transição entre o agregado graúdo e a matriz de argamassa, que é, em muitas vezes, a fonte de microfissuras nos concretos, reduzindo assim a resistência e durabilidade (SUZUKI *et al.*, 2009). Richard e Cheyrezy (1995b) explicitam sobre a substituição do agregado graúdo por areia fina de quartzo com a finalidade de aumentar a homogeneidade da mistura.

Sugere-se que o tamanho máximo das partículas da areia para o uso em CPR seja de 600 μm (RICHARD; CHEYREZY, 1995b). A areia fina representa cerca de 40% do peso do CUAR, sendo o material de maior proporção no CUAR. Para conseguir uma matriz com grau de homogeneidade alta, bem como o mínimo de vazios, o CUAR deve conter areia finamente graduada entre 150 μm e 600 μm . Os tamanhos de partículas de areia abaixo de 150 μm devem ser evitados para impedir interferências com as partículas maiores de cimento (80-100 μm). Um tamanho ideal para essas partículas são cerca de 250 μm .

Vanderlei (2004) também relata sobre o diâmetro médio dessas partículas que devem ser em torno de 250 μm . O diâmetro máximo nominal é limitado em 600 μm para CPR e, para o valor mínimo do tamanho dessas partículas, não devem possuir ordem de grandeza menor que 150 μm . A próxima classe granular mais baixa é o cimento, para o qual o diâmetro médio pode variar entre 11 μm e 15 μm .

A areia fina pode ser adquirida pelo peneiramento do pó resultante da pedra britada, conhecida como areia fina artificial, que apresenta grãos altamente angulares. Pode ser extraída areia natural (de rio) com granulometria pequena, aos quais os grãos são mais esféricos. Ambos os tipos de areia podem ser usadas na produção do CUAR. Contudo a demanda de água é ligeiramente menor para a areia natural o que é, consequentemente, preferível (VANDERLEI, 2004).

2.3 Atividade Pozolânica

As pozolanas são substâncias constituídas de sílica e alumina que, em presença de água, combinam com o hidróxido de cálcio e com os diferentes componentes do cimento, formando compostos estáveis à água e com propriedades aglomerantes (NEVILLE, 2015). A relação portlandita/pozolana, o pH do meio, o teor de fase amorfa contido na adição mineral e composição da matriz amorfa são fatores que influenciam a atividade pozolânica, dentre outros (LOTHENBACH *et al.*, 2011).

As metodologias para embasar e organizar as adições minerais que serão incorporadas ao cimento Portland exigem a mensuração da pozolanicidade, o que se torna bem complexa, pois existem metodologias diretas e indiretas. A utilização da reação da adição mineral com cal hidratada, direta ou indiretamente, são as metodologias mais utilizadas no Brasil. (HOPPE FILHO *et al.*, 2017). Um dos métodos mais utilizados para avaliar atividade pozolânica, proposto em 1958, por J. Chapelle e modificado, em 1980, por Raverdy, o método Chapelle Modificado mede a quantidade de hidróxido de cálcio fixada em um grama de sílica ativa na solução em comparação com uma solução padrão (branco). O ensaio é conveniente pela rapidez e simplicidade de execução. Este ensaio está padronizado pela NBR 15895 (ABNT, 2010).

2.4 Empacotamento das Partículas

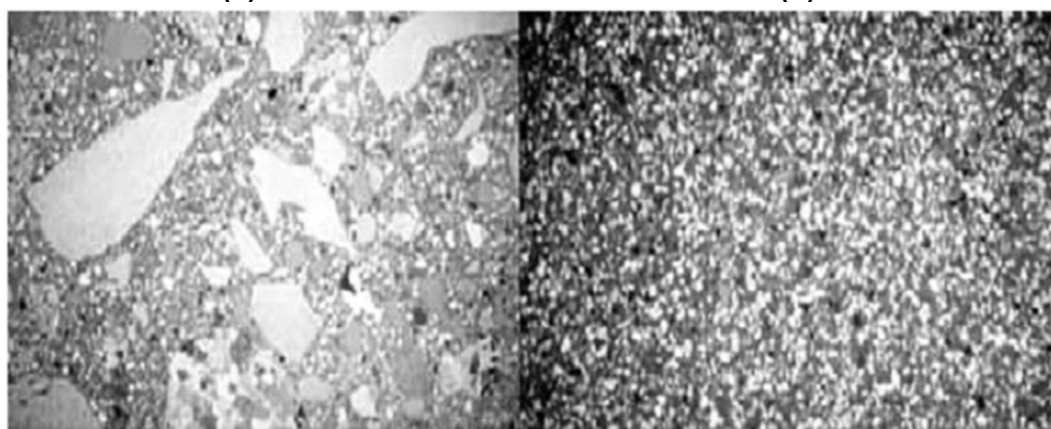
A distribuição granulométrica dos grãos que compõem o CUAR é estudada de modo a obter um produto com alta densidade, no qual os espaços entre as partículas maiores são preenchidos pela classe de partículas imediatamente menor e, assim sucessivamente, formando o chamado empacotamento das partículas (VANDERLEI, 2004).

O CUAR foi idealizado como base no princípio de formação com o mínimo de defeitos como fissuras ou poros capilares, propriedades obtidas com o aumento da compacidade e resistência dos materiais constituintes (CHEYREZY, 1999). Segundo Aïtcin² (2008) *apud* Tutikian *et al.* (2011), o conceito de CUAR se baseia em três princípios básicos: eliminação do agregado graúdo proporcionando melhoria na homogeneidade da mistura, melhoria na granulometria da areia para diminuir o contato e concentração de tensões na pasta endurecida, propriedades mecânicas aumentadas da pasta de cimento hidratada e inibição da zona de transição na interface pasta/agregados, com aumento da compacidade e possível compressão e tratamento térmico para refinamento da microestrutura da pasta hidratada.

² AÏTCIN, P.C. **Binders for durable and sustainable concrete**. Abingdon: Taylor & Francis, 2008 (Modern Concrete Technology, 16)

Segundo Vanderlei (2004), com a aplicação desses três princípios se obtém uma matriz com alta resistência à compressão. Na figura 10 está apresentada uma comparação entre um concreto convencional e um CUAR. Para realizar o empacotamento das partículas existem alguns modelos matemáticos (MANGULKAR; JAMKAR, 2013). De Larrard e Sedran (1994), utilizam do modelo linear de densidade de empacotamento (*Linear Packing Density Model - LPDM*), proposto por Mooney (1951) e propõem um novo modelo de empacotamento, o modelo de suspensão sólida (*Solid Suspension Model - SSM*) combinando os modelos de Mooney (1951) e F  ret (1894), em que    necessário inser  o de valores de granulometria dos materiais constituintes.

Figura 10 - Compara  o de texturas entre Concreto Convencional (CC) (a) e CUAR (b).



Fonte: (RESPLENDINO, 2006)

Myhre e Hundere (1996) descrevem sobre modelos matemáticos para o empacotamento de partículas e inferem que os clássicos modelos de FURNAS (1931), ANDEREGG (1931) e ANDREASSEN e ANDERSEN (1930) são os mais referenciados. O modelo de FURNAS (1931)    defendido por vários autores, mesmo com dificuldade apresentada na utiliza  o. A simplicidade de aplica  o do modelo de ANDREASSEN e ANDERSEN (1930) tem uma vantagem, apesar de sua natureza ser semi-empírica. Apesar de ser necessário que as partículas apresentem formas semelhantes, não exigem fator de forma para sua utiliza  o. Alguns autores discordam do modelo de ANDREASSEN e ANDERSEN, devido partículas infinitamente pequenas serem aceitas, o que    irreal. DINGER e FUNK (1992), com intuito de eliminar essa questão, uniram a distribui  o de ANDREASSEN e ANDERSEN com o de FURNAS, a distribui  o denominada "Andreassen Modificado", permite que o tamanho da menor partícula seja incorporado.

A equação 1 foi desenvolvida por Andreasen e Andersen, 1930.

$$CPFT = \left(\frac{d}{D}\right)^q \cdot 100 \quad (1)$$

Conhecida como Andreassen Modificado, a equação 2 foi utilizada por Dinger e Funk, 1997.

$$CPFT = \left(\frac{d^q - d_m^q}{D^q - d_m^q}\right) \cdot 100 \quad (2)$$

Sendo:

$CPFT$ = percentual acumulado de finos menor que “d” em volume;

d = tamanho da partícula;

d_m = menor tamanho de partícula da distribuição;

D = maior tamanho de partícula da distribuição;

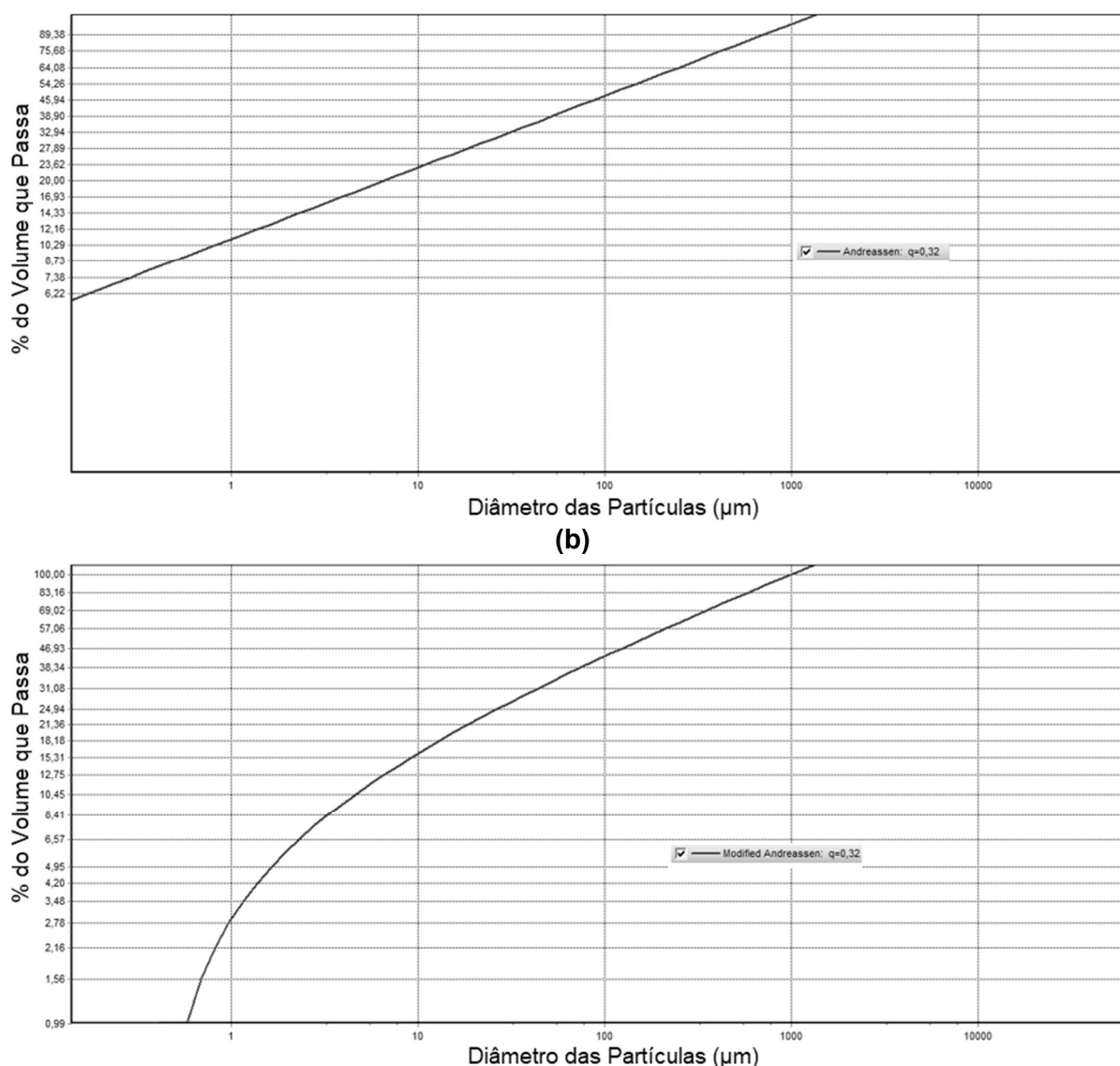
q = coeficiente de distribuição.

Dinger e Funk (1997) demonstraram que o coeficiente “q” influencia no empacotamento das partículas em simulações computacionais e encontraram para o valor “q” 0,37 ou menor, 100% de empacotamento é possível para uma distribuição infinita, já para o valor de “q” acima de 0,37, a porosidade existirá. Dinger e Funk (1997) ainda recomendaram para a distribuição do tamanho de partículas entre os grãos - o que significa a distribuição do tamanho de partículas dos pós em suspensões de processo a serem secadas por pulverização - é utilizar uma distribuição ampla e contínua de tamanhos de partículas otimizados para empacotamento de acordo com a abordagem contínua.

As distribuições devem seguir a equação 2, com módulo de distribuição “q” na faixa de 0,20 a 0,37. O expoente “q”, na equação de Andreassen Modificado, pode variar de 0,21 a 0,37, dependendo dos vários requisitos de trabalhabilidade. Valores próximos a 0,37, significa um aumento dos materiais de granulometria maior e, próximo a 0,21, a quantidade de materiais finos é aumentada (KUMAR; SANTHANAM, 2003). Como a demanda de água e a capacidade de armazenamento de água da mistura é controlada pelo volume de finos, o expoente “q” fornece uma base razoável para a escolha da quantidade de água e agentes modificadores de reologia como superplastificante a serem adicionados à mistura (MANGULKAR; JAMKAR, 2013).

Na figura 11, estão demonstrados as curvas para as equações 1 e 2, utilizando o valor de $q = 0,32$ e de menor partícula de $0,42 \mu\text{m}$ e maior de $1000 \mu\text{m}$ para partículas secas.

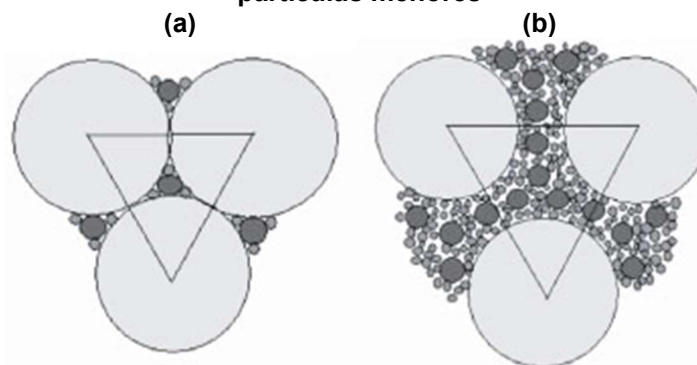
Figura 11 – Distribuição das partículas, Método Andreassen (a) e Andreassen Modificado (b)



Fonte: (ELKEM SA, 2012) (adaptado).

Para Lee e Chisholm, (2005) a performance do CUAR está diretamente relacionada à otimização do empacotamento de partículas. Quanto melhor for este empacotamento, maior será o grau de compacidade e o desempenho de trabalho do concreto, assim como, melhoria na mobilidade para os componentes, possibilitando uma melhor acomodação entre os materiais. A figura 12 demonstra o empacotamento das partículas, sendo que a figura 12(a) os grãos se encaixam nos espaços deixados pelas partículas maiores e a 12(b) com uma otimização do empacotamento, que ocorre no CUAR, as partículas maiores são circundadas (empacotamento) por partículas menores, sendo o resultado esperado uma transmissão de tensões mais distribuída e homogênea (VERNET, 2004).

Figura 12 - Otimização do empacotamento de partículas (a) partículas pequenas cabem no vazio deixado pelas partículas maiores. (b) as partículas maiores são empurradas por partículas menores



Fonte: (VERNET, 2004).

2.5 Processo de Cura

As propriedades do CUAR podem ser melhoradas utilizando-se o processo de cura térmica. A aceleração da resistência inicial à compressão e de novas reações pozolânicas são percebidas imediatamente com este processo. Temperaturas em torno de 90°C são recomendadas em vários trabalhos, mas temperaturas de 250°C a 400°C podem ser usadas para atingir resistências muito elevadas, pois produzem cristais hidratados de xonotlita, que é um silicato de cálcio (BIZ, 2001).

A formação do cristal tobermorita é observado em cura com temperaturas inferiores a 200°C, já com temperaturas maiores, ocorre a formação de *truscottite*, *gyrolite*, *xonotlite* e *hillebrandite*, dependendo da relação cálcio/sílica ativa de acordo com Richard e Cheyrezy (1995). Para obtenção de um CUAR 200 Dugat *et al.* (1996) aplicou o seguinte procedimento de cura térmica:

- Após desmoldagem os corpos de provas foram mantidos submersos em água a 20°C durante 7 dias;
- Após esse período foi aplicado vapor d'água a 90°C por 4 dias;
- Por último os corpos de prova foram expostos ao ar seco a 90°C por 2 dias.

De Larrard e Sedran (1994) utilizaram além do empacotamento de partículas, a cura térmica, durante 2 dias, à temperatura de 90°C e chegaram a resultados de até 236 MPa em 7 dias. A reação de hidratação foi observada por Zanni *et al.* (1996) medindo-se o comprimento da cadeia de hidratos C-S-H e a reação pozolânica com a sílica ativa e o pó de quartzo. A variação da temperatura na cura, de 20°C, 90°C, 200°C e 250°C foram utilizadas, percebendo-se um aumento da cadeia C-S-H à medida de acréscimo da temperatura e uma alteração na microestrutura para temperaturas acima de 200°C.

3. METODOLOGIA

3.1. Enquadramento Metodológico

O enquadramento metodológico de uma pesquisa científica pode ser realizado de diversos modos e depende principalmente do assunto abordado, dos objetivos do estudo e dos meios que serão utilizados para que os dados sejam alcançados (KAUARK *et al.*, 2010). Para Kauark *et al.* (2010), a pesquisa pode ser classificada de acordo com sua natureza (básica ou aplicada), abordagem (qualitativa ou quantitativa), objetivo (exploratória, descritiva ou explicativa), e finalmente, de acordo com os procedimentos técnicos utilizados (bibliográfica, documental, experimental, levantamento, estudo de caso, *expost-facto*, ação ou participante).

Esta pesquisa pode ser considerada aplicada, do ponto de vista da sua natureza, já que é um estudo restrito a objetos situados em uma área delimitada com características semelhantes e tem como objetivo a geração de conhecimento para uma aplicação prática, com foco na solução de problemas específicos (KAUARK *et al.*, 2010). A aplicação prática é a avaliação da variação de três tipos de cimento Portland e o problema específico é o efeito da cura térmica ou por imersão em cada dosagem.

Em relação à forma de abordagem do problema, ela pode ser classificada tanto como quantitativa como qualitativa. A primeira pode ser justificada por apresentar números relativos às intensidades das propriedades analisadas, proporcionando a composição de tabelas e gráficos, utilizando recursos estatísticos para sua análise. Já a segunda é explicada por conter um estudo interpretativo da qualidade dos CUAR produzidos.

Do ponto de vista dos objetivos, essa pesquisa apresenta características exploratória, pois explora e investiga três tipos cimento Portland em CUAR e de cura, identificando os fatores que culminaram nas características diferenciadas do CUAR.

Enfim, em relação aos procedimentos técnicos, a pesquisa é mais bem enquadrada em experimental e bibliográfica. Experimental pois determina o objeto de estudo, avalia as interferências e proposição de formas de controle do efeito dessas interferências no objeto. Bibliográfica, pois busca conhecer o estado da arte do tema tratados e os conceitos mais importantes que devem ser explorados (KAUARK *et al.*, 2010).

3.2. Materiais

3.2.1 Cimento Portland

Foram utilizados três tipos de cimento Portland (tabela 5) para a produção deste trabalho, a fim de elaborar uma comparação entre as propriedades mecânicas proporcionadas

por estes diferentes materiais cimentícios. A variação do tipo de material cimentício permitirá compreender e relacionar a influência nas propriedades mecânicas do CUAR.

Tabela 5 - Composição dos tipos de cimentos utilizados neste trabalho

Tipo de cimento Portland	Sigla	Composição (% em massa)				Norma Brasileira
		Clínquer + gesso	Material Carbonático	Escória granulada de alto forno	Teor de Aluminato Tricálcio	
Composto	CP II - E	94-96	0-10	6-34	-	NBR 11578
Alta Resistência Inicial	CP V - ARI	100-95	0-5	-	-	NBR 5733
Alta Resistência Inicial - RS	CP V - ARI RS	100-95	0-5	-	< 8	NBR 5737

Fonte: ABNT, 2002 (adaptado).

Os ensaios físicos e mecânicos disponibilizados pelos fabricantes estão apresentados na tabela 6.

Tabela 6 – Ensaio Físicos e Mecânicos dos cimentos Portland

Ensaio Físico e Mecânico	Método	CP II - E 40 Nacional	CP V - ARI Fácil Lafarge/Holcim	CP V - ARI RS Lafarge/Holcim	Limites
Superfície Específica Blaine (cm²/g)	NBR NM 16372	4727	4724	4465	≥ 2800 CP II E 40 ≥ 3000 CP V ARI
Massa Específica (g/cm³)	NBR NM 23	3,02	-	-	n.a.
Início de Pega (min)	NBR NM 65	180	127	141	≥ 60
Fim de Pega (min)	NBR NM 65	243	173	178	≤ 600
Expansabilidade à Quente (mm)	NBR 11582	1,98	-	-	≤ 5,0
Índice de finura #200 - 75 µm (%)	NBR 11579	0,11	≤ 6,00	1,00	≤ 10 CP II ≤ 6 CP V ARI
Resíduo na peneira #325 (%)	NBR 9202	1,15	-	-	n.a.
Resistência 1 dia (MPa) Média	NBR 7215	18,9	29,5	19,8	n.a. CP II - 40 ≥ 14 CP V ARI
Resistência 3 dias (MPa) Média		31,9	42,8	34,2	≥ 15 CP II - 40 ≥ 24 CP V ARI
Resistência 7 dias (MPa) Média		40,1	48,4	41,3	≥ 25 CP II - 40 ≥ 34 CP V ARI
Resistência 28 dias (MPa) Média		50,7	55,5	48,2	≥ 40 CP II - 40 n.a. CP V ARI

Fonte: Relatórios de Ensaio - Fabricantes (adaptado).

Os ensaios químicos disponibilizados pelos fabricantes estão apresentados na tabela 7.

Tabela 7 – Ensaios Químicos dos cimentos Portland

Ensaios Químicos	Método	CP II - E 40 Nacional	CP V - ARI Fácil Lafarge/Holcim	CP V - ARI RS Lafarge/Holcim	Limites
Perda ao Fogo - 1000°C (%)	NBR NM 18	6,10	4,03	3,19	≤ 6,5 CP II E 40 ≤ 4,5 CP V ARI
Resíduo Insolúvel - RI	NBR NM 15	1,14	0,53	0,70	≤ 2,5 CP II E 40 ≤ 1,0 CP V ARI
Trióxido de Enxofre - SO ₃ (%)	NBR NM 16	2,75	2,60	2,99	≤ 4,0 CP II E 40 ≤ 4,5 CP V ARI
Óxido de Magnésio - MgO (%)	NBR NM 14	1,88	0,70	2,10	≤ 6,5
Anidrido Carbônico - CO ₂ (%)	NBR NM 20	4,89	-	2,97	≤ 5,0

Fonte: Relatórios de Ensaios - Fabricante (adaptado).

3.2.2 Aditivo Químico Superplastificante

O aditivo químico superplastificante Fluxer PC 3505, do fabricante Erca, à base de policarboxilatos, foi utilizado para a confecção do CUAR. As características indicadas pelo fabricante estão apresentados na tabela 8.

Tabela 8 – Superplastificantes utilizados na pesquisa.

Fabricante	Tipo	Aditivo	Dosagem Sugerida (%)	Massa Específica (g/cm ³)
ERCA	SP-II R	Fluxer PC 3505	0,6 a 1,0	1,070 a 1,110

Fonte: Boletim Técnico do fabricante, (adaptado).

3.2.3 Sílica Ativa

A sílica ativa é proveniente dos filtros de manga de uma indústria de silício metálico localizada no município de Capitão Enéas-MG. A descrição apresentada pelo relatório de análises que a indústria forneceu é de que se trata de “sílica ativa não densificada, com pH constante, amorfa, cor cinza claro, em pó, obtido a partir dos filtros de manga dos fornos de arco elétrico de produção de silício metálico”. A tabela 9 apresenta as características químicas e físicas disponibilizadas pela indústria de silício metálico.

Tabela 9 – Características Químicas e Físicas da Silica Ativa

Características Químicas e Físicas	Unidade	Análise	Mínimo	Máximo
SiO ₂	%	95,00	91,50	98,70
C livre	%	1,10	0,60	2,20
Si livre	%	0,12	0,10	0,16
CaO total	%	0,19	0,17	0,22
SO ₃	%	0,01	0,008	0,014
Na ₂ O	%	0,14	0,10	0,20
K ₂ O	%	1,80	1,50	2,00
Cl ⁻	ppm	0,34	0,30	0,40
Al ₂ O ₃	%	< 0,09	< 0,07	0,15
Fe ₂ O ₃	%	< 0,10	< 0,01	< 0,10
MgO	%	0,20	0,15	0,25
H ₂ O	%	0,50	0,30	0,60
pH	-	8,00	7,50	8,50
Peneira > 0,045 mm	%	0,00	0,00	0,00
Peneira > 0,0001 mm	%	100,00	100,00	100,00
Perda ao Fogo - 950° C	%	1,60	1,40	1,80
Suerfície Específica - BET	m ² /g	2,75	2,60	2,99
Massa unitária	kg/m ³	250,00	230,00	280,00

Fonte: Relatório de análises do fabricante, (adaptado).

3.2.4 Pó de Quartzo

O pó de quartzo artificial é proveniente de mineração de extração de quartzo, no município de Olhos D'água-MG. A tabela 10 apresenta informações químicas de acordo com o tamanho das partículas.

Tabela 10 – Características Químicas da Areia Quartzosa Artificial e Pó de Quartzo

Característica Química Areia Quartzosa Artificial	Amostra Geral (%)	> 0,075mm (%)	< 0,075mm (%)
SiO ₂	97,0	97,2	95,5
Al ₂ O ₃	0,26	0,4	0,54
CaO	0,062	0,04	0,09
Fe ₂ O ₃	2,21	1,92	3,21
TiO ₂	0,0327	0,0364	0,06255
P ₂ O ₅	0,085	0,0612	0,1125
Ba	0,0017	0,0016	0,0022
Cr	0,0101	0,0098	0,0125
Pb	0,0024	0,002	0,0036
Ni	0,0032	0,0028	0,0038
Zn	0,0019	0,002	0,0034
Cu	0,005	0,0052	0,0071
Mn	0,0052	0,0037	0,0065
B	0,0092	0,0089	0,0095
Mg	0,13	0,15	0,25
Pb	0,0024	0,0028	0,0036

Fonte: Relatório de análises do fabricante, (adaptado).

3.2.5 Areia Fina

A areia fina natural utilizada neste trabalho é proveniente do Rio Gorutuba, em Janaúba-MG. A areia foi peneirada nas granulometrias de 150, 300 e 600 μm com utilização das peneiras da série normal da ABNT NM 248 (2003).

3.2.6 Água

A água utilizada nos experimentos foi a de abastecimento da COPASA, tanto na cidade de Janaúba-MG, quanto em Belo Horizonte-MG.

3.3. Métodos

3.3.1. Caracterização dos constituintes da mistura

Os seguintes ensaios foram realizados para a caracterização físico-química das amostras dos materiais.

- Difração de Raios X (DRX);
- Fluorescência de Raios X (FRX);
- Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV);
- Difração à Laser;
- Picnometria de Hélio;
- Adsorção de Nitrogênio (B.E.T.).

O ensaio de Difração de Raios X (DRX) foi realizado para a determinação da composição mineralógica da estrutura cristalina da sílica ativa. A análise do resultado desse ensaio permite avaliar se a cinza possui uma estrutura cristalina ou amorfa e ainda permite identificar os cristais que, por ventura, estejam presentes nessa composição. O DRX foi realizado no Departamento de Engenharia Civil do CEFET-MG com o Difrátômetro Raios X *Shimadzu MAXima XRD-7000*. Os parâmetros utilizados para o teste foram os seguintes: intervalo mínimo de 5° , máximo de 80° , passo de $0,02^\circ$, velocidade de $1^\circ/\text{min}$, tensão de 40 V, corrente de 30 A e comprimento de onda 2θ .

A análise química da sílica ativa, do pó de quartzo e areia fina foi realizada utilizando os ensaios de espectroscopia por Fluorescência de Raios X (FRX). O ensaio semiquantitativo de FRX foi realizado no laboratório de Controle de Processos e Medição de Partículas do Instituto SENAI de Inovação em Processamento Mineral em Belo Horizonte e também no Laboratório de Mecânica dos Pavimentos e de Materiais do Departamento de Engenharia de Transportes do CEFET-MG com o Espectrômetro de Fluorescência de Raios X por Energia Dispersiva (EDX) *Shimadzu EDX 720*. Para esse ensaio, a sílica ativa, o pó de quartzo e a areia fina foram prensados para que ficasse na forma de pastilha. O resultado dessa análise

permite ao pesquisador conhecer a composição química do material, identificando a presença e a proporção de compostos, tais como, SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 , dentre outros.

Utilizando o recurso de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), foi possível investigar, por meio de análise microscópica, a estrutura e a morfologia da sílica ativa, do pó de quartzo e dos cimentos Portland utilizados, além da microestrutura do concreto aos 28 dias. O ensaio foi realizado no Laboratório de Mecânica dos Pavimentos e de Materiais do Departamento de Engenharia de Transportes do CEFET-MG, com o microscópio eletrônico de mesa *TM3000* da *Hitachi*.

A granulometria da sílica ativa, do pó de quartzo e dos cimentos Portland foram analisadas por meio do ensaio de Difração a Laser utilizando o equipamento *CILAS Particle Size Analyzer 1090* do laboratório de análise química do Departamento de Engenharia Civil do CEFET-MG. O ensaio foi realizado por via úmida (água para a sílica ativa e o pó de quartzo e álcool isopropílico para os cimentos Portland) e parâmetros de banho ultrassônico de 60 segundos do próprio aparelho.

A massa específica da sílica ativa, do pó de quartzo, dos cimentos Portland e da areia natural foram obtidas por meio do ensaio de Picnometria com gás hélio, utilizando o equipamento *Quantachrome Multipycnometer* do Laboratório de Análises Térmicas do Departamento de Engenharia Civil do CEFETMG. O procedimento do ensaio foi realizado 10 vezes, até que os resultados apresentassem uma estabilidade.

A superfície específica da sílica ativa, do pó de quartzo, das areias naturais e dos cimentos Portland foram obtidas com a realização do ensaio de B.E.T., método multiponto, que utiliza o princípio da adsorção de partículas de nitrogênio. O equipamento utilizado foi o *NOVA 2200e* da *Quantachrome Instruments*, no Laboratório de Análises Térmicas do Departamento de Engenharia Civil.

3.3.2 Atividade Pozolânica

Segundo a NBR 15895 (ABNT, 2010), o ensaio consiste em manter em agitação e banho maria a $90^{\circ}\pm 5^{\circ}$ C, durante 16 ± 1 horas, uma mistura com 2 g de CaO, 1 g de material pozolânico (sílica ativa) e 250 g de água destilada isenta de CO_2 . O resultado obtém-se ao titular a solução com HCl 0,1 M, usando fenolftaleína como indicador. Para calcular o índice de atividade, compara-se o volume gasto na solução com a sílica ativa e a solução em branco. Método proposto por J. Chapelle no ano 1958 e modificado por Raverdy *et al.* em 1980. Neste ensaio, a reatividade é avaliada em relação à capacidade de o material fixar cal quando mantido em solução aquosa com óxido de cálcio, CaO.

O resultado é apresentado na equação 3 pela quantidade de CaO fixado por grama de sílica ativa pozolânica. Quanto maior a fixação, mais reativo é o material, em que 330 mg/g é considerado como o mínimo necessário (RAVERDY *et al.*, 1980).

$$I_{ch} = \frac{28 \cdot (V_3 - V_2) \cdot F_c \cdot 1,32}{m_2} \quad (3)$$

I_{ch} é o índice de atividade pozolânica Chapelle, corresponde ao teor de hidróxido de cálcio fixado, expresso em miligramas (mg) de CH por grama (g) da sílica ativa; m_2 é a massa da sílica ativa expressa em gramas (g); V_2 é o volume de HCl 0,1 M consumido no ensaio com amostra, expresso em mililitros (ml); V_3 é o volume de HCl 0,1 M consumido no ensaio em branco, expresso em mililitros (ml); F_c é o fator de correção do HCl para uma concentração de 0,1 M; 1,32 é a relação molecular CH/CaO.

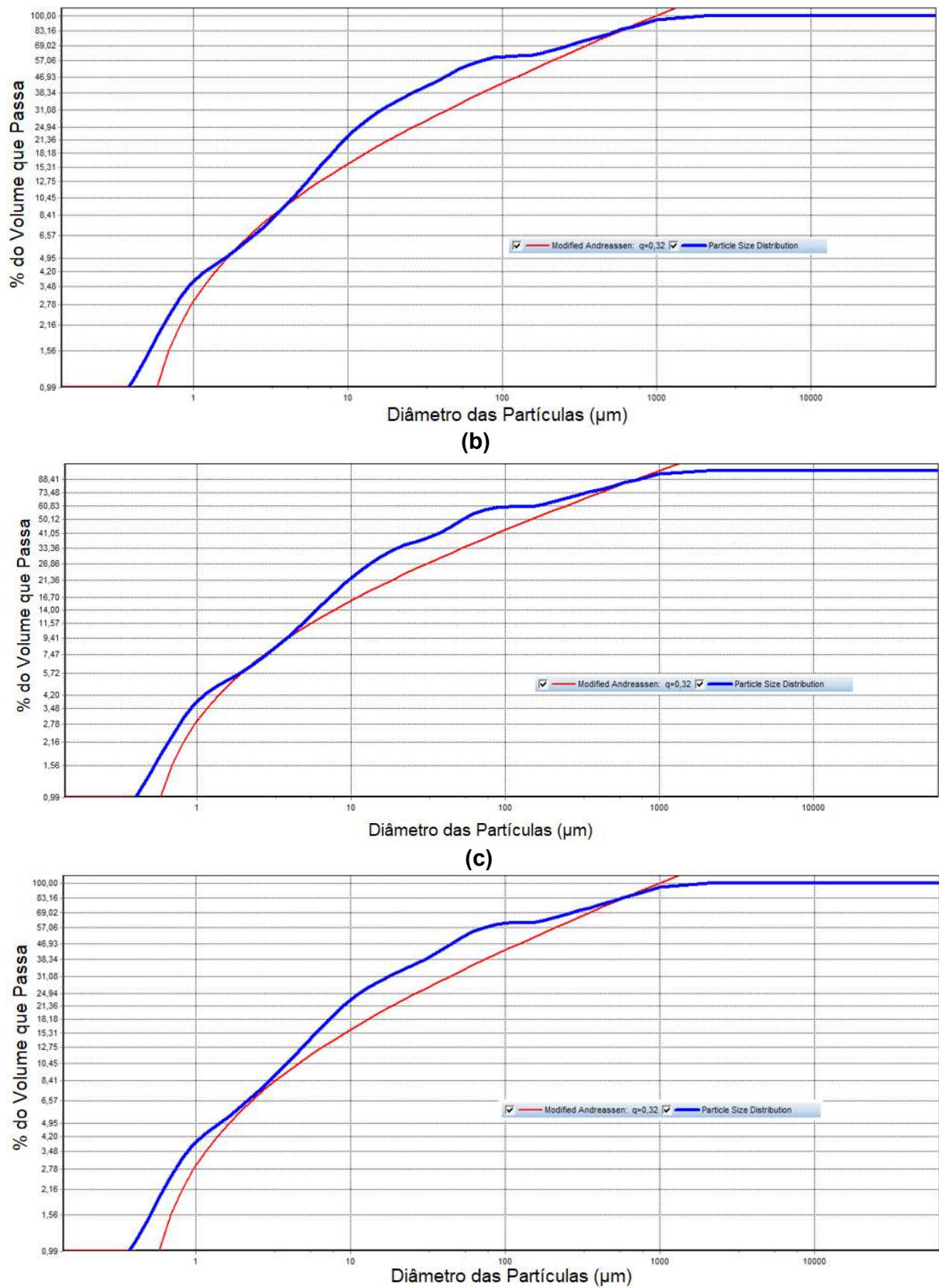
3.3.3 Método de Empacotamento de Partículas e produção do CUAR

Segundo Tutikian *et al.* (2011), o conceito básico para a dosagem do CUAR é a homogeneidade e a compacidade granular. A homogeneidade é obtida eliminando o agregado grão, restando o agregado miúdo, cimento, adição mineral, aditivo químico e água. E, por meio da compacidade entre os sólidos do material, obtém-se a compacidade granular.

O EMMA - *Elkem Material Mix Analyzer* (Analisador de Mistura de Material Elkem), com direitos da *Elkem S/A* (2012), versão 3.5.2, é um aplicativo que calcula e exibe a distribuição de tamanho de partícula de uma mistura de componentes. Ele foi originalmente desenvolvido para projetar composições refratárias autoescoáveis na *Elkem S/A*. Atualmente, a análise da distribuição do tamanho de partículas de diferentes produtos de construção, concreto, etc, é investigada por essa ferramenta.

O método utilizado para a determinação da dosagem foi o Andreassen Modificado com o auxílio do aplicativo EMMA com os parâmetros de $q = 0,32$ e tamanho das partículas, menor partícula 0,42 μm e maior partícula 1000 μm . Está demonstrado na figura 13 as curvas das dosagens utilizadas onde as curvas demonstram o empacotamento das partículas para os componentes secos, de acordo com a granulometria, proporção e densidade.

Figura 13 – Distribuição de partículas da receita Andreassen Modificado $q=0,32$ e CUAR I CP II E 40 (a), e CUAR II CP V ARI (b) e CUAR III CP V ARI RS (c)



Fonte: (ELKEM S/A, 2012) (adaptado).

Foram avaliados dois processos de mistura para o CUAR. A produção do CUAR ocorreu no laboratório de concreto da Faculdade Vale do Gortuba (FAVAG), em Nova Porteirinha - MG. Primeiro consistiu em misturar todos os sólidos (sílica ativa + areia fina + pó de quartzo + cimento Portland) por 3 minutos em velocidade baixa, e posteriormente inserir os líquidos (água + aditivo superplastificante) (JUSTS, Janis *et al.*, 2011). Devido ao alto volume da sílica ativa não densificada, a argamassadeira eletro-mecânica I-3010, da *Pavintest Contenco*, de 5 litros, utilizada, não comportava o volume a ser produzido ainda em sólidos.

Sendo assim, optou-se pelo segundo método, adaptado de Khaloo *et al.* (2017), que inicialmente, mistura-se a sílica ativa não densificada, os agregados (areia fina e pó de quartzo), juntamente com a água e o superplastificante em velocidade baixa por 3 minutos, reduzindo o volume da sílica ativa. Posteriormente foi inserido o cimento Portland, em duas etapas em velocidade baixa por 30 segundos, e misturou-se por 5 minutos em velocidade alta.

Após várias tentativas de se determinar o processo de mistura e de índice de consistência, foi determinado a produção de 1,3 litros de CUAR por traço produzido, gerando 6 CPs. A tabela 11 apresenta a dosagem e traço utilizados. Foram moldados um total de 72 CPs para a dosagem apresentada.

Tabela 11 – Dosagem e traço em massa dos CUAR utilizados neste trabalho

Materiais Constituintes	CUAR I CP II - E 40		CUAR II CP V - ARI		CUAR III CP V - ARI RS		CUAR I CP II - E 40	CUAR II CP V - ARI Fácil	CUAR III CP V - ARI RS
	kg/m³	%	kg/m³	%	kg/m³	%	Traço em massa		
Cimento Portland	900,0	37,2	900,0	37,2	900,0	37,0	1,000		
Sílica não	240,0	9,9	240,0	9,9	240,0	9,9	0,267		
Areia - 0,600mm	320,0	13,2	320,0	13,2	320,0	13,2	0,356		
Areia - 0,300mm	270,0	11,2	270,0	11,2	270,0	11,1	0,300		
Areia - 0,150mm	230,0	9,5	230,0	9,5	230,0	9,5	0,256		
Pó de Quartzo	250,0	10,3	250,0	10,3	250,0	10,3	0,278		
SP - Fluxer PC 3505	18,5	0,8	18,5	0,8	20,0	0,8	0,021	0,021	0,022
Água	190,0	7,9	190,0	7,9	200,0	8,2	0,211	0,211	0,222

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os moldes cilíndricos utilizados foram os de 5 cm de diâmetro e altura de 10 cm ($\Phi 5 \times 10$ cm), mantendo a proporcionalidade da altura duas vezes o diâmetro. Após aplicação de desmoldante nos moldes, foram inseridas 3 camadas com 10 golpes cada camada e 5 golpes na lateral do molde, com o acomodar a mistura, e foi submetido à mesa vibratória durante 30 segundos. Posteriormente foram cobertos com filme plástico (YI *et al.*, 2012), com intenção de reduzir a retração, nas primeiras 24h e submetidos a cura úmida por imersão em água saturada com hidróxido de cálcio (cal hidratada) nas 24h seguintes. Os CPs que foram curados por imersão, seguiram em cura úmida até 1 dia antes do ensaio. Os CPs que foram submetidos à cura térmica, ficaram em estufa por 24h à 220 °C (JUSTS, *et al.*, 2010), em ambiente seco, e armazenados em local protegido e arejado até a data do ensaio. Foram utilizados 3 CP's para cada ensaio.

3.3.4. *Análise do CUAR no estado fresco*

Para a análise do concreto no estado fresco o índice de consistência conforme NBR 13276 (ABNT, 2016a) foi utilizado. O método indica que após a preparação da mistura, utilizá-la para encher o molde tronco-cônico, colocado de modo centralizado sobre a mesa para índice de consistência. Deve-se enchê-lo em três camadas sucessivas, com alturas aproximadamente iguais, e aplicar em cada uma delas, respectivamente, 15, 10 e 5 golpes com o soquete, de maneira a distribuí-las uniformemente. Elimina-se qualquer partícula em volta do molde com pano ou esponja úmidas. Em seguida acionar a manivela da mesa para índice de consistência, de modo a que a mesa suba e caia 30 vezes em 30 s de maneira uniforme e imediatamente após a última queda da mesa, medir o espalhamento do molde tronco-cônico original de argamassa. Estas medidas devem ser realizadas em três diâmetros tomados em pares de pontos uniformemente distribuídos ao longo do perímetro. Registrar as três medidas e o índice de consistência da argamassa corresponde à média das três medidas de diâmetro, expressa em milímetros e arredondada ao número inteiro mais próximo.

3.3.5. *Análise do CUAR no estado endurecido*

O comportamento do concreto em seu estado endurecido foi avaliado por meio da realização dos seguintes ensaios:

- Resistência à Compressão Axial (NBR 5739:2007);
- Módulo de elasticidade (NBR 8522:2017);
- Tração por Compressão Diametral (NBR 7222:2011).

3.3.5.1. Resistência à compressão axial e módulo de elasticidade

O ensaio de resistência à compressão axial consiste na determinação da carga máxima de ruptura suportada pelo CP, que nesse caso foi realizado nas idades de 1 e 4 dias do concreto. As faces de contato dos CPs com os pratos da prensa foram retificadas com auxílio do equipamento modelo *FULL* da marca *Setor Ind.* O ensaio foi realizado como prescreve a norma NBR 5739 (ABNT, 2007), utilizando a prensa hidráulica *EMIC* do Departamento de Engenharia Civil do CEFET-MG, que atende aos valores máximos admissíveis pela NBR NM ISO 7500-1 (ABNT, 2016).

O comportamento tensão *versus* deformação foi obtido com o emprego de extensômetros elétricos para a medição dos deslocamentos longitudinais com posterior rompimento a compressão axial aos 28 dias. O módulo de elasticidade foi calculado como prescreve a norma NBR 8522 (ABNT, 2017) e o ensaio, realizado no Laboratório de Mecânica dos Pavimentos e de Materiais do Departamento de Engenharia de Transportes do CEFET-MG.

3.3.5.2. Tração por Compressão Diametral

Foi decidido utilizar o teste de tração por compressão diametral, um método indireto de calcular a tração, utilizando o mesmo equipamento de compressão. Com auxílio de um aparato que transfere as cargas uniformemente, coloca-se a amostra com o eixo no sentido horizontal. Semelhante ao ensaio de compressão axial precisa-se o valor da força máxima ($F_{\text{máx}}$) e valores geométricos para calcular a resistência à tração do material com a equação 4, sendo L = comprimento do corpo de prova; D = diâmetro; $F_{\text{máx}}$ = força máxima suportada pelo corpo de prova, de acordo com a NBR 7222 (ABNT, 2011b).

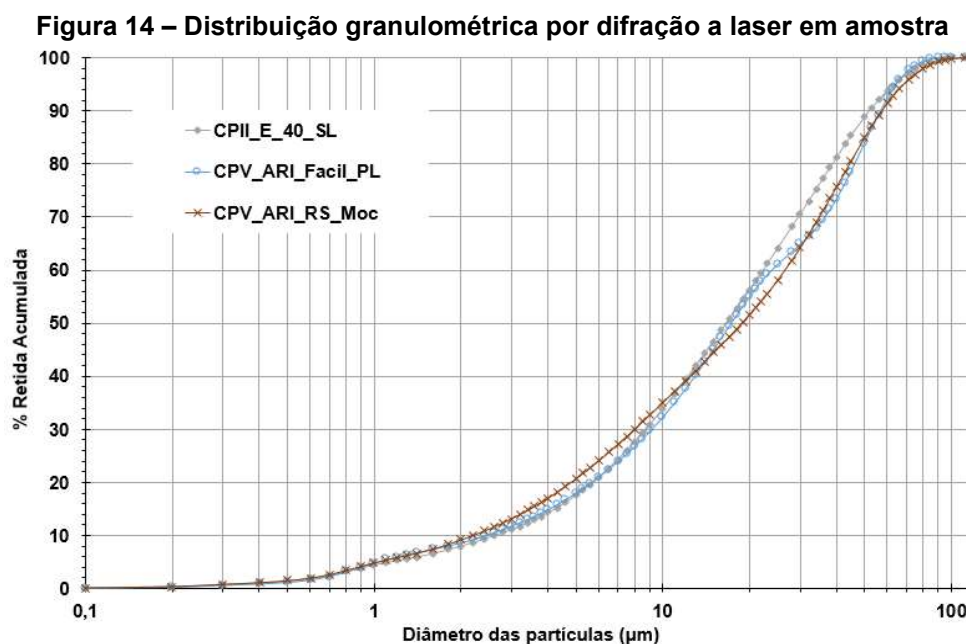
$$f_{t,D} = \frac{2 \cdot F_{\text{máx}}}{\pi \cdot D \cdot L} \quad (4)$$

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Caracterização dos materiais constituintes

4.1.1 Cimento Portland

A figura 14 apresenta a distribuição granulométrica dos cimentos Portland utilizados neste trabalho.



É possível observar que estão bem próximas as curvas granulométricas, pois tratam de cimentos de qualidade especial, segundo os fabricantes. A tabela 12 apresenta a composição granulométrica resumida, superfície específica (B.E.T.) e a massa específica (picnometria a hélio) dos cimentos Portland utilizados neste trabalho.

Tabela 12 – Granulometria resumida, superfície específica e massa específica dos cimentos Portland.

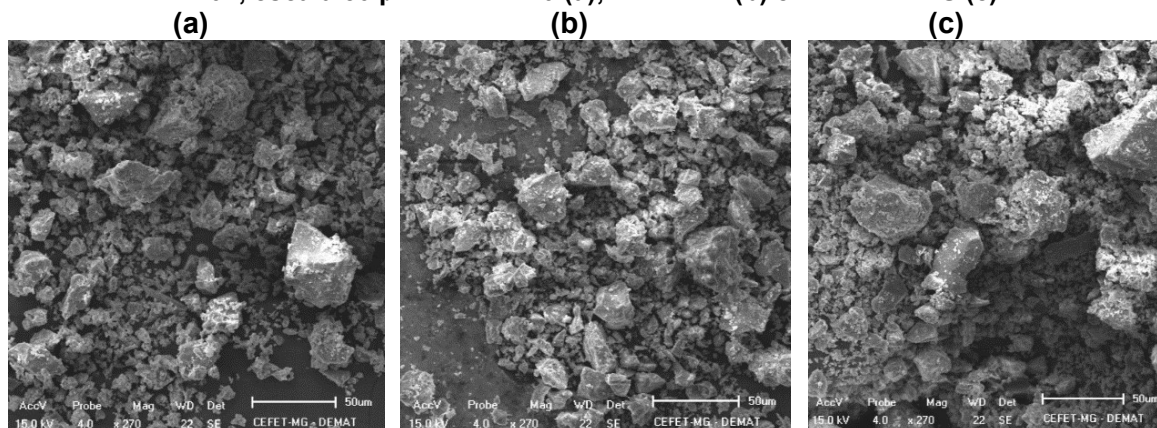
Tipo Cimento (Nome)	Origem (MG)	Granulometria (μm)				Superfície Específica (m^2/g) (B.E.T.)	Massa Específica (kg/m^3)
		D10	D50	D90	Φ médio		
CP II - E 40	Sete Lagoas	2,62	16,59	52,08	22,75	1,65	2995
CP V - ARI	Pedro Leopoldo	2,44	17,28	56,87	24,82	1,41	3058
CP V - ARI RS	Montes Claros	2,20	18,82	57,50	25,10	1,22	3044

Fonte: Resultados dos ensaios.

A superfície específica do CP II E 40 está ligeiramente maior, em consonância com o diâmetro médio apresentado, assim como os outros cimentos Portland.

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) para os tipos de cimento Portland estão apresentados na figura 15. É possível perceber a angulosidade dos grãos presentes nos cimentos Portland e a variação na granulometria do material.

Figura 15 – Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) dos cimentos Portland, aumentada 270x, escala 50 μm : CP II E 40 (a), CP V ARI (b) e CP V ARI RS (c)



Fonte: Resultados dos ensaios.

4.1.2 Superplastificante

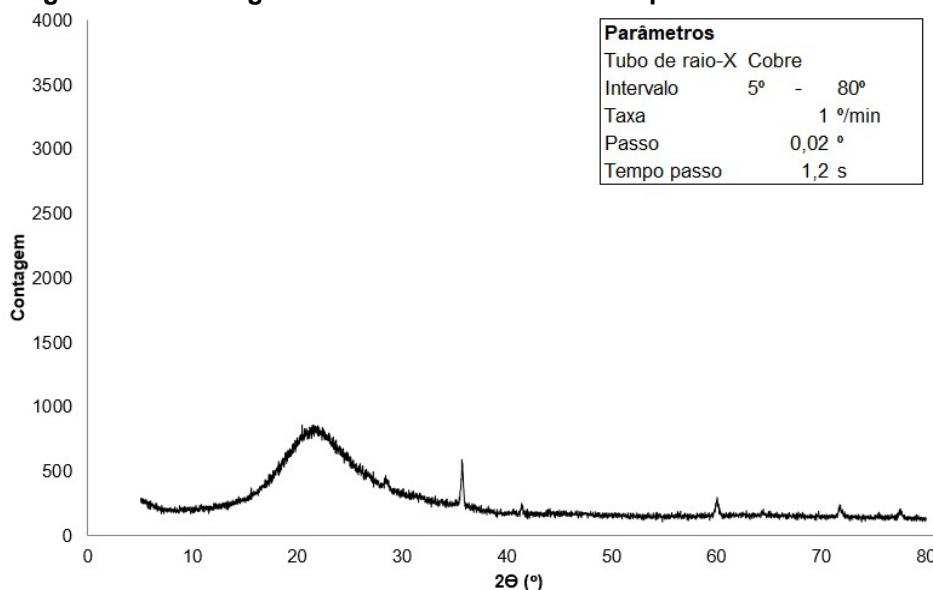
Uma análise do teor que proporcionou aumento no índice de consistência, mantendo a coesão e trabalhabilidade, sem exsudação no CUAR, foi de 2% da massa do material cimentício para esta pesquisa, mantendo a proporcionalidade de autores citados anteriormente. De Larrard e Sedran (1994), Vanderlei e Giongo (2006) e Justs *et al.* (2010) utilizaram uma dosagem de 2% do peso de cimento de superplastificante, Justs *et al.* (2011) utilizou 2,5%, justificando a dosagem superior a recomendada pelo fabricante, devido ao alto teor cimentício e de sílica ativa nas misturas.

4.1.3 Sílica ativa

Em sua grande maioria, o espectro da difração de raios X não apresenta picos muito bem definidos, característica de um material com estrutura mineral interna amorfa. Na figura 16, é apresentado o Difratograma de raios X e os parâmetros de análise. O resultado desse

ensaio já era esperado pelo autor, uma vez que a estrutura interna não cristalina é um dos fatores que sugerem a alta reatividade do material.

Figura 16 - Difratoograma de raios X em amostra e parâmetros de análise.



Fonte: Resultados da pesquisa.

A composição química por FRX da amostra de sílica ativa está disposta na tabela 13.

Tabela 13 - Análise química da sílica ativa.

Composição Química	Porcentagem
SiO ₂	ordem de 95%
Al ₂ O ₃ , CaO, K ₂ O	> 1% - < 5%
P ₂ O ₅ , F ₂ O ₃ , SO ₃ , MnO, SrO, ZnO	<1%

Fonte: Resultados da pesquisa.

Essa análise sugere que os teores de Al₂O₃, Fe₂O₃ e SiO₂, quando somados, estão bem acima de 70%, limite inferior da classificação de materiais pozolânicos da norma NBR 12653 (ABNT, 2014b).

A superfície específica da sílica ativa obtida pelo método B.E.T foi de 27,32 m²/g e a massa específica obtida pelo método de picnometria a hélio foi de 2,23 g/cm³. O índice de atividade pozolânica obtida pelo método Chapelle Modificado foi de 1.334 mg Ca(OH)₂/g de adição pozolânica (mg_{CH}/g_{PZ}), foram consumidos 61,6 ml na solução branco e 21,9 ml na solução com a sílica ativa de HCl 0,1 M, e fator de correção 0,909 do HCl. A tabela 14 apresenta a comparação dos resultados obtidos com a pesquisa Hoppe Filho *et al.* (2017).

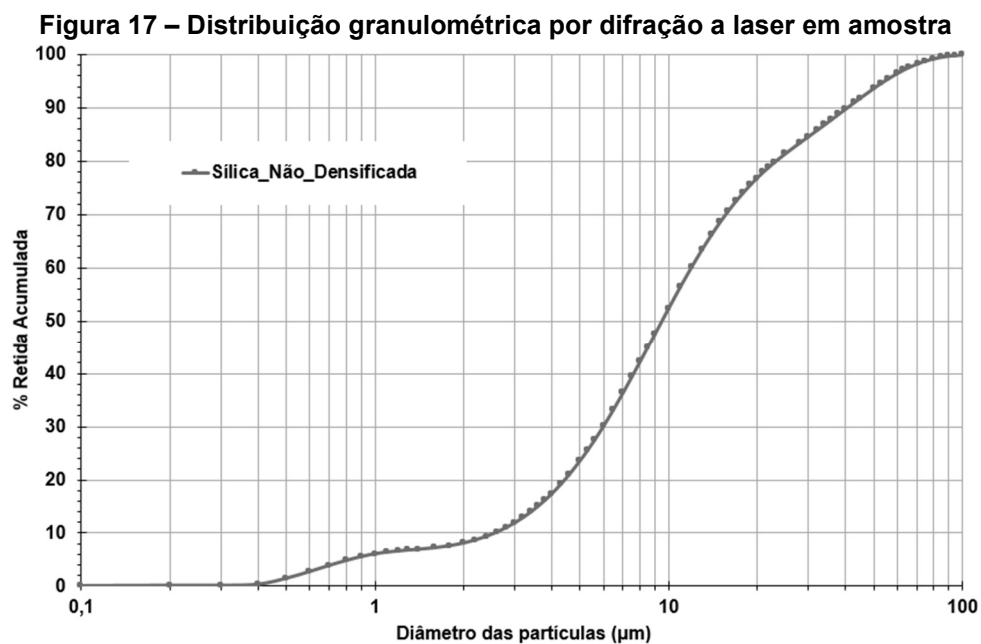
Tabela 14 – Comparação entre os resultados desta pesquisa e de Hoppe Filho *et al.*, 2017

Propriedade	Unidade	Pesquisa	Filho <i>et al.</i> , 2017
Superfície Específica (B.E.T)	m ² /g	27,32	20,24
Índice de Atividade Pozolânica	mg _{CH} /g _{PZ}	1334	1542
Massa Específica	g/cm ³	2,23	2,18

Fonte: Resultados da pesquisa; (HOPPE FILHO *et al.*, 2017) (adaptado)

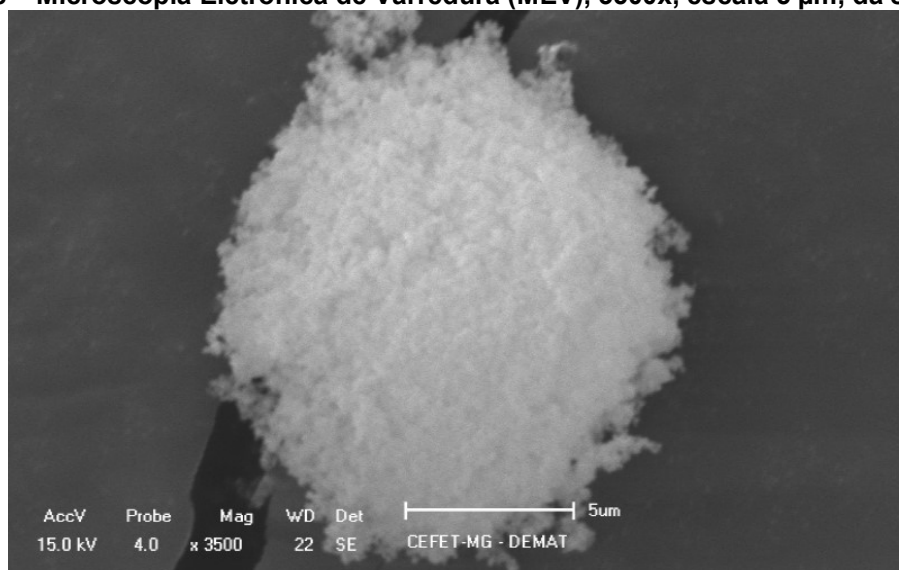
Resultados encontrados por Quarcioni *et al.* (2015) para o Índice de Atividade Pozolânica situaram entre 967 e 1.153 mg CaO/grama, equivalente à faixa de 1.276 e 1.522 mg_{CH}/g_{PZ}, após conversão.

A curva granulométrica da sílica ativa, obtida pelo ensaio de granulometria por difração a laser efetuado é demonstrado na figura 17, sendo o diâmetro médio de 15,71 µm.



A figura 18 apresenta a microscopia eletrônica de varredura (MEV) da sílica ativa, demonstrando o formato esférico e proximidade ao diâmetro médio das partículas, apesar de aparentemente, haver um conglomerado de partículas menores ao redor.

Figura 18 – Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), 3500x, escala 5 µm, da sílica ativa.



Fonte: Resultados dos ensaios.

A sílica ativa apresentou resultados satisfatórios, pois auxiliará na reação pozolânica que ocorre devido à interação da sílica ativa com o hidróxido de cálcio do cimento Portland, produzindo silicato de cálcio hidratado (C-S-H), material resistente e estável, que favorece a durabilidade dos compósitos, aumentando a resistência e diminuindo a permeabilidade do sistema devido ao processo de refinamento dos poros (AITCIN, 2000) e também no efeito fíler que ocorre devido à diminuição da porosidade total do sistema promovida pelo preenchimento dos vazios de empacotamento, de poros capilares e de gel (VELASCO, 2002).

4.1.4 *Pó de Quartzo*

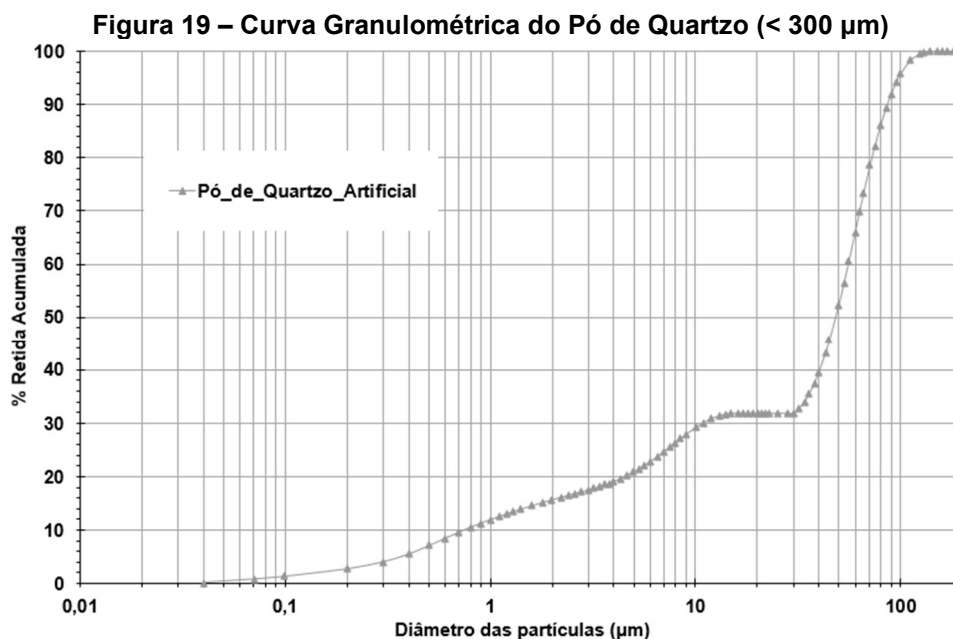
A composição granulométrica por peneiramento da amostra de pó de quartzo está disponível na tabela 15, obtendo o módulo de finura igual 0,99.

Tabela 15 – Composição Granulométrica do Pó de Quartzo.

COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA ABNT NBR NM 248:2003									
PENEIRAS		1ª DETERMINAÇÃO			2ª DETERMINAÇÃO			MÉDIA	
nº	mm	Peso Retido (g)	% Retida	% Acum.	Peso retido (g)	% Retida	% Acum.	% Retida	% Retida Acumulada
3/8"	9,5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	4,8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8	2,4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
16	1,2	2,26	0,45	0,45	2,07	0,42	0,42	0,43	0,43
30	0,6	20,93	4,16	4,61	23,15	4,64	5,05	4,40	4,83
50	0,3	65,73	13,07	17,68	68,34	13,69	18,74	13,38	18,21
150	0,15	302,00	60,05	77,73	277,45	55,57	74,31	57,81	76,02
Fundo	<0,15	111,98	22,27	100,00	128,24	25,69	100,00	23,98	100,00
TOTAL		502,90	100,00		499,25			100,00	

Fonte: Resultados dos ensaios.

Após uma análise da composição granulométrica, utilizou-se o pó de quartzo com granulometria menor que 300 μm (passou pela peneira 0,3 mm), a fim de compor o empacotamento de partículas nas faixas menores. Observou-se que as partículas retidas na peneira de 150 μm , que passaram pela peneira de 300 μm , possuíam uma granulometria aparentemente menor, possivelmente aglomeradas. Acredita-se que grãos podem ter obstruído a passagem das partículas menores. A distribuição granulométrica por difração a laser está apresentada na figura 19. O banho ultrassônico de 60 segundos antes e durante a difração a laser permitiu a dispersão das partículas.

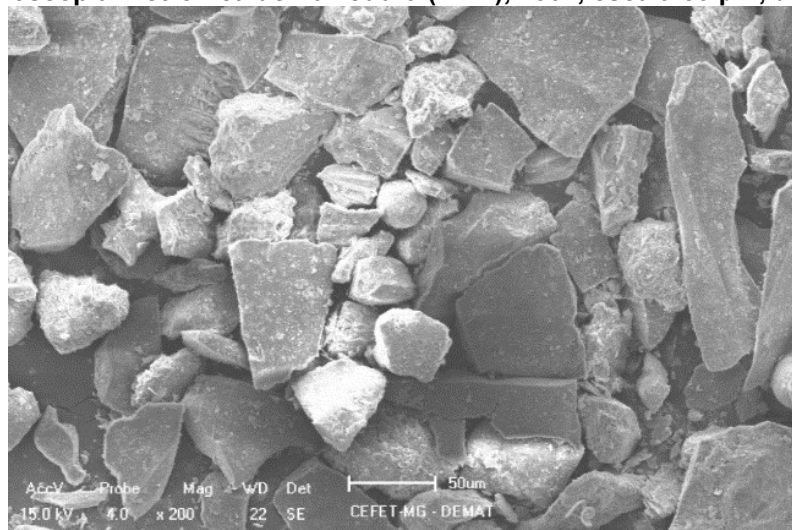


Fonte: Resultados do ensaio.

A superfície específica do pó de quartzo (<300 µm) obtida pelo método B.E.T foi de 2,02 m²/g e a massa específica obtida pelo método de picnometria a hélio foi de 2.830 kg/m³. O pó de quartzo apresentou-se como um material adequado à composição granulométrica dos componentes da mistura nas faixas menores que 3 µm, faixa que os outros materiais da mistura estavam escassos

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) do pó de quartzo está apresentada na figura 20.

Figura 20 – Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), 200x, escala 50 µm, do Pó de Quartzo.



Fonte: Resultados do ensaio.

É possível perceber que os grãos do pó de quartzo são disformes e possuem aspecto de material que sofreu quebra por processo mecânico. A tabela 16 apresenta a composição química do pó de quartzo, com resultados esperados pelo autor.

Tabela 16 – Análise química do Pó de Quartzo.

Composição Química	Porcentagem
SiO ₂	ordem de 83%
Fe ₂ O ₃ , Al ₂ O ₃	> 5% - < 10%
K ₂ O, SO ₃ , Ca ₂ O, Sn ₂ O, Cr ₂ O ₃ , SrO	<1%

Fonte: Resultados do ensaio.

4.1.5 Areia Fina

A areia fina natural foi peneirada a fim de separar os grãos nas granulometrias desejadas. Foram utilizadas as partículas retidas nas peneiras de 0,150 mm, 0,300 mm e 0,600 mm, sendo que, nessa última, passou pela peneira de 1,2 mm.

A superfície específica das areias finas foram obtidas pelo método multiponto utilizando a teoria B.E.T e a massa específica obtida pelo método de picnometria a hélio estão apresentadas na tabela 17

Tabela 17 –Superfície específica (B.E.T) e massa específica das areias finas naturais.

Areia Fina Natural	Superfície específica (B.E.T.) (m²/g)	Massa Específica (kg/m³)
Areia - 0,600mm	0,51	2712
Areia - 0,300mm	0,55	2720
Areia - 0,150mm	0,81	2720

Fonte: Resultados do ensaio.

A composição química da areia fina natural está apresentada na tabela 18, confirmando a origem quartzosa devido o alto teor de SiO₂.

Tabela 18 – Análise química da areia fina natural.

Composição Química	Porcentagem
SiO ₂	ordem de 80%
Al ₂ O ₃ , K ₂ O	> 5% - < 15%
TiO ₂ , SO ₃ , Ca ₂ O, MnO, Rb ₂ O, SrO	<1%

Fonte: Resultados do ensaio.

4.2 Resultados dos ensaios no CUAR

4.2.1 Índice de Consistência

Os resultados do índice de consistência para as misturas estão apresentados na tabela 19.

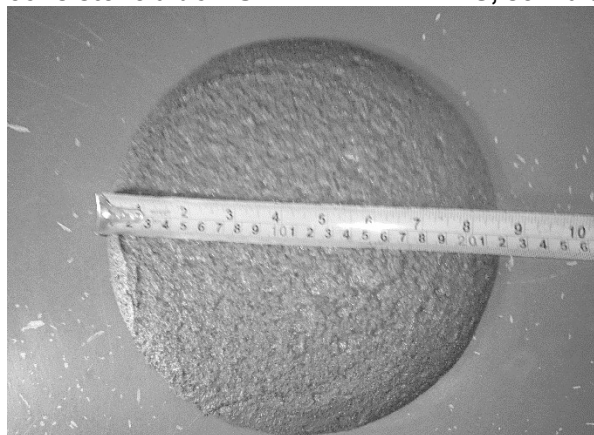
Tabela 19 – Índice de consistência das misturas

Mistura	Relação a/c	Relação a/ag	Índice de Consistência (mm)			
			1	2	3	Média
CP II - E 40	0,21	0,17	250	250	245	248
CP V - ARI Fácil	0,21	0,17	270	270	265	268
CP V - ARI RS	0,22	0,17	237	239	235	237

Fonte: Resultados do ensaio.

A mistura com CP V ARI RS teve sua relação a/c e a/ag ligeiramente alterada para melhorar a trabalhabilidade, pois conforme a figura 21, é apresentado um índice de consistência baixo, prejudicando a moldagem e processo de adensamento da mistura.

Figura 21 – Índice de consistência do CUAR III CP V ARI RS, sem alteração da relação a/c.



Fonte: Resultados do ensaio.

Após os procedimentos de moldagem, o adensamento do material foi considerado satisfatório. Mesmo apresentando valores de índice de consistência variados, as misturas estavam com boa trabalhabilidade durante a moldagem e os CPs não tiveram falhas na superfície após a desmoldagem. Percebeu-se que resultados de índice de consistência a partir de 230 mm para as misturas apresentadas foram necessários para uma boa trabalhabilidade e adensamento.

4.2.2 Resistência à Compressão Axial

A tabela 20 apresenta os resultados da resistência média à compressão axial e o desvio padrão dos CUAR.

Tabela 20 – Resistência média à Compressão Axial e Desvio Padrão (D.P.), cura úmida e térmica

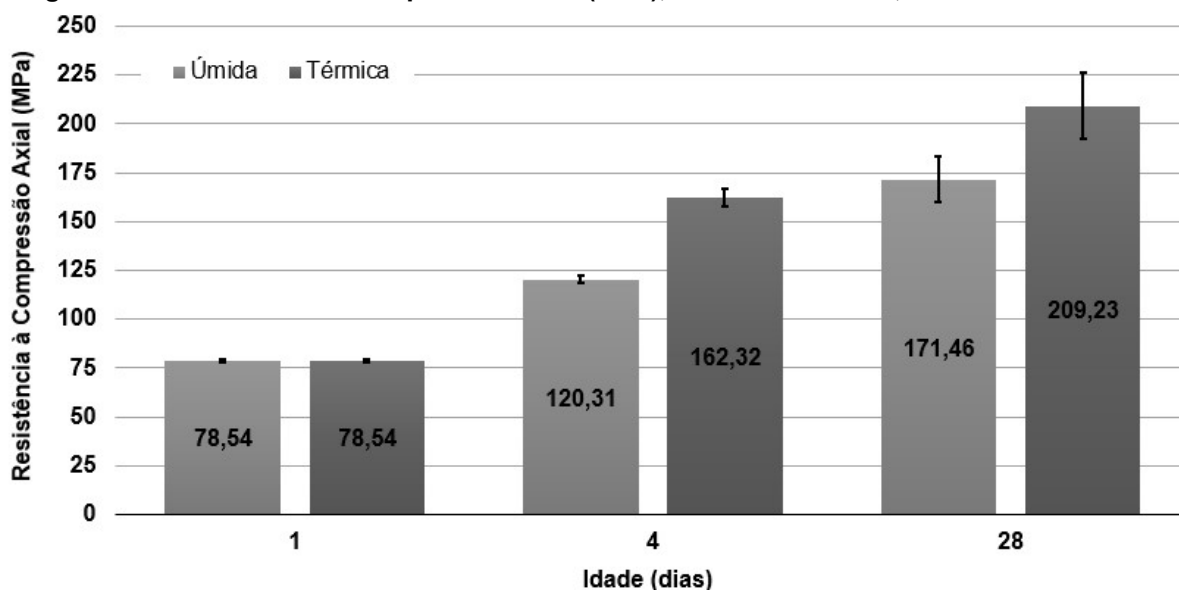
CUAR	1 dia		Cura Úmida				Cura Térmica			
			4 dias		28 dias		4 dias		28 dias	
	Média	D.P.	Média	D.P.	Média	D.P.	Média	D.P.	Média	D.P.
CP II - E 40	78,54	0,58	120,31	1,89	171,46	11,52	162,32	4,21	209,23	16,86
CP V - ARI Fácil	73,78	12,72	120,46	4,13	176,33	2,85	183,84	24,73	208,28	4,83
CP V - ARI RS	54,60	7,22	98,77	6,68	152,33	7,31	147,95	18,42	182,34	7,92

Fonte: Resultados do ensaio.

A seguir, serão analisados os resultados para cada tipo de cimento Portland em relação à idade e ao tipo de cura.

Os resultados para o ensaio de resistência à compressão axial estão apresentados na figura 22 para a mistura do cimento Portland CP II E 40, em cura úmida e térmica, e, para ambas as curas, o primeiro dia foi o mesmo ensaio à compressão axial.

Figura 22 – Resistência à Compressão Axial (MPa), CUAR I CP II E 40, cura úmida e térmica.

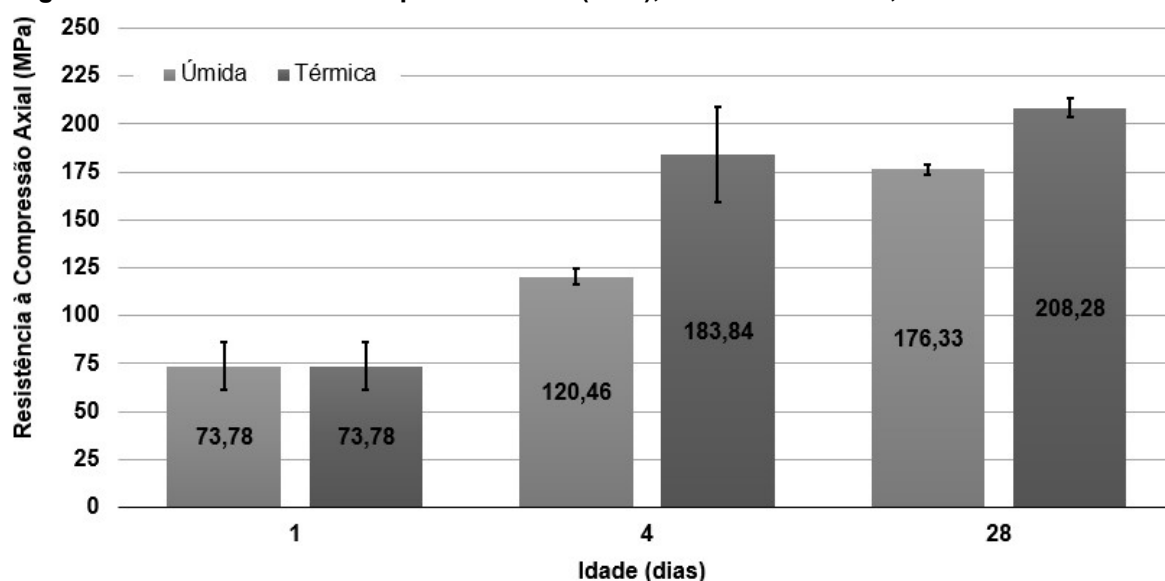


Fonte: Resultados do ensaio.

A resistência à compressão axial em um dia para este cimento foi considerável, além de ter tido um desvio padrão baixo. A cura térmica apresentou ganhos de resistência interessantes aos quatro dias, considerando o desvio padrão. Já aos 28 dias, o acréscimo não foi tão interessante, considerando o desvio padrão. A escória de alto forno, presente no CP II E 40, pode ter influenciado o ganho de resistência em cura úmida. Shi *et al.* (2015) encontrou resistências de 80,1 MPa aos 3 dias e 126,9 MPa aos 56 dias para um traço 1:1:0,16:0,02 (ligante : areia : água : superplastificante), sendo o ligante composto por cimento Portland, escória e sílica ativa.

Os resultados para o ensaio de resistência à compressão axial estão apresentados na figura 23 para a mistura CUAR II CP V ARI, em cura úmida e térmica.

Figura 23 – Resistência à Compressão Axial (MPa), CUAR II CP V ARI, cura úmida e térmica.

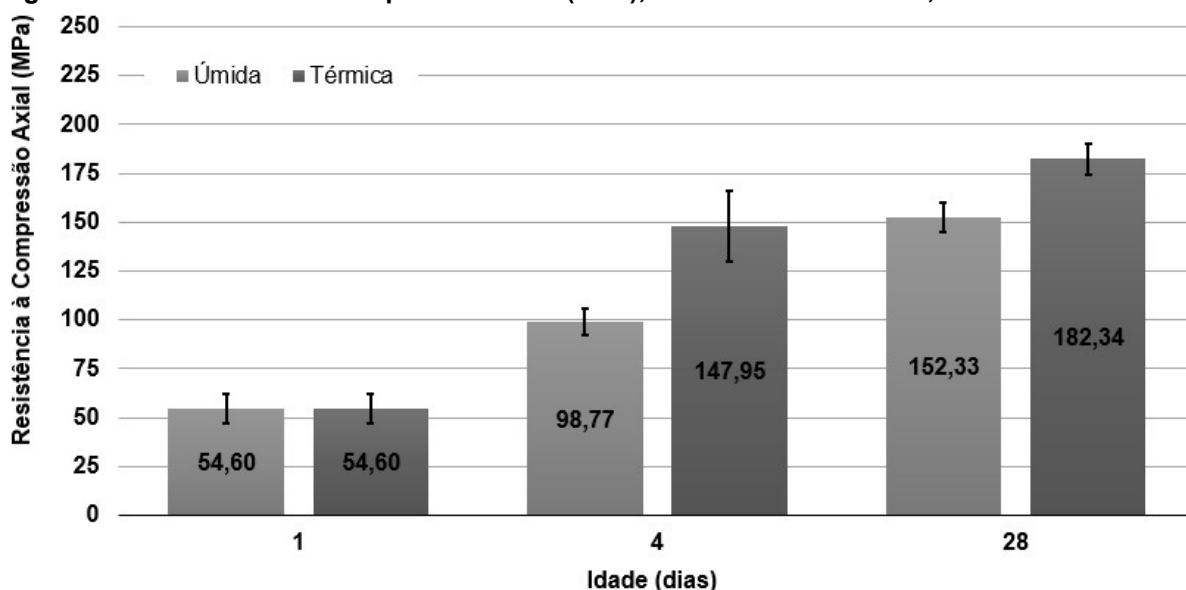


Fonte: Resultados do ensaio.

O resultado do primeiro dia apresentou um desvio padrão considerável. Aos quatro dias é possível perceber que a cura térmica apresentou bom ganho de resistência, mesmo com desvio padrão considerável. Já aos 28 dias, tanto a cura úmida quanto térmica apresentou desvios padrão baixos, e, a cura térmica, apresentou um acréscimo interessante na resistência em relação à cura úmida, porém, relativamente menor que aos quatro dias.

Os resultados para o ensaio de resistência à compressão axial estão apresentados na figura 24 para a mistura CUAR III CP V ARI RS, em cura úmida e térmica, e, para ambas as curas, o primeiro dia foi o mesmo ensaio à compressão axial.

Figura 24 – Resistência à Compressão Axial (MPa), CUAR III CP V ARI RS, cura úmida e térmica



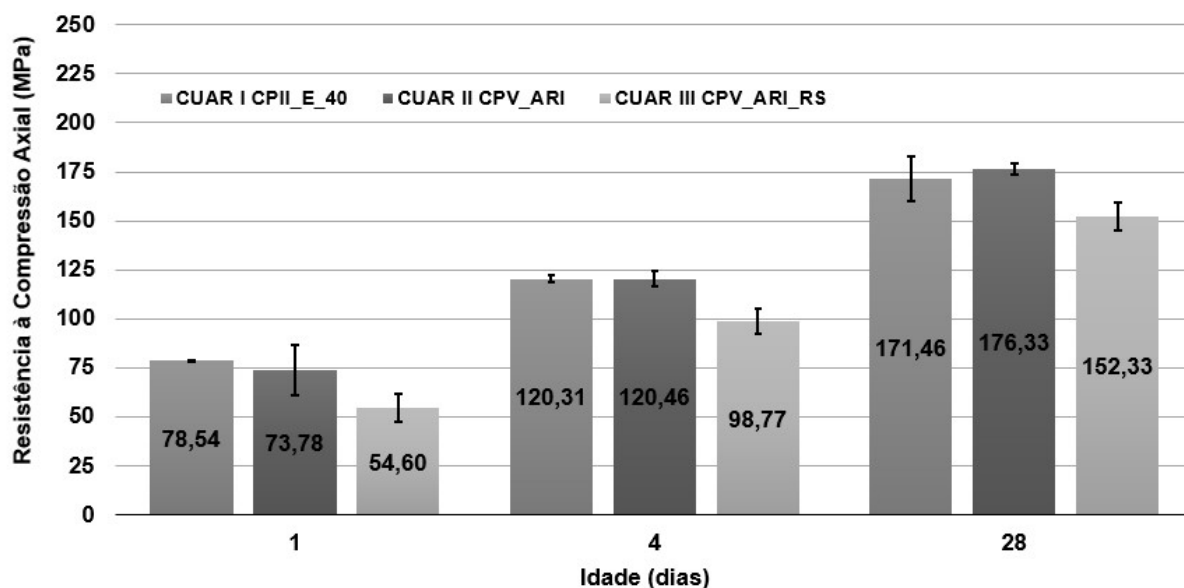
Fonte: Resultados do ensaio.

O resultado do primeiro dia apresentou um desvio padrão considerável. Aos quatro dias é possível perceber que, tanto a cura úmida quanto a térmica, apresentaram ganhos de resistências consideráveis, mesmo com desvio padrão acentuado para a cura térmica. Aos 28 dias, tanto a cura úmida quanto a térmica apresentaram acréscimos interessantes na resistência em relação à idade anterior.

As análises a seguir avaliam o tipo de cura, perante o tipo de cimento ao decorrer da idade.

Os resultados para o ensaio de resistência à compressão axial estão apresentados na figura 25 para a cura úmida e na figura 26 para cura térmica.

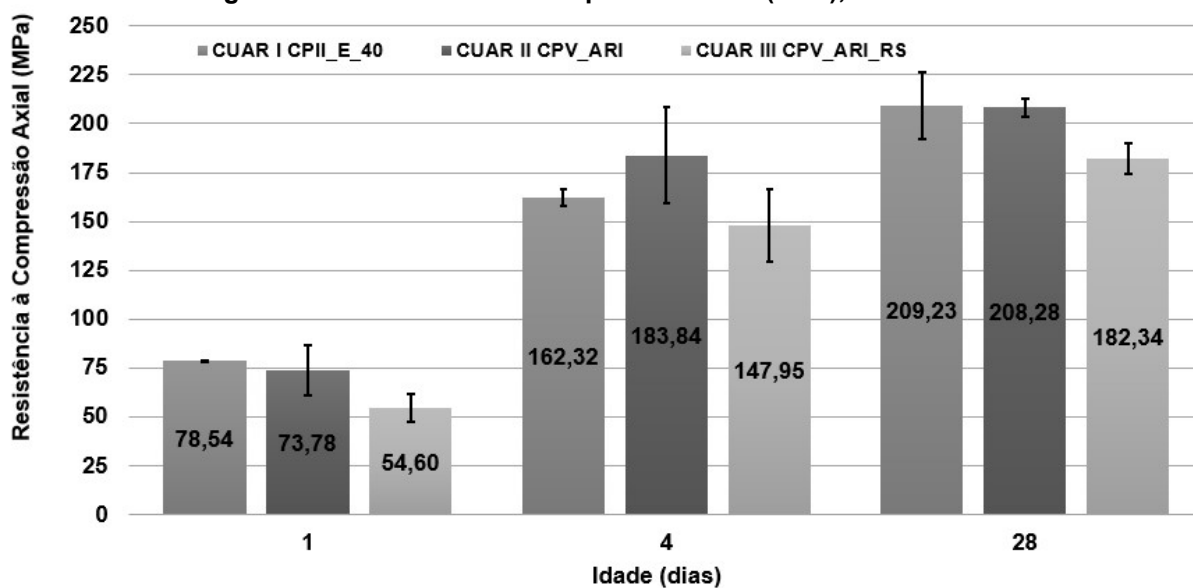
Figura 25 – Resistência à Compressão Axial (MPa), cura úmida



Fonte: Resultados do ensaio.

É perceptível que a resistência inicial do CUAR I CP II E 40, perante os CUAR II CP V ARI e CUAR III CP V ARI RS foi interessante, por se tratar de um cimento composto. A evolução da resistência aos 4 e 28 dias para todos os cimentos foi proporcional na cura úmida. Uma sinergia positiva, no incremento da resistência à compressão axial nos primeiros dias (três dias), entre a sílica ativa e a escória de alto forno foi relatada por Shi *et al.* (2015) enquanto que, em idades superiores, 56 dias, essa sinergia não foi tão acentuada, confirmando os resultados do CUAR I CP II E 40.

Figura 26 – Resistência à Compressão Axial (MPa), cura térmica



Fonte: Resultados do ensaio.

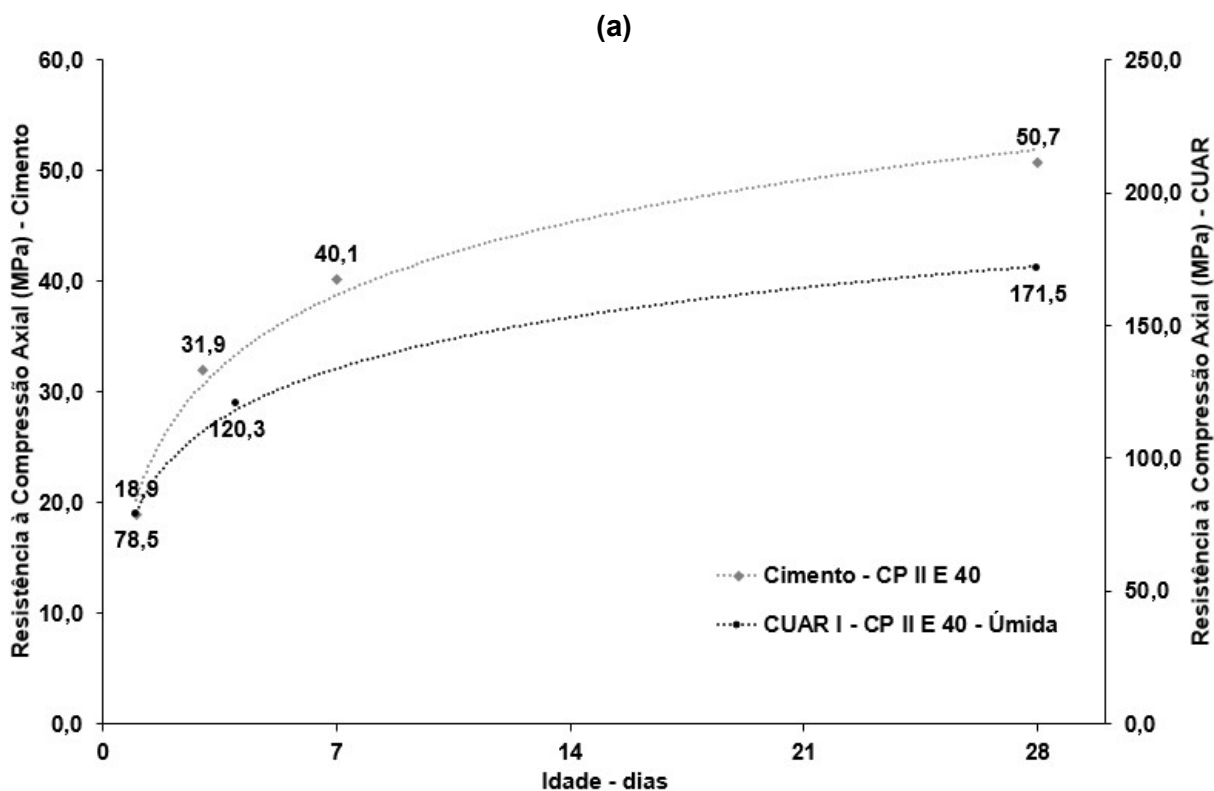
A cura térmica apresentou resultados de acréscimos de resistência aos quatro dias significantes, mas considerando o desvio padrão, estão na mesma faixa de resistência. Já

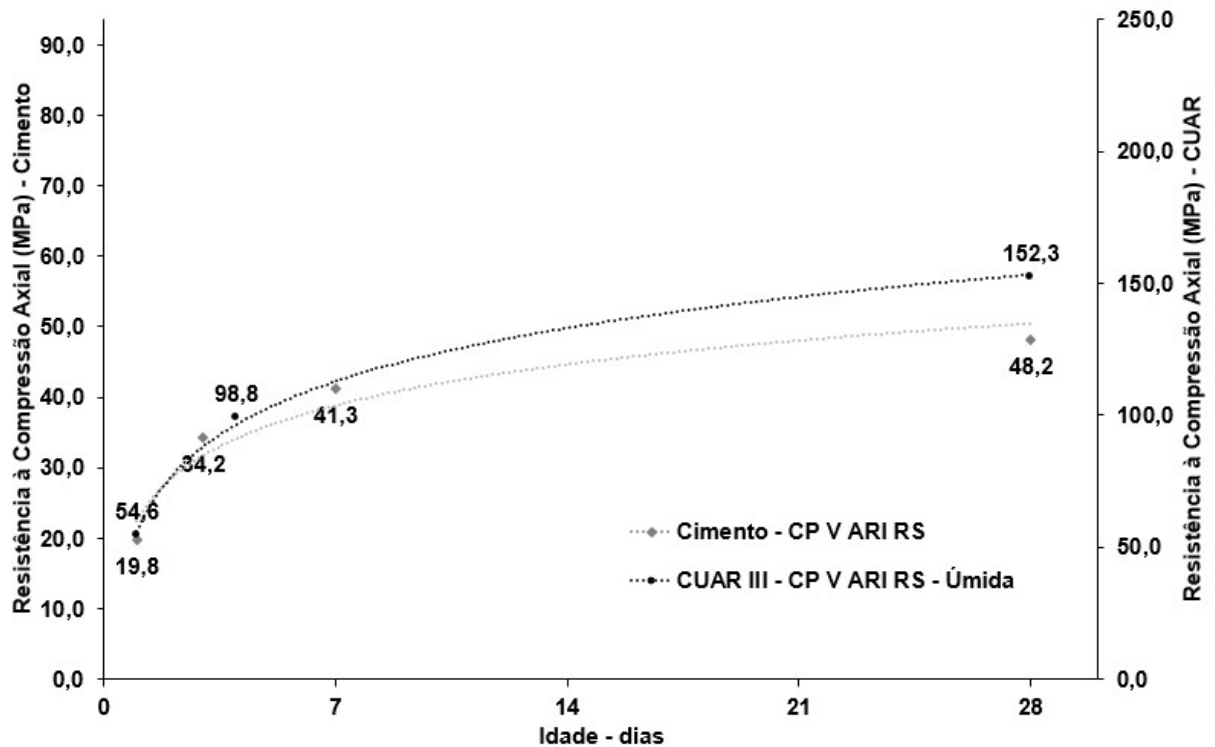
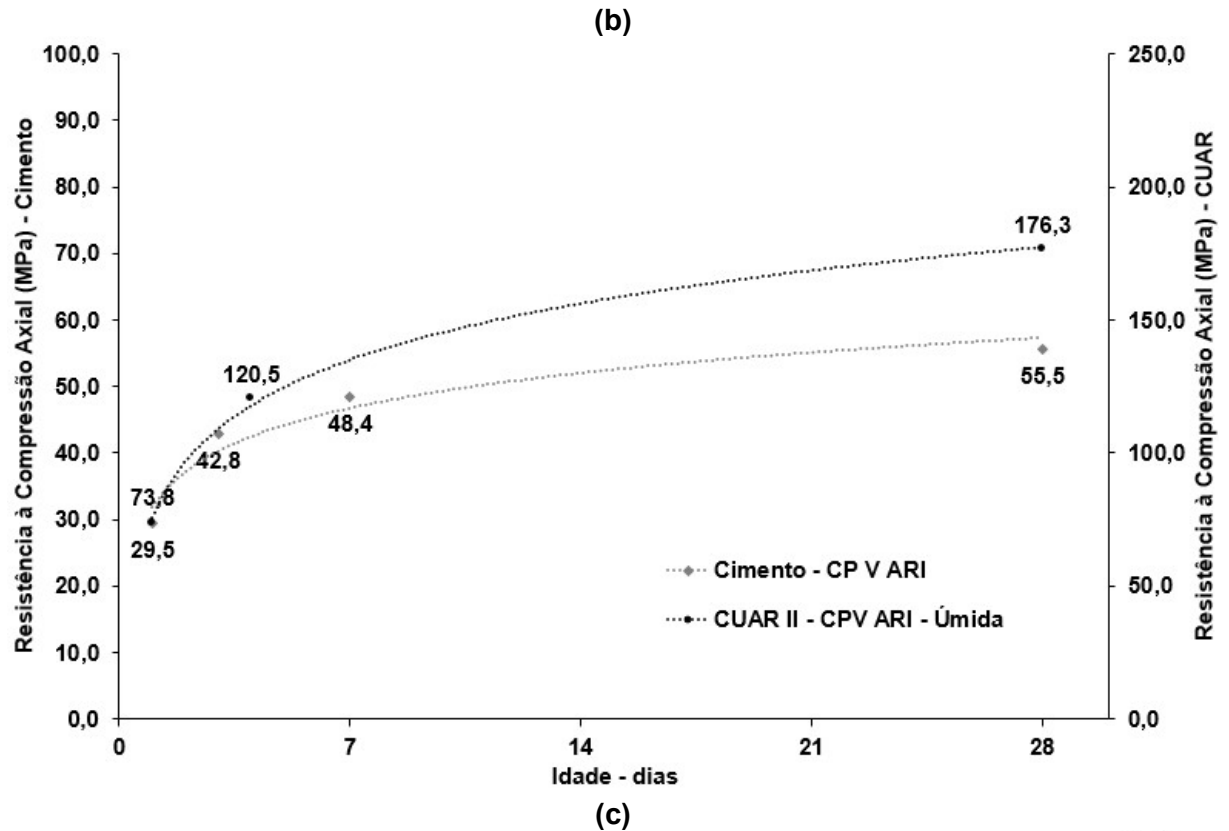
aos 28 dias, o CUAR I CP II E 40 e o CUAR II CP V ARI se destacam com resistências superiores.

De acordo com (MEHTA; MONTEIRO, 2008), a sílica ativa é capaz de contribuir para a resistência de um determinado concreto mesmo no período inicial da hidratação (1 a 3 dias), e a contribuição mais significativa ocorre até os 28 dias de idade. Após esse período, a contribuição da sílica ativa para a resistência final é relativamente pequena.

As resistências fornecidas pelos fabricantes na tabela 6 e comparando-as com as resistências adquiridas em cura úmida nos CUAR produzidos foram apresentadas na figura 27. Para essa comparação, os eixos apresentados têm a proporção da relação entre as resistências de um dia. Sendo assim, as resistências no primeiro dia iniciam simultaneamente.

Figura 27 – Comparação entre Resistência Média à Compressão Axial (MPa) da pasta de cimento e CUAR, em cura úmida, CUAR I CP II E 40 (a), CUAR II CP V ARI (b) e CUAR III CP V ARI RS (c)





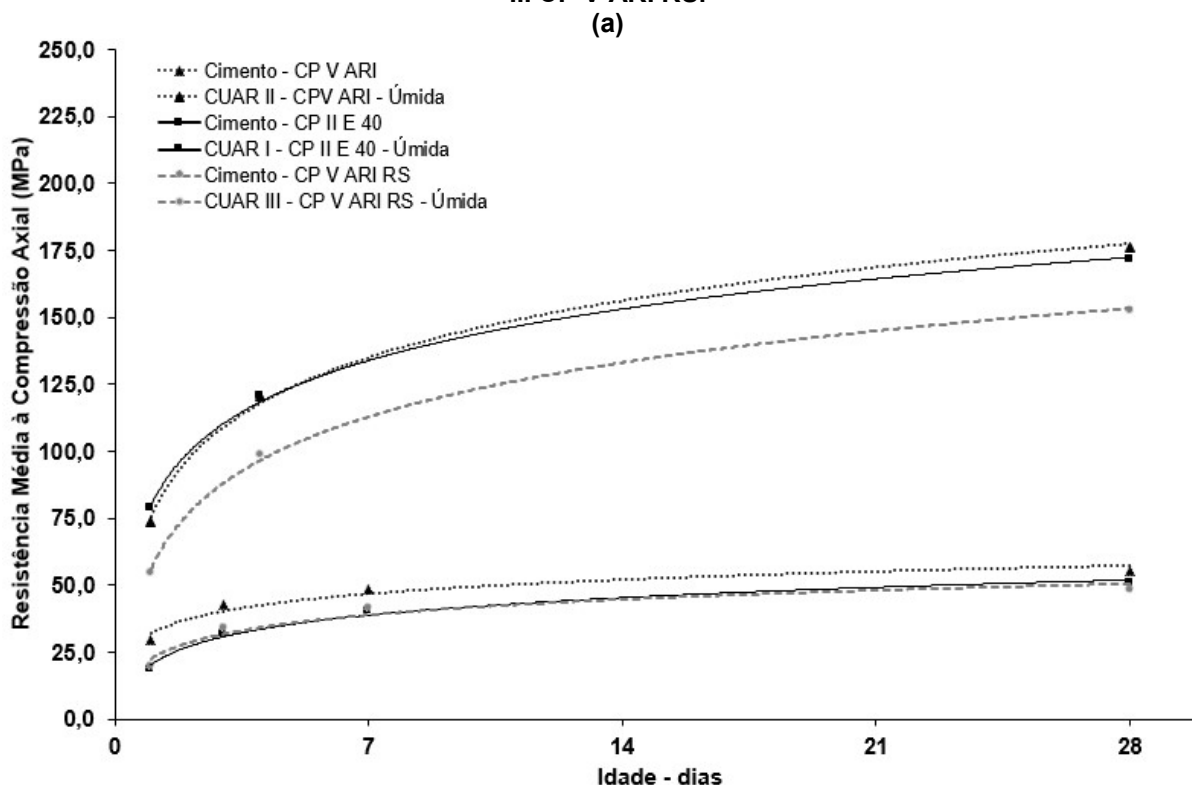
Fonte: Resultados da pesquisa.

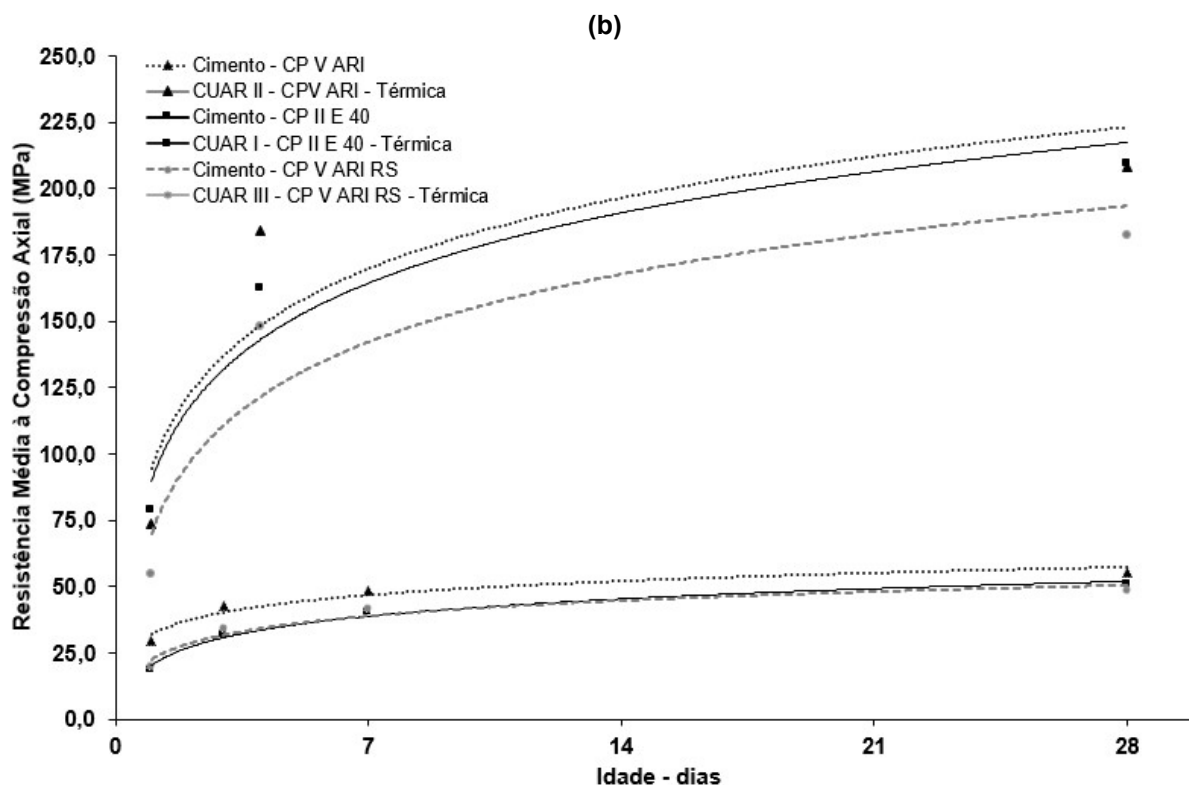
A comparação do cimento CP II E 40 se diferencia das comparações dos dois cimentos CP V ARI, pois, para o CUAR I CP II E 40, a curva aproximada da evolução da resistência do ensaio da pasta de cimento adquire mais resistência proporcional ao passar do tempo. Já para os CP V ARI, os CUAR adquirem mais resistência proporcional ao passar do tempo. Nessa comparação entre o cimento e o CUAR, inicialmente acredita-se que o CP II E 40, por

ser um cimento composto de escória de alto forno, apresenta um comportamento de reações diferenciadas dos CP V ARI, perante a evolução como CUAR.

Na figura 28a, é perceptível a característica melhorada no CUAR em cura úmida apresentada pelo CP II E 40, pois, enquanto ensaios com pasta de cimento se equipara com CP V ARI RS, no CUAR segue a tendência do CP V ARI.

Figura 28 – Comparação entre Resistência Média à Compressão Axial (MPa) da pasta de cimento e CUAR, em cura úmida (a) e térmica (b), CUAR I CP II E 40, CUAR II CP V ARI e CUAR III CP V ARI RS.





Na figura 28b, é perceptível a característica melhorada no CUAR também na cura térmica apresentada pelo CP II E 40, pois, enquanto ensaios com pasta de cimento se equiparam com CP V ARI RS, no CUAR se aproxima a tendência do CP V ARI. Acredita-se que o comportamento do cimento CP II E 40 em relação aos componentes da mistura foram melhorados perante os cimentos CP V ARI.

A tabela 21 apresenta a correlação entre as resistências à compressão axial, apresentando o percentual de incremento, de acordo com a idade anterior.

Tabela 21 – Correlação de incremento entre as resistências à compressão axial (MPa) de acordo a idade anterior.

CUAR (MPa)	1 dia	Cura Úmida				Cura Térmica			
	Média	4 dias Média	% incremento à 1 dia	28 dias Média	% incremento à 4 dias	4 dias Média	% incremento à 1 dia	28 dias Média	% incremento à 4 dias
CUAR I CP II - E 40	78,54	120,31	53%	171,46	43%	162,32	107%	209,23	29%
CUAR II CP V - ARI	73,78	120,46	63%	176,33	46%	183,84	149%	208,28	13%
CUAR III CP V - ARI RS	54,60	98,77	81%	152,33	54%	147,95	171%	182,34	23%

Fonte: Resultados do ensaio.

Nessa correlação é possível perceber que, apesar de apresentar números absolutos relativamente abaixo de resistência à compressão axial, o CUAR III CP V ARI RS apresentou incrementos em relação a idade anterior interessantes, tanto para cura úmida quanto térmica. É possível também visualizar o considerável incremento de resistência à compressão axial proporcionado pela cura térmica. A tabela 22 apresenta o percentual de incremento da cura térmica perante a cura úmida nas mesmas idades.

Tabela 22 – Correlação de incremento entre as resistências à compressão axial (MPa) de acordo o tipo de cura nas mesmas idades.

CUAR (MPa)	Cura Úmida	Cura Térmica	%	Cura Úmida	Cura Térmica	%
	4 dias	4 dias	incremento	28 dias	28 dias	incremento
	Média	Média	cura térmica	Média	Média	cura térmica
CUAR I CP II - E 40	120,31	162,32	35%	171,46	209,23	22%
CUAR II CP V - ARI	120,46	183,84	53%	176,33	208,28	18%
CUAR III CP V - ARI RS	98,77	147,95	50%	152,33	182,34	20%

Fonte: Resultados do ensaio.

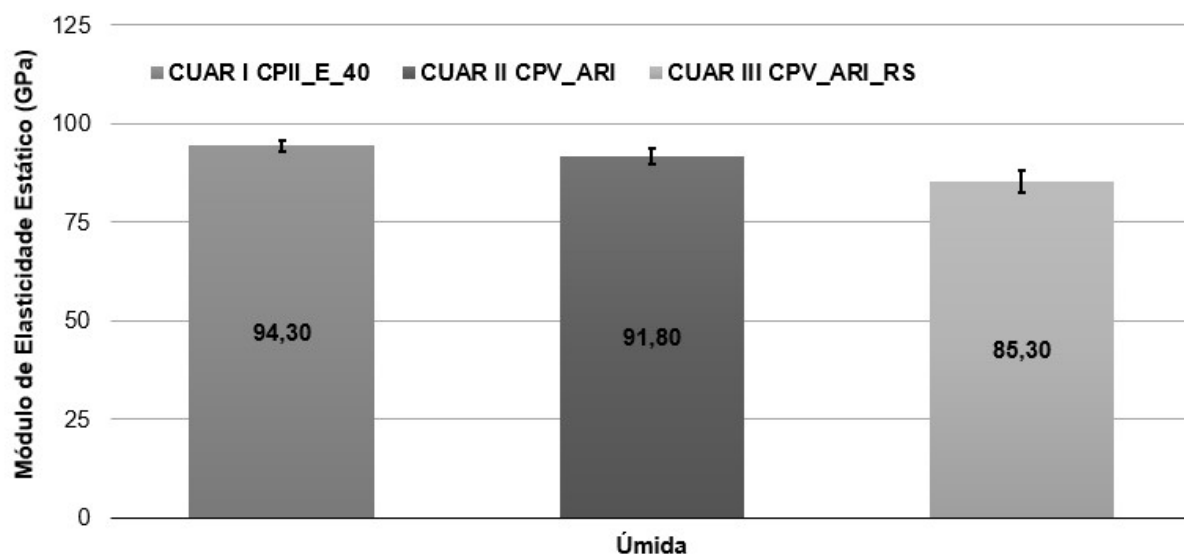
É possível perceber que os CUAR II CP V ARI e CUAR III CP V ARI RS apresentaram incrementos mais interessantes aos quatro dias por cura térmica em comparação com o CUAR I CP II E 40. É possível também visualizar que o incremento proporcionado pela cura térmica aos 28 dias se manteve regular.

O consumo de cimento Portland para alcançar Concreto de Ultra-Alta Resistência (CUAR) ($670\text{--}1200\text{ kg/m}^3$) (ABBAS *et al.*, 2016), em números absolutos, aparenta ser alto em comparação com o consumo em Concretos Convencionais (CC) ($260\text{--}400\text{ kg/m}^3$) e Concretos de Alta Resistência (CAR) ($400\text{--}600\text{ kg/m}^3$) (CREMONINI *et al.*, 1998), mas quando comparado às resistências à compressão axial atingidas é possível perceber que se trata de um melhor aproveitamento do potencial do cimento Portland em conjunto com os materiais constituintes. Considerando essas informações, é possível inferir que cada quilograma de cimento Portland pode proporcionar na resistência à compressão axial em torno de 0,12 MPa no CC, em torno 0,16 MPa no CAR e em torno de 0,20 MPa no CUAR, por metro cúbico de concreto. Sendo assim, observa-se que a quantidade de MPa por metro cúbico de cimento Portland é maior no CUAR, demonstrando a eficácia nas técnicas empregadas para produção deste material.

4.2.3 Módulo de Elasticidade Estático

Os módulos de elasticidade estáticos, ensaiados aos 28 dias, estão apresentados na figura 29, para a cura úmida.

Figura 29 – Módulo de Elasticidade Estático (GPa), cura úmida, aos 28 dias

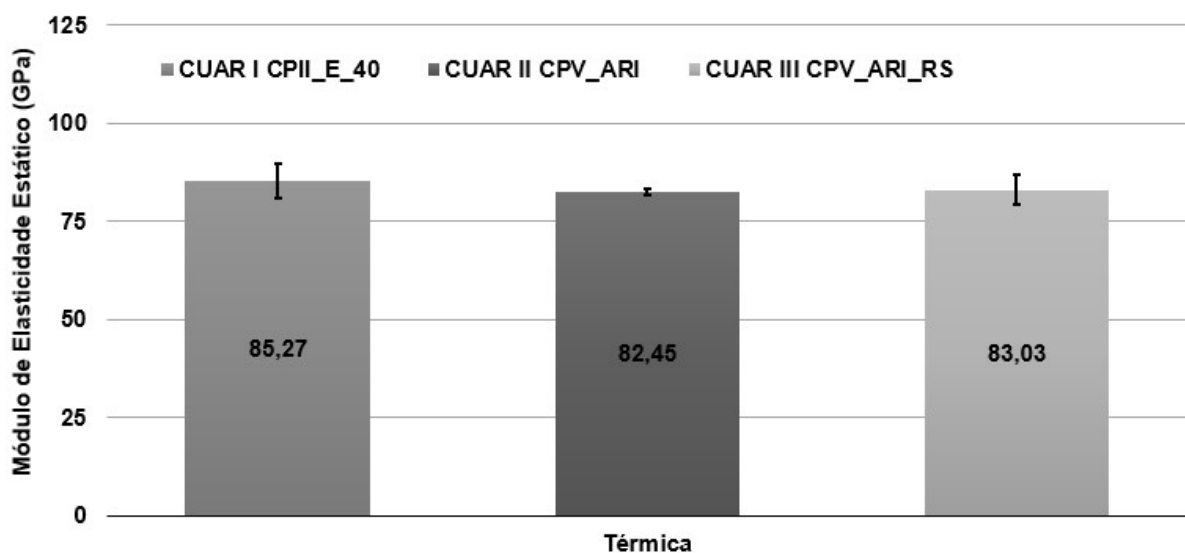


Fonte: Resultados do ensaio.

Os módulos de elasticidade para a cura úmida não demonstraram diferenças significativas entre os CUAR, e os resultados acompanharam proporcionalmente os resultados da resistência à compressão axial.

Os módulos de elasticidade estáticos, aos 28 dias, estão apresentados na figura 30 para a cura térmica.

Figura 30 – Módulo de Elasticidade Estático (GPa), cura térmica, aos 28 dias

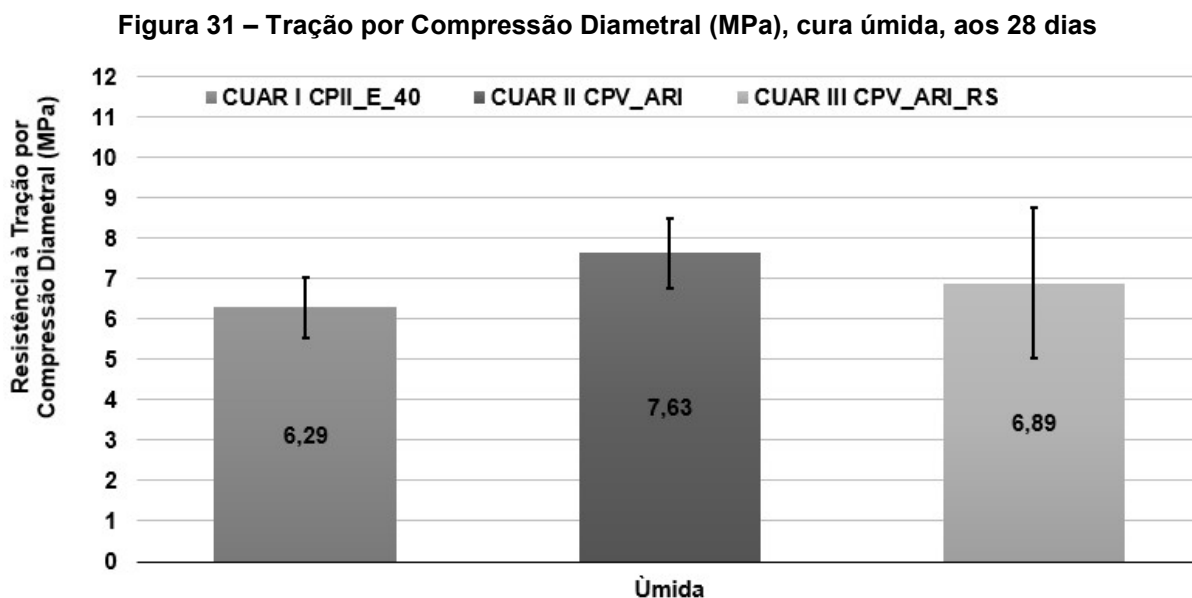


Fonte: Resultados do ensaio.

Os módulos de elasticidade para a cura térmica não demonstraram diferenças significativas entre os CUAR, considerando os desvios padrão, mas apresentaram redução perante a cura úmida.

4.2.4 Tração por Compressão Diametral

Os resultados para a tração por compressão diametral, aos 28 dias, estão apresentados na figura 31 para a cura úmida.

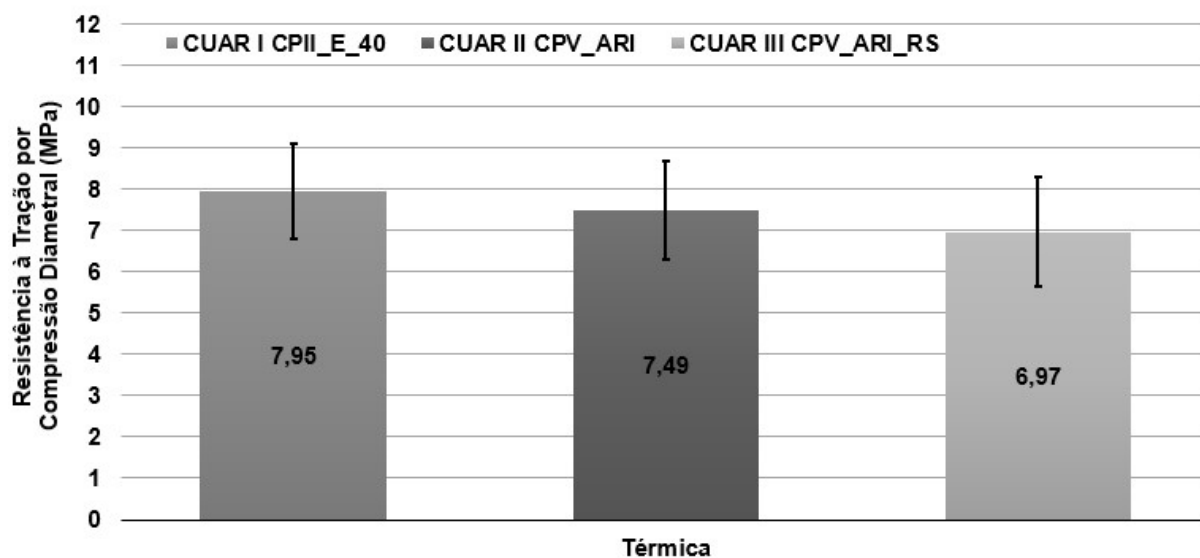


Fonte: Resultados do ensaio.

Os desvios padrão são consideráveis para estes resultados, como era esperado para este autor, pois esta técnica apresenta uma maior dispersão dos resultados. Sendo assim, não apresentam diferenças consideráveis nesta análise. Na análise do percentual da resistência à tração por compressão diametral em relação à compressão axial foram encontrados os valores de 3,7%, 4,3% e 4,5% para CUAR I CP II E 40, CUAR II CP V ARI e CUAR III CP V ARI RS, respectivamente. Resultados encontrados por (YI *et al.*, 2012) atingiram 4,5% da resistência à compressão para CUAR em cura úmida.

Os resultados para a tração por compressão diametral, aos 28 dias, estão apresentados na figura 32 para a cura térmica.

Figura 32 – Tração por Compressão Diametral (MPa), cura térmica, aos 28 dias



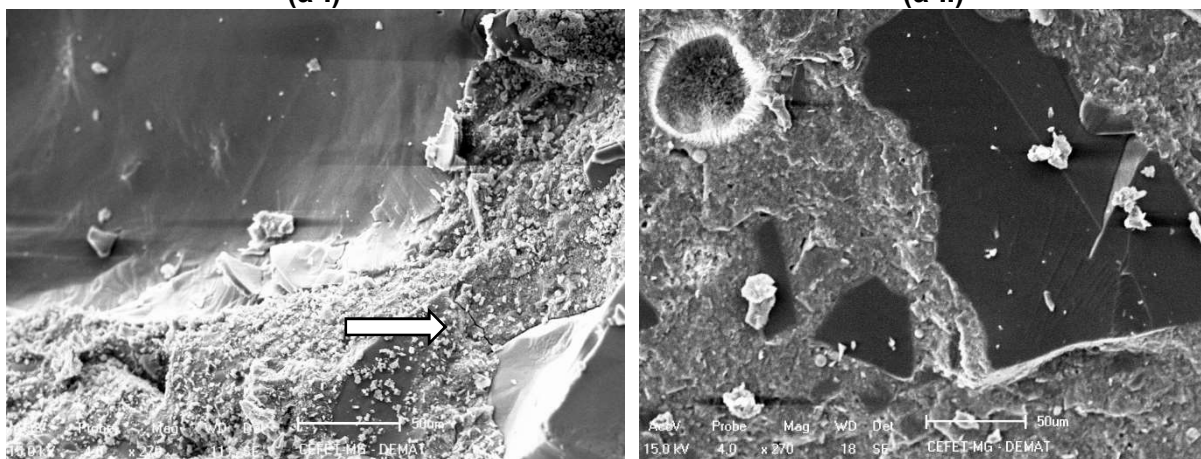
Fonte: Resultados do ensaio.

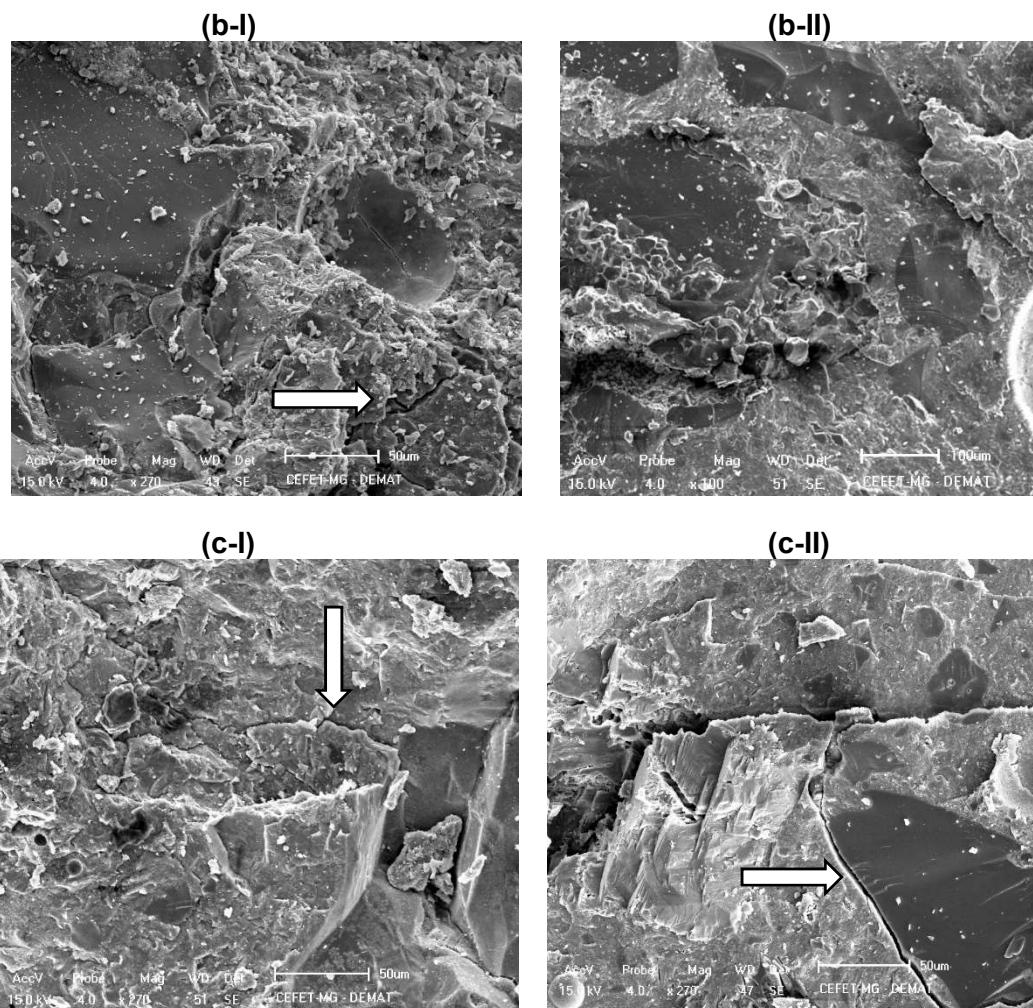
Apesar de apresentar médias diferentes da cura úmida, os resultados obtidos, considerando o desvio padrão, estão semelhantes, não apresentando diferenças significantes nesta análise.

4.2.5 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) do CUAR

As imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) dos CUAR estão apresentadas na figura 33, tanto para cura úmida e térmica. As imagens foram efetuadas com partes dos CPs rompidos aos 28 dias à compressão axial. É possível perceber algumas fissuras na pasta entre o que se acredita ser agregados (areia natural ou pó de quartzo), em alguns casos, assinalados com seta.

Figura 33 – Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), 270x, escala 50 μ m, dos CUAR: I CP II E 40 (a), II CP V ARI (b) e III CP V ARI RS (c), cura úmida (I) e térmica (II), (a-I)





Fonte: Resultados dos ensaios.

É possível perceber pela micrografia apresentada ausência de zona de transição entre o que se acredita ser o agregado e a pasta de cimento, além também, da característica densa do material. Oertel *et al.* (2014) também encontrou um material denso no CUAR em sua pesquisa.

5. CONCLUSÕES

5.1 Considerações Finais

A busca por resistências à compressão axial acima de 150 MPa torna-se possível com utilização de algumas técnicas avaliadas neste trabalho, como por exemplo, a utilização de materiais cimentícios suplementares, ou pozolânicos, empacotamento de partículas, curas úmida e térmica, superplastificantes com dosagens eficazes, boa trabalhabilidade e utilização de materiais locais com características que atendem as boas práticas no desenvolvimento de Concretos de Ultra-Alta Resistência (CUAR).

As ferramentas propostas por Mehta (2009) para reduzir a emissão de CO₂ na atmosfera pela indústria cimentícia são cumpridas com uso do CUAR. Nesta pesquisa é

possível observar que o CUAR I CP II E 40, um cimento Portland composto, alcançou resistências consideráveis. O CUAR permite o consumo de menos concreto para novas estruturas, devido à ultra-alta resistência, promove menor consumo proporcional de cimento para o alcance dessas resistências e, no caso do cimento Portland composto, apresentou a possibilidade de consumir menos clínquer para produção de cimento Portland.

A sílica ativa e o pó de quartzo, subprodutos da indústria de produção do silício metálico demonstraram sinergia na produção de Concretos de Ultra-Alta Resistência, assim como as areias quartzosas naturais, confirmando que o uso de materiais disponíveis localmente no Norte de Minas Gerais pode promover tecnologia de ponta no desenvolvimento de materiais e estruturas.

A caracterização físico-química dos materiais componentes do CUAR foi determinante para uma dosagem baseada no modelo de empacotamento de partículas Andreassen Modificado. A sílica ativa apresentou estrutura interna não cristalina, um dos fatores que sugerem a alta reatividade do material, confirmados pelo alto teor de SiO_2 no ensaio químico e uma boa atividade pozzolânica pelo ensaio de Chapelle Modificado, além de granulometria capaz de compor adequadamente a faixa em que estava inserida. O pó de quartzo, além de apresentar a composição química condizente com as análises do fornecedor, também apresentou granulometria capaz de compor uma faixa granulométrica antes deficiente.

A produção do CUAR contou com várias tentativas, principalmente para se determinar e compreender o comportamento entre os materiais e a relação entre o superplastificante, água e materiais constituintes, a fim de obter uma mistura trabalhável, coesa e capaz de adensar de maneira a não propiciar exsudação nem desagregação dos materiais. Os ensaios de índice de consistência apresentaram resultados superiores a 235 mm em todas misturas, sendo os valores abaixo de 230mm, prejudiciais para trabalhabilidade e adensamento nesse trabalho.

Os resultados obtidos para a resistência à compressão axial foram satisfatórios pois superaram os 150 MPa sugeridos para Concretos de Ultra-Alta Resistência. O comportamento diferenciado de cada material cimentício foi observado perante suas características mecânicas de resistência à compressão axial, como por exemplo, o CUAR II CP V ARI propiciou em números absolutos maiores resistências características, sendo 172 MPa para cura úmida e 200 MPa para cura térmica; o CP II E 40 se demonstrou um cimento Portland bastante eficaz, pois apresentou desempenho mecânico superior no CUAR I CP II E 40 perante a pasta de cimento; e o CUAR III CP V ARI RS, em relação aos incrementos de resistência, destacou-se por apresentar maiores percentuais, sendo 81% aos quatro dias para cura úmida e 171% para cura térmica, em relação ao primeiro dia.

O processo de cura influenciou diretamente no ganho de resistência inicial, com incrementos que variaram de 35% a 53% aos quatro dias e de 18% a 23% aos 28 dias em comparação com a cura úmida.

Sendo assim, os materiais disponíveis na região do Norte de Minas Gerais foram capazes de compor de forma adequada o desenvolvimento de Concretos de Ultra-Alta Resistência, variando o tipo de cura e os tipos de cimentos, proporcionando correlações interessantes do ponto de vista da resistência à compressão axial.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Sugere-se uma caracterização da sílica ativa utilizando métodos de análise térmica como a termogravimetria, por exemplo. Esse método poderia analisar quantitativamente a reatividade e o potencial pozolânico da adição mineral. Além disso, também é indicada para trabalhos futuros a variação da curva do método de empacotamento Andreassen Modificado, a fim de compreender os resultados das propriedades do CUAR no estado fresco e endurecido.

Também é sugerido que se investigue o processo de hidratação do cimento em uma microestrutura tão densa como é a do CUAR, principalmente em idades iniciais e mais avançadas. É preciso entender melhor os mecanismos de reação das pozolanas com o hidróxido de cálcio liberado tardiamente no processo de hidratação, aumentando a resistência do concreto. Essas informações podem auxiliar uma avaliação em estruturas pré-moldadas e protendidas, em que este material é promissor, analisando também a ductilidade e retração.

Para um melhor entendimento da influência dos materiais na durabilidade do CUAR e corroborar os resultados apresentados neste estudo, sugere-se que sejam realizados em trabalhos futuros ensaios de carbonatação acelerada e porosidade por intrusão de mercúrio. Sugere-se ainda a utilização conjunta de mais de uma adição mineral, como por exemplo a cinza de casca de arroz (CCA) (predominante na região sul) e a CBC cinza do bagaço de cana-de-açúcar (predominante na região nordeste), com a intenção de otimizar a substituição do cimento Portland pelos resíduos disponíveis localmente em cada região.

Como sugestão final, indica-se a análise do CIA (Custo Impacto Ambiental) do CUAR, inserindo fibras, variando o consumo de cimento Portland e pressão ainda fresco em molde, a fim de compreender os efeitos sustentáveis e desempenho que este material pode proporcionar.

6. REFERÊNCIAS

ABBAS, S.; NEHDI, M. L.; SALEEM, M. A. Ultra-High Performance Concrete: Mechanical Performance, Durability, Sustainability and Implementation Challenges. **International Journal of Concrete Structures and Materials**, 2016. v. 10, n. 3, p. 271–295.

AÏTCIN, P. C. **Concreto de alto desempenho**. São Paulo: Pini, 2000.

ALSALMAN, A.; DANG, C. N.; MICAH HALE, W. Development of ultra-high performance concrete with locally available materials. **Construction and Building Materials**, 2017a. v. 133, p. 135–145.

_____.; DANG, C. N.; MICAH HALE, W. Development of ultra-high performance concrete with locally available materials. **Construction and Building Materials**, 15 fev. 2017b. v. 133, p. 135–145. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061816319468>>.

AMANJEAN, E. N. P. **Développement de bétons fibrés ultra performants pour la réalisation d'éléments de structure préfabriqués**. Matériaux composites et construction: Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2015.

ANDREASEN, A. H. M.; ANDERSEN, J. Ueber die Beziehung zwischen Kornabstufung und Zwischenraum in Produkten aus losen Körnern (mit einigen Experimenten). **Kolloid-Zeitschrift**, 1930. v. 50, n. 3, p. 217–228.

AREL, H. Ş. Effects of curing type, silica fume fineness, and fiber length on the mechanical properties and impact resistance of UHPFRC. **Results in Physics**, 2016. v. 6, p. 664–674.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11578 – Cimento Portland Composto – Especificação**. São Paulo: ABNT, 1991a.

_____. **NBR 5735 - Cimento Portland -Cimento Portland de alto-forno - Especificação**. Rio de Janeiro: ABNT, 1991b.

_____. **NBR 5733 - Cimento Portland de alta resistência inicial**. [S.l.]: Rio de Janeiro, 1991c.

_____. **NBR NM 248 - Agregados - Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

_____. **NBR 5739 - Concreto: ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.

_____. **NBR 15895 – Materiais pozolânicos – Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado – Método Chapelle Modificado**. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

_____. **NBR 11768 - Aditivo para concreto de cimento Portland**. Rio de Janeiro: ABNT, 2011a.

_____. **NBR 7222 - Argamassa e concreto: determinação de resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2011b.

_____. **NBR 6118 - Projeto de Estruturas de Concreto - Procedimento**. Rio de Janeiro: ABNT, 2014a.

- _____. **NBR 12653 - Materiais pozolânicos — Requisitos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2014b.
- _____. **NBR 13276 - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência**. Rio de Janeiro: ABNT, 2016a.
- _____. **NBR NM 7500-1 - Materiais metálicos - Calibração e verificação de máquinas de ensaio estático uniaxial - Parte 1: Máquinas de ensaio de tração/ compressão - Calibração e verificação do sistema de medição da força**. Rio de Janeiro: ABNT, 2016b.
- _____. **NBR 8522 - Concreto -determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação e da curva tensão e deformação**. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.
- BIZ, C. E. **Concreto de Pós Reativos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2001.
- BOROSNYOI, A. Development of compressive strength of HPC with the use of supplementary cementing material (SCM) combination. **Építőanyag (Online)**, 2015. n. 3, p. 110.
- BRASIL, S. De G. M. M. E T. **Anuário Estatístico: Setor Metalúrgico, Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral, 1995 – Brasília: SGM, 2015. ISSN 2358.7687**. Ministério de Minas e Energia. Disponível em: <www.mme.gov.br>.
- CHEYREZY, M. Structural applications of RPC. **Concrete**, 1999. v. 33, n. 1, p. 20–23.
- CONCRETE, E. Environmental impact-Cement production and the CO2 challenge. **Canada: Ecosmart Foundation**, Vancouver, 2017. Disponível em: <http://ecosmartconcrete.com/>. Acesso em: 17 abr. 2018.
- CREMONINI, R. A. *et al.* Desenvolvimento de um Método de Dosagem de Concretos de Alta Resistência com Baixo Consumo de Cimento. **40º Congresso Brasileiro do Concreto**, 1998. n. April, p. 1–16.
- DAL MOLIN, D. C. C. **Adições minerais para concreto estrutural**. V1. ed. São Paulo: IBRACON, 2005.
- DINGER, D. R.; FUNK, J. E. Particle-packing phenomena and their application in materials processing. **MRS Bulletin**, 1997. v. 22, n. 12, p. 19–23. Disponível em: <citelike-article-id:11883351>.
- DUCTAL®. Innovative UHPC Solution. [S.l.], 2018. Disponível em: <https://www.ductal.com/en>. Acesso em: 17 abr. 2018.
- DUGAT, J.; ROUX, N.; BERNIER, G. Mechanical properties of reactive powder concretes. **Materials and Structures**, 1996. v. 29, n. 4, p. 233–240. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/BF02485945>.
- ELKEM S/A. **EMMA - Elkem Material Mix Analyzer - Version 3.5.2 - Aplicativo - 2012**.
- FEAM. **Levantamento da Situação ambiental e Energética do Setor de Ferroligas e Silício Metálico no Estado de Minas Gerais, Prospecção de Ações para o Desenvolvimento Sustentável da Atividade**. Belo Horizonte: Fundação Estadual do Meio Ambiente, 2010.
- GRAYBEAL, B.; HARTMANN, J. L. Ultra-high performance concrete material properties. **Transportation Research Board Conference**, 2003. v. 14.

HOLLAND, T. C. Silica Fume User's Manual. **FHWA - IF-05 - 016**, 2005. p. 194. Disponível em: <<http://www.chinamicrosilica.com/news/212.html>>.

HOPPE FILHO, J. *et al.* Atividade pozzolânica de adições minerais para cimento portland (Parte ii): índice de atividade pozzolânica com cimento portland (IAP), difração de raios-x (DRX) e termogravimetria (TG/DTG). **Revista Materia**, 2017. v. 22, n. 3.

HOPPE FILHO, J. *et al.* Atividade pozzolânica de adições minerais para cimento Portland (Parte I): Índice de atividade pozzolânica (IAP) com cal, difração de raios-X (DRX), termogravimetria (TG/DTG) e Chapelle modificado. **Revista Materia**, 2017. v. 22, n. 3.

JUSTS, J. *et al.* ULTRA HIGH PERFORMANCE CONCRETE HARDENING UNDER PRESSURE. **3rd International Conference CIVIL ENGINEERING`11 Proceedings**, 2011. n. 3, p. 38–43. Disponível em: <<http://www.upress.uni-kassel.de/katalog/abstract.php?978-3-89958-376-2>>.

JUSTS, J.; SHAKHMENKO, G. Effect of mix proportions and curing regimes on ultra high performance concrete. **8th fib PhD Symposium**, 2010. n. January, p. 20–25.

JUSTS, J.; SHAKHMENKO, G.; BAJARE, D. Effect of different mix compositions and curing regimes on ultra high performance concrete compressive strength. Riga Technical University, Kalku str. 1, Riga, Latvia: **10th International Conference Modern Building Materials, Structures and Techniques**, 2010. p. 112–116.

KAUARK, F. Da S.; MANHÃES, F. C.; MEDEIROS, C. H. **Metodologia da pesquisa: um guia prático**. Itabuna - BA: Via Litterarum: Via Litterarum, 2010.

KHALOO, A. R. *et al.* A New Mixture Design Method for Ultra-High-Strength Concrete. Farmington Hills: **ACI Materials Journal**, 2017. v. 114, n. 2, p. 215–224. Disponível em: <<https://search.proquest.com/docview/1881971788?accountid=26629>>.

KRUGER, P. Von. **Relatório Técnico 60- PERFIL FERROLIGAS**. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2009.

KUMAR, S.; SANTHANAM, M. Particle packing theories and their application in concrete mixture proportioning: A review. **Indian concrete journal**, 2003. v. 77, n. 9, p. 1324–1331.

KUSHARTOMO, W.; BALI, I.; SULAIMAN, B. Mechanical behavior of reactive powder concrete with glass powder substitute. **Procedia Engineering**, 2015. v. 125, p. 617–622. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2015.11.082>>.

LACERDA, C. S.; HELENE, P. **Estudo da Influência da Substituição de Cimento Portland por Metacaulim em Concretos**. São Paulo: Boletim Técnico - EPUSP, 2005. Disponível em: <http://www2.pcc.usp.br/files/text/publications/BT_00419.pdf>.

LARRARD, F. DE; SEDRAN, T. Optimization of ultra-high-performance concrete by the use of a packing model. **Cement and Concrete Research**, 1994. v. 24, n. 6, p. 997–1009.

LEE, N. P.; CHISHOLM, D. H. **Reactive powder concrete**. Study Report SR 146: BRANZ Ltd, Judgeford, New Zeland., 2005.

LOTENBACH, B.; SCRIVENER, K.; HOOTON, R. D. Supplementary cementitious materials. **Cement and Concrete Research**, 2011. v. 41, n. 12, p. 1244–1256. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.12.001>>.

MA, J. *et al.* Comparative investigations on ultra-high performance concrete with and without

coarse aggregates. **Proceedings of international symposium on ultra high performance concrete, Germany**, 2004. p. 205–212.

_____; SCHNEIDER, H. Properties of ultra-high-performance concrete. **Leipzig Annual Civil Engineering Report (LACER)**, 2002. v. 7, p. 25–32.

MANGULKAR, M. N.; JAMKAR, S. S. Review of Particle Packing Theories Used For Concrete Mix Proportioning. **Contributory Papers**, 2013. v. 141, n. 5, p. 143–148.

MARTINS, V. Da C.; MELO, K. A. De; REPETTE, W. L. Estudo de compatibilidade entre cimento e aditivo redutor de água. **Ambiente Construído**, 2009. v. 9, p. 45–56. Disponível em: <<http://www.seer.ufrgs.br/index.php/ambienteconstruido/article/view/8366/5081>>.

MAZANEC, O.; LOWKE, D.; SCHIEL, P. Mixing of high performance concrete: Effect of concrete composition and mixing intensity on mixing time. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, 2010. v. 43, n. 3, p. 357–365.

MEHTA, P. K. Global Concrete Industry Sustainability. **Concrete international**, 2009. n. February, p. 45–48.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Ibracon, 2008.

MIR, A. EL; NEHME, S. G.; NEHME, K. In situ application of high and ultra high strength concrete. **Építőanyag (Online)**, 2016. v. 68, n. 1, p. 20–23. Disponível em: <https://search.proquest.com/docview/1768945251?accountid=26629%0Ahttp://link.periodicos.capes.gov.br/sfxlcl41?url_ver=Z39.88-2004&rft_val_fmt=info:ofi/fmt:kev:mtx:journal&genre=article&sid=ProQ:ProQ%3Atechnology1&atitle=In+situ+application+of+high+and+ult>.

MORANVILLE-REGOURD, M. Microstructure of high performance concrete in. **High performance concrete, from material to structure**, 1992. p. 3–13.

MORI, V.; SANTOS, R. L. C. Dos; SOBRAL, L. G. S. **Metalurgia do silício: processos de obtenção e impactos ambientais**. Série Tecnologia Mineral, 41: CETEM/MCT, Rio de Janeiro, Brasil, 2007.

MYHRE, B.; HUNDERE, A. M. **The use of particle size distribution in development of refractory castables**. In: XXV ALAFAR CONGRESS, Anais... San Carlos de Bariloche, Argentina.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 5ª ed. Porto Alegre: Bookman Editora, 2015.

OERTEL, T. *et al.* Influence of amorphous silica on the hydration in ultra-high performance concrete. **Cement and Concrete Research**, abr. 2014. v. 58, p. 121–130. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884614000076>>.

PLANK, J. *et al.* Effectiveness of polycarboxylate superplasticizers in ultra-high strength concrete: The importance of PCE compatibility with silica fume. Department of Construction Chemicals, Technische Universität München, Germany: **Journal of Advanced Concrete Technology**, 2009. v. 7, n. 1, p. 5–12. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.3151/jact.7.5>>.

QUARCIONI, V. A. *et al.* Indirect and direct Chapelle's methods for the determination of lime consumption in pozzolanic materials. **IBRACON Structures and Materials Journal**, 2015. v. 8, n. 1, p. 1–7. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S1983-41952015000100002>>.

RANADE, R. *et al.* Composite Properties of High-Strength , High-Ductility Concrete. **ACI Materials Journal**, 2013. n. 110, p. 413–422.

RAVERDY, M. *et al.* Appréciation de l'activité pouzzolanique de constituents secondaires. **Proceedings of 7e congrés international de la chimie des ciments, Paris, France**, 1980. p. 6–41.

RESPLENDINO, J. **Les Bétons Fibrés Ultra Performants BFUP - Perspectives offertes vis-à-vis de la pérennité et la maintenance des ouvrages**. Toulouse: In: Colloques sur lès Ouvrages d'Art, 2006.

RICHARD, P.; CHEYREZY, M. Composition of reactive powder concretes. **Cement and Concrete Research**, out. 1995. v. 25, n. 7, p. 1501–1511. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0008884695001442>>.

_____; CHEYREZY, M. H. Reactive powder concretes with high ductility and 200-800 MPa compressive strength. **Special Publication**, 1994. v. 144, p. 507–518.

SCHRÖFL, C.; GRUBER, M.; PLANK, J. Preferential adsorption of polycarboxylate superplasticizers on cement and silica fume in ultra-high performance concrete (UHPC). **Cement and Concrete Research**, 2012. v. 42, n. 11, p. 1401–1408.

SHI, C. *et al.* The hydration and microstructure of ultra high-strength concrete with cement-silica fume-slag binder. **Cement and Concrete Composites**, 2015. v. 61, p. 44–52. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.04.013>>.

SILVA, R. Do N. **Um estudo sobre o concreto de alto desempenho**. Feira de Santana: Universidade Estadual de Feira de Santana, 2010.

ŠPAK, M. *et al.* Comparison of Conventional and Advanced Concrete Technologies in terms of Construction Efficiency. **Advances in Materials Science and Engineering**, 2016. v. 2016.

SUZUKI, M.; SEDDIK MEDDAH, M.; SATO, R. Use of porous ceramic waste aggregates for internal curing of high-performance concrete. **Cement and Concrete Research**, 2009. v. 39, n. 5, p. 373–381. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.01.007>>.

TUTIKIAN, B. F.; ISAIA, G. C.; HELENE, P. Concreto de Alto e Ultra-Alto Desempenho. **Concreto: Ciência e Tecnologia**, 2011. n. 1990, p. 1283–1326.

VANDERLEI, R. D. **Análise experimental do concreto de pós reativos: dosagem e propriedades mecânicas**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2004.

VANDERLEI, R. D.; GIONGO, J. S. **Análise experimental do concreto de pós reativos: dosagem e propriedades mecânicas**. **Cadernos de Engenharia de Estruturas**, 2006. v. 8, n. 33, p. 115–148. Disponível em: <http://www.set.eesc.usp.br/cadernos/pdf/cee33_115.pdf>.

VELASCO, R. V. Concreto de alto desempenho reforçado com fibras de polipropileno e sisal submetido a altas temperaturas. **Rio de Janeiro: Dissertação de Mestrado, COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro**, 2002.

VERNET, C. P. Ultra-durable concretes: structure at the micro-and nanoscale. **MRS bulletin**, 2004. v. 29, n. 5, p. 324–327.

VIEIRA, F. P. *et al.* Durabilidade e resistência mecânica de concretos e argamassas com

adição de sílica ativa. **Workshop - Durabilidade das Construções.**, 1997. n. 1, p. 107–116.

VOO, Y. L.; FOSTER, S. J. Characteristics of ultra-high performance ‘ductile’ concrete and its impact on sustainable construction. **The IES Journal Part A: Civil & Structural Engineering**, ago. 2010. v. 3, n. 3, p. 168–187. Disponível em: <<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/19373260.2010.492588>>. Acesso em: 12 dez. 2017.

WILLE, K.; NAAMAN, A. E.; PARRA-MONTESINOS, G. J. Ultra-high performance Concrete with compressive strength exceeding 150 MPa (22 ksi): A simpler way. Department of Civil and Environmental Engineering, University of Connecticut, Storrs, CT, United States Civil and Environmental Engineering, University of Michigan, Ann Arbor, MI, United States: **ACI Materials Journal**, 2011. v. 108, n. 1, p. 46–54.

WU, Z.; SHI, C.; KHAYAT, K. H. Influence of silica fume content on microstructure development and bond to steel fiber in ultra-high strength cement-based materials (UHSC). **Cement and Concrete Composites**, 2016. v. 71, p. 97–109.

YI, N.-H. *et al.* Blast-resistant characteristics of ultra-high strength concrete and reactive powder concrete. **Construction and Building Materials**, 2012. v. 28, n. 1, p. 694–707.

ZANNI, H. *et al.* Investigation of hydration and pozzolanic reaction in reactive powder concrete (RPC) using ²⁹Si NMR. **Cement and Concrete Research**, 1996. v. 26, n. 1, p. 93–100.